

ANSÄTZE EINER MODELLGESTÜTZTEN ÖKOLOGISCHEN WIRKUNGSPROGNOSE GRUNDWASSERBEEINFLUSSTER SUKZESSIONSPROZESSE

ENTWICKLUNG EINES GIS-INTEGRIERTEN FUZZY-REGELBASIERTEN MODELLS ZUR UNTERSTÜTZUNG EINES NATURSCHUTZFACHLICHEN MONITORING IM STEINKOHLENBERGBAU

NICKEL, S.¹, KELSCHBACH, M.², BUSCH, W.¹, VOSEN, P.³

1. Einleitung

Ökologische Wirkungsprognosen und Geoinformationssysteme bilden heute einen festen Bestandteil in der Methodik der Umweltplanung. GIS-integrierte ökologische Modelle stellen jedoch insbesondere im biotischen Bereich immer noch die Ausnahme dar. Meistens werden Wirkungsprognosen auf der Grundlage von Karten und Plänen in Verbindung mit menschlichem Wirkungswissen durchgeführt. Dieses Vorgehen kann sich jedoch bei größeren Datenmengen oder periodisch wiederkehrenden Untersuchungen als sehr zeitaufwendig und kaum reproduzierbar erweisen.

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 und so naturschutzfachliche Planungsabläufe wirksam unterstützen kann. Der Ansatz beruht neben einschlägigen pflanzenökologischen Vorarbeiten (z.B. KELSCHBACH & NESSELHAUF 1995, 1997) vor allem auf der Expertensystemtechnik sowie auf Methoden der Geoinformatik.

2. Anforderungen und Zielsetzung

Der untertägige Steinkohlenabbau wird im Land Nordrhein-Westfalen 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 (STAEGE 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).

¹ Stefan Nickel, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal, Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld

² Dipl.-Biol. Michael Kelschbach, Institut für Landschaftsentwicklung und Stadtplanung, Frankenstraße 332, 45133 Essen

³ Dipl.-Ing. Peter Vosen, Deutsche Steinkohle AG, Abteilung BG G1 – Geoinformation, Shamrockring 1, 44623 Herne

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 Planung von gegensteuernden Maßnahmen.

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. Zur Verkürzung der Bearbeitungszeiten sowie zur Steigerung von Transparenz und Reproduzierbarkeit wurde für den Themenbereich „Prognose von Sukzessionsprozessen“ ein fuzzy-regelbasiertes Modell entwickelt und in eine GIS-Umgebung eingebunden. Mit Blick auf die Dynamik des Abbaugeschehens war zudem die Dimension Zeit in das GIS zu integrieren.

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 (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2006, BORSCH et al. 2007) in einem regelbasierten Modell abgebildet. Da Vorhersagen von Sukzessionsprozessen zudem hauptsächlich auf unscharfem Wissen beruhen, wurde der regelbasierte Ansatz mit Hilfe der Fuzzy-Logik (STRIEZEL 1996, KIENDL 1997, LIPPE 2006) erweitert. Die Konzepte der Fuzzy-Set-Theorie sollten, wie nachfolgend beschrieben, realitätsnähere Modelle sowie geeignete Repräsentationsformen für unscharfes Wissen liefern. Das so entstandene Modell wurde schließlich in ein raum-zeitliches GIS integriert.



Abbildung 1: Bergbaubedingter Vernässungsbereich in einem Senkungsgebiet

3. 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 Mechanismen zu weitreichenden Modifizierungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels führen kann (KRATZSCH 2004). Als planungsrelevante Wirkungen ergeben sich hieraus Veränderungen der ökologischen Standortverhältnisse sowie der land- und forstwirtschaftlichen Nutzungen (Abbildung 2). Diese Veränderungen sowie das floristische Artenpotential stellen wesentliche Einflussgrößen auf die Entwicklungsprozesse der Vegetation dar. Das Wirkungsgefüge weist sowohl deterministische als auch stochastische Elemente (v.a. Nutzungsänderung, spontane Sukzession) auf.

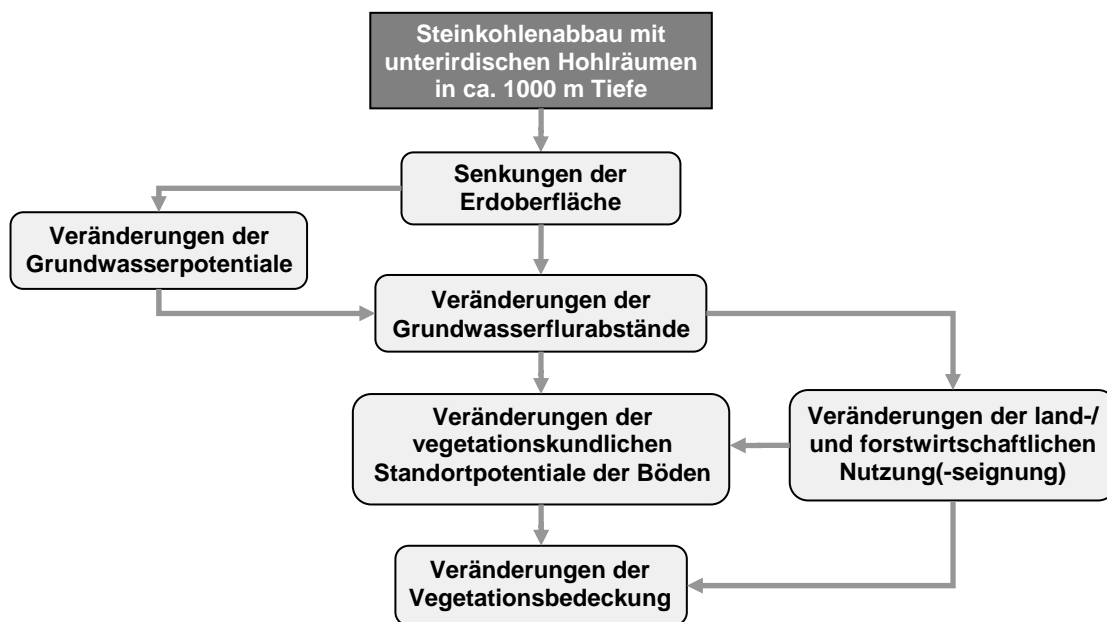


Abbildung 2: Wirkungsmodell für das Biomonitoring (vereinfacht)

Die Wirkungsprognosen im Biomonitoring orientieren sich hauptsächlich an dem Verfahren der „integrativen Sukzessionsprognose zu dynamischen Landschaftsveränderungen“ (KELSCHBACH & NESSELHAUF 1995, 1997), das als primär verbal-argumentatives Verfahren eine Vorhersage künftig möglicher Standortverhältnisse und Biotoptypen erlaubt. Anders als bei vielen anderen Methoden zur Wirkungsprognose erfolgt hier die Ermittlung und Beschreibung der Umweltauswirkungen auf der Basis von Situationsprognosen und Alternativszenarien (multiple Zukunftsbilder). Das mit Hilfe der Expertensystemtechnik und Methoden der Geoinformatik erweiterte Verfahren kann wie folgt beschrieben werden.

3.1 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 Erfassung und Beschreibung der pflanzenökologischen Standortpotentiale beruht auf der Methode der Ökoschlüssel (DAHMEN et al. 1976, DAHMEN & SIMON 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 prognostizierten Auswirkungen betroffenen Standorteinheiten repräsentiert. Die Standorteigenschaften der punkthaften Monitoringstellen werden durch Extrapolation auf die flächenhaft betroffenen Standorteinheiten übertragen.

3.2 Ermittlung und Beschreibung der Wirkfaktoren

Die Wirkfaktoren, d.h. die von einem Vorhaben ausgehenden Ursachen für Umweltveränderungen, ergeben sich aus einem komplexen Zusammenwirken von untertäglichem Abbau, Senkungen der Erdoberfläche und dadurch hervorgerufenen Grundwasserpotentialänderungen. Die Ermittlung des Wirkfaktors „Veränderungen der Grundwasserflurabstände“ beruht somit selbst bereits auf verschiedenen Prognosen. Die Vorausberechnung der künftigen Geländeoberfläche stützt sich auf photogrammetrisch erzeugte digitale Höhenmodelle und markscheiderische Berechnungen der Senkungen mit Hilfe des Systems CadBERG (WIELAND 2001), die Prognose der künftigen Grundwasserpotentiale auf eine Simulation mit einem drei-dimensionalen stationären Grundwasserströmungsmodell (RÜBER 1997).

3.3 Prognosen 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 abgeleitet. 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 (siehe Kap. 4).

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. Der Klassifikationsprozess wurde mit Hilfe eines nutzerdefinierten Klassifikationsbaumes (Entscheidungsbaum) nachgebildet 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. Die meisten Landnutzungsszenarien ließen sich aus der aktuellen Nutzung sowie den Betroffenheitsgraden als Ausdruck der Veränderung der land- und forstwirtschaftlichen Nutzungspotentiale herleiten. Da Vorhersagen über das Anpassungsverhalten der Flächennutzer an die veränderten Rahmenbedingungen jedoch kaum zweifelsfrei möglich sind, mussten zudem grundlegende Modellannahmen getroffen werden (z.B. „Bei Waldflächen und Waldlichtungsfluren, die trotz bergbaubedingter Standortveränderungen waldfähig bleiben, findet keine Umwidmung statt.“).

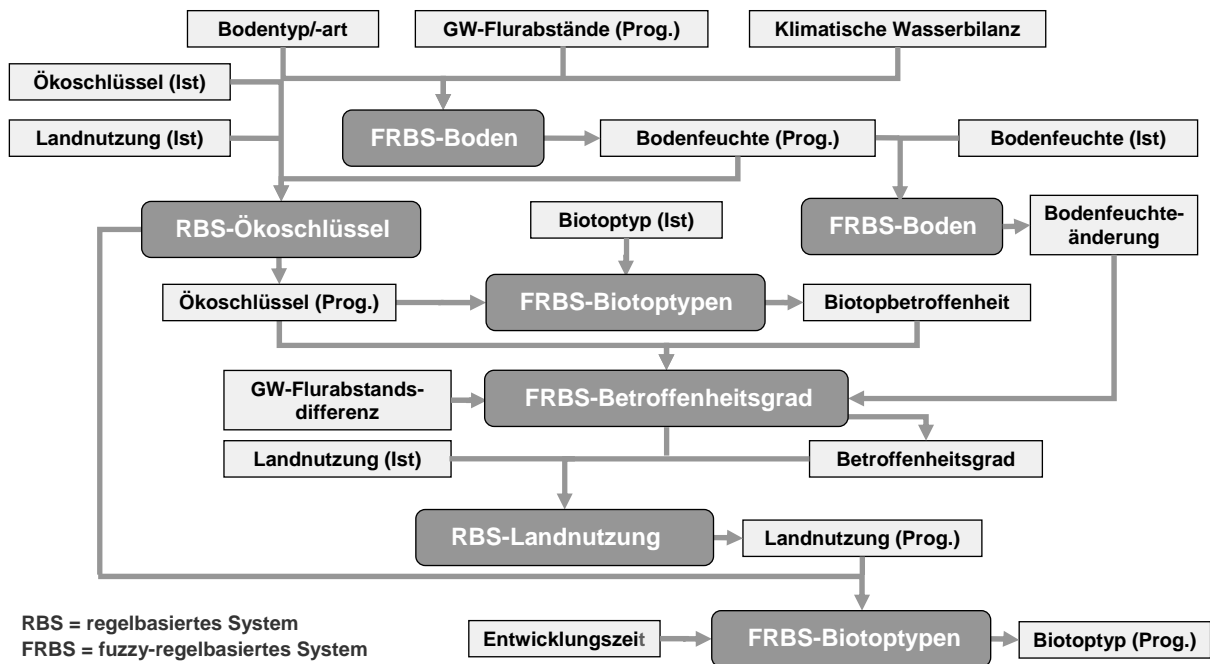


Abbildung 3: Konzeptionelles Modell (vereinfacht)

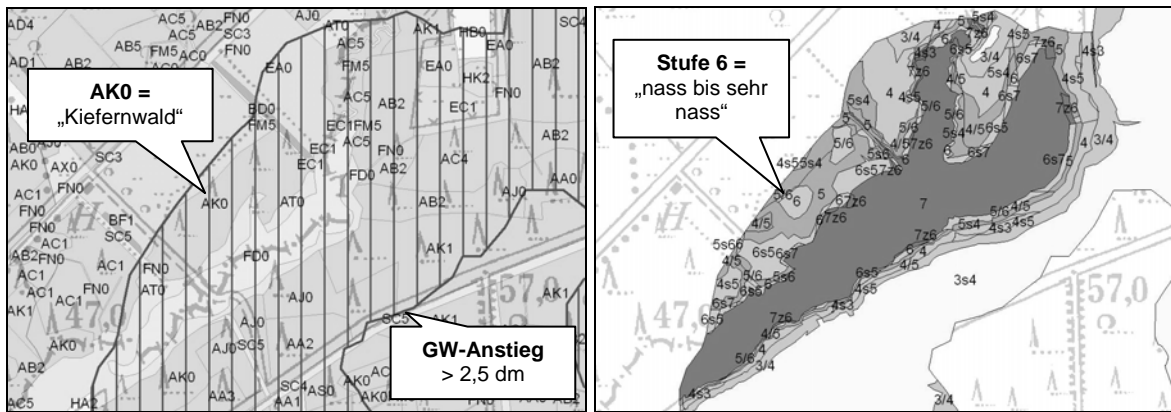
Zur Berücksichtigung der pflanzenökologischen Standorteignung bildet das Modell charakteristische Standortbereiche von Biotoptypen ab. Aufgrund unterschiedlicher Standortansprüche der für einen Biotyp charakteristischen Pflanzenarten und allgemein hoher Variabilität ökologischer Systeme sind jedoch insbesondere die Grenzen der Standortbereiche mit Unschärfen behaftet. Für die Darstellung dieser Unschärfen wurde ein fuzzy-basierter Modellierungsansatz in Anlehnung an ASSHOFF (1999) gewählt und auf die pflanzenökologische Ansprache nach Dahmen angewendet (siehe Kap. 4). Ferner wurden unscharfe zeitliche Mindestansprüche der Biotypenentwicklung 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 verdeutlicht Abbildung 3. Das Gesamtmodell wurde als integriertes System, bestehend aus mehreren (fuzzy-)regelbasierten Teilmodellen und interoperablen GIS-Komponenten, realisiert („wissenbasiertes GIS“).

Beispiel: Monitoring bergbaulicher Umwelteinwirkungen im Bereich der „Kirchheller Heide / Hünxer Wald“

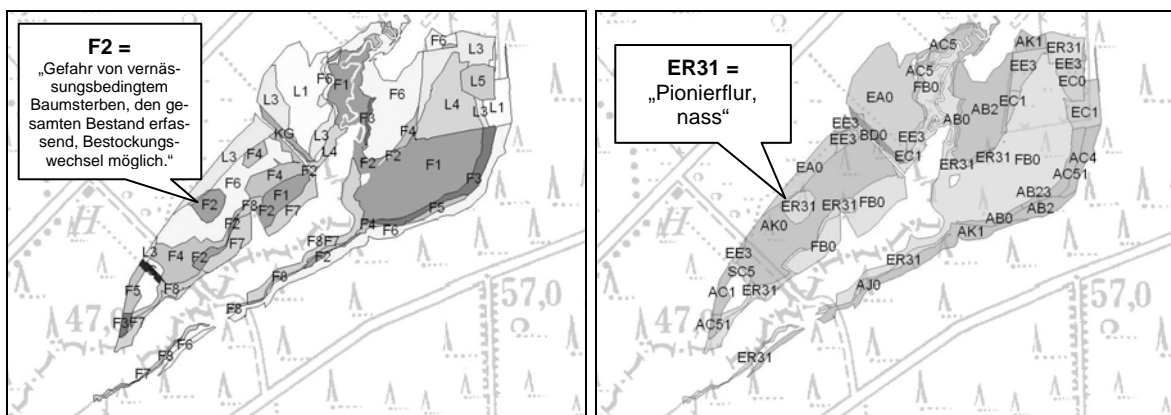
Im Rahmen des laufenden Monitoringverfahrens zur „Erfassung der bergbaulichen Einwirkungen im Bereich der Kirchheller Heide / Hünxer Wald“ (BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG 2002) wurde das GIS-integrierte Modell bereits mehrfach angewendet. Das unmittelbar an das nördliche Ruhrgebiet angrenzende, ca. 60 km² große Monitoringgebiet wird durch den untertägigen Abbau des Bergwerkes Prosper-Haniel der Deutschen Steinkohle AG beeinflusst. Es entspricht dem Untersuchungsgebiet der Umweltverträglichkeitsprüfung zum Rahmenbetriebsplan unter Ausschluss einiger Bereiche außerhalb des bergbaulichen Einwirkungsbereiches.

Die Eingabedaten des Modells bildeten eine Bestandskartierung der Biotoptypen nach dem Schlüssel der RBAG (1996), flächendeckende Informationen zu den aktuellen Standorteigenschaften nach Dahmen sowie verfügbare Bodendaten des Geologischen



A. Biotoptypenkartierung 2004 (nach RBAG 1996)

B. Bodenfeuchteprognose 2008 (n. DAHMEN et al. 1976)



C. Betroffenheitsgrade 2008 (nach ILS 1999)

D. Biotoptypenprognose 2008 (nach RBAG 1996)

Abbildung 4: Modellanwendung im Bereich der „Kirchheller Heide / Hünxer Wald“

Landesamt Nordrhein-Westfalen. Die aktuellen und künftigen Grundwasserflurabstände wurden mit Hilfe mathematisch-numerischer Simulationen der Grundwasserströmungen ermittelt und anschließend mit dem Modell verknüpft.

Die Datengrundlagen wurden über das GIS bereitgestellt und vorprozessiert: Klassifizierung der Grundwasserflurabstände, Ermittlung der Flurabstandsänderungen, Bildung annähernd homogener, ökologischer Raumeinheiten mit Merkmalen der o.g. Wirkfaktoren und Bestandsaufnahme.

Für die Prognosen der Veränderungen von Natur und Landschaft (Standortprognose und Biotoptypenprognose) wurden zwei ESRI ArcMap-Erweiterungen entwickelt (siehe Kap. 5). Die Standortprognose in Bereichen mit signifikanten Flurabstandsänderungen beruht auf der Ermittlung der mittleren Flurabstände pro Raumeinheit durch zonale Statistik (auf der Beispielfläche in Abbildung 4: „2,4 dm u. GOK“), einem fuzzy-regelbasierten Modell zur Prognose der Bodenfeuchte (hier: „Stufe 6 = nass bis sehr nass“) bzw. Bodenfeuchteveränderung (hier: „Stufe 2 = viel feuchter“) sowie einem regelbasierten Modell zur Abschätzung der Wechselwirkungen mit den übrigen Standortfaktoren Säure-/Basen-, Sauerstoff- und Nährstoffversorgung. Die Biotoptypenprognose in Bereichen mit signifikanten Bodenfeuchteveränderungen stützt sich auf eine Prognose der zu erwartenden Biotop- und Nutzungsbetroffenheiten (hier: „Betroffenheitsgrad F2“), auf eine regelbasierte Ableitung hypothetischer Landnutzungen (hier: „Waldlichtungen, Moore, Heiden, Staudenfluren“) und - im Falle eines Biotoptypenwechsels – auf eine fuzzy-regelbasierte Vorhersage eindeutiger oder multipler Zukunftsbilder der Biotoptypenentwicklung für vorgegebene Planungshorizonte (hier: „ER31 = Pionierflur, nass“).

4. Fuzzy-regelbasierte Modellierung

Die regelbasierte Modellierung nutzt fundamentale Methoden wissensbasierter Systeme und damit Konzepte der künstlichen Intelligenz (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2006, BORSCH et al. 2007). Wissensbasierte Systeme (Expertensysteme) sind Programme, die auf der Grundlage von Wissen in einer begrenzten Problem­domäne Schlussfolgerungen ziehen können und so dem Benutzer helfen, ein Problem zu lösen oder eine Entscheidung zu treffen (GÖRZ et al. 2003). Die Verknüpfung von regelbasierten Konzepten mit der Fuzzy-Logik führt zur fuzzy-regelbasierten Modellierung (BARDOSSY & DUCKSTEIN 1995, LIPPE 2006). Die Fuzzy-Set-Theorie stellt eine Verallgemeinerung der klassischen, zwei-wertigen Mengenlehre dar, bei der die Zugehörigkeiten von Elementen zu einer Menge, nicht wie bei der klassischen Mengenlehre durch eine diskrete, sondern durch eine kontinuierliche Zugehörigkeitsfunktion beschrieben werden, so dass die Zugehörigkeitsgrade auch jeweils zwischen 1 und 0 liegen können (STRIETZEL 1996, KIENDL 1997). Dies eröffnet den Zugang zur Modellierung von Phänomenen der Unschärfe (z.B. fließende Grenzen) oder Vagheit der Repräsentationssprache (z.B. linguistische Regeln).

Für die Entwicklung eines fuzzy-regelbasierten Systems spielt der Wissenserwerb, d.h. der Aufbau und die Wartung einer formalisierten Wissensbasis eine zentrale Rolle. Als Entwicklungswerkzeug für das hier beschriebene Prognosemodell wurde *fuzzyTECH 5.55d Professional* (INFORM GMBH 2001) verwendet. Der Prozess des Wissenserwerbs beruhte auf den folgenden Ansätzen der fuzzy-regelbasierten Modellierung.

Die Methode zur Ermittlung der Bodenfeuchte (MÜLLER 2004) repräsentiert als diskretes kombinatorisches Regelwerk einen relativ häufigen Typus von Auswertemethoden in der Umweltplanung. Differenzierende Kriterien sind hier v.a. der Bodentyp, die Bodenart, die klimatische Wasserbilanz des Sommerhalbjahres sowie der mittlere jährliche Grundwasserflurabstand. Bei kontinuierlichen Eingabegrößen, wie dem Flurabstand, treten vor allem an den Klassengrenzen Sprünge auf, die den kontinuierlichen Charakter physikalisch basierter Größen nicht realistisch abbilden (FISCHER et al. 2004). Fuzzy-Sets schaffen hier eine Brücke zwischen wert-diskreten und wert-kontinuierlichen Systemen und können so eine bessere Annäherung des Modells an das Realsystem bewirken.

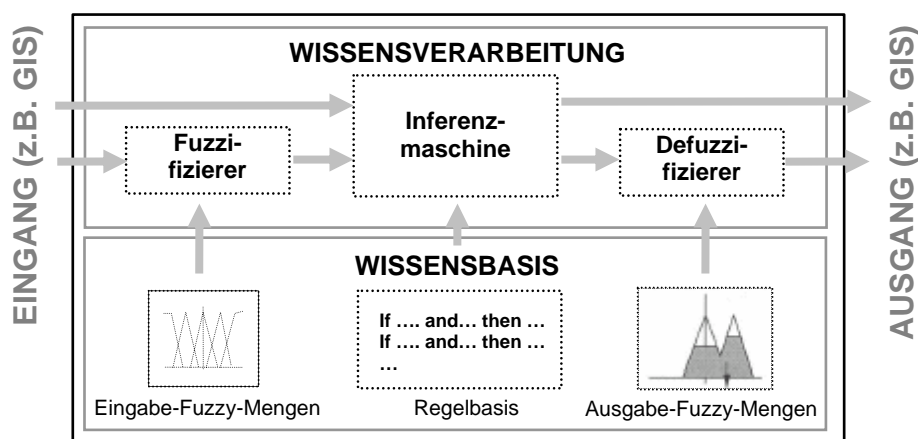


Abbildung 5: Prinzipskizze eines fuzzy-regelbasierten Systems (nach LIPPE 2006, verändert)

Ein um Fuzzy-Sets und Fuzzy-Logik erweitertes regelbasiertes System arbeitet nach den Prinzipien der Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung (Abbildung 5). Bei der Fuzzifizierung wird jedem Wert der kontinuierlichen Eingabegröße eine bestimmte Menge an unscharfen Begriffen mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen zugewiesen, so dass diese unabhängig voneinander in einem diskreten kombinatorischen Regelwerk weiterverarbeitet werden können. In unserem Fall werden zur Ableitung der Bodenfeuchte die physikalischen Eingangsvariablen Tongehalt, Schluffgehalt und Grundwasserflurabstand durch die Eingangsinterfaces fuzzifiziert. Dabei 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 werden können (Abbildung 6). Die Darstellung der Fuzzy-Mengen erfolgte mittels Dreiecksfunktionen, die so angeordnet wurden, dass die Summe der Zugehörigkeitsgrade immer jeweils 1 ergibt. Die Zugehörigkeitsfunktionen nehmen in diesem Sinne den Charakter einer stückweise 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. Die Darstellung der Fuzzy-Mengen erfolgte hier mittels Dreiecks- und Trapezfunktionen.

Im Zuge der Inferenz wird der Wahrheitsgehalt (Erfüllungsgrad) jeder Regel durch logische Verknüpfung der Zugehörigkeitsgrade der Eingabegrößen berechnet (Aggregation) und alle „feuernden“ Regeln zu einer Ausgabe-Fuzzy-Menge zusammengefasst (Komposition). Der Inferenzmechanismus greift hierzu auf die in der Wissensbasis enthaltenen Regeln zurück, die im Falle der Bodenfeuchteermittlung z.B. die Verknüpfungsregel VKR 6.4.8 (MÜLLER 2004) repräsentieren. Als Aggregationsmethode für die Bodenfeuchteermittlung wurde das algebraische Produkt gewählt, was in der Terminologie der Fuzzy-Logik einer unscharfen UND-Verknüpfung entspricht. Diese Fuzzy-Konjunktion soll in der Gewichtung jeder Regel die Zugehörigkeitsgrade aller Eingänge berücksichtigen, da auch alle Eingabegrößen entsprechend ihrer Ausprägung Einfluss auf die Bodenfeuchte haben. Als Kompositionsmethode wurde die begrenzte Summe (Bounded Sum) verwendet, wodurch die Erfülltheitsgrade aller Regeln, die Aussagen über diesen Term treffen, bis zu der oberen Grenze von 1 addiert werden und der Ausgabewert im Falle mehrerer „feuernden“ Regeln ein größeres Gewicht erhält. Auf eine benutzerdefinierte Regelgewichtung mittels eines „Degree of Support“ (DoS) wurde verzichtet, da sich im Falle der Bodenfeuchte die Gewichtung allein aus den Zugehörigkeitsgraden der Eingabewerte ergibt.

Bei der Defuzzifizierung werden die Ausgabe-Fuzzy-Mengen schließlich in einen reellen („scharfen“) Ausgabewert überführt. Hierzu bietet *fuzzyTECH* mehrere Methoden an, wobei das Mean-of-Maximum (MoM) eindeutige Feuchtestufen, das Center-of-Maximum (CoM) Zwischenstufen der Bodenfeuchte oder die Unterdrückung der Defuzzifizierung alternative Feuchtestufen (gewichtete Mehrfachantworten) liefert. Da im Rahmen des Biomonitoring insbesondere auch geringere Veränderungen der Bodenfeuchtestufe detektiert werden sollen, wurde die Center-of-Maximum-Methode gewählt. In unserem Beispiel erfolgt im Zuge der Defuzzifizierung auch der Transfer der Bodenfeuchtwerte aus der Klassifikation nach Müller in die Klassifikation nach Dahmen. An dieser Stelle ist eine Kalibrierung des Modells anhand von empirischen Daten, d.h. eine Anpassung an die spezifischen Bedingungen des Untersuchungsraumes durch Veränderung der Lage der Zugehörigkeitsfunktionen über der Bodenfeuchte nach Dahmen als Grundmenge möglich.

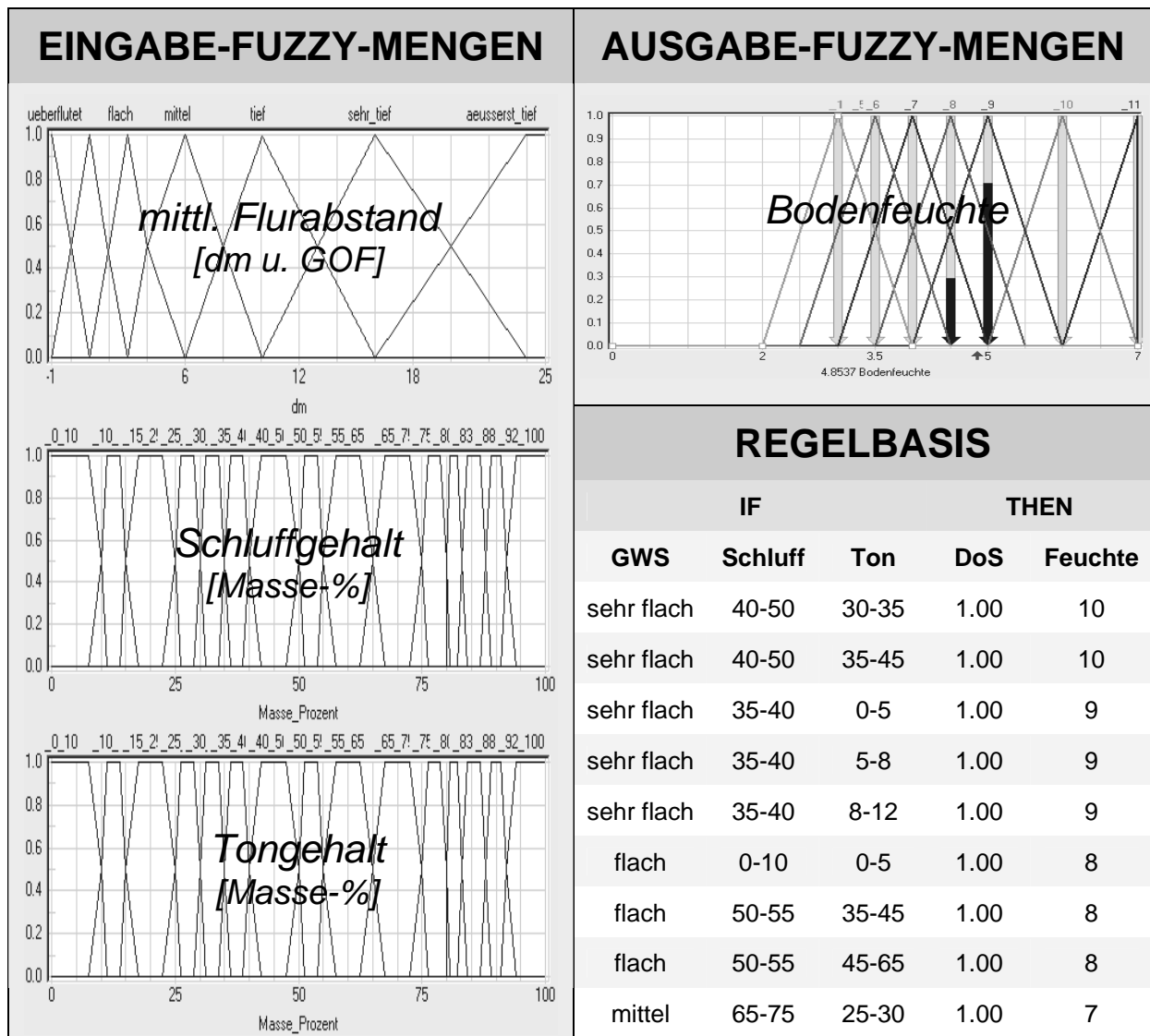


Abbildung 6: Bodenkundliche Wissensbasis für die Standortprognose (Auszug)

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

Zur Beschreibung der biotypenbezogenen 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 (Tabelle 1). Für jede Art wurden Standortbereiche hinsichtlich der 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 Toreranzspannen angegeben, die als Orientierung für die Definition der typischen Standortbereiche der Biotoptypen verwendet wurden.

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

Tabelle 1: Charakterisierung des Standortbereichs des Eichen-Buchenwaldes nach Dahmen

Mehr noch als bei den einzelnen Arten sind auf der Ebene von Biotoptypen die Grenzen der Standortbereiche als unscharf anzusehen. 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 (Abbildung 7). Die so modellierten ca. 600 biotoptypenspezifischen und ca. 150 baumartspezifischen Fuzzy-Standorttoleranzen wurden anschließend mit Hilfe empirischer Werte aus langjährigen Dauerbeobachtungen im Untersuchungsraum überprüft und an die spezifischen Bedingungen der „Kirchheller Heide“ angepasst.

Die Wissensbasis liefert so verschiedene Kennwerte für die Wissensverarbeitung bzw. fachliche Interpretation. Insbesondere können für vorgegebene Standorteigenschaften verschiedene einfaktorielle Standorteignungen in Bezug auf die vier Standortfaktoren (StEignW, StEignS, StEignO, StEignN) oder Veränderungen der einfaktoriellen Standorteignung zwischen zwei Monitoringzeitpunkten (dStEignW, dStEignS, dStEignO, dStEignN) ermittelt werden. Die unscharfe Verknüpfung der einfaktoriellen Standortbereiche in Verbindung mit dem MIN-Operator (Standortfaktoren als Minimumfaktoren für das Pflanzenwachstum) führt zur mehrfaktoriellen Standorteignung einer Fläche für einen bestimmten Biotoptyp (StEign).

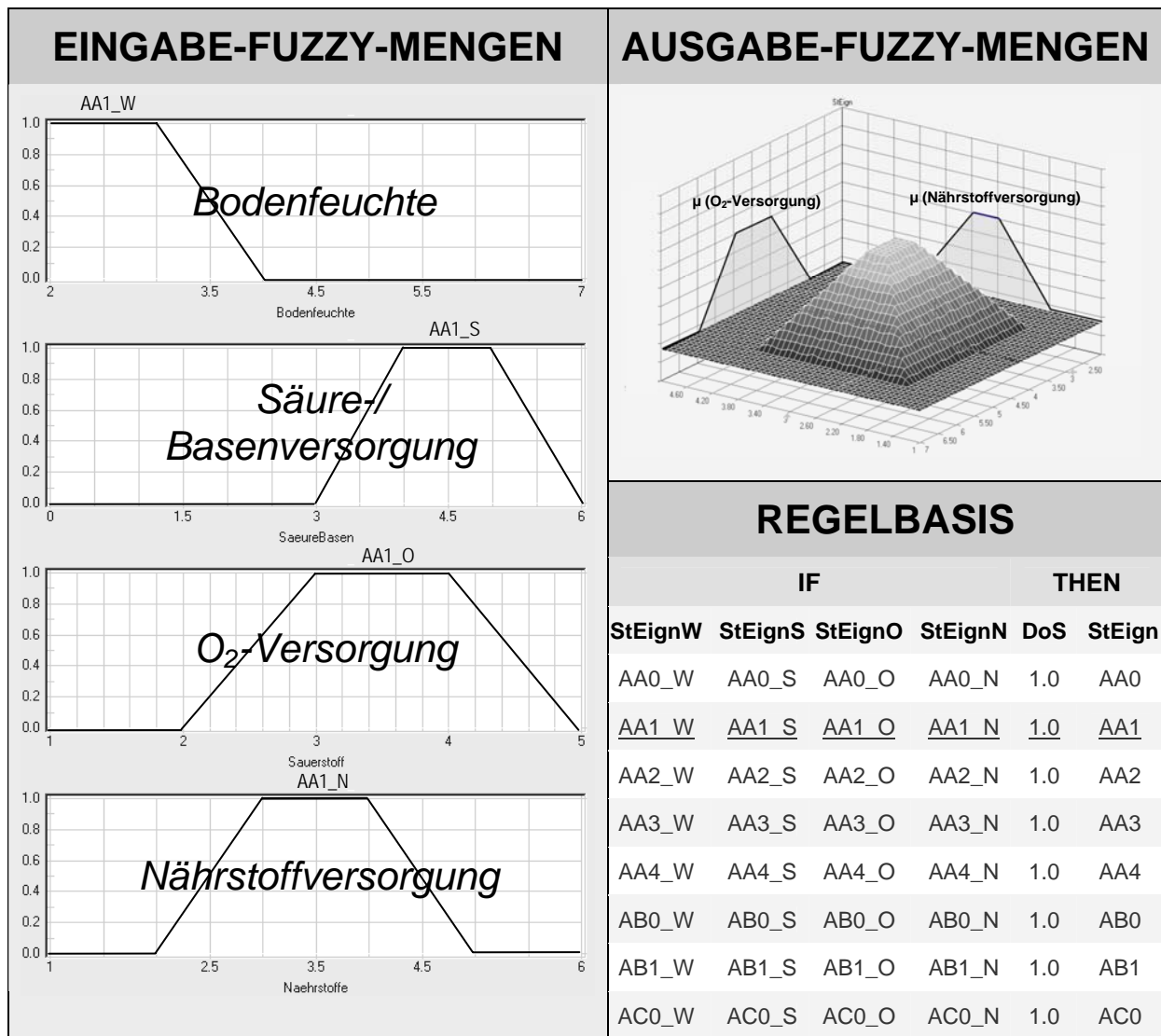


Abbildung 7: Pflanzenökologische Wissensbasis für den Eichen-Buchenwald (AA1)

Aus der Vielzahl von Fakten, Wissen über die ökologischen Wirkungszusammenhänge, Lösungsstrategien u.ä. war schließlich das implizite oder in natürlichsprachlichen Formulierungen vorliegende Wissen zu ordnen, zu strukturieren und schrittweise für eine Repräsentation im System zu formalisieren. Die wichtigsten Formalismen für prozedurales Wissen bildeten Wenn-Dann-Regeln und Klassifikationsbäume (PULLAR 1997, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2006). So ließ sich das ökologische Wissen für die „Prognose der Betroffenheitsgrade“ in einem Klassifikationsbaum nachbilden und anschließend in einen äquivalenten Satz von Regeln transformieren. Beispiel: „Betroffenheitsgrad F2 - Gefahr von vernässungsbedingtem Baumsterben, den gesamten Bestand erfassend, Bestockungswechsel möglich“:

WENN	„Grundwasseranstieg“
UND	„Fläche noch waldfähig (keine zeitweilige Überstauung)“
UND	„signifikante Verschlechterung der Standorteignung“
UND	„Waldbiotoptyp toleriert den Standort nicht mehr“
UND	„keine der Hauptbaumarten toleriert den Standort noch“
DANN	„Betroffenheitsgrad F2“

Für die Ermittlung der wesentlichen Fakten der Regelprämisse, wie die Veränderung der Standorteignung über die Zeit oder die Standorttoleranzen des Biotoptyps bzw. der charakteristischen Hauptbaumarten, bildet die ökologische Wissensbasis die entscheidende Grundlage. Zusammen mit weiteren Informationen über Art und Ausmaß der Flurabstands- bzw. Bodenfeuchteänderungen, der aktuellen Nutzung und der künftigen Nutzungsfähigkeit des Standortes u.ä. können insgesamt 22 Betroffenheitsgrade durch das Klassifikationsverfahren unterschieden werden.

Für die Biotoptypenprognose wird anhand von Annahmen über künftige Landnutzungen sowie der zeitlichen und standörtlichen Ansprüche der Biotoptypenentwicklung zunächst ein Möglichkeitsraum als Ergebnismenge aufgespannt. Dabei wird auf eine Defuzzifizierung bewusst verzichtet, d.h. alle Fuzzy-Mengen (Biotoptypen mit unterschiedlichen Possibilitätsgraden) werden an die GIS-Anwendung übergeben. Dort erfolgen die Entwicklung unterschiedlich plausibler Szenarien der Biotoptypenentwicklung, die Auswahl des Trendszenarios sowie eine Bereitstellung von Informationen für die fachliche Interpretation.

5. Aufbau des wissensbasierten Geoinformationssystems

Das wissensbasierte GIS wurde auf der Grundlage von ArcGIS der Firma ESRI in Verbindung mit einer Oracle Datenbank realisiert. Entsprechend der beiden wesentlichen Arbeitsschritte der Sukzessionsprognose (Standortverhältnisse und Biotoptypen) wurden zwei Tools als ArcMap-Erweiterung mit Hilfe des Microsoft .NET Framework und ArcObjects entwickelt.

Die Architektur des wissensbasierten Geoinformationssystems integriert typische Komponenten wissensbasierter Systeme (Wissensverarbeitungskomponente, Wissensbasis, Erklärungskomponente). Die Funktionalitäten werden über eine einheitliche Oberfläche zu Verfügung gestellt und sind vollständig in das GIS integriert (vgl. Abbildung 8):

- Die Datenhaltung arbeitet auf einem Versionskonzept zur Speicherung unterschiedlicher Zustände in nutzerdefinierten "Snapshots" auf der Basis des ESRI-proprietären Multiuser Geodatabase Object Model. Die Versionsverwaltung der Geodatabase ermöglicht in Verbindung mit temporalen Metadaten, die Dimension Zeit in die Geodatenbank zu integrieren und die Genese von Geodaten zu dokumentieren (MATEJKA et al. 2005).
- Die GIS-Komponente stellt v.a. Funktionalitäten für die Analyse und Visualisierung der Planungsgrundlagen und Prognoseergebnisse bereit (Nachbarschaftsanalysen, zonale Statistiken der Flurabstände u.ä.).
- 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.
- Durch die Wissensverarbeitungskomponente wird das gespeicherte Wissen mit geeigneten Methoden verarbeitet. Dabei werden sowohl verschiedene Fuzzy-Logic-Systeme berechnet als auch „einfache“ Regeln aus der Datenbank ausgewertet.
- Die Erklärungskomponente hat die Aufgabe, das Verhalten des Systems für den Nutzer transparent zu machen. Kennzeichnend sind die Bereitstellung von Analysedetails, das Aufzeigen von Fehlerquellen bzw. Modellunsicherheiten, Vollständigkeitsprüfungen sowie eine regelbasierte Plausibilitätskontrolle. Die Analysedetails und Qualitätsmerkmale werden objektbezogen als Metainformationen in der Datenbank abgelegt und können so der fachlichen Interpretation zugänglich gemacht werden.

Zur Entwicklung und Wartung der Fuzzy-Logik-Systeme (Wissenserwerb, Aufbau der Wissensbasen) wurde fuzzyTECH 5.55d Professional als kommerzielle Software eingesetzt.

Für die syntaktische Integration, d.h. der Entwicklung eines integrierten Systems, das die jeweiligen Vorteile von GIS und der Methoden wissensbasierter Systeme synergetisch nutzt, bietet *fuzzyTECH* unterschiedliche Implementierungsvarianten an (INFORM GMBH 2001). In einer .NET-Umgebung lässt sich die Funktionalität von ESRI ArcMap leicht durch Integration des *fuzzyTECH* Active X Control (Wissensverarbeitungskomponente) erweitern. Die Fuzzy-Systeme (Wissenbasen) werden für die Laufzeitimplementierung mit Hilfe des *fuzzyTECH* Codegenerators unabhängig von der GIS-Anwendung erzeugt und als *.FTR-Dateien abgelegt. Diese enthalten die für jedes Fuzzy-System spezifischen Informationen als binäre Daten in einem gepackten und für das *fuzzyTECH* Active X Control optimierten Format. Der in die ArcMap-Erweiterung integrierte *fuzzyTECH* Active X Server kann schließlich multiple Instanzen des gleichen Fuzzy-Systems verwenden und gleichzeitig beliebig viele verschiedene Fuzzy-Systeme laden und berechnen.

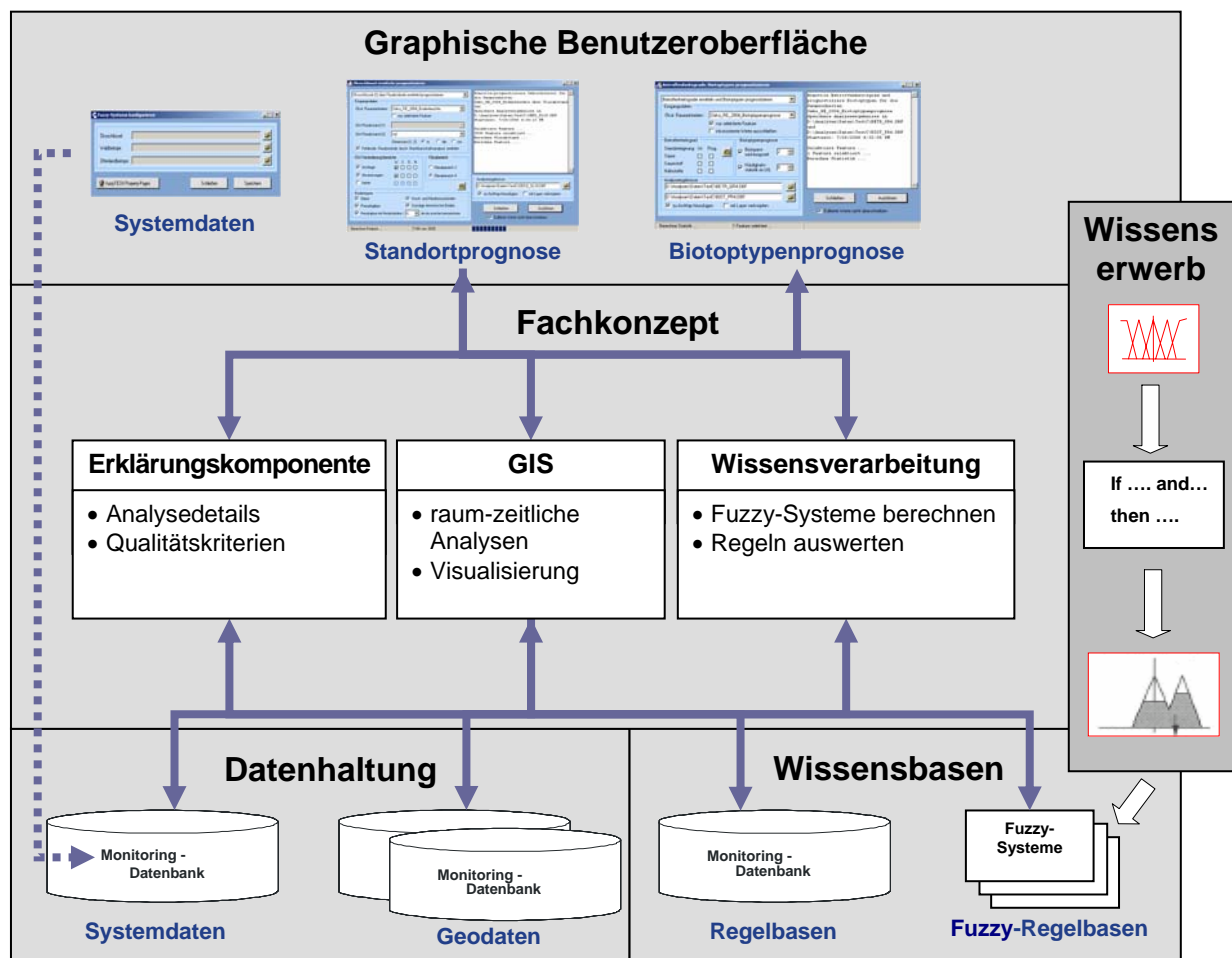


Abbildung 8: Systemarchitektur des wissensbasierten GIS

6. Fazit

Für die Entwicklung des GIS-integrierten Modells zur Prognose grundwasserbeeinflusster Sukzessionsprozesse bildete qualitatives und unscharfes Wissen die wesentliche Grundlage. Die Methoden wissensbasierter Systeme erlaubten, sehr nah an der Praxis der Umweltplanung zu modellieren, d.h. insbesondere vorliegendes ökologisches Expertenwissen zu erfassen und zu repräsentieren. Interoperable Komponenten ermöglichten die problemlose Integration der wissensbasierten Komponenten in ein Geoinformationssystem.

Die exemplarische Anwendung auf das Gebiet der „Kirchheller Heide / Hünxer Wald“ nördlich des Ruhrgebietes und anschließende Plausibilitätsprüfung (Vergleich mit den Ergebnissen des verbal-argumentativen Verfahrens) zeigte die prinzipielle Anwendbarkeit des Modells im Rahmen des Monitoring. Die modellgestützte Wirkungsprognose ist im Vergleich zur 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 bei max. 40 % (Rassmus et al. 2003). Vereinfachungen und Abstraktion im Rahmen der Modellbildung bedingen, dass die Modellergebnisse im Einzelfall überprüft werden müssen. Zum Aufspüren von Modell- und Datenunsicherheiten ermittelt das wissensbasierte GIS 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 weiterhin die verbal-argumentative Vorgehensweise zu empfehlen ist.

Die Konzepte der Fuzzy-Set-Theorie unterstützen die Integration kontinuierlicher Größen in ein diskretes kombinatorisches Regelwerk. Bei der Methode zur Ermittlung der Feuchtesituation bodenkundlicher Standorte (Müller 2004) konnten die fließenden Klassengrenzen beim Grundwasserflurabstand realitätsnäher modelliert 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 für das Untersuchungsgebiet "Kirchheller Heide / Hünxer Wald". 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-Logik ermöglicht hier zum einen die Darstellung unscharfen Wissens, erhöht zum anderen aber auch die Modellkomplexität. Bestehende Prognoseunsicherheiten konnten durch Szenarien der Biotoptypenentwicklung im Sinne unterschiedlich plausibler alternativer Zukunftssituationen in GIS visualisiert werden.

7. 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. 3. erw. Auflage, Viehweg-Verlag, Wiesbaden
- 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: Monitoringkonzept zur Erfassung der bergbaulichen Einwirkungen im Bereich Kirchheller Heide/Hünxer Wald für den Zeitraum bis 2019. – Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie (Stand: 21. Juni 2002)
- BORSCH, I., HEINSOHN, J. & SOCHER-AMBROSIUS, R. 2007: Wissensverarbeitung - Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure. 2. Aufl., Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München
- 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. Schweppe-Kraft
- GÖRZ, G., ROLLINGER, C.R. & SCHNEEBERGER, J. (HRSG) 2003: Einführung in die Künstliche Intelligenz. 4. neu bearbeitete Auflage. Oldenbourg Verlag München
- INFORM GMBH 2001: *fuzzyTECH*® 5.5 Benutzerhandbuch. <http://www.fuzzyTECH.com>
- 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. Im Auftrag der Deutschen Steinkohle AG, Herne
- KELSCHEBACH, M. & NESSELHAUF, G. 1995: Konzept zur Entwicklung von Sukzessionsprognosen. In: LÖBF-Mitteilungen, Heft 3, S. 47 – 52
- KELSCHEBACH, M. & NESSELHAUF, G. 1997: Integrative Sukzessionsprognose zu dynamischen Landschaftsveränderungen. In: UVP-Report, Heft 2, S. 108 – 112.
- KIENDL, H. 1997: Fuzzy Control methodenorientiert. Oldenbourg Verlag München

- KRATZSCH, H. 2004: Bergschadenkunde. 4. Aufl. Dt. Markscheiderverein
- LIPPE, W.-M. 2006: Soft-Computing mit Neuronalen Netzen, Fuzzy-Logic und Evolutionären Algorithmen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- 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. <http://www.geocomputation.org/1997/papers/pullar.pdf>
- RASSMUS, J., HERDEN, C., JENSEN, I., RECK, H. & SCHÖPS, K. 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 2004, veröffentlicht unter <http://www.corp.at>
- 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. & Löhnert, E. P. (Hrsg.): Grundwasser im Ruhrgebiet. Köln, S. 243 - 248.
- STAEGE, 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