

RecuSim – Ein Werkzeug zur Simulation der zeitlichen Entwicklung von Pflanzengesellschaften auf Extremstandorten

RecuSim – A Tool for the Simulation of Phytocoenosis Dynamics on Extreme Sites

C. Kunze, H. Sänger und P. Schneider

Zusammenfassung: Die Rekultivierung von Bergbaufolgelandschaften und anderen Extremstandorten erfordert zur Erlangung der erforderlichen Genehmigungen für Abschlußbetriebsplane und einzelne Sanierungsmaßnahmen oft frühzeitige Entscheidungen hinsichtlich der kurzfristigen und längerfristigen Pflege- und Nutzungsstrategie. Die sich aus verschiedenen Pflege- und Nutzungsstrategien ergebende Entwicklung der Ökosysteme besitzt Auswirkungen auf abiotische Faktoren wie z.B. den Wasserhaushalt der Altstandorte und damit auch erhebliche Bedeutung für die Planung weiterführender Sanierungsmanahmen Sanierungsmaßnahmen wie der Wasserbehandlung.

Zur Unterstützung dieser Entscheidungsprozesse und Planungen wurde ein rechnergestütztes interaktives und visuell orientiertes Simulationswerkzeug (RecuSim) entwickelt. Es bildet die komplexen Zusammenhänge zwischen Nutzungs- und Pflegeszenarien, der Entwicklung gelenkter bzw. natürlicher Sukzessionsfolgen und den sanierungsrelevanten abiotischen Prozessen ab und gestattet den Vergleich verschiedener Strategien in Form von „Planspielen“, die auch die Unsicherheiten und die stochastische Natur biotischer und abiotischer Prozesse und Parameter berücksichtigen.

Dieser Beitrag stellt neben der grundsätzlichen Herangehensweise bei der rechnergestützten Beschreibung von Sukzessionsfolgen die allgemeine Architektur des Simulationsmodells sowie die konkrete Form der Umsetzung in ein handhabbares Werkzeug für die Praxis vor. Als Beispiel wird die Einbindung wasserhaushaltlicher Berechnungen auf konzeptioneller Stufe gezeigt.

Schlüsselwörter: Rekultivierung, Nutzungs- und Pflegeszenarien, Simulation, Sukzessionsfolgen, Wasserhaushalt, Infiltrationsrate

Summary: In order to obtain a permission for recultivation/rehabilitation measures on abandoned mining sites (and other extreme landscapes) it is often required that decisions are taken at an early stage which affect the later land use and recultivation strategies.

The dynamics of the plant ecosystems resulting from distinct use and maintenance strategies will affect abiotic factors such as the infiltration rate of cover systems. This will have, in turn, knock-on effects on subsequent remediation measures such as active and/or passive treatment of seepage and ground waters.

To assist decision makers and planners, an interactive PC-based, visually orientated, rule-based simulation tool has been developed which is presented in this article. It simulates the complex interplay of land use and maintenance scenarios, natural and controlled succession, links abiotic processes to the dynamic biotic system, and allows for the comparison of various strategies in a "flight simulator". Uncertainties and the stochastic nature of biotic and abiotic processes and parameters are appropriately taken into account.

Our article presents not only the principal approach to handling and formalizing the knowledge on succession series, but also the general architecture of the simulation model and its implementation as a useful tool for the practical use. As an example, the conceptual scenario-based prognosis of hydrogeological parameters (e.g., infiltration rate) is shown.

Keywords: Recultivation, Land-use and maintenance scenarios, dynamic simulation, succession series, water balance, infiltration rate

1 Einleitung

Bei der Planung von Rekultivierungsmanahmen auf Standorten des Altbergbaus und vergleichbaren Extremstandorten stehen neben naturschutzfachlichen und ästhetisch-landschaftsgestalterischen Aspekten vor allem technische Gesichtspunkte im Vordergrund. Dazu zählen beispielsweise der Schutz vor Bodenerosion, die Minimierung der Schadstoffaustrage aus Halden und Deponien und insbesondere die Steuerung des Wasserhaushaltes wegen der an vielen Standorten gegebenen Notwendigkeit einer langfristigen Fassung und Behandlung kontaminierter Grund- und Oberflächenwässer.

Die genannte Problematik ist sowohl für Bergbau- und Sanierungsunternehmen wie auch für andere Bereiche der Rekultivierung (z.B. bei industriellen Altstandorten und einigen Steinbrüchen, Rotschlammablagerungen u.a.) relevant. Die enge Kopplung zwischen Vegetation und technischen Faktoren spielt grundsätzlich auch auf Deponien eine bedeutsame Rolle, wobei die Gestaltungsspielräume für die Rekultivierung und Nachnutzung vielfach durch entsprechende Regelungen (TASi) begrenzt sind.

