

# Ein Wärmesimulationsmodell für den hessischen Main

W3/  
W1

GERHARD BRAHMER & WERNER TEICHMANN

## 1 Anlass und Zielsetzung

Die in den letzten Jahren, insbesondere im Jahr 2003 und 2006 aufgetretenen hohen sommerlichen Lufttemperaturen haben auch zu einer Erhöhung der Wassertemperaturen im Main geführt. Durch die Überlagerung geringer Abflüsse und hoher Lufttemperaturen wurden dabei Grenzwerte der Fischgewässerverordnung (Wassertemperatur 28 °C) erreicht und teilweise überschritten. Es ist somit zu befürchten, dass bei weiteren und längeren Überschreitungen des Grenzwertes Schädigungen in der Fließgewässergemeinschaft auftreten. Biochemische Reaktionen (z. B. Stoffwechselaktivitäten) verdoppeln bis vervierfachen sich bei einer Temperaturerhöhung um 10 Grad. Somit führen schon geringe Temperaturdifferenzen – je nach biologischer Art und ihrem Temperaturanspruch – entweder zu extrem hohen oder nur zu geringen Änderungen z. B. in der Stoffwechselintensität und damit zu artspezifisch unterschiedlich starken Reaktionen auf Temperaturänderungen. In der Regel ist die Biozönose (Artenzusammensetzung) an das am Standort herrschende Temperaturregime angepasst. Längeres und häufigeres Über- bzw. Unterschreiten der herrschenden Temperaturverhältnisse führt daher zu einem Verschwinden temperaturempfindlicher Arten.

Hinsichtlich der Höhe der maximalen Wassertemperatur (Grenztemperatur) ist der Main als Fischgewässer klassifiziert und unterliegt somit den dazu getroffenen Regelungen in der EG-Fischgewässerrichtlinie (78/659/EWG) und der hessischen Fischgewässerverordnung vom 24. April 1997 (GVBl. I S. 87), zuletzt geändert mit Verordnung vom 13. Mai 1998 (GVBl. I S. 209). Für den als „Fluss“ (im Ggs. zu „Bach“) eingestuften Untermain gilt ein Temperaturgrenzwert von 28 Grad, der durch Abwärmeeinleitungen nicht überschritten werden darf. Daraus und aus aktuellen Fragestellungen zur Wärmelastplanung bei Genehmigungsprüfungen von Wärmeeinleitern ergab sich die Erfordernis der Erstellung eines Wärmehaushaltmodells für den Main. Ein vorliegender Wärmelastplan für den Main datiert bereits aus dem Jahr 1973 [1], wenngleich interne Wärmelastrechnungen auch für spätere Zustände untersucht wurden. Nach Prüfung der Möglichkeit einer eigenen Modellentwicklung und der Übertragung von bestehenden Modellen konnte auf ein Angebot der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zurückgegriffen werden, das die Bereitstellung einer Software und die Erstaufstellung des Modells beinhaltete.

## 2 Das Wärmesimulationsmodell Main

### 2.1 Das Modell QSIM

Bei dem eingesetzten Modell QSIM handelt es sich um ein mathematisches Gewässergütemodell, das die komplexen chemischen und biologischen Vorgänge in Fließgewässern deterministisch verknüpft. Es wurde vor allem zur Untersuchung der Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen auf die Wasserbeschaffenheit entwickelt. Das Modell wurde über die letzten 20 Jahre kontinuierlich fortgeschrieben und hat eine Vielzahl von Anwendungen erfahren [2]. Da für die meisten hydrochemischen und biologischen Prozesse die Temperatur eine maßgebliche steuernde Größe ist, stellt die Modellierung der Wassertemperatur eine wesentliche Grundlage des Gewässergütemodells dar. Für die Wärmehaushaltssimulation des Mains wurden aus dem modular aufgebauten Modell lediglich der Hydraulikbaustein und der Temperaturbaustein aktiviert und mit den Randbedingungen des hessischen Mains implementiert. Die Wassertemperatur wird als gleichverteilt über den gesamten Gewässerquerschnitt (eindimensional) betrachtet. Als antreibende Kräfte wirken die Abfluss- und Wassertemperaturdaten an den Modellrändern (Zufluss, Nebenflüsse und Einleiter) und die meteorologischen Daten für das Modellgebiet. Der Abfluss wird dabei durch Lösung der Saint-Venant Gleichungen instationär berechnet. Der Wärmehaushalt wird im Wesentlichen durch die Bilanzierung der eingeleiteten Wärme (Nebengewässer und Einleiter), der Strahlungswärme, der Verdunstungs-

wärme und der Konvektionswärme bestimmt. Die dynamische Modellierung erfolgt dabei mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde, je nach Datenlage können so ganze Jahresgänge berechnet werden.

### 2.2 Modellsegmentierung und Randbedingungen

Der zu simulierende Gewässerabschnitt des Mains vom Pegel Mainflingen nahe der bayerisch-hessischen Grenze bei km 76,4 bis zur Mündung in den Rhein bei km 0 wurde entsprechend der sechs Stau-stufen in sieben Segmente unterteilt. Die Segmente werden geometrisch durch Querprofile des Mains abgebildet, die im Abstand von 200 m ins Modell aufgenommen wurden. Querprofile (Abb. 1) und hydraulische Rauigkeitsbeiwerte konnten aus dem Programm K-Wert der BfG übernommen werden, mit dem in einem früheren Projekt Wasserspiegellagenberechnungen für den Main ermittelt wurden [3]. Als obere Randbedingung gehen der Abfluss und die Wassertemperatur am Pegel Mainflingen in das Modell ein. Als wichtigste Zuflüsse werden weiterhin die Kinzig mit dem Pegel Hanau und die Nidda mit dem Pegel Bad Vilbel berücksichtigt (Abfluss und Temperatur). Die Wärmeeinleiter (teils mit, teils ohne vorherige Wasserentnahme aus dem Main) wie Kraftwerke (5), Industriebetriebe (6) und Kläranlagen

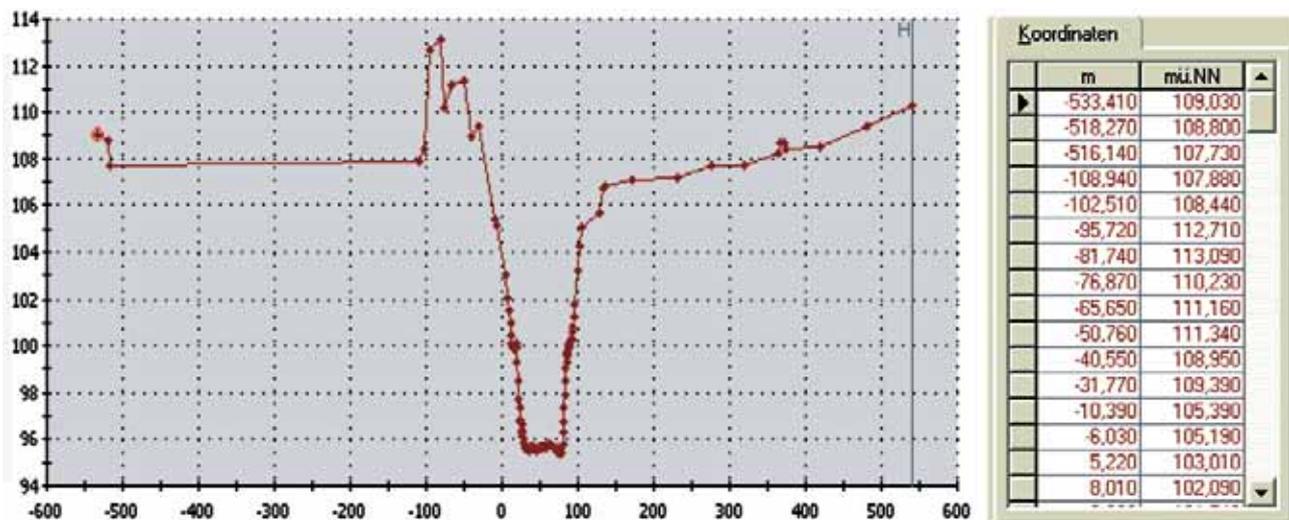


Abb. 1: Mainquerprofil bei Main-km 76,4.

(5) werden entsprechend ihrer Lage am Main in das entsprechende Segment eingebaut (Abb. 2). Für die meteorologischen Randbedingungen werden Daten zur Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Globalstrahlung und Angaben zur Bewölkung benötigt.

### 2.3 Datenbeschaffung und Datenaufbereitung

Nach der Vorgabe der Datenformate konnten die erforderlichen Eingangsdaten für die kompletten Jahre 2003 und 2006 in i.d.R. stündlicher Auflösung erhoben, aufbereitet, plausibilisiert und ggf. korrigiert werden. Für den Eingangspegel Mainflingen/Main wurden entsprechende Zeitreihen im wasserwirtschaftlichen Informationssystem des HLUg eingerichtet und ein Datenabruf von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung aktiviert. Dadurch stehen Abfluss- und Wassertemperaturdaten für den Mainpegel Mainflingen ebenso wie die Abflüsse der hessischen Landespegel Hanau/Kinzig und Bad Vilbel/Nidda ständig aktualisiert in der Datenbank zur Verfügung. Die Wassertemperaturdaten für die Kinzig, die Nidda sowie für den Main bei Frankfurt-Nied und bei Raunheim stehen aus dem Gewässergütemessnetz zur Verfügung. Für den meteorologischen Antrieb wurden Daten der Stationen Hanau und Riedstadt aus dem hessischen Luftmessnetz (HLUG-Datenbank, bzw. Download via Internet) und Angaben zur Bewölkung vom DWD (Frankfurt-Flughafen; Datendownload via Internet) zusammengestellt. Von den Betreibern der Anlagen mit Wärmeeinleitung bzw. den Kläranlagenbetreibern wurden die Daten nach Vorgabe des entsprechenden Formats in digitaler Form bereitgestellt. Bei den Kläranlageneinleitungen werden Einleitemengen und Einleitetemperaturen in das Modell eingegeben, während bei den Kraftwerken aus den Wassermengen und Temperaturen der Entnahme und Wiedereinleitung die Wärmeeinleitung in [MJ/s] ermittelt und dem Modell bereitgestellt werden muß.



Abb. 2: Modellstruktur mit berücksichtigten Zuflüssen und Einleitern.

### 3 Modellrechnung zum Wärmehaushalt des Mains

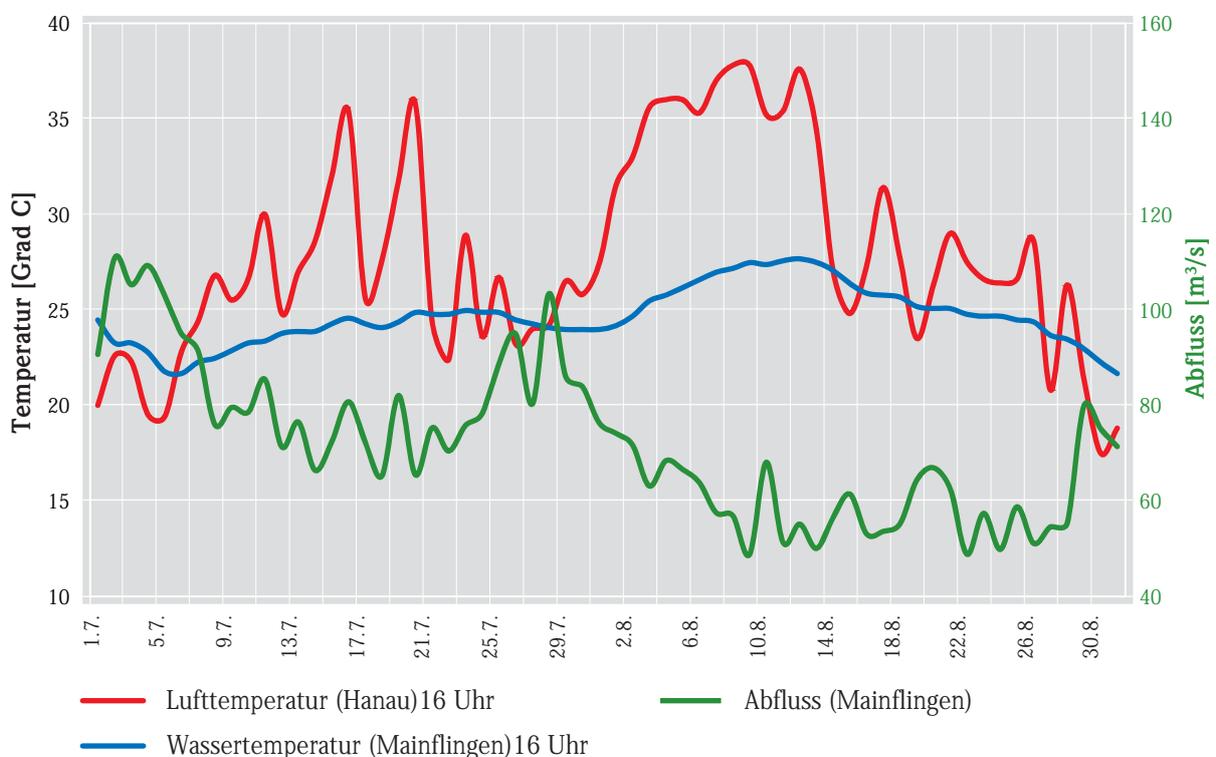
Nachdem die erforderlichen Eingangsdaten in das Modell übertragen sind, werden zunächst mit dem hydraulischen Baustein HYDRAX die Abflüsse und Wasserstände für jeden Zeitschritt (Stunde) und jeden Modellknoten (alle 200 m) berechnet. Danach wird das Modell QSIM gestartet und in gleicher zeitlicher und räumlicher Auflösung auch die Wassertemperatur ermittelt. Als Ergebnis können Längsschnitte entlang des gesamten Mains für einzelne Zeitpunkte ausgegeben werden (Abfluss, Wasserstand, Wassertemperatur) oder für ausgewählte Modellknoten der Jahresgang der Wassertemperatur bzw. Abfluss und Wasserstand in grafischer oder tabellarischer Form dargestellt werden.

#### 3.1 Simulation des Wärmehaushalts und Vergleich mit Messwerten

Im „Hitzesommer“ 2003 zeichneten sich ab Ende Juli die Vorbedingungen für erhöhte Wassertemperaturen im Main ab (Abb. 3). Die Abflüsse im Main an

der hessisch-bayerischen Landesgrenze bewegten sich nahezu im gesamten Zeitraum des Juli und August unterhalb 100 m<sup>3</sup>/s und sanken im Juli auf Werte um 50 m<sup>3</sup>/s. Gleichzeitig stiegen die Lufttemperaturen in der ersten Augushälfte auf Werte von 36 bis 38 °C. Die Wassertemperaturen im Main stiegen am Pegel Mainflingen auf Werte um 27 °C an, so dass die weitere Erwärmung auf der hessischen Fließstrecke des Mains zusammen mit Wärmeleitern die Wassertemperaturen bis in den Bereich des Grenzwertes von 28 °C ansteigen lies.

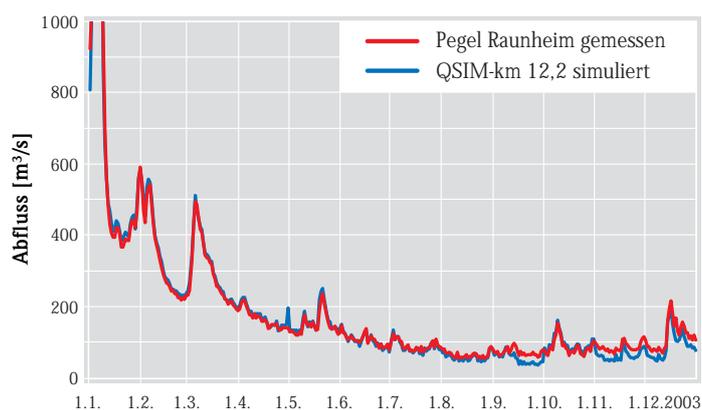
Die über die hessische Mainstrecke simulierten Abflüsse decken sich gut mit den am Pegel Raunheim (ca. 12 km oberhalb der Mündung) mittels Ultraschallmessanlage ermittelten Durchflüssen (Abb. 4). Von Januar bis Mai gingen die Abflüsse auf unter 100 m<sup>3</sup>/s zurück, die bis Dezember nur gelegentlich überschritten wurden. Während im mittleren und hohen Abflussbereich aber auch für die niedrigen Abflüsse in den Sommermonaten die Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Abflüs-



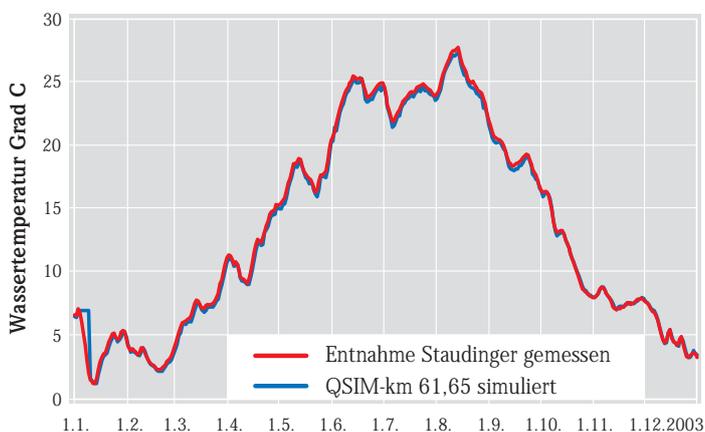
**Abb. 3:** Abflüsse sowie Luft- und Wassertemperaturen am Pegel Mainflingen im Hochsommer 2003.

sen als sehr gut zu bezeichnen ist, treten im November gewisse Unterschiede auf. Hierbei ist noch unklar, inwieweit die Simulation zu Unschärfen führt oder ob die Abflussermittlung in dem staugeregelten Bereich zu Schwierigkeiten führt. Für das ebenfalls simulierte Jahr 2006 stimmen die gemessenen und simulierten Abflüsse über den gesamten Zeitraum sehr gut überein.

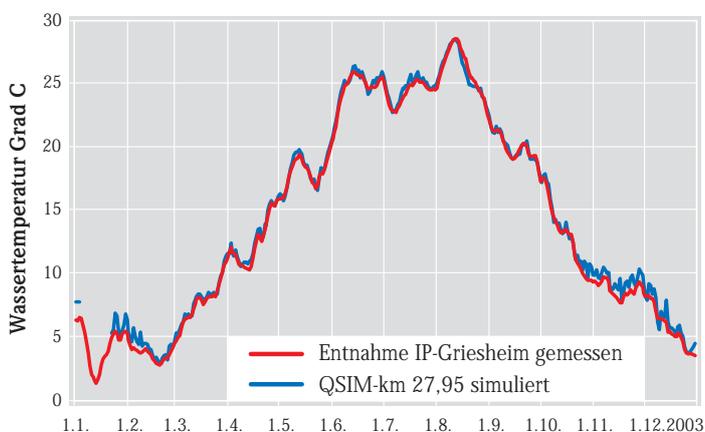
Die Güte der Simulation der Gewässertemperatur lässt sich an den Abb. 5 bis 7 ablesen, in denen die mittels QSIM simulierte Gewässertemperaturen (die die mittlere Temperatur über das gesamte Gewässerprofil repräsentieren) den gemessenen Wassertemperaturen an der Entnahmestelle des KW Staudinger bei km 61,65, an der Entnahmestelle des Industriepark Griesheim bei km 28 und an der Gewässergütemessstelle Bischofsheim bei km 4 gegenübergestellt sind. Beim Kraftwerk Staudinger (Abb. 5) zeigt sich nach 15 km simulierter Gewässerstrecke eine nahezu völlige Übereinstimmung. Auch nach insgesamt 59 km simulierter Gewässerstrecke beim Industriepark Griesheim (Abb. 6) bzw. nach 73 km bei der Messstelle Bischofsheim (Abb. 7) ist die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Temperaturen bis Mitte Oktober als sehr gut zu bezeichnen. Die im Vergleich zu den Messwerten etwas zu niedrig simulierten Temperaturen im Oktober und November können einerseits mit den Abweichungen der Abflüsse zusammenhängen, andererseits aber auch dem Umstand des Vergleichs von durchschnittlichen Wassertemperaturen gegenüber punktuellen Messungen am Gewässerufer geschuldet sein. Für den kritischen Bereich des Zeitraums Juli und August ist die Übereinstimmung in jedem Fall ausgezeichnet. Somit ist das Modell in der Lage, den Wärmehaushalt des Mains unter Berücksichtigung der Einleitungen und der meteorologischen Randbedingungen zu simulieren. Anderweitig festgestellte Abweichungen gegenüber einer weiteren Temperaturmessstelle konnten auf Probleme der Messanordnung zurückgeführt werden, so dass darin schon ein erster Erkenntnisgewinn aus der Wärmesimulation hinsichtlich der Messstellenoptimierung der Gewässerüberwachung gewonnen werden konnte.



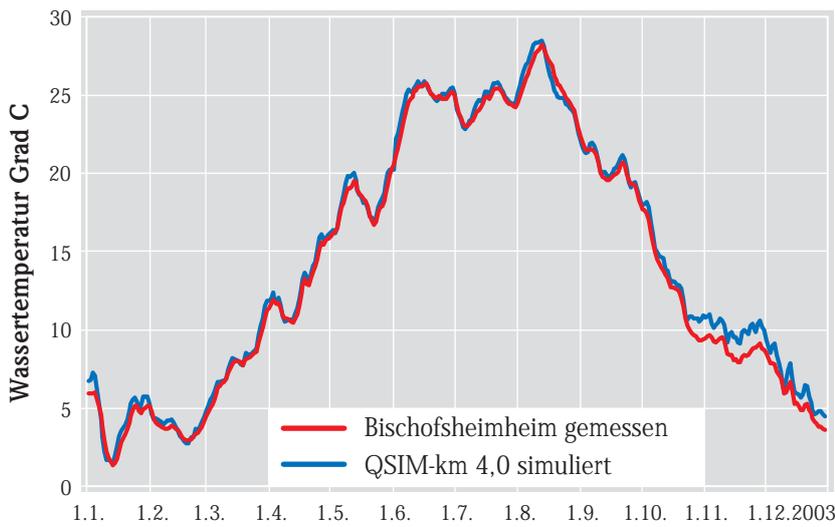
**Abb. 4:** Gemessene und simulierte Abflüsse am Pegel Raunheim bei Main-km 12,2.



**Abb. 5:** Gemessene und simulierte Wassertemperaturen bei Main-km 61,65 (Tagesmitteltemperatur).



**Abb. 6:** Gemessene und simulierte Wassertemperaturen bei Main-km 27,95 (Tagesmitteltemperatur).

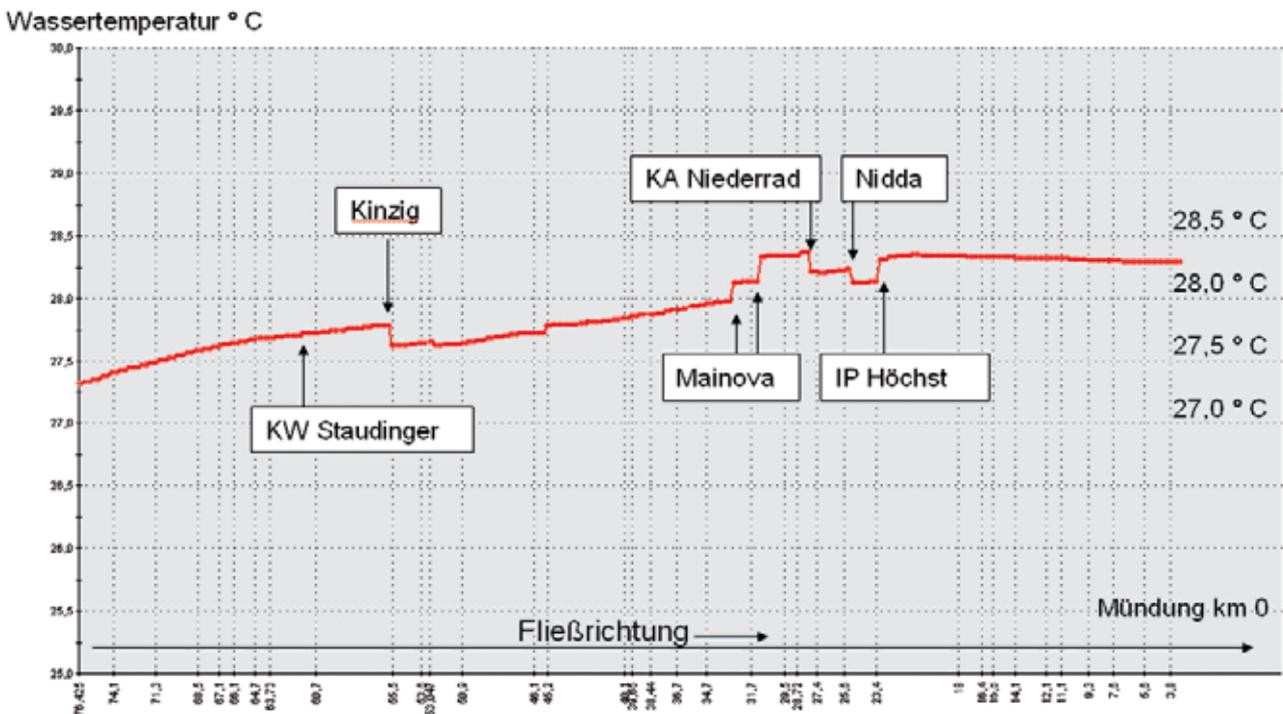


**Abb. 7:** Gemessene und simulierte Wassertemperaturen bei Main-km 4,0 (Tagesmitteltemperatur).

Der Temperaturverlauf im Längsschnitt der hessischen Mainstrecke ist in Abb. 8 für den 13. August, den Tag mit den höchsten Wassertemperaturen im Jahr 2003, dargestellt. Von der hessisch-bayerischen Landesgrenze bei km 77 nehmen die Wassertemperaturen (Tagesmittelwerte) witterungsbedingt gleichmäßig bis zur Einmündung der Kinzig bei km 55 bis auf 27,7 °C zu. Die Wärmeeinleitungen des auf

dieser Strecke gelegenen Kraftwerk Staudinger wurden seit dem 9.8.2003 eingestellt, so dass der sonst größte Wärmeeinleiter am hessischen Main zu keiner Temperaturerhöhung führte. Durch den Zufluss der Kinzig mit 2,2 m³/s und einer Temperatur von 23,9 °C resultiert eine leichte Abkühlung. Danach steigen die Temperaturen linear weiter an, bis durch die Wärmeeinleitungen der Mainova-Werke (insgesamt ca. 67 MJ/s) die Temperatur auf 28,4 °C ansteigt. Unmittelbar danach ergeben sich stromabwärts wiederum Abkühlungen durch die Einleitungen der Kläranlage Niederrad (1,8 m³/s mit einer Temperatur von 23,7 °C) und dem Zufluss der Nidda ( 2,6 m³/s mit 25 °C). Im Anschluss daran erfolgt die Wärmeeinleitung des Industriepark Höchst mit ca. 43 MJ/s, so dass sich eine Maintemperatur von 28,3 °C ergibt, die dann bis zur Mündung anhält. Die jeweiligen simulierten maximalen Tageshöchsttemperaturen (nicht dargestellt) liegen etwa 0,5 Grad über den Tagesmitteltemperaturen.

Der Temperaturverlauf im Längsschnitt der hessischen Mainstrecke ist in Abb. 8 für den 13. August, den Tag mit den höchsten Wassertemperaturen im Jahr 2003, dargestellt. Von der hessisch-bayerischen Landesgrenze bei km 77 nehmen die Wassertemperaturen (Tagesmittelwerte) witterungsbedingt gleichmäßig bis zur Einmündung der Kinzig bei km 55 bis auf 27,7 °C zu. Die Wärmeeinleitungen des auf



**Abb. 8:** Tagesmitteltemperaturen 13.8.2003.

Eine stärkere Temperaturzunahme und generell höhere Temperaturen im Längsverlauf der Tagesmitteltemperaturen des Mains ergeben sich für den 22. Juli 2006 (Abb. 9). Während dieser Situation führen die Wärmeinleitungen des Kraftwerk Staudinger (wo am folgenden Tag die Wärmeinleitung eingestellt wurde) zu einem Temperaturanstieg um etwa 1 Grad auf geringfügig über 28° C. Auch in 2006 resultiert aus

dem Zufluss der Kinzig eine gewisse abkühlende Wirkung, ebenso wie aus der Einleitung der Kläranlage Niederrad und dem Zufluss der Nidda. Ab Main-km 40 liegen die Wassertemperaturen bis zur Mündung oberhalb 28° C, im Maximum bei 29,2° C. Auch am 22.7.2006 lagen die berechneten Tagesmaxima der Wassertemperaturen um etwa 0,5 Grad über denjenigen der dargestellten Tagesmittelwerte.

Wassertemperatur ° C

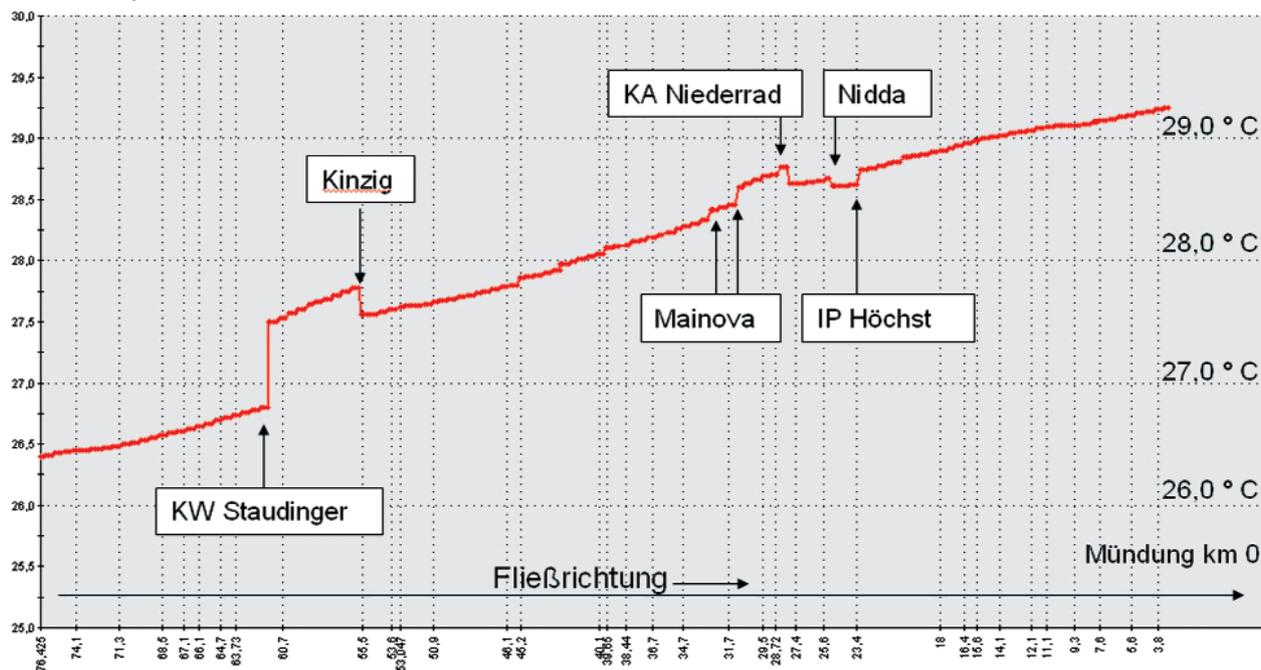


Abb. 9: Tagesmitteltemperaturen 22.7.2006.

#### 4 Fazit und Ausblick

Auf Basis des Gewässergütemodells QSIM konnte ein Wärmesimulationsmodell für den hessischen Main aufgestellt werden. Anhand des Vergleichs der gemessenen Wassertemperaturen und der simulierten Modellergebnisse konnte die detaillierte Nachvollziehung der Auswirkung der Einleitungen und der Witterung auf das Temperaturregime des Mains durch das Modell überprüft werden. Mit dem Modell können die Gewässertemperaturen in hoher

zeitlicher und räumlicher Auflösung dargestellt und einzelne Einflüsse separiert und analysiert werden.

Durch Inaktivierung einzelner Einleiter kann deren Wirkung auf die Temperaturveränderung hinsichtlich Ausmaß und räumlicher Erstreckung untersucht werden. Mit dem Modell können nun Wärmelastrechnungen bei definierten Randbedingungen durchgeführt werden, um den Einfluss einzelner

Einleiter und die Summenwirkung aller Wärmeeinleitungen zu quantifizieren und im Sinne einer Genehmigungsplanung nachzuweisen. Durch iterative Modellläufe können vor dem Hintergrund ökologischer Grenzwerte maximal mögliche Einleitungen ermittelt und ggf. auf unterschiedliche Einleiter verteilt werden.

Aus den ersten Simulationsergebnissen konnten schon Optimierungen des Überwachungsmessnetzes abgeleitet werden. Zur verbesserten Gewässerüberwachung werden derzeit neue fernabfragbare Temperatursensoren eingerichtet, um mit dem Modell auch aktuelle Ereignisse zu simulieren. Insbesondere für die Eingangstemperatur des Mains am oberen Modellrand ist eine durchgängige Datenverfügbarkeit von großer Bedeutung. Durch die „quasi-operationelle“ Simulation der Gewässertemperaturen ist es weiterhin möglich, aktuell erforderliche Reduzierungen von Wärmeeinleitungen zu ermitteln, um Grenzwertüberschreitungen während kritischer sommerlicher Hitzeperioden zu vermeiden. Den Erkenntnissen aus Sensitivitätsanalysen der wichtigsten Eingangsgrößen und den ggf. auftreten-

den Unterschieden zwischen der an einer (oberflächen- und ufernahen) Messstelle gemessenen und der tatsächlichen mittleren Gewässertemperatur ist dabei Rechnung zu tragen. Ein weiteres mögliches Anwendungsfeld liegt in der Untersuchung von Auswirkungen des Klimawandels auf den Temperaturhaushalt der hessischen Mainstrecke.

Das Wärmemodell Main wird im HLOG für weitere Untersuchungen vorgehalten und beim Regierungspräsidium Darmstadt, Abteilung Arbeitsschutz und Umwelt Frankfurt für Wärmelastrechnungen bei der Genehmigungsplanung, zur Gewässerüberwachung und in Verbindung mit Kurz- und Mittelfristvorhersagen von meteorologischen Daten als Vorhersagemodell für die Entwicklung der Wassertemperatur während kritischer Perioden bereitgestellt. Entwicklungsbedarf besteht hinsichtlich der Unterstützung von Optimierungsrechnungen zur Steuerung von Einleitemöglichkeiten und der aufwändigen manuellen Modellanwendung, verglichen mit ggf. zukünftig möglichen automatisierten Temperatursimulationen auf Basis von operationellen Wasserhaushaltsmodellen [4].

## 5 Literatur

- [1] Hessischer Minister für Landwirtschaft und Umwelt Wiesbaden (Hrsg.) 1973: Wärmelastplan Main. Hessische Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden.
- [2] KIRCHESCH, V., EIDNER, R. & Müller, V. (1998): Gewässergütemodellierung in der Bundesanstalt für Gewässerkunde. In: Mathematische Modelle in der Gewässerkunde – Stand und Perspektiven, BfG-Kolloquium am 15./16.11. 1998 in Koblenz, S. 105–114.
- [3] Bundesanstalt für Gewässerkunde, Wasser- und Schiffahrtsamt Aschaffenburg, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Regierungspräsidium Darmstadt (2000): Aktualisierte Bemessungswasserspiegellagen mit gewässerkundlichen Grundlagen für den Main in Hessen (Main-km 0 bis 77,1). BfG-Berichte 1261, Koblenz, 76 S. u. Anhang.
- [4] HAAG, I., LUCE, A. & BADDE, U. (2005): Ein operationelles Vorhersagemodell für die Wassertemperatur im Neckar. Wasserwirtschaft, 95. Jhg. 7-8, S. 45–51.

## Danksagung

Das Wärmemodell für den Main konnte durch die Bereitstellung der Software QSIM durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde und insbesondere durch die Unterstützung von Herrn Dipl.-Ing. Volker Kirchesch in effizienter Weise aufgestellt werden. Ein wesentlicher Beitrag zur zeitnahen Umsetzung des Vor-

habens erfolgte durch die Zusammenstellung und Datenprüfung durch das RP Darmstadt, Abteilung Arbeitsschutz und Umwelt Frankfurt, sowie durch die kurzfristige Datenbereitstellung und Erläuterungen zu den Daten durch die Betreiber von Anlagen mit Einleitungen am hessischen Main.