

Grundlagen der ökologischen Modellierung in Küstengewässern am Beispiel der Elbe

Arne Hammrich und Dagmar Schuster

Zusammenfassung

Die mathematische Modellierung von Sauerstoff im Gewässer umfasst zahlreiche Prozesse. Neben einer präzisen Berechnung der Hydraulik, sowie der Advektion/Dispersion, sind die formulierten Prozesse im Wasserqualitätsmodell eine wichtige Voraussetzung für ein verlässliches Modell.

Für die vorliegende Untersuchung wurde ein MIKE 21 FM Modell (DHI, 2013) verwendet, um die hydraulischen Bedingungen im Hafen von Hamburg und der angrenzenden Tideelbe zu berechnen. Das Modell basiert auf Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Berücksichtigung der Annahmen von Boussinesq und unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung. Impuls- und Massenerhaltung, auch für die Inhaltsstoffe wie z. B. Salz und Temperatur, sind in dem zugrunde liegenden Ansatz erfasst. Die räumliche Diskretisierung erfolgt über einen elementzentrierten Finite-Volumen-Ansatz. Horizontal wird ein unstrukturiertes Mesh verwendet.

Das hydrodynamische Modell wurde an einen Gleichungslöser (ECO Lab) als Basis für das Wasserqualitätsmodell gekoppelt. ECO Lab (DHI, 2013) ist ein numerischer Gleichungslöser zur Programmierung von ökologischen Modellen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Eutrophierungsmodell in ECO Lab verwendet, um die Konzentrationen von Phytoplankton, Chlorophyll-a, Zooplankton, Detritus, anorganischen Nährstoffen und Sauerstoff in der Elbe bei Hamburg zu berechnen. Makroalgen wurden im Modell nicht berücksichtigt, da ihr Einfluss in diesem Teil der Elbe vernachlässigbar ist. Das Eutrophierungsmodell ist in das Advektions-/Dispersionsmodul integriert, welches den physikalischen Transport im Modell rechnet.

Das Modell wurde zur Berechnung der Sauerstoffkonzentration im Hafen von Hamburg verwendet. Speziell die Veränderungen der Sauerstoffkonzentration im Reiherstieg, einem Kanal im Süden Hamburgs, der normalerweise zur Süderelbe hin durch eine Schleuse verschlossen ist, sollte im Modell erfasst werden. Die geschlossene Schleuse soll vor allem den Eintrag und die Sedimentation von Schwebstoffen in das Hafengebiet verhindern. Im Rahmen der Planungen für eine neue Schleuse am Reiherstieg sollte mithilfe des Modells untersucht werden, ob durch eine zeitweilige Öffnung der Schleuse die Sauerstoffkonzentration im Reiherstieg verbessert werden kann. Die Untersuchung zeigt, dass die Resuspension und anschließende sauerstoffzehrende Mineralisation von organischem Material eine wichtige Rolle spielt. Eine optimale Steuerung der Schleuse muss ein Kompromiss sein, zwischen möglichst langer Öffnung der Schleusentore, um viel sauerstoffreiches Wasser in den Hafen zu spülen, und einer möglichst geringen Resuspension von organischem Material, da diese immer eine Sauerstoffzehrung durch Mineralisation nach sich zieht.

Schlagwörter

Sauerstoff, Nährstoff, Wasserqualität, Elbe, Modell, MIKE 21, ECO Lab

Summary

Modelling dissolved oxygen in water encompasses a range of requirements and process descriptions. Among a good representation of hydraulics, including advection/dispersion, the processes in the ecological part of the model are crucial for a reliable model.

A MIKE 21 (DHI 2013) flexible mesh model was used to simulate the hydrodynamic conditions in the River Elbe around Hamburg. The model is based on the numerical solution of twodimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and of hydrostatic pressure. Thus, the model consists of continuity, momentum, temperature and density equations and is solved by a turbulent closure scheme. The spatial discretisation is performed using a cell-centred finite volume method. In the horizontal plane an unstructured mesh is used.

This hydrodynamic model was coupled to the ecological module (ECO Lab) to form the basis for the water quality model. ECO Lab (DHI 2013) is a numerical lab for ecological modelling. It is an open and generic tool for customising aquatic ecosystem models to describe water quality. The module is mostly used for modelling water quality as part of an environmental impact assessment.

In the present case a eutrophication model was used to describe the concentrations of phytoplankton, chlorophyll-a, zooplankton, organic matter (detritus), inorganic nutrients and oxygen in the river Elbe in Hamburg. Rooted vegetation and macroalgae were not implemented as their influence in this part of the Elbe is negligible. The eutrophication module is integrated within the advection-dispersion module which describes the physical transport processes at each node in the model domain.

The model was used to describe the oxygen conditions in the Port of Hamburg, especially the change of dissolved oxygen in the Reiherstieg, a lateral channel which is usually closed with a sluice at the southern end to prevent suspended solids to deposit in the port. Due to plans for a new sluice gate the Hamburg Port Authority tested if a temporary opening of the gate could improve the oxygen conditions in the port. The model showed that resuspension and mineralization of organic material play an important role in this system. The balance between opening the gates to flush oxygen rich water into the port and preventing the introduction of organic material is crucial for better oxygen balance in the Reiherstieg.

Keywords

oxygen, nutrients, water quality, Elbe, model, MIKE21, ECO Lab

Inhalt

1 Einleitung.....117

2 Methoden.....119

2.1 Hydrodynamisches Modell119

2.2 Ökologisches Modell119

3 Ergebnisse.....120

3.1 Hydrodynamisches Modell120

3.2 Ökologisches Modell122

4 Diskussion126

5 Schriftenverzeichnis126

1 Einleitung

Die Modellierung der Hydrodynamik ist zwar ein seit vielen Jahren fest etabliertes Verfahren, die ökologische Modellierung spielt dabei jedoch eine eher untergeordnete Rolle. Der hohe Rechenaufwand für die in der Regel sehr komplexen ökologischen Modelle stellte bisher ein großes Problem dar. Mit den rückläufigen Preisen für leistungsstarke Computer entwickelt sich die ökologische Modellierung jedoch immer mehr zu einem geeigneten Werkzeug für die Untersuchung anthropogener Eingriffe in Küstengewässer.

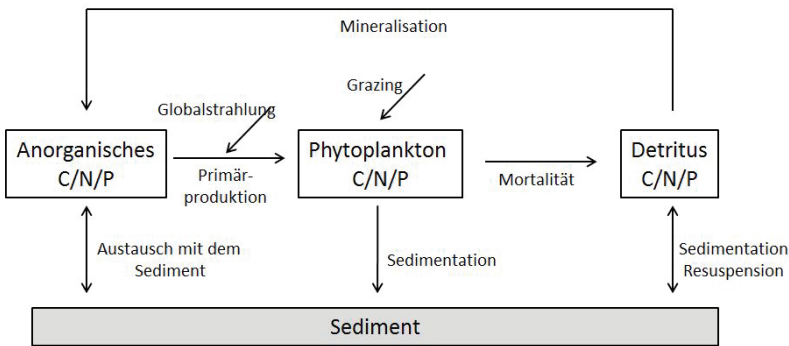


Abbildung 1: Typisches konzeptionelles ökologisches Modell.

Die Komplexität solcher Modelle beruht auf der engen Verzahnung der biologischen und chemischen Prozesse, die in hohem Maße voneinander abhängig sind. So hängt beispielsweise die Sauerstoffkonzentration von der Temperatur und der Konzentration des Phytoplanktons ab. Die Konzentration des Phytoplanktons selbst ist eine Funktion des Lichts und der Verfügbarkeit von Nährstoffen. Dies wiederum bedeutet, dass in einem Sauerstoffmodell auch die Temperatur und alle Nährstoffkreisläufe (insbesondere die Kreisläufe für Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor) abgebildet werden müssen. Ein

typisches konzeptionelles Modell, das den Einfluss benthischer Vegetation vernachlässigt, ist in Abb. 1 dargestellt.

Das gesamte Phytoplankton wird unter Einwirkung von Licht aus anorganischem Material aufgebaut (Primärproduktion). Diese Primärproduktion ist der einzige sauerstoffproduzierende Prozess im Wasser. Die gesamte tote Materie (Detritus) wiederum wird unter Sauerstoffverbrauch in anorganische Materie mineralisiert. Beide organischen Pools (Phytoplankton und Detritus) unterliegen einem Absinkverhalten. In der Regel kann nur der Detritus-Anteil erneut resuspendieren, da, so die häufige Annahme, abgesunkenes Phytoplankton abstirbt.

Da Licht der wichtigste Einflussfaktor für die Primärproduktion ist, wirken sich alle Faktoren mit Einfluss auf die Lichtdurchdringung (z. B. die Trübung) direkt auf den gelösten Sauerstoff aus. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die durch Trübung häufig verursachte Erhöhung des biologischen Sauerstoffbedarfs (BSB), da organische Verbindungen nach der Resuspension mineralisieren und dabei gelösten Sauerstoff zehren.

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Problematik der resuspendierten Stoffe, die im Hafen von Hamburg zu starker Sauerstoffzehrung führen.

Das Hafenbecken des Reiherstiegs im südlichen Teil des Hamburger Hafens ist am südlichen Ende durch eine Schleuse verschlossen (Abb. 2). Um den Eintrag von Schwebstoffen in den Reiherstieg zu verhindern, bleibt die Schleuse in der Regel geschlossen. Lange Verweilzeiten des Wasserkörpers und niedrige Sauerstoffkonzentrationen sind die Folge. Im Rahmen der geplanten Ertüchtigung dieser Schleuse wurde diskutiert, ob durch eine zeitweilige Öffnung der Schleusentore eine Verkürzung der Verweilzeiten und eine Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im Hafen erreicht werden könnte. Es ist offensichtlich, dass eine Öffnung der Schleuse die Verweilzeiten verkürzen würde, es war jedoch unklar, ob die Sedimente aufgrund der zunehmenden Strömungsgeschwindigkeiten resuspendieren und zu einer Erhöhung des BSB im Reiherstieg führen würden.

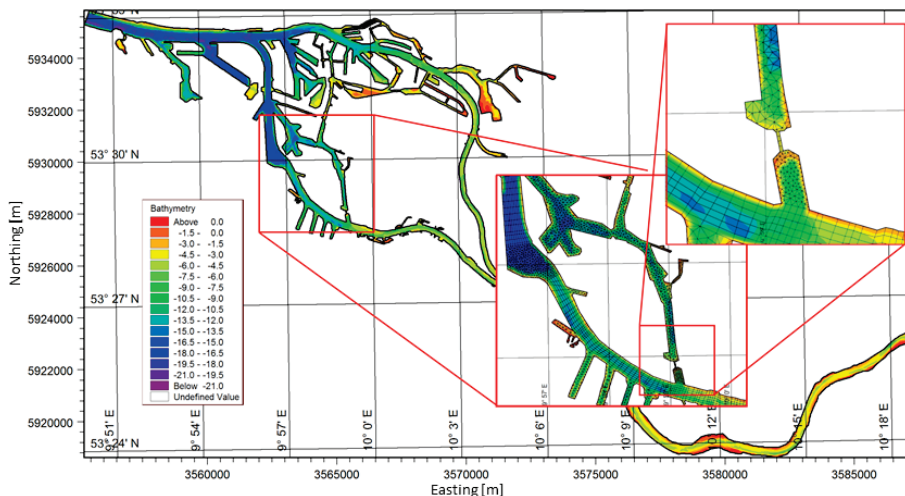


Abbildung 2: Der Reiherstieg im Hafen von Hamburg.

2 Methoden

2.1 Hydrodynamisches Modell

Zur Simulation der hydrodynamischen Bedingungen in der Elbe in Hamburg wurde das flexible Mesh-Modell MIKE 21 (DHI, 2013) eingesetzt. Das Modell basiert auf der numerischen Lösung von Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Berücksichtigung der Annahmen von Boussinesq und der Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung. Kontinuitäts-, Impuls-, Temperatur- und Dichtegleichungen sowie Turbulenz sind in diesem Modell erfasst. Die räumliche Diskretisierung erfolgt über einen elementzentrierten Finite-Volumen-Ansatz. Horizontal wird ein unstrukturiertes Mesh verwendet.

Das Modellgebiet (Abb. 3) erstreckt sich im tideabhängigen Teil der Elbe vom Wehr in Geesthacht (stromaufwärts) bis nach Blankenese (stromabwärts).

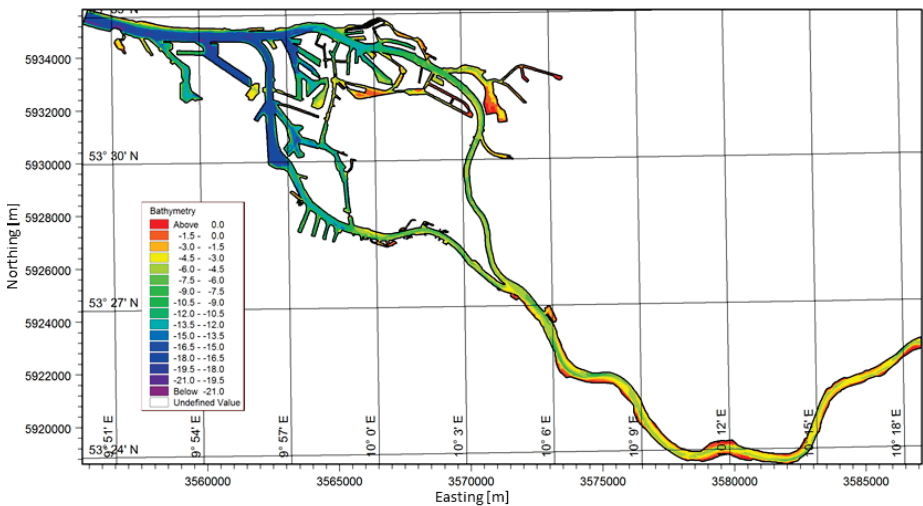


Abbildung 3: Modellgebiet des M21FM-Modells.

2.2 Ökologisches Modell

An das 2D-hydrodynamische Modell wurde ein ökologisches Modell gekoppelt, um die gleichzeitig stattfindenden Transport- und Dispersionsvorgänge sowie die biologischen/chemischen Prozesse zu berechnen. Das ökologische Modell basiert auf dem Modell „Eutrophication 1“ (DHI 2013). In dem Modell sind die folgenden 11 Zustandsgrößen, die der Advektion und Dispersion unterliegen, beschrieben:

- Kohlenstoff aus Phytoplankton (gC/m³)
- Stickstoff aus Phytoplankton (gN/m³)
- Phosphor aus Phytoplankton (gP/m³)
- Chlorophyll-a (g/m³)
- Kohlenstoff aus Zooplankton (gC/m³)
- Kohlenstoff aus Detritus (gC/m³)

- Stickstoff aus Detritus (gN/m³)
- Phosphor aus Detritus (gP/m³)
- Anorganischer Stickstoff (gN/m³)
- Anorganischer Phosphor (gP/m³)
- Gelöster Sauerstoff (g/m³)

Die benthische Vegetation wurde im untersuchten tideabhängigen Teil der Elbe und im Hamburger Hafen als unerheblich angesehen.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Resuspension von Sedimenten nahe der Schleuse durch die höheren Strömungsgeschwindigkeiten beim Öffnen der Tore. Aus diesem Grund wurden an der Schleuse Sedimentproben entnommen, um die Korngrößenverteilung zu messen. Ausgehend von diesen Messungen wurden Strömungsgeschwindigkeit und resuspendiertes Sediment für verschiedene Korngrößenklassen korreliert (Abb. 4).

Darüber hinaus wurde der biologische Sauerstoffbedarf (BSB) der Sedimentproben gemessen. Die empirischen Beziehungen zwischen Resuspension und BSB wurden in das ökologische Modell aufgenommen. Mit diesem Ansatz wurde sichergestellt, dass die durch die Mineralisierung der resuspendierten Sedimente am Schleusentor verursachte biologische/chemische Sauerstoffzehrung im Modell angemessen umgesetzt wird.

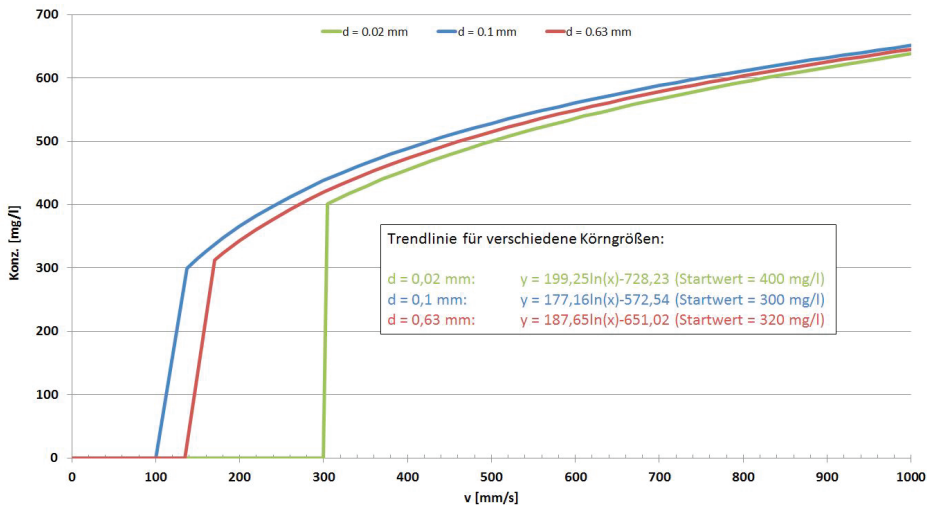


Abbildung 4: Korrelation zwischen Strömungsgeschwindigkeit und resuspendiertem Sediment für verschiedene Korngrößenklassen.

3 Ergebnisse

3.1 Hydrodynamisches Modell

Das hydrodynamische Modell wurde an den Pegeln in St. Pauli (Abb. 5) und Bunthaus (Abb. 6) für den Wasserstand kalibriert. Bei Tideniedrigwasser neigt das Modell besonders bei Bunthaus zu einer Überschätzung der gemessenen Werte. Im Allgemeinen besteht jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Wasserständen.

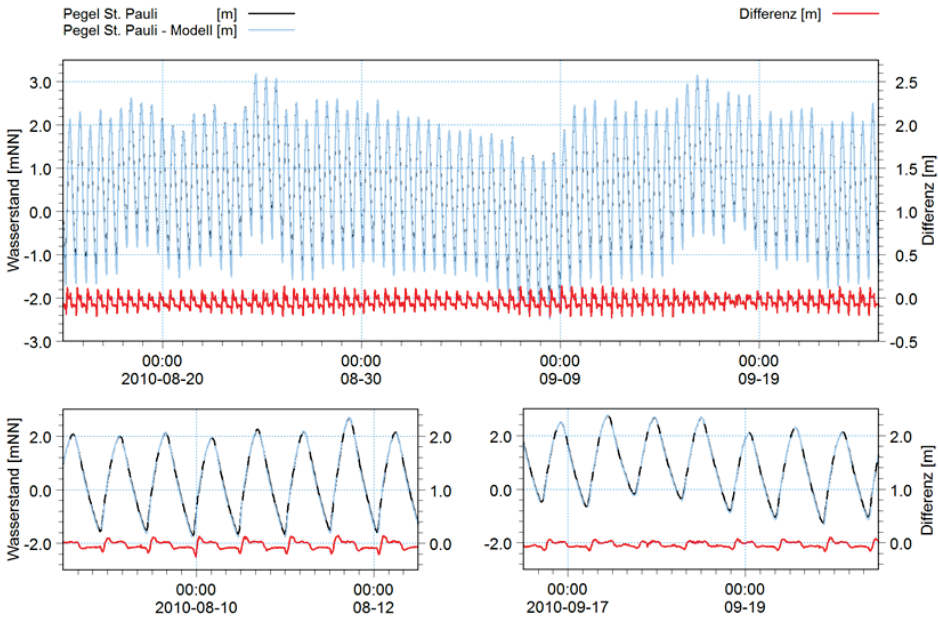


Abbildung 5: Gemessener Wasserstand (schwarze Linie) und simulierter Wasserstand (blaue Linie) am Pegel St. Pauli. Die rote Linie kennzeichnet die Differenz zwischen den gemessenen und den simulierten Werten.

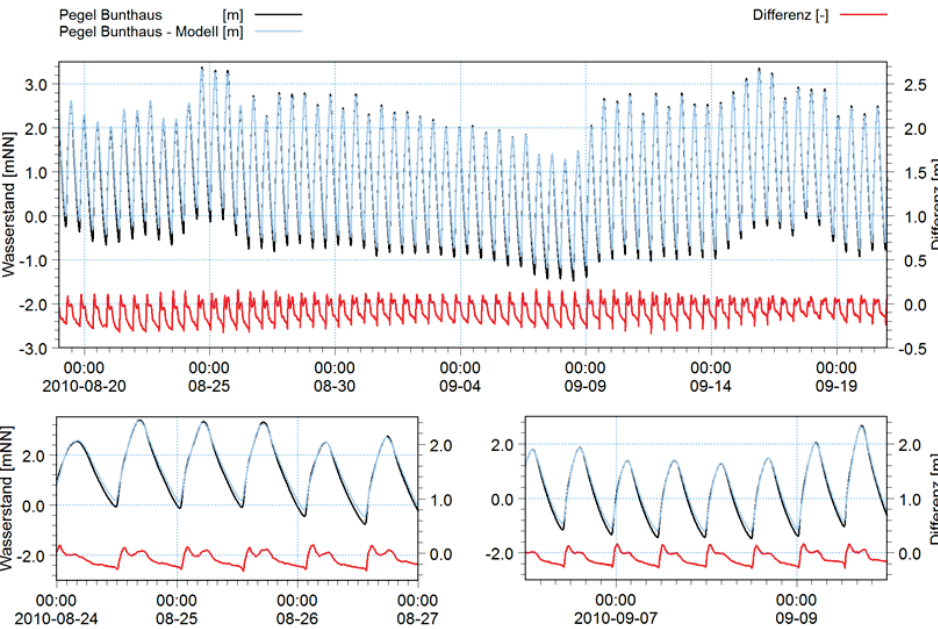


Abbildung 6: Gemessener Wasserstand (schwarze Linie) und simulierter Wasserstand (blaue Linie) am Pegel Bunthaus. Die rote Linie kennzeichnet die Differenz zwischen den gemessenen und den simulierten Werten.

3.2 Ökologisches Modell

Die Sauerstoffkonzentrationen wurden mit Messungen von zwei Messstationen kalibriert. Ein Sauerstoffsensor wurde südlich der Reiherstieg-Schleuse, der zweite im Reiherstieg nördlich der Schleuse (Abb. 7) angebracht.

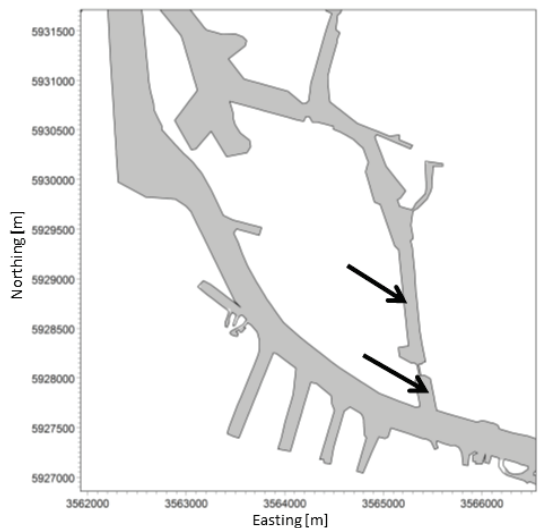


Abbildung 7: Position der beiden Sauerstoffsonden.

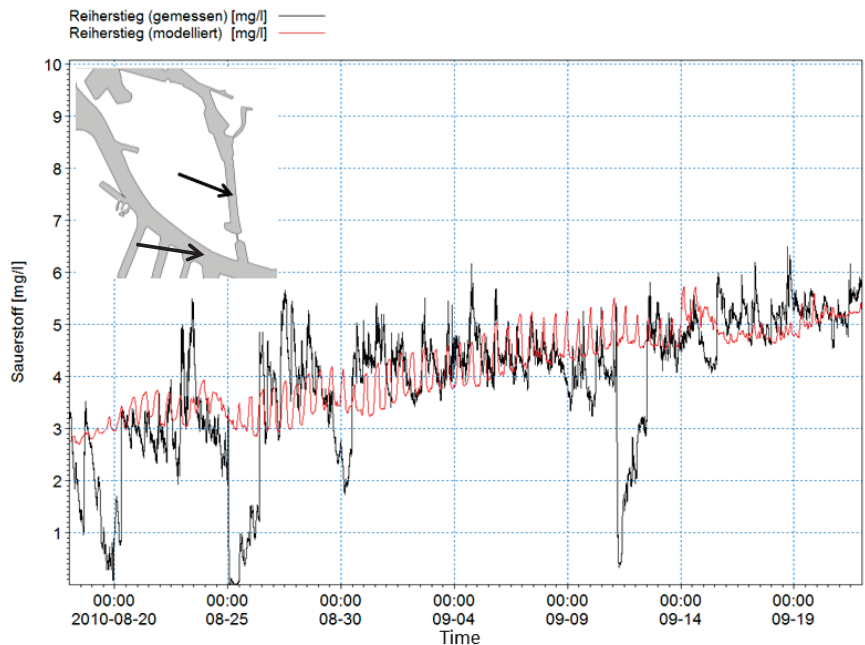


Abbildung 8: Gemessene (schwarz) und simulierte (rot) Sauerstoffkonzentrationen im Reiherstieg.

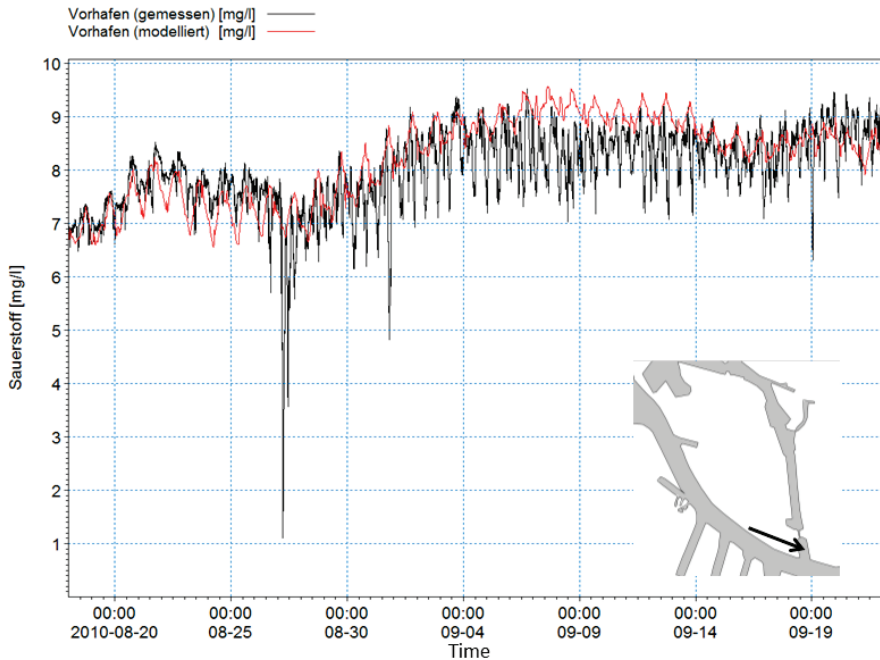


Abbildung 9: Gemessene (schwarz) und simulierte (rot) Sauerstoffkonzentrationen südlich der Reihersstieg-Schleuse.

Die Sauerstoffmessungen zeigten starke Schwankungen, die nicht dem Tagesverlauf oder dem Tidenzyklus zuzuschreiben waren (Abb. 8 und Abb. 9). Mit großer Wahrscheinlichkeit ist der starke Sauerstoffrückgang im Reihersstieg Schiffsbewegungen geschuldet, durch die eine Resuspension großer Mengen an Sedimenten verursacht wird. Weitere mögliche Erklärungen wären lokale Einleiter oder der Oberflächeneintrag organischer Substanzen nach Regenereignissen. Diese Erklärungsmöglichkeiten lassen sich jedoch wegen fehlender Daten nicht bestätigen. Folglich können die entsprechenden Ereignisse im vorliegenden Modell nicht reproduziert werden. Abgesehen von diesen ungeklärten Ereignissen reproduziert das Modell die allgemeinen Trends sowie die Tages- und Tidezyklen.

Nach der Kalibrierung wurde ein Szenario mit zeitweise geöffneten Schleusentoren berechnet. Im Modell wurde die Öffnung der Tore eine Stunde nach Tidehochwasser und die Schließung der Tore eine Stunde vor Tideniedrigwasser angesetzt. Ziel dieser kontrollierten Vorgehensweise war es, dass möglichst viel Wasser aus der Süderelbe in den Reihersstieg gelangt. Während des Hochwassers blieben die Tore geschlossen, um das Einströmen aus Richtung unterstrom in den Reihersstieg zu vermindern. Unterhalb von Hamburg ist die Konzentration von gelöstem Sauerstoff in der Regel niedriger als im Oberwasser; daher war das Ziel, möglichst viel Oberwasser in den Reihersstieg zu pumpen und das Einströmen von Unterwasser zu vermindern.

Abb. 10 zeigt die allgemeine Entwicklung von gelöstem Sauerstoff, BSB und resuspendiertem Sediment über mehrere Tiden. Die Zeitreihe stellt die Situation direkt an den Schleusentoren im Reihersstieg dar. Für den gelösten Sauerstoff zeigt sich bei Öffnung der

Tore ein deutlich positiver Effekt. Große Mengen an Wasser mit einer hohen Konzentration von gelöstem Sauerstoff gelangen in den Reiherstieg und bewirken den sofortigen Anstieg der Sauerstoffkonzentration im Bereich der Schleusentore.

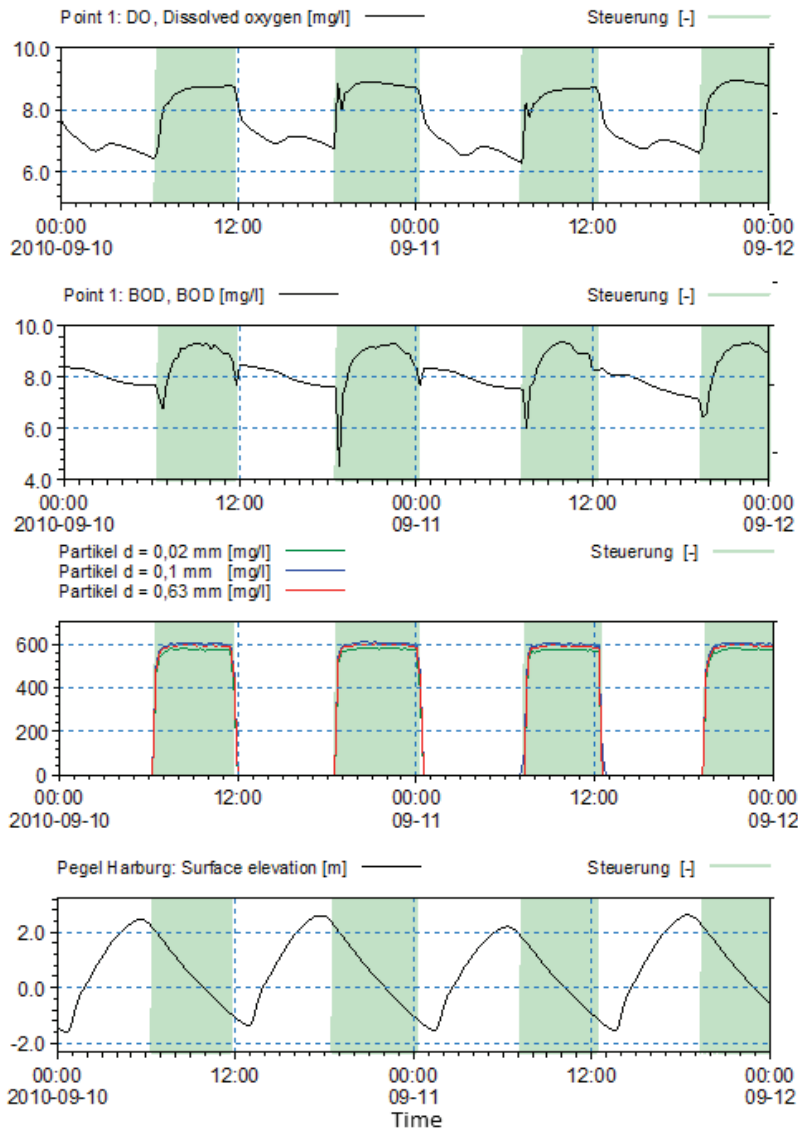


Abbildung 10: Verlauf von gelöstem Sauerstoff, BSB und resuspendierten Sedimenten an den Schleusentoren während unterschiedlicher Tidezeiträume. Das unterste Diagramm zeigt den Wasserstand. Die Zeiträume, in denen die Schleusentore geöffnet sind, sind grün unterlegt.

Gleichzeitig mit dem Eintritt von Wasser und Sauerstoff in den Reiherstieg resuspendieren große Mengen Sediment aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Schleuse (Abb. 10). Dadurch steigt auch der BSB.

In den Zeiträumen mit geschlossenen Toren sinkt der BSB mit einsetzender Mineralisation der organischen Verbindungen. Dieser Vorgang spiegelt sich auch in der sinkenden Konzentration des gelösten Sauerstoffs wider, da die Mineralisation ein sauerstoffzehrender Vorgang ist.

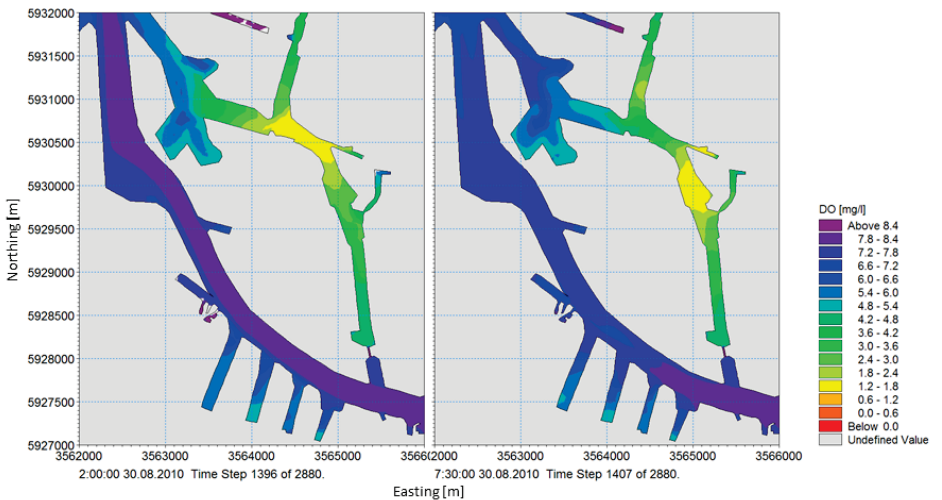


Abbildung 11: Konzentration an gelöstem Sauerstoff im Reiherstieg im Szenario mit permanent geschlossenen Schleusentoren. Die linke Abbildung zeigt die Bedingungen bei Tideniedrigwasser, die rechte Abbildung die Bedingungen bei Tidehochwasser.

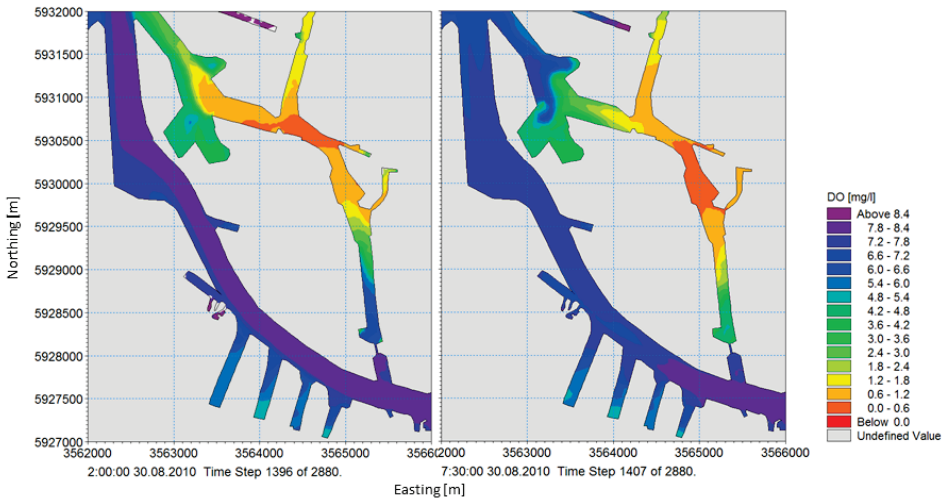


Abbildung 12: Konzentration an gelöstem Sauerstoff im Reiherstieg im Szenario mit zeitweise geöffneten Schleusentoren. Die linke Abbildung zeigt die Bedingungen bei Tideniedrigwasser, die rechte Abbildung die Bedingungen bei Tidehochwasser.

Abb. 11 und Abb. 12 zeigen die räumliche Wirkung der zeitweiligen Öffnung auf den gelösten Sauerstoff bei Tidehoch- und Tideniedrigwasser am 30. 8. 2010. Im Anfangszustand (Abb. 11) liegt die niedrigste Konzentration des gelösten Sauerstoffs im Reiherstieg bei ca. 1,5 mg/l. Je nach Tide oszilliert die niedrigste Konzentration zwischen dem „Äußeren Schmidtkanal“ und dem „Mittleren Reiherstieg“. Die zeitweilige Öffnung (Abb. 12) ändert das räumliche Muster nicht, führt jedoch zu einer viel niedrigeren Konzentration des gelösten Sauerstoffs (ca. 0,5 mg/l) infolge des sauerstoffzehrenden BSB. Der positive Effekt des sauerstoffhaltigen Elbewassers ist nur auf den ersten hundert Metern nördlich der Schleuse sichtbar.

4 Diskussion

Die vorliegende Studie zeigt die Auswirkung der Mineralisierung von resuspendiertem Sediment. Die mit der zeitweiligen Öffnung der Schleusentore angestrebte Verbesserung im Hinblick auf den gelösten Sauerstoff zeigt in weiten Bereichen des Reiherstiegs eine unerwartete Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse. Der positive Effekt des sauerstoffreichen Elbewassers endet nach einigen wenigen hundert Metern im Reiherstieg. Nördlich dieses kleinen Bereichs sinken die Konzentrationswerte des gelösten Sauerstoffs auf einen niedrigeren Wert als im Szenario mit permanent geschlossenen Toren. Dieser Rückgang ist der starken Sauerstoffzehrung von mineralisierendem Material (BSB) zuzuschreiben, das hauptsächlich von resuspendierten Sedimenten stammt, die durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Schleusentore auftreten. Das Material wird in Richtung Norden in den Reiherstieg transportiert, wo der Mineralisierungsprozess einsetzt. Dadurch kommt es zu einer starken Sauerstoffzehrung im mittleren Bereich des Reiherstiegs. Auch wenn große Mengen sauerstoffreichen Wassers in den Reiherstieg eintreten, wird dieser positive Effekt in weiten Teilen des Reiherstiegs durch die Sauerstoffzehrung des BSB überlagert.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass ein nachhaltiger positiver Effekt auf die Sauerstoffkonzentration im Reiherstieg ein Kompromiss zwischen einer möglichst hohen Menge an sauerstoffreichem Elbewasser und einem möglichst niedrigen BSB ist. Aus diesem Grund muss die Strömung niedrig gehalten werden, um die Resuspension von Sedimenten zu verhindern.

5 Schriftenverzeichnis

- DHI: MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation, 2013.
DHI: ECO Lab, Short scientific description, 2013.