

GIS-INTEGRIERTES FUZZY-REGELBASIERTES MODELL ZUR PROGNOSE VON SUKZESSIONSPROZESSEN IM RAHMEN EINES MONITORING BERGBAULICHER UMWELTEINWIRKUNGEN

*Dipl.-Ing. Stefan Nickel, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch, Technische Universität Clausthal
Dipl.-Biol. Michael Kelschbach, Institut für Landschaftsentwicklung und Stadtplanung
Dipl.-Ing. Volker Staeger, Dipl.-Ing. Peter Vosen, Deutsche Steinkohle AG*

ZUSAMMENFASSUNG:

Die senkungsbedingten Auswirkungen des untertägigen Steinkohlenabbaus auf das Schutzgut Pflanzen und Tiere werden im Land Nordrhein-Westfalen im Rahmen eines „Biomonitoring“ abbaubegleitend erfasst und prognostiziert. Die Prognose der grundwasserabhängigen Sukzessionsprozesse erfolgte bislang verbal-argumentativ auf der Grundlage von Karten und Plänen in Verbindung mit menschlichem Wirkungswissen. Zur Verkürzung der Bearbeitungszeit sowie zur Steigerung von Transparenz und Reproduzierbarkeit wurde das vorliegende ökologische Expertenwissen erschlossen und mit Methoden wissensbasierter Systeme modelliert. Das auf der Grundlage der Fuzzy-Logic entwickelte regelbasierte Modell wurde in ein Geoinformationssystem integriert und mit einem 3D-Grundwasserströmungsmodell gekoppelt. Das System liefert - für das Untersuchungsgebiet „Kirchheller Heide“ - Aussagen zu künftig möglichen Standortverhältnissen und Szenarien der Biotoptypenentwicklung im Sinne unterschiedlich plausibler alternativer Zukunftsbilder.

ABSTRACT:

The subsurface hard coal mining in North Rhine-Westphalia is accompanied by a system of spatial monitoring and controlling the environmental impacts. In the context of the “Bio monitoring-process” the subsidence-conditioned effects are analyzed and a prediction is made on the future impact on the protected goods fauna and flora. So far, the prognosis of the groundwater-dependent vegetation development took place according to an argumentative method based on maps and programs in connection with human expertise. For the increase of efficiency, transparency and reproductibility, the available ecological expert knowledge was included and modelled with methods of knowledge-based systems. A fuzzy rule-based model was developed, integrated into a Geoinformation System and coupled with a 3D-Groundwatermodel. The system provides - for the investigated area “Kirchheller Heide” - forecasts of soil conditions and future biotope developments based on alternative future scenarios.

1 EINLEITUNG

Der untertägige Steinkohlenabbau im Land Nordrhein-Westfalen wird durch ein System der räumlichen Beobachtung, Kontrolle und Steuerung der Umweltauswirkungen (Monitoring) begleitet. Das Monitoring befasst sich mit den unterschiedlichsten Themenbereichen, wie bergbauliche Einwirkungen, Grundwasser, Altlasten, Oberflächengewässer, terrestrische Biotope, Fauna, Forst- und Landwirtschaft, Freizeit und Erholung (Staeger 2006). Aufgrund der für den Steinkohlenbergbau charakteristischen Dynamik und Langfristigkeit des Abbaugeschehens sind bei Planungshorizonten von etwa 20 – 25 Jahren die Wirkungsprognosen zur Umwelt- und FFH-Verträglichkeitsprüfung bzw. Eingriffsregelung auf der Ebene der Rahmenbetriebsplanzulassung noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Im Rahmen eines naturschutzfachlichen Monitoring („Biomonitoring“) werden daher in einem 2-jährigen Turnus die senkungs- bzw. grundwasserbedingten Auswirkungen auf die Schutzgüter Pflanzen und Tiere abbaubegleitend analysiert und prognostiziert (ILS 2003). Als Besonderheit des Monitoring werden an fest vorgegebenen Zeitschnitten die tatsächlichen Umweltbeeinträchtigungen als Grundlage für die Festlegung von naturschutzrechtlichen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen ermittelt (Bezirksregierung Arnsberg 2002). Aber auch kurzfristige Prognosen, die anhand von konkreteren Abbauplanungen erstellt werden, liefern Hinweise zum frühzeitigen Erkennen möglicher Abweichungen von erwarteten Langfristentwicklungen und zur rechtzeitigen Planung gegensteuernder Maßnahmen.



Abb. 1 : Bergbaubedingter Vernässungsbereich in einem Senkungsgebiet

Angesichts der Komplexität dieser Aufgabenstellung und der anfallenden Datenmengen in Untersuchungsgebieten von bis zu 150 km² kann das Monitoring praktisch nicht ohne EDV-Einsatz durchgeführt werden. Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der Deutschen Steinkohle AG wurden in den vergangenen Jahren umfangreiche Grundlagen, Modelle und Computerwerkzeuge für ein „Monitoring bergbaulicher Umwelteinwirkungen“ erarbeitet (Roosmann et al. 2004, Matejka et al. 2005, Vosen et al. 2006). Für den Themenbereich „Prognose von Sukzessionsprozessen“ wurde ein GIS-integriertes Modell entwickelt, das nach Koppelung mit einem Grundwassersimulationsmodell eine Vorhersage von ökologischen Standortverhältnissen und Biotoptypen ermöglicht. Mit Blick auf die Dynamik des Abbaugeschehens war zudem die Dimension Zeit in das GIS zu integrieren.

Der Ansatz beruht neben einschlägigen pflanzenökologischen Vorarbeiten (Kelschbach & Nesselhauf 1995, 1997) vor allem auf der Expertensystemtechnik sowie Methoden der Geoinformatik. Als Modellierungsgrundlage diente umfangreiches boden- und vegetationskundliches Fach- und Expertenwissen, das hauptsächlich im Dialog zwischen den naturschutzfachlichen Gutachtern und Modellierern erhoben wurde. Das überwiegend qualitative Wirkungswissen wurde mit Methoden wissensbasierter Systeme in einem regelbasierten Modell (Pullar 1997, Beierle et al. 2006) abgebildet und mit Hilfe von empirischen Daten aus dem Untersuchungsraum überprüft. Da für Vorhersagen von Sukzessionsprozessen insbesondere auch unscharfes ökologisches Wissen von Bedeutung ist, wurde der regelbasierte Ansatz mit Hilfe der Fuzzy-Logic (Bardossy et al. 1995, Striezel 1996) erweitert. Die Konzepte der Fuzzy-Set-Theorie sollten, wie nachfolgend beschrieben, realitätsnähere Modelle sowie geeignete Repräsentationsformen für unscharfes Wissen liefern. Der so entstandene Entwurf wurde schließlich in ein raum-zeitliches GIS implementiert.

2 PROGNOSE VON SUKZESSIONSPROZESSEN

Die Entnahme größerer Mengen Steinkohle im untertägigen Abbau ist mit Hohlräumen verbunden, die sich unter dem Gebirgsdruck über kurz oder lang wieder schließen. Dies leitet einen Senkungsvorgang der nächst höheren Gebirgsschichten ein, der sich bis an die Erdoberfläche fortsetzt und über verschiedene Wirkungspfade zu weitreichenden Modifizierungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels führen kann (Kratzsch 2004). Als planungsrelevante Wirkungen sind Veränderungen von Standortverhältnissen bzw. land- und forstwirtschaftlichen Nutzungen zu nennen (Abb. 2). Diese Veränderungen sowie das floristische Artenpotential der Umgebung stellen wesentliche Einflussgrößen für die Entwicklungsprozesse der Vegetation dar. Das Wirkungsgefüge weist sowohl deterministische als auch stochastische Elemente (v.a. Nutzungsänderung, spontane Sukzession) auf.

Die Wirkungsprognosen im Biomonitoring orientieren sich hauptsächlich an dem Verfahren der „integrativen Sukzessionsprognose zu dynamischen Landschaftsveränderungen“ (Kelschbach & Nesselhauf 1997). Die primär verbal-argumentative Methode kennzeichnet eine weitgehende Trennung der Sach- und Wertebene und ermöglicht Vorhersagen künftig möglicher Standortverhältnisse und Biotoptypen.

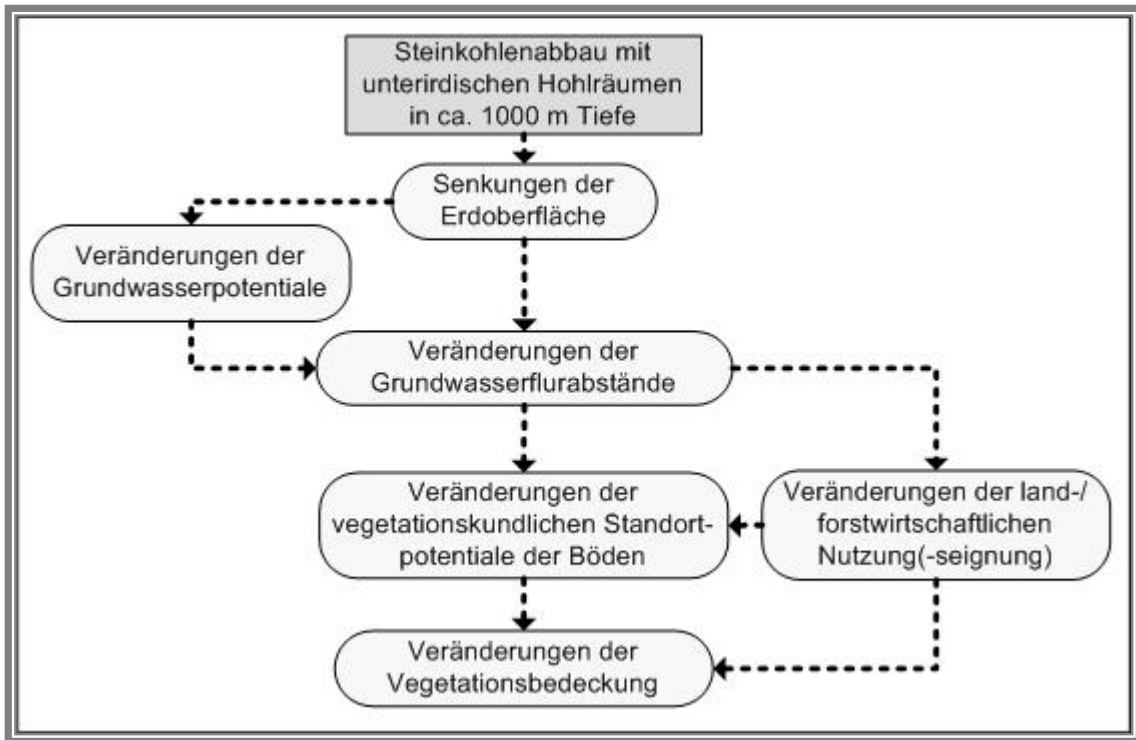


Abb. 2 : Wirkungsmodell für die Prognosen im Biomonitoring

Anders als bei vielen anderen Methoden zur Wirkungsprognose erfolgt hier die Ermittlung und Beschreibung der Umweltveränderungen auf der Basis von Situationsprognosen und Alternativszenarien. Das mit Hilfe der Expertensystemtechnik und Methoden der Geoinformatik erweiterte Verfahren kann wie folgt beschrieben werden.

2.1 Ermittlung und Beschreibung des Zustandes von Natur und Landschaft

In der 2-jährlich wiederkehrenden Analysephase erfolgt im gesamten Untersuchungsgebiet eine Erfassung der Biotoptypen gemäß dem Kartierschlüssel der Deutschen Steinkohle AG (RBAG 1996). Die Ermittlung und Beschreibung der pflanzenökologischen Standortpotentiale beruht auf der Methode der Ökoschlüssel (Dahmen 1976, 1997), die eine mehrfaktorielle Standortansprache über Vegetations- und Bodenmerkmale erlaubt. Im sog. integrierten Ökoschlüssel sind die primären edaphischen Standortfaktoren Bodenfeuchte, Säure-/Basenversorgung, Sauerstoffversorgung und Nährstoffversorgung in bodenkundlicher und pflanzenökologischer Hinsicht zusammengefasst. Die flächendifferenzierte Darstellung des integrierten Ökoschlüssels erfolgt auf der Basis von annähernd homogenen Standorteinheiten mit gleichen Boden- und Nutzungsmerkmalen. Im Untersuchungsgebiet wurde zudem ein Netz von Dauerbeobachtungsflächen eingerichtet, das das gesamte Spektrum der von möglichen Auswirkungen betroffenen Standorteinheiten repräsentiert. Die Standorteigenschaften der punkthaften Monitoringstellen werden durch Extrapolation auf die flächenhaft betroffenen Standorteinheiten übertragen.

2.2 Ermittlung und Beschreibung der Wirkfaktoren

Die Wirkfaktoren, d.h. die von einem Vorhaben ausgehenden Ursachen für Umweltveränderungen, ergeben sich aus dem komplexen Zusammenwirken von untertägigem Abbau, Senkungen der Erdoberfläche und dadurch hervorgerufenen Grundwasserpotentialänderungen. Die Ermittlung des Wirkfaktors „Veränderungen der Grundwasserflurabstände“ beruht selbst bereits auf verschiedenen Prognosen. Die Vorausberechnung der künftigen Geländeoberfläche stützt sich auf photogrammetrisch erzeugte digitale Höhenmodelle und markscheiderische Vorausberechnungen der Senkungen mit Hilfe des Systems CadBERG (Wieland 2001), die Prognose der künftigen Grundwasserpotentiale auf eine Simulation mit einem dreidimensionalen stationären Grundwassermodell (Rüber 1997).

2.3 Prognose der Veränderungen von Natur und Landschaft

Auf der Grundlage annähernd homogener Raumeinheiten mit Merkmalen der Bestandsaufnahme und Wirkfaktoren erfolgt in einem ersten Schritt die modellgestützte Prognose der Standortverhältnisse, d.h. eine Abschätzung des Feuchtezustands der Böden und der Wechselwirkungen mit den übrigen Standortfaktoren des Ökoschlüssels nach Dahmen. Die Bodenfeuchte wird entsprechend der vorhandenen Datenquellen aus bodenkundlichen, bodenhydrologischen und klimatischen Größen hergeleitet. Hierzu wurde eine Methode des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (Benzler et al. 1987, Müller 2004) herangezogen und mit Hilfe der Konzepte der Fuzzy-Set-Theorie erweitert.

In einem zweiten Schritt werden die Betroffenheiten des Biotoptypenbestandes und der Nutzungseignung für die Land- und Forstwirtschaft herausgearbeitet. Für eine qualitative Beschreibung dieser Auswirkungen dient die Systematik der Betroffenheitsgrade (ILS 1999). Beispiele sind: „Gefahr von vernässungsbedingtem Baumsterben, den gesamten Bestand erfassend, Fläche nicht mehr waldfähig“ oder „Keinerlei landwirtschaftliche Nutzung mehr möglich“. In formaler Hinsicht stellt die Prognose der Betroffenheitsgrade einen mehrstufigen Klassifikationsprozess dar, der aus relevanten Attributen, wie Wirkfaktoren (z.B. Grundwasseranstieg) und Wirkungen (z.B. Biotoptyp toleriert den Standort nicht mehr) eine Zuordnung zu einer der vorab definierten Betroffenheitsgrade liefert. Die Nachbildung dieses Klassifikationsprozesses wurde mit Hilfe eines nutzerdefinierten Klassifikationsbaumes (Entscheidungsbaum) realisiert und in das wissensbasierte GIS integriert.

Der letzte Schritt der Biotoptypenprognose basiert auf Landnutzungsszenarien (Bandbreiten künftiger Entwicklungsmöglichkeiten), ökologischem Wissen über charakteristische Standortbereiche bzw. Entwicklungszeiten von Biotoptypen sowie dem floristischen Artenpotential der näheren und weiteren Umgebung. Landnutzungsszenarien lassen sich vereinfacht aus der aktuellen Nutzung sowie den Betroffenheitsgraden als Ausdruck der Veränderung der land- und forstwirtschaftlichen Nutzungspotentiale ableiten. Da Vorhersagen über das Anpassungsverhalten der Flächennutzer an veränderte Rahmenbedingungen jedoch kaum zweifelsfrei möglich sind, mussten zudem grundlegende Modellannahmen getroffen werden (z.B. „Bei Waldflächen, die trotz bergbaubedingter Standortveränderungen waldfähig bleiben, findet keine Umwidmung statt.“).

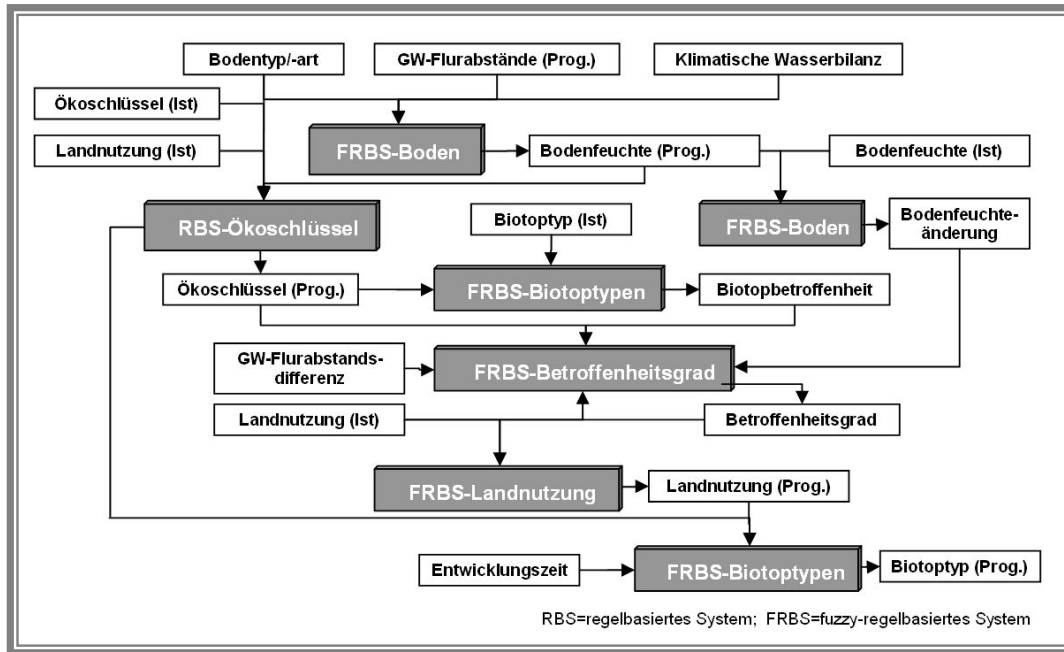


Abb. 3 : Struktur des konzeptionellen Modell (vereinfacht)

Zur Berücksichtigung der pflanzenökologischen Standorteignung bildet das Modell charakteristische Standortbereiche von Biotoptypen ab. Aufgrund unterschiedlicher Standortansprüche der für einen Biotoptyp charakteristischen Pflanzenarten, vagem Wissen über die Standortansprüche einzelner Arten und allgemein hoher Variabilität ökologischer Systeme sind jedoch insbesondere die Grenzen derartiger Standortbereiche mit Unschärfen behaftet. Für die Darstellung dieser Unschärfen wurde ein fuzzy-basierter Modellierungsansatz gewählt (Asshoff 1999) und auf die pflanzenökologische Ansprache nach Dahmen übertragen. Ferner wurden unscharfe zeitliche Mindestansprüche der Biotoptypenentwicklung bei unterschiedlichen Ausgangszuständen (Froelich & Sporbeck 1995) mit Hilfe von Fuzzy-Sets modelliert und das floristische Artenpotential der näheren und weiteren Umgebung durch eine Häufigkeitsstatistik der Lieferbiotope im Untersuchungsgebiet berücksichtigt. Die Struktur des konzeptionellen Modells zeigt Abb. 3.

3 FUZZY-REGELBASIERTE MODELLIERUNG

Die fuzzy-regelbasierte Modellierung (Bardossy et al. 1995) nutzt fundamentale Methoden wissensbasierter Systeme (Beierle et al. 2006). Wissensbasierte Systeme sind Programme, die auf der Grundlage von Wissen in einer begrenzten Problem-domäne Schlussfolgerungen ziehen können, und so dem Benutzer helfen, ein Problem zu lösen oder eine Entscheidung zu treffen. Die Fuzzy-Set-Theorie als Verallgemeinerung der klassischen, zwei-wertigen Mengenlehre ermöglicht die Beschreibung der Zugehörigkeiten von Elementen zu einer Menge durch eine kontinuierliche Zugehörigkeitsfunktion, so dass Zugehörigkeitsgrade auch jeweils zwischen 1 und 0 liegen können (Strietzel 1996). Das Sukzessionsmodell zum Zwecke der Ermittlung und Beschreibung senkungsbedingter Auswirkungen auf die Umwelt beruht im Wesentlichen auf den nachfolgend beschriebenen Ansätzen der fuzzy-regelbasierten Modellierung.

Die Methode zur Ermittlung der Bodenfeuchte (Müller 2004) repräsentiert als diskretes kombinatorisches Regelwerk einen relativ häufigen Typus in der Methodik der Umweltplanung. Bei kontinuierlichen Eingangsgrößen, wie dem mittleren Flurabstand, treten vor allem an den Klassengrenzen Sprünge auf, die den kontinuierlichen Charakter von physikalisch basierten Größen nicht realistisch abbilden (Fischer et al. 2004). Fuzzy-Sets schaffen hier eine Brücke zwischen wert-diskreten und wert-kontinuierlichen Systemen und ermöglichen damit eine bessere Annäherung des Modells an das Realsystem. Im Rahmen des Monitoring können mit Hilfe des so verbesserten Modells vor allem auch geringere Veränderungen des Bodenwasserhaushalts durch Koppelung mit dem 3D-Grundwassermodell detektiert werden.

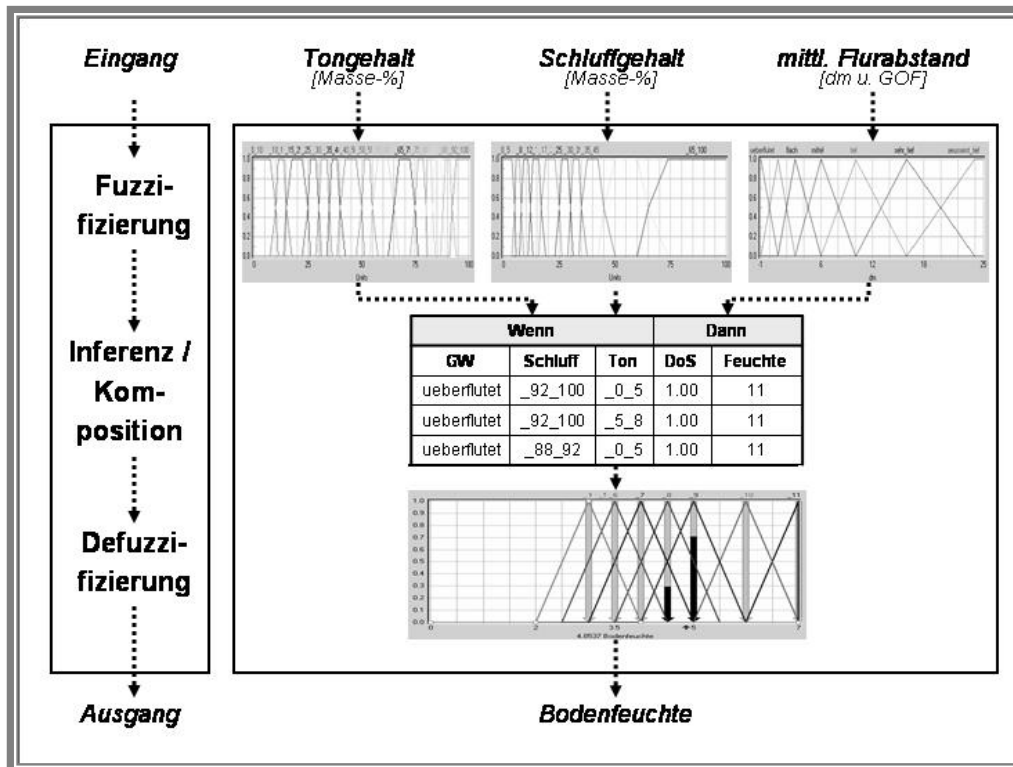


Abb. 4 : Prinzip des fuzzy-regelbasierten Systems zur Ermittlung der Bodenfeuchte

Im Falle der Flurabstände stellen die Grundwasserstufen („flach“, „mittel“, „tief“ etc.) unscharfe Begriffe dar, die mit Hilfe von Zugehörigkeitsfunktionen über dem Definitionsbereich des mittleren Grundwasserflurabstandes als Fuzzy-Mengen beschrieben wurden (Abb. 4). Bei der Fuzzifizierung wird jedem Wert der kontinuierlichen Eingangsgröße eine bestimmte Menge an unscharfen Begriffen mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen zugewiesen, so dass diese unabhängig voneinander in einem diskreten kombinatorischen Regelwerk weiterverarbeitet werden können. Die Zugehörigkeitsfunktionen nehmen in diesem Sinne den Charakter einer stückweisen linearen Interpolationsfunktion an.

Bezüglich der Klasseneinteilungen der Bodenarten nach KA 5 (AG Boden 2005) und der Masse-% der Kornfraktionen Schluff und Ton konnte entsprechend verfahren werden. Mit Hilfe der Fuzzy-Logic werden durch Inferenz und Komposition die unscharfen Aussagen logisch miteinander verknüpft und die Bodenfeuchtestufen als unscharfe Mengen ausgegeben. Bei der

Defuzzifizierung werden diese in einen reellen („scharfen“) Ausgabewert überführt, wobei in Abhängigkeit von der gewählten Methode (z.B. Mean of Maximum, Center of Maximum, Unterdrückung der Defuzzifizierung) entweder eindeutige Feuchtestufen, Zwischenstufen oder mehrere alternative Feuchtestufen (Fuzzy-Mengen mit ihren Zugehörigkeitsgraden) geliefert werden.

In unserem Beispiel erfolgt im Zuge der Defuzzifikation auch der Transfer der Bodenfeuchtwerte aus der Klassifikation nach Müller in die Klassifikation nach Dahmen. Durch Veränderung der Zugehörigkeitsfunktionen über der Grundmenge der Feuchtegrade kann das Modell mit Hilfe empirischer Daten kalibriert werden.

Für den zweiten Anwendungsbereich der Fuzzy-Logic, den Vorhersagen von Biotop-betroffenheiten durch Standortveränderungen und Prognosen der Vegetationsentwicklung, ist umfangreiches Wissen über die Standortansprüche von Pflanzenarten Voraussetzung. Da das Monitoring insbesondere auch Biotoptypen als Indikatoren für die Leistungsfähigkeit des Naturhaushalts heranzieht, wurde untersucht, inwieweit eine Transformation von artspezifischem Wissen auf die Ebene von Biotoptypen möglich ist.

Tab.1 : Charakterisierung des Standortbereichs des Eichen-Buchenwaldes nach Dahmen

Biotoptyp	Bezeichnung	Typische Pflanzenarten	Bodenfeuchte	Säurestufe	O ₂ -Versorgung	Nährstoffversorgung
AA1	Eichen-Buchenwald	Dryopteris carthusiana	3-6 (z. 7)	1-3	2-3	1-3
		Fagus sylvatica	2-3	2-6	3-4	3-4
		Ilex aquifolium	2-4	2-4	3-4	2-3
		Luzula sylvatica	3-4	1-3	3-4	1-3
		Maianthemum bifolium	2-3	2-4	3-4	2
		Milium effusum	2-3	3-5	3-4	3-4
		Oxalis acetosella	3-4	2-3	3-4	2-3
		Pteridium aquilinum	2-3	1-3	2-3	2-3
		Quercus petraea	1-4	2-6	4-5	2-4
		Quercus robur	1-5	1-6	2-4	1-4
		Amplitude	2-3	2-5	3-4	3-4

Zur Beschreibung der biotoptypenbezogenen Standortansprüche wurden den meisten vegetationsgeprägten Biotoptypen des zugrundeliegenden Kartierschlüssels (RBAG 1996) typische Pflanzenarten zugeordnet, die den Charakter und die standörtlichen Ansprüche der Biotoptypen im Untersuchungsgebiet annähernd repräsentieren (Tab. 1). Für jede Art wurden Standortbereiche in Bezug auf die Bodenfeuchte, Säure-/Basenversorgung, Sauerstoffversorgung und Nährstoffversorgung mit Hilfe der Datenbank des Wildpflanzen-Informationssystems TERRA BOTANICA (Dahmen & Dahmen 1994) ermittelt. Anders als bei den meisten Ansätzen zur Beschreibung pflanzenökologischer Standortansprüche werden bei der Methode nach Dahmen Toleranzspannen angegeben, die als Orientierung für die Definition der typischen Standortbereiche der Biotoptypen verwendet werden können.

Mehr noch als bei den einzelnen Arten ist auf der Ebene von Biotoptypen das Wissen über die Grenzen der Standortbereiche als sehr vage einzustufen. Die Identität eines Biotoptyps wird bei allmählichen Standortveränderungen z.B. erst nach und nach durch Ausfall der einen oder anderen Art verändert. Zur Modellierung dieser und anderer Unschärfen wurden die Standortbereiche der Biotoptypen in Bezug auf jeweils einen Standortfaktor durch Fuzzy-Sets beschrieben (Asshoff 1999). Die Steilheit der Dreiecks- oder Trapezfunktionen über den einzelnen Standortfaktoren als Grundmengen repräsentiert dabei die Unschärfe an den Rändern der Standortbereiche. Die so modellierten Fuzzy-Standorttoleranzen konnten anschließend mit Hilfe empirischer Kenntnisse aus langjährigen Dauerbeobachtungen an die Bedingungen des Untersuchungsraumes angepasst werden.

Der mehrfaktorielle Standortbereich eines Biotoptyps lässt sich darauf aufbauend durch eine Fuzzy-Relation (Verknüpfung mehrerer Grundmengen durch Kreuzproduktbildung) in Verbindung mit dem MIN-Operator (Standortfaktoren als Minimumfaktoren für das Pflanzenwachstum) darstellen. Abb. 5 zeigt das unscharfe kartesische Produkt über 2 Grundmengen (Bodenfeuchte und Säure-/Basenversorgung), das um weitere Umweltfaktoren beliebig erweiterbar ist.

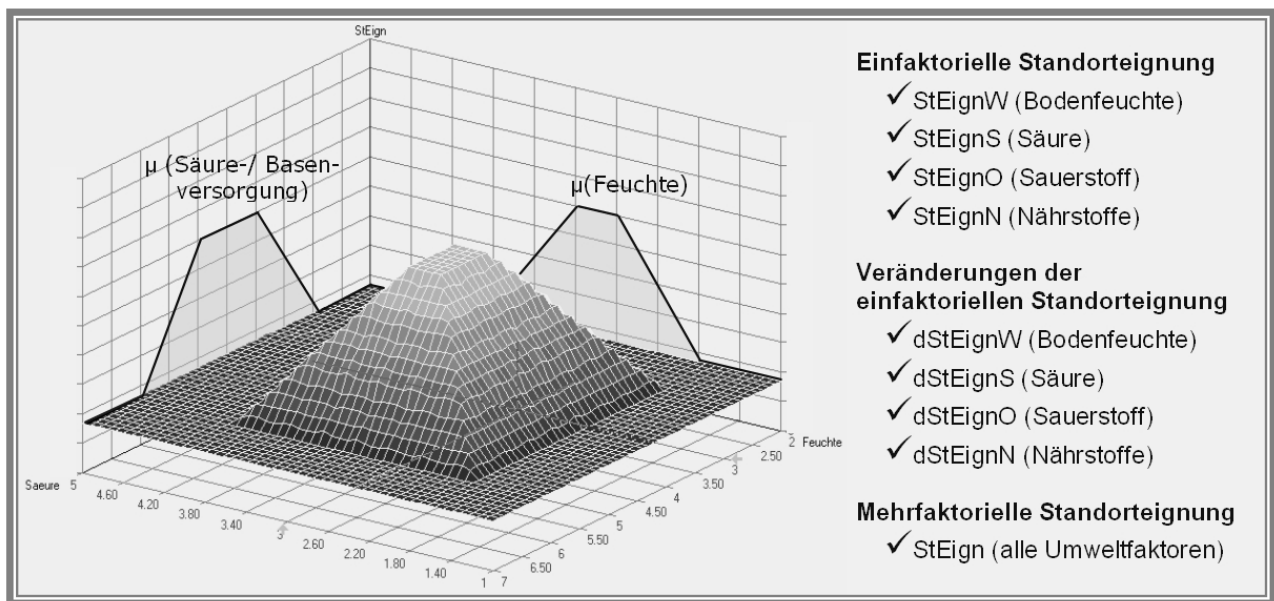


Abb. 5 : Mehrfaktorieller, unscharfer Standortbereich und daraus ableitbare Kennwerte für die Sukzessionsprognose

Die Wissensbasis liefert somit verschiedene Kennwerte für die Wissensverarbeitung bzw. fachliche Interpretation. Beispielweise kann für vorgegebene Standorteigenschaften eine ein- oder mehrfaktorielle Standorteignung für einen Biotoptyp ermittelt werden. In der Terminologie der unscharfen Mengenlehre ist dies der Zugehörigkeitsgrad eines Standortes zur Menge der von einem Biotoptyp tolerierten Standorte.

4 AUFBAU DES WISSENSBASIERTEN GEOINFORMATIONSSYSTEMS

Das wissensbasierte GIS wurde auf der Grundlage von ArcGIS der Firma ESRI in Verbindung mit einer Oracle Datenbank realisiert. Die funktionellen Erweiterungen von ArcMap wurden mit Hilfe des Microsoft .NET Framework und ArcObjects entwickelt (Abb. 6).

Im Monitoring müssen sowohl raum- als auch zeitbezogene Daten erfasst, verwaltet, analysiert und präsentiert werden. Die Datenhaltung arbeitet hierfür auf einem Versionskonzept zur Speicherung unterschiedlicher Zustände in nutzerdefinierten "Snapshots" auf der Basis des ESRI-proprietären Multiuser-Geodatabase-Modells. In Verbindung mit temporalen Metadaten ermöglicht die erweiterte Versionsverwaltung, die Dimension Zeit in die Geodatenbank zu integrieren und die Genese von Geodaten zu dokumentieren (Matejka et al. 2005). In der Wissensbasis ist das Fach- und Expertenwissen explizit in unterschiedlichen Repräsentationsformen (v.a. Fuzzy-Sets, Wenn-Dann-Regeln) gespeichert. Da eine klare Schnittstelle zwischen der Wissensbasis und der Komponente für die Wissensverarbeitung existiert, ist es prinzipiell möglich, die Wissensbasis nachträglich und unabhängig vom Programmcode zu erweitern oder wiederzuverwenden. Für die Erstellung und Pflege der Wissensbasis wird fuzzyTECH 5.55d Professional als kommerzielle Software eingesetzt.

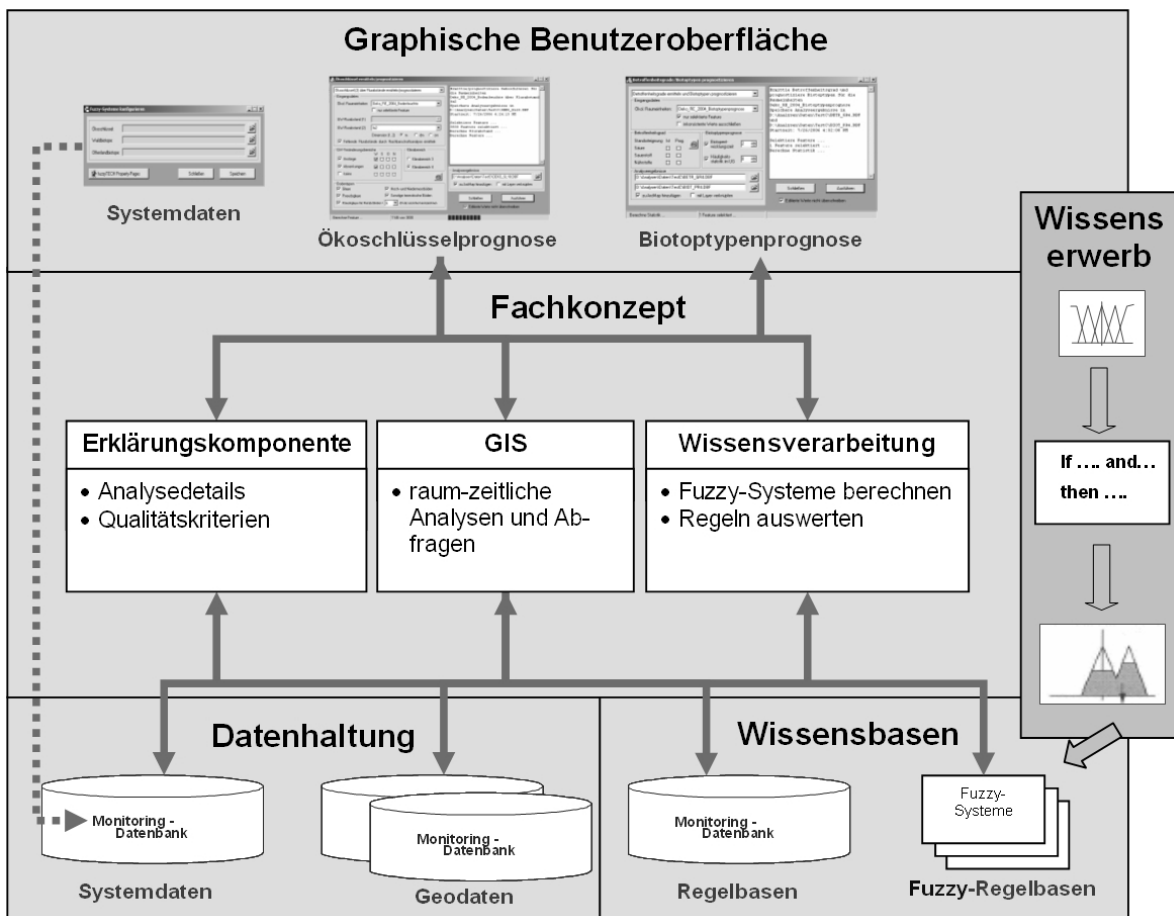


Abb. 6 : Systemarchitektur des wissensbasierten GIS

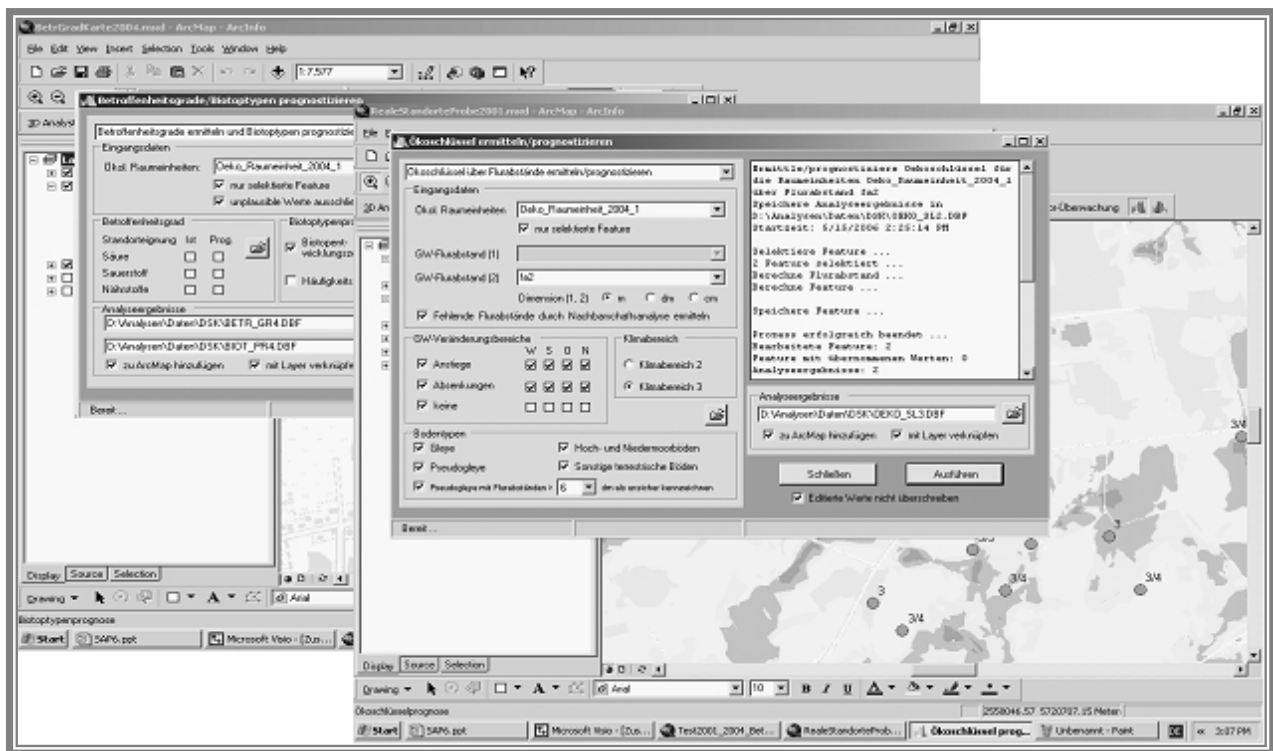


Abb. 7 : Benutzeroberflächen der funktionellen Erweiterungen von ArcGIS

In der Fachkonzeptschicht wird das gespeicherte Wissen durch die Wissensverarbeitungs-komponente mit geeigneten Methoden verarbeitet. Diese sind vollständig in das GIS integriert und werden über eine einheitliche Oberfläche zu Verfügung gestellt (Abb. 7). Darüber hinaus umfasst die GIS-Komponente spezielle Funktionalitäten für die Abfrage und Analyse der raumzeitlichen Daten (Nachbarschaftsanalysen, zonale Statistiken der Flurabstände u.ä.). Eine weitere Komponente dient dem clientseitigen Qualitätsmanagement, die v.a. die Aufgabe hat, Plausibilitätsprüfungen durchzuführen und das Verhalten des Systems gegenüber dem Nutzer transparent zu machen (Erklärungskomponente). Kennzeichnend ist die Bereitstellung von Analysedetails, das Aufzeigen von Fehlerquellen bzw. Modellunsicherheiten, Vollständigkeitsprüfungen sowie eine regelbasierte Plausibilitätskontrolle. Die Analysedetails und Qualitätsmerkmale werden als objektbezogene Metainformationen der fachlichen Interpretation zugänglich gemacht.

5 FAZIT

Bei der Entwicklung des Prognosemodells für grundwasserbeeinflusste Sukzessionsprozesse bildete qualitatives und unscharfes Wissen die wesentliche Grundlage der Modellierung. Mit Hilfe von Methoden wissensbasierter Systeme konnte im Rahmen des F & E - Vorhabens vorhandenes Expertenwissen erfasst, formalisiert und in einem fuzzy-regelbasierten Modell nachgebildet werden. Interoperable Komponenten ermöglichten problemlos die Integration des ökologischen Modells in ein Geoinformationssystem.

Die exemplarische Anwendung auf das Gebiet der „Kirchheller Heide“ im nördlichen Ruhrgebiet und anschließende Plausibilitätsprüfung zeigte die prinzipielle Anwendbarkeit des Modells im Rahmen des Monitoring. Die modellgestützte Wirkungsprognose ist im Vergleich zur bisherigen verbal-argumentativen Vorgehensweise durch eine höhere Bearbeiterunabhängigkeit und Reproduzierbarkeit gekennzeichnet. Der Entwicklungsprozess förderte zudem die Optimierung von Planungsabläufen sowie die Kommunikation zwischen den beteiligten Experten.

Eine Validierung des Modells ist im Verlauf des Monitoring vorgesehen. Allgemein liegt die Trefferquote vergleichbarer Sukzessionsmodelle jedoch nur bei max. 40 % (Rasmus et al. 2003). Vereinfachung und Abstraktion von komplexen ökologischen Wirkungsstrukturen bedingen, dass die Modellergebnisse im Einzelfall überprüft werden müssen. Zum Aufspüren von Modell- und Datenunsicherheiten ermittelt das wissensbasierte GIS objektbezogene Qualitätsmerkmale und legt Analysedetails offen. In Zweifelsfällen kann unter Zuhilfenahme des Wildpflanzen-Informationssystems TERRA BOTANICA auf Artniveau überprüft werden, welche Pflanzenarten bei erwarteten Standortveränderungen auf der Fläche verbleiben, welche ausfallen und welche sich neu ansiedeln können. Als problematisch erwies sich generell die modellgestützte Vorhersage der Wechselwirkungen zwischen den Veränderungen der Bodenfeuchte mit den übrigen Standortfaktoren (Säure-/Basen-, Sauerstoff- und Nährstoffversorgung), so dass hier nach wie vor die verbal-argumentative Vorgehensweise zu empfehlen ist.

Die Konzepte der Fuzzy-Set-Theorie unterstützen die Integration kontinuierlicher Größen in ein diskretes kombinatorisches Regelwerk. So konnten bei der Methode zur Ermittlung der Feuchtesituation bodenkundlicher Standorte (Müller 2004) fließende Klassenübergänge bezüglich des mittleren Grundwasserflurabstandes modelliert und so Informationsverluste vermieden werden. Die Ergebnisse stellen jedoch entweder Ratiowerte oder Fuzzy-Mengen dar, die einer weiteren fachlichen Interpretation oder Klassifizierung bedürfen.

Die durch typische Pflanzenarten charakterisierten Standortbereiche der Biotoptypen gelten bisher nur für das Untersuchungsgebiet "Kirchheller Heide". In anderen Untersuchungsräumen können andere pflanzensoziologische Einheiten die Ausprägung der Biotoptypen bestimmen, so dass dort andere Pflanzenarten "typisch" sind und die Standortbereiche der Biotoptypen an die örtlichen Gegebenheiten entsprechend anzupassen sind.

Für die Repräsentation unscharfer Standortansprüche vegetationsgeprägter Biotoptypen konnte der fuzzy-regelbasierte Modellierungsansatz von Asshoff (1999) auf die Standortansprache nach Dahmen übertragen und in ein GIS implementiert werden. Fuzzy-Logic ermöglicht hier zum einen die Darstellung vagen Wissens, erhöht zum anderen aber auch die Modellkomplexität. Bestehende Prognoseunsicherheiten konnten durch Szenarien der Biotoptypenentwicklung im Sinne von unterschiedlich plausiblen alternativen Zukunftssituationen in GIS visualisiert werden.

6 LITERATUR

- AG Boden 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. - 5. verbesserte und erweiterte Auflage
- Asshoff, M. 1999: Die Erschließung und Modellierung ökologischen Wissens für das Management von Feuchtwiesenvegetation – ein Beispiel für die Aufbereitung ökologischen Wissens und den Transfer mit einem Expertensystem. EcoSys, Suppl. Bd. 27, Diss. Math.-Nat.-Fak. Universität Kiel
- Bardossy, A. & Duckstein, L. 1995: Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysikal, Biological and Engineering Systems. – CRC Press
- Beierle, Chr. & Kern-Isberner, G. 2006: Methoden wissensbasierter Systeme. Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen. Vieweg-Verlag
- Benzler, J.-H., Eckelmann, W. & Oelkers, K.-H. 1987: Ein Rahmenschema zur Kennzeichnung der bodenkundlichen Feuchtesituation. – Mitteilungen d. Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 53, 95 – 101
- Bezirksregierung Arnsberg 2002: Entwurf eines Monitoringkonzeptes zur Erfassung der bergbaulichen Einwirkungen im Bereich Kirchheller Heide/Hünxer Wald für den Zeitraum bis 2019. – Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie
- Dahmen, F. W. & Dahmen, H.-Ch. 1994: Terra Botanica – Wildpflanzen-Datenbank und Informationssystem, Blankenheim
- Dahmen, F. W., Dahmen, G. & Heiss, W. 1976: Neue Wege der graphischen und kartographischen Veranschaulichung von Vielfaktorenkomplexen. Decheniana 129, 145-178
- Dahmen, W. & Simon, I. 1997: Beschreibung pflanzenökologischer Standortpotentiale mit Hilfe der Vegetation und primärer Standortfaktoren. – In: UVP-Report, 4 + 5, 1997
- Fischer, C., Hirsemann, A., Matejka, H., Körber, C. & Zemke, C. 2004: Konzeptuelle Entwicklung und Einsatz regelbasierter Entwicklungswerkzeuge in geotechnologischen Anwendungen. In: Wittmann, J., Wieland, R. (Hrsg.): Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Shaker-Verlag, Aachen, S. 234-251
- Froelich & Sporbeck 1995: Gutachten zur Ausgleichsabgabe in Thüringen. Erstellt durch Froelich & Sporbeck in Zusammenarbeit mit Dipl. Volkswirt B. Schewpe-Kraft
- Institut für Landschaftsentwicklung und Stadtplanung (ILS) 1999: Umweltverträglichkeitsstudie zum Steinkohlenabbau-Vorhaben Kirchheller Heide / Hünxer Wald. Im Auftrag der Deutschen Steinkohle AG, Herne
- Institut für Landschaftsentwicklung und Stadtplanung (ILS) 2003: Musteranforderungsprofil Monitoring in Einwirkungsbereichen des Steinkohlenbergbaus
- Kelschbach, M. & Nesselhauf, G. 1995: Konzept zur Entwicklung von Sukzessionsprognosen. In: LÖBF-Mitteilungen, Heft 3, S. 47 – 52
- Kelschbach, M. & Nesselhauf, G. 1997: Integrative Sukzessionsprognose zu dynamischen Landschaftsveränderungen. In: UVP-Report, Heft 2, S. 108 – 112
- Kratzsch, H. 2004: Bergschadenkunde. 4. Aufl. Dt. Markscheiderverein, 2004
- Matejka, H., Busch, W., Gorczyk, J., Mauersberger, F., Nickel, S. & Vosen, P. 2005: Metadatenkonzepte zur Unterstützung der GIS-Bearbeitung im Monitoring bergbaulicher Umweltauswirkungen. - Seyfert, E. (Hrsg.): 25. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Rostock, 21. – 23. September 2005, S. 65 – 74
- Müller 2004: Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems. Technische Berichte zum NIBIS, 7. erweiterte und ergänzte Auflage, Herausgegeben vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Hannover

- Pullar, D. 1997: Rule-Based Modelling in GIS – Proceedings of GeoComputation '97 & SIRC '97: 15-23
- Rasmus, J., Herden, C. & Jensen, I. 2003: Methodische Anforderungen an Wirkungsprognosen in der Eingriffsregelung. *Angewandte Landschaftsökologie* 51, Bonn-Bad Godesberg
- Roosmann, R., Busch, W., Gorczyk, J., Mauersberger, F., Nickel, S. & Vosen, P. 2004: Einsatz von ArcGIS im Rahmen eines Monitorings bergbaulicher Umwelteinwirkungen. - In: CORP2004 & Geomultimedia 04, Wien
- Ruhrkohle Bergbau AG (RBAG) 1996: Biotoptypen – Kartierschlüssel für den Landschaftsraum und Nutzungen-/Biotoptypenschlüssel für den besiedelten Raum und dessen Randzonen für UVS der RBAG.- EDV-Konzept II - DEEP-Datenbank
- Rüber, O. 1997: Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung zur Beurteilung von bergsenkungsbedingten Veränderungen der Grundwassersituation im Bereich der Kirchheller Heide. In: Coldewey, W. G. und Löhnert, E. P. (Hrsg.): *Grundwasser im Ruhrgebiet*. Köln, S. 243 - 248
- Staeger, V. 2006: Die Rahmenbetriebspläne mit Umweltverträglichkeitsprüfung für die Gewinnung von Steinkohle im Ruhrrevier – eine Zwischenbilanz. – In: *Markscheidewesen* 113, Nr. 2
- Strietzel, R. 1996: *Fuzzy-Regelung*. – Oldenbourg-Verlag, München
- Vosen, P., Spreckels, V., Busch, W., Fischer, Chr. & Matejka, H. 2006: Einsatz von Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS im Umweltmonitoring der Deutschen Steinkohle AG. In: *Markscheidewesen* 113 (2006) Nr. 3, S. 95 - 113
- Wieland, R. 2001: *CadBERG - Eine kurze Einführung über das Verfahren zur Vorausberechnung von Gebirgs- und Bodenbewegungen*. User manual: CadBERG