



# **Abschätzungen der Folgen des Klimawandels auf die Entwicklung zukünftiger Rheinwassertemperaturen auf Basis von Klimaszenarien**

## **Kurzbericht**

Internationale  
Kommission zum  
Schutz des Rheins

Commission  
Internationale  
pour la Protection  
du Rhin

Internationale  
Commissie ter  
Bescherming  
van de Rijn

*Bericht Nr. 213*



## **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 2014  
ISBN-Nr.: 3-941994-51-4

## **Abschätzungen der Folgen des Klimawandels auf die Entwicklung zukünftiger Rheinwassertemperaturen auf Basis von Klimaszenarien**

### **Zusammenfassung**

Die mit sommerlichen Hitzeperioden einhergehenden erhöhten Wassertemperaturen im Rhein, insbesondere die in den Sommern 2003 und 2006 am Mittel- und Niederrhein gemessenen höchsten Tagesmittelwerte der Wassertemperatur zwischen 28 °C (Grenzwert der Fischgewässerrichtlinie<sup>1</sup>) und 29 °C, haben zu einer vertieften Befassung des Themas „Wassertemperatur und Klimaveränderung“ auf der Rheinministerkonferenz (RMK) im Oktober 2007 geführt. Eine durch die IKSR beauftragte und durchgeführte Literaturlauswertung von einschließlich bis Anfang des Jahres 2009 vorliegenden Forschungsergebnissen zur Klimaveränderung (ICPR 2009a) enthält u.a. auch Aussagen zu den bisherigen Änderungen der Rheinwassertemperatur. Diese Aussagen beziehen sich auf Messwerte einzelner Pegel und auf begrenzte Zeiträume. Aufgrund eines weiteren Auftrages der RMK 2007 hat die IKSR eine Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins erstellt (IKSR 2011).

Eine Beschreibung der langjährigen Entwicklung der Wassertemperaturen für die gesamte Rheinstrecke fehlte bisher ebenso wie Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung der Rheinwassertemperaturen.

Anfang 2013 hat die IKSR Berichte zur Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011 (IKSR 2013a) und zum aktuellen Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen von Änderungen des Abflussgeschehens und der Wassertemperatur auf das Ökosystem Rhein und mögliche Handlungsperspektiven (IKSR 2013b) veröffentlicht.

Mit der Erarbeitung von Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung der Rheinwassertemperaturen von Basel bis zum Rheindelta auf der Basis von Klimaszenarien wurde in der IKSR im Juli 2012 die Expertengruppe STEMP<sup>2</sup> „Temperaturmodell-Prognosen“ beauftragt.

Grundlage für die Abschätzungen sind die am Rhein bisher vorliegenden Wasserhaushalts- oder hydraulischen Wellenablaufmodelle, die mit einem entsprechenden Temperaturmodul auch Wassertemperaturen simulieren können. Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzbereiche wurden aus den für verschiedene Rheinabschnitte vorliegenden Modellen die Modelle LARSIM (LUBW<sup>3</sup>) für den Streckenabschnitt Basel bis Worms und SOBEK (RWS<sup>4</sup>) für den Streckenabschnitt Worms bis zum Rheindelta für die Simulationen ausgewählt. Der Pegel Worms stellt dabei die Übergabestelle zwischen den beiden Modellen dar. Mit den übrigen für Teilabschnitte vorliegenden Modellen (LARSIM von HLUG<sup>5</sup> und LUWG<sup>6</sup> von Worms bis Köln und QSim der BfG von Karlsruhe bis Lobith) wurden Vergleichssimulationen durchgeführt, um den Modelleinfluss bewerten zu können (siehe Abbildung 1).

---

<sup>1</sup> Richtlinie 2006/44/EG vom 6. September 2006 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten.

<sup>2</sup> Expertengruppe „Temperaturmodell-Prognosen“ der Arbeitsgruppe S (= Stoffe) der IKSR

<sup>3</sup> Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

<sup>4</sup> Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving

<sup>5</sup> Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

<sup>6</sup> Landesanstalt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz

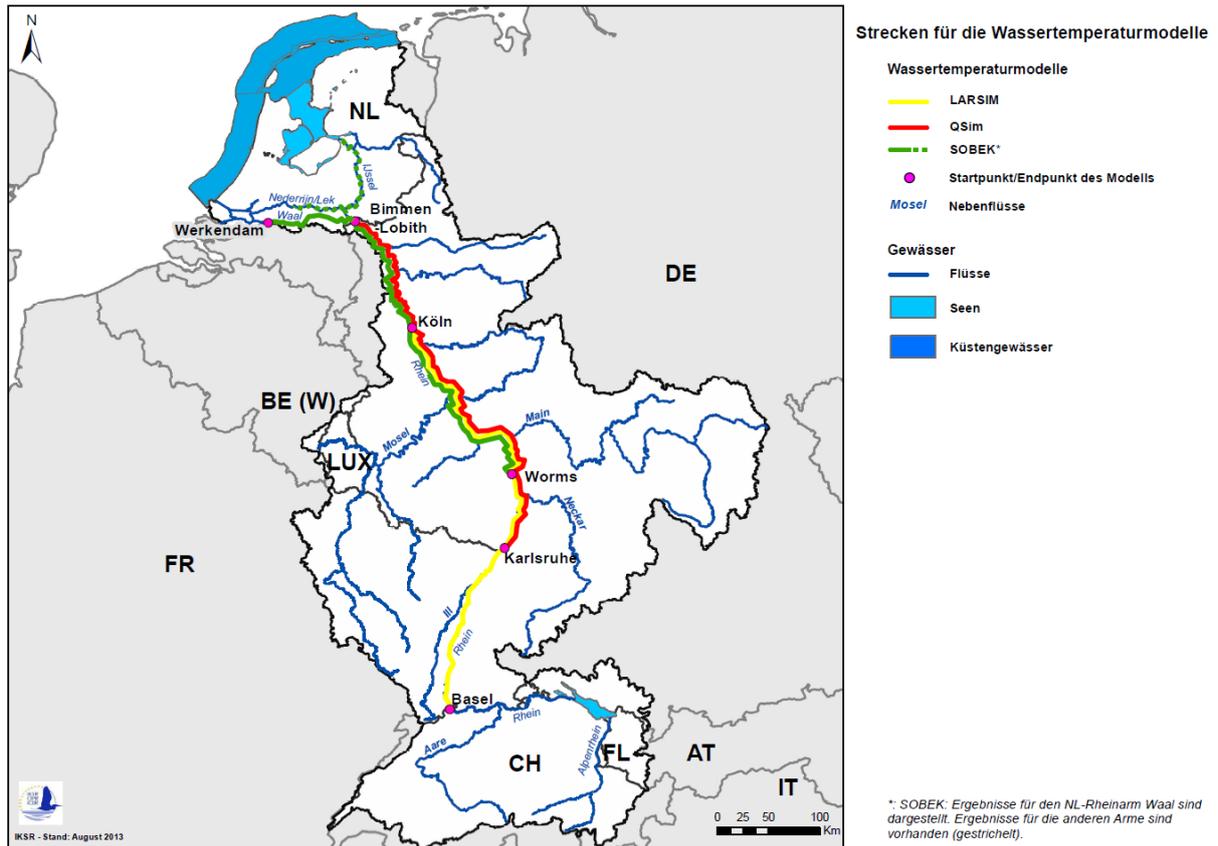


Abb. 1: Karte mit den Rheinstrecken, an denen die Modelle LARSIM, QSim und SOBEK eingesetzt werden

Als Referenz-Zeitraum wurde der Zeitraum von 2001–2010 festgelegt. Die Szenarienberechnungen beziehen sich auf die klimatische und hydrologische Szenarienstudie der IKSR (IKSR 2011) mit den Zeithorizonten 2021–2050 (nahe Zukunft, NF) und 2071–2100 (ferne Zukunft, FF), vgl. Tabelle 1. Der gesamte Referenz-Zeitraum der sich durch eine große Varianz in Wassertemperatur und Abfluss auszeichnet, wird für die zu diesen Szenarien gehörigen angepassten Bedingungen (Meteorologie und Abfluss) berechnet. So können Erkenntnisse über die durchschnittliche Veränderung der Wassertemperatur im Verhältnis zur Referenzsituation (wichtigster Schwerpunkt dieser Studie) und über die Bandbreite dieses Mittelwertes (Extreme) gewonnen werden.

Nr.	Name	Modellsimulation	Zeit- raum	Wärme- einleitungen	Luft	Sommer Abfluss	Winter Abfluss
1	Referenz (Ref50)	Referenz (aktuell) mit Wärmeeinleitungen	2001- 2010	50% genehmigt 2010	2001-2010	2001- 2010	2001- 2010
2	Ref. ohne Wärmeeinl. (Ref0)	Referenz (aktuell) ohne Wärmeeinleitungen	2001- 2010	keine Wärme- einleitung	2001-2010	2001- 2010	2001- 2010
3	NF+Qmax	Szenario für die nahe Zukunft mit maximalem Abfluss und Wärmeeinleitung wie in Ref50	2021- 2050	50% genehmigt 2010	Durch- schnittliche Sommer- Lufttemp. +1.5°C	+10%	+15%
4	NF+Qmin	Szenario für die nahe Zukunft mit minimalem Abfluss und Wärmeeinleitung wie in Ref50	2021- 2050	50% genehmigt 2010	Durch- schnittliche Sommer- Lufttemp. +1.5°C	-10%	0%
5	FF+Qmax	Szenario für die ferne Zukunft mit maximalem Abfluss und Wärmeeinleitung wie in Ref50	2071- 2100	50% genehmigt 2010	Durch- schnittliche Sommer- Lufttemp. +4.0°C	-10%	+15%
6	FF+Qmin	Szenario für die ferne Zukunft mit minimalem Abfluss und Wärmeeinleitung wie in Ref50	2071- 2100	50% genehmigt 2010	Durch- schnittliche Sommer- Lufttemp. +4.0°C	-25%	-5%

Tabelle 1: Ausgangssituation für die Modellsimulationen

Die Modellkalibrierungen erfolgten mit den tatsächlichen Wärmeeinleitungen und den hydrometeorologischen Messwerten für den Zeitraum 2001 bis 2010 oder mindestens mit zusammenhängenden Daten bestückten Teil-Zeiträumen innerhalb des Referenz-Zeitraumes, z.B. Juli–September 2003.

Der Vergleich der Validierungsergebnisse der drei Modelle LARSIM, SOBEK und QSim, zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Wassertemperaturen, wobei bei LARSIM die beste Übereinstimmung besteht.

Für die Szenarienbetrachtungen wurden aus den Ergebnissen der Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins (IKSR, 2011) Klimaveränderungsvektoren ermittelt und diese auf die meteorologischen Messdaten des Referenz-Zeitraumes aufgeprägt. Da die zukünftigen Wärmeeinleitungen in Menge und zeitlicher Verteilung nicht bekannt sind, wurden für alle Szenarien als Wärmeeinleitungen 50% der genehmigten Einleitewerte mit Stand 2010 angesetzt. Diese entsprechen in etwa den aktuellen Wärmeeinleitungen des Referenz-Zeitraumes. An den Modellrändern (Rhein bei Basel und zufließende Nebengewässer wie z.B. Neckar) wurden mit den Klimaparametern die Wassertemperaturen von LARSIM mittels Regressionsmodellen (Abhängigkeit der Wassertemperatur von Lufttemperatur und Abfluss) simuliert oder in SOBEK und QSim mittels eines vereinfachten Simulationsmodells abgeschätzt. Obwohl die drei Modelle verschiedene Methoden eingesetzt haben, sind die Unterschiede gering und haben kaum Bedeutung für die Ergebnisse.

Für SOBEK erfolgte die Ergebnisbereitstellung für den Streckenabschnitt von Worms bis zum Ende des Rheinarms Waal bei Werkendam. Die beiden anderen Rheinarme des Rheindeltas (IJssel bis Kampen und Lek bis Schoonhoven) wurden zwar ebenfalls modelliert, aber im vorliegenden Bericht nicht im Einzelnen dokumentiert. Die Modellberechnungen für die beiden anderen Rheinarme liefern vergleichbare Ergebnisse wie die Berechnungen für die Waal. Deshalb hat man sich in diesem Bericht dafür

entschieden, nur den wichtigsten Rheinarms in den Niederlanden zu behandeln, der etwa 2/3 des Wassers im gesamten Rheindelta mit sich führt.

Abbildung 2 zeigt ausgewählte Ergebnisse der Modellierungen. Dargestellt sind Wassertemperaturen der einzelnen Szenarien als Monatsmittelwerte für August.

Im Referenz-Zeitraum 2001-2010 zeigt der Verlauf der Wassertemperatur – ohne Berücksichtigung von Wärmeeinleitern (Ref0) – eine graduelle Erwärmung auf der Rheinstrecke von Basel bis Werkendam, wobei die Wassertemperatur am stärksten im Oberrhein bis Worms zunimmt. Die Berücksichtigung von 50% der genehmigten Wärmeinleitungen (Ref50) im Referenz-Zeitraum führt insbesondere stromabwärts von Worms im Mittel zu einer zusätzlichen Erwärmung von etwa 1°C.

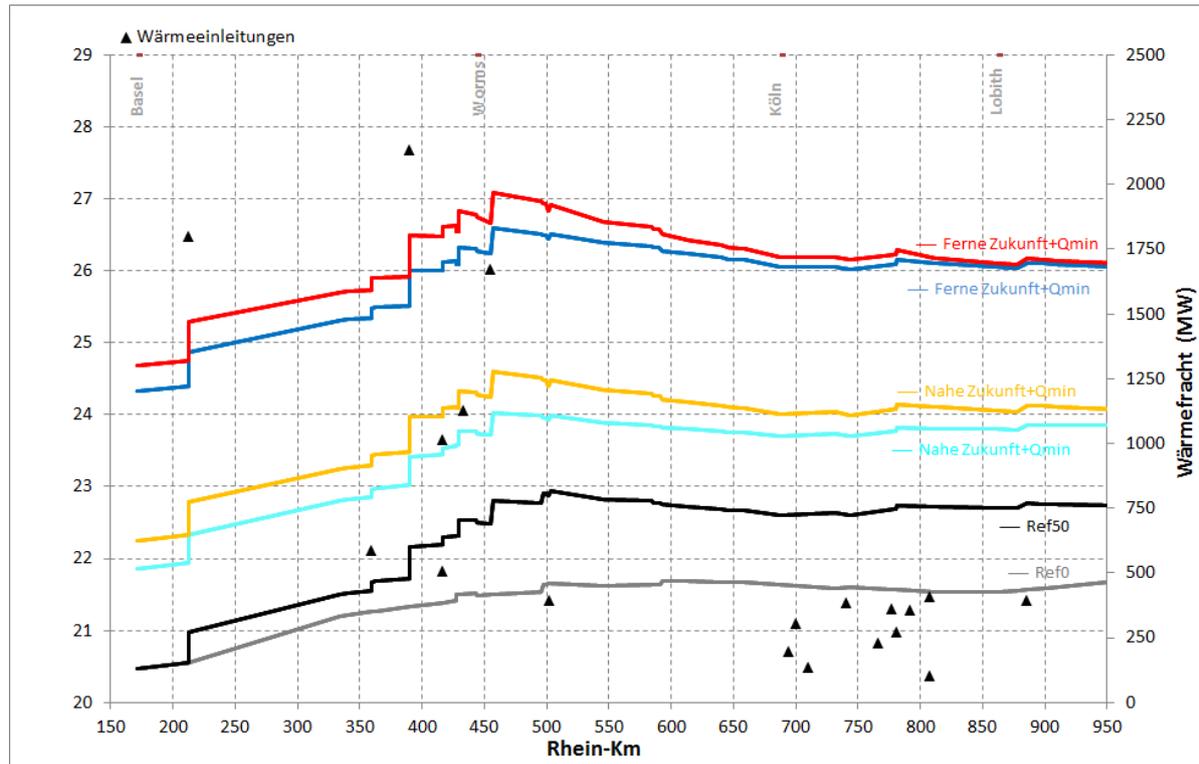


Abb. 2: Rhein-Längsschnitt der Wassertemperatur-Mittelwerte für den Monat August simuliert von LARSIM (Basel–Worms) und SOBEK (Worms–Werkendam).

In der nahen Zukunft NF (2021-2050) zeigen die Längsschnitte im Vergleich zum Referenz-Zeitraum eine um etwa 1,5°C erhöhte Wassertemperatur für den Monat August, während in der fernen Zukunft FF (2071-2100) die Zunahme der mittleren Augusttemperaturen im Rhein eine Größenordnung von 3,5°C einnimmt. In beiden Fällen ist die Erwärmung ursächlich klimatisch bedingt, ohne Zusatzeffekt durch signifikante Wärmeinleitungen. Die Zunahme der Wassertemperatur ist erwartungsgemäß bei hohem Abfluss ( $Q_{max}$ ) geringer als bei geringem Abfluss ( $Q_{min}$ ). Die aus den zwei unterschiedlichen Abflussannahmen für die Zukunft resultierenden Auswirkungen auf die Wassertemperaturen sind im Vergleich zu den absoluten Temperaturänderungen aufgrund der angenommenen Klimaänderungen gering.

Die natürliche Variabilität von Klima- und Abflusswerten während des Referenz-Zeitraumes führt auch zu signifikanten Streuungen bei den Wassertemperaturen. Vergleicht man bei Ref50 die mittleren Werte der Augustwerte mit den 90-Perzentil-Werten der Augustmonate im Zeitraum 2001-2010, so liegen letztere um 2°C über den mittleren Augustwerten 2001-2010; die Augustmittelwerte des Jahres 2003 liegen sogar um 3°C höher als die mittleren Augustwerte 2001-2010. Die mittleren Augustwerte des Jahres 2003 korrespondieren ungefähr mit den modellierten mittleren Augustwerten für

die ferne Zukunft FF, so dass die Wassertemperaturen aus dem August 2003 bereits als Maßstab für die zukünftigen Wassertemperaturen der fernen Zukunft FF angesehen werden können.

		Basel	Worms	Köln	Lobith
Ref50: Mittlere Augustwerte 2001-2010	T (°C)	20.5	22.5	22.6	22.7
Ref50: 90-Perzentil-Augustwerte 2001-2010	T (°C)	22.4	24.1	24.6	25.3
August 2003: Monatsmittelwert	T (°C)	23.8	26.5	25.6	25.5 <sup>7</sup>
FF+Qmax: Mittlere Augustwerte 2001-2010	T (°C)	24.3	26.3	26.1	26.0

Tabelle 2: Vergleich der Simulationsergebnisse (Ref50 und FF+Qmax aus Abb. 2) mit einer alternativen Typisierung des Referenz-Zeitraumes: 90-Perzentilwert der Augustmonate 2001-2010 und Monatsmittelwert für August 2003

Organismen können nur innerhalb bestimmter Temperaturbereiche ihre Lebenstätigkeit (z. B. Reproduktion) voll entfalten. Temperaturen >25°C können Stress bei Flora und Fauna verursachen. Wenn z. B. gewisse Fischarten über einen längeren Zeitraum Temperaturen >25 °C ausgesetzt sind, so ist ihre Lebenserwartung sehr viel geringer.

Die Abbildung 3 zeigt die aus den modellierten Szenarien ausgewerteten Tage, an denen die Wassertemperatur über 25°C liegen wird. In der nahen Zukunft NF zeigen die Simulationen, dass die Tage mit Wassertemperaturen über 25°C im Vergleich zum Referenzlauf Ref50 zunehmen, und zwar bei geringem Abfluss (Qmin) bis auf das Doppelte. In der fernen Zukunft FF werden die Tage mit Überschreitungen der 25°C stark zunehmen. Bei Worms wird z. B. gegenüber dem Referenzlauf Ref50 die Anzahl der Überschreitungstage pro Jahr von 11 auf 64 bis 74 in der fernen Zukunft zunehmen. D. h. in der fernen Zukunft FF wird im Mittel im Sommer während ca. 10 Wochen bei Worms die Wassertemperatur über 25°C liegen.

Abbildung 3 zeigt für die verschiedenen Szenarien die Überschreitungstage und die Bandbreite an, in die 80% der ermittelten Ergebnisse im Zeitraum 2001-2010 fallen. Diese Darstellung soll verdeutlichen, dass es in der nahen Zukunft NF weiterhin Jahre ohne Überschreitungen geben wird. Dagegen werden in der fernen Zukunft FF Jahre ohne Überschreitungen von 25°C ganz selten vorkommen. Ähnliches gilt auch für die ferne Zukunft (FF) für die Überschreitungen von 28°C.

Zudem wurden entsprechende Berechnungen zu Unterschreitungstagen unter 3 °C durchgeführt, da diese Phasen sich positiv auf die Ausbreitung Rhein-typischer Makrozoobenthosarten auswirken und wärmeliebende Neozoa zurückgedrängt werden. Im Vergleich zu Ref0 ohne Wärmeleinleitung werden sich die Unterschreitungstage in der nahen Zukunft auf dem Streckenabschnitt bei Worms von 10 auf 0 Tage verringern, auf dem Streckenabschnitt bis Lobith, der weniger durch Wärmeeinleitungen beeinflusst wird, bewegen sich die Unterschreitungstage bei Ref50 zwischen 4 und 6, die sich in der nahen Zukunft auf 1-3 und in der fernen Zukunft bis 0 bzw. 1 verringern werden.

<sup>7</sup> Der Monatsmittelwert der Abflüsse im August 2003 bei Lobith lag bei 1013 m<sup>3</sup>/s, was 55% niedriger ist als der mittlere Abfluss im Referenz-Zeitraum 2001-2010 (2264 m<sup>3</sup>/s) und 50% niedriger ist als der mittlere Abfluss im Szenario NF+Qmin und 40% niedriger als der mittlere Abfluss im Szenario FF+Qmin ist.

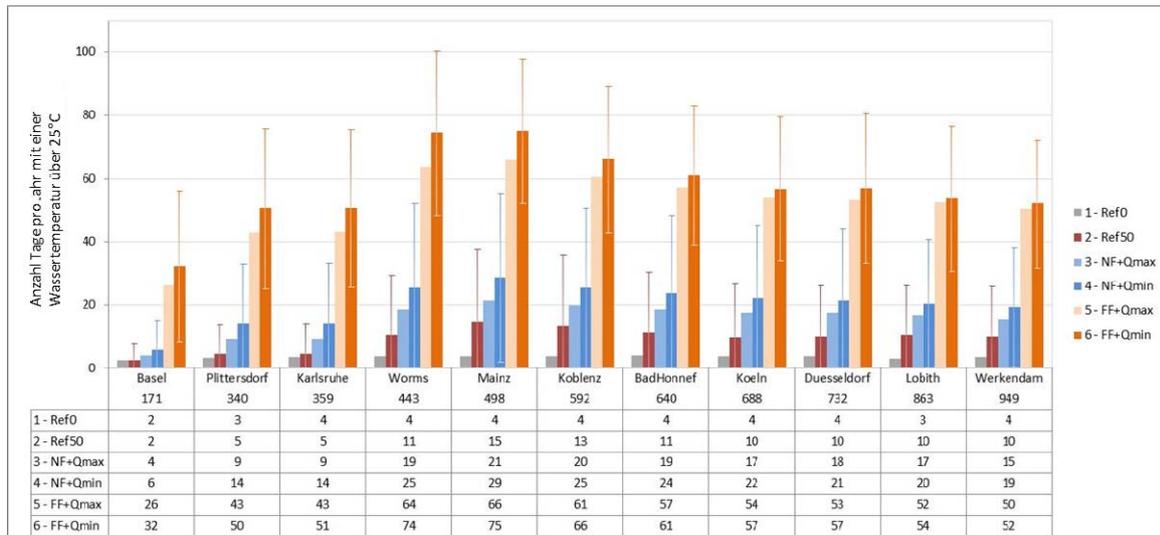


Abb. 3: Mittlere Anzahl Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur über 25°C im Rheinverlauf ermittelt mittels LARSIM (Basel-Worms) und SOBEK (Worms-Werkendam). Bandbreite in der Abbildung nur für die Szenarien Ref50, NF+Qmin und FF+Qmin angeben, zeigt 80% der ermittelten Variation im Zeitraum 2001 - 2010. Das bedeutet, dass 80% der ermittelten Werte in diese Bandbreite fallen.

Diese Zusammenfassung gibt einen raschen Überblick über die relevanten Ergebnisse des englischsprachigen Berichts „Estimation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development“ (vgl. CIPR Report No. 214). Die angegebenen Literaturhinweise sind diesem umfassenden Bericht zu entnehmen.