

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe



Oliver Stoschek

DHI-WASY GmbH

» Max-Planck-Str. 6

28857 Syke

Deutschland

Michael Potthoff¹

Ole Svenstrup Petersen²

Ole Larsen³

Ralf Engels⁴

Eine der größten infrastrukturellen Herausforderungen in Deutschland ist die Erneuerung einiger in den 60er und 70er Jahren erbauter thermischer Kraftwerke. Diese thermischen Kraftwerke benötigen für ihren Betrieb Kühlwasser. Die ökonomisch attraktivste Kühlwassergewinnung ist Oberflächenwasser. Momentan werden entlang der Tide-Elbe einige neue Kraftwerke geplant, die ihr Kühlwasser aus der Elbe gewinnen sollen und dem Gewässer außerdem eine signifikante Wärmemenge zurückgeben. Die FFH Richtlinie der EU fordert die Ermittlung des Einflusses von Kühlwasser auf die Gewässerökologie und die Umwelt. Im dem folgenden Beitrag wird der Einfluss des Kühlwassers auf den Tidebereich der Elbe numerisch untersucht. Neben dem Einfluss auf Hydraulik und Temperatur der Kühlwasserentnahme und -einleitung wurde ein ökologisches Modell mit Hilfe der ECOLab Toolbox aufgebaut. Dieses Modell wurde verwendet, um die Eutrophierung der Elbe aufgrund der zusätzlichen Wärmeeinleitung zu bewerten.

¹ DHI-WASY GmbH, Max-Planck-Str. 6, Syke, 28857, Deutschland

² DHI Water•Environment•Health, Agern Allé 5, Hørsholm, 2970, Dänemark

³ DHI Water•Environment•Health, Agern Allé 5, Hørsholm, 2970, Dänemark

⁴ DHI Water & Environment (s) Pte. Ltd., 200 Pandan Loop, 08-03 Pantech 21, 128388, Singapur

⁵ DHI-WASY GmbH, Max-Planck-Str. 6, Syke, 28857, Deutschland

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

Einleitung Hintergrund

Im Jahr 1973 wurde ein Wärmelastplan für die Elbe aufgestellt (ARGE Elbe, 1973). Dieser beinhaltet etwa 10.000 MW Wärmeproduktion und enthält etwa 6.500 MW Wärmeaustausch mit der Elbe sowie die Gewinnung von etwa 3.500 MW elektrischer Energie. Seit 1973 wurde ein großes Atomkraftwerk neu gebaut, während zwei kleinere Kraftwerke außer Betrieb genommen wurden. Momentan sind mehr als 16.000 MW (8.000 MW Wärmeaustausch mit der Elbe) geplant oder im Bau. Dieser Sachverhalt führte dazu, dass ein neuer Wärmelastplan für die Elbe entwickelt werden musste.

Die EU-FFH Richtlinie fordert, den Einfluss von Kühlwasserentnahme und -einleitung auf die Gewässerökologie und die Umwelt zu quantifizieren und zu minimieren. Der Beitrag hat zum Ziel, die kumulierten Umwelteinflüsse von Kühlwasseremissionen im Bereich der Unterelbe zu quantifizieren.

Der tidebeeinflusste Bereich der Elbe wird abgegrenzt durch das Elbwehr in Geesthacht, etwa 30km oberhalb von Hamburg gelegen (Abbildung 1). Von dem Wehr bis nach Hamburg ist die Elbe relative flach mit einer Wassertiefe von 4-6m. Dieser Teil wird obere Tideelbe genannt. In Hamburg teilt sich die Elbe in zwei Flussabschnitte (die Süder- und die Norderelbe). Die Wassertiefe nimmt hier auf 15-18m zu, was mit den Managementaktivitäten im Hamburger Hafen zusammenhängt. Beide Flussabschnitte fließen durch die Stadt Hamburg, vereinen sich in Köhlbrandhöft und bilden die untere Tideelbe. Die untere Tideelbe ist gekennzeichnet durch eine tiefe Fahrrinne. Im Gewässerverlauf haben sich umfangreiche Wattgebiete ausgebildet, von denen sich einige im Süßwasserbereich befinden. Diese Bereiche bilden einige der größten Süßwasserwattgebiete in Europa (Abbildung 1).

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

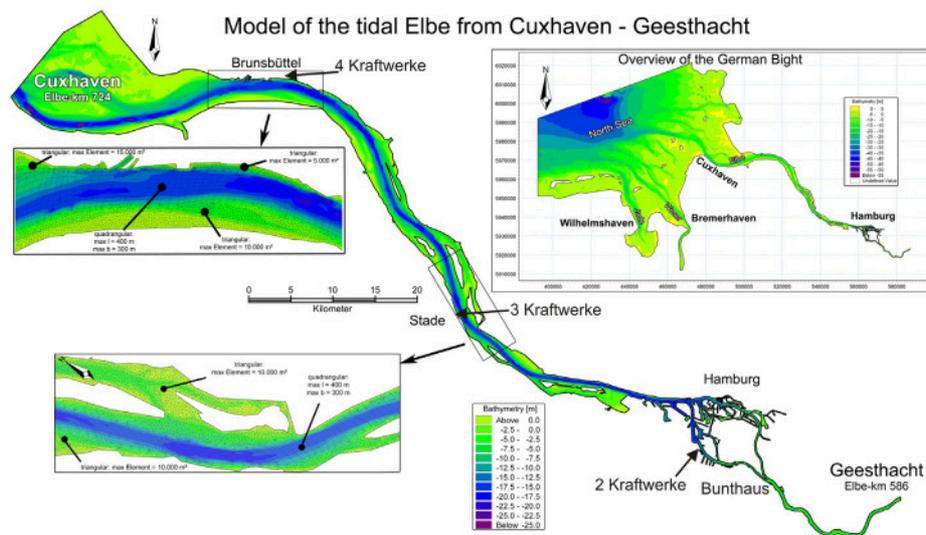


Abb. 1. Untersuchungsgebiet, Modell der Tide-Elbe und detaillierte Modellgebiete

In den Sommermonaten steigt die Temperatur in der Elbe auf bis zu 26°C. In der Vergangenheit hat sich dabei ein Sauerstoffdefizit mit Sauerstoffgehalten von weniger als 1,0 mg/l in Hamburg ausgebildet, wodurch es häufiger zu lokalem Fischsterben gekommen ist (Bergemann et al. 1996).

Nach Bergemann et al., 1996, sind Bereiche mit einem Sauerstoffdefizit in Ästuaren nicht ungewöhnlich. Normalerweise liegen diese Bereiche in Zonen mit maximaler Turbulenz, die eine Durchmischung von Salz- und Süßwasser auszeichnet. Die sich dadurch verändernden ökologischen Bedingungen führen zu einem Absterben vieler Plankton-Organismen, sowohl aus der Nordsee als auch aus dem Gewässer. Dichtegradienten akkumulieren die Biomasse und der mikrobiologische Abbauprozess zehrt den Sauerstoff in diesen Bereichen.

In den 1980er und 1990er Jahren begrenzte die Verschmutzung der Elbe die Entwicklung großer Planktonpopulationen im mittleren Bereich der Elbe. Seitdem hat sich die Gewässergüte verbessert, was ein Wachstum des Phytoplanktons von bis zu 300 µg/l Chlorophyll-a im Sommer ermöglicht. Gemeinsam mit der plötzlichen Vertiefung im Bereich des Hamburger Hafens und der erhöhten Turbulenzen im Gewässer erhöht sich die Mortalität des Phytoplanktons erheblich, was zu hohen Abbauraten der Biomasse und damit zu

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

niedrigen Sauerstoffkonzentrationen in Hamburg führt.

Thermische Einleitungen von Kraftwerken können eine Vielzahl von Einflüssen auf einen Wasserkörper haben (Langford 1990). Erstens beeinflusst die Wärme direkt die Sauerstofflöslichkeit und die biologischen Umsetzungsprozesse, wodurch es zu einem größeren Sauerstoffbedarf kommen kann. Zweitens erhöht die Passage durch das Kühlkreislaufsystem des Kraftwerkes die Mortalität der mitgerissenen Organismen. Darüber hinaus beeinflussen Chemikalien zur Verhinderung von Faulungsprozessen in den Rohrleitungen die biologischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wassers (z. B. die Oberflächenspannung).

Für eine bestmögliche Quantifizierung des Einflusses von Kühlwasser wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt. Zuerst wurde ein 3-dimensionales Modell aufgebaut, mit dessen Hilfe der Einfluss des Temperaturanstiegs in der Elbe und die lokalen Auswirkungen nahe der Entnahme- und Einleitungsstellen ermittelt wurden (Abbildung 1). Zusätzlich wurde ein 1-dimensionales Modell für eine Langzeituntersuchung (2 Jahre) des Einflusses auf das gesamte ökologische System mit Fokus auf den Sauerstoffkonzentration in der Elbe erstellt.

Ziel der Untersuchung

Dieser Beitrag behandelt die Quantifizierung der Temperaturveränderungen und der Veränderung des Sauerstoffhaushaltes rund um Hamburg unter Berücksichtigung neu gebauter Kraftwerke. Die Ergebnisse wurden verwendet, um die ARGE Elbe in der Formulierung eines neuen Wärmelastplanes zu unterstützen.

Methoden

Die Veränderungen der Flusstemperatur werden mit Hilfe eines numerischen, 3-dimensionalen Modells (MIKE 3 by DHI) der Tide-Elbe durchgeführt (Abbildung 1). Dieses Modell beschreibt ein meteorologisches Szenario im Sommer, das durch hohe Temperaturen und niedrige oberstromige Abflüsse charakterisiert ist – eine typische limitierende Situation für verfügbare Kühlwassermengen. Das 3-dimensionale Modell liefert Informationen über den Einfluss auf die Flusstemperatur im unmittelbaren Umfeld jedes Kraftwerkes für diese kritische Situation. Für einen allgemeinen Überblick über die Temperaturveränderungen über mehrere Jahre wurde ein 1-dimensionales Modell (MIKE 11 by DHI) aufgebaut, das

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

Berechnungen über lange Zeiträume ermöglicht. Für die Berücksichtigung verschiedener möglicher Planungsvarianten und zukünftiger Bedarfsanpassungen der Kraftwerke wurden mehrere Szenarien für jeden Standort und verschiedene Kühlwasserentnahmen mit den Modellen berechnet. In diesen Simulationen wurden die Langzeiteffekte der verschiedenen Abflüsse auf die Sauerstoffkonzentration über mehrere Jahre berechnet mit dem Ziel, die kritischen Situationen zu ermitteln und zu bewerten.

Das hydrodynamische Modell

Der Abfluss und die Strömungen in der Elbe werden durch ein 3-dimensionales hydrodynamisches Modell beschrieben. Dieses Modell basiert auf dem Modell MIKE 3 (DHI, 2007a). Es löst die 3-dimensionale Reynolds gemittelte Navier-Stokes Gleichungen unter Annahme einer vertikal hydrostatischen Druckverteilung und einer freien Wasseroberfläche. Die Sohlreibung wird beschrieben durch eine Oberflächenreibung basierend auf einer äquivalenten Sandrauheit. Die horizontale Turbulenz wird durch ein Smagorinsky Modell beschrieben (Large Eddy Simulation). Die vertikale Turbulenz und Auftrieb wird in diesem Fall durch ein erweitertes $k-\epsilon$ Turbulenzmodell beschrieben. Der Auftrieb steht in direktem Zusammenhang mit dem Transport von Wärme und Salz. Dieses wird durch die UNESCO Gleichung beschrieben. Da das Modell hydrostatisch ist, wirken sich die Auftriebskräfte lediglich über die horizontalen Druckgradienten aus. Der Transport von Wärme, Salzgehalt und Turbulenzparametern wird über 3-dimensionale Advektion-Diffusion Gleichungen beschrieben, wobei die Diffusion über Schmidt oder Prandtl Werte mit der Eddy-Viskosität verbunden sind. An der Wasseroberfläche werden die Randbedingungen für die Wärmeaustauschgleichungen über einen Satz von atmosphärischen Wärmeaustauschgleichungen formuliert, die kurz- und langwellige Strahlung ebenso berücksichtigen wie Verdampfungswärme und Eigenwärmeaustausch.

Die Gleichungssysteme werden mit Hilfe eines horizontal unstrukturierten Meshes – basierend auf einer Kombination von dreieckigen und viereckigen Elementen – gelöst. In vertikaler Richtung wird ein strukturiertes Sigma-Koordinatensystem eingesetzt. Der Lösungsansatz ist explizit in der Zeit, mit Ausnahme eines impliziten Ansatzes unter Nutzung einer Runge-Kutta Integration zweiter Ordnung. Die räumliche Diskretisierung basiert auf einem Finite Volumen Ansatz, wobei die konvektiven Terme über ein Roe-Schema zweiter Ordnung beschrieben werden.

Trockene und innerhalb eines Tidezyklus zeitweise trocken fallende Bereiche werden über

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

einen Massenerhaltungsansatz beschrieben, wobei das jeweilige Element zeitweise aus der Berechnung entfernt wird und je nach dem Wasserstand in dem Element sowie in den umgebenden Elementen wieder zur Berechnung hinzugefügt wird.

Das Modell der Tide-Elbe umfasst den Bereich von Geesthacht, wo die Elbe über ein Wehrbauwerk geführt wird, an dem der Wasserstand der Elbe effektiv gesteuert und genau bekannte Durchflüsse bereitgestellt werden, bis nach Cuxhaven, an der Mündung in die Nordsee. Die Randbedingungen an dieser Stelle in Bezug auf Wasserstände, Temperatur und Salzgehalt werden über Messungen beschrieben. Das Mesh besteht aus ungefähr 39.000 horizontalen Elementen und fünf vertikalen Layern. Die räumliche Auflösung variiert von 10m bis hin zu 400m (Abbildung 1).

Das ökologische Modell

Für die benötigten Langzeitsimulationen (Simulationszeit: etwa zwei Jahre) wurde in 1-dimensionales ökologisches Modell für das gesamte Modellgebiet in MIKE 11 (DHI, 2007b) aufgebaut. Die Möglichkeit der Anbindung des numerischen Kerns des ökologischen Modells (ECO Lab) an das 3-dimensionale Modell wäre ohne Anpassungen möglich gewesen. Allerdings wurde aufgrund der für den Zeitraum und die Modellgröße sehr großen Rechenzeit das 1-dimensionale Modell eingesetzt.

Die Hydrodynamik des 1-dimensionalen Modells basiert auf den gleichen Daten wie das 3-dimensionale Modell und konnte automatisch und mit nur geringen Anpassungen aus dem 3-dimensionalen Modell erstellt werden. Die räumliche Auflösung ist mit Abständen der Querprofile von 100m bis 700m sehr hoch. Im Bereich um Hamburg ist die räumliche Auflösung dabei sehr hoch, während sie im Bereich Cuxhaven weniger groß ist. Bezüglich der berechneten Wasserstände und Abflüsse erreicht das Modell nahezu die gleiche Genauigkeit wie das 3-dimensionale Modell (unter Berücksichtigung der Tatsache, dass 1-dimensionale Modelle natürlicherweise keine kleinräumigen Detailuntersuchungen zulassen).

Weiterhin wurde ein Wärmebilanzmodul für den Wärmeaustausch zwischen Wasser, Atmosphäre und anderen Quellen mit berücksichtigt. Dieses Wärmebilanzmodul ist prinzipiell das gleiche Modul, wie das für das 3-dimensionale Modell bereits beschriebene. Für Quellen mit signifikantem Wärmeeintrag wurde der Wärmeaustausch als Prozess in MIKE ECO-Lab formuliert. Das ökologische Modell enthält entsprechende Formulierungen. Dadurch ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten für die Modellierung der dynamischen

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

Charakteristik der Wärmequellen (z. B. ein reduziertes ΔT bei höheren Temperaturen) oder für die Mortalität eintretender Planktonorganismen.

Das ökologische Modell (Abbildung 2) ist ein prozessbasiertes Modell, das auf Basis des Standard „Eutrophication Model 2“ (DHI, 2007c) von DHI an die speziellen Anforderungen an der Tide-Elbe angepasst wurde. Der Phytoplankton-Teil ist ein einzelnes Modell, das Silikate als limitierende Nährstoffe betrachtet, da Diatomeen den wesentlichen Teil des Planktons im Gewässer ausmachen. Eine weitere Formulierung betrachtet das Zooplankton. Nährstoffkreisläufe werden über einfache Nitrifikationschemata erster Ordnung und einen Phosphorkreislauf abgebildet. Ein Abbaumodell für organisches Material ist ebenfalls Teil des Modells. Temperaturabhängigkeiten werden für die meisten Prozesse entsprechend eines Arrhenius-Gesetzes formuliert. Für den Abbauprozess organischen Materials wurde ein biologisch sinnvoller Ansatz mit einer optimalen Temperatur von 25°C gewählt. Dieser Wert basiert auf Daten zur Temperaturabhängigkeit von BSB-Prozessen in der Elbe (Schroeder, 1997).

Die Eingangsdaten des ökologischen Modells wurden aus im Zwei-Wochen-Rhythmus gemessenen Daten, die von der ARGE Elbe seit den 1960er Jahren gemessen wurden, gewonnen. Wenn möglich, wurden Messungen der Wasserchemie und der Nährstoffe direkt oberhalb des Wehres in Geesthacht ebenfalls benutzt. Einige andere Daten wie Chlorophyll-A und Temperatur stammen von der Station „Bunthaus“ des Gewässergüternetzwerkes Hamburg. Dieses Netzwerk unterhält einige automatische Messstationen in Hamburg, die alle 15 Minuten Daten aufnehmen. Berechnungen der Fließzeiten des Wassers

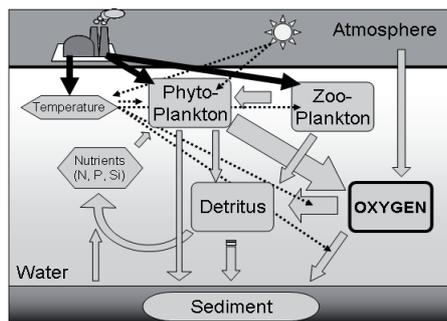


Abb. 2: Schematische Darstellung der Prozesse des ökologischen Modells

zeigten, dass diese Station dominiert wird vom dem Wasser aus Geesthacht mit einer Verzögerungszeit von einem halben Tag.

Klimadaten zu Lufttemperatur, Wind, Globalstrahlung und Luftfeuchtigkeit wurden von drei Stationen in Hamburg, Stade und Cuxhaven abgefragt, um die atmosphärischen Parameter mit einer hohen Auflösung bereitstellen zu können.

Die Kalibrierung des Modells fand mit Daten aus dem Jahr 2002 statt.

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

Ergebnisse

Modellierung von Abfluss- und Temperaturverteilungen

Das 3-dimensionale Modell benutzt kontinuierliche Wasserstände, Abflüsse, Salzgehalte und Temperaturinformationen aus Pegelmessungen als Randbedingungen. Die Genauigkeit des Modells wurde verifiziert mit Referenzwerten im Juni 2006. Wasserstände wurden dabei mit weniger als 10cm Abweichung ermittelt und Temperaturdaten mit weniger als 2°C Abweichung bestimmt. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit guter Genauigkeit getroffen, wie Abbildung 3 zeigt, in der die modellierte und die gemessene Strömungsgeschwindigkeit am Pegel Bunthaus verglichen wird. Das Modell liefert also realistische Aussagen der Strömungsgeschwindigkeiten und der tidebedingten Asymmetrie an dieser Station.

Für die Abschätzung des maximalen Einflusses aller geplanten und bestehenden Kraftwerke wurde der Sommer 2003 herangezogen. Der warme Sommer 2003 hatte ein Wiederkehrintervall von mehr als 1.000 Jahren (DWD, 2003), wobei die Luft- und Wassertemperatur über einen Zeitraum von mehr als drei Wochen kontinuierlich sehr hoch waren, was zu einer mittleren Wassertemperatur von $T_{\text{middle}} = 22\text{ °C}$ führte. Aufgrund einer sehr langen Trockenzeit im Elbeeinzugsgebiet sank der Abfluss der Elbe für einen Zeitraum von mehr als fünf Monaten unter $280\text{ m}^3/\text{s}$, was gegenüber dem mittleren Jahresabfluss von $780\text{ m}^3/\text{s}$ sehr gering ist. Um die Situation im Modell bestmöglich beschreiben zu können, wurde ein vollständiger, zweiwöchiger Springnipp tide-Zyklus berechnet. Dieser Zyklus beinhaltet einen Tidebereich von bis zu 3,8m in Hamburg und Salzgehaltsvariationen von bis zu 10 PSU in Cuxhaven.

Als Basisszenario wurden die Kühlwassereinleitungen aller bestehenden Kraftwerke entlang der Elbe berücksichtigt. Die Abbildung 4 zeigt die relevanten Kraftwerke und Industriebetriebe in Hamburg. Als ein zweites Zukunftsszenario wurden darüber hinaus die Kühlwassereinleitungen aller neun geplanten Kraftwerke entlang der Elbe dem Modell hinzugefügt (insgesamt $30\text{ m}^3/\text{s}$ mit einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 6\text{ K}$ ohne Hamburg) (Abbildung 1).

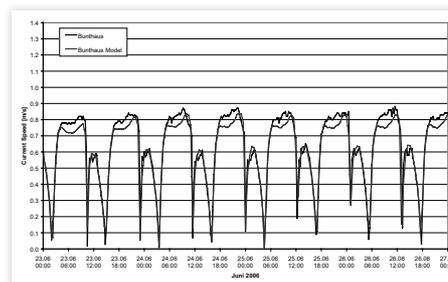


Abb. 3. Modellierte und gemessene Strömungsgeschwindigkeiten am Pegel Bunthaus

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die tiefengemittelten Temperaturen in Hamburg während Ebbe und Flut. Die Abbildungen 5A und 6A zeigen die Situation im Sommer 2003. Es gab einige kleinere Zuflüsse, die etwa $22,5 \text{ m}^3/\text{s}$ um 6°C erwärmtes Wasser in die Hafenbecken eingeleitet haben. Das kältere Wasser, das von oberstrom mit einer Temperatur von 22°C kommt vermischt sich mit dem warmen Wasser (bis zu 26°) der unterhalb liegenden flacheren Bereiche und führt am Zusammenstrom von Norder- und Süderelbe zu einer Wassertemperatur von $24\text{--}25^\circ\text{C}$. Der Wärmezustrom aus den Kraftwerken beeinflusst damit maßgeblich die Verhältnisse in den Hafenbecken.

Die Abbildungen 5B und 6B zeigen die Temperaturverteilung, nachdem im Hamburger Hafen ein neues Kraftwerk hinzugefügt wurde, dass $64 \text{ m}^3/\text{s}$ Kühlwasser mit einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 6 \text{ K}$ in die Elbe einleitet. Die daraus resultierenden Temperatur-

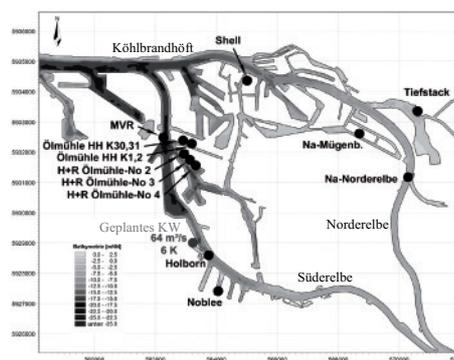


Abb. 4: Existierende (Schwarz) und geplante (grau) Kühlwassereinleitungen in Hamburg

differenzen zwischen den beiden Szenarien sind in den Abbildungen 5C und 6C abgebildet.

Während der Ebbe resultiert die zusätzliche Wärme in einem Temperaturanstieg von 2°C im Bereich der Süderelbe. Nach dem Zusammenfluss von Norder- und Süderelbe reduziert sich der Temperaturanstieg auf weniger als 1°C .

Die Flutströmung liefert dann sowohl das warme Wasser aus Hamburg zurück in die Süderelbe als auch die zusätzliche Wärme-einleitung der Kraftwerke in Stade (Abbildung 1), was nun zu einer Temperaturdifferenz von $2,5^\circ\text{C}$ in der Süderelbe oberhalb des neuen Kraftwerkes führt.

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

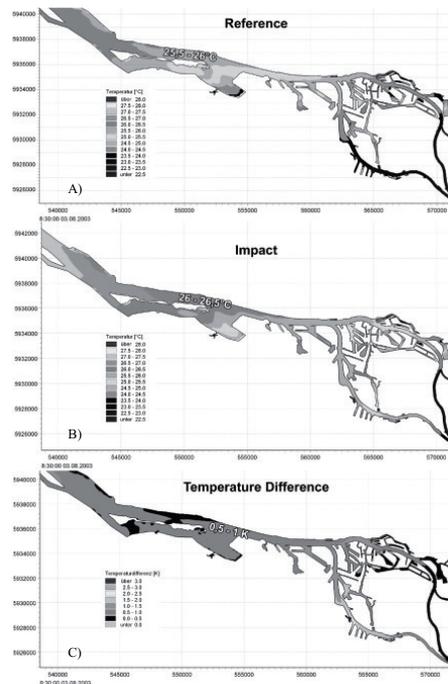
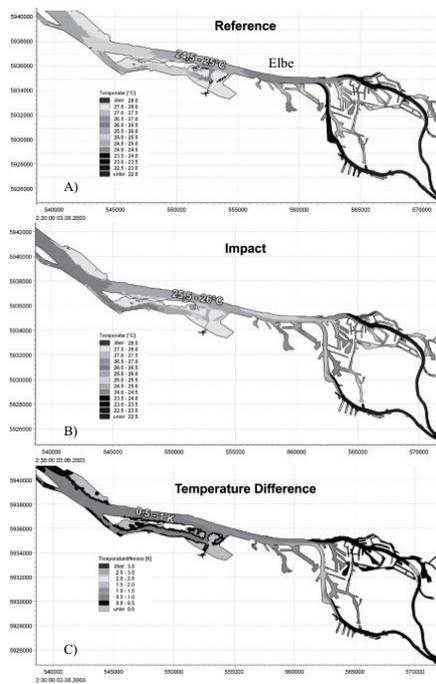


Abb. 5: Tiefengemittelte Temperaturverteilung bei Ebbe

Abb. 6: Tiefengemittelte Temperaturverteilung bei Flut

Zusammengefasst ist der Einfluss geplanter Kühlwassereinleitungen auf den maximalen Temperaturanstieg in der Elbe in Tabelle 1 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Temperaturanstieg unterhalb von Hamburg abnimmt, so dass der Temperaturanstieg in Stade weniger als 0,5 °C ausmacht, trotz Berücksichtigung dreier neuer Kraftwerke mit einer Wärmeleistung von 2.400 MW.

Position	Temperaturdifferenz [K]	Tideabfluss [m ³ /s]
Hamburg	Bis zu 2	~ 2000
Stade	Bis zu 1	~ 12000
Brunsbüttel	Bis zu 0.5	~ 30000

Ökologische Modellierung

Das 1-dimensionale ökologische Modell (Abbildung 7) war gut in der Lage, die Temperatur- und Sauerstoffwerte (Abbildungen 8 und 9) über einen Zeitraum von zwei Jahren abzubilden. Lediglich in zwei Wochen des Sommers 2003 zeigte das Modell größere Abweichungen.

Um die möglichen Effekte zunehmender Kühlwassereinleitungen auf das Ökosystem und den Sauerstoffhaushalt der Elbe zu erläutern, wird hier exemplarisch ein "virtuelles" Kraftwerk in Hamburg mit einer Einleitungsmenge von $60 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem Temperaturanstieg von maximal $\Delta T = 6 \text{ K}$ (6K bei einer Wassertemperatur von $T < 22^\circ\text{C}$, lineare Abnahme auf 0 K für eine Wassertemperatur von mehr als 28°C) aus vielen Szenarien ausgewählt und in das Modell eingefügt. Im Jahr 2002 hatte ein solches Kraftwerk nur geringe Auswirkungen auf den Sauerstoffgehalt in Seemannshöft (Abbildung 10), obwohl eine bedeutende Menge Phytoplankton durch die Passage durch das Kraftwerk abgestorben ist (im Mittel $\sim 21,1 \text{ t/d}$ in der Vegetationsperiode Mai-Oktober), was zu einem deutlichen Anstieg des organischen Materials und des Sauerstoffbedarfs geführt hat.

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

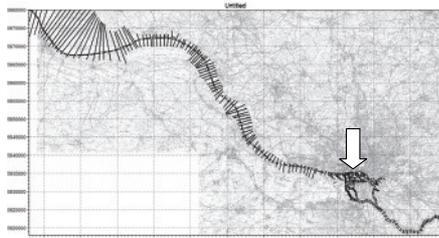


Abb. 7: 1-dimensionales Modell von MIKE 11 als Basis für die ECO Lab Modellierung. Der Pfeil markiert die Station „Seemannshöft“

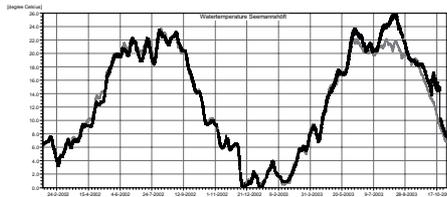


Abb. 8: Simulierte (grau) und gemessene (Schwarz) Temperaturen der Station „Seemannshöft“ im 1-dimensionalen Modell ohne zusätzliche Kraftwerke. Der erste Simulationsmonat wurde entfernt. Die Genauigkeit liegt bei $0,03 \pm 1,09^\circ\text{C}$ mit einer empirischen Korrelation von $r^2=0,99$. Lediglich im Sommer 2003 sind die Abweichungen größer

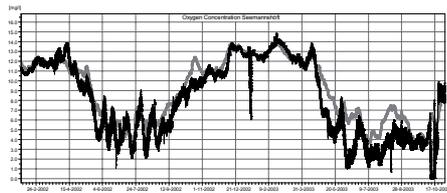


Abb. 9: Simulierte (grau) und gemessene (schwarz) Sauerstoffkonzentration an der Station „Seemannshöft“. Die Fließzeit vom Wehr Geesthacht bis dorthin beträgt 7-14 Tage, je nach Abfluss. Die Genauigkeit liegt zwischen $-0,7 \pm 1,2 \text{ mg/l}$ mit einer Korrelation von $r^2=0,96$. Die größten Abweichungen treten im Sommer 2003 auf

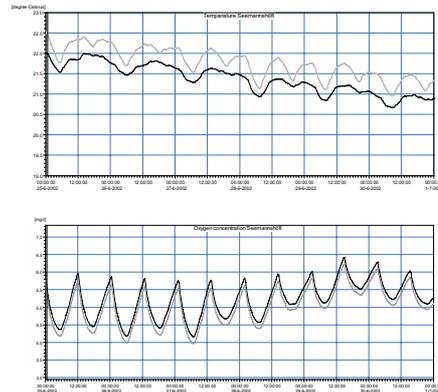


Abb.10: Exemplarischer Einfluss eines Kraftwerkes in Hamburg auf die Temperatur und die Sauerstoffkonzentration in der Tide-Elbe an der Station „Seemannshöft“ zwischen dem 25.06.2002 und dem 01.07.2002. Das Kraftwerksszenario ist in grau dargestellt, das Referenzszenario in schwarz

Schlussfolgerungen

Als Fazit haben sowohl das 3-dimensionale als auch das vereinfachte 1-dimensionale Modell eine realistische Beschreibung der Temperatur in der Tide-Elbe geliefert. Der Einfluss der geplanten Kraftwerke konnte klar identifiziert und aufgezeigt werden. Es findet ein deutlicher Anstieg der Wassertemperatur in Hamburg aufgrund der zwei dort neu geplanten Kraftwerke statt, wobei 64 m³/s Kühlwasser in die Süderelbe eingeleitet werden. Der Einfluss der vier an der Elbe geplanten Kraftwerke auf die Temperatur in der Mündung der Elbe ist mit einem zu erwartenden Temperaturanstieg von weniger als 0,5 °C gering.

Zusätzlich dazu wurde das ökologische Modell dazu verwendet, den Einfluss Kraftwerke auf den Sauerstoffgehalt in der Elbe zu quantifizieren. Eine Reihe von Kraftwerkskonfigurationen und Wärmeabgaben wurden an jedem Standort geprüft und gingen in den neuen Wärmelastplan ein. Allgemein konnten einige Bereiche ausgemacht werden, in denen Temperaturanstieg und Anteil Kühlwasser an der Gesamtwassermenge zusammenhängen (Tabelle 1). Der Einfluss auf den Sauerstoffgehalt war dagegen in allen Bereichen begrenzt, was mit den speziellen Eigenheiten in der Elbe zusammenhängt und so nicht auf andere Ästuare übertragen werden kann.

Ein Kernfaktor für den relativ geringen Einfluss auf den Sauerstoffhaushalt sind die schnell abnehmenden Überlebensbedingungen für Phytoplankton in der unteren Tide-Elbe. Schnell zunehmende Wassertiefen und hohe Turbulenzen begrenzen das verfügbare Licht und führen zum Tod eines Großteils des Phytoplanktons in Hamburg, unabhängig von jedem Kraftwerk. Dieses abgestorbene Plankton tritt in den mikrobiologischen Kreislauf ein und führt zu Sauerstoffverbrauch. Der geringe BSB im Unterlauf zeigt an, dass das meiste organische Material im Bereich Hamburg bereits umgesetzt wurde.

Ein Kraftwerk in Hamburg führt nicht zu signifikant höherer Bildung organischen Materials durch abgestorbenes Plankton, da der Großteil des Planktons in jedem Fall in umgewandelt wird. Allerdings führen auch die gestiegenen Wassertemperaturen zu einem steigenden Sauerstoffbedarf, da die Umsetzungsprozesse beschleunigt werden. Unterhalb von Hamburg bleiben die Bedingungen für die Entwicklung des Phytoplanktons unvorteilhaft, was dazu führt, dass relative wenig Neubildung auf dem Weg zur Mündung entsteht. Zusammen mit dem zunehmenden Tidevolumen (und damit abnehmendem Anteil des Kühlwassers an der Gesamtmenge) korrelieren die Einflüsse auf das Ökosystem mit der Distanz zur Nordsee.

Ökologische Modellierung von Gewässergüteparametern an der Tide-Elbe

Danksagungen

Diese Arbeit wurde beauftragt und unterstützt von der ARGE Elbe im Zuge der Neuauflage des Wärmelastplans Elbe. Herr W. Blohm von der Stadt Hamburg stellte freundlicherweise WGMN Daten zur Verfügung.

Referenzen

- Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (ARGE Elbe). 1973. Wärmelastplan für die Elbe von Schnackenburg bis Cuxhaven. Hamburg, Germany.
- Deutscher Wetter Dienst (DWD). 2003. Der Rekordsommer 2003. www.dwd.de, document: DWD/FE24/PS. Offenbach, Germany.
- DHI, 2007a, MIKE 3, DHI Water and Environment
- DHI, 2007b, MIKE 11, DHI Water and Environment
- DHI, 2007c, DHI Eutrophication Model 2 - ECO Lab Template, A Scientific Description, DHI Water and Environment
- Langford T.E.L. 1990. Ecological Effects of Thermal Discharges, Elsevier.
- Michael Bergemann, Gerd Blöcker, Heinz Harms, Martin Kerner, Regina Meyer-Nehls, Wilhelm Petersen, Friedhelm Schroeder. 1996. Der Sauerstoffhaushalt der Tideelbe, Die Küste, 58/96
- Schroeder, F., Water quality in the Elbe estuary: Significance of different processes for the oxygen deficit at Hamburg. 1997. Environmental Modeling and Assessment, 2, 73–82