

Modellierung in der MDI-DE

Christoph Wosniok und Rainer Lehfeldt

Zusammenfassung

Neben Messdaten sind die Ergebnisse aus numerischen Simulationen wichtige Datenquellen für das Verständnis der Abläufe in der Küstenzone. Die Erzeugung von Modellierungsergebnissen und die Erhebung von Messdaten sind unterschiedliche Prozesse, die bei einer Integration in Geodateninfrastrukturen unterschiedlich behandelt werden. Sowohl bei der Aufarbeitung von Daten für Webdienste als auch für die standardisierte Beschreibung mit Metadaten können oft nicht die bei Geodaten üblichen Mittel eingesetzt werden. Anhand von Daten des AufMod-Projektes wird gezeigt, wie Modellierungsergebnisse in die MDI-DE integriert werden und wo weiterer Forschungsbedarf liegt.

Schlagwörter

Modellierung, Geodateninfrastrukturen, Metadaten, Digitale Atlanten, AufMod

Summary

In addition to filed data, results of numerical simulations are important sources of data for understanding processes in the coastal zone. The generation of modeling results and the collection of measured data are different processes that are treated differently when integrated in spatial data infrastructures. Common geodata tools are often insufficient for data transformation towards web services and for producing standardized metadata descriptions. A use case from the AufMod project shows how modeling results can be integrated into the MDI-DE and where further research is needed.

Keywords

Modelling, Spatial Data Infrastructures, metadata, digital atlases, AufMod

Inhalt

1	Einleitung.....	140
2	Modellierung in Geodateninfrastrukturen.....	140
2.1	Modellierungs- und Geodaten.....	141
2.2	Metadaten.....	142
3	Umsetzung in AufMod.....	143
4	Ausblick.....	144
4.1	netCDF.....	145
4.2	Web Processing Service.....	145
5	Schriftenverzeichnis	146

1 Einleitung

Eine wichtige Motivation für die Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE war die Erfüllung von Berichtspflichten aus europäischen Richtlinien. In deutschen Gesetzen ratifiziert, sind Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie und Wasserrahmenrichtlinie (MSRL und WRRL) Zugpferde für die zunehmende standardisierte und interoperable Bereitstellung von Datensätzen aus dem marinen Bereich.

Europäische Richtlinien betonen die Relevanz von Modellen als Werkzeug zur Problemlösung (EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL 2000). Die Integration in Geodateninfrastrukturen (GDI) birgt dabei insbesondere im Vergleich zu Messdaten, die mit Sensoren gewonnenen werden, zusätzliche und andere Probleme, die zum Teil noch nicht vollständig gelöst sind (BEVEN 2007). Während die durch klassische Sensorik aller Art gewonnenen Messdaten mit weitreichenden standardisierten Metadaten (COX 2011), (LEHFELDT und REIMERS 2008) in GDIs integriert werden können, sind Modellierungsergebnisse und deren Eigenschaften bisher nicht vollständig abbildbar. Modellierungsdaten verfügen über Eigenschaften, die über das hinausgehen, was Geodaten ausmacht und wofür die Standards der Webdienste und Metadaten entworfen wurden. Zunächst ist der Weg der Daten aus einem Modellierungsprozess hin zu einem interoperablen Webdienst in der Regel mit deutlich mehr Umformungsaufwand verbunden als bei Messdaten. Viele Modellierungssysteme arbeiten mit proprietären Datenformaten, für die individuelle Wandler in Webdienste-konforme Datenformate wie Geographic Markup Language (GML, (PORTELE 2007)) oder ESRI Shape erst implementiert werden müssen. Dieser Bearbeitungsweg, und so der Ursprung eines Simulationsergebnisses, muss für den Nutzer der Daten, vergleichbar wie die Beschreibung von Sensoren, nachvollziehbar sein. Hierfür werden Metadaten benötigt, die diese Details widerspiegeln können.

Im Rahmen der MDI-DE konnte die Bereitstellung von Simulationsergebnissen exemplarisch anhand der Ergebnisse des KFKI-geförderten Projekts „Aufbau von integrierten Modellierungssystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht“ (AufMod) gezeigt werden. Daten konnten in verschiedenen Formaten nach einer Umwandlung aus proprietären Formaten über die MDI-DE bereitgestellt werden, dank der verteilten Datenstruktur der MDI-DE von zwei verschiedenen Institutionen. Damit konnte die Nutzbarkeit der MDI-DE für Forschungs- und Entwicklungsprojekte gezeigt werden. Zugleich wurde ein erheblicher Forschungsbedarf für Simulationen in Geodateninfrastrukturen erkannt.

