

Integrating Knowledge about Complex Adaptive Systems - Insights from Modelling the Eastern Baltic Cod.

Dissertation

to

obtain the degree

Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)

from the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering

of the University of Rostock.

Submitted by:

Maria Elena Pierce,
born on December 31st 1981,
in Goch, Germany

Rostock, June 7th 2022

Integrating Knowledge about Complex Adaptive Systems - Insights from Modelling the Eastern Baltic Cod.

Maria E. Pierce

Abstract

Currently, the Eastern Baltic cod (EBC) is in continuing decline regarding both the productivity of the stock and the condition of its individuals. Supporting management efforts to assist the stock in its recovery will require a functional understanding of the new dynamics of the EBC stock and the Baltic ecosystem. However, aquatic environments are challenging to research because they are not directly accessible to humans, encompass many scientific disciplines, and are complex adaptive systems (CAS). This thesis explores how modelling and simulation methods can be applied and adapted to meet the specific needs of fisheries biologies' current challenges regarding the management of the EBC and potentially other stocks facing similar challenges.

To effectively incorporate modelling and simulation into the workflow of departmental research, specific key requirements and matching solutions were identified: functionally integrating knowledge across scientific domains, which can be achieved through multi-faceted modelling; providing the required accessibility, which can be supported by suitable domain-specific languages (DSLs) and thorough documentation; modelling CAS to a high degree of verisimilitude of functionality, which requires a careful selection of type of model based on the respective system of interest and research question; and continued validity, which can be streamlined by iterative validation.

As the general approach, multi-faceted modelling was adapted to the given requirements by using white-box integration of submodels to provide insight into mechanisms and interaction of processes in the modelled system. These models were specified in the DSL ML-Rules, a language for multi-level modelling and simulation of cell-biological systems, which was previously tested for its suitability for ecological models. The systematic reuse of simulation experiments during the iterative integration of models helped to maintain the continued validity of the model. Additionally, a focus was placed on documentation to further ensure accessibility and invite scrutinisation of the simulation study. Both structured natural language documentation using the TRACE protocol and formal provenance documentation based on the provenance data model (ProvDM) were applied here. Provenance metadata was then used to link the two documentations, which provides increased navigability by supporting queries of the provenance graph.

The simulation study currently covers the facets of physiology, reproduction, behaviour, environment, prey and parasitism and iteratively worked towards understanding the decline in growth and condition. Although the processes formalised to this point have not uncovered the mechanisms of the decline, several suspected causes could be dismissed. Notwithstanding the domain results, the study illustrates the merits and viability of the multi-faceted approach for the functional integration of knowledge about CAS.

Zusammenfassung

Gegenwärtig ist beim Ostdorsche (EBC - "Eastern Baltic cod") eine anhaltende Verschlechterung, sowohl hinsichtlich der Produktivität des Bestands als auch des Zustands seiner Individuen, festzustellen. Um Bewirtschaftungsmaßnahmen welche den Bestand bei seiner Erholung unterstützen würden zu identifizieren, wird ein funktionales Verständnis der neuen Dynamik des EBC-Bestands und des Ökosystems Ostsee benötigt. Die Erforschung aquatischer Systeme birgt jedoch eine Reihe an Herausforderungen, so sind sie für den Menschen nicht direkt zugänglich, umfassen eine Vielzahl an wissenschaftlichen Disziplinen und fallen in die Kategorie komplexer adaptiver Systeme (CAS - 'complex adaptive systems'). In Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht wie Modellierungs- und Simulationsmethoden angewendet und angepasst werden können, um den spezifischen Bedürfnisse der aktuellen Herausforderungen der Fischereibiologie in Bezug auf die Bewirtschaftung des EBC und möglicherweise anderer Bestände welche vor ähnlichen Herausforderungen stehen, gerecht zu werden.

Um Modellierung und Simulation effektiv in den Arbeitsablauf der Ressortforschung zu integrieren, wurden spezifische Schlüsselanforderungen und passende Lösungsansätze identifiziert: funktionale Integration von Wissen über wissenschaftliche Domänen hinweg kann durch die 'Modellierung unterschiedlichen Facetten' (multi-faceted modelling) erreicht werden; Bereitstellung der erforderlichen Zugänglichkeit kann durch geeignete domänenspezifische Sprachen (DSLs - 'domain specific languages') und eine gründliche Dokumentation unterstützt werden; Modellierung von CAS mit einem hohen Maß an Realitätsnähe in Bezug auf Funktionalität benötigt eine sorgfältige Auswahl des Modelltyps basierend auf dem spezifischen System und der jeweiligen Forschungsfrage; und fortgesetzte Validität kann durch iterative Validierung optimiert werden.

Als übergreifender Ansatz wurde die Methode der 'Modellierung unterschiedlichen Facetten' an die gegebenen Anforderungen angepasst, indem eine White-Box-Integration von Teilmodellen verwendet wurde, um Zugang zu Mechanismen und Wechselwirkungen von Prozessen im modellierten System zu gewährleisten. Zur Umsetzung des Ansatzes wurde die DSL ML-Rules verwendet, welche für die Mehrebenenmodellierung zellbiologischer Systeme konzipiert und bereits auf ihre Eignung für ökologische Modelle getestet wurde. Die systematische Wiederverwendung von Simulationsexperimenten während der iterativen Integration von Modellen trug dazu bei, die Validität des Modells aufrechtzuerhalten. Darüber hinaus wurde ein Fokus auf die Dokumentation gelegt, um stets Zugänglichkeit zu gewährleisten und zur Prüfung der Simulationsstudie einzuladen. Dabei kamen sowohl die strukturierte Dokumentation nach dem TRACE-Protokoll als auch die formale Provenienzdokumentation nach dem Provenance Data Model (ProvDM) zum Einsatz. Provenienz-Metadaten wurden dann verwendet, um die beiden Dokumentationen zu verknüpfen, was eine verbesserte Navigierbarkeit bietet, indem Abfragen des Provenienzgraphen unterstützt werden.

Die Simulationsstudie deckt derzeit die Facetten Physiologie, Reproduktion, Verhalten, Umwelt, Beute und Parasitierung ab und arbeitete während der Entwicklung iterativ auf das Verständnis des Wachstums- und Zustandsrückgangs

hin. Obwohl die bis zu diesem Punkt formalisierten Prozesse die Mechanismen des Rückgangs nicht aufgedeckt haben, konnten mehrere vermutete Ursachen verworfen werden. Ungeachtet der inhaltlichen Ergebnisse veranschaulicht die Studie die Vorzüge und Realisierbarkeit den Ansatz der ‘Modellierung unterschiedlichen Facetten’ für die funktionale Integration von Wissen über CAS.