

Hydro- und Morphodynamische Simulation unter Berücksichtigung ökologischer Modellkomponenten

Peter Milbradt und Tino Schonert

Institut für Bauinformatik (Universität Hannover)

Summary

In future, ecological considerations will play a major role in numerical simulations of coastal waters and rivers. On the one hand the hydrodynamic conditions represent an important effect to the growth of organisms, on the other hand the natural cover affects the hydro- and morphodynamic. Especially the sensitivity of the watersubsurface to erosion is primary influenced by the existence of animals and seaweeds.

In this article a discrete ecological model based on a cellular automaton, which simulates the growth of the seaweeds in coastal areas in relation to different hydrodynamic parameters and densities of algae and snails, is introduced. The hydrodynamic values are calculated with a stabilised finite element flow model. Possible transfer strategies, which allow a direct coupling between these different model paradigms, are presented. Main effects and possible influences to a changed hydro- and morphodynamic are shown on first academically studies.

Zusammenfassung

In Zukunft werden bei der numerischen Simulation von Gewässersystemen vermehrt ökologische Betrachtungen eine wesentliche Rolle spielen. Auf der einen Seite stellen die hydrodynamischen Gegebenheiten eine wesentliche Randbedingung für das Wachstum von Organismen dar, auf der anderen Seite beeinflusst der Bewuchs auch die Hydro- und Morphodynamik. Insbesondere die Anfälligkeit von Gewässeruntergründen gegenüber Erosionserscheinungen wird wesentlich durch das Vorhandensein von Lebewesen und Seegräsern beeinflusst.

Es wird ein diskretes ökologisches Modell auf der Grundlage eines Zellularen Automaten vorgestellt, welches in Abhängigkeit unterschiedlicher hydrodynamischer Zustandsvariablen und Populationsdichten von Mikroalgen und Wattschnecken das Seegraswachstum im Küstennahbereich simuliert. Die genutzten hydrodynamischen Zustandsgrößen werden mit einem tiefenintegrierten Strömungsmodell auf der Basis stabilisierter Finiter Elemente berechnet. Mögliche Übertragungsstrategien, die eine direkte Kopplung dieser unterschiedlichen Modellparadigmen erlauben, werden im Beitrag vorgestellt. An ersten akademischen Modelluntersuchungen werden wesentliche Effekte aufgezeigt und mögliche Einflüsse auf eine veränderte Hydro- und Morphodynamik dargestellt.

1 Einleitung

Bei der Lösung von Ingenieurproblemen treten verstärkt ökologische Aspekte in den Vordergrund. Neben Naturbeobachtungen (Monitoring) werden heute immer stärker auch Simulationsmodelle zur Beantwortung ökologischer Fragestellungen herangezogen. Die Simulation der Entwicklung bioti-

scher und abiotischer Zustandsgrößen von Gewässersystemen ermöglicht Abschätzungen und Aussagen bezüglich der Veränderung bestehender Systeme u.a. durch menschliche Eingriffe.

Während für die Beschreibung der nichtbiologischen Zustandsgrößen der Gewässer in der Vergangenheit eine Vielzahl von numerischen Simulationsmodellen entwickelt worden sind, lässt sich die Entwicklung der in den Gewässern lebenden Organismen wesentlich schwieriger beschreiben. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass es sich um individuelle Lebewesen handelt, die teilweise in Nahrungsbeziehung zueinander stehen. Ökologische Systeme werden „klassisch“ meist durch kontinuierliche Modelle beschrieben. Typische Vertreter sind Wachstumsmodelle mit und ohne Rückkopplung. Die klassischen Gleichungen der biologischen Ökologie beschreiben das Wachstum einer Beutepopulation x und ihrer Räuber y über die kontinuierlichen Volterra-Lotka Gleichungen [Ri85]. Diese einfachen mathematischen Modelle führen schon zu ersten qualitativen und quantitativen Abschätzungen möglicher Populationsentwicklungen. Diese Klasse von Modellen auf der Basis gewöhnlicher Differential- bzw. Differenzgleichungen setzt stets die räumliche Homogenität der Systementwicklung voraus. Vernachlässigt werden die räumliche Verteilung der jeweiligen Populationen, ihrer Lebensgrundlagen und Feinde in ihrem Territorium. Die Erweiterung um solche Ortsabhängigkeiten kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. In Anlehnung an Strömungs-, Diffusions- und Konvektionsprobleme in der Physik wird der Versuch unternommen, ähnliche Formulierungen in der Ökosystemmodellierung zu verwenden [Fi95]. Die Formulierung partieller Differentialgleichungen zur Beschreibung der örtlichen und zeitlichen Entwicklung in Ökosystemen setzt ein umfassendes Verständnis der ablaufenden Prozesse voraus und die Möglichkeit, diese mathematisch zu formalisieren.

Für die Untersuchung und Beschreibung zeitlich und örtlich veränderlicher Entwicklungsprozesse haben sich in den letzten Jahren besonders Zellulare Automaten als geeignetes Simulationswerkzeug erwiesen.

2 Zellulare Automaten

Zellulare Automaten werden erfolgreich in unterschiedlichen Teilgebieten der Ökosystemforschung eingesetzt und weiter entwickelt [GS95],[CMM02]. Gründe hierfür sind ihr einfacher Aufbau als reines diskretes Modellparadigma, die Möglichkeit intuitiv Entwicklungsregeln festzulegen und nicht zuletzt die Möglichkeit, einzelne Individuen betrachten und beschreiben zu können. Ein Zellularer Automat ist ein vollkommen diskretes Berechnungsmodell, das sich durch die wiederholte Anwendung einfacher deterministischer Regeln entwickelt [GS95].

Ein Zellularer Automat kann beschrieben werden durch ein 4-Tupel (L, Z, N, δ) , bestehend aus

- einem regulären Gitter L
- einer endlichen Zustandsmenge Z
- einer Nachbarschaftsrelation $N \subseteq L^n$
- und einer Zustandsübergangsfunktion $\delta : Z^n \rightarrow Z$.

Das reguläre Gitter L , welches in gleich große und gleichartige Zellen aufgeteilt ist, repräsentiert das durch den Zellularen Automaten beschriebene Gebiet Ω . Die Gittergeometrie wird bestimmt durch die Dimension und die geometrische Grundform der einzelnen Zellen. Für die Diskretisierung eines zweidimensionalen Gebietes sind Dreiecke, Vierecke oder Sechsecke denkbar.

Jede Zelle des Zellularen Automaten befindet sich zu jedem Zeitpunkt in einem bestimmten Zustand $z \in Z$. Mögliche Zustände der Zellen sind durch die endliche Zustandsmenge Z festgelegt.

Die Nachbarschaftsrelation wird entscheidend von der zugrunde liegenden Zellstruktur bestimmt. Denn in Abhängigkeit der Form sind unterschiedliche Zellen zueinander benachbart. Grundsätzlich wird zwischen der *von-Neumann-Nachbarschaft* und der *Moore-Nachbarschaft* unterschieden.

In der von-Neumann-Nachbarschaft werden nur solche Zellen als benachbart betrachtet, die eine gemeinsame Kante besitzen. Werden zusätzlich die Zellen mit einem gemeinsamen Eckpunkt betrachtet, so handelt es sich um die Moore-Nachbarschaft.

Die Zustände der Zellen verändern sich in diskreten Zeitschritten entsprechend einer Zustandsübergangsfunktion $\delta: Z^n \rightarrow Z$, die in Form von Regeln angegeben wird. Die Entwicklung einer Zelle hängt nur von ihrem aktuellen Zustand und dem ihrer Nachbarzellen ab.

3 Ökosystem Seegraswiese

Seegraswiesen sind nicht nur Lebensraum vieler Tierarten, sondern stabilisieren aufgrund ihrer eng verflochtenen Wurzelsysteme das Sediment. Darüber hinaus ist der dichte Teppich von Blättern imstande den Strömungswiderstand zu erhöhen und somit Strömungen und Wellenbewegungen zu verringern [MLT94].



Abbildung 1: Seegraspflanzen im Wattenbereich der Nordsee

Betrachtet werden die beiden Gattungen *Zostera marina* (das große Seegras) und *Zostera noltii* (kleines Seegras), die früher in deutschen Küstengewässern weit verbreitet waren. Jedoch wurden die großen Seegrasbestände um 1930 von einer eingeschleppten Pilzkrankheit fast vollständig vernichtet. Hierdurch kam es in diesen Bereichen zu einem veränderten Erosionsverhalten. Während sich die Seegrasbestände an anderen Küsten wieder erholt haben, sind die Seegraswiesen im Wattenmeer nicht wieder entstanden. Ein vermehrtes Vorkommen ist nur noch im nordfriesischen Wattenmeer [MLT94] zu finden.

Als Ursache hierfür wird das Zusammenspiel mehrerer verschiedener Umweltfaktoren, wie z. B. veränderte Strömungsverhältnisse, erhöhte Trübung des Wassers und der zunehmende Bewuchs durch Mikroalgen auf den Seegrasblättern, infolge der gestiegenen Nährstoffkonzentrationen (*Eutrophierung*) im Wattenmeer, verantwortlich gemacht. Darum gilt einer besonderen Aufmerksamkeit der

Modellierung des Wachstumsverhaltens des Seegrases im Wattenmeer der Nordsee in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussfaktoren sowie einer Interaktion mit hydro- und morphodynamischen Systemgrößen.

In speziellen Experimenten konnte aufgezeigt werden, dass besonders Wasserbewegungen, Algenbewuchs und Beweidung durch Wattschnecken (*Hydrobia ulvae*) Auswirkungen auf die Entwicklung des Seegrases haben. Dort wo die Strömungsgeschwindigkeiten gering sind, weiden die nur millimetergroßen Wattschnecken den Algenbewuchs auf den Seegrasblättern ab. Jedoch werden die Wattschnecken leicht durch erhöhte Strömungsverhältnisse verdriftet und sind deshalb in Gebieten mit starkem Strömungseinfluss kaum zu finden. Infolge dessen werden dort die Mikroalgen auf den Seegrasblättern nicht mehr abgeweidet und bilden sich bei hohen Nährstoffkonzentrationen im Watt zu einem dichten Pelz, der die Seegräser überwuchert und schließlich das Wachstum hemmt. Die Stoffwechselaktivität aller Organismen hängt stark mit der Umgebungstemperatur zusammen. Wachstum und Vermehrung setzen milde Wassertemperaturen voraus.

Die in diesem Wortmodell beschriebenen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Modellgrößen lassen sich als Wirkungsbeziehungen in einem sogenannten Wirkungsgraphen darstellen.

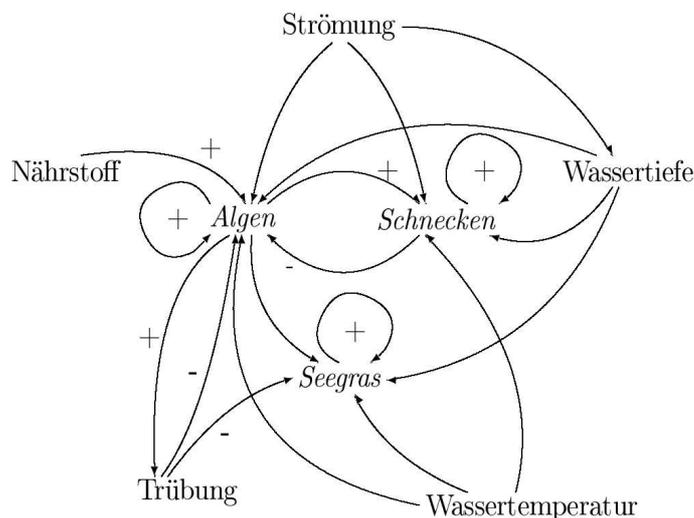


Abbildung 2: Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Systemgrößen

4 Seegrasmodell in Anlehnung eines Zellularen Automaten

4.1 Modellierung der Teilsysteme im Seegrasmodell

Für das Seegraswiesenmodell betrachten wir ein zweidimensionales Gebiet Ω , welches durch ein einfaches rechteckiges Zellgitter, bestehend aus $m \times n$ Zellen, beschrieben wird. Dabei stellt jede Zelle $c_{ij} \in L$ des Automaten einen kleinen Meeresausschnitt dar. Zur Darstellung der einzelnen Modellgrößen werden folgende Zustandsmengen eingeführt:

- G: der Bedeckungsgrad des Seegrases, welcher das Verhältnis der von den Blättern überdeckten Fläche zur Grundfläche darstellt und zwischen 0 und 1 variiert

- N: die Anzahl der Schnecken, deren Bevölkerungsgrad durch das Intervall $[0,1]$ ausgedrückt wird.
- A: Populationsgröße der Algen, ebenfalls im Bereich zwischen 0 und 1
- H: der Nährstoffeintrag, dessen Intensität durch 11 verschiedene Klassen von *sehr niedrig* (0) bis *sehr hoch* (10) ausgedrückt wird.
- Z: die Wassertiefe
- V: die aktuellen Strömungsverhältnisse (v_x, v_y, η)
- T: die Wassertemperatur, die im Modell Werte zwischen 0°C und 20°C annimmt
- B: die Wassertrübung, welche analog zum Nährstoffeintrag in unterschiedliche Klassen von *sehr klar* (0) bis hin zu *sehr trüb* (10) eingeteilt wird.
- D: der Zeitraum des Trockenfallens. Dieser Wert gibt an (in Sekunden), wie lange eine Zelle bereits trocken liegt.

Zwischen den genannten Zustandsvariablen ist eine Regelbasis zu definieren, um die Abhängigkeiten und Wachstumsprozesse beschreiben zu können. Das im Rahmen der Ökosystemforschung erworbene Wissen über Populationsentwicklungen, z. B. durch zahlreiche Beobachtungen und Experimente, kann aufgrund der Komplexität und Zufälligkeit der Einflussfaktoren nur ganz allgemein und sehr vage formuliert werden.

Aussagen bezüglich des Vorhandenseins einer bestimmten Populationsdichte in einem betrachteten Gebiet können daher nur mit einer gewissen Unsicherheit gemacht werden, denn

- nicht alle Regeln sind absolut gültig,
- nicht alle Fakten sind absolut verlässlich.

Deshalb ist es erforderlich, Unsicherheiten in den Fakten und Regeln verarbeiten und entsprechend schlussfolgern zu können. Ziel des unscharfen Schließens ist es, aus unscharfen Prämissen unpräzise Folgerungen nach formalen Rechenvorschriften herzuleiten. Hier bietet sich die Fuzzy-Logik an, welche auf einer kontinuierlichen Festlegung des Grads der Zugehörigkeit von Elementen zu einer Menge bzw. einem Begriff basiert. Dabei beschreibt eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu: G \rightarrow [0,1]$ die linguistischen Werte (*sehr niedrig*, *niedrig*, *mittel*, ... *sehr hoch*) einer jeden Zustandsvariablen des Zellularen Automaten.

In Abhängigkeit des Erfüllungsgrades der verschiedenen Werte können nun Regeln definiert werden, die die Beziehungen der unterschiedlichen Modellgrößen beschreiben und weitere Ereignisse (wie das Wachstum einer Population X) auslösen können.

4.2 Anwendung der Regelbasis

Ausgehend von der Definition von Fuzzy-Mengen für die einzelnen Systemvariablen erfolgt die Anwendung der Regelbasis nach dem Prinzip der Fuzzy-Regelung. Durch Fuzzifizierung erfolgt zunächst eine graduelle Zuweisung der scharfen Systemgrößen auf die linguistischen Werte. Im Inferenzschritt werden diese unscharfen Terme entsprechend der definierten Regelbasis ausgewertet und eine Ergebnis-Fuzzy-Menge gebildet. Diese wird im Defuzzifizierungsschritt in einen scharfen Parameter (z. B. Wachstumsrate) umgewandelt.

Wie eingangs erläutert, lässt sich das durch Beobachtungen gewonnene Wissen über die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Zustandsgrößen in einem Wirkungsgraphen darstellen. Diese Wirkungsbeziehungen können in Form von sehr einfachen Regeln angegeben werden.

Beispielhaft sind hier zwei Regeln, die das Räuber-Beute-Verhalten zwischen Schnecken und Algen beschreiben, dargestellt:

- R_1 : **Wenn** die Algenanzahl in einer Zelle (Gebiet) hoch ist und
 die Schneckenanzahl ist gering,

 dann lässt sich mit einer hohen Wahrscheinlichkeit sagen, dass sich die
 Schneckenanzahl dort vergrößern wird.
- R_2 : **Wenn** die Algenanzahl in einer Zelle mittel ist und
 die Schneckenanzahl ist sehr hoch,
 dann ist das Schneckenwachstum sehr niedrig.

Die Regelprämisse beschreibt die Situation, in der die Regel angewendet werden kann. Die Konklusion der Regel enthält ebenfalls eine unscharfe Angabe eines eintretenden Ereignisses, wie beispielsweise die Stärke des Wachstums einer Population.

Regeln dieser Art lassen sich aus dem dargestellten Wirkungsgraphen herleiten und formulieren in geeigneter Weise das Hintergrundwissen über die Zusammenhänge des Ökosystems Seegraswiese. Auf diese Weise ergibt sich ein komplexes Regelsystem. Die Regelanwendung erfolgt entsprechend des Erfüllungsgrades der Prämissen.

4.3 Entwicklung der Populationen

Durch Anwendung des beschriebenen Regelsystems werden die Raten bezüglich des Wachstums und Absterbens einer Population X bestimmt. Für jede Tier- bzw. Pflanzenart gibt es eine positive Rückkopplung über die Wachstumsrate α und eine negative über die Sterbe- bzw. Fressrate β . Die Entwicklungen der Populationsdichten für Algen, Schnecken und Seegras werden in jedem Zeitschritt t gemäß der allgemeinen Formel für logistisches Wachstum bestimmt:

$$X_{t+1} = \underbrace{\alpha \cdot \left(1 - \frac{X_t}{K}\right)}_{\text{Kapazitätsabhängige Wachstumsrate}} \cdot X_t - \overbrace{\beta \cdot X_t}^{\text{Verlustterm}}$$

Dabei wird die konstante Wachstumsrate α mit einem dichteabhängigen Faktor $(1 - X/K)$ multipliziert, wobei K die maximale Kapazität des bewohnten Gebiets angibt. X/K beschreibt die Gesamtminderung der Wachstumsrate α der aktuellen Population X , wodurch sich das so genannte logistische Verhalten ergibt. Die allgemeine Formel wurde erweitert durch einen Verlustterm, welcher in Abhängigkeit von Sterberate und Populationsdichte den Verlust der Population in jedem Zeitschritt bestimmt. In diese Regel sind für jede Population typische Wachstums- und Verlustraten α, β einzusetzen.

4.4 Nachbarschaftsrelation und Randbedingungen

Als Nachbarschaft für das Wachstum der einzelnen Populationen wird die einfache Moore-Nachbarschaft verwendet. Da die Algen- und Schneckenbewegung vorrangig durch die Strömung beeinflusst wird, findet für die Wanderung die erweiterte Moore-Nachbarschaft Anwendung. Der Radius $r \in \mathbb{N}$ der Moorschen Nachbarschaft wird hinreichend groß gewählt, so dass die aktuellen Strömungsgeschwindigkeiten in den Regeln des Zellularen Automaten adäquat abgebildet werden können.

An den offen Gebietsrändern werden symmetrische Randbedingungen angenommen. Wandernde Populationsanteile werden entsprechend den vorliegenden Strömungsrichtungen aus dem Betrachtungsgebiet herastransportiert bzw. bei einlaufender Strömung hineingetragen. Um das Modell „lebendig“ zu halten, wird in jedem Zeitschritt zufällig in 0,1% der Zellen die Anzahl der Algen- bzw. Schnecken erhöht, die von „außen“ einwandern.

5 Kopplung mit Finite-Element-Modell

Im folgenden Abschnitt soll näher auf die direkte Kopplung des Zellularen Automaten mit einem Finite-Element-Strömungsmodell eingegangen und mögliche Übertragungsstrategien zwischen diesen verschiedenen Modellansätzen vorgestellt werden. Die prinzipiellen Unterschiede der Modellparadigmen des hydro-numerischen Modells auf der Basis kontinuierlicher Modellparameter und des diskreten Modells auf der Basis eines Zellularen Automaten zur Beschreibung der ökologischen Begebenheiten, machen das Koppeln solcher Modelle schwierig. Offensichtlich führt nur eine ganzheitliche Betrachtung und Modellierung der biotischen und abiotischen Prozesse zu vertrauenswürdigen Resultaten. Bei der Kopplung sind beide Richtungen zu berücksichtigen. Auf der einen Seite stellen die hydrodynamischen Größen eine wesentliche Randbedingung für das Wachstum von Organismen dar, auf der anderen Seite beeinflusst der Bewuchs und die Besiedelung durch Organismen auch die Hydro- und Morphodynamik. Die drückt sich unter anderem in einer Veränderung der Turbulenz

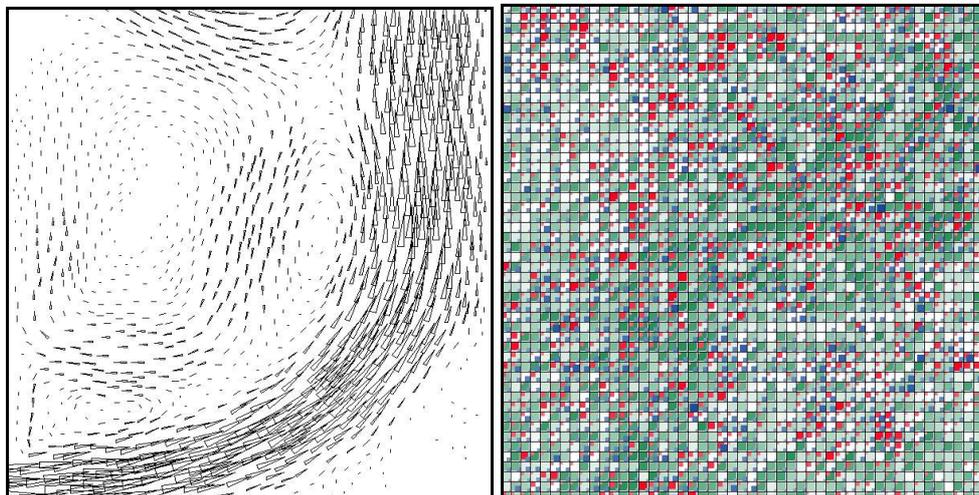


Abbildung 3: Simulation von Algen-, Schnecken- und Seegraspopulationen unter Berücksichtigung des Strömungsfeldes in einem Betrachtungsgebiet

und der Strömungswiderstände sowie einer Beeinflussung der Anfälligkeit der Gewässersohle gegenüber Erosionserscheinungen aus.

5.1 Strömungsmodell

Als Grundlage für die Berechnung der erforderlichen hydrodynamischen Zustandsgrößen wird ein tiefenintegriertes Strömungsmodell auf Basis stabilisierter Finiten Elemente verwendet [Mi95]. Bei der Finiten Element Methode wird das Gebiet in viele kleine Elemente, in diesem Fall in Dreiecke, unterteilt. Die Bestimmung der Zustandsgrößen v_x, v_y, η, z erfolgt an den Knoten des Netzes.

5.2 Kopplung stetiger Simulationsergebnisse mit Zellularen Automaten

Die Verwendung der unterschiedlichen Modellkonzepte erfordert zum einen eine Interpretation der stetigen Systemgrößen, so dass sie in den Regeln des ZA verarbeitet werden können. Andererseits müssen die diskreten Zustandsgrößen zur Berücksichtigung im hydrodynamischen Modell in stetige Parameter überführt werden. Ausgehend vom FE-Netz wird im Pre-Processing Schritt zunächst anhand der Gesamtgröße des zu betrachtenden Gebietes die Zellgröße bestimmt und jeder Zelle des Gitters ein Referenzelement zugeordnet. Dazu werden beide Netzstrukturen übereinander gelegt und einer Zelle jeweils das Element zugewiesen, welches den Mittelpunkt dieser Zelle enthält. In jedem Zeitschritt kann nun auf die hydrodynamischen Größen aus der FE-Rechnung zugegriffen werden, die das Verhalten dieser Zelle beschreiben. Auf diese Weise lässt sich das gesamte Finite-Element-Netz auf die reguläre Gitterstruktur des Zellularen Automaten abbilden.

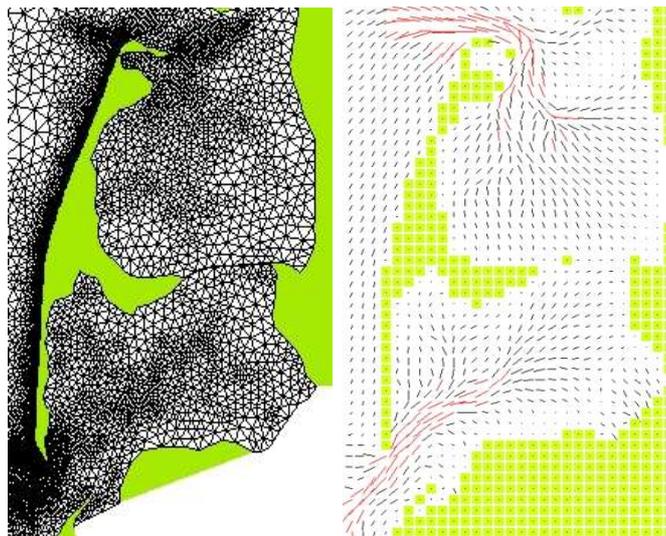


Abbildung 4: Abbildung des Finite-Element-Netzes auf ein reguläres rechteckiges Gitter

Auf der Grundlage dieser Strömungswerte erfolgt die Regelanwendung und Berechnung der Zustandsvariablen des Zellularen Automaten für den nächsten Zeitschritt.

5.3 Rückkopplung diskreter ökologischer Systemgrößen im Strömungsmodell

Durchströmte Tier- oder Pflanzenbestände bilden einen nicht zu vernachlässigbaren Faktor der lokalen Hydro- und Morphodynamik. In Vegetationsgebieten wirkt die Bewuchsdichte als zusätzliche Rauheit und als Strömungswiderstand. Seegras ist ein sehr flexibles Material mit einer geringen Biegesteifigkeit. Nach [PD03] ergibt sich der Gesamtströmungswiderstand F_p der Seegraspflanze als Summe der zwei Kraftkomponenten F_D und F_S . Dabei bezeichnet F_D die senkrecht zur Pflanze

wirkende Druckkraft (sog. Formwiderstand) und F_s die auf der Blattoberfläche wirkende Reibungskraft. Beide Kräfte resultieren aus der relativen Bewegung des Wasserkörpers um die Pflanze und sind strömungsabhängig.

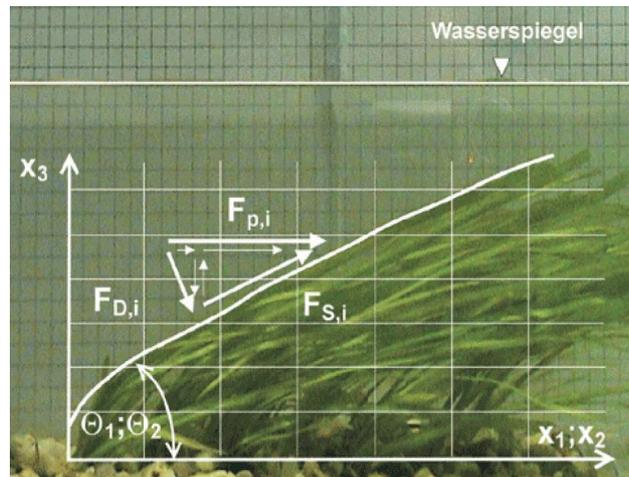


Abbildung 5: Widerstandskräfte des Seegrases (aus [PD03])

Mit der Änderung des Seegrasbewuchses im Zellularen Automaten sind im Verlauf der Simulation die Reibungskoeffizienten im Strömungsmodell anzupassen. Es wird der Ansatz verfolgt, in Abhängigkeit des Dichtegrades des Seegrases in einer Zelle des Zellularen Automaten den Reibungsbeiwert k_{Str} für jeden Knoten des FE-Netzes zu bestimmen. Dabei referenziert jeder Knoten diejenige Zelle des rechteckigen Gitternetzes in der er liegt. Eine Erweiterung dieses Ansatzes zur Bestimmung des Reibungswertes durch Berücksichtigung sämtlicher Zellen, die in der Voronoi-Region des Knoten liegen, mit anschließender Abstandsinterpolation zwischen Knoten und Zellschwerpunkten führt zu einer Verbesserung der Bestimmung des Reibungsbeiwertes.

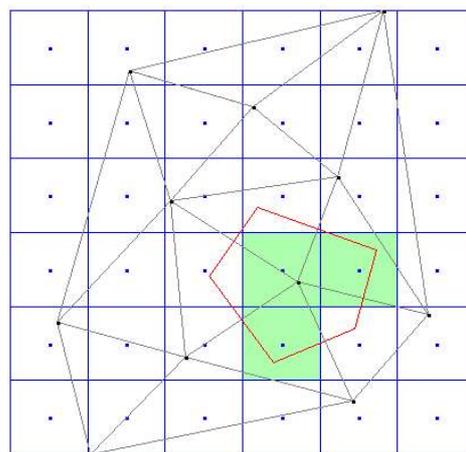


Abbildung 6: Zur Bestimmung des Reibungswertes haben alle Zellen Einfluss, deren Mittelpunkt in der Voronoi-Region des Knotens liegen.

Die sich ergebenden Reibungsbeiwerte k_{Str} werden im Strömungsmodell unter Verwendung des klassischen Stricklergesetzes

$$\frac{1}{\varphi(\eta+h)} T_x^B = \frac{g}{(\eta+h)^{\frac{3}{4}} k_{Str}^2} U_x \cdot \|\vec{U}\| \cdot \|\nabla U\|$$

$$\frac{1}{\varphi(\eta+h)} T_y^B = \frac{g}{(\eta+h)^{\frac{3}{4}} k_{Str}^2} U_y \cdot \|\vec{U}\| \cdot \|\nabla U\|$$

berücksichtigt.

Eine weitere Verbesserung dieses Ansatzes wird durch die Berücksichtigung der Strömungsintensität auf die Neigung der Seegrassblätter erreicht.

6 Simulationsergebnisse

Die Umsetzung des Modells und anschließende Tests an einem akademischen Beispiel ermöglichen erste quantitative Untersuchungen des gekoppelten Strömungs- und Seegrassmodells und Aussagen über mögliche Entwicklungstendenzen des Seegrases. Für die Simulationen wurde das Gebiet um Sylt gewählt, da es aus hydrodynamischer Sicht gut untersucht ist und eines der wenigen Gebiete mit Seegrasaufkommen darstellt.

Der betrachtete Simulationszeitraum mit einer zunächst zufälligen Verteilung von Seegrass, Schnecken und Algen im gesamten Untersuchungsgebiet betrug zwei Jahre. Die Simulationen geben das typische Entwicklungsverhalten des Seegrases in einem solchen Untersuchungsgebiet wieder. Während in den Zellen mit hohen Wassertiefen und starkem Strömungseinfluss eine deutliche Seegrassreduktion zu verzeichnen ist, konnte sich das Seegrass in Gebieten mit niedrigeren Wasserständen und schwächerer Strömung gut entwickeln. Insbesondere das komplexe Zusammenspiel zwischen Algen, Schnecken und Strömungsverhältnissen kann durch das Modell wiedergegeben werden. So zeigt sich, dass in Gebieten mit überwiegend sehr starken Strömungsgeschwindigkeiten kaum Schnecken vorzufinden sind und daher auch der dort befindliche Algenbewuchs nicht abgeweidet wurde.

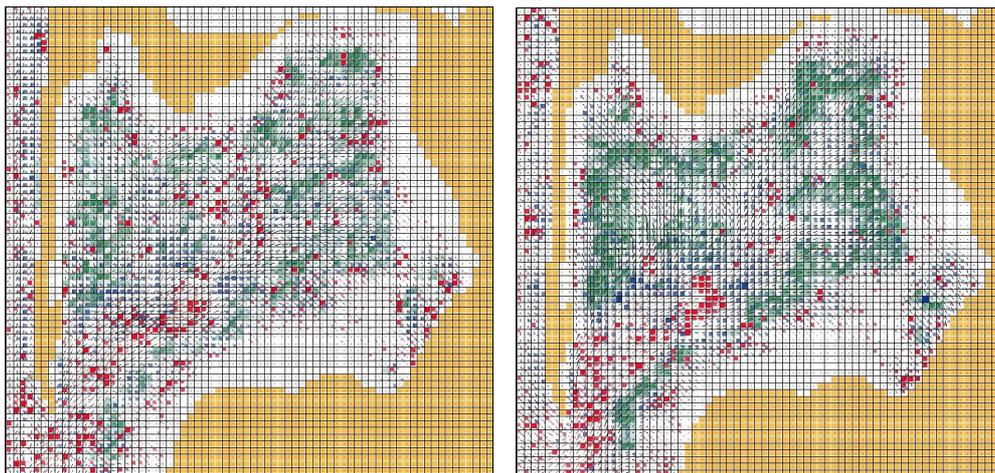


Abbildung 7: Simulationsergebnisse nach 12 bzw. 18 Monaten

Die Veränderung im Bewuchs des Untersuchungsgebietes führt zu einer Veränderung der hydrodynamischen Verhältnisse. In der Abbildung 8 sind die Bereiche dargestellt, in denen es auf Grund erhöhter Seegrasdichten zu Veränderungen in den Reibungsbeiwerten des hydrodynamischen Modells kommt.

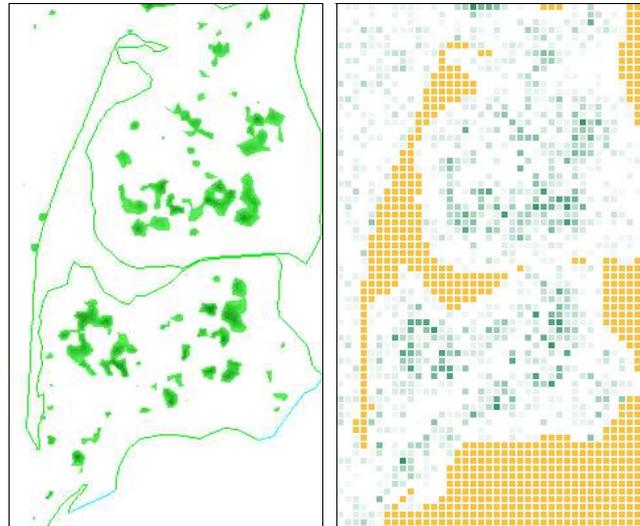


Abbildung 8: Gebiete mit veränderlichen Reibungsbeiwerten aufgrund der Rückkopplung zur Seegrasdichte

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein diskretes Ökosystemmodell auf Basis eines Zellularen Automaten vorgestellt, welches das Seegraswachstum im Küstenbereich der Nordsee beschreibt. Dabei werden verschiedene Einflussgrößen, wie Algen-, Schneckenanzahl, Wassertemperatur, Strömungsverhältnisse usw. berücksichtigt.

Die direkte Kopplung zwischen dem Seegrasmodell auf Basis eines ZA und einem Finite-Elemente-Strömungsmodell stellt eine besondere Herausforderung dar. Erste Modelluntersuchungen zeigen für das Untersuchungsgebiet Sylt plausible Ergebnisse. Erste Übertragungsstrategien der stetigen Simulationsergebnisse zur Verarbeitung in den diskreten Regeln des Zellularen Automaten sowie die Rückkopplung der diskreten Größen auf das stetige Modell wurden vorgestellt.

Die Abbildung des Finite-Element-Netzes auf ein reguläres rechteckiges Gitter bewirkt eine relativ grobe Diskretisierung des betrachteten Gebietes, wobei bereichsweise Verfeinerungen verloren gehen. Adaptive Verfeinerungen und hierarchische Gittergeometrien in Zellularen Automaten ermöglichen bereichsweise Gebietsverfeinerungen. Damit ist es möglich, grob aufgelöste und unwichtige Bereiche durch größere Zellen abzudecken, während fein aufgelöste und interessante Stellen durch kleinere Zellen beschrieben werden können. Dies erfordert jedoch eine Anpassung der Regeln des ZA. Durch die Berücksichtigung mehrerer Referenzelemente kann eine bessere Abbildung der hydrodynamischen Größen auf das Gitternetz und umgekehrt erwartet werden.

Weitere Einflussfaktoren, wie Nährstoffzufuhr und Sonnenlicht, führen zur Verbesserung des ökologischen Modells auf der einen Seite, sowie die Rückkopplung der Populationsdichten und abgeleitete Kenngrößen auf das hydro- und morphodynamische Modell zu einer besseren Abbildung der natürlichen Prozesse auf der anderen Seite.

8 Literatur

- [CMM02] Q. CHEN, A.E. MYNETT und W.A. MINNS: Application of cellular automata to modelling competitive growth of two underwater species *C. aspera* and *P. Pectinatus* in Lake Veluwe. *Ecological Modelling*, 2002.
- [Fi95] P. A. FISHWICK: *Simulation model design and execution: building digital worlds*, Prentice-Hall Inc., 1995.
- [GS95] M. GERHARDT, H. SCHUSTER: *Das digitale Universum – Zelluläre Automaten als Modelle der Natur*. Vieweg-Verlag, 1995.
- [MLT94] H.U. MEYER, F. LÜDKE TWENHÖVEN, K. KOCK: *Lebensraum Wattenmeer*. Quelle & Meyer Verlag Wiesbaden, 1994.
- [Mi95] P. MILBRADT: *Zur mathematischen Modellierung großräumiger Wellen- und Strömungsvorgänge*. Dissertation am Institut für Bauinformatik, 1995.
- [PD03] E. PASCHE, N. DEUßFELD: Hydro- und Morphodynamik in Seegrasswiesen. *HANSA International Maritime Journal* (05/2003), pages 67-73, 2003.
- [Ri85] O. RICHTER: *Simulation des Verhaltens ökologischer Systeme – Mathematische Methoden und Modelle*. VCH Weinheim, 1985.

Address

Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt
Dipl.-Inform.(FH) Tino Schonert
Universität Hannover
Institut für Bauinformatik
Callinstraße 34
30167 Hamburg
Germany

E-mail: milbradt@bauinf.uni-hannover.de
schonert@bauinf.uni-hannover.de