Der Bewuchs und dabei vor allem seine räumliche und zeitliche Entwicklung besitzt im Gesamtsystem der zu sanierenden Objekte eine zentrale Bedeutung. Welche Phytozosen sich auf einem Standort entwickeln können, wie und in

welchen Zeiträumen sich Sukzessionsvorgänge vollziehen und wie durch Pflege- und Pflanzungsmaßnahmen sowie unterschiedliche Flächennutzungen die Sukzessionsfolgen gelenkt werden, hat einen erheblichen Einfluß auf die Erreichung der technischen Sanierungsziele und die dabei kurz- und langfristig entstehenden Kosten. Ein weiterer Aspekt bei der Planung von Rekultivierungsmaßnahmen ist die öffentliche Akzeptanz und die Divergenz zwischen sanierungstechnischen und landschaftsökologischen Anforderungen einerseits und Vorstellungen zur zukünftigen Gestaltung der Bergbau- und Industrieflächen von Bürgern, Behörden u.s.w. andererseits.

Für die konsensfähige Entscheidung ist deshalb ein Abwägungsprozess zwischen Vorstellungen, sanierungstechnischen, landschaftsökologischen und finanziellen Notwendigkeiten erforderlich. Dieser Prozess kann nur effizient und zeitsparend vorangetrieben werden, wenn allen Beteiligten die zur Beurteilung aller relevanten Aspekte notwendigen Informationen in allgemein verständlicher Form zur Verfügung stehen. Für die Bewertung von Rekultivierungsmaßnahmen sind dies vor allem Informationen hinsichtlich

- der Eignung der Standortbedingungen (Feuchte, Nährstoffe u.s.w.) für die Entwicklung der zur Diskussion stehenden Vegetationstypen,
- der mittel- und langfristigen Entwicklung des Vegetationsbildes, ausgehend von einer initialen Pflanzung/Aufforstung bzw. vom unbewachsenen Rohboden, unter verschiedenen Pflege-, Bewirtschaftungs- und Nutzungsszenarien,
- der je nach Rekultivierungsstrategie unterschiedlichen wechselseitigen Beeinflussung biotischer und abiotischer Faktoren (z.B. Wasserhaushalt) und der daraus resultierenden Folgen und Kosten.

Die Entscheidungsfindung hinsichtlich der auf einem Standort optimalen Ansaat- bzw. Pflanzungs-, Pflege- und Bewirtschaftungsstrategie wird oft durch erfahrene Ökologen begleitet. Nicht immer sind jedoch Spezialisten bei allen Terminen, Diskussionen mit Trägern öffentlicher Belange, Behörden und Bürgerinitiativen im Rahmen der Planung von Rekultivierungs- und Sanierungsmaßnahmen verfügbar.

In diesen Fällen – und zur Unterstützung der Beratungstätigkeit von Spezialisten – kann ein Werkzeug, welches die umfangreichen fachspezifischen Kenntnisse verwaltet und dem Nutzer in intuitiver, anschaulicher Form verfügbar macht, von großem Nutzen sein. Ein solches Werkzeug, sollte ebenfalls in der Lage sein, die Unsicherheiten und die stochastische Natur der Parameter und der ablaufenden Prozesse zu erfassen, um damit die raumzeitlichen Spannbreiten zukünftiger Vegetationsbilder adäquat darzustellen. Die unmittelbare Anbindung technischer und finanzieller Größen an die Vegetationsdynamik ist in diesem Zusammenhang ebenfalls von Vorteil, da diese Parameter oft entscheidungsrelevant sind.

Von einem Werkzeug, welches diese Anforderungen erfüllt, wird man in der Regel nicht die Verwaltung des gesamten dem Spezialisten verfügbaren Kenntnisstandes verlangen. Details der Planungen müssen ohnehin mit Landschaftsarchitekten und Sukzessionsbiologen abgestimmt werden. Es ist nach unseren Erfahrungen ausreichend, die wesentlichen Zusammenhänge auf konzeptioneller Stufe korrekt abzubilden, um auf dieser Basis schnell und mit ausreichender Sicherheit zu belastbaren Grundsatzentscheidungen zu gelangen.