2 Modellierung in Geodateninfrastrukturen

Die Entwicklung von Geodateninfrastrukturen wurde mit der Nutzung von Service-orientierten Architekturen (SOA) für den Geodatenaustausch entscheidend beschleunigt (ISOU und BUTTENFIELD 2002). Dies ermöglicht eine interoperable, flexible Struktur von verteilten, in sich geschlossenen Einheiten, die über standardisierte Schnittstellen kommunizieren. Auf Grundlage von SOA formt die INSPIRE-Richtlinie der Europäischen Union (EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL 2007) europaweit die technischen Gegebenheiten für den Austausch und die Bereitstellung von Geodaten und deren Metadaten.

Diese Vorgaben werden in Deutschland von der Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE) und auch der MDI-DE umgesetzt. Die Richtlinie stützt sich dabei größtenteils auf Standards und Normen für Metadaten und Webdienste (KRESSE und FADAIE 2004) von ISO und OGC. Wichtige Rollen spielen der OGC Web Map Service (WMS) für die Darstellung als Karte in einem Bildformat, der OGC Web Feature Service (WFS) für den Austausch und Download von geographischen Vektordaten, der OGC Catalogue Service for the Web (CSW) als Katalogdienst für den Austausch von Metadaten sowie der ISO 19115 – Geographic Information – Metadata (ISO 19115 2003) für die Beschreibung der Geodaten.

Auf die technische Umsetzung einer Integration von Modellierung in Geodateninfrastrukturen wird im Rahmen von INSPIRE oder der WRRL nicht explizit eingegangen. Die Literatur unterscheidet grundsätzlich zwischen der Nutzung von Webdiensten für die Bereitstellung von Ergebnissen aus der Modellierung (SIMONIS et al. 2003) (GRANELL et al. 2010) (MAUÉ et al. 2011) und der Nutzung von Webdiensten für den Vorgang der Modellierung. Dies umfasst insbesondere die interoperable Verknüpfung von Modellen über ein Model Web (GELLER und MELTON 2008), um in einem verteilten System Rechnerressourcen zu nutzen (CASTRONOVA et al. 2013b). Probleme sind dabei unter anderem die großen Datenvolumen oder die Behandlung von Unsicherheiten (BASTIN et al. 2013). Im Umfeld der OGC-Webdienste wird dabei der Web Processing Service (WPS) (SCHUT 2007) genutzt, der mit seinen generischen Schnittstellen die online-Prozessierung ermöglichen soll. Der WPS kommt wie auch die anderen OGC-Webdienste aus der Welt der Geoinformationssysteme (GIS) und ist von daher auf GIS-Operationen wie Buffer oder Interpolationen ausgelegt. Dies ist auch ein Grund weshalb die Metadaten für numerische Modelle nicht ausreichend sind (CROSIER et al. 2003) (WOSNIOK und LEHFELDT 2012). Auf die mögliche Nutzung des WPS für numerische Modelle wird in Abschnitt 4.2. eingegangen. Für die MDI-DE galt es zunächst die Ergebnisse aus der Modellierung standardkonform bereitzustellen. Dies betrifft vorrangig die Datenaufbereitung und die Beschreibung mit Metadaten.

2.1 Modellierungs- und Geodaten

Geodaten, wie sie in GIS eingesetzt werden, verfügen über Attribute auf punkt-, linien- oder -flächenförmigen Geometrien. Rasterdaten, wie sie auch in GIS eingesetzt werden, sind wie Bilddateien auf ein gleichmäßiges Raster. Typische Dienste und Standards in GDIs wie WMS, WFS oder der ISO 19115 sind primär auf diese Geometrien ausgerichtet. Damit entsprechen sie aber in der Regel nicht der Entstehungsgeschichte von Ergebnissen aus numerischen Modellen.

Ein numerisches Modell als generalisiertes Konzept der Realität soll mithilfe von numerischen Methoden möglichst realitätsnahe Ergebnisse liefern. Die konzeptionelle Struktur, die zu einem Ergebniswertebereich führt, wird dabei als „Modell“ bezeichnet, während ein „Modelllauf“ oder „Szenario“ nur eine Instanz eines Modells mit konkreten Werten und einem konkreten Ergebnis darstellt. Die Ausprägung der Eingangsdaten, die Fähigkeiten des Modellkerns, die Parameterbelegung des Modellkerns, die Steuerung der Randwerte beeinflussen dabei die Ergebnisse. Modellläufe werden, im Gegensatz zu den einfachen Geodaten, oft auf unregelmäßigen Gittern durchgeführt, haben eine zeitliche Komponente und nutzen verschiedene Eingangsdatensätze, die wiederum einfache

Geodaten sein können. Ein Modell der Hydrodynamik der deutschen Bucht setzt sich zum Beispiel zusammen aus Zeitreihen für den Wasserstand an einzelnen Pegeln, Messungen für den Salzgehalt an anderen Messstellen, einem flächenhaften Windfeld, der Bathymetrie in Form eines digitalen Geländemodells und weiteren Parametern in verschiedenen Formaten. Diese Parameter mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Ausdehnungen müssen an das Berechnungsverfahren angepasst werden. Der Modellkern löst dann die numerischen Gleichungen, auf die der Modellierer über verschiedene Parametereinstellungen Einfluss haben kann. Die Ergebnisse einer Simulation sind also immer ein Aggregat aus verschiedenen Eingangsdaten, Approximationen, Interpolationen und Berechnungsvorschriften bezogen auf das Berechnungsgitter.

Mit kleinen Veränderungen während des Modelllaufs lassen sich folglich schon große Veränderungen bei den Ergebnissen erreichen. Zur Darstellung und Bereitstellung in einer GDI über die bekannten Dienste müssen wiederum Umformungen durchgeführt werden, was zumindest zu Verlusten der räumlichen Genauigkeit führt. Der Ursprung eines Modellierungsergebnisses muss deshalb umso genauer mit Metadaten dokumentiert werden.

2.2 Metadaten

Standardisierte Metadaten sind ein elementarer Bestandteil von GDIs und der MDI-DE (WOSNIOK et al 2014). Mit dem ISO 19115 wurde ein flexibler Standard geschaffen, auf dessen Basis bereits umfassende Daten der Küstenzone beschrieben werden können (LEHFELDT und REIMERS 2008): Der Metadatenstandard erlaubt eine Ergänzung um beliebige Fachelemente zu einem ISO Profil, solange der Kern des Standards für die Interoperabilität Teil des neuen Profils bleibt.

Bisherige Ansätze für ein Metadatenprofil für die numerische Modellierung orientieren sich zwar am ISO 19115, waren aber zur Zeit der Erstellung noch nicht kompatibel (HILL et al. 2001) oder stützen sich auf andere Beschreibungssprachen, deren Eigenschaften nicht auf den ISO übertragbar sind (BENZ et al. 2001; ISLAM und PLASECKI 2006). Diese Ansätze konnten aber genutzt werden, um ein strukturiertes Profil zu entwerfen, das die verpflichtenden sowie zusätzliche Elemente des ISO 19115 einschließt (WOSNIOK und LEHFELDT 2012). Dabei wird der erweiterte ISO 19115 Kern, der Recommended Core, genutzt und um spezifische Elemente zur Charakterisierung eines Modellierungslaufs erweitert. Diese umfassen das Digitale Geländemodell, Eingangs- und Ergebnisdaten und deren Formate, Randwerte sowie Steuerungsparameter des Modellkerns. Um Redundanzen zu vermeiden, kann auf bestehende Metadatenbeschreibungen verlinkt werden. Ein Metadatenprofil, das diese Eigenschaften widerspiegelt, befindet sich in der Umsetzung.

Für die Darstellung und Auswertung von Simulationsergebnissen ist für ein vollständiges Verständnis die Einbeziehung der Erstellungsgeschichte erforderlich. Wie bei Messdaten können mit der Kenntnis des „Erstellungswerkzeug Modell“ die Ergebnisdaten besser interpretiert werden. Für die Metadaten bedeutet dies die Aufzeichnung aller Schritte, die einen Modelllauf ausgemacht haben. Umgesetzt wird dies über das entsprechende Feld (Lineage) im Metadatenschema, mit Universal Unified Identifier (UUID) kann jeder Schritt eindeutig identifizierbar gemacht werden (WOSNIOK und LEHFELDT 2013).

3 Umsetzung in AufMod

Das BMBF förderte von 2010-2012 das Projekt „Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der deutschen Bucht“ (AufMod). Aus einer umfangreichen Datenbasis wurden zahlreiche morphologische und hydrodynamische Datenprodukte gewonnen (HEYER und SCHROTTKE 2013). Im sogenannten Funktionalen Bodenmodell werden sedimentologische und morphologische Messdaten bereitgehalten und bilden die Grundlage für die datenbasierte Modellierung. Bereitgestellte Ergebnisse umfassen unter anderem eine konsistente Bathymetrie der Deutschen Bucht für die Jahre 1982 bis 2012, Höhenänderungsraten, die Entwicklung von Sohlformen oder sedimentologische Parameter wie Korngrößenverteilungen und Sortierungen.

Zusätzlich stellt ein Tidekennwertatlas Daten aus den hydrodynamischen Simulationen bereit. Tidekennwerte sind über mehrere Tiden gemittelte Parameter der Hydrodynamik zur Analyse des Tideverhaltens in der deutschen Bucht. Beispiele sind Hoch- und Niedrigwasser, Flut- und Ebbedauer und -geschwindigkeit oder Bodenschubspannung. Der Atlas stellt für 22 Parameter das Verhalten für acht verschiedene Windrichtungen bei 12,5 m/s dar, sowie für Westwind bei 0, 6 und 25 m/s. Die Werte wurden gemittelt über 2 Tage, ein weiterer Modellierungslauf ohne den Einfluss von Wind wurde über ein Jahr gemittelt.

Aufgrund des Datenvolumens sowie aus organisatorischen Gründen wurde die Bearbeitung der Produkte aus dem funktionalen Bodenmodell und der Tidekennwerte auf die beiden AufMod-Projektpartner aus Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg (BAW) und Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) aufgeteilt. Die verteilte Struktur der Infrastrukturknoten (ISK) der MDI-DE lässt die einzelne Bereitstellung in Form von Diensten und Metadaten zu. Die insgesamt 264 Datensätze der Tidekennwerte wurden als WMS und WFS in die MDI-DE über den ISK der BAW eingebunden, für jeden Parameter wurde ein Metadatensatz ausgefüllt. Der ISK des BSH stellt die Datensätze des Funktionalen Bodenmodells bereit. Über das Schlüsselwort „aufmod“ in den Metadaten werden die Daten verknüpft und können so gemeinsam über die Suche der MDI-DE oder den Themeneinstieg AufMod gefunden und visualisiert werden.

Zusätzlich werden auf einer Projektseite (MDI-DE 2014) die Ergebnisse präsentiert. Neben der konzentrierten Ansicht und Dokumentation können so die Produkte des Funktionalen Bodenmodells auch als FTP-Download angeboten werden, der entsprechende Link ist auch in den Metadaten zu finden. Die Bereitstellung als WFS ist aufgrund der Dateigrößen von mehreren 100 Megabytes nicht praktikabel.

Die Bereitstellung der 264 Datensätze als WMS und WFS erfolgte in mehreren Schritten. Die Ergebnisse aus dem Modellsystem UnTRIM2007 lagen zunächst in einem proprietären Format vor, das für die BAW entworfen wurde und als Grundlage für Pre- und Post-Processing-Methoden genutzt wird. Mit einer Erweiterung für ESRI ArcGIS konnten aus diesem Format halbautomatisiert Shape-Daten erzeugt werden. Dabei wurden aus den Dreiecksgitterflächen des Ausgangsformats Polygone erzeugt. Die etwa 65000 resultierenden Polygone mit jeweils eigenen Attributwerten bedeuteten erhebliche Performanceeinbußen bei der Darstellung in ArcGIS. Um keine Informationen zu verlieren wurden keine Zusammenschlüsse der Datengrundlage zu großflächigen Polygonen durchgeführt. Für die Darstellung mussten Legenden in Form von Styled Layer Descriptoren SLDs (LUPP 2007) für die 22 verwendeten Parameter entworfen werden.

Aufgrund der Vielzahl der Datensätze war die Übernahme in den Diensteserver des BAW ISKs und das Einpflegen der umfangreichen Datensätze nicht vollständig automatisierbar.

Für die Tidekennwerte wurde ein Atlas entworfen, mit dem die vergleichsweise homogenen Datensätze einfach verglichen werden können (Abb. 1). Mit der Auswahl von Windrichtung, Windgeschwindigkeit oder dem Parameter kann der Nutzer den räumlichen Ausschnitt unter verschiedenen Bedingungen betrachten. Auch in der Darstellung als WMS ist die Performance der Datensätze durch die große Zahl der einzelnen Polygone zum Teil eingeschränkt, Vektorpfeile sind deshalb erst ab einer Auflösung von 1:250000 sichtbar.

Tidekennwertatlas

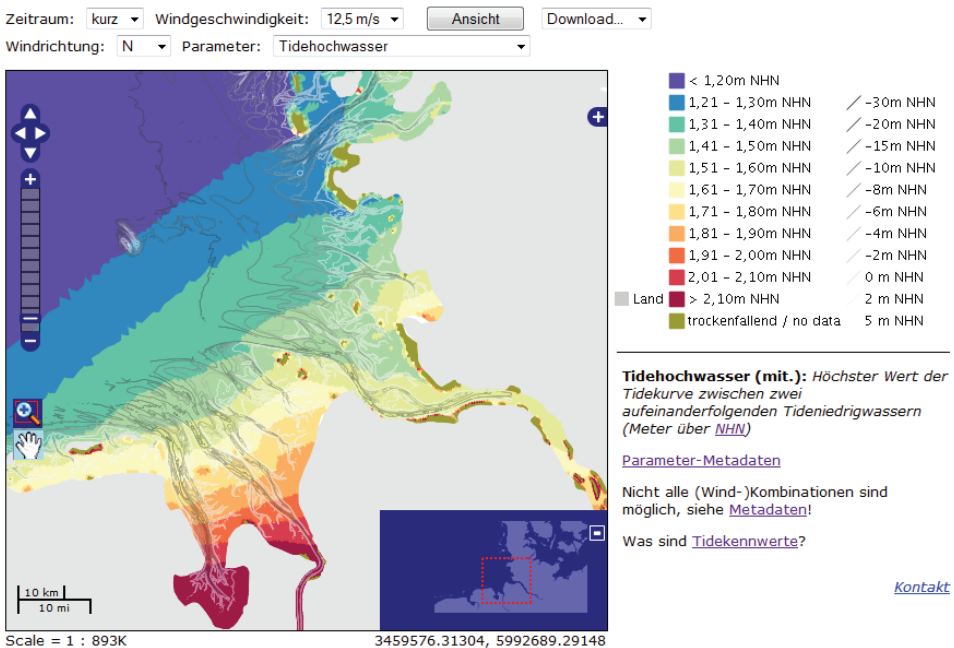


Abbildung 1: Der Atlas für die hydrodynamischen Kennwerte des Projekts AufMod. Verschiedene Auswahloptionen lassen die die Überlagerung der Layer für einen direkten Vergleich zu.

4 Ausblick

Mit den im Rahmen der MDI-DE durchgeführten Arbeiten konnten wichtige Arbeitsschritte hin zu einer interoperablen Bereitstellung von Produkten aus der numerischen Modellierung in Geodateninfrastrukturen geleistet werden. Ein entsprechendes Metadatenprofil wurde entworfen und befindet sich in der Erprobungsphase. Mit der Umsetzung von AufMod-Produkten in Webdienste konnten viele Elemente des Workflows so generisch angelegt werden, dass sie auch für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte genutzt werden können. Das Erstellen der Dienste aus Modellierungsergebnissen kann über Automatisierungsroutinen in Zukunft noch effizienter gestaltet werden,

insbesondere bei der Umwandlung in ESRI Shape Dateien, bei der Bearbeitung der Dateien und auch bei der Integration in den Diensteserver.

Im Folgenden werden zwei Entwicklungen vorgestellt, die den Umgang mit numerischer Modellierung in Zukunft beeinflussen werden, und deshalb hier nicht unerwähnt bleiben sollen.

4.1 netCDF

Die Zusammenführung von numerischer Modellierung mit Geodateninfrastrukturen erfolgt nicht nur aus der Sicht der GIS-Welt, sondern auch seitens der Modellanwender. Aus der Klimamodellierung kommend, hat sich in der datenintensiven Modellierung das netCDF-Format als Standard (DOMENICO 2011) durchgesetzt. Durch eine binäre Speicherung kann das Datenvolumen reduziert werden, außerdem werden die Metadaten direkt neben den eigentlichen Daten in der gleichen Datei gespeichert.

Die Verbindung von Daten und Metadaten in einer Datei ist bei der Verarbeitung in Modellierungssystemen von Vorteil, widerspricht aber dem Paradigma von Geodateninfrastrukturen, nach dem die Metadaten auf die Daten oder Dienste verlinken. Ein Kopieren aus der netCDF-Metadaten in ein ISO-Format ist für eine nahtlose Integration in die gegenwärtigen Strukturen also nötig. Die für netCDF-Dateien verbreitet genutzten Climate-and Forecasting Conventions (CF) (EATON et al. 2014) enthalten wenige sogenannte globale Variablen, Metadaten in denen nicht die Struktur der Datensätze über Dimensionen und Zeit definiert wird. Dafür gehört zum CF-Standard eine umfangreiche vordefinierte Parameterliste, im ISO 19115 können Parameter nur vergleichsweise umständlich abgebildet werden. Ein Mapping zum ISO 19115 ist aber durchführbar (WOSNIOK und RÄDER 2013), einige Variablen müssen dabei aus vorhandenen Angaben zu Dimensionen extrahiert werden.

Die Aufbereitung und Darstellung von netCDF-Dateien in OGC-Webdienste bedeutet zumeist eine Auswahl aus dem Inhalt der netCDF-Dateien, da oft mehr als ein Parameter pro Datei abgelegt wird. Die OGC-konforme Bereitstellung wurde beispielsweise im Thredds Data Server (NATIVI et al. 2006) umgesetzt. Die Nutzung des netCDF-Formats würde die Entwicklung von einheitlichen Aufbereitungs- und Bereitstellungs-methoden vereinfachen, die bisher auf individuelle Formate angepasst werden müssen.

4.2 Web Processing Service

Während sich die Ergebnisse der numerischen Modellierung mit der Umsetzung durch WPS gut in Geodateninfrastrukturen integrieren lassen, ist eine Nutzung von OGC-Webdiensten für andere Schritte der numerischen Modellierung weiter Gegenstand der Forschung. Der Web Processing Service verfügt über wenige verpflichtende Operationen: DescribeProcess, Execute und die für alle OGC-Dienste verpflichtende GetCapabilities. Dieses grobe Gerüst ermöglicht prinzipiell beliebige standardkonforme Ausführungen von Berechnungen. Für komplexe Berechnungen wie die numerische Modellierung werden mit diesen wenigen Vorgaben aber umso umfangreichere Individuallösungen nötig. Dabei muss gleichzeitig das generelle Ziel der interoperablen Nutzung eines WPS beachtet werden, ein WPS sollte deshalb nicht zu umfangreich sein. Diese Problematik wird im

Projekt RichWPS anhand eines einfachen Anwendungsfalls untersucht (WOSNIOK et al. 2014a).

Die Nutzung des WPS für die numerische Modellierung ist grundsätzlich möglich (VITOLO et al. 2012; FENG et al. 2011), mehrere Problemstellungen müssen dabei aber berücksichtigt werden: Die Bereitstellung von Ressourcen muss gesichert werden, wofür es Vorschläge für die Nutzung von verteilten Diensten und von verteilten Ressourcen in GDIs gibt (CASTRONOVA et al. 2013a), auch die Nutzung von Grids oder von öffentlich zugänglicher Speicher- und Rechenleistung in der sogenannten Cloud ist möglich (KIM und TSOU 2013). Die Verknüpfung von verschiedenen Prozessen (Service Chaining) muss gesichert werden (WEHRMANN et al. 2011). In Verbindung mit Service Chaining muss die Frage nach den Metadaten von Prozessketten beantwortet werden und wie diese in die bisherigen GDIs integriert werden können (FOERSTER und SCHÄFFER 2011).

5 Schriftenverzeichnis

- BASTIN, L.; CORNFORD, D.; JONES, R.; HEUVELINK, G. B. M.; PEBESMA, E.; STASCH, C.; NATIVI, S.; MAZZETTI, P. und WILLIAMS, M.: Managing uncertainty in integrated environmental modelling: The UncertWeb framework. In: *Environmental Modelling & Software*, Jg. 39, 116-134. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.02.008, 2013.
- BENZ, J.; HOCH, R. und LEGOVIĆ, T.: ECOBAS — modelling and documentation. In: *Ecological Modelling*, Jg. 138, 1-3, 3-15. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00389-6, 2001.
- BEVEN, K.: Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, Jg. 11, 1, 460-467. doi: 10.5194/hess-11-460-2007, 2007.
- CASTRONOVA, A. M.; GOODALL, J. L. und ELAG, M. M.: Models as web services using the Open Geospatial Consortium (OGC) Web Processing Service (WPS) standard. In: *Environmental Modelling & Software*, Jg. 41, 72-83. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.11.010, 2013a.
- CASTRONOVA, A. M.; GOODALL, J. L. und ERCAN, M. B.: Integrated modeling within a Hydrologic Information System: An OpenMI based approach. In: *Environmental Modelling & Software*, Jg. 39, 263-273. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.02.011, 2013b.
- COX, S. (Hrsg.): Observations and Measurements. Version 2.0. Open Geospatial Consortium (OGC 10-004r3), 2011.
- CROSIER, S. J.; GOODCHILD, M.; HILL, L. und SMITH, T.: Developing an infrastructure for sharing environmental models. In: *Environment and Planning B: Planning and Design*, Jg. 30, 487-501. 2003.
- DOMENICO, B. (Hrsg.): OGC Network Common Data Form (NetCDF) Core Encoding Standard version 1.0. Open Geospatial Consortium (OGC 10-090r3), 2011.
- EATON, B.; GREGORY, J.; DRACH, B.; TAYLOR, K. und HANKIN, S.: CF Conventions, 2014.
<http://cfconventions.org/1.7.html>, Stand: 08.05.2014.
- EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL: Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial

- Information in the European Community. INSPIRE In: Official Journal of the European Union, L108, 1–14, 2007.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32007L0002>:
EN:NOT
- EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. WFD In: Official Journal of the European Union, L327, 1-73, 2000.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060>:
EN:NOT
- FENG, M.; LIU, S.; EULISS, N. H.; YOUNG, C. und MUSHET, D. M.: Prototyping an online wetland ecosystem services model using open model sharing standards. In: Environmental Modelling & Software, Jg. 26, 4, 458-468. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.10.008, 2011.
- FOERSTER, T. und SCHÄFFER, B.: RM-ODP for WPS Process Descriptions. In: SCHWERING, A. (Hrsg.): Geoinformatik 2011. Geochance; [Konferenzband, 15. - 17. Juni 2011, Münster]. Heidelberg, 2011.
- GELLER, G. N. und MELTON, F.: Looking forward: Applying an ecological model web to assess impacts of climate change. In: Biodiversity, Jg. 9, 3-4, 79-83. doi: 10.1080/14888386.2008.9712910, 2008.
- GRANELL, C.; DIAZ, L. und GOULD, M.: Service-oriented applications for environmental models: Reusable geospatial services. In: Environmental Modelling & Software, Jg. 25, 2, 182-198. doi: 10.1016/j.envsoft.2009.08.005, 2010.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht - AufMod (03KIS082-03KIS088), doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.
- HILL, L.; CROSIER, S. J.; SMITH, T. R. und GOODCHILD, M.: Content Standard for Computational Models. In: D-Lib Magazine, Jg. 6, digital. 2001.
- ISLAM, A.K.M.S. und PIASECKI, M.: A generic metadata description for hydrodynamic model data. In: Journal of Hydroinformatics, Jg. 8, 2, 141-148. 2006.
- ISO 19115:2003: Geographic Information - Metadata. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland, ISO/TC211, 2003.
- KIM, I.-H. und TSOU, M.-H.: Enabling Digital Earth simulation models using cloud computing or grid computing – two approaches supporting high-performance GIS simulation frameworks. In: International Journal of Digital Earth, Jg. 6, 4, 383-403. doi: 10.1080/17538947.2013.783125, 2013.
- KRESSE, W. und FADAIE, K.: ISO Standards for Geographic Information. Springer, Berlin, New York, xi, 322 S., 2004.
- LEHFELDT, R. und REIMERS, H.-C.: NOKIS++ Abschlussbericht. 2008.
- LUPP, M. (Hrsg.): Styled Layer Descriptor profile of the Web Map Service Implementation Specification. Open Geospatial Consortium (OGC 05-078r4), 2007.
- MAUÉ, P.; STASCH, C.; ATHANASOPOULOS, G. und GERHARZ, L.: Geospatial Standards for Web-enabled Environmental Models. In: International Journal of Spatial Data Infrastructures Research, Jg. 6, 145-167. doi: 10.2902/1725-0463.2011.06.art, 2011.
- MDI-DE (Hrsg.): Aufbau von integrierten Modellsystemen, 2014.

- Stand 04.02.2014: <http://projekt.mdi-de.org/services/verwandte-projekte/40-aufbau-von-integrierten-modellsystemen.html>
- NATIVI, S.; DOMENICO, B.; CARON, J.; DAVIS, E. und BIGAGLI, L.: Extending THREDDs middleware to serve OGC community. In: *Advances in Geosciences*, Jg. 8, 57-62. doi: 10.5194/adgeo-8-57-2006, 2006.
- PORTELE, C. (Hrsg.): OGC Geography Markup Language (GML) — Extended schemas and encoding rules. Open Geospatial Consortium (OGC 07-036), 2007.
- SCHUT, P. (Hrsg.): OpenGIS Web Processing Service. Open Geospatial Consortium (OGC 05-007r7), 2007.
- SIMONIS, I.; WYTZISK, A. und STREIT, U.: Integrating Simulation Models Into SDIs. In: *Proceedings of The 6th AGILE International Conference on Geographic Information Science*. Lyon, 2003.
- TSOU, M.-H. und BUTTENFIELD, B. P.: A Dynamic Architecture for Distributing Geographic Information Services. In: *Transactions in GIS*, Jg. 6, 4, 355-381. doi: 10.1111/1467-9671.00118, 2002.
- VITOLO, C.; BUYTAERT, W. und REUBNER, D. E.: Hydrological Models as Web Services: An Implementation using OGC Standards. In: HINKELMANN, R., NASERMOADDELI, M. H., LIONG, S., SAVIC, D., FRÖHLE, P. und DAEMRICH, K. (Hrsg.): *Understanding Changing Climate and Environment and Finding solutions*, Proceedings of the 10th International Conference on Hydroinformatics – HIC 2012. Hamburg, Germany, 2012.
- WEHRMANN, T.; GEBHARDT, S.; KLINGER, V. und KÜNZER, C.: Data processing using Web Processing Service orchestration within a Spatial Data Infrastructure. In: *34th International Symposium for remote Sensing of the Environment*. Sydney, Australia, 2011.
- WOSNIOK, C.; RÄDER, M.; KORDUAN, P. und LEHFELDT, R.: Metadaten in der MDI-DE. *Die Küste*, 82, 2014.
- WOSNIOK, C.; BENSMANN, F.; WÖSSNER, R.; KOHLUS, J.; ROOSMANN, R.; HEIDMANN, C. und LEHFELDT, R.: Enriching the Web Processing Service. In: *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly 2014, Jg. 16, 13365. 2014a.
- WOSNIOK, C. und LEHFELDT, R.: A Metadata-Driven Management System for Numerical Modeling. In: *IEEE/MTS (Hrsg.): Oceans - San Diego*, 2013. San Diego, CA, USA, 1-7. 2013.
- WOSNIOK, C. und RÄDER, M.: Leitfaden zur Pflege und Erstellung von Metadaten in der MDI-DE. Mit Mapping-Tabelle MDI-DE, 2013.
- WOSNIOK, C. und LEHFELDT, R.: A Metadata Profile For Numerical Modeling Systems. In: HAGEN, S., CHOPRA, M., MADANI, K., MEDEIROS, S. und WANG, D. (Hrsg.): *Proceedings of The 10th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2012)*. Orlando, USA, 2012.