



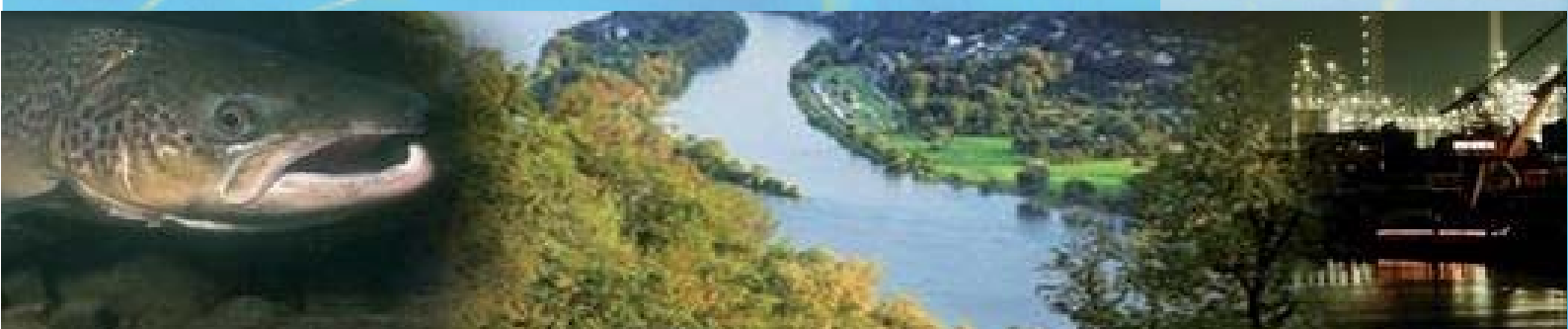
Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011

Internationale
Kommission zum
Schutz des Rheins

Commission
Internationale
pour la Protection
du Rhin

Internationale
Commissie ter
Bescherming
van de Rijn

Bericht Nr. 209



Impressum

Herausgeberin:

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Koblenz
Postfach 20 02 53, D 56002 Koblenz
Telefon +49-(0)261-94252-0, Fax +49-(0)261-94252-52
E-mail: sekretariat@iksr.de
www.iksr.org

© IKSR-CIPR-ICBR 2013
ISBN-Nr.: 3-941994-35-2

Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011

Zusammenfassung

Die bisherigen Untersuchungen zur langjährigen Entwicklung der Rheinwassertemperaturen belegen, dass die Wassertemperaturen deutlich mit der Entwicklung der Lufttemperaturen im Rheingebiet korreliert sind. Besondere klimatische Ereignisse, wie sie im Winter 1988/89, in den Sommern 2003 und 2006 oder im April 2007 aufgetreten sind, werden auch signifikant in den Wassertemperaturen abgebildet.

Die Auswertung der Zeitreihen von 1978 bis 2011 zeigt für diesen Zeitraum eine Temperaturerhöhung für Rekingen (Hochrhein) von 1,7 °C, für Mainz (Oberrhein) von 1,3 °C und für Koblenz (Mittelrhein) von 1,2 °C. Für die Sommermonate liegen die Werte durchweg deutlich über 2 °C. Dieser Trend ist jedoch nicht linear über den gesamten Zeitraum (1978-2011) ersichtlich, sondern resultiert im Wesentlichen aus einem Anstieg in den Jahren 1987-1989.

Regional begrenzt tragen Wärmeeinleitungen zur weiteren Erhöhung der Wassertemperatur bei. Rund 60 % der großen genehmigten Wärmeeinleitungen in den Rhein erfolgten bis 2010 auf einem kurzen Stück des Oberrheins zwischen Karlsruhe und Worms (IKSR-Bericht Nr. 151). Unter der Voraussetzung, dass alle Einleiter ihre genehmigten Kapazitäten gleichzeitig voll ausnutzen würden, können diese, bezogen auf den mittleren Abfluss bei Worms und nach vollständiger Einmischung, zu einer theoretischen Temperaturerhöhung von maximal 2,6 °C beitragen. Die tatsächlich messbare mittlere Temperaturerhöhung bei Mainz liegt dagegen bei rund 1,4°C (bezogen auf den langjährigen mittleren Abfluss MQ) und verringert sich weiter bis Koblenz auf rund 1 °C. Die Temperaturerhöhung bis Mainz ist im Wesentlichen auf die Wärmeeinleitungen im Großraum Mannheim/Ludwigshafen und Worms sowie zu einem geringen Anteil auf die natürliche Erwärmung im Laufe der Fließstrecke zurückzuführen.

Die großen Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel tragen aktuell zu einer geringen Entlastung der Wassertemperaturen des Rheins bei. Diese Entlastung liegt, auf mittlere Abflüsse und auf das gesamte Jahr bezogen, zwischen 0,1 °C für den Neckar und 0,2 °C für die Mosel. Die Entlastung liegt allerdings überwiegend in den Winter- und Herbstmonaten – in den Sommermonaten ist keine Entlastung durch die Nebenflüsse messbar.

Die Häufigkeitsanalyse für die Überschreitung bestimmter Temperaturschwellenwerte, wie z. B. 22 °C oder 25 °C, zeigt eine deutliche Zunahme der Anzahl der Tage pro Jahr im vergangenen Jahrzehnt im Vergleich zu den beiden Jahrzehnten vorher. Da die Geschwindigkeit biochemischer Prozesse temperaturabhängig ist, werden durch lang anhaltende Extremwerte der Wassertemperatur die Lebensprozesse aller aquatischen Organismen beeinflusst.

Durch die Stilllegung von vier Kernkraftwerksblöcken im Bereich des Oberrheins im März 2011 scheinen die Wärmeeinträge in den Rhein zwischen Karlsruhe und Worms um etwa die Hälfte reduziert worden zu sein. An der Messstelle Mainz konnte für das 2. Halbjahr 2011 auch ein entsprechender Rückgang der mittleren Temperaturerhöhung (im Vergleich zu Karlsruhe) auf die Hälfte festgestellt werden.

1. Einleitung

In den Jahren 2003 und 2006 wurden am Rhein neue Höchstwerte der Wassertemperatur mit Tagesmittelwerten zwischen 28 °C und 29 °C am Mittel- und Niederrhein gemessen. Aufgrund der schon vorher verstärkt eingesetzten Diskussion zu Klimaveränderungen haben im Oktober 2007 die für den Schutz des Rheins zuständigen Minister und Ministerinnen die IKSR beauftragt, sich vertieft mit den Auswirkungen von Klimaveränderungen auf das Rheingebiet zu befassen. In der Folge hat die IKSR in 2009 einen Bericht zum bisherigen Kenntnisstand (Literaturobwohlung) vorgelegt [IKSR 2009]. Weiter wurde bis 2011 eine Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins erstellt [IKSR 2011]. Im ersten Bericht wird auch auf den lückenhaften Kenntnisstand zur bisherigen Entwicklung und zur Prognose der Wassertemperaturen im Rheingebiet eingegangen. Dieser Bericht schließt diese Lücke anhand einer Beschreibung der langjährigen Temperaturentwicklung des Rheins.

Der hier vorliegende Bericht nutzt als Basis u. a. die Temperaturdaten aus einem Auftrag des Ständigen Ausschusses der Deutschen Kommission zur Reinhaltung des Rheins (heute: Flussgebietsgemeinschaft Rhein) im Jahr 2010 zur Erstellung einer gemeinsamen und plausibilisierten Datenbasis für Wassertemperaturdaten des Rheins, die im Rahmen einer Ad-hoc-Arbeitsgruppe zusammengeführt wurden.

Der Bericht referiert zunächst die bestehenden Wassertemperaturuntersuchungen im Rheingebiet. Danach wird auf die Datenbasis und insbesondere auf die Qualität der Temperaturzeitreihen eingegangen. Es schließen sich ein Überblick über die Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Rheins sowie statistische Aussagen wie Häufigkeitsanalyse von Extremwerten und langjährige und saisonale Trendanalysen an. Zuletzt wird der Einfluss von Nebenflüssen und von großen Wärmeeinleitern auf die Rheinwassertemperatur dargestellt und speziell auf die aktuelle Entwicklung im Jahr 2011 nach Abschaltung einiger Kernkraftwerksblöcke im Rheingebiet eingegangen.

Dieser Bericht beschreibt nur die Entwicklungen der Rheinwassertemperatur in der letzten 30 Jahren. Hohe Wassertemperaturen (Temperaturen über 25 °C) aber auch niedrige Wassertemperaturen (z.B. wenn die Wassertemperatur im vorangegangenen Winter längere Zeit unter 2°C lag) können Organismen beeinflussen und zu einer Artenverschiebung in den Fließgewässern führen. Mögliche Auswirkungen von Änderungen der Wassertemperatur auf die aquatische Lebensgemeinschaft werden in [IKSR 2013] beschrieben.

2. Bisherige Studien zur Temperatur des Rheinwassers

Die ersten systematischen Untersuchungen der Rheinwassertemperatur wurden für den Rhein bei Kehl dokumentiert. Für die Jahre 1850-1859 wurden aus drei Messungen pro Tag die 10-jährigen Monatsmittel mitgeteilt. Das daraus abgeleitete 10-Jahresmittel betrug 10,9 °Re (Réaumur-Skala, entspricht 13,6 °C). Weitere Ergebnisse mit einem 4-Jahresmittel von 10,8 bzw. 10,2 °Re (entspricht 13,5 und 12,8 °C) sind für den Rhein bei Freiburg und Speyer aus den Jahren 1889-1892 bekannt [Forstner 1894]. Damals wurden auch schon Tages- und Jahresganglinien aufgenommen und interpretiert und Vergleiche zum Einfluss der Lufttemperatur auf die Wassertemperatur angestellt.

Zusammenfassende Berichte über die Gewässertemperaturen in Mitteleuropa wurden von Wundt in den Jahren 1940 und 1967 veröffentlicht. In letztgenanntem Bericht werden auch sieben Rheinmessstellen und 14 Nebenflussmessstellen einbezogen. Die Mittel der Wassertemperaturen werden z. B. für den Rhein bei Maxau mit 11,8 °C (Zeitreihe 1951/60), bei Kaub mit 11,1 °C (Zeitreihe 1946/60) und bei Rees mit 11,2 °C (Zeitreihe 1951/60) angegeben. Die Werte stammen aus täglichen Einzelmessungen jeweils um 13 Uhr. Da das Tagesmittel erfahrungsgemäß etwa um 11 Uhr erreicht wird, sind diese Werte mit einem Korrekturfaktor von -0,5° belegt. Weiter werden in diesem Bericht die

Differenz zwischen Wasser- und Lufttemperatur sowie die Amplituden der Monatsmittel näher betrachtet. [Wundt 1940, 1967]

Nach dem 2. Weltkrieg wurden die Daten zur Wassertemperatur zunehmend an den Pegeln erfasst und in die gewässerkundlichen Jahrbücher aufgenommen. Im internationalen Rheinmessprogramm der IKSR, das 1953 begann, wurden anfangs die Wassertemperaturen vierzehntägig erfasst und später als 14-Tagesmittel aus kontinuierlicher Messung dargestellt (Jährliche Zahlentafeln der chemisch-physikalischen Messungen der IKSR).

Grundlegende Untersuchungen zur Einordnung der Wassertemperatur in hydrologische Prozesse und als Ergebnis eine Zunahme der Fließgewässertemperaturen in Europa von rund 1 °C im 20. Jahrhundert wurden von Webb vorgelegt [Webb 1996]. Eine Auswertung des Einflusses von Klimaveränderungen wird stark durch Wärmeeinleitungen, Verstädterung (Kläranlagen) und den Staustufenausbau erschwert [Webb 2008].

Nach den bereits erwähnten Jahren 2003 und 2006 mit Höchstwerten der Wassertemperatur gibt es bis heute zahlreiche Untersuchungen zur Temperaturentwicklung, die auch Teile des Rheingebiets betreffen. So wird in einem schweizerischen Bericht für den Rhein bei Basel über die letzten 50 Jahre eine Zunahme der Wassertemperatur von 2 °C festgestellt [BUWAL 2004]. In der Abb. 2-1 ist zudem die Entwicklung der Jahresmittelwerte bis 2012 an mehreren Rheinmessstellen im Schweizer Teil des Rheingebietes dargestellt.

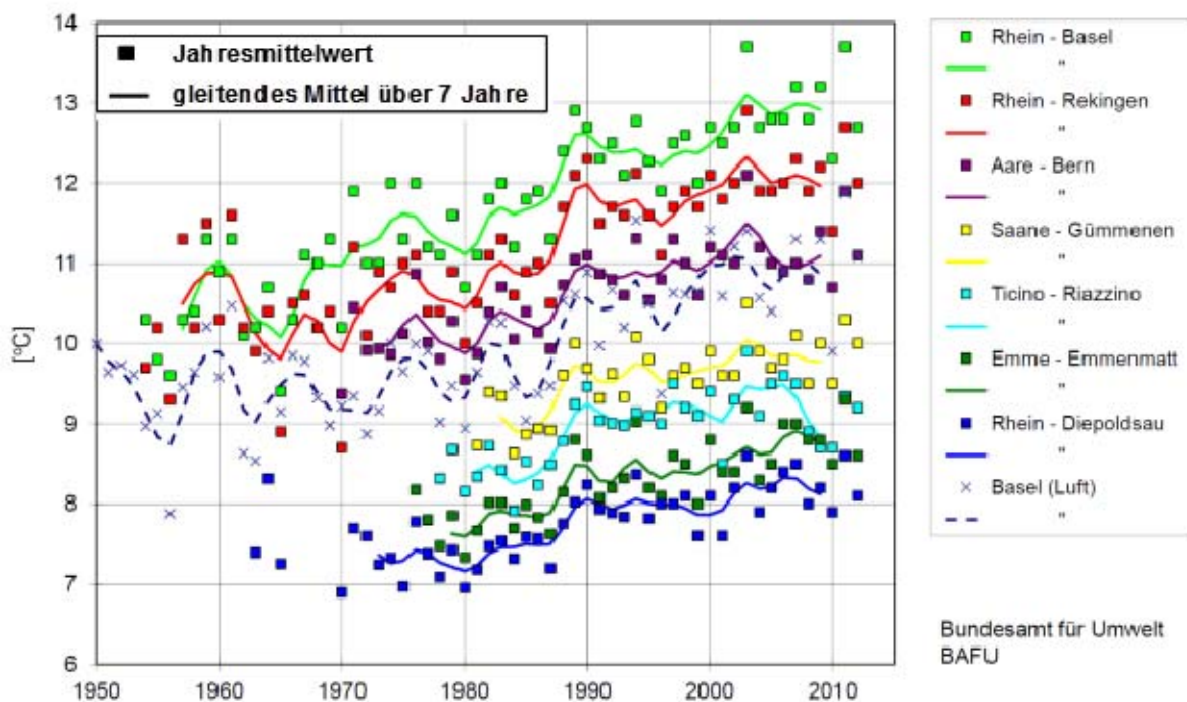


Abb. 2-1: Veränderung der Wassertemperatur (Quadrate = Jahresmittelwerte; Linien = gleitendes Mittel über 7 Jahre) an ausgewählten BWG-Messstationen von 1954-2012. Dargestellt ist zudem der Verlauf der Lufttemperatur in Basel (unterbrochene Linien).
Quelle: BAFU, Abt. Hydrologie, 05.03.2013

Für den Niederrhein bei Kleve-Bimmen wird eine Zunahme der mittleren Wassertemperatur des Rheins > 1 °C seit 1977 und eine Zunahme der Jahre mit maximalen Wassertemperaturen von über 25 °C festgestellt. Dabei wird der Temperaturanstieg mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Klimawandel zurückgeführt, da gleichzeitig die genehmigten Abwärmeeinleitungen am Rhein rückläufig waren [MUNLV 2009].

Auf Basis der Daten der Messstation Lobith wird eine Zunahme der Wassertemperatur im Rhein bei Lobith um mehr als 3 °C (Zeitraum 1908-2000) postuliert [Liefveld & Postma 2007].

Weitere Studien können genannt werden:

- Im Auftrag des Rijkswaterstaat Waterdienst der Niederlande hat Deltares eine aktuelle Studie zur Wassertemperaturentwicklung im niederländischen Einzugsgebiet der Maas unter dem Aspekt anthropogener Einflüsse und klimatischer Veränderungen erstellt [Deltares 2012]. Dieses Einzugsgebiet grenzt unmittelbar an das Niederrheingebiet, für das die Erkenntnisse somit teilweise auch gelten können.
- In einer Studie von Haag werden die möglichen Einflüsse des Klimawandels auf die Fließgewässertemperaturen erläutert und die bisherigen wissenschaftlichen Ergebnisse zur Wirkung des Klimawandels auf die Wassertemperaturen zusammengefasst [Haag 2009]. Es werden sowohl Untersuchungen zur historischen Entwicklung, als auch die Prognosen zur zukünftigen Entwicklung von Wassertemperaturen referiert.
- Ebenfalls 2009 erschien eine Studie des BUND zur Wärmelast Rhein [Lange 2009] mit umfangreichen Recherchen zu Wärmeeinleitungen und Kraftwerksplanungen am Rhein. Die Studie soll als Grundlage dienen, sich im Kontext der Bewirtschaftungspläne nach EU-Wasserrahmenrichtlinie und unter Berücksichtigung des Klimawandels kompetent mit den Folgen der geplanten Kraftwerke auseinanderzusetzen.

Die umfangreichsten Datenanalysen zu langjährigen Wassertemperaturzeitreihen wurden in den letzten Jahren von Greis und Strauch ausgeführt [Greis 2007], [Strauch 2011], [Greis et al 2011], wobei die wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkung thermischer Kraftwerke in Deutschland im Vordergrund stand. In diese Untersuchungen wurden auch große Teile des Rheingebiets mit einbezogen. Die Datenbasis ist für einige Messstationen identisch mit der Datenbasis für den vorliegenden Bericht. Weiter wurden signifikante Trends der Wassertemperaturen für ausgewählte Flüsse in Deutschland dargestellt und Auswirkungen des sich verändernden Abflussverhaltens diskutiert [Rothstein et al 2008].

3. Kontinuierliche Messung der Wassertemperatur

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts werden in den gewässerkundlichen Jahrbüchern für den Rhein nur tägliche Einzelmessungen (meistens der 12 Uhr Wert) berichtet.

Die kontinuierliche Messung der Wassertemperatur mittels Temperaturfühler (z. B. Pt100-Sensoren) und Aufzeichnung des Messsignals auf Messstreifen begann vor rund 50 Jahren. Erst seit etwa zwei Jahrzehnten werden die Messsignale direkt digital erfasst und gespeichert. Für einige Messstationen wurden die Messstreifen nachträglich nach Plausibilisierung digitalisiert, so dass für einen Zeitraum von 30-35 Jahren Tagesmittelwerte der Wassertemperatur zur Verfügung stehen.

Im Folgenden wird auf die Messtechnik der Temperaturmessung, den Umgang mit Datenlücken sowie den zeitlichen Umfang der zur Verfügung stehenden Datenbasis eingegangen. In diesem Bericht werden auch Temperaturdifferenzen grundsätzlich in °C und nicht – wie sonst in der Literatur üblich – in Kelvin angegeben.

3.1 Messtechnik

Zur Messtechnik gehören der Temperaturfühler, das Messgerät, die Datenübertragung und die Kontrolle. Die Messtechnik bezieht sich somit auch auf die Messanordnung im Gewässer und/oder in der Messstation.

Seit vielen Jahren werden an den Messstellen Pt100- oder NTC-Temperaturfühler verwendet. Deren Genauigkeit liegt (bei den üblichen Temperaturmessbereichen) zwischen 0,1 °C und 0,25 °C. Für die gesamte Messkette (Messgerät und Datenübertragung) wird auch eine Genauigkeit von 0,1 °C angegeben. Entscheidend ist, dass eine regelmäßige Wartung und Kalibrierung (z. B. monatlich) erfolgt. Die Genauigkeit der Temperaturmessung liegt damit zwischen 0,1 °C und 0,3 °C. Abweichungen bis 0,5 °C sind möglich, wenn Kalibrierintervalle nicht eingehalten werden.

Liegt der Messpunkt in der Messstation, muss der Einfluss der Rohrleitung bekannt sein, um die Datenqualität zu sichern.

3.2 Umgang mit Datenlücken und Homogenisierung der Zeitreihen

Für langjährige Trendbetrachtungen müssen äquidistante Zeitreihen ohne Datenlücken (Tagesmittelwerte) vorliegen. Dies ist durch lineare Interpolation (bei kleinen Lücken von 1-2 Tagen) oder besser durch grafischen Vergleich mit benachbarten Stationen möglich. Lückenwerte können auch mit einem bereits validierten Modell annähernd berechnet werden.

Wenn beispielsweise 3 % (11 Werte) der Tagesmittelwerte im Jahr an zwei benachbarten Stationen fehlen und die fehlenden Werte liegen bei einer Station im Sommer und bei der andern im Winter, dann können die Jahresmittel um 0,5-0,7 °C voneinander abweichen, obwohl tatsächlich der gleiche Jahresmittelwert für beide Stationen gilt. Pro Station kann die Abweichung 0,3-0,4 °C betragen.

Unter der Homogenisierung von Zeitreihen versteht man das Prüfen auf systematische Fehler, die z. B. durch Änderung der Messtechnik, durch Verlegung des Messpunktes oder Veränderung der Umgebungsbedingungen auftreten können. Diese können sich durch einen Versatz oder einen Trend bemerkbar machen, der aber der natürlichen Variabilität und dem Trend der Wassertemperatur überlagert ist. Das statistische Verfahren, insbesondere das des relativen Homogenitätstests mit Hilfe von Referenzzeitreihen, die aus benachbarten Vergleichszeitreihen gemittelt werden, ist bei Strauch [Strauch 2011] ausführlich beschrieben und auf Messreihen an Rhein, Neckar und Main angewandt worden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden lediglich visuelle Überprüfungen und Plausibilitätsbetrachtungen zwischen den Zeitreihen benachbarter Stationen durchgeführt.

3.3 Zeitlicher Umfang der Datenbasis

Für Zwecke der Verifizierung von Temperaturtrends wurden von den Messstellenbetreibern langjährige Messreihen auf Tagesmittelwertbasis (und teilweise auch auf Stundenbasis) zur Verfügung gestellt. Folgende Messreihen wurden in diesem Bericht verwendet:

Tab. 3.3-1: Übersicht über die WT-Zeitreihen (Tagesmittel aus kontinuierlicher Messung)

| WT-Messstellen | Fluss (km) | Zeitreihe WT | Quelle |
|-----------------------|-------------------|---------------------|---------------|
| Rekingen* | Rhein, km 90,7 | 1997-2011 | BAFU |
| Weil a. Rh.* | Rhein, km 174,0 | 1997-2011 | BAFU |
| Karlsruhe* | Rhein, km 359,2 | 1988-2011 | LUBW |
| BASF WW Süd | Rhein, km 426 | 1991-2011 | BASF |
| Mannheim | Neckar, km 3,0 | 2000-2010 | LUBW |
| Worms | Rhein, km 443,3 | 1996-2009 | LUWG |
| Bischofsheim | Main, km 4,0 | 2000-2010 | HLUG |
| Mainz | Rhein, km 498,5 | 1980-2011 | LUWG |
| Koblenz/Rh.* | Rhein, km 590,3 | 1978-2011 | BfG |
| Koblenz/Mosel* | Mosel, km 2,0 | 1978-2011 | BfG |
| Bad Honnef | Rhein, km 640,0 | 2004-2010 | LANUV |
| Düsseld.-Flehe | Rhein, km 732,2 | 2004-2010 | LANUV |
| Kleve-Bimmen* | Rhein, km 865,0 | 1995-2009 | LANUV |
| Lobith* | Rhein, km 862,3 | 2000-2010 | RWS |

* Internationale Messstellen des IKSR-Messprogramms

Zur Plausibilisierung und Füllen von Datenlücken wurden außerdem die kontinuierlichen WT-Daten der Pegelstationen Koblenz, Köln und Rees sowie die Daten der Messstationen Fankel/Mosel und Lahnstein/Lahn verwendet.

Weiterhin hat die BASF die Eingangstemperaturen des Wasserwerks Süd (Rhein-km 426) auf Stundenbasis (2000-2011) bzw. von 1991-1999 auf Tagesmittelwertbasis und von 1952-1990 auf Monatsmittelwertbasis zur Verfügung gestellt. Diese Datensätze sind insbesondere auch zur langjährigen Trendbetrachtung geeignet.

In der folgenden Abbildung 3.3-1 ist die Lage der Messstellen gemäß Tabelle 3.3-1 längs des Rheins dargestellt.

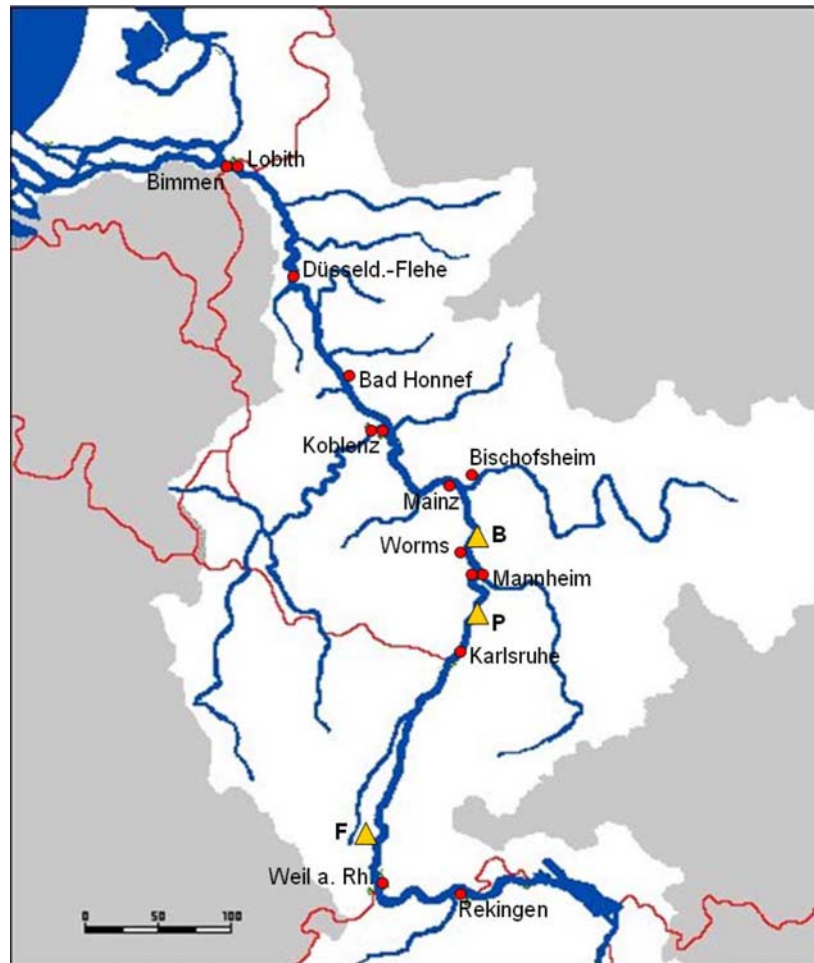


Abb. 3.3-1: Lage der Messstellen mit Wassertemperaturdaten (rote Punkte) als Datenbasis des Berichtes. (Standorte Kernkraftwerke (gelbe Dreiecke): F=Fessenheim, P=Philippsburg, B=Biblis)

4. Untersuchungen zur Repräsentativität der Temperaturdaten der Messstationen

Um die Temperaturentwicklung im Rheinverlauf zuverlässig abschätzen zu können, muss gewährleistet sein, dass die an den Messstationen ermittelten Wassertemperaturen auch repräsentativ für den Wasserkörper im Flussquerschnitt sind. An den Messstationen Weil a. Rhein, Worms und Mainz erfolgen die Messungen daher an mehreren Punkten im Querprofil (an Brückenpfeilern).

Für die Messstation Worms hat sich gezeigt, dass aufgrund großer Wärmeeinleiter oberhalb der Messstelle sowie der Einmündung des Neckars für etwa ein Drittel aller Tage eines Jahres die Temperaturdifferenz zwischen linkem und rechtem Ufer 1-2 °C beträgt.

Die Repräsentativität der Daten wird durch Vergleichsmessungen im Querprofil oder durch Vergleich der Ergebnisse mit benachbarten Messstationen gesichert.

Mit Hilfe der langjährigen Querprofilmessungen des Messschiffs BURGUND an neun Profilen von Rhein-km 355 (Neuburg) bis km 638 (Oberwinter) wurden für ausgewählte Messstationen die Temperaturdaten auf Repräsentativität geprüft.

Am Beispiel der Messstation Karlsruhe (km 359,2, rechtes Ufer) soll dies näher erläutert werden. Hier werden die Ergebnisse der BURGUND aus 4 Querprofilmessungen pro Jahr von 2003-2008 bei Rhein-km 355,4 mit den Stundenmittelwerten der Messstation zu

diesem Zeitpunkt (eine Querprofilfahrt dauert etwa 8-12 Minuten) verglichen. Die gemittelten Ergebnisse aus 21 Messungen in Tab. 4-1 zeigen:

- a) dass in diesem Rheinabschnitt die Temperaturverteilung im Querschnitt sehr einheitlich ist und die Messstation Karlsruhe daher repräsentative Daten liefert.
- b) dass die Abweichungen der beiden unabhängigen Messungen im Rahmen der Messgenauigkeit liegen, d. h. zum gleichen (richtigen) Wert führen.

Tab. 4-1: Rhein-WT an fünf Messpunkten; Messung mit BURGUND links, Mitte, rechts und Vergleich mit entspr. Stundenmittel aus Messstation (z. B. km 359,2 rechts)
N ist die Anzahl der realisierten Querprofile

| WT in °C | N | linkes Ufer | Mitte | rechtes Ufer |
|--|----|----------------|----------------|----------------|
| Oberwinter, km 638 Mittel 2003-2007 Station Bad Honnef, km 640 | 15 | 13,66 | 13,71 | 13,74 13,67 |
| Lahnstein, km 585 Mittel 2004-2008 Station Koblenz/Rh., km 590,3 | 20 | 14,18 14,24 | 14,21 | 14,20 |
| Mainz-Weisenau, km 496 Mittel 2004-2008 Station Mainz, km 498,5 | 19 | 14,62 14,68 | 14,76 | 14,82 |
| Ludwigshafen, km 424,6 Mittel 2004-2008 BASF WW Süd, km 426 | 20 | 13,33 | 13,55 13,58 | 13,96 |
| Neuburg, km 355,4 Mittel 2003-2008 Station Karlsruhe, km 359,2 | 21 | 13,73 | 13,69 | 13,68 13,80 |

An den weiteren vier Messpunkten gemäß Tabelle 4-1 gibt es ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung der Schiffsmessungen mit den Ergebnissen aus der Messstation am jeweiligen Ufer.

Über den Querschnitt einheitliche Wassertemperaturen liegen demnach auch bei den Messstationen Bad Honnef und Koblenz vor. Die Querprofilmessung bei Mainz erfolgte unmittelbar vor der Mainmündung. Die Messstation Mainz liegt 2,5 km unterhalb der Mainmündung und erfasst die Wassertemperatur an vier Messpunkten im Querprofil an Brückenpfeilern. Für diesen Bericht wurden nur die Tagesmittelwerte der Messpunkte 1 und 2, die näher am linken Ufer liegen verwendet, weil nur diese die Wassertemperatur des Rheins ohne den Maineinfluss abbilden (vgl. Kap. 5.6). Die Messpunkte im Querprofil bei Ludwigshafen sind, wie aus den Daten ersichtlich, am rechten Uferbereich durch Kraftwerkswärmeeinleitungen beeinflusst (siehe auch Kap. 5.7).

5. Analyse der Wassertemperaturzeitreihen

5.1 Steuergrößen der Fließgewässertemperatur

Eine ausführliche Beschreibung des physikalischen Hintergrunds der Komponenten des Wärmehaushalts findet man bei [Haag 2009] und [LAWA2012]. Deshalb wird hier nur kurz anhand der Abb. 5.1-1 auf die relevanten Faktoren eingegangen.

Die natürliche Wassertemperatur wird maßgeblich durch meteorologische Komponenten wie den Wärmeaustausch zwischen dem Gewässer und der Umgebung sowie dem Abfluss bestimmt.

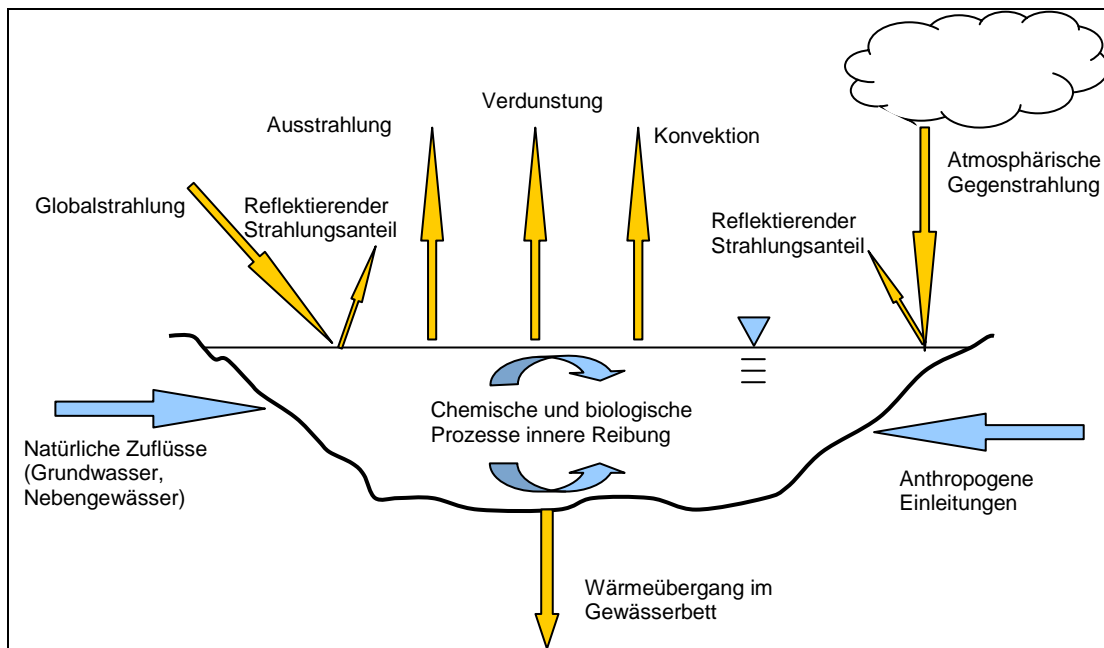


Abb. 5.1-1: Schematische Abbildung der für Fließgewässer relevanten Wärmeaustauschprozesse (nach LAWA 2012)

Die kurzwellige Strahlungsbilanz ergibt sich aus der eingehenden Globalstrahlung (direkte und diffuse Sonnenstrahlung) und dem der an der Gewässeroberfläche reflektierten Anteil (Albedo). Die langwellige Strahlungsbilanz resultiert aus der Wärmestrahlung der Atmosphäre sowie der Abstrahlung des Gewässers aufgrund seiner Eigentemperatur.

Die Verdunstung ist die für die Abkühlung des Gewässers wesentlichste Komponente der Wärmebilanz. Wenn der Dampfdruck an der Wasseroberfläche geringer ist als in der darüber liegenden Luftschicht, findet Kondensation statt.

Unter Konvektion versteht man den direkten Wärmeübergang zwischen Gewässeroberfläche und Luft. Die Größe ist abhängig von dem Temperaturgradienten zwischen Wasseroberfläche und der umgebenden Luft. Verdunstung und Konvektion werden stark von der Windgeschwindigkeit beeinflusst.

Im Quellbereich entsprechen die Wassertemperaturen denen des Grundwassers. Mit zunehmender Entfernung zur Quelle steigen in der Regel sowohl die mittlere Jahrestemperatur des Wassers als auch die Jahres- und Tagestemperaturamplituden [LAWA 2012, S. 47]. Speziell für den Hochrhein gilt hier die Besonderheit dass er ein Seeausfluss ist. In kalten Wintern fällt dann am Auslass des Bodensees die Wassertemperatur nur wenig unter 4 °C während in heißen Sommermonaten die Oberflächenwassertemperatur des Bodensees bestimmend wird.

5.2 Temperaturentwicklung im Längsverlauf des Rheins

Für einen ersten Überblick sind in Abb. 5.2-1 die Jahresmittel der Rheinwassertemperaturen der Jahre 2000 bis 2010 von der IKSR-Messstation Rekingen (vor der Aare-Mündung am Hochrhein) bis zur IKSR-Messstation Lobith (an der deutsch-niederländischen Grenze) dargestellt. Bezogen auf diesen Zeitraum und die Fließstrecke zwischen diesen beiden Stationen nimmt die Rheinwassertemperatur mit einem jährlichen Schwankungsbereich zwischen 1,5 °C (in 2003) und 2,3 °C (in 2008) im Mittel um knapp 2 °C zu. Zwischen den Stationen Rekingen und Karlsruhe sowie zwischen Karlsruhe und Mainz nimmt die Temperatur im Mittel entsprechend jeweils um rund 1,3 °C zu (im Mittel der letzten 20 Jahre liegt die Zunahme der Temperatur zwischen Karlsruhe und Mainz sogar bei 1,5 °C). Ein großer Teil dieser Temperaturdifferenz kann durch die großen Kühlwassereinleitungen auf der Strecke zwischen Karlsruhe und Worms sowie teilweise auch durch die natürliche Erwärmung auf dieser Fließstrecke (siehe unten) erklärt werden. Gemäß IKSR-Bestandsaufnahme der Wärmeeinleitungen finden rund 60 % der Wärmeeinträge in den Rhein auf dieser Strecke statt [IKSR 2006].

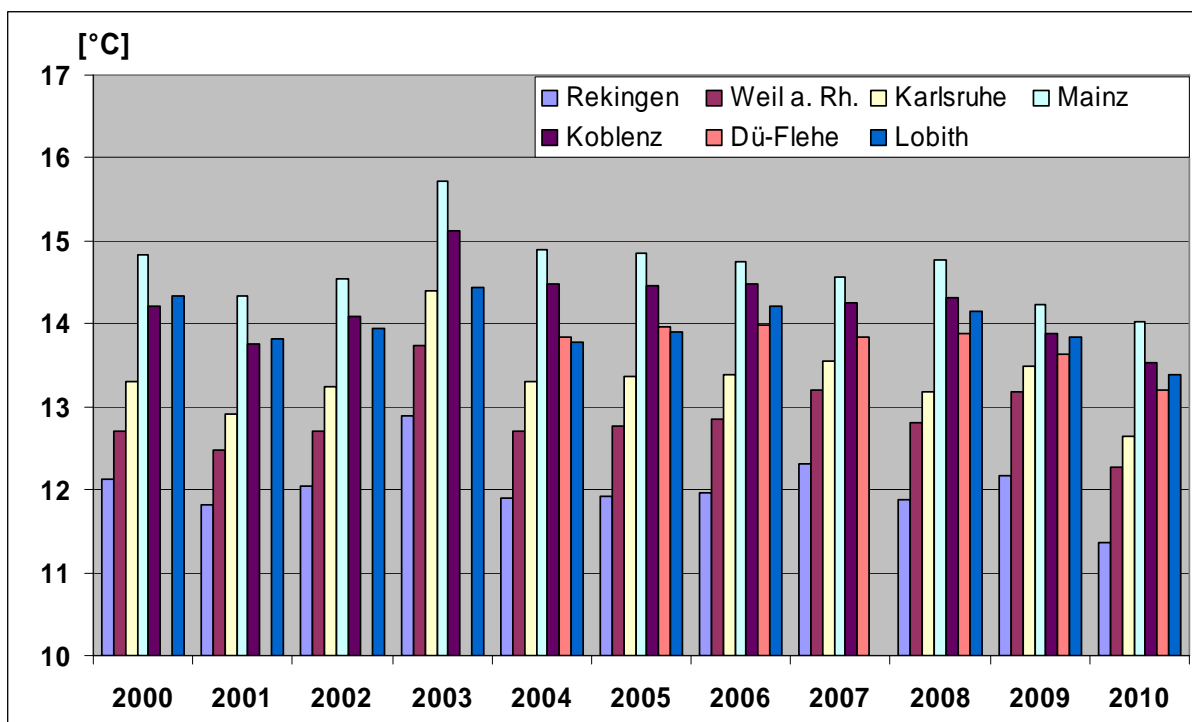


Abb. 5.2-1: Jahresmittelwerte der Rheinwassertemperatur an Messstationen entlang des Rheins

Bei Koblenz ist der Wert aber infolge der Abkühlungsprozesse und Anpassung an die Lufttemperatur im Mittel wieder um 0,4 °C niedriger. Im weiteren Verlauf bis Bad Honnef sinkt die Wassertemperatur weiter um etwa 0,3 bis 0,4 °C. Die weitere Abkühlung ist auch auf die Einmischung der Mosel und anderer kleiner Mittelgebirgsflüsse zurückzuführen. Diese Nebenflüsse haben z. B. im Winter eine bis zu 4 °C niedrigere Wassertemperatur als der Rhein. Die Temperaturen bei Bad Honnef, Köln, Düsseldorf-Flehe und Lobith liegen auf fast gleichem Niveau – in diesem Rheinabschnitt halten sich somit Wärmeeinträge und Abkühlungsprozesse die Waage.

Eine detailliertere Darstellung des Temperaturverlaufs zeigt Abb. 5.2-2 mit den Monatsmittelwerten der Temperaturdifferenz zwischen Mainz und Koblenz in den Jahren 2001-2011. Im Laufe eines Jahres ist die weitere Abkühlung des Rheinwassers zwischen Mainz und Koblenz sehr unterschiedlich ausgeprägt, wobei für wenige Monate im Frühjahr/Sommer sogar eine weitere Erwärmung auf der Fließstrecke stattfindet. Hier zeigt sich der beherrschende Einfluss der Strahlungskomponenten in der Wärmebilanz.

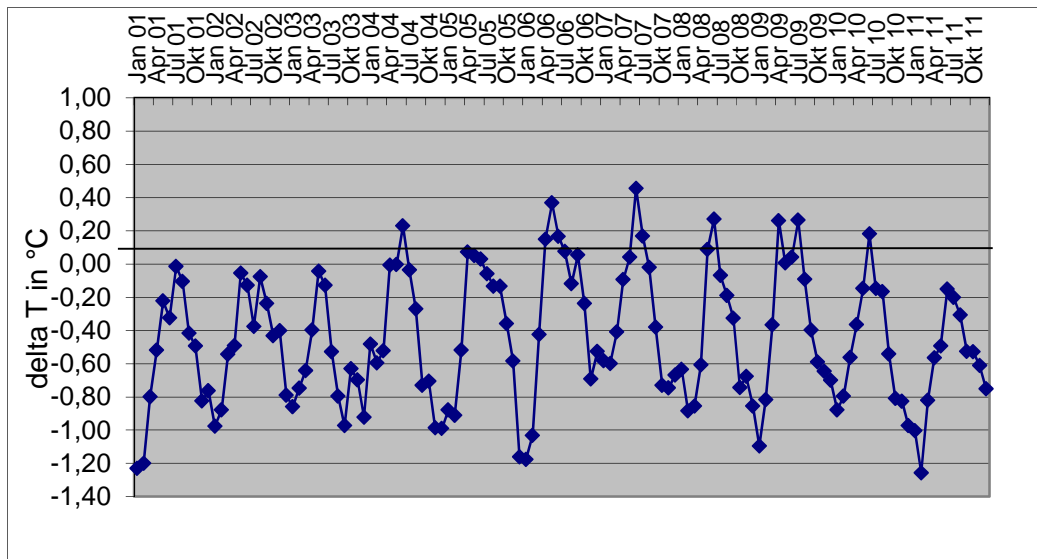


Abb. 5.2-2: Verlauf der Monatsmittelwerte der Temperaturdifferenz zwischen Mainz und Koblenz in den Jahren 2001-2011 ($\Delta T = T(\text{KO}) - T(\text{MZ})$)

In dem Rheinabschnitt zwischen Basel und Karlsruhe fließt der Rhein durch ein Gebiet mit den höchsten mittleren Lufttemperaturen des Rheingebiets. Die zahlreichen Stauhaltungen auf diesem Rheinabschnitt fördern zusätzlich den Temperaturexaustausch mit der Atmosphäre. Infolgedessen ist die Temperaturzunahme bis Karlsruhe nur in sehr geringem Maße durch direkte Wärmeleiter und wahrscheinlich überwiegend durch natürliche Prozesse bedingt, die ihrerseits aber wieder durch anthropogene Einflüsse verstärkt werden (siehe auch Kap. 5.7).

5.3 Häufigkeitsanalyse (Extremwerte)

Eine erste und robuste Auswertung von Temperaturzeitreihen erfolgt über eine Zählstatistik. Hierbei wird über einen Mehrjahreszeitraum die Anzahl der Tage ermittelt, die einen bestimmten Extremwert oder Schwellenwert über- oder unterschreiten. Am Beispiel der Abb. 5.3-1 ist in den beiden Jahren 2003 und 2006 eine deutliche Zunahme der Tage mit Wassertemperaturen über 22 °C und auch über 25 °C längs des Rheins bis Koblenz zu erkennen. Dagegen war im Jahr 2009 im gesamten Rheingebiet bis Lobith kein Tagesmittel der Wassertemperatur über 25 °C festgestellt worden.

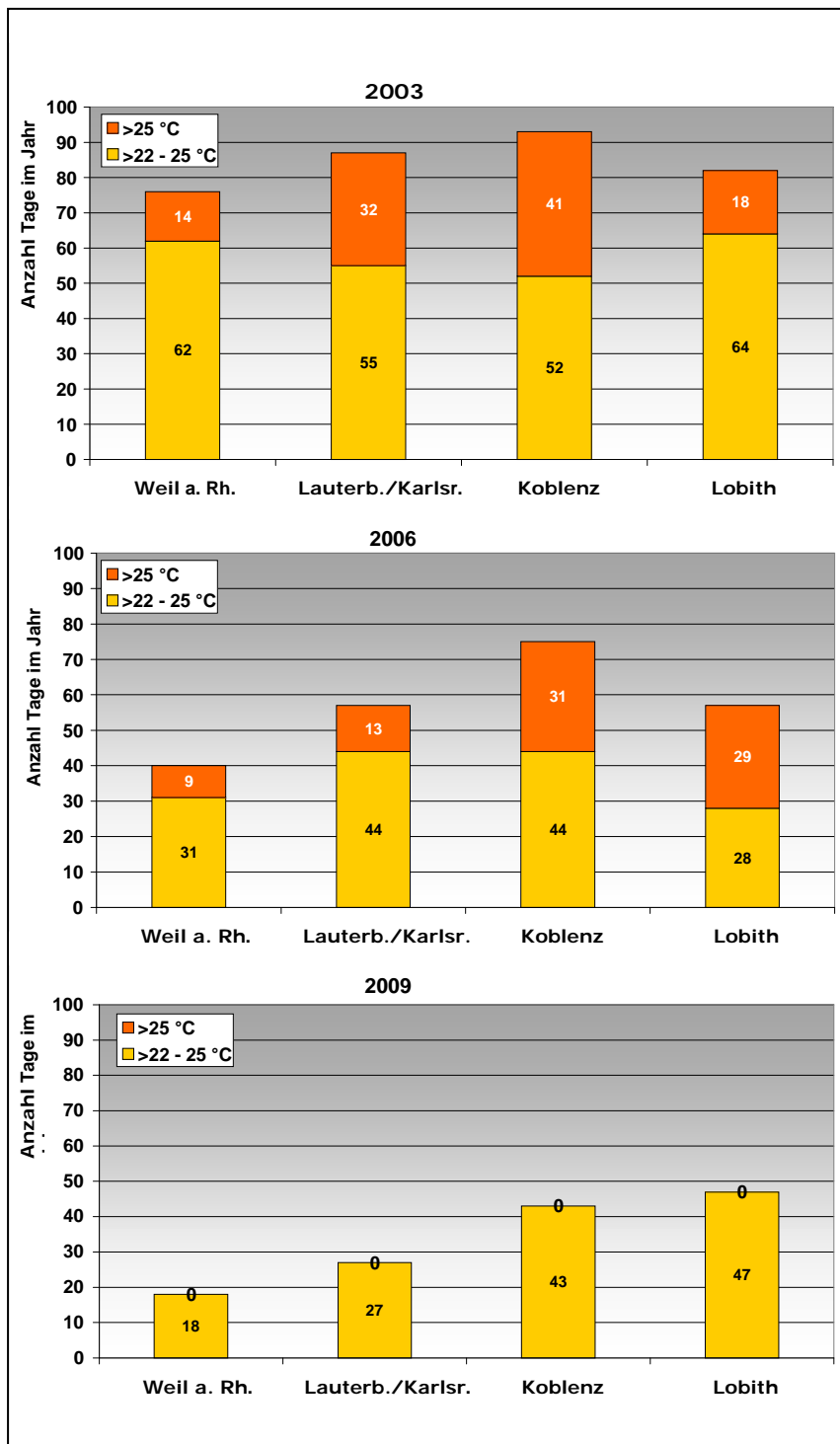


Abb. 5.3-1: Anzahl der Tage mit Überschreitungen der Rheinwassertemperatur von 22°C in den Jahren 2003, 2006 und 2009

Während Wassertemperaturen über 22 °C in den letzten Jahrzehnten häufig auftraten (Abb. 5.3-2), sind Temperaturen über 25 °C in 7 der letzten 12 Jahren (bezogen auf Koblenz – Abb. 5.3-3) aber nur in einem Jahr im Zeitraum 1978-1989 aufgetreten. Für die Jahre 1978-1987 und 1978-1996 sind für die Messstelle Karlsruhe bzw. Weil am

Rhein. wegen der fehlenden Datenbasis keine Aussagen möglich (siehe Abb. 5.3-2 und 5.3-3)

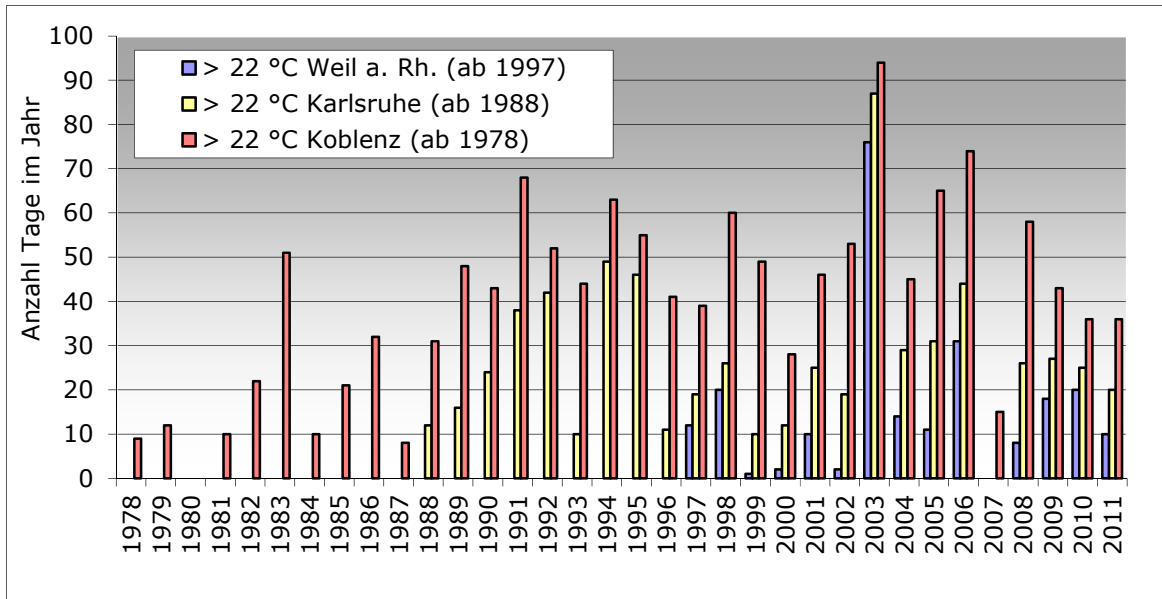


Abb. 5.3-2: Überschreitungsdauer der Rhein-WT von 22 °C in den letzten drei Jahrzehnten

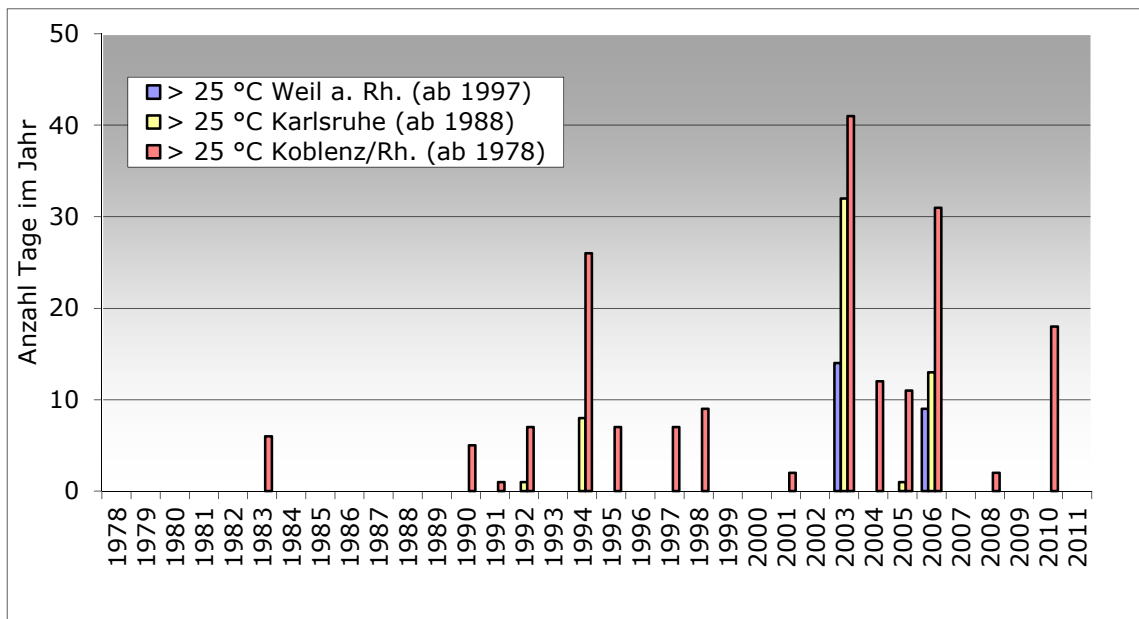


Abb. 5.3-3: Überschreitungsdauer der Rhein-WT von 25 °C in den letzten drei Jahrzehnten

Im April 2007 wurden für etwa drei Wochen (bis Anfang Mai) ebenfalls hohe Wassertemperaturen (bis über 20 °C) bei Koblenz gemessen. Das langjährige Mittel für diesen Zeitraum war um 5 °C überschritten und dies ist vergleichbar mit den entsprechenden Extremwerten der Sommer 2003 und 2006.

In Abb. 5.3-4 ist für Koblenz/Rhein und über den Zeitraum 1978-2011 die Unterschreitungsdauer bestimmter Temperaturen in den Wintermonaten dargestellt. Auffällig ist hier, dass im Winter 2011/2012 die Wassertemperatur an 11 Tagen unter 2 °C lag. Dies ist die längste Zeit in den betrachteten 34 Jahren. Die zurückgegangenen Wärmeeinträge in 2011 (vgl. Kap. 6) zwischen Karlsruhe und Worms könnten hier das

Ergebnis mit beeinflusst haben. Weitere Stationen mit WT-Daten aus 2012 müssen zur Klärung noch in die Auswertung einbezogen werden.

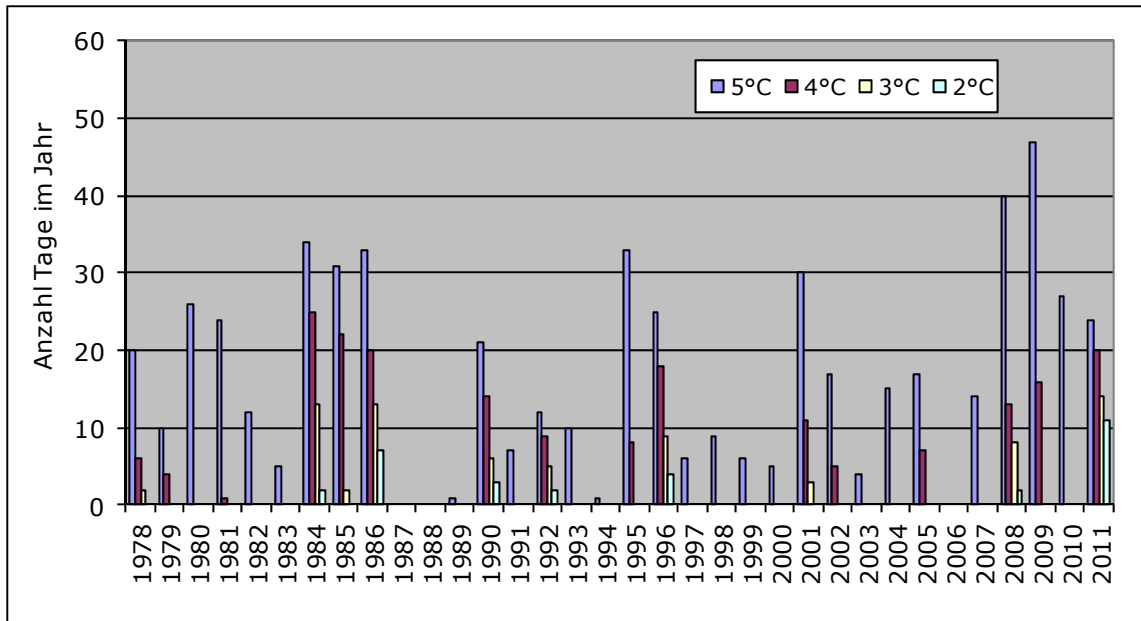


Abb. 5.3-4: Unterschreitungsdauer der Rhein-WT bei Koblenz von x °C in den Jahren 1978-2011

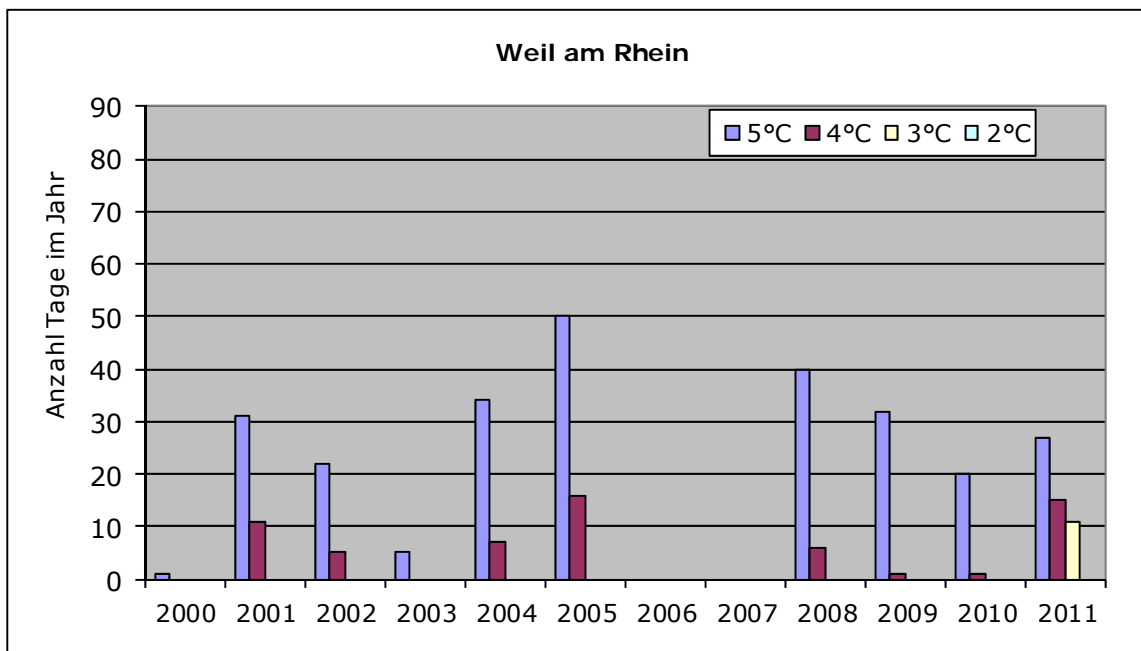


Abb. 5.3-5: Unterschreitungsdauer der Rhein-Wassertemperatur bei Weil am Rhein von x °C in den Jahren 2000-2011

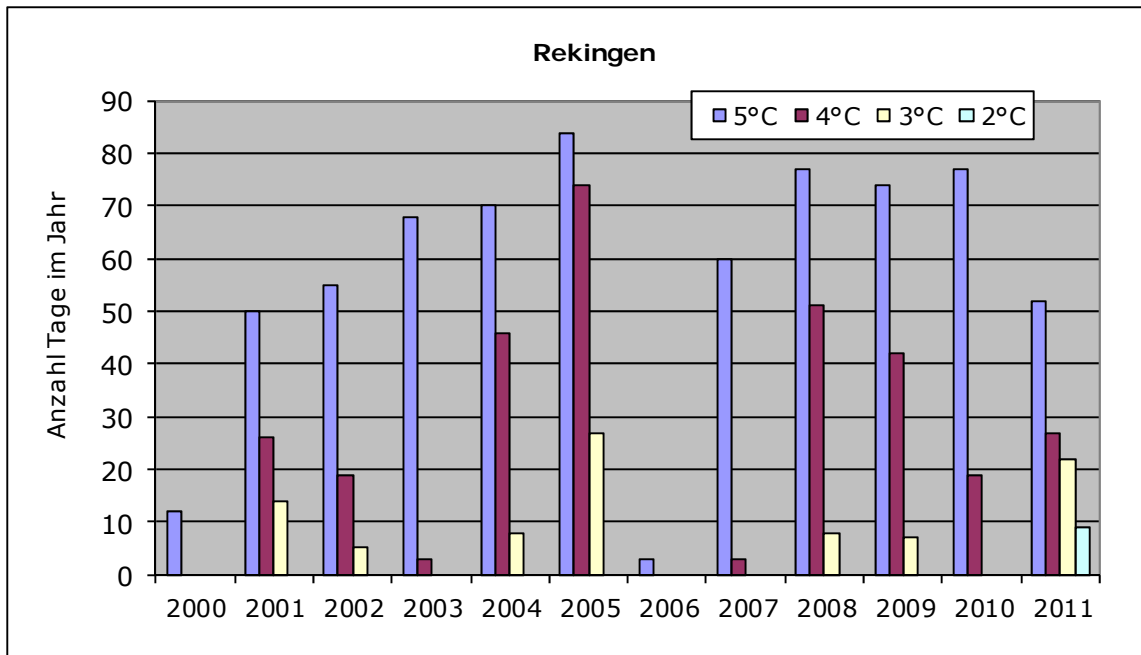


Abb. 5.3-6: Unterschreitungsdauer der Rhein-Wassertemperatur bei Rekingen von x °C in den Jahren 2000-2011

Bei einem Vergleich der entsprechenden Auswertung für die Stationen Weil a. Rh. und Rekingen fallen besonders die warmen Winter 2006/2007 und 2000/2001 auf, in denen die Rhein-WT fast immer über 5 °C lag. Im Winter 2011/2012 wurden aber auch Temperaturen unter 2 °C erreicht.

5.4 Trendanalyse

Um Aussagen über die Entwicklung der Rheinwassertemperatur in den vergangenen Jahrzehnten treffen zu können, wurden ausgewählte WT-Zeitreihen auf Trends hin untersucht. Hierbei wurde der Mann-Kendall-Trendtest eingesetzt. Dieser setzt keine Normalverteilung oder Linearität des Trends voraus. Neben der Richtung des Trends wurden auch die Signifikanz und die Größe des Trends berechnet. In Tab. 5.4-1 sind für Messstellen mit langen Zeitreihen die Trends, bezogen auf Jahresmittel und auf Jahreszeiten, dargestellt.

Tab. 5.4-1: Trendauswertung für ausgewählte Zeitreihen mit dem Mann-Kendall-Trendtest

| Messstation | Zeitreihe | Signifikanter Trend (%) | Zu-/Abnahme der WT in °C | Mittelwerte (Zeitbezug) |
|-------------|-----------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Rekingen | 1978-2011 | 99,9 | 1,7 | Jahresmittel |
| BASF WW Süd | 1978-2011 | 99,9 | 2,2 | Jahresmittel |
| Mainz | 1980-2011 | 99 | 1,3 | Jahresmittel |
| Koblenz/Rh. | 1978-2011 | 99,9 | 1,2 | Jahresmittel |
| Rekingen | 1989-2011 | - | 0,5 | Jahresmittel |
| BASF WW Süd | 1989-2011 | 95 | 0,9 | Jahresmittel |
| Mainz | 1989-2011 | - | -0,2 | Jahresmittel |
| Koblenz/Rh. | 1989-2011 | - | 0,01 | Jahresmittel |
| Koblenz/Rh. | 1978-2011 | 99 | 1,7 | Frühling |

| Messstation | Zeitreihe | Signifikanter Trend (%) | Zu-/Abnahme der WT in °C | Mittelwerte (Zeitbezug) |
|-------------|-----------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Koblenz/Rh. | 1978-2011 | 99,9 | 2,3 | Sommer |
| Koblenz/Rh. | 1978-2011 | - | 0,6 | Herbst |
| Koblenz/Rh. | 1978-2011 | - | -0,3 | Winter |
| BASF WW Süd | 1978-2011 | 99,9 | 2,7 | Frühling |
| BASF WW Süd | 1978-2011 | 99,9 | 2,6 | Sommer |
| BASF WW Süd | 1978-2011 | 95 | 1,1 | Herbst |
| BASF WW Süd | 1978-2011 | 95 | 1,4 | Winter |
| Koblenz/Rh. | 1989-2011 | - | -0,2 | Frühling |
| Koblenz/Rh. | 1989-2011 | - | -0,2 | Sommer |
| Koblenz/Rh. | 1989-2011 | - | 0,5 | Herbst |
| Koblenz/Rh. | 1989-2011 | - | -0,9 | Winter |
| BASF WW Süd | 1989-2011 | - | 0,6 | Frühling |
| BASF WW Süd | 1989-2011 | - | 0,6 | Sommer |
| BASF WW Süd | 1989-2011 | - | 0,4 | Herbst |
| BASF WW Süd | 1989-2011 | - | 0,1 | Winter |

Die Auswertung der Zeitreihen von 1978 bis 2011 zeigt für diesen Zeitraum eine Temperaturerhöhung für Rekingen (Hochrhein) von 1,7 °C, für Mainz (Oberrhein) von 1,3 °C und für Koblenz (Mittelrhein) von 1,2 °C. Für die Sommermonate liegen die Werte deutlich über 2 °C. Der Trend für diese Temperaturerhöhungen ist jedoch nicht linear über den gesamten Zeitraum (1978-2011) ersichtlich, sondern resultiert im Wesentlichen aus einem Anstieg in den Jahren 1987-1989. Auf der Basis der Zeitreihen von 1978 bis 2011 ist der Trend zu höheren Temperaturen stärker und von 1989 bis 2011 oder kürzeren Zeitreihen allerdings nur sehr schwach ausgeprägt oder gar nicht vorhanden.

Auch auf der Basis der Zeitreihe aus Tagesmittelwerten, die für Rekingen am Hochrhein zur Verfügung stand (1997-2010), konnte weder in den Jahresmitteln noch in den Jahreszeiten ein signifikanter Trend ermittelt werden (Tab. 5.4-2). Für die Wintermonate wird sogar eine Temperaturabnahme ermittelt – allerdings ebenfalls ohne signifikanten Trend.

Tab. 5.4-2: Trendauswertung für ausgewählte kurze Zeitreihen mit dem Mann-Kendall-Trendtest

| Messstation | Zeitreihe | Signifikante r Trend (%) | Zu-/Abnahme der WT in °C | Mittelwerte (Zeitbezug) |
|-------------|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Rekingen | 1997-2010 | - | 0,3 | Jahresmittel |
| BASF WW Süd | 1997-2010 | - | 0,4 | Jahresmittel |
| Koblenz/Rh. | 1997-2010 | - | -0,3 | Jahresmittel |
| Rekingen | 1997-2010 | - | -0,4 | Frühling |
| Rekingen | 1997-2010 | - | 0,7 | Sommer |
| Rekingen | 1997-2010 | - | 0,6 | Herbst |
| Rekingen | 1997-2010 | - | -0,9 | Winter |

| Messstation | Zeitreihe | Signifikante r Trend (%) | Zu-/Abnahme der WT in °C | Mittelwerte (Zeitbezug) |
|-------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| BASF WW Süd | 1997-2010 | - | 0,00 | Frühling |
| BASF WW Süd | 1997-2010 | - | 1,1 | Sommer |
| BASF WW Süd | 1997-2010 | - | 0,00 | Herbst |
| BASF WW Süd | 1997-2010 | - | -0,3 | Winter |
| | | | | |
| Koblenz/Rh. | 1997-2010 | - | -0,8 | Frühling |
| Koblenz/Rh. | 1997-2010 | - | 0,7 | Sommer |
| Koblenz/Rh. | 1997-2010 | - | 0,1 | Herbst |
| Koblenz/Rh. | 1997-2010 | - | -1,1 | Winter |

Die Trendauswertung zeigt, dass ganz unterschiedliche Ergebnisse erzeugt werden können, je nachdem, welche Zeitreihen zu Grunde gelegt werden.

In Abb. 5.4-1 ist daher zusätzlich eine grafische Darstellung des Verlaufs der Jahresmittel an fünf Stationen längs des Rheins dargestellt (Zeitraum 1978-2011).

Den größten Einfluss auf die Wassertemperatur hat die Lufttemperatur (vgl. Kap. 5.5) und dies ist an dem gleichsinnigen Verlauf der Werte längs des Rheins gut zu erkennen. Deutlich werden auch die großen Kühlwassereinleitungen auf der Strecke zwischen Karlsruhe und Mainz (vgl. Kap. 5.7). Der deutliche Sprung zu höheren Wassertemperaturen im Vergleich der Jahresmittel 1987 bis 1989 wurde durch den starken Rückgang der Jahresabflüsse in diesen drei Jahren noch verstärkt.

Dieser Sprung ist auch an anderen Rhein- und Nebenflussmessstationen für diesen Zeitraum zu finden und muss daher als klimatisches Phänomen angesehen werden. In den langjährigen Auswertungen alpiner Flüsse der Schweiz ist von Hari [Hari et al 2006] bereits auf diesen Klimateffekt hingewiesen worden. Er wird mit der in diesem Zeitraum besonders stark ausgeprägten so genannten Nordatlantischen Oszillation (NAO) erklärt. Dies sind große Luftdruckunterschiede im Nordatlantik, die dazu führen, dass insbesondere im Winter verstärkt warme Meeresluft nach Westeuropa einströmt. Nicht erklärbar ist, dass in den Folgejahren die NAO weniger ausgeprägt war, die Luft- und Wassertemperaturen aber auf einem höheren Niveau geblieben sind (siehe Abb. 5.5-1).

Je nachdem, ob also eine Zeitreihe diesen Zeitraum 1987-1989 beinhaltet oder nicht, lassen sich statistisch z. T. hoch signifikante Trends erzeugen.

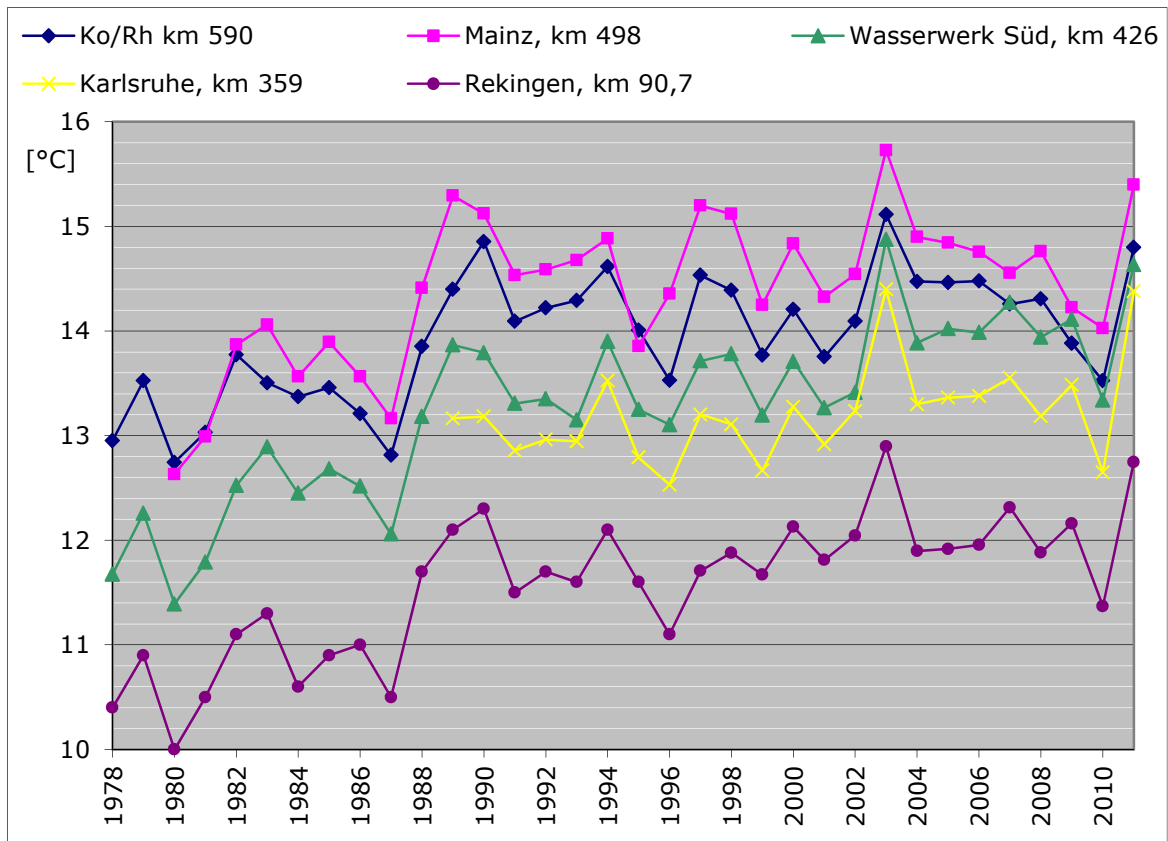


Abb. 5.4-1: Jahresmittel der Rheinwassertemperaturen von 1978-2011 an fünf Messstellen vom Hoch-, Ober- und Mittelrhein

5.5 Korrelationsanalyse

Nach [Haag, 2009] werden Luft- und Fließgewässertemperaturen weitgehend von denselben klimatischen Faktoren gesteuert. Daher sollte ein ähnlicher Trend auch in den Temperaturen der Flüsse abzulesen sein. Da die Messzeitreihen für Wassertemperaturen in der Regel wesentlich kürzer sind als für Lufttemperaturen, gibt es jedoch nur relativ wenige Untersuchungen zur historischen Entwicklung von Wassertemperaturen [Webb 1996].

Für die Messstellen Koblenz/Rh., Wasserwerk Süd der BASF und Rekingen wurden die Jahresmittel der Wassertemperatur mit den Lufttemperaturen bei Mannheim verglichen, wobei zusätzlich die Dekadenmittel, beginnend mit 1979-1988 eingetragen sind – siehe Abb. 5.5-1. Der Sprung zwischen der ersten (1979-1988) und zweiten Dekade (1989-1998) beträgt bei den Wassertemperaturen bei Rekingen 0,9 °C, bei Koblenz 1,0 °C und beim WW Süd 1,1 °C, während der Sprung in der Lufttemperatur bei 0,75 °C liegt.

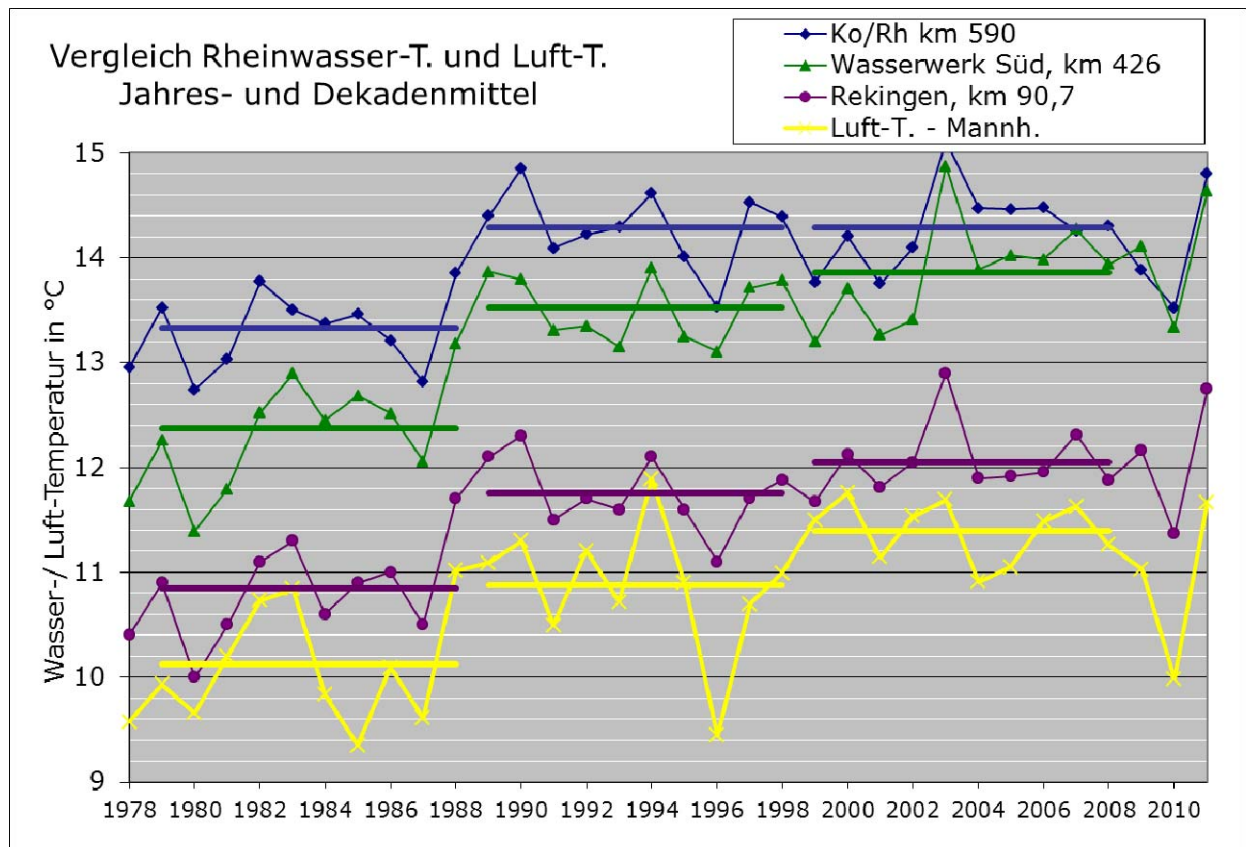


Abb. 5.5-1: Vergleich der Jahres- und Dekadenmittel von Rhein-Wassertemperatur und Luft-Temperatur (Dekadenmittel beginnend mit Dekade 1979-1988; farbige horizontale Striche)

Der direkte Vergleich der Wassertemperatur beim WW Süd mit der benachbarten Luftmessstation des DWD in Mannheim zeigt, dass die Wassertemperatur im langjährigen Mittel zwischen 2 und 2,3 °C höher als die Lufttemperatur liegt. Dies ist in guter Übereinstimmung mit aus der Literatur bekannten Auswertungen.

In der Arbeit von Greis [Greis 2007] wurden auch Stationen im Rheingebiet hinsichtlich der Korrelation zwischen Luft- und Wassertemperaturen an nahe gelegenen Standorten geprüft. Für die Wassertemperaturstationen Koblenz und Karlsruhe wurden dabei Korrelationskoeffizienten von 0,898 bzw. 0,900 ermittelt. Das bedeutet, dass in diesen Fällen eine sehr gute Korrelation zwischen Luft- und Wassertemperaturen besteht.

Tab. 5.5-1: Korrelationskoeffizienten zwischen den Daten der Wassertemperatur- und Lufttemperatur-Stationen (Quelle: Greis 2007)

| Wassertemperatur-Station | Lufttemperatur-Station | Untersuchungszeitraum | Korrelationskoeffizient |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Koblenz | Koblenz-Horchheim | 1978 bis 2007 | 0,898 |
| Karlsruhe | Karlsruhe | 1988 bis 2007 | 0,900 |

Die außerdem durchgeführte Kreuzkorrelation ergab, dass eine maximale Korrelation der Lufttemperatur mit der Wassertemperatur an den einzelnen Stationen bei einer Verschiebung um einen bis drei Tage vorliegt.

An Rhein und Neckar wurden maximale Korrelationskoeffizienten bei einer Verschiebung um zwei Tage (an den Stationen Koblenz/Rhein, Besigheim/Neckar und Poppenweiler/Neckar) sowie drei Tage (Rockenau/Neckar und Karlsruhe/Rhein) festgestellt.

5.6 Einfluss von großen Nebenflüssen auf die Wassertemperatur des Rheins

Beim Vergleich der jahreszeitlichen Mittel der Wassertemperaturen von Rhein und Mosel bei Koblenz über die letzten 20 Jahre zeigt sich, dass im Herbst und Winter die Differenzen im Mittel bei 1,7 bzw. 1,8 °C liegen, während im Sommer die Temperaturen von Rhein und Mosel im Mittel gleich hoch sind. Im Mittel über den genannten Zeitraum ist die Mosel 1 °C kühler als der Rhein. Dies bedeutet, dass die Mosel bei dem mittleren Abflussverhältnis zum Rhein bei Koblenz von 1:5 rein rechnerisch nach Einmischung den Rhein um 0,2 °C abkühlt (Abb. 5.6-1).

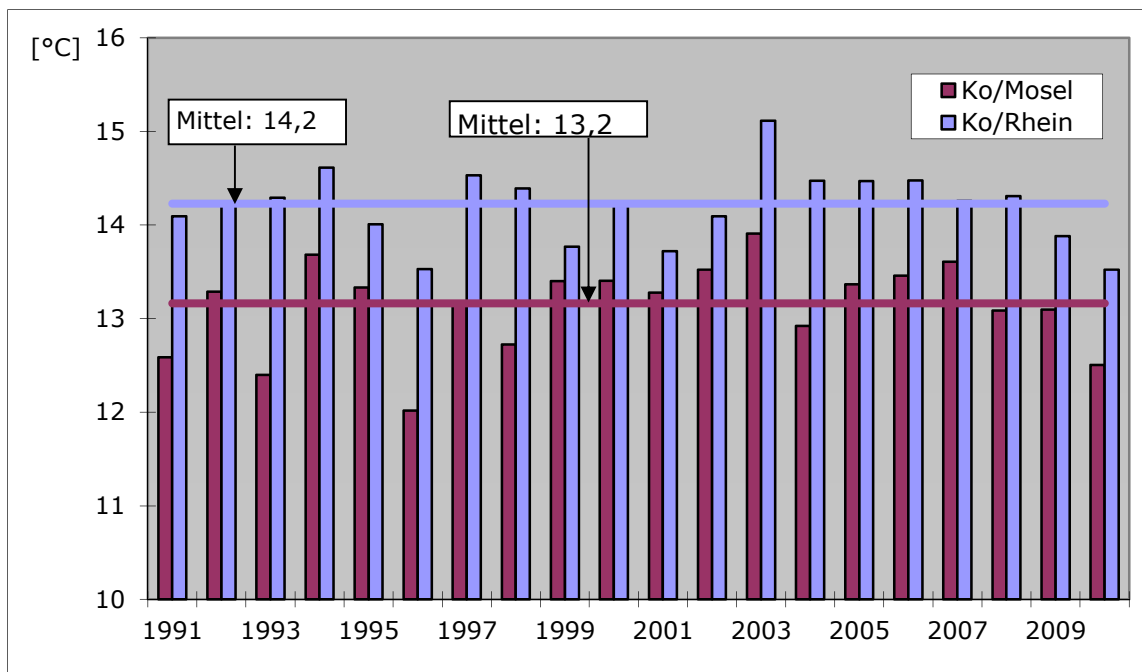


Abb. 5.6-1: Vergleich der Wassertemperatur-Jahresmittel von Rhein und Mosel bei Koblenz von 1991-2010

Analog wurden die Wassertemperaturen vom Rhein bei Mainz (linkes Ufer) mit denen vom Main bei Bischofsheim verglichen – Abb. 5.6-2a. Hier ergibt sich ebenfalls eine Temperaturdifferenz von 1 °C, die aber auch saisonal im Herbst und Winter ausgeprägt und im Sommer nicht vorhanden ist.

Bei einem Vergleich der Wassertemperaturen von Rhein und Neckar bei Mannheim fällt der Wechsel des Neckars von höheren zu niedrigeren Jahresmitteln auf (Abb. 5.6-2b). Der Grund liegt in der Stilllegung des AKW Obrigheim im Mai 2005. Im Mittel des Zeitraums 2006-2010 hat daher auch der Neckar zu einer kleinen Abkühlung des Rheins beigetragen (etwa 0,1 °C auf MQ-Worms bezogen).

| WT in °C Mittel 2000- 2010 | Main Bischofs- heim | Rhein-km 498 li. Ufer | delta T |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------|
| Jahresmittel | 13,7 | 14,7 | -1,0 |
| Frühling | 12,4 | 13,1 | -0,7 |
| Sommer | 22,4 | 22,2 | 0,2 |
| Herbst | 14,7 | 16,0 | -1,3 |
| Winter | 5,0 | 7,4 | -2,3 |

| WT in °C | Mannheim Neckar | Rhein -km 426 | delta T |
|----------------------|--------------------|---------------------|------------|
| Mittel 2000- 2004 | 14,8 | 13,8 | 0,93 |
| Mittel 2006- 2010 | 13,2 | 13,9 | -0,72 |

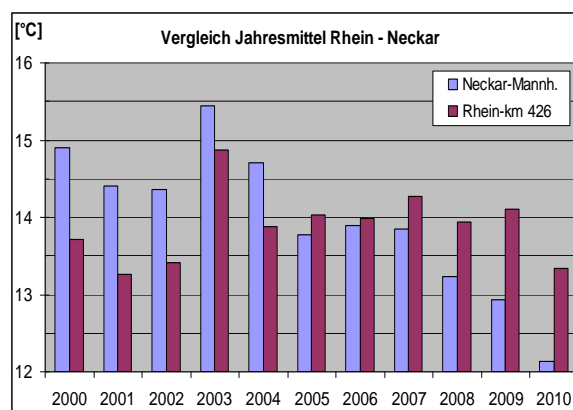
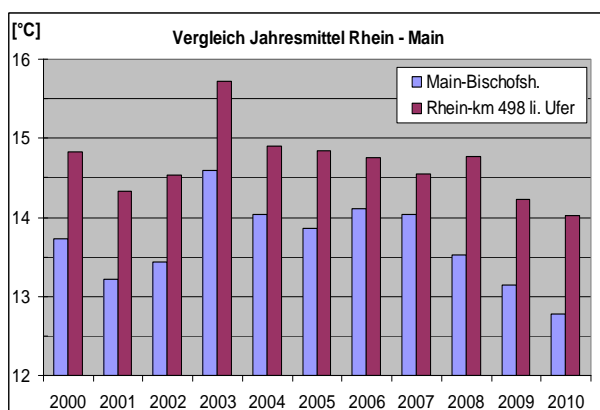


Abb. 5.6-2a/b: Vergleich der Wassertemperatur-Jahresmittel von Rhein und Main bzw. Rhein und Neckar von 2000-2010 einschließlich tabellarischer Auswertung

Im Gegensatz zum Rhein selbst erreichen die Nebenflüsse am Ober- und Mittelrhein im Winter häufig Tiefsttemperaturen nahe 0 °C, z. T. wird auch starke Eisbildung beobachtet. Wie in Kap. 5.3 erläutert, wurden im Rhein bei Koblenz zwischen 1978 und 2011 nur in sieben Jahren Wassertemperaturen (Tagesmittel) unter 2 °C gemessen.

5.7 Einfluss von großen Wärmeinleitern auf die Wassertemperatur des Rheins

Schon in den 70-er Jahren hat sich die IKSR vor dem Hintergrund der Wärmeinleitungen bestehender und noch geplanter Kraftwerke mit Fragen der Wärmelast beschäftigt. Nach der Extremsituation im Sommer 2003 hat die IKSR, wie bereits oben ausgeführt, das Wärmeinventar für das Jahr 1989 auf das Jahr 2004 aktualisiert [IKSR 2006]. Vor dem Hintergrund der bereits durch Klimaänderung erhöhten Wassertemperatur (von rund 1-2 °C) ist in Tabelle 5.7.1 ein Vergleich mit der theoretisch möglichen Temperaturerhöhung aufgrund von Wärmeinleitungen, hier bezogen auf den mittleren Abfluss von Worms (1400 m³/s), dargestellt. Rund 60 % der großen Wärmeinleitungen in den Rhein erfolgten bis 2010 auf einem kurzen Abschnitt des Oberrheins zwischen Karlsruhe und Worms. Unter der Voraussetzung, dass alle Einleiter ihre genehmigten Kapazitäten gleichzeitig voll ausnutzen, können diese, bezogen auf den mittleren Abfluss bei Worms und nach vollständiger Einmischung, ohne Berücksichtigung natürlicher Prozesse, zu einer theoretischen Temperaturerhöhung von maximal 2,6 °C beitragen. Die tatsächlich messbare mittlere Temperaturerhöhung bei Mainz liegt dagegen bei rund 1,4°C (bezogen auf MQ) und verringert sich weiter bis Koblenz auf rund 1 °C. Die geringere Differenz ist überwiegend dadurch zu erklären, dass die genehmigten Einleitmengen nicht voll ausgeschöpft werden und ein Wärmeaustausch (Verdunstung und Konvektion) mit der

Atmosphäre auf der Fließstrecke bis Mainz bzw. Koblenz stattfindet. Es gilt die Vermutung, dass die Temperaturerhöhung bei Mainz im Wesentlichen auf die Wärmeeinleitungen im Großraum Mannheim/Ludwigshafen und bei dem AKW Biblis sowie zu einem geringen Anteil auf die natürliche Erwärmung im Laufe der Fließstrecke von rund 50-60 km zurückzuführen ist. Der Einfluss der deutlich weiter entfernten und geringeren Wärmeeinleitung des AKW Philippsburg dürfte dagegen in Mainz kaum noch signifikant messbar sein. Genauere Aussagen werden von der Modellierung der Wassertemperaturen dieses Rheinabschnittes erwartet.

Eine Reduktion sommerlicher Niedrigwasserabflüsse auf die Hälfte von MQ oder weniger, wie z. B. 2003, kann zu einer kritischen Situation führen, weil bei geringeren Abflüssen und somit verringerter Kühlkapazität bei gleicher Wärmeeinleitung höhere Wassertemperaturen resultieren (Webb 2006).

In Deutschland bestehen daher je nach Kraftwerksstandort und Gewässertyp für die Kühlverfahren wasserrechtlich festgelegte Grenzwerte bezüglich der Kühlwasserentnahme und -einleitung. Diese basieren auf den Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. Werden diese Grenzwerte erreicht, muss die Kraftwerksleistung reduziert werden, um den Wärmeeintrag in den Vorfluter zu senken [UBA 2010, S. 141].

In den anderen Rheinanliegerstaaten wurden ähnliche Maßnahmen ergriffen.

Tab. 5.7-1: Zusammenstellung von großen genehmigten Wärmeeinleitungen zwischen Karlsruhe und Mainz, dem mittleren Abfluss von Worms und der daraus resultierenden theoretischen Temperaturerhöhung des Rheinwassers

| Wärmeeinleiter | MW* | MQ [m ³ /s] | Theoret. Temp.-erhöhung [°C] |
|-------------------------------|-------|------------------------|------------------------------|
| AKW Philippsburg | 4265 | 1400 | 0,7 |
| AKW Biblis | 4940 | 1400 | 0,8 |
| Gesamt: Karlsru. - Worms | 15000 | 1400 | 2,6 |
| delta T: Mainz-Karlsruhe 2010 | | | 1,4 |

* Genehmigte Wärmeeinleitungen gemäß Inventar der Wärmeeinleitungen 2004 des IKSR-Berichtes Nr. 151 [IKSR 2006]

Weiter wird der mögliche Einfluss der punktuellen Wärmeeinleitung des Kernkraftwerks bei Fessenheim im Elsass, das seit 1977 der größte anthropogene Wärmeeinleiter (mit einer genehmigten Wärmeeinleitung von 3520 MW [IKSR 2006]) im Abschnitt zwischen Basel und Karlsruhe ist, auf die über 130 km stromabwärts registrierten Messungen der Wassertemperatur bei Karlsruhe betrachtet. Dazu wurden die veröffentlichten Monatsmittel [Umwelt & Strahlenschutz] der Temperaturerhöhung im unmittelbaren Umfeld des Rheinseitenkanals vom März 2010 bis März 2012 ausgewertet. Die monatliche Temperaturerhöhung lag zwischen 0 °C (während Revisionszeiten des Kraftwerks) und 2,3 °C (April 2010). Die mittlere Temperaturerhöhung des Rheinseitenkanals lag in diesem Zeitraum bei 0,9 °C. Nach einem deutsch-französischen Vertrag ist das Abflussregime durch den Rheinseitenkanal für alle Abflusssituationen geregelt. Danach wird bis zu einem Abfluss von 1500 m³/s der überwiegend größte Anteil durch den Seitenkanal geleitet und nur ein kleiner Teil verbleibt im sog. Restrhein. Das bedeutet, dass die Aufwärmung des Rheinseitenkanals an den meisten Tagen im Jahr annähernd der nicht natürlichen Erwärmung des gesamten Rheinwassers im Querschnitt entspricht.

Aus der Darstellung der Monatsmittel der Temperaturdifferenz zwischen Karlsruhe und Weil a. Rh. in Abb. 5.7-1. geht nun hervor, dass die Wassertemperatur auf der Fließstrecke in den meisten Monaten zunimmt und lediglich in Herbst- und

Wintermonaten um bis zu 0,5 °C abnehmen kann. Auf der langen und staugeregelten Fließstrecke von über 130 km bis zur Messstation Karlsruhe stellt sich weitgehend das Niveau des natürlichen Wärmeaustausches Wasser-Atmosphäre ein. Wie in Kap. 4 gezeigt, ist auch kein Temperaturgradient im Querprofil bei der Messstation Karlsruhe festzustellen. Die dargestellte Wärmeinleitung (Monatsmittel 2010-2011) in den Rheinseitenkanal bei Fessenheim lässt sich aber nicht mit dem Temperaturverlauf korrelieren. Offensichtlich ist der Einfluss dieser Wärmeinleitung durch natürliche Prozesse (Erwärmung und Abkühlung) überlagert und nicht mehr nachweisbar. Auf der langen und staugeregelten Fließstrecke von über 130 km bis zur Messstation Karlsruhe stellt sich weitgehend das Niveau des natürlichen Wärmeaustausches Wasser-Atmosphäre ein. Auch hier wird die Modellierung der Wassertemperatur eine genauere Aussage ermöglichen.

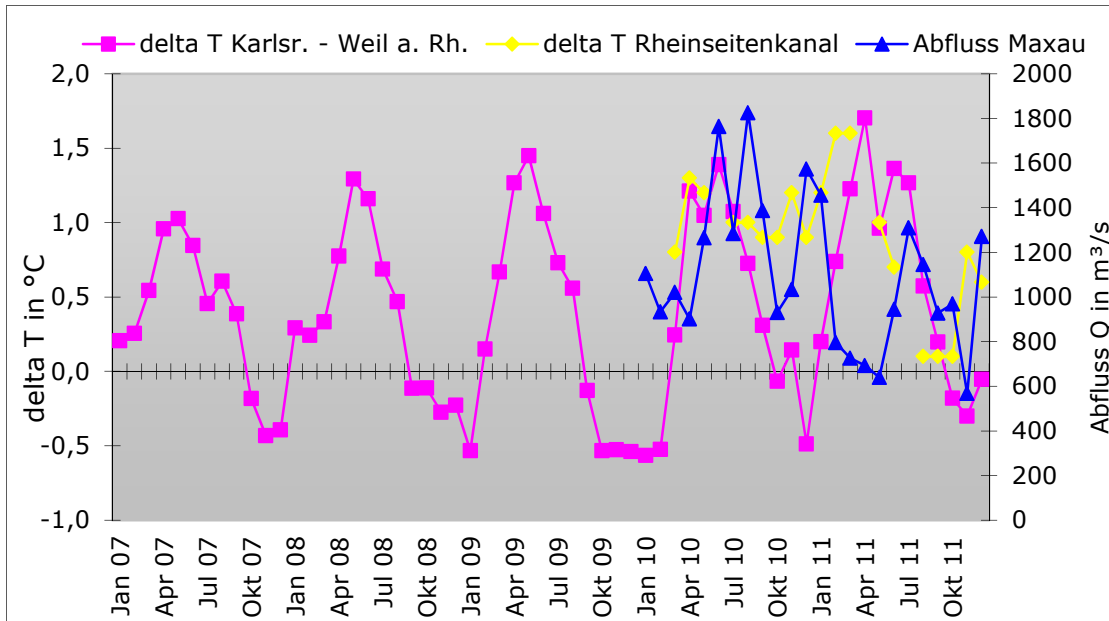


Abb. 5.7-1: Monatsmittelwerte der Temperaturdifferenz zwischen Karlsruhe und Weil a. Rh. 2007-2011, Monatsmittel des Abflusses bei Karlsruhe-Maxau und Temperaturerhöhung des Rheinseitenkanals bei Fessenheim 2010-2011

Grundsätzlich muss im Anbetracht der in Abb. 5.7-2 dargestellten Ergebnisse und der Untersuchungen von Glaser [Glaser 1975] festgehalten werden, dass bei vergleichbaren Abflussverhältnissen eine derartige Wärmeinleitung bei 20 °C Wassertemperatur zu einer doppelt so hohen Wärmeabgabe durch Verdunstung und Konvektion führt als bei einer Wassertemperatur von 5 °C.

Verhältnis der Wärmeabgabe bezogen auf die Abgabe bei der Oberflächentemperatur von 10 °C Temperatur an der Wasseroberfläche

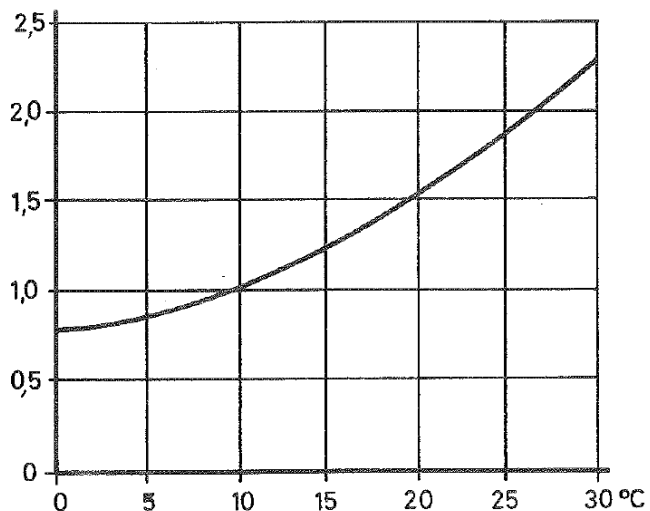


Abb. 5.7-2: Wärmeabgabe in Abhängigkeit von der Temperatur an der Wasseroberfläche (Quelle: Glaser 1975)

6. Entwicklung der Rheinwassertemperatur seit März 2011

Nach den Reaktorunfällen in Fukushima/Japan hat die deutsche Bundesregierung im März 2011 entschieden, für acht Kernkraftwerksanlagen, die vor 1981 den Betrieb aufgenommen hatten, ein dreimonatiges Moratorium zu verhängen. Mit Inkrafttreten der 13. Novelle des Atomgesetzes im August 2011 wurde der Leistungsbetrieb dieser Anlagen auf Dauer eingestellt. Im Rheingebiet zwischen Karlsruhe und Mainz betraf dies die Reaktorblöcke Biblis I und Biblis II sowie Philippsburg I und am Neckar Neckarwestheim I. Rund die Hälfte der bilanzierten Wärmeeinleitungen (gemäß IKSR-Bericht Nr. 151) für diesen Rheinabschnitt resultiert aus diesen Anlagen. Infolgedessen müsste die Temperaturdifferenz zwischen den Messstationen Mainz und Karlsruhe, die im langjährigen Mittel (1989-2010) bei 1,5 °C liegt, signifikant zurückgegangen sein. In der Abb. 6-1 sind die Monatsmittel 2011 der Temperaturdifferenz im Vergleich zu den Monatsmitteln der Jahre 2001-2010 dargestellt. Die Einstellung des Leistungsbetriebs der Reaktoren ab Mitte März 2011 scheint zu einer Halbierung der Temperaturdifferenz in der 2. Jahreshälfte im Vergleich zum 1. Halbjahr bzw. zum langjährigen Mittelwert zu führen. Das deutsche deterministische Modell auf physischer Basis, das derzeit am Rhein entwickelt wird, sollte die Größenordnung bestätigen können. Diese Entwicklung wird in den kommenden Jahren weiter verfolgt und statistisch gesichert. Der rein statistische Weg kann die Entlastung präzisieren, wenn die Wärmeeinleitungen nicht durch andere Kraftwerke am Rhein oder seinen Nebenflüssen wieder zunehmen.

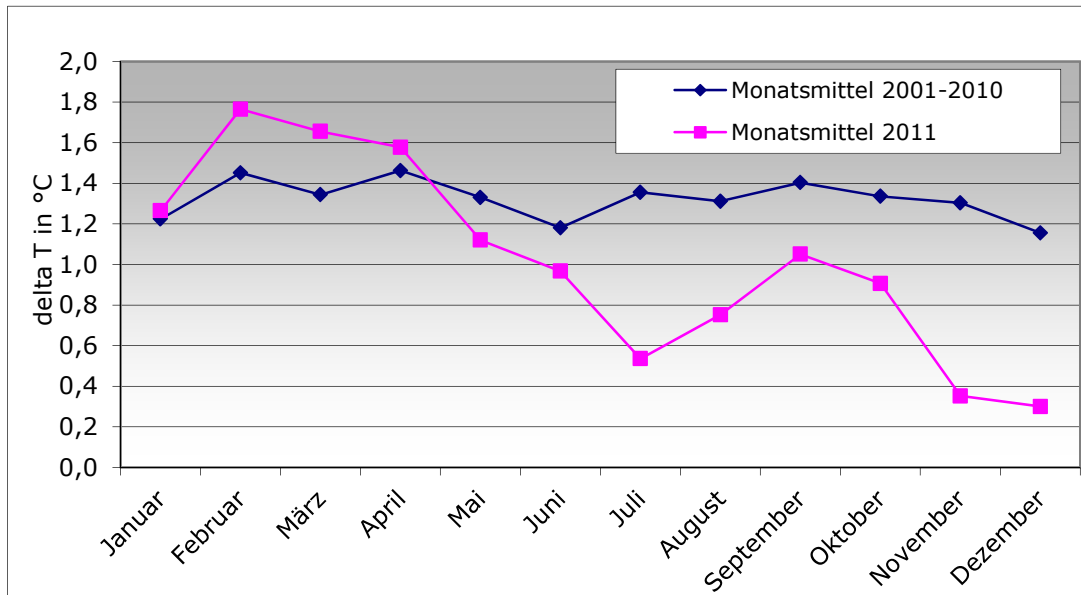


Abb. 6-1: Temperaturdifferenz zwischen den Messstationen Karlsruhe und Mainz, Vergleich der Entwicklung der Monatsmittel 2011 mit den Monatsmitteln über die Jahre 2001-2010

7. Ausblick

Die hier vorgelegten Ergebnisse bestätigen die bisher in der Literatur für einzelne Regionen des Rheingebiets gefundene Zunahme der Wassertemperatur um rund 1 °C über die vergangenen 3 Jahrzehnte infolge klimatischer Veränderungen. Klar geworden ist, dass diese Temperaturerhöhung nicht kontinuierlich erfolgt ist, sondern wesentlich aus einem Klimateffekt Ende der 80-er Jahre des 20. Jahrhunderts resultiert. Weder am Hochrhein noch am Ober- oder Mittelrhein sind signifikante Trends der Wassertemperaturzunahme über die letzten beiden Jahrzehnte festzustellen. Dies gilt bis heute besonders auch für die Sommer-Jahreszeit, für die von Klimaexperten steigende Lufttemperaturen vorhergesagt werden.

Nach einem schweizerischen Bericht [BAFU 2012] hat in der Schweiz für den Zeitraum 1912-2011 das Jahresmittel der Lufttemperatur um mehr als 1,5 °C zugenommen, wobei sich die Erwärmung in den letzten 30 Jahren beschleunigt hat (Abb. 7-1).

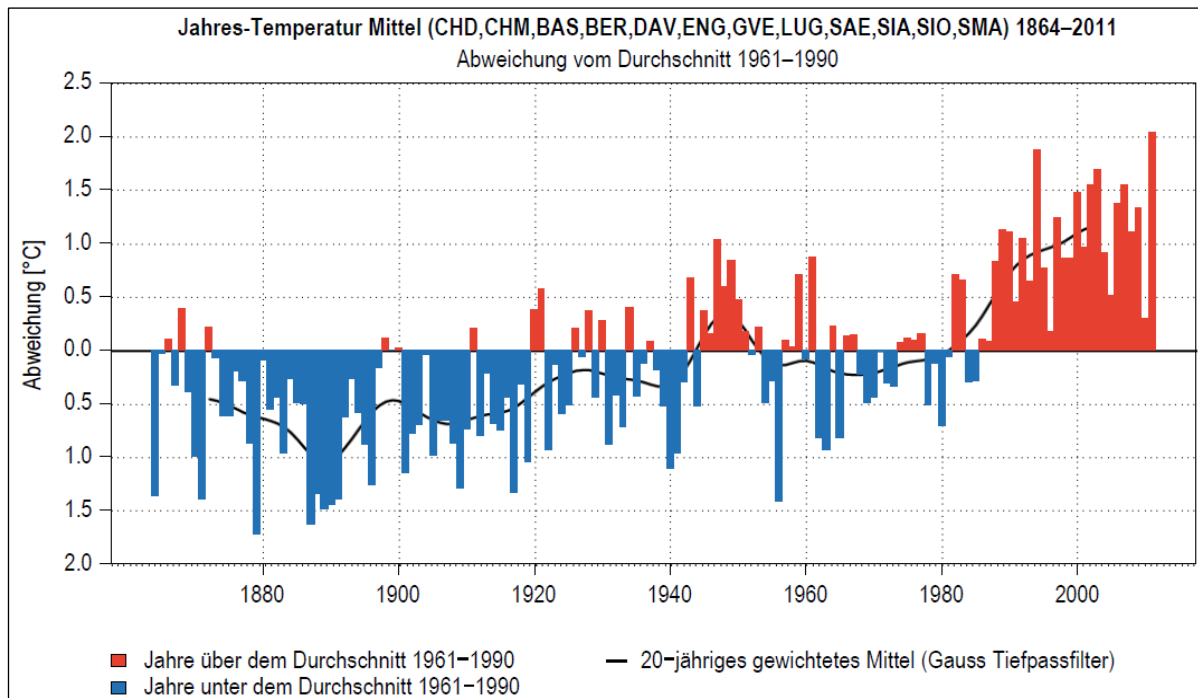


Abb. 7-1: Abweichung der mittleren Jahreslufttemperatur vom Durchschnitt der Jahre 1961-1990. (Quelle: BAFU 2012, Mittel für die Schweiz)

Zwischen 1901 und 2006 ist die mittlere Lufttemperatur in Deutschland um knapp 0,9° C gestiegen, wobei der Anstieg im Südwesten Deutschlands sogar bei 1,2 °C liegt [DAS 2008]. Nach aktuellen Ergebnissen aus dem KLIWA Projekt (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) gibt es positive signifikante Trends der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur für die Zeitreihe 1941-2010 im Gebiet des Hoch- und Oberrheins von 1,0°C, in der Region Nahe und Mittelrhein von 1,1 °C und im Neckargebiet von 1,2 °C [KLIWA 2012]. Gegenüber der Zeitreihe 1931-2000 hat sich dabei die Erwärmung in den letzten 10 Jahren verstärkt.

Wenn also diese Tendenz weiter geht, müssten auch die Wassertemperaturen in einem bestimmten Maß beeinflusst werden. Dies gilt umso mehr, wenn auch das Abflussregime des Rheins sich dahingehend ändert, dass Niedrigwasserperioden gerade im Sommer zunehmen [Belz 2010]. Eine Studie zur zukünftigen Entwicklung der Rheinwassertemperaturen in den nächsten Jahrzehnten wird bei der IKSR zurzeit erstellt.

Weitere Untersuchungen im Rahmen des KLIWA Projektes zeigen, dass der Klimawandel Einfluss auf die chemisch-physikalischen Verhältnisse im Gewässer und auf die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaften hat [UBA 2010]. Dabei wird besonders auf den großen Einfluss einer Temperaturerhöhung hingewiesen, die sich negativ auf die Selbstreinigungsprozesse auswirken kann.

Die Abschaltung einiger Kernkraftwerke im Rahmen der Energiewende in Deutschland im Jahr 2011 führte auch bei den Rheinwassertemperaturen am nördlichen Oberrhein zu einer in Mainz nachweisbaren Entlastung (Abb. 6-1). Es bleibt abzuwarten, ob diese Entwicklung für die Rheinwassertemperaturen nachhaltig ist. In der oben genannten, in Arbeit befindlichen Studie zur zukünftigen Wassertemperaturentwicklung sollten daher neben ausgewählten Klimaszenarien auch Varianten von „Wärmeeinleiterszenarien“ berücksichtigt werden.

Quellen

- BAFU (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), Bern, 2012. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S. – 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, S. 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 S.
- 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, August 2012.
- Forstner, A. E. (1894): Die Temperatur fließender Gewässer Mitteleuropas. - Geographische Abhandlungen, Band V, Heft 4, S. 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 S. (unveröffentlicht).
- Greis, S., U. Strauch und B. Rothstein (2011): Untersuchungen zur Gewässertemperaturentwicklung ausgewählter Flüsse mit thermischen Kraftwerksstandorten in Deutschland. - Korrespondenz Wasserwirtschaft 2011 (4) Nr. 1, S. 35-40.
- Haag, I. (2009): Die mögliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fließgewässern. - Herausgeber: 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), S. 10-26.
- IKSR (2006): Vergleich der Wärmeeinleitungen 1989 und 2004 entlang des Rheins. – IKSR Bericht Nr. 151. 4S.
- IKSR (2009): Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet – Literaturlauswertung. IKSR Bericht Nr. 174. 67 S.
- IKSR (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. IKSR Bericht Nr. 188. 28 S.
- IKSR (2013): Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen von Änderungen des Abflussgeschehens und der Wassertemperatur auf das Ökosystem Rhein und mögliche Handlungsperspektiven. IKSR-Fachbericht Nr. 204, 37 S.
- Jakob, A., Binderheim E.; Pfammatter, F. und Schädler, M. (2010): Temperaturen in Schweizer Fließgewässern - Langzeitbeobachtung. Gas-Wasser-Abwasser, 3/2010, S. 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. Hrsg. Arbeitskreis KLIWA, April 2012. <http://www.kliwa.de>

Lange, J. (2009): Studie Wärmelast Rhein. – Herausgeber: 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 S.

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, S. 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 S. 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, S. 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, S. 902-918.

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

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

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------------|--|
| AKW | Atomkraftwerk |
| BAFU | Bundesamt für Umwelt (CH) |
| BfG | Bundesanstalt für Gewässerkunde (D) |
| BUWAL | Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (CH) |
| BWG | Bundesamt für Wasser und Geologie (CH) |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| HLUG | Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie |
| IKSR | Internationale Kommission zum Schutz des Rheins |
| KLIWA | Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und des DWD |
| LANUV | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW |
| LUBW | Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg |
| LUWG | Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz |
| Meteo Schweiz | Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (CH) |
| WT | Wassertemperatur |
| WW | Wasserwerk |