Es ist auch nicht das Ziel eines entscheidungsunterstützenden Werkzeuges, die ablaufenden Prozesse der Sukzession in ihren Ursachen zu modellieren und auf dieser Basis zu beschreiben. Für den gestellten Anspruch ist die Verwaltung von beobachteten und formalisierten „Regeln“ (Übergänge zwischen Pflanzengesellschaften unter bestimmten Bedingungen und in bestimmten Zeiträumen) ausreichend.

Ein diesen Anforderungen genügendes Werkzeug, welches in den vergangenen Jahren durch die Autoren konzipiert und zur Praxisreife entwickelt wurde ist RecuSim.

RecuSim eröffnet den Entscheidungsträgern, welche zwar die übergreifenden Zielstellungen einer Sanierung oder Rekultivierung im Auge haben, nicht jedoch über Detailkenntnisse zur Sukzessionsbiologie, zum Wasserhaushalt auf bewachsenen Abdecksystemen oder zu den wirtschaftlichen Aspekten von Rekultivierungsmaßnahmen verfügen, die Möglichkeit eines schnellen und zuverlässigen Vergleichs verschiedener Strategien und einer risikoarmen, belastbaren Entscheidung für eine bevorzugte Vorgehensweise hinsichtlich der Begrünung von Extremstandorten.

Aus der Zusammenfassung der Tatsachen, daß

- sich die Entwicklung von pflanzlichen Ökosystemen auf Altbergbau- und Extremstandorten gut formalisieren lässt,
- das verfügbare Wissen über natürliche und gelenkte Sukzessionsfolgen auf diesen Standorten aufgrund seines Umfangs einer Systematisierung bedarf,
- zwischen biotischen und abiotischen Faktoren enge und teilweise sehr komplexe Wechselwirkungen und Rückkopplungen vorliegen,
- die Erreichung technischer Sanierungsziele stark von der Entwicklung des pflanzlichen Bewuchses auf Extremstandorten mit teilweise aufwendigen Abdeckungen abhängt,
- eine tragfähige Entscheidung über langfristig einzuschlagende Strategien eine kurzfristige Festlegung der ersten Schritte mit entsprechenden wirtschaftlichen Konsequenzen erfordert,

entstand die Zielstellung der Autoren, ein Werkzeug zu entwickeln, mit dem sich die Sukzession unter verschiedenen Strategien der gezielten Pflanzung/Ansaat, Pflegemaßnahmen und Nutzungsszenarien realitätsnah nachbilden lässt und unmittelbar mit technischen und finanziellen Größen der Sanierung wie z.B. der Infiltrationsrate durch eine Abdeckung gekoppelt ist.

Die Modellierung von Sukzessionsfolgen unter verschiedenen Nutzungs- und Pflegebedingungen ist ein Spezialfall, der in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnenden Entscheidungsunterstützung für das Ökosystem-Management.

2 Pflanzensoziologische Erkenntnisse an Altbergbau- und Extremstandorten

An Altbergbaustandorten kommt es entsprechend der gegebenen Standortbedingungen auch ohne Einfluss des Menschen mehr oder weniger schnell zu einer natürlichen Begrünung (Sukzession) von Rohböden und Decks substraten.

Der Verlauf dieses Prozesses lässt sich an den bisher untersuchten Extremstandorten als Gras-Kräuter bzw. als Gehölzfolge beschreiben. In jedem Fall ist das Klimax-Stadium der Vegetationsentwicklung eine Waldform, die entspre-

