Nichtlineare Dynamik in Modellen für das Wattsystem: Strukturbildung, Komplexität und kritische Übergänge

Thilo Groß, Martin Baurmann, Ulrike Feudel
Institut für Biologie und Chemie des Meeres; Universität Oldenburg

Hauptziel:

- Untersuchung von Strukturbildungsprozessen in einer Hierarchie von Ökosystemmodellen, die das Zusammenwirken biogeochemischer Prozesse mit Transportprozessen sowohl im Wattensediment als auch in der Nordsee beschreiben
- Studium der Herausbildung zeitlicher, räumlicher und/oder raum-zeitlicher Strukturen als Resultat nichtlinearer Wechselwirkungen von Reaktion, Diffusion und Advektion

Methoden:

- Untersuchung des Langzeitverhaltens der Modellsysteme und ihrer Stabilität bezüglich kleiner Störungen der Methoden der nichtlinearen Dynamik
- Entdeckung von Übergängen in der Dynamik der Modellsysteme: Bifurkationen ⇒ solche Übergänge sig einen charakteristischen Wechsel im Verhalten, wie z. B. das Auftreten von Oszillationen statt eines Gleichg
- Untersuchung von Multistabilität, d.h. des Auftretens mehrerer koexistierender Zustände

Biogeochemische Prozesse im Wattensediment

Für die Bildung von Strukturen relevante Wechselwirkungen:

- nichtlokale Wechselwirkungen durch Wassertransport in den Poren des Sediments
- inhomogene Verteilungsmuster von Mikroorganismen
- kleine Störungen z.B. durch stochastische Einflüsse (z.B. Wetter)
- grosse Störungen z.B. durch extreme Wetterereignisse

Strukturbildung und Modellierung:

Im Wattensediment werden häufig charakteristische Strukturen bei den biogeochemischen Kenngrößen verzeichnet (Bekanntes Beispiel *Schwarze Flecken*).

- Welche Formen der Strukturbildung treten auf?
- Welche Prozesse (Diffusion, lokaler und nicht lokaler Transport, mikrobiologische Stoffumsetzung) bewirken die Ausbildung der Strukturen?
- Kann die Strukturbildung mit dem Modell beschrieben werden?
- Welche Aussagen lassen sich bezüglich der Stabilität der Strukturen treffen?

Berücksichtigte Prozesse im biogeochemischen Sedimentmodell:

- lokaler Transport (zwischen benachbarten Kompartimenten)
- nicht lokaler Transport (zwischen Kompartimenten und dem Porenwasser)
- durch Mikroorganismen hervorgerufene biochemische Prozesse

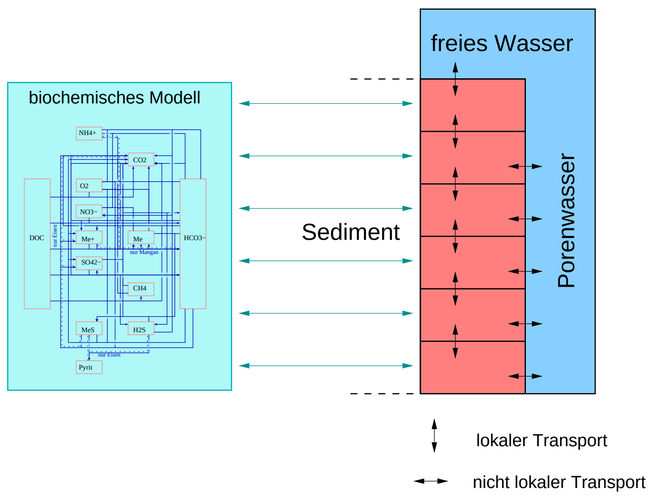

Bild 1 : Schematische Darstellung des integrierten Sedimentmodells

Ergebnisse aus dem integrierten Sedimentr

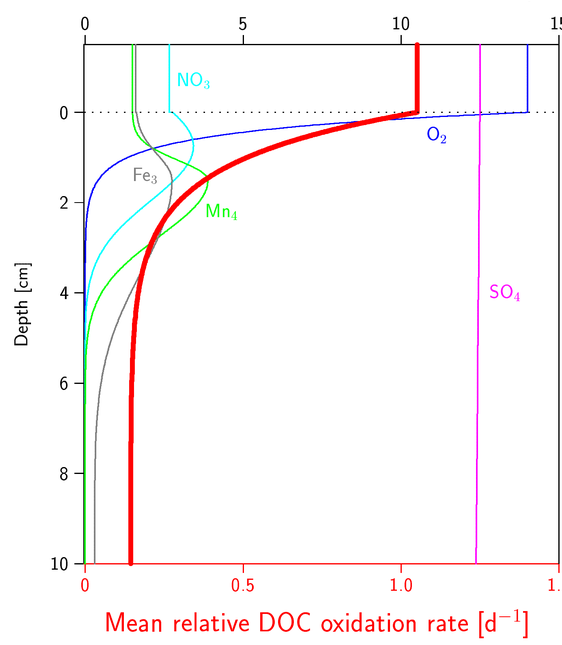

Bild 2 : Tiefenprofil verschiedener chemischer Verbindunge

Stabilität von Nahrungsketten

Motivation

Ziel:

- Überbrückung des Grabens zwischen großen, realistischen und kleinen, konzeptionellen Modellen.

Insbesondere betrachten wir die Fragestellungen:

- Welches Verhalten von kleinen Modellen kann im großen Modell wiedergefunden werden? Welche Auswirkungen hat das Hinzufügen zusätzlicher Strukturen?
- Welche Rückschlüsse sind für die Modellierung zu ziehen?
- Welche Aussagen können wir zur Stabilität von Ökosystemen machen?

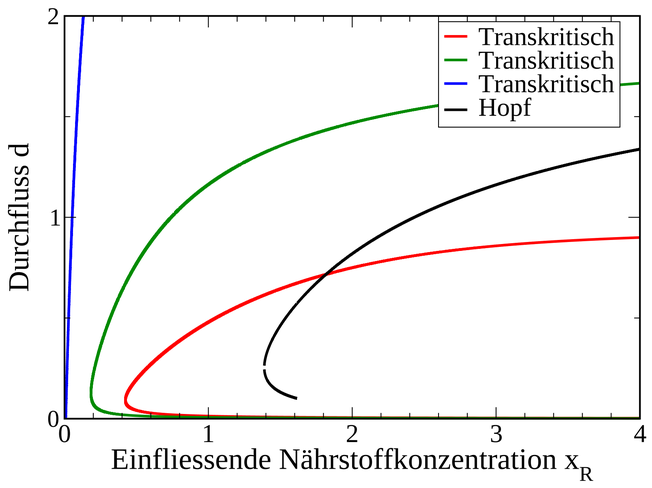

Bild 3 : Ausschnitt des Bifurkationsdiagramms der dreistufigen Nahrungskette im Chemostat. Beim Überschreiten einer farbigen (transkritischen) Bifurkationslinie stirbt eine Spezies aus bzw. wandert ein. Beim Überschreiten der schwarzen (Hopf) Bifurkationslinie wird der Gleichgewichtszustand der 2-Spezies Lösung instabil

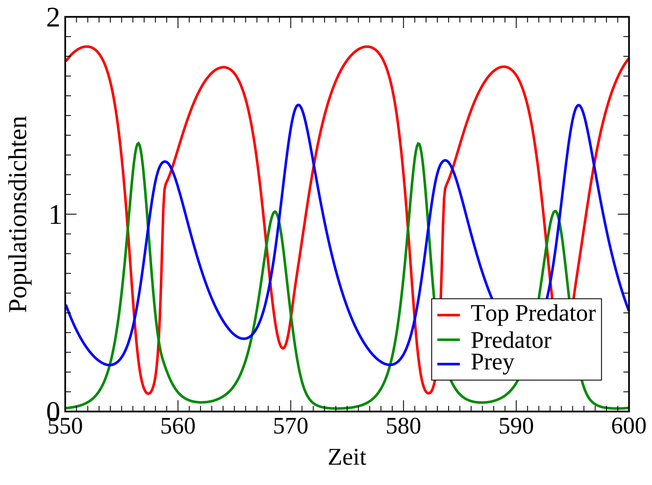

Bild 4 : Simulierte Zeitreihe eines Systems auf einem Periode-2 Grenzzyklus

Ansatz:

Bisher wurde die Dynamik von Nahrungsketten in Chemostat Systemen untersucht. Dabei konzentrieren wir uns nicht auf ein spezielles System, sondern lassen eine *allgemeine Klasse von Wechselwirkungen* zu. Vorteile dieses Ansatzes sind:

- Die gewonnenen Erkenntnisse basieren nicht auf einem Spezialfall.
- Es ergibt sich ein Gesamtbild, das ein tieferes Verständnis der Dynamik ermöglicht.
- Eine Erweiterung hin zu großen Modellen ist leichter möglich.

Es gelang bisher auf diesem Wege viele der Beobachtungen aus spezielleren Systemen in einem allgemeinen Kontext zu reproduzieren (siehe unten).

Transkritische Bifurkationen. Bei den in Nahrungsketten auftretenden transkritischen Bifurkationen ändert sich die Zahl der überlebenden Spezies. Wir beobachten das Aussterben oder Einwandern einer Spezies.

Hopf-Bifurkationen. In der Hopf-Bifurkation ändert sich die Stabilität eines Gleichgewichtszustands und ein Grenzzyklus entsteht. Die Überquerung einer Hopf-Bifurkation bedeutet für das Ökosystem:

- Es existiert in der Regel kein Gleichgewichtszustand mehr in dem alle Spezies überleben.
- Die Populationsdichten beginnen zu oszillieren.
- In den Minima besteht die Gefahr das Spezies aussterben.
- Es kann zu Synchronisationseffekten mit externen Triebkräften kommen.

Die in der Hopf-Bifurkation beginnenden Oszillationen werden von dem (internen) Prey-Escape Mechanismus getrieben.
Im Chemostat System kann eine Hopf-Bifurkation durch Erhöhung der Nährstoffkonzentration überschritten werden. Die beginnenden Oszillationen können rasch zum Aussterben einer Spezies führen. (Beispiel für Rosenzweigs Paradox of Enrichment)

Ausblick

Die Anwesenheit der Bifurkationen deutet auf weitere interessante Effekte hin. Unser Ziel ist deshalb:

- Das Auftreten von Bifurkationen möglichst genau einzugrenzen. Und ihre Bedeutung für große Modelle abzuschätzen.
- Die Klasse der betrachteten Modelle möglichst groß zu halten, um einen möglichst fundamentalen Einblick in die Dynamik zu erlangen anstatt Spezialfälle zu verallgemeinern.
- Den bisher verwendeten Zugang auf Nahrungsnetze auszudehnen.
- Alternative Methoden zur Detektion von Bifurkationen zu entwickeln.

Methodik

Analytische und numerische qualitative Analyse zur Bestimmu furkationen. Die Kenntnis der Bifurkationsstruktur ist für das der Dynamik eines Systems von großer Bedeutung.

- An Bifurkationen ändert sich das qualitative Verhalten des Sy ne Änderungen eines Parameters haben große Auswirkungen
- In Ökosystemen ist beim Überqueren von Bifurkationen das von Spezies zu befürchten.

Bisher wurden in dem Chemostat System Hopf- und transkritis kationen gefunden.

Paradox of Enrichment: Mit Paradox of Enrichmer Beobachtung bezeichnet, dass der Versuch die Populationsd gewünschten Spezies (zum Beispiel durch erhöhen der Nährstof erhöhen, zu qualitativen Änderungen führen kann, die letzte Aussterben der gewünschten Spezies führen.

Prey Escape: Zum Prey Escape kann es kommen, wen Räuber-Beute System die Beute zu gute Bedingungen vorfi schnellen Anwachsen der Beutepopulation wird die Limitie den Räuber praktisch aufgehoben. Dieser Schneeballeffekt k Erliegen, sobald die Vermehrungsrate der Beute nicht mehr werden kann. Die Räuberpopulation kann nun aufholen, w Beutepopulation stark zurückgeht. Die niedrige Beutedichte füh starken Absinken der Räuberpopulation, bis die Räuberdic genug ist, das es zu einem erneuten Prey Escape kommen kann Populationen ausgestorben sind.

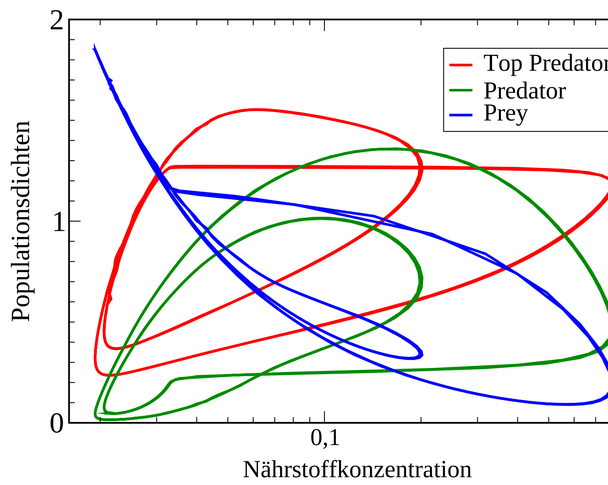

Bild 5 : Projektionen des Phasenraumes eines Periode-2 G