

# **Einfluss der Wärmeeinleitungen auf die Wassertemperatur des Rheins**

**Zusammenfassung**

**Niederländische Delegation**

**August 2006**

## Einleitung

Die Wassertemperatur des Rheins wird durch Witterungseinflüsse, Wassertemperatur, Abfluss der Nebenflüsse und Grundwasser, wie auch durch Kühlwassereinleitungen beeinflusst. In den vergangenen Jahren war das Problem der Kühlwassereinleitungen und der hohen Wassertemperaturen des Rheins ein regelmäßig wiederkehrendes Thema. Im Rheineinzugsgebiet stellt die Kühlwasserproblematik ein grenzüberschreitendes Problem dar. Wenn das Flusswasser flussaufwärts zu stark erwärmt wird, bedeutet das für die weiter stromabwärts gelegenen Industriebetriebe und den Energiesektor eingeschränkte Möglichkeiten zur Kühlwassereinleitung. In der Arbeitsgruppe Wasserqualität/Emissionen der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) werden derzeit die Angaben zu Wärmeeinleitungen in das Rheineinzugsgebiet aktualisiert. Die Niederlande haben angeboten, auf der Grundlage dieser Information richtungweisende Berechnungen der Auswirkungen der wichtigsten Kühlwassereinleitungen auf die Rheinwassertemperatur durchzuführen.

Im Jahr 2005 wurde ein Quick scan [WL, 2005] der Auswirkungen der Kühlwassereinleitungen auf die Rheinwassertemperatur durchgeführt. Daraus ging hervor, dass in einem warmen und trockenen Sommer wie in 2003 die zulässigen Kühlwassereinleitungen bei Lobith zu einem Anstieg der Wassertemperatur um 2,2°C führen. Im Nachgang zu diesem Quick scan wurde eine Empfindlichkeitsanalyse durchgeführt, deren wichtigste Ergebnisse in der vorliegenden Zusammenfassung vorgestellt werden.

## Ziel der Untersuchung

Die Untersuchung soll Einsicht in die natürliche witterungsbedingte Erwärmung des Rheinwassers geben und anhand von Modellsimulationen (Szenarien) die Auswirkung der Kühlwassereinleitungen der Betriebe in der Schweiz, Deutschland, Frankreich und den Niederlanden auf die Rheinwassertemperatur in dem besonders trockenen und warmen Sommer des Jahres 2003 quantifizieren.

## Methode

Die Auswirkungen auf die Wassertemperaturen des Rheins wurden mit Hilfe eines zweiteiligen Modellinstruments berechnet, das den Rhein und einige große Nebenflüsse vom Bodensee bis zur Nordsee umfasst. Der eine Teil dieses Instruments betrifft die Flussstrecke vom Bodensee bis Lobith, einschließlich der Nebenflüsse Aare, Neckar, Main und Mosel (auf der Grundlage des Rhein-Alarmmodells), das andere das nationale Temperaturmodell (SOBEK) für den Flussabschnitt von Lobith bis zur Nordsee und umfasst alle Rheinarme. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird für den niederländischen Teil nur der Arm von Lobith nach Maassluis betrachtet. Die Qualität des Modellinstruments wurde anhand der Messdaten für die Wassertemperatur des Rheins im Jahr 2003 (Juni – September) getestet. Bei der Modellkalibrierung wurde die Abkühlung aufgrund zufließenden (kühleren) Grundwassers und der Wärmeübertragung in den Boden in Austausch mit der Luft verarbeitet. Die Berechnungen der Wassertemperatur für den Sommer 2003 stellen das Bezugsszenario dar. Nachstehend werden sechs verschiedene Szenarien (s. Tabelle 1) mit unterschiedlichen Kühlwassereinleitungen durchgerechnet. Darüber hinaus wurde in einer Empfindlichkeitsanalyse untersucht, wie sich Veränderungen von Lufttemperatur und Abfluss auf die Ergebnisse der Modellberechnung auswirken. Die Ergebnisse werden für einige Messstellen (Karlsruhe, Mainz, Lobith und Maassluis) dargestellt (s. Anlage 1).

## Eingegebene Daten

### *Abfluss*

Den Berechnungen liegt der Abfluss des Rheins im trockenen und warmen Sommer 2003 zu Grunde. Das Temperaturmodell des Rhein Alarmmodells rechnet mit monatlich unveränderten Abflüssen und Wasserständen. Dabei wurde ein Abfluss gewählt, der 90 % der niedrigsten Werte des Tagesabflusses bei Lobith im betroffenen Monat entspricht. Das Nationale Temperaturmodell für die Niederlande rechnet mit zeitlich schwankenden Abflüssen.

### *Wassertemperatur Nebenflüsse*

Sofern möglich, basiert die Wassertemperatur der Nebenflüsse auf Messdaten. Diese Daten wurden den Internetseiten der DK Rhein, dem schweizerischen Hydrologischen Jahrbuch 2003 und der französischen Website der europäischen Wasserrahmenrichtlinie 2015 Rhein-Maas entnommen. Für Nebenflüsse, für die keine Daten vorlagen, wurde davon ausgegangen, dass die Wassertemperatur der des nächstgelegenen Nebenflusses entspricht, für den Daten vorlagen.

### *Kühlwassereinleitungen*

Die für das Modell betrachteten Wärmeeinleitungen in das Rheineinzugsgebiet stammen aus der Bestandsaufnahme der Einleitungsgenehmigungen der AG Wasserqualität/Emissionen der IKSR (IKSR, 2004; DBRM, 2005). Die niederländischen Einleitungen wurden 2006 inventarisiert (WL | Delft Hydraulics, in Vorbereitung). Infolge der Einleitungsbeschränkungen im Sommer 2003 liegen die tatsächlich eingeleiteten Frachten unter den genehmigten Einleitungen. Auf der Grundlage von Presseberichten geht diese Studie der Kühlwassereinleitungen von einer Einleitungsbeschränkung von 20 % in Süd- und Mitteldeutschland und von 50 % stromabwärts von Koblenz aus. Diese Einleitungsbeschränkungen werden nur auf Szenario 1 für den Monat August angewandt. Für die Niederlande liegen die tatsächlich eingeleiteten Wärmefrachten einer Reihe Stellen vor, die für die Berechnungen mit dem nationalen Temperaturmodell verwendet wurden.

### *Meteorologie*

Das Temperaturmodell verwendet Lufttemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Sonnenstunden und Gesamtstrahlung als Eingabedaten für die Berechnung der Hintergrundtemperatur des Flusswassers. Abgesehen von der Gesamtstrahlung stammen die Daten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Königlichen Niederländischen Meteorologischen Institut (KNMI). Die Gesamtstrahlung wurde anhand eines empirischen Vergleichs berechnet. Für diese Studie stehen mehr Daten zur Verfügung, als für den Quick Scan. Dies hat Auswirkungen auf die Ergebnisse.

## Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der Szenarioberechnung zusammen, wobei die Auswirkungen auf die Wassertemperatur im Vergleich zum Bezugsszenario dargestellt werden. Das Bezugsszenario (Sommer 2003, **ohne** Einleitungsbeschränkungen) weist signifikante Auswirkungen der Kühlwassereinleitungen auf die Wassertemperatur auf: bei Karlsruhe schwankt der Temperaturanstieg aufgrund der Kühlwassereinleitungen zwischen 1,3 und 2,4 °C, bei Mainz, unterhalb der größten Kühlwassereinleitung, liegen die Werte zwischen 3,7 und 6,2 °C. Bei Lobith ist ein geringerer Schwankungsbereich zu verzeichnen: 2,4 - 3,5 °C. Dieser Schwankungsbereich liegt über den Quick scan Ergebnissen. Er ist auf die Veränderung der Dateneingabe, beispielsweise Gesamtstrahlung und Windgeschwindigkeit zurückzuführen. Weiter stromabwärts, bei Maassluis, schwankt der Temperaturanstieg nur zwischen 0,9 und 1,5 °C. An allen Messstellen wurden die niedrigsten Werte im September ermittelt. Die höchsten Werte wurden an allen Messstellen im August ermittelt.

Tabelle 1: Szenarien für die Empfindlichkeitsanalyse: Schwankungen der Wassertemperatur im Hinblick auf das Bezugsszenario an vier Messstellen im Rheineinzugsgebiet. Die Szenarien in rot bezeichnen einen Anstieg der Flusswassertemperatur, während die übrigen einen Temperaturabfall zeigen

Szenario	Schwankungen in der Wassertemperatur (°C) im Vergleich zum Bezugsszenario ( $\Delta T$ Juni – September)			
	Karlsruhe	Mainz	Lobith	Maassluis
0 Bezugsberechnung Sommer 2003	-	-	-	-
1 Sommer 2003 mit Einleitungsbeschränkungen*	< 1	< 1,8	< 0,9	< 0,01
2 Halbierung Einleitungen Bodensee-Mannh.	0,6 - 1,2	0,9 - 1,5	0,4 - 0,5	< 0,2
3a Halbierung Einleitungen Mannh. - Koblenz	-	0,9 - 1,6	0,4 - 0,5	< 0,2
3b Keine Einleitungen Mannh. - Koblenz	-	1,8 - 3,2	0,8 - 1,1	0,2 - 0,4
3c Zunahme Einleitungen Mannh- Koblenz um 30 %	-	0,5 - 0,9	0,2 - 0,3	< 0,1
4 Halbierung Einleitungen Strecke Koblenz-Nordsee	-	-	0,4 - 0,6	< 0,2
5 Anstieg der Lufttemperatur um 1°C	0,4 - 0,6	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	0,5 - 0,6
6a Auswirkung eines niedrigeren Abflusses bis minimalen Tagesabflusses pro Monat	< 0,4	0,5 - 1	< 0,3	-
6b Auswirkung eines höheren Abflusses bis maximalen Tagesabflusses pro Monat	< 0,2	0,3 - 0,5	< 0,2	-

\*Auswirkung auf die Flusstemperatur im August

#### Szenario 1:

Einleitungsbeschränkungen wie in Szenario 1 führen zu einem merkbaren Rückgang der Wassertemperatur des Rheins. Der größte Temperaturrückgang im Vergleich zum Bezugsszenario ist bei Mainz (1,8 °C) zu verzeichnen, aber auch bei Koblenz (< 1°C) und Lobith (<0,9 °C) sind die Auswirkungen deutlich. Bei Maassluis zeichnet sich kein derartiger Effekt ab, da im niederländischen Teil des Modells die Einleitungsbeschränkungen bereits in das Bezugsszenario integriert worden sind. Aus den Abbildungen in Anlage 2 gehen die Auswirkungen der Einleitungsbeschränkungen gegenüber dem Bezugsszenario bei Karlsruhe, Mainz und Lobith hervor.

#### Szenario 2 und 3:

Die insgesamt größte Gesamtwärmefracht (ca. 14.000 MW) ist auf der Strecke Bodensee-Mannheim zu verzeichnen und verteilt sich über den gesamten Streckenabschnitt. Auf dem Streckenabschnitt Mannheim-Koblenz liegt eine vergleichbare Wärmefracht vor (ca. 12.000 MW). Umfang und Verteilung der Wärmefracht sind in der Abbildung in Anlage 3 dargestellt. Veränderungen in der Menge eingeleiteten Kühlwassers auf der Strecke Bodensee-Koblenz beeinflussen die Wassertemperatur deutlich (Szenario 2 und 3). Diese Auswirkungen sind am größten auf dem Streckenabschnitt Worms-Düsseldorf (s. **Abbildung 2 Verlauf der mittleren Flusstemperatur** Abbildung sind die Halbierung der Einleitungen (Szenario 3a), keine Einleitungen (Szenario 3b) und die Zunahme der Einleitungen um 30 % in Anlage 4). Unterhalb von Lobith nehmen die Auswirkungen ab und bei Maassluis sind sie kaum noch zu verzeichnen, außer in dem Szenario, in dem keine Einleitungen stattfinden. Die Auswirkungen der Wärmeverteilung hängen vom Umfang der Wärmeeinleitungen und der Verteilung der Einleitungspunkte im Streckenverlauf ab. Dies erklärt, warum der Temperaturanstieg in Szenario 2 mit dem in Szenario 3 vergleichbar ist.

Die Ergebnisse dieser beiden Szenarien können nicht addiert werden. Demnach ist die bei Lobith festgestellte Auswirkung einer Halbierung der Einleitungen auf der Strecke Bodensee-Koblenz **nicht** mit der des Temperaturrückgangs von Szenario 2 und 3 bei Lobith vergleichbar. Bei den Abkühlungsprozessen spielen Abnahme der Wärme und Abkühlung durch Windeinwirkung eine wichtige Rolle. Diese Komponenten sind nicht gleichmäßig über das Gebiet verteilt. Aus Szenario 6 geht beispielsweise hervor, dass die Temperatursprünge in der Nähe der Wärmeeinleitungen größer werden. Unterhalb der Einleitungsstellen nimmt die Wassertemperatur ganz allmählich als Folge des Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre ab.

Die Ergebnisse aus Szenario 3 (Halbierung der Einleitungen) und Szenario 3b weichen um einen Faktor 2 von einander ab. Dies gilt für den gesamten Streckenabschnitt Mainz – Maassluis und weist auf ein lineares Verhältnis zwischen der Veränderung der Einleitungen auf dieser Strecke und den Auswirkungen auf die Flusstemperatur im Verhältnis zum Bezugsszenario hin. Die Auswirkung einer Zunahme der Einleitungen um 30 % auf diesem Streckenabschnitt (Szenario 3c) bedeutet einen Temperaturanstieg im Vergleich zum Bezugsszenario. Der maximale Anstieg in diesem Szenario liegt bei 0,9 °C bei Mainz und 0,3 °C bei Lobith.

#### Szenario 4:

Wie erwartet, hat die Halbierung der Einleitungen auf dem Streckenabschnitt Koblenz-Nordsee deutliche Auswirkungen auf die Flusstemperatur im Streckenabschnitt Koblenz-Düsseldorf. Deutliche Auswirkungen sind auch bei Lobith zu verzeichnen (s. **Abbildung 3 Verlauf der mittleren Flusstemperatur** (Temp) und mittlerer Temperaturanstieg (Mod Temp) des Rheins in Szenario 4 im Vergleich zum Bezugsszenario. In lila: kumulierte Verteilung der Genehmigungen für Wärmeeinleitungen in den Rhein bis Lobith. In grün: Wärmefracht nach Szenario.

in Anlage 4). Ab hier nehmen die Auswirkungen ab und bei Maassluis liegt der Unterschied in der Flusstemperatur im Verhältnis zum Bezugsszenario unter 0,2 °C.

#### Szenario 5:

Im Vergleich zum Bezugsszenario führt der Anstieg der Lufttemperatur um 1 °C zu einem gleichmäßig über den gesamten Streckenabschnitt verteilten Anstieg der Wassertemperatur in der Größenordnung 0,4 bis 0,7 °C. Der Anstieg der Lufttemperatur hat nur Auswirkungen auf die Hintergrundtemperatur, nicht aber auf den Temperaturanstieg infolge der Kühlwassereinleitungen.

#### Szenario 6:

Die Auswirkungen der Abflussschwankungen sind im Vergleich zum Bezugsszenario kleiner als erwartet (< 0,3 °C bei Lobith und < 0,4 °C bei Karlsruhe), außer wenn die Messstelle ganz in der Nähe der Einleitungsstelle liegt, wie z. B. in Mainz. In letztgenanntem Fall ist der Temperaturunterschied größer als im Bezugsszenario.

## Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen dieser Untersuchung sind:

- Eine Minderung der Wärmefracht führt zu einer Temperaturabnahme bei Lobith. Die in warmen und trockenen Perioden ausgesprochenen Einleitungsbeschränkungen haben sicher Auswirkungen auf die Wassertemperaturen anderswo und können daher extra Spielraum bieten, um Störfällen im Einzugsgebiet zuvor zu kommen. Signifikante Auswirkungen einer Änderung der Einleitungen sind vor allem in bis zu hundert Kilometer von der Einleitungsstelle zu verzeichnen. Auswirkungen sind aber auch noch in bis zu 300-350 km Entfernung spürbar.
- Unterhalb der Einleitungsstellen (ab Worms) nimmt die Wassertemperatur ganz allmählich als Folge des Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre und der Abflusszunahme ab. Auf diesem Streckenabschnitt wird noch viel Wärme eingeleitet, aber es ist deutlich, dass diese Einleitungen im Verhältnis zur Wassertemperatur bei Worms zu keinem Anstieg der Wassertemperatur führen.
- Die Kühlwassereinleitungen (ohne Einschränkungen) leisten einen erheblichen Beitrag zur Erwärmung des Flusswassers. Je nach Einleitungsstelle und Zeitpunkt schwankt die Erwärmung zwischen 1 und 6 °C (s. Abbildungen in Anlage 2).
- Aufgrund der Kühlwassereinleitungen weist die Temperaturkurve des Rheins an einigen Stellen Temperatursprünge auf. An einigen Stellen liegen diese Sprünge bei mehr als 1,5 °C (s. auch Abbildung 1, Anlage 4). Derartige Temperatursprünge können für Salmoniden problematisch sein.

- Temperaturanstiege infolge von Kühlwassereinleitungen scheinen jedoch nur eine kleine Komponente der gesamten Temperaturverhältnisse des Rheins darzustellen. Aber naturgegebene Bedingungen (Wetterverhältnisse und Hydrologie) können nicht gesteuert werden, wohl aber der Temperaturanstieg durch Kühlwassereinleitungen.
- Die natürlichen Schwankungen der Wassertemperatur sind vor allem auf meteorologische Faktoren wie Strahlung, Wind und Lufttemperatur zurückzuführen. Das Modell reagiert weniger empfindlich auf Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und Sonnenstunden.

## Literaturhinweise

Délégation de bassin Rhin-Meuse DBRM (2005). *Eléments de mise à jour de l'inventaire des rejets thermiques sur le Rhin. Informations de la délégation française à destination du GT S de la CIPR le 24/10/05*. 05 123 NT VB DBRM.

DK Rhein: <http://www.dk-rhein.de>

EU-Wasserrahmenrichtlinie 2015 Rhein-Maas:

[http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/fr/etat/district-rhin/page\\_03\\_02\\_08\\_01\\_c.php](http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/fr/etat/district-rhin/page_03_02_08_01_c.php)

Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2003:

(<http://www.bwg.admin.ch/service/hydro/pdf/80450003.pdf>).

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins IKSR (2004) *Inventar der Wärmeeinleitungen/ Inventaire des rejets thermiques*. S 19-04d.doc.

WL Delft Hydraulics, 2005. *Quick scan warmtelozingen Rijnstroomgebied*.

WL Delft Hydraulics, 2006. *Verificatie SOBEK landelijk temperatuurmodel*. Bericht in Vorbereitung

Anlage 1



Anlage 2

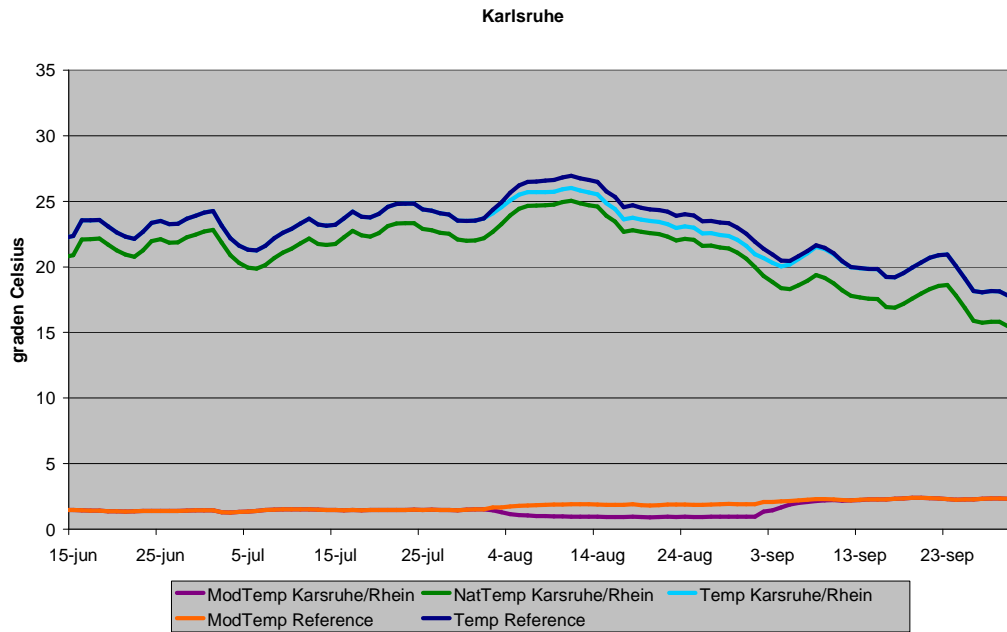


Abbildung 1: Verlauf der mittleren Flusstemperatur (Temp) und mittlerer Temperaturanstieg (Mod Temp) des Rheins in Szenario 1 im Vergleich zum Bezugsszenario bei Karlsruhe.

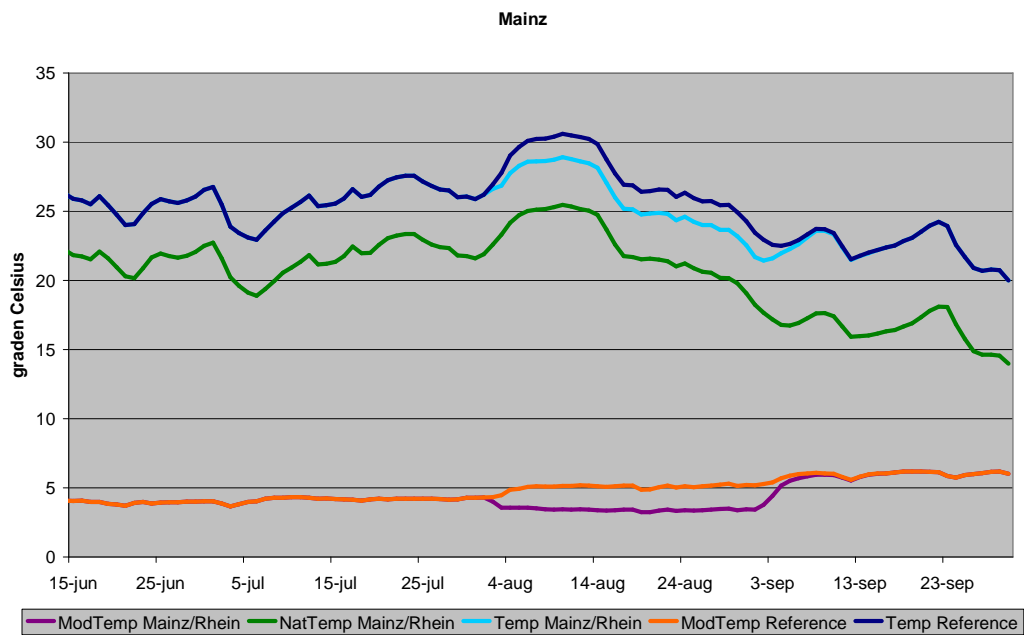


Abbildung 2: Verlauf der mittleren Flusstemperatur (Temp) und mittlerer Temperaturanstieg (Mod Temp) des Rheins in Szenario 1 im Vergleich zum Bezugsszenario bei Mainz,.

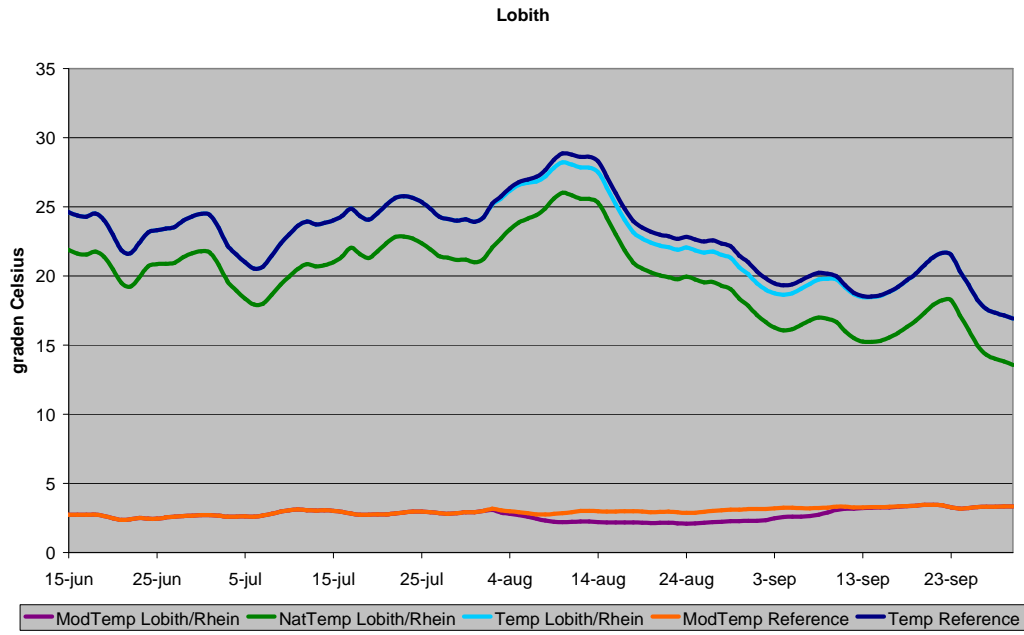
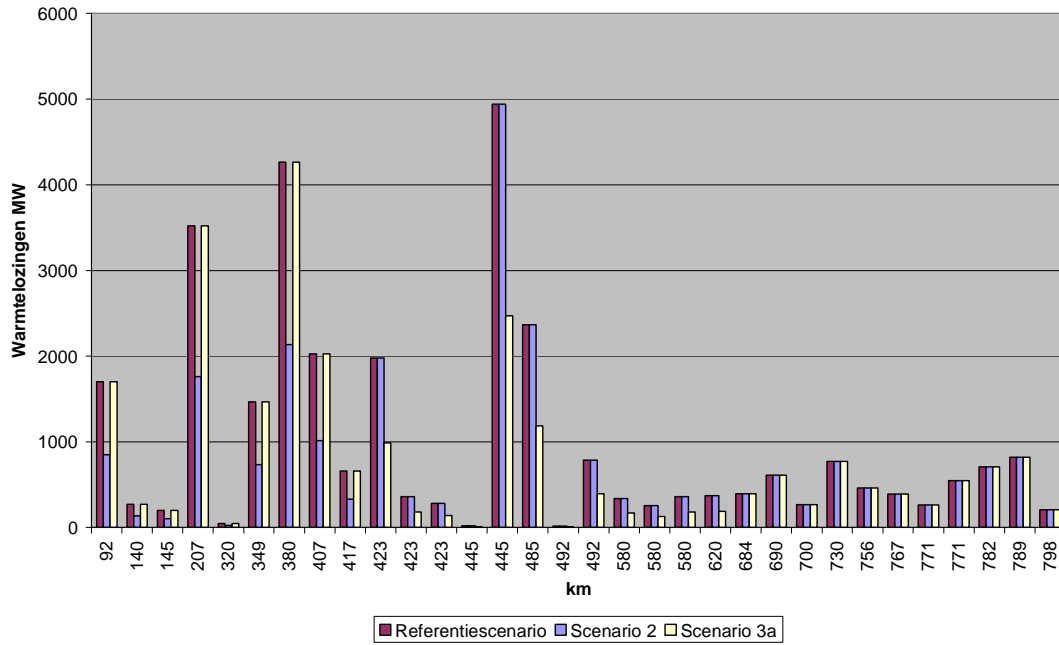


Abbildung 3: Verlauf der mittleren Flusstemperatur (Temp) und mittlerer Temperaturanstieg (Mod Temp) des Rheins in Szenario 1 im Vergleich zum Bezugsszenario bei Lobith.

Anlage 3  
Verteilung und Umfang der Wärmefracht im Rhein.



Anlage 4

In den nachfolgenden Abbildungen sind Mittelwerte der Wassertemperatur und des Temperaturanstieg des Rheins im Sommer 2003 für Flusskilometer ausgewiesen. Es fällt auf, dass die Temperaturkurve unterhalb von Worms fällt. Die Ursache dafür liegt in günstigeren Witterungsbedingungen und einer größeren Abflusszunahme (Nebenflüsse).

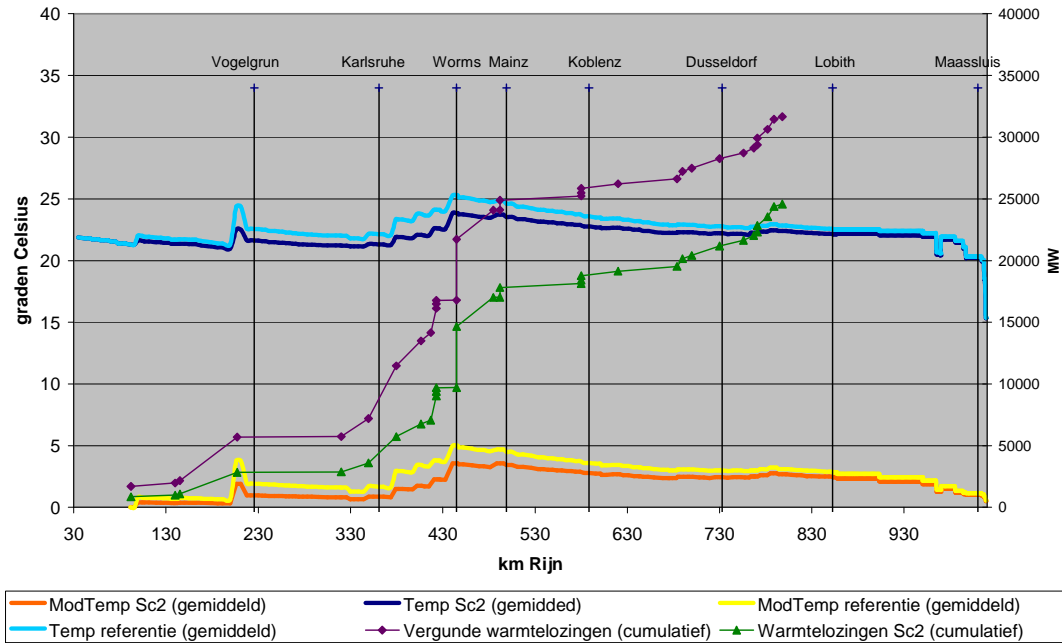


Abbildung 1 Verlauf der mittleren Flusstemperatur (Temp) und mittlerer Temperaturanstieg (Mod Temp) des Rheins in Szenario 2 im Vergleich zum Bezugsszenario. In lila: kumulierte Verteilung der Genehmigungen für Wärmeeinleitungen in den Rhein bis Lobith. In grün: Wärmefracht nach Szenario.

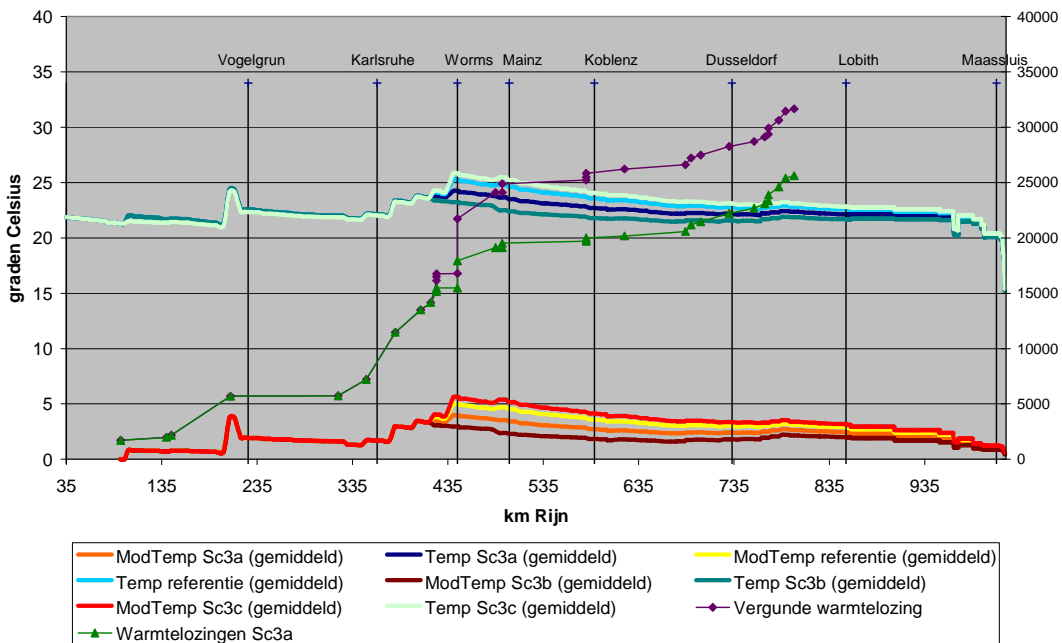


Abbildung 2 Verlauf der mittleren Flusstemperatur (Temp) und mittlerer Temperaturanstieg (Mod Temp) des Rheins in Szenario 3 im Vergleich zum Bezugsszenario. In dieser Abbildung sind die Halbierung der Einleitungen (Szenario 3a), keine Einleitungen (Szenario 3b) und die Zunahme der Einleitungen um 30 % (Szenario 3c) auf dem Streckenabschnitt Mannheim-Koblenz dargestellt. In lila: kumulierte Verteilung der Genehmigungen für Wärmeeinleitungen in den Rhein bis Lobith. In grün: Wärmefracht nach Szenario 3a.

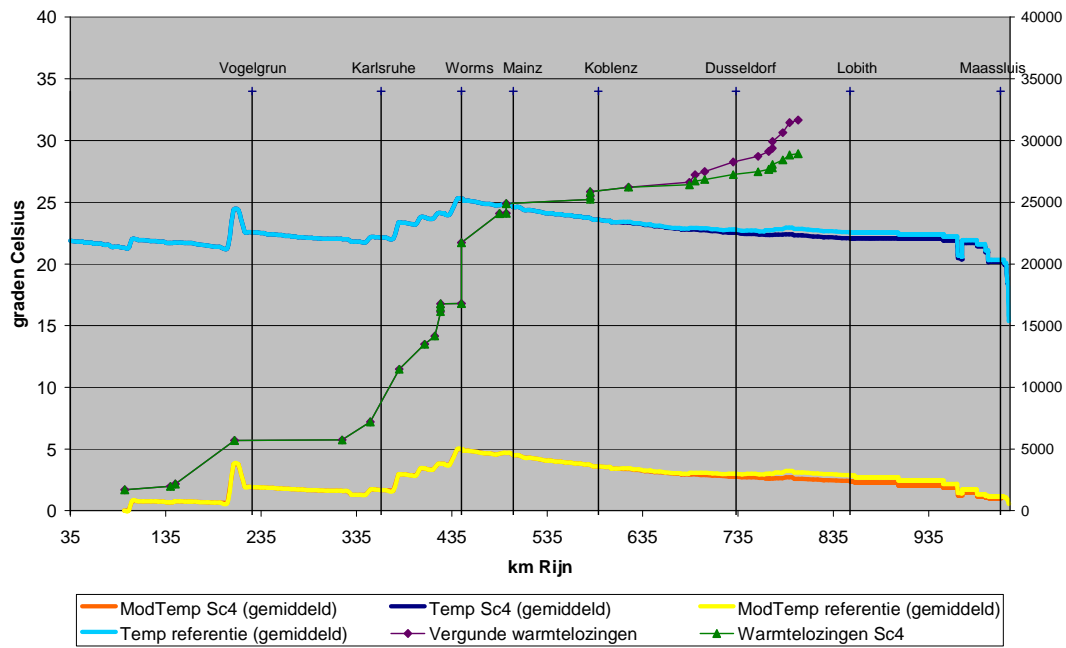


Abbildung 3 Verlauf der mittleren Flusstemperatur (Temp) und mittlerer Temperaturanstieg (Mod Temp) des Rheins in Szenario 4 im Vergleich zum Bezugsszenario. In lila: kumulierte Verteilung der Genehmigungen für Wärmeeinleitungen in den Rhein bis Lobith. In grün: Wärmefracht nach Szenario.