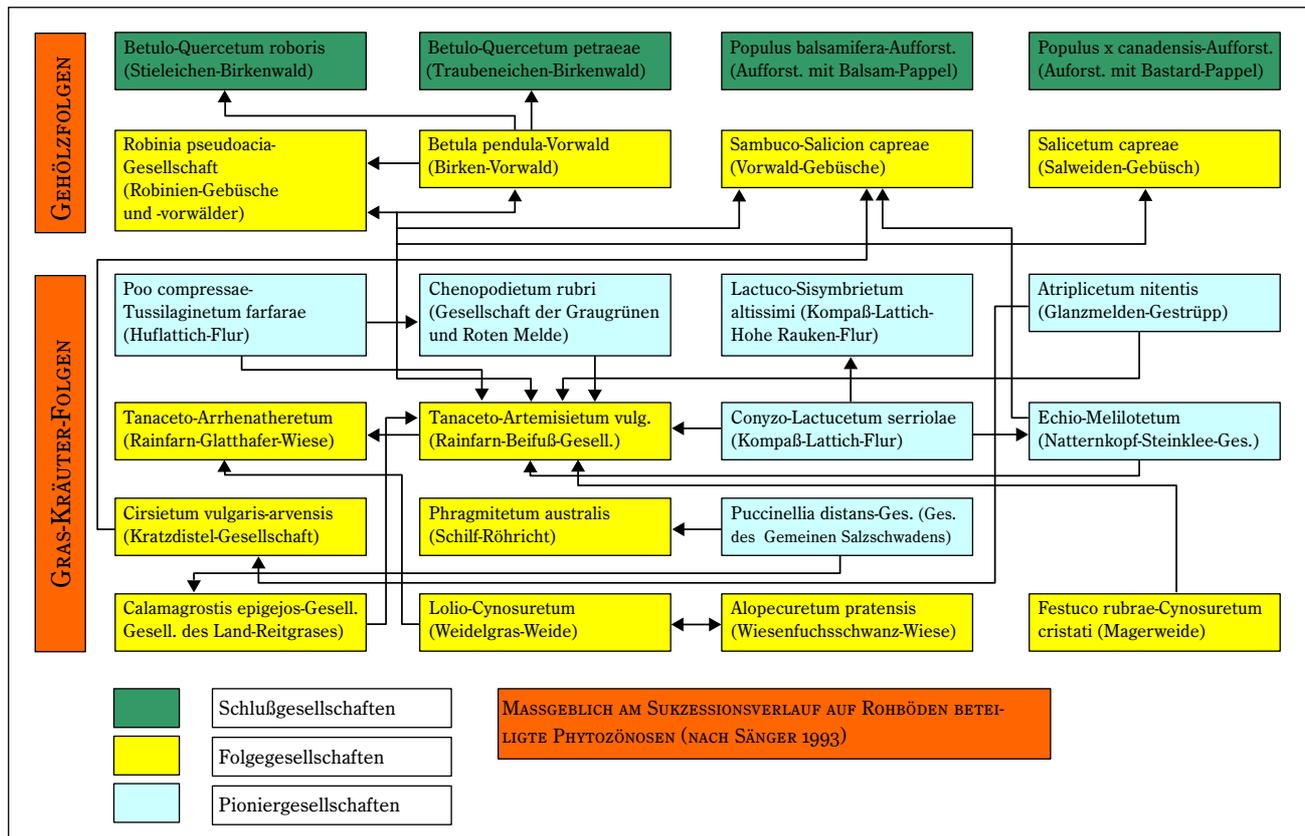


Abb.1: Maßgeblich am Sukzessionsverlauf auf Rohböden beteiligte Phytozönosen nach Säger (1993)

Fig.1: Phytocoenoses which are dominant in the succession on raw soils (after Säger 1993)

chend der gegebenen Raum-Zeit-Dynamik unterschiedlich schnell erreicht wird (Abbildung 1). Von den natürlichen Sukzessionsfolgen kann in einem sekundären Schritt auf die mögliche Entwicklung künstlich aufgebrachter Ansaaten bzw. Aufforstungen geschlossen werden.

Die Vegetation der Standorte steht in enger Wechselwirkung mit den abiotischen Standortfaktoren, speziell dem Wasserhaushalt (Speichervermögen im Wurzelraum, Evapotranspiration, Interzeption) sowie den möglichen mittelfristigen Veränderungen von Bodenstruktur und Wasserhaushalt. Durch die Anwesenheit von Phytozönosen zu einem gegebenen Zeitpunkt können sich wasserhaushaltliche und pedologische Bedingungen verändern, so dass Arten wegfallen, weitere Arten hinzukommen oder es zu einer Umbildung der einzelnen Pflanzengesellschaften kommt.

Für die Einbindung der natürlich ablaufenden Sukzessionsprozesse in das Simulationsmodell war es wichtig, die durch die einzelnen Phytozönosen angezeigten abiotischen Standortbedingungen auf der Basis der Zeigerwerte einzelner Sippen (Kennarten) Lichtzahl, Temperaturzahl, Feuchtezahl, Reaktionszahl, Nährstoffzahl nach Ellenberg (1992) einzubeziehen. Damit wird eine Möglichkeit geschaffen, den Verlauf der Sukzession insbesondere bei anthropogen veränderten abiotischen Standortfaktoren anzupassen (z.B. bei Düngung oder Bewässerung).

Die von Ellenberg (1992) publizierten Zeigerwerte der Pflanzen Mitteleuropas müssen vor ihrer Anwendung im Simulationsmodell hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf anthropogen gestörten Standorten kritisch überprüft werden. Wenn notwendig, werden einzelne Zeigerwerte entsprechend

der langjährig erhobenen floristisch-vegetationskundlichen Daten standortspezifisch korrigiert.

Um die Dynamik von Sukzessionsfolgen realitätsnah abbilden zu können, ist es weiterhin notwendig, Übergangszeiten zwischen den einzelnen Phytozönosen zu definieren (diese werden in der weiteren Formalisierung in Übergangswahrscheinlichkeiten umgewandelt, siehe folgende Abschnitte). Anhand bisher vorliegender Untersuchungsdaten u.a. Säger (1993) können beispielsweise für Altbergbaustandorte in Thüringen und Sachsen die in Tabelle 1 genannten Übergangszeiten als realistisch angenommen werden.

In welchem Maße ein Rohboden von Pflanzen besiedelt wird, hängt weiterhin vom Diasporenangebot ab. Im Simulationsmodell werden diesbezüglich die Möglichkeiten des Diasporeneintrags von außen auf die Rekultivierungsflächen ebenso betrachtet, wie die im Substrat vorhandene oder sich mehr oder weniger schnell aufbauende Diasporenbank.

Neben den Vorgängen der natürlichen Sukzession sind auf Alt- und Extremstandorten auch Bepflanzungen denkbar. Diese Szenarien reichen vom Aufbringen einer Ansaatmischung zum Erosionsschutz auf Abdecksystemen bis hin zur gezielten forstlichen Bewirtschaftung durch die Festlegung von Bestandeszieltypen. Die dadurch ausgelösten und gesteuerten Prozesse unterliegen anderen Gesetzmäßigkeiten als die natürliche Sukzession, lassen sich jedoch in ähnlicher Weise formalisieren und in ein Regelwerk übersetzen. Entsprechende Untersuchungen mit dem Ziel einer Steuerung des Wasserhaushaltes auf Abdecksystemen wurden durch die Autoren in einer Studie durchgeführt (Schneider et al. 2001).

Tab.1: Geschätzte Übergangszeiten sukzessionsbestimmender Phytozönosen**Table 1:** Estimated transition times between phytocoenoses dominating succession

Ausgangspunkt	Übergang zu....	Ursache/Bedingung	Zeitraum
Calamagrostis epigejos-Gesellschaft (Gesellschaft des Land-Reitgrases)	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	10 a
Lolio perennis-Cynosuretum cristati (Br.Bl. et de Leeuw 1936) R.Tx. 1937 (Weidelgras-Kammgrass-Weide)	Poa trivialis-Rumex obtusifolius-Gesellschaft (Gesellschaft des Stumpfbältrigen Ampfers)	Unterbeweidung	3-5 a
	Polygono arenastri-Poetalia annuae R. Tx. In Gèhu et.al. 1972 corr. (Einjährige Trittpflanzengesellschaften)	starke Betretung	3-5 a
	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Tanaceto vulgaris-Arrhenatheretum elatioris A. Fischer 1985 (Rainfarn-Glatthafer-Wiese)	unterlassene Mahd	5-10 a
	Ranunculo repentis-Alopecuretum geniculati R. Tx. 1937 (Knickfuchsschwanz-Gesellschaft)	Vernässung	5-10 a
Poa trivialis-Rumex obtusifolius-Gesellschaft (Gesellschaft des Stumpfbältrigen Ampfers)	Arctietum lappae Felf. 1942 (Kletten-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
Polygono arenastri-Poetalia annuae R. Tx. In Gèhu et.al. 1972 corr. (Einjährige Trittpflanzengesellschaften)	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
Festuco rubrae-Cynosuretum cristati R.Tx. 1940 ap. Bükler 1942 (Rotschwengel-Kammgras-Weide)	Verband Convolvulo-Agropyrion repentis Görs 1966 (Ruderales Pionier- und Halbtrockenrasen)	unterlassene Bewirtschaftung	3-5 a
Poo compressae-Tussilaginatum R.Tx. 1931 (Hufflattich-Flur)	Ordnung Onopordetalia acanthii Br.Bl. et R.Tx. ex Klika et Hadac 1944 (Eurosibirische ruderales Beifuß- und Distelgesellschaften)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Verband Convolvulo-Agropyrion repentis Görs 1966 (Ruderales Pionier- und Halbtrockenrasen)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Ordnung Epilobietalia angustifolii (Vlieg. 1937) R.Tx. 1950 emend. Pass. 1956 (Schlagfluren)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Ordnung Potentillo-Polygonetalia R.Tx. 1947 (Flutrasen)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Klasse Agrostietea stoloniferae Oberd. in Oberd. et.al. 1967 emend. Klotz (Flutrasen und feuchte bis nasse, ausdauernde Trittrasen)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Salicetum capreae Schreier 1955 (Salweiden-Gebüsch)	natürliche Sukzession	5-10 a
Lactuco-Sisymbrietum altissimi Lohm. ap. Tx. 1955 (Kompaß-Lattich-Hohe Rauken-Flur)	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
Erigeronto-Lactucetum serriolae Lohm. In Oberd. 1957 (Kompaß-Lattich-Flur)	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	2-3 a
	Echio-Melilotetum R. Tx. 1947 (Natterkopf-Steinklee-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	2-3 a
	Salicetum capreae Schreier 1955 (Salweiden-Gebüsch)	natürliche Sukzession	5-10 a
Echio-Melilotetum R. Tx. 1947 (Natterkopf-Steinklee-Gesellschaft)	Verband Convolvulo-Agropyrion repentis Görs 1966 (Ruderales Pionier- und Halbtrockenrasen)	natürliche Sukzession	5-10 a
	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
Verband Convolvulo-Agropyrion repentis Görs 1966 (Ruderales Pionier- und Halbtrockenrasen)	Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
Tanaceto-Artemisietum vulgaris Siss. 1950 (Rainfarn-Beifuß-Gesellschaft)	Verband Convolvulo-Agropyrion repentis Görs 1966 (Ruderales Pionier- und Halbtrockenrasen)	fortgesetzte Mahd oder Brand	2-3 a
	Tanaceto vulgaris-Arrhenatheretum elatioris A. Fischer 1985 (Rainfarn-Glatthafer-Wiese)	Mahd, Mulchen	2-3 a
	Arctietum lappae Felf. 1942 (Kletten-Gesellschaft)	Eutrophierung	5-10 a
	Atriplicetum nitentis R. Knapp 1945 (Glanzmelden-Gestrüpp)	Eutrophierung	5-10 a
	Salicetum capreae Schreier 1955 (Salweiden-Gebüsch)	natürliche Sukzession	5-10 a
	Robinia pseudoacacia-Gesellschaft (Robinien-Gebüsche und Robinien-Vorwälder)	natürliche Sukzession	10-15 a
	Birken-Vorwald	natürliche Sukzession	5-10 a

Tab.1: Fortsetzung**Table 1:** Continuation

Ausgangspunkt	Übergang zu ...	Ursache/Bedingung	Zeitraum
Atriplicetum nitentis R. Knapp 1945 (Glanzmelden-Gestrüpp)	Arctietum lappae Felf. 1942 (Kletten-Gesellschaft)	natürliche Sukzession	3-5 a
	Ordnung Onopordetalia acanthii Br.Bl. et R.Tx. ex Klika et Hadac 1944 (Eurosibirische ruderaler Beifuß- und Distelgesellschaften)	natürliche Sukzession	3-5 a
Ordnung Onopordetalia acanthii Br.Bl. et R.Tx. ex Klika et Hadac 1944 (Eurosibirische ruderaler Beifuß- und Distelgesellschaften)	Verband Convolvulo-Agropyrion repentis Görs 1966 (Ruderaler Pionier- und Halbtrockenrasen)	natürliche Sukzession	3-5 a
Cirsietum vulgaris-arvensis Morariu 1972 (Kratzdistel-Gesellschaft)	Sambuco-Salicion capreae R.Tx. et Neum. in R.Tx. 1950 (Vorwald-Gebüsche)	natürliche Sukzession	5-10 a
	Verband Convolvulo-Agropyrion repentis Görs 1966 (Ruderaler Pionier- und Halbtrockenrasen)	Brand, Mahd	1-3 a
Sambuco-Salicion capreae R.Tx. et Neum. in R.Tx. 1950 (Vorwald-Gebüsche)	Birken-Vorwald	natürliche Sukzession	5-(10)-15 a
Salicetum capreae Schreier 1955 (Salweiden-Gebüsch)	Birken-Vorwald	natürliche Sukzession	5-(10)-15 a
Birken-Vorwald	Quercion robori-petraeae Br.Bl. 1932 (West- und mitteleuropäische Birken-Eichenwälder)	natürliche Sukzession	10-20 a

3 Struktur und Umsetzung des Simulationswerkzeuges für Sukzessionsfolgen

Zur Beschreibung von Sukzessionsfolgen und ihres Zusammenhangs mit abiotischen Standortfaktoren bestehen mehrere Möglichkeiten. Einerseits wird mit zunehmend komplexen Ökosystemmodellen versucht, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Komponenten eines Ökosystems unter Zuhilfenahme einer großen Anzahl von Zustandsgrößen zu beschreiben, auf dieser Basis ein besseres Verständnis von Teilprozessen und neue Erkenntnisse zu erlangen und Prognosen des Systemverhaltens zu ermöglichen (Recknagel, 1989). Die erste und vielleicht einfachste Form dieser Art sind Räuber-Beute- und Konkurrenzmodelle (Bossel, 1992). Bis heute hat sich eine unübersehbare Zahl von Modellansätzen zur Beschreibung von Prozessen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen entwickelt, die teilweise einzelne Teilprozesse herausgreifen oder aber den Versuch eines möglichst viele Teilprozesse integrierenden Ansatzes unternehmen (siehe z.B. Knox et al., 1996).

Dieser Herangehensweise stehen die regelbasierten Modelle gegenüber. Mit ihnen wird lediglich das bekannte, phänomenologisch orientierte Wissen zusammengefasst und in Form eines „Expertensystems“ Nutzern des Modells zugänglich gemacht. An die Stelle einer Analyse und Nachbildung elementarer Prozesse tritt die Formalisierung des Wissens und die Ableitung von Regelwerken. Diese Art von Modellen hat nicht die Erzeugung neuer Erkenntnisse, sondern die schnelle und sichere Verfügbarkeit des bereits Bekannten zum Ziel. Der Nutzen regelbasierter Modelle ist umso größer, je umfangreicher und komplexer das vorliegende Wissen ist.

Der oben formulierten Zielstellung, Entscheidungsträgern ein rechnergestütztes System an die Hand zu geben, mit dem sie das verfügbare Wissen, meist gekoppelt mit Erkenntnissen aus anderen Fachdisziplinen wie z.B. der Hydrogeologie, für den Vergleich verschiedener Bewuchsstrategien nutzen können, wird mit regelbasierten Modellen und Simulationswerkzeugen am besten umgesetzt.

Die Formalisierung der sukzessionsbiologischen Kenntnisse in regelbasierten Systemen lässt sich einerseits durch

Markovsche Ketten realisieren (Horn, 1975; Usher, 1979, 1981), in denen die Übergangswahrscheinlichkeiten bzw. die daraus ableitbaren charakteristischen Zeiträume für den Übergang von einer Gesellschaft zu einer anderen in sogenannten Übergangsmatrizen zusammengefasst sind. Die Übergangsmatrizen können zeitlich veränderlich sein, um auf veränderte Standortbedingungen, Nutzungs- oder Pflegeszenarien zu reagieren. Markov-Ketten mit zeitlich veränderlichen Übergangsmatrizen haben sich in den vergangenen Jahren zu einer Standardmethode der Beschreibung von Ökosystemen entwickelt (Logofet und Lesnaya, 2000).

Alternativ hierzu wurde mit der PC-Software RecuSim durch die Autoren des vorliegenden Beitrages ein weniger formaler und mehr graphisch-objektorientierter, inhaltlich jedoch äquivalenter Weg beschritten. Die Umsetzung des regelbasierten Simulationsmodells erfolgt bei RecuSim in der graphischen, objektorientierten Umgebung ithink® (Hannon und Ruth, 1996, Hermann et al. 2001), weitgehend der bekannteren Simulationsumgebung Stella® vergleichbar.

Ein für die Zwecke der Darstellung stark vereinfachtes Beispiel ist in Abbildung 2 gezeigt. Dabei wird gezielt von der Stock-Flow- (Speicher-Strom-) Architektur von Stella/ithink Gebrauch gemacht:

- Jeder Gesellschaft wird ein Speicher/Stock zugeordnet.
- Die Verbindungen der Stocks untereinander (die Übergänge zwischen den Gesellschaften) werden durch Ströme (Flows) gebildet.
- Von einer Gesellschaft kann ein Übergang zu einer anderen Gesellschaft, mehrere Übergangsmöglichkeiten zu anderen Gesellschaften, aber auch kein Übergang realisiert werden. Im letzteren Fall bildet die Gesellschaft einen stabilen Endpunkt einer Sukzessionsfolge.
- Ist ein Stock voll gefüllt, so ist der Standort ausschließlich mit der zugehörigen Gesellschaft bewachsen. Sind zu einem Zeitpunkt mehrere Gesellschaften mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten zu erwarten, so sind die zugehörigen Stocks jeweils anteilig gefüllt.

Die im Rahmen langjähriger Untersuchungen beobachteten und in der umfangreichen Literatur dokumentierten Übergänge zwischen den einzelnen Gesellschaften werden in Form von „Regelwerken“ zusammengefasst und bilden

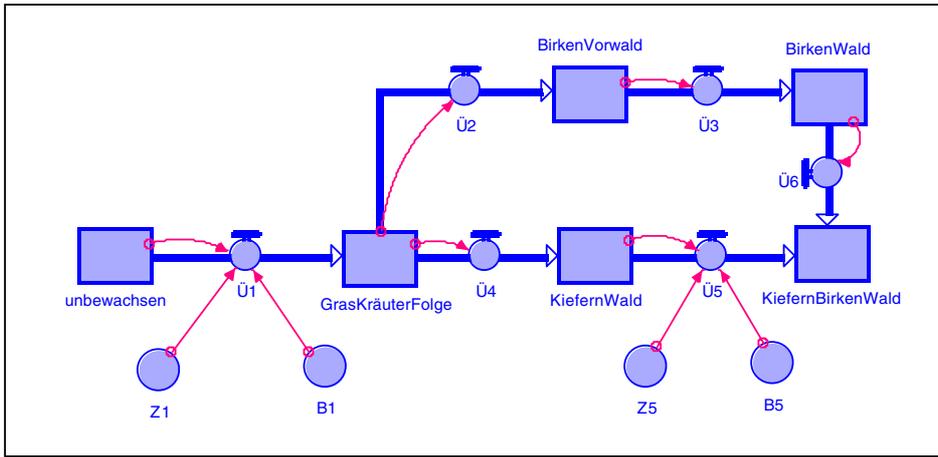


Abb. 2: Flußdiagramm eines sehr stark vereinfachten Sukzessionsschemas, objektorientiert realisiert unter *ithink®/Stella®*. Die Übergänge (Ü1 bis Ü6) werden bei vorgegebenem Alter der Gesellschaften (Z1 und Z5 sind beispielhaft dargestellt) und unter Vorliegen bestimmter Bedingungen (z.B. B1, B5) freigegeben. Verzweigungen sind möglich, z.B. von Gras-Kräuter-Folge in Birkenvorwälder oder Kiefernwald

Fig. 2: Flow diagram of a very simplified succession scheme which has been implemented in an object-oriented environment under *ithink®/Stella®*. Transitions (Ü1 through Ü6) are activated at given age (Z1 and Z5 are represented as an example) and under given conditions (e.g., B1, B5). Bifurcations of succession series are possible, such as from Grassland alternatively into Birch-Preforest or Pine Forest

die Grundlage für die Aktivierung der Übergänge (Flows) zwischen den Gesellschaften. Regeln lassen sich allgemein darstellen aus

- dem Alter einer Gesellschaft (bzw. die Spannbreite des Alters), bei dem der Übergang in eine andere Gesellschaft erfolgt,
- den Bedingungen für den jeweiligen Übergang (Nutzungsszenarien, Standortbedingungen, Diasporeangebot der Zielgesellschaft).

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die Übergänge zwischen den Phytozönosen an Bedingungen gekoppelt sind. Für das Gesamtsystem steht somit eine Vielzahl von Regeln (Übergangszeiten, Bedingungen, Verzweigungen) zur Verfügung, welche in Abhängigkeit vom jeweiligen Nutzungsszenario aktiviert werden müssen.

In der bis zum Zeitpunkt der Manuskripterstellung realisierten Version von *RecuSim* werden dem Nutzer für die einzelnen Parameter und Szenarien die folgenden Auswahlmöglichkeiten angeboten:

Standortbedingungen

- Feuchtezahl nach Ellenberg
- Nährstoffzahl nach Ellenberg
- Morphologie (planierte/ebene vs. stark/kleinräumig strukturierte Fläche)

Nutzungs- und Pflegeszenarien

- Betritt
- Beweidung
- Auslichtung
- Mahd
- Düngung

Konkurrenz, Einwanderung, Fauna

- Präsenz von Bedrängern (Konkurrenten)
- Entfernung zu benachbarten Wald- und

Gras-Kräuter-Gesellschaften
Alter bzw. Samenreife der benachbarten Pflanzengesellschaften

Präsenz von Eichelhähern (Häheransaat von Eichen)

Präsenz von Wildschweinen (z.B. Aufbrechen geschlossener Calamagrostis-Decken, Verzögerung der Eichenkeimung, da Wildschweine Eicheln fressen)

Nachdem der Nutzer die Szenarien und Standortbedingungen interaktