



Konzeption und Implementierung einer fallspezifischen Unsicherheitskette im Rahmen fernerkundlicher Auswertungen

JOCHEN SCHIEWE & CHRISTOPH KINKELDEY, Hamburg

Keywords: uncertainty modeling, uncertainty visualization, classification

Zusammenfassung: Dieser Beitrag behandelt alternative bzw. innovative Ansätze für die Modellierung und Visualisierung von Unsicherheiten, die im Rahmen von fernerkundlichen Auswertungen entstehen. Hinsichtlich der Modellierung sollen räumlich und thematisch differenziertere Angaben als die häufig nur verwendeten *overall accuracy* oder *Kappa-Index* erzeugt werden. Hierzu wird eine erweiterte Kategorisierung der Unsicherheiten hinsichtlich des Trägers der Unsicherheit (flächenhaftes Objekt, Objektgrenze) sowie der Herkunft der Unsicherheitsinformationen (Vergleich mit *ground truth*, Güte der Klassenzuweisung, Bewertung mit Hilfe von Zusatzwissen) vorgeschlagen. Auf diese generellen Unsicherheitstypen aufbauend werden angepasste Visualisierungsformen (*Noise Annotation Lines* bzw. *Ghost Lines*) vorgestellt. Schließlich wird die Implementierung dieser Konzepte bis hin zur Nutzbarkeit in einem Webportal, d. h. bis zum Schließen einer „Unsicherheitskette“, im Rahmen des Projektes „KLIWAS“ beschrieben.

Summary: *Conception and Implementation of a Case Specific Uncertainty Chain in the processing of Remote Sensing Scenes.* This contribution deals with alternative and innovative approaches for modeling and visualizing uncertainties that arise in the context of a remote sensing analysis. Concerning the modeling stage, measures will be generated that yield more spatially and thematically differentiated information in contrast to the commonly used *overall accuracy* and *Kappa-Index*. For this purpose, we propose an expanded categorization of uncertainties related to the carriers of uncertainty (polygonal object, object boundary) and the origin of uncertainty information (comparison with *ground truth*, quality of class assignment, evaluation by means of a priori expert knowledge). Based on these general uncertainty types we present adapted visualization forms (*Noise Annotation Lines* and *Ghost Lines*, respectively). Finally, the implementation of these concepts up to the utilization in a web portal, i. e. towards the closing of the “uncertainty chain”, as part of the project “KLIWAS” is described.

1 Einführung

Die **Daten- und Modellqualitäten** geben die Übereinstimmung zwischen der realen Welt und den erfassten bzw. bearbeiteten (Fernerkundungs-)Daten wieder. Eine Reihe von Normen und Standards, z. B. ISO 19113, 19115, 19138, 14825, ENV 12656 oder die Vorgaben des US-amerikanischen Federal Geographic Data Committee, beschreiben die Qualitätsbegriffe näher. Diese reichen allerdings nicht aus, um alle denkbaren Diskrepanzen darzustellen. So gibt es weitere teilweise unbekannt Parameter wie die inhärente Unsicherheit

in der realen Welt, die Beschränkung des menschlichen Wissens in der Erkenntnis der realen Welt oder die Grenzen der Messtechnik zum Erfassen räumlicher Daten. Im Kontext der Auswertung von Fernerkundungsszenen fehlt beispielsweise häufig das objektive Wissen über bestimmte atmosphärische Aufnahmebedingungen, die eine Verfälschung der empfangenen Reflexionen verursachen können, oder über die tatsächliche Entwicklung der Landbedeckung, die sich zwischen zwei diskreten Aufnahmezeitpunkten im Rahmen einer Veränderungsanalyse ergeben hat.

Daher ist es angebracht, den übergeordneten Begriff der **Unsicherheiten** zu verwenden, der die Gesamtheit aller Effekte inkludiert (HUNTER & GOODCHILD 1993, ZHANG & GOODCHILD 2002). Im Kontext der thematischen Auswertung von Fernerkundungsszenen geschieht die Beschreibung bzw. **Modellierung** der Unsicherheiten aus pragmatischen Gründen sehr häufig nur a posteriori und summarisch, z. B. durch Angaben der *overall accuracy* oder des *Kappa-Indexes*, die jeweils durch einen Vergleich mit Referenzdaten (*ground truth*) bestimmt werden. Die **Vermittlung** dieser oder auch detaillierterer Informationen erfolgt oft nur rudimentär oder mit ungeeigneten (kartographischen) Mitteln. Diese Einschränkungen, die in Abschnitt 2 näher beschrieben werden, führen u. a. dazu, dass die **Nutzung** dieser Unsicherheitsinformationen bei der Ableitung neuen Wissens oder Entscheidungen nach unseren Beobachtungen (zu) selten stattfindet. Einige Studien haben jedoch Indizien dafür geliefert, dass Entscheidungen durch die Kommunikation von Unsicherheiten zuverlässiger werden können (EVANS 1997, LEITNER & BUTTENFIELD 2000, DEITRICK & EDSALL 2006). Auch die Sensitivitätsanalysen von PONTIUS & LIPPITT (2006) stellen ein Argument zur Nutzung von Unsicherheitsinformationen dar: Hierbei stellten die Autoren fest, dass die Hälfte der erkannten "Veränderungen" aus zwei klassifizierten Bildern durch Klassifizierungsfehler verursacht wurden, wobei die Gesamtklassifizierungsgüte jeweils einen – für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten durchaus typischen – Wert von 91% aufwies.

Folglich besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Modellierung, Vermittlung und Nutzung von Unsicherheitsinformationen – und speziell in der Verknüpfung der i. d. R. isoliert betrachteten Arbeitsschritte. Aus diesem Grund soll hier auch der Begriff der *Unsicherheitskette* propagiert werden, um die Bedeutung des Zusammenwirkens dieser Schritte zu verdeutlichen.

In diesem Kontext verfolgt dieser Beitrag zwei übergeordnete Ziele: Zum einen sollen basierend auf bisherigen Arbeiten und Erkenntnissen (Abschnitt 2) alternative bzw. innovative Ansätze für die Teilschritte der Modellierung und Vermittlung vorgestellt werden

(Abschnitt 3). Hierbei zielen wir auf eine primär *qualitative* Nutzung, z. B. zur Erkennung von Mustern oder Inhomogenitäten, ab, während die quantitative Verwertung nicht näher behandelt wird.

Zum anderen soll aufbauend auf diese konzeptionellen Arbeiten die Implementierung einer konkreten Unsicherheitskette für den Anwendungsfall einer fernerkundlichen Auswertung realisiert werden (Abschnitt 4). Die generalisierten Erkenntnisse aus diesem Vorhaben hinsichtlich Vorgehensweise, Aufwand und Übertragbarkeit werden abschließend zusammengefasst (Abschnitt 5).

2 Bisherige Arbeiten

2.1 Modellierung

Modelle zur Beschreibung von qualitativen und quantitativen Unsicherheiten sind in der Regel nicht allgemeingültig und müssen für konkrete Anwendungen angepasst werden (CAERS 2011, CONGALTON & GREEN 2009, EHLERS & SHI 1996). Im Kontext der Fernerkundung spielen vor allem Modelle für thematische und geometrische Unsicherheiten sowie kombinierte Verfahren wichtige Rollen.

Thematische Unsicherheiten beschreiben die Übereinstimmung eines Attributwerts zu seinem Wert in der realen Welt (SHI 2010). Thematische Unsicherheiten können Fehler und Ungenauigkeiten umfassen, aber auch die Vagheit, z. B. bei der Definition von Landbedeckungsklassen, und Mehrdeutigkeit, z. B. aufgrund der Mischpixelproblematik.

Geometrische Unsicherheiten können als Unterschied zwischen der beschriebenen (2D- oder 3D-)Position eines Geoobjekts und der Position in der realen Welt aufgefasst werden (SHI 2010). Am häufigsten werden hierzu probabilistische Modelle verwendet, die die räumliche Verteilung von Fehler-Wahrscheinlichkeiten abbilden, z. B. das S-Band-Modell von SHI & EHLERS (1993). Zum anderen kommen Fuzzy-Logik-Modelle zum Einsatz, die sich vor allem zur Behandlung von Mehrdeutigkeit und Vagheit eignen, z. B. EDWARDS & LOWELL (1996).

Die beiden genannten Aspekte der thematischen und geometrischen Unsicherheiten

lassen sich nicht immer trennen. Daher gibt es auch **kombinierte Unsicherheitsmodelle**. Beispielsweise wurden im CLAIM-Projekt (Classification Assessment using an Integrated Method, KINKELDEY et al. 2010) Unsicherheiten in den Übergängen zwischen Geoobjekten mit Hilfe von Fuzzy Logic modelliert.

Bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten liegt der Fokus im Allgemeinen auf der Angabe von summarischen, a posteriori Maßen, weil eine exakte Quantifizierung und Beschreibung der Fortpflanzung aufgrund der Komplexität sowie der vielfältigen Unsicherheitseinflüsse schwierig sind. Durch die summarische Angabe, z. B. durch Fehlermatrizen, *overall accuracy* oder *Kappa-Index* (CONGALTON 1991), gehen allerdings auch räumliche Bezüge bzw. geometrisch-thematische Zusammenhänge verloren, die für eine detaillierte Analyse von Interesse sein könnten.

2.2 Vermittlung

Die oben genannte Komplexität und der Anspruch einer räumlich differenzierten Modellierung der Unsicherheiten führen fast zwangsläufig zur Notwendigkeit der (karto-)graphischen Visualisierung zu Vermittlungszwecken. Auch wenn das Thema der Visualisierung von Unsicherheiten nur nebenläufig behandelt wurde (MACÉACHREN et al. 2012), wurden in den letzten Jahren in der Kartographie oder wissenschaftlichen Visualisierung einige Typologien und Kategorisierungen, z. B. durch BRODLIE et al. (2012), Methoden, z. B. durch SKEELS et al. (2009), und Studien vorgestellt, z. B. durch BOUKHELIFA et al. (2012) und ROTH (2009). Grundsätzlich sind bei der Visualisierung zwei Aspekte zu berücksichtigen – zum einen das graphische Zusammenspiel der Darstellung mit dem eigentlichen Karteninhalt, z. B. der erzeugten Landbedeckungs-Klassifizierung, zum anderen der Einsatz einer passenden graphischen Kodierung.

Hinsichtlich des **graphischen Zusammenspiels mit dem Karteninhalt** werden drei Varianten unterschieden: Bei der *separaten Darstellung* wird zusätzlich zur eigentlichen Karte eine weitere angezeigt, die die zugehörigen Unsicherheiten visualisiert. Diese

Methode erfordert viele Blickbewegungen (Sakkaden), die einen exakten Vergleich von identischen Positionen oder Bereichen in verschiedenen Fenstern sowie die Behaltensleistungen erschweren. *Sequenzielle Darstellungen* bestehen z. B. in der abwechselnden Darbietung von Karte und Unsicherheitskarte in einem Fenster oder in einer aufwändigeren Animation. Diese Variante hat den Nachteil, dass die einzelnen Repräsentationen nur kurz und vor allem nicht gleichzeitig dargestellt werden, so dass mentale Vergleiche mit gerade nicht sichtbaren Informationen hergestellt werden müssen (ANDRIENKO 2005). Die *kombinierte Darstellung* besteht in der Verschmelzung der zugrunde liegenden Geodaten und der Angabe zu ihren Unsicherheiten in einem Fenster. Hierbei gehen oft Informationen, z. B. durch Überdeckungen oder Generalisierungen, verloren.

Im Hinblick auf die eigentliche **graphische Kodierung der Unsicherheitsinformationen** müssen intuitive und gut lesbare „Metaphern“ gefunden werden (GERSHON 1998). Hierzu geben VAN DER WEL et al. (1994) einen Überblick, der geeignete Zuordnungen von graphischen Variablen, z. B. Größe, Farbe oder Textur, zu verschiedenen Unsicherheitsarten, z. B. geometrische und thematische Unsicherheiten, und Merkmalsskalierungen (nominal, ordinal, intervall, ratio) beschreibt. Weitere Typologien zur Unsicherheitskodierung geben beispielsweise PANG (2001), MACÉACHREN et al. (2005) oder SCHIEWE (2010). MACÉACHREN et al. (2012) untersuchen in einer empirischen Studie die Intuitivität sowie die Genauigkeit der Schätzung von Unsicherheiten auf Basis verschiedener abstrakter und bildhafter Darstellungen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es weder eine allumfassende Methode, noch eine allgemein akzeptierte Typologie zur Repräsentation von Unsicherheiten gibt.

3 Weiterentwicklung von Methoden

3.1 Modellierung

Im Folgenden besteht das übergeordnete Ziel in einer räumlich und zeitlich differenzierten Beschreibung der Unsicherheiten bei der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten, um eine umfassendere Beschreibung sowie tiefere Ursachenanalyse zu ermöglichen.

Abb. 1 fasst die im Folgenden aufgeführten Unsicherheitsmaße zusammen. Hierbei wird zuerst zwischen den **Trägern der Unsicherheit** (flächenhaftes Objekt und Objektgrenze) unterschieden. Die klassische Trennung zwischen thematischer und geometrischer Unsicherheit wird hier mit Absicht nicht verfolgt, da diese Typen in der Regel eine wechselseitige Wirkung aufweisen. Z. B. zieht eine sehr große Unsicherheit in der Klassenzuweisung auch eine Unsicherheit der Grenze nach sich. Werden Unsicherheiten der Objektgrenzen betrachtet, müssen diese in der Regel entsprechend ihrer Nachbarschaften zerlegt und je nach Klassenkombination die jeweiligen Teilgrenzen separat behandelt werden (Abb. 2).

Der übliche Weg zur Unsicherheitsbeschreibung für die thematische Objektklassifizierung ist die Ableitung von **Maßen aus dem Vergleich** des Klassifizierungsergebnisses mit **ground-truth-Daten** (CONGALTON 1991). Diese Maße beziehen sich zwar auf einzelne Merkmalsträger (Pixel, Regionen, Objekte), in der Regel findet aber eine Aggregation

bis hin zu einer Kennzahl für die Gesamtszene (*overall accuracy, Kappa-Index*) statt. Ein Problem hierbei ist häufig das Fehlen einer geeigneten *ground truth* für die beobachteten Fernerkundungsdaten, die aufgrund der verbesserten räumlichen, spektralen und radiometrischen Auflösungen prinzipiell auch verbesserte Referenzdaten erfordern. Außerdem erlaubt diese summarische Betrachtung keine Differenzierung nach verschiedenen Arten der Unsicherheiten. Beispielsweise kann der Anteil, der durch den eigentlichen Klassifizierungsprozess entsteht, nicht isoliert betrachtet werden.

Ein alternativer Weg zur Beschreibung der Objektklassifizierung (Thematik) ist ein **Maß der Klassenzuweisung**. Dieses beschreibt die innere Güte bei Anwendung eines Klassifizierungsalgorithmus – z. B. einen Wahrscheinlichkeitswert aus dem Maximum-Likelihood-Verfahren, einen Zugehörigkeitswert aus einer Fuzzy-Logic-Klassifizierung oder die Differenz zwischen der besten und zweitbesten Zuweisung. Die Klassenzuweisung erfolgt je nach Verfahren pixel- oder regionenbasiert, kann dann aber zu Objekten, Klassen oder der Gesamtszene aggregiert werden, z. B. über den Mittel- oder Minimalwert der Zuweisungsgüte.

Sowohl die Maße aus dem Vergleich mit *ground-truth*-Daten, als auch diejenigen, die auf der Klassenzuweisung basieren, sind in unterschiedlicher Tiefe in Software-Produkten implementiert worden. Eine recht große Auswahl bietet z. B. *Trimble eCognition®* (TRIMBLE 2013, SCHIEWE & GÄHLER 2006) mit

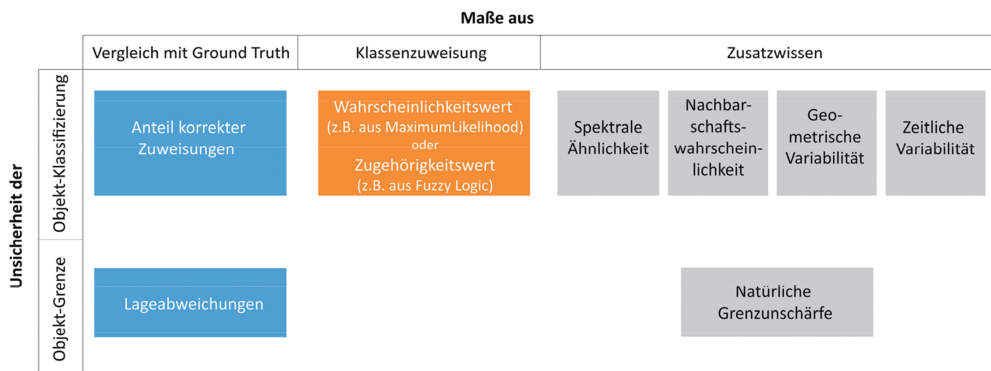


Abb. 1: Übersicht der Unsicherheitsmaße.

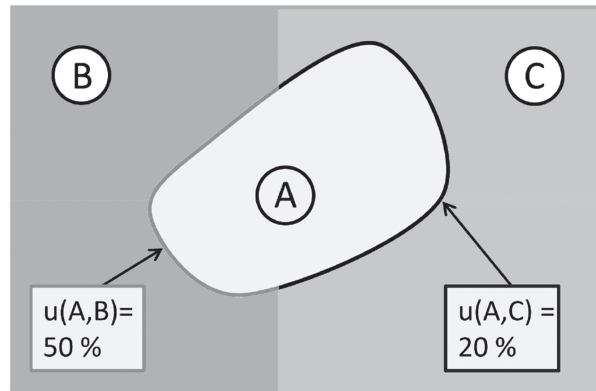


Abb. 2: Zerlegung der Objektgrenze in Teilgrenzen (links: Klassen A und B, rechts: Klassen A und C) und Zuweisung von Grenzunsicherheiten.

den Ansätzen „Error matrix based on TTA mask“ und „Error matrix based on samples“ (Vergleich mit *ground-truth*) sowie „Classification stability“ und „Best classification result“ (Berücksichtigung von Zugehörigkeitswerten der fuzzy-logic-Zuweisung).

Zu den bisher vorgestellten Kennzahlen werden im Folgenden zusätzliche Maße vorgestellt, die unabhängig von der eigentlichen Klassifizierung und basierend auf Expertenwissen ermittelt werden können:

- **Maß der spektralen Ähnlichkeit:** Je spektral ähnlicher ein Objekt zu seinen Nachbarobjekten ist, desto unsicherer sind sowohl die Klassenzuweisung zum Objekt als auch die Grenzziehung. Die Ähnlichkeit zwischen zwei *Objekten* O_A und O_B erfolgt auf Basis einer anwendungsspezifischen Beschreibung der Ähnlichkeit zwischen den zugehörigen *Klassen* A und B.
- **Maß der zeitlichen Variabilität:** Klassen, deren Erscheinung in der Natur, in Fernerkundungsbildern sich über die Zeit oft und/oder stark ändern kann, weisen eine höhere Unsicherheit bei der Klassifizierung und dementsprechend in der Grenzscharfe auf.
- **Maß der geometrischen Variabilität:** Klassen, deren Vorkommen in Größe und Form stark variieren, weisen eine höhere Unsicherheit bei der Klassifizierung und dementsprechend in der Grenzziehung auf.
- **Maß der Grenzunschärfe:** Ist die Grenze zwischen zwei Klassen A und B in der

Natur bereits schwer zu beschreiben bzw. unscharf, z. B. zwischen Wald und Wiese, wird durch diese Unschärfe nicht nur die Lage der Grenze, sondern zu einem gewissen Grad auch die Klassifizierung beeinflusst.

- **Maß der Nachbarschaftswahrscheinlichkeit:** Ist die Nachbarschaft zweier Klassen A und B sehr selten, sind sowohl die Zuweisung zu den Objekten O_A und O_B , als auch die Grenzziehung zwischen diesen beiden als unsicher zu bezeichnen.

Diese Maße setzen ein domänenspezifisches Expertenwissen voraus und lassen sich i. d. R. auf einer ordinalen Skala beschreiben. Eine anwendungsspezifische Anwendung dieser Maße wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt.

Alle bisher genannten Maße geben primär Aufschluss über die *thematische Korrektheit* der Zuordnung von Objekt-Zuweisungen bzw. der zugehörigen Attribute. Andere, z. B. in der ISO 19113 genannten Komponenten der Datenqualität, werden dabei indirekt betrachtet. So lässt sich die *Vollständigkeit*, also die Präsenz oder das Fehlen von Objekten oder Attributen, über eine summarische Bewertung einer Konfusionsmatrix nachvollziehen. Dagegen können Verletzungen der logischen *Konsistenz*, die aus Widersprüchen der konzeptionellen und logischen Datenstrukturen bzw. der Definition des Objektmodells entstehen, durch die vorgestellten a posteriori-Maße nicht ohne weiteres aufgedeckt werden.

3.2 Visualisierung

Im Kontext der Vermittlung bzw. Visualisierung sollen im Folgenden Methoden vorgestellt werden, die in der Lage sind, den erweiterten Satz der oben dargestellten Unsicherheitsmaße in einer möglichst homogenen sowie übertragbaren Art und Weise zu behandeln. Hierzu wird entsprechend der Strukturierung in Abb. 2 zwischen den Maßen unterschieden, die sich auf die eigentliche Unsicherheit der Objektklasse sowie auf die Objekt-(Teil-)Grenzen beziehen.

Für die **Darstellung der thematischen Objektunsicherheiten** wird die kombinierte Methode der *Noise Annotation Lines* propagiert, die im Umfeld der wissenschaftlichen Visualisierung erstmals von CEDILNIK & RHEINGANS (2000) vorgestellt, danach aber kaum weiterverfolgt wurde. Hierzu wird an jedem Punkt eines regelmäßigen Gitters ein Unsicherheitswert in Form von Rauschen visualisiert, wobei die Strichbreite proportional zur Größe der Unsicherheit gewählt wird (Abb. 3). Vorteile dieser Darstellungsmethode sind die Verwendung einer Metapher (Rauschen ~ Unsicherheiten) und eine relativ geringe Überdeckung der Karteninhalte. Zum anderen kann sie auf verschiedene Kartenmaßstäbe durch Wahl der Gitterweite angepasst werden. Eine ausführliche Beschreibung zur Generierung sowie eine Bewertung der Gebrauchstauglichkeit der Methode der Annotation Lines geben KINKELDEY & SCHIEWE (2012).

Im Zusammenhang mit der Darstellung der **Unsicherheiten im Grenzverlauf** verglichen BOUKHELIFA et al. (2012) in einer Nutzerstudie

die Intuitivität und Gebrauchstauglichkeit vier verschiedener Techniken: Unscharfe, gestrichelte und unregelmäßige Linien sowie solche, die in verschiedenen Graustufen dargestellt werden. Von den Probanden wurden die gestrichelten Linien subjektiv bevorzugt, wobei es keine Einschränkungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit gab. Ein Vorteil dieser als *Ghost Lines* bezeichneten Variante ist zudem, dass sie im Vergleich zu den anderen genannten Techniken eine geringere Überdeckung aufweisen.

4 Anwendung

4.1 Projekthintergrund

Die Umsetzung der in Abschnitt 3 dargestellten Konzepte zur Modellierung und Visualisierung von Unsicherheiten erfolgte im Vorhaben „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (KLIWAS)“, das durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gefördert und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) geleitet wurde.

Im Projekt 3.09 „Ästuarvegetation und Vorlanderschutz“ wurde untersucht, wie sich Eigenschaften und Funktionen der gezeitenbeeinflussten Vegetation im Elbe- und Weser-Ästuar klimabedingt verändern. Hierzu sollte eine Kombination von Felduntersuchungen und Auswertungen von Fernerkundungsdaten zu einer zeitnahen und effektiven Erfassung der großflächigen Röhrichtflächen beitragen.

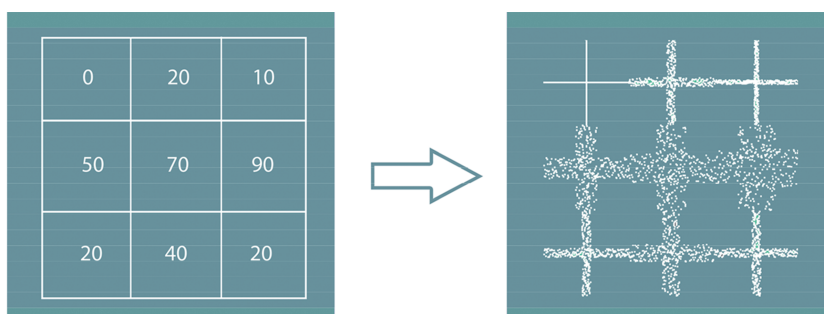


Abb. 3: Noise Annotation Lines: Unsicherheitswerte (links, in Prozent) werden durch ein „Rauschgitter“ (rechts) repräsentiert.

Im Teilprojekt „Querschnittsaufgabe Fernerkundung“ wurden zwei Sensoren zur Erfassung von unterschiedlichen Vorlandbereichen innerhalb des Elbe-Ästuars von jeweils ca. 400 ha eingesetzt: An der TU Berlin (BAHLS & KLEINSCHMIT 2012) wurden Daten des satellitengestützten Systems RapidEye und an der Universität Bonn (FAUDE & SCHMIDTLEIN 2012) Szenen des hyperspektralen flugzeuggestützten Scanners AISA verwendet. Um die Unsicherheiten der abgeleiteten Klassifizierungen und Veränderungsanalysen besser beurteilen zu können, befasste sich eine Arbeitsgruppe der HafenCity Universität Hamburg (KINKELDEY & SCHIEWE 2013) mit der Modellierung und Visualisierung der auftretenden Unsicherheiten. Um in diesem Kontext die Anforderungen und Wünsche der potenziellen Fachnutzer zu berücksichtigen, wurden in einer a priori Anforderungsanalyse elementare Kenntnisse und Einschätzungen zu Themen wie notwendige Karteninhalte und -interaktionen sowie Bedeutung von Unsicherheitsinformationen abgefragt. Das notwendige Expertenwissen speziell zur Modellierung der Unsicherheiten wurde durch die Projektpartner eingebracht.

4.2 Modellierung

Aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen in diesem Anwendungsprojekt, z. B. eine zu geringe Zahl von *ground-truth*-Mes-

sungen, konnte nur eine Auswahl der in Abschnitt 3.2 skizzierten Unsicherheitsmaße implementiert werden. Solche Einschränkungen sind aber durchaus als typisch anzusehen. Die Existenz einer Vielzahl von Optionen ist umso wichtiger.

Als **Maße der Klassenzuweisung** wurden die pixelbezogenen Werte aus den sogenannten *Rule Images* aus der Klassifizierung der AISA Eagle-Daten mit dem Random-Forest-Klassifikator (Universität Bonn) sowie der objektbezogenen Klassenzugehörigkeiten aus der Klassifizierung der RapidEye-Daten mit einem Maximum-Likelihood-Klassifikator (TU Berlin) herangezogen.

Für die aus Expertenwissen abgeleiteten Maße wurden nach Diskussion mit Vegetationsexperten die Merkmale der zeitlichen und geometrischen Variabilität aufgrund fehlender Eindeutigkeiten im gegebenen Klassifizierungsschema nicht berücksichtigt. Für die drei verbleibenden Maße wurden folgende ordinale Skalen festgelegt:

- **Maß der spektralen Ähnlichkeit:** absolut unähnlich, teilweise ähnlich, ähnlich, sehr ähnlich, identisch;
- **Maß der Nachbarschaftswahrscheinlichkeit:** sehr häufig, häufig, indifferent, selten, sehr selten;
- **Maß der Grenzscharfe:** sehr unscharf, unscharf, scharf.

Auf dieser Basis wurden Matrizen aufgestellt, in denen diese Maße klassenpaarweise definiert wurden. Abb. 4 zeigt ein Beispiel

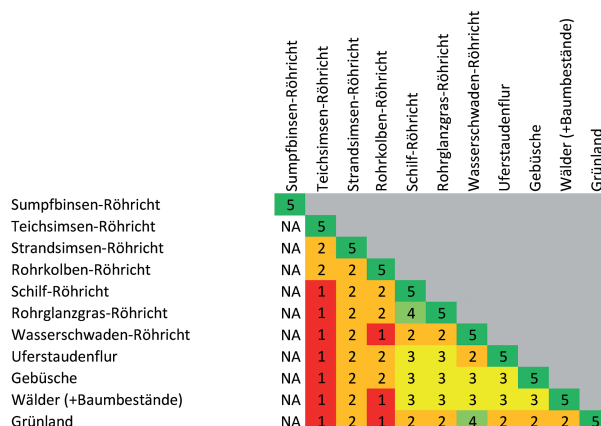


Abb. 4: Ausschnitt aus einer Unsicherheitsmatrix, die die spektrale Ähnlichkeit zwischen gegebenen Klassen beschreibt und aus Expertenwissen abgeleitet wurde.

hierfür. Die angesprochene Komplexität sowie heterogene Korrelationen zwischen diesen Maßen erlaubten es nicht, eine aussagekräftige, zusammenfassende Kenngröße zu ermitteln. Stattdessen erfolgt die Betrachtung der Unsicherheiten weiterhin getrennt.

4.3 Visualisierung

Für die Darstellung der verschiedenen **Maße der Objekt-Unsicherheiten** (Abb. 2) wurde die kombinierte Darstellung der *Noise Annotation Lines* (Abschnitt 3.2) gewählt. Je nach Verfahren kann die Darstellung einen konstanten Wert für jedes Objekt oder aber auch für jeden Gitterpunkt umfassen. Um die Überdeckung gegenüber dem eigentlichen Karteninhalt, d. h., dem Klassifizierungsergebnis, so gering wie notwendig zu halten, wurden Tests mit verschiedenen Gitterweiten für verschiedene Maßstäbe durchgeführt. Abb. 5 zeigt eine exemplarische Realisierung.

Die geometrischen **Grenzunsicherheiten** der Biotopkartierung wurden durch *Ghost Lines* (Abschnitt 3.2) visualisiert, die die Strichelung der Teilgrenze je nach Unsicherheitswert variieren (Abb. 6).

4.4 Nutzbarmachung

Das propagierte Modell der Unsicherheitskette bedarf in erster Linie einen möglichst einfachen und schnellen Daten- bzw. Informationsfluss. Dieser wurde dadurch erreicht, dass für alle beschriebenen Unsicherheitsmaße insgesamt nur zwei unterschiedliche Visualisierungsformen (*Noise Annotation Lines* bzw. *Ghost Lines*) verwendet worden sind, die ihrerseits mit üblicher GIS-Software und selbst erstellten Java-Tools leicht generiert werden können. Der Quellcode für die beschriebenen Tools für die Erzeugung von Noise Annotation Lines und Ghost Lines ist unter LGPL-Lizenz verfügbar (KLIWAS 2013a).

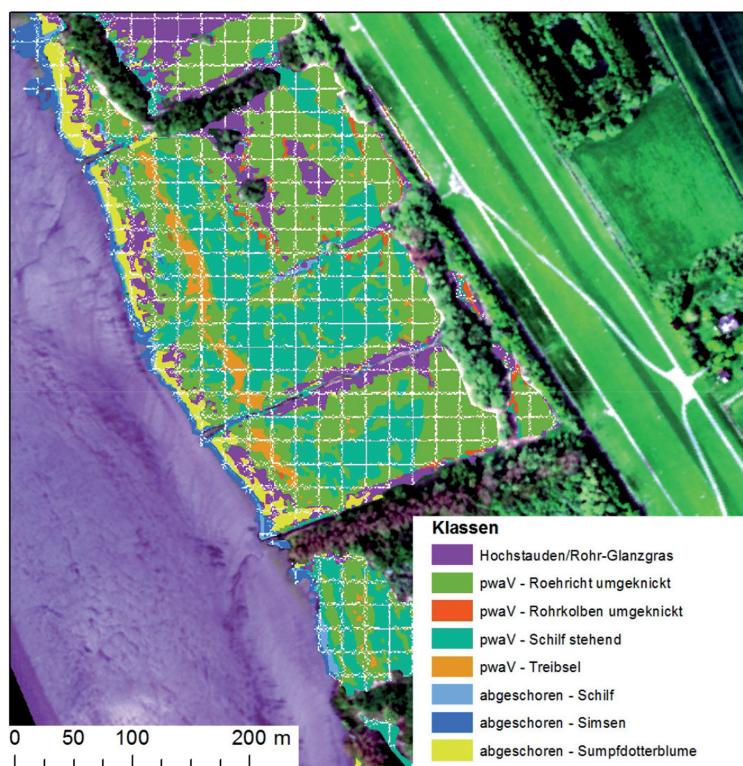


Abb. 5: Noise Annotation Lines zur Darstellung der Unsicherheit – Rasterweite 20 m.

In einem nächsten Schritt wurden die so erzeugten Unsicherheits-Layer zusammen mit den relevanten Geo- und Fachdaten, z. B. den Fernerkundungsbildern und Klassifizierungs-

ergebnissen, in das webbasierte Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde integriert (Abb. 7). Da dieses Portal die Esri ArcGIS-Server-Technologie nutzt, ist das Einstellen

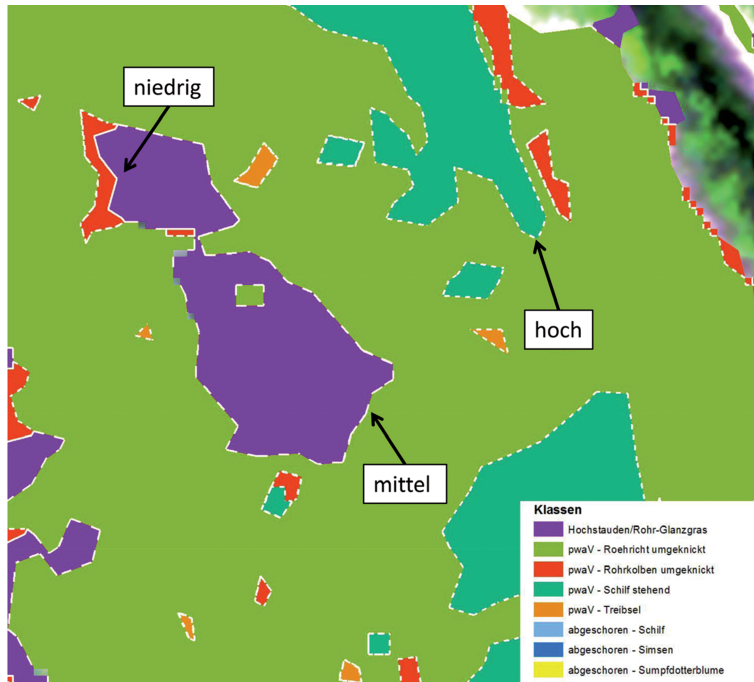


Abb. 6: Ghost Lines (gestrichelte Linien) repräsentieren die geometrische Unsicherheit einer jeden Teilgrenze der Klassifizierung.

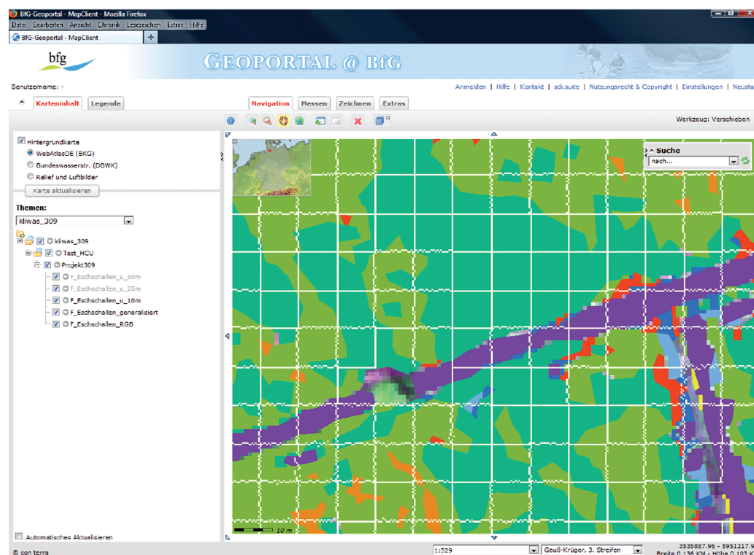


Abb. 7: Kombinierte Darstellung der Noise Annotation Lines im Geoportal@BfG (KLIWAS 2013b).

der Daten in Form eines ArcMap-Projekts und der zugehörigen Datei-Geodatenbank möglich. Es wurden Unsicherheits-Layer für mehrere Maßstabsbereiche erzeugt und integriert, um einen guten Kompromiss aus Überdeckung und Detailgrad der Information zu erreichen. Da die Unsicherheits-Layer über die OGC-konforme Web Mapping Service (WMS)-Schnittstelle zugänglich sind, können sie in andere Anwendungen importiert werden, die diese Schnittstelle unterstützen.

Aufgrund des Projektstatus konnte eine Evaluation der tatsächlichen Nutzung im Sinne der Gebrauchstauglichkeit und dem Ziel von verbesserten Entscheidungen durch Fachexperten noch nicht erfolgen. Aus den ersten qualitativen Reaktionen konnte aber geschlossen werden, dass das Rauschen der *Noise Annotation Lines* eine geeignete Metapher für Unsicherheiten zu sein scheint: Die Betrachter der Darstellung brauchten in der Regel keine Legende, um sich einen *qualitativen* Eindruck zu verschaffen bzw. relative Vergleiche zwischen Flächen korrekt durchzuführen. Es ist zu erwarten, dass sich die Darstellung weniger für das Ablesen *quantitativer* Unsicherheitswerte eignet.

Noch wichtiger erscheint der Eindruck, dass bei den Endnutzern durch die vorgeschaltete Anforderungsanalyse sowie die detaillierten kartographischen Darstellungsmöglichkeiten überhaupt eine Schärfung des Bewusstseins bzw. eine Steigerung der Akzeptanz für die Nutzung von Unsicherheiten erzielt wurde.

5 Fazit und Ausblick

Die **Modellierung von Unsicherheiten** ist ein hinsichtlich des Arbeitsaufwandes oft unterschätzter Schritt. Die starke Anwendungsabhängigkeit ergibt sich durch das Zusammenspiel des konkreten konzeptionellen Modells, z. B. des Katalogs der zu erfassenden Vegetationsarten, und der thematischen Detailtiefe, die aus vorhandenen (Fernerkundungs-)Daten abgeleitet werden kann. Eine einfache Übertragbarkeit auf andere Anwendungen ist kaum realisierbar. Die wissenschaftliche Erkenntnis aus diesem Beitrag bezieht sich daher auch vielmehr auf die Vorgehensweise als solche, die eine erweiterte Kategorisierung der Un-

sicherheiten hinsichtlich des Trägers der Unsicherheit, flächenhaftes Objekt, Objektgrenze, sowie der Herkunft, Vergleich mit *ground truth*, Güte der Klassenzuweisung, Bewertung mit Hilfe von Zusatzwissen, vorsieht. Weitere Forschung in diesem Bereich sollte eine noch stärker generalisierte Formulierung des Vorgehens erzielen, um Fachanwendern eine Handlungsanweisung zu ermöglichen.

Bezüglich der **Visualisierung von Unsicherheitsinformationen** gibt es keine standardisierten Methoden. Im Zusammenhang mit der anfangs propagierten Unsicherheitskette ist es andererseits aber notwendig, eine klare und wiedererkennbare Zuordnung zwischen den elementaren Typen von Unsicherheiten und ihrer visuellen Repräsentation zu gewährleisten. Mit den hier vorgestellten und implementierten Methoden der *Noise Annotation Lines* bzw. *Ghost Lines* ist dies für die getrennte Betrachtung von Unsicherheiten der Objektklasse bzw. der Objektgrenze realisiert worden. Die gute Erfassbarkeit von relativen Unsicherheiten, z. B. zwischen benachbarten Polygonen, konnte bereits nachgewiesen werden (KINKELDEY & SCHIEWE 2012). Derzeit sind von den Autoren Nutzerstudien zur *Noise-Annotation-Lines*-Methode in Arbeit, die weitere Erkenntnisse liefern werden. Die generelle Übertragbarkeit dieser Darstellungsformen auf andere Anwendungsfälle wird nach den bisherigen Erkenntnissen als unproblematisch eingeschätzt.

Im Zusammenhang mit der **Nutzung von Unsicherheitsinformationen** stellt die Integration der Visualisierungen in das BfG-Portal sicherlich nur einen praktischen Schritt dar. Dieser ermöglicht aber nun weitere Untersuchungen zur tatsächlichen Gebrauchstauglichkeit, z. B. durch systematische Befragungen von Nutzern, die das Webportal tatsächlich in ihre Arbeit eingebunden haben.

Die Übertragbarkeit des vorgestellten Arbeitsablaufes auf andere Anwendungsfälle ist grundsätzlich gewährleistet. Große Teile laufen dank der entwickelten Java-Tools automatisiert ab, so dass der Aufwand für die Behandlung der Unsicherheiten im Vergleich zur eigentlichen Klassifizierung als gering eingeschätzt wird. Es sind weitere Vorhaben in Planung, die das Konzept auf andere Anwendungen übertragen sollen.

Danksagungen

Die grundlegenden Arbeiten zu diesem Beitrag sind im Vorhaben „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (KLIWAS) – Teilprojekt 3.09 „Ästuarvegetation und Vorlandschutz“ – Querschnittsaufgabe Fernerkundung“ entstanden, das durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gefördert und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) geleitet wird. Wir danken den Projektpartnern, neben der BfG (Dipl.-Geoökologin MAIKE HEUNER, Dipl.-Geograph UWE SCHRÖDER) auch der Technischen Universität Berlin (Prof. BIRGIT KLEINSCHMIT) sowie der Rheinischen Friedrich Wilhelms-Universität Bonn (Prof. SEBASTIAN SCHMIDTLEIN), für einen reibungslosen Austausch von Daten, Informationen und Wissen.

Literatur

- ANDRIENKO, N., 2005: Impact of Data and Task Characteristics on Design of Spatio-Temporal Data Visualization Tools. – DYKES, J., MACEachREN, A.M. & KRAAK, M.-J. (eds.): *Exploring Geovisualization: 201–222*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- BAHLS, A. & KLEINSCHMIT, B., 2012: Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Konzeption für ein Langzeitmonitoring der gezeitenbeeinflussten Vegetation mit hochauflösenden Satellitendaten. – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.): *KLIWAS Schriftenreihe 13/2012*, KLIWAS-Projekt 3.09, doi: 10.5675/Kliwas_13.2012_Fernerkundung_2, Koblenz.
- BRODLIE, K., ALLENDES OSORIO, R. & LOPES, A., 2012: A Review of Uncertainty in Data Visualization. – DILL, J., EARNSHAW, R., KASIK, D., VINCE, J. & CHUNG WONG, P. (eds.): *Expanding the Frontiers of Visual Analytics and Visualization: 81–109*, Springer, London.
- BOUKHELIFA, N., BEZERIANOS, A., ISENBERG, T. & FEKETE, J.-D., 2012: Evaluating Sketchy Lines for the Visualization of Qualitative Uncertainty. – *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics* **18** (12): 2769–2778.
- CAERS, J., 2011: *Modeling uncertainty in the earth sciences*. – Wiley-Blackwell, Chichester, UK.
- CEDILNIK, A. & RHEINGANS, P., 2000: Procedural Annotation of Uncertain Information. – *IEEE Visualization IEEE* **2000**: 77–84, <http://www.cs.umbc.edu/~rheingan/pubs/grids00.pdf> (15.3.2013).
- CONGALTON, R.G., 1991: A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. – *Remote Sensing of Environment* **37** (1): 35–46.
- CONGALTON, R.G. & GREEN, K., 2009: *Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices*. – CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- DEITRICK, S. & EDSALL, R., 2006: The Influence of Uncertainty Visualization on Decision Making: An Empirical Evaluation. – *Progress in Spatial Data Handling: 719–738*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- EDWARDS, G. & LOWELL, K.E., 1996: Modeling uncertainty in photointerpreted boundaries. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **62** (4): 377–390.
- EHLERS, M. & SHI, W., 1996: Error Modelling for Integrated GIS. – *Cartographica* **33** (1): 11–21.
- EVANS, B.J., 1997: Dynamic Display of Spatial Data Reliability: Does It Benefit the Map User? – *Computers & Geosciences* **23** (4): 409–442.
- FAUDE, U. & SCHMIDTLEIN, S., 2012: Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Analyse von Störstellen, Röhricht- und Neophytenarten. – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.): *KLIWAS Schriftenreihe 5/2012*, KLIWAS-Projekt 3.09, doi: 10.5675/KLIWAS_5.2012_Fernerkundung_1, Koblenz.
- GERSHON, N., 1998: Visualization of an imperfect World. – *IEEE Computer Graphics and Application* **18** (4): 43–45.
- HUNTER, G. & GOODCHILD, M.F., 1993: Managing uncertainty in spatial databases: Putting theory into practice. – *Annual Conference “Urban and Regional Information Systems Association”* **15**.
- KINKELDEY, C., TOMOWSKI, D., SCHIEWE, J. & EHLERS, M., 2010: Entwicklung alternativer Maße zur Bewertung der Güte klassifizierter Fernerkundungsszenen. – *GIS Science* **23** (1): 34–39.
- KINKELDEY, C. & SCHIEWE, J., 2012: Visualisierung thematischer Unsicherheiten mit „Noise Annotation Lines“. – *Kartographische Nachrichten* **62** (5): 241–249.
- KINKELDEY, C. & SCHIEWE, J., 2013: Modellierung und Kommunikation von Unsicherheiten. Querschnittsaufgabe Fernerkundung. KLIWAS-Projekt 3.09. – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.): *KLIWAS Schriftenreihe 14/2013*, doi: 10.5675/Kliwas_14.2013_Fernerkundung_3, Koblenz.
- KLIWAS, 2013a: <http://code.google.com/p/kliwas/> (24.6.2013).
- KLIWAS, 2013b: <https://geoportal.bafg.de/> (24.6.2013).

- LEITNER, M. & BUTTENFIELD, B.P., 2000: Guidelines for the Display of Attribute Certainty. – *Cartography and Geographic Information Science* **27** (1): 3–14.
- MACÉACHREN, A.M., ROBINSON, A., HOPPER, S., GARDNER, S., MURRAY, R., GAHEGAN, M. & HETZLER, E., 2005: Visualizing Geospatial Information Uncertainty: What We Know and What We Need to Know. – *Cartography and Geographic Information Science* **32** (3): 139–160.
- MACÉACHREN, A.M., ROTH, R.E., O'BRIEN, J., LI, B., SWINGLEY, D. & GAHEGAN, M., 2012: Visual Semiotics & Uncertainty Visualization: An Empirical Study. – *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* **18** (12): 2496–2505.
- PANG, A., 2001: Visualizing Uncertainty in Geospatial Data. – Workshop on the Intersections between Geospatial Information and Information Technology, University of California, Santa Barbara, USA.
- PONTIUS, R.G. & LIPPITT, C.D., 2006: Can Error Explain Map Differences Over Time? – *Cartography and Geographic Information Science* **33** (2): 159–171.
- ROTH, R.E., 2009: A qualitative approach for understanding the role of geographic information uncertainty during decision making. – *Cartography and Geographic Information Science* **36** (4): 315–330.
- SCHIEWE, J. & GÄHLER, M., 2006: Modelling uncertainty in high resolution remotely sensed scenes using a fuzzy logic approach. – 1st International Conference on Object-based Image Analysis, Salzburg, Österreich (CD-ROM).
- SCHIEWE, J., 2010: Einsatz von Methoden zur interaktiven Visualisierung und Analyse von Unsicherheiten bei der Auswertung von Geodaten. – *gis.SCIENCE* **23** (1): 26–33.
- SHI, W., 2010: Principles of modeling uncertainties in spatial data and spatial analyses. – CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- SHI, W. & EHLERS, M., 1993: "S-BAND", a model to describe uncertainty of an object in an integrated GIS/remote sensing environment. – *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '93* (4): 1721–1723.
- SKEELS, M., LEE, B., SMITH, G. & ROBERTSON, G.G., 2009: Revealing uncertainty for information visualization. – *IVS* **0** (1): 70–81, <http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/groups/cue/publications/ivs2009-uncertainty.pdf> (15.3.2013).
- TRIMBLE, 2013: User Guide eCognition Version 8.8. – <http://www.ecognition.com/> (15.6.2013).
- VAN DER WEL, F.J.M., HOOTSMANS, R.M. & ORMELING, F. 1994: Visualization of Data Quality. – MACÉACHREN, A.M. & TAYLOR, D.R.F. (eds.): *Visualization in modern cartography*. – Pergamon, Oxford, UK & New York, NY, USA.
- ZHANG, J. & GOODCHILD, M.F., 2002: Uncertainty in geographical information. – Taylor & Francis, London, UK.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. JOCHEN SCHIEWE & Dipl.-Ing. CHRISTOPH KINKELDEY, HafenCity Universität Hamburg, Lab for Geoinformatics and Geovisualization (g2lab), Hebebrandstr. 1, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5442, e-mail: {jochen.schiewe},{christoph.kinkeldey}@hcu-hamburg.de

Manuskript eingereicht: April 2013
Angenommen: Juni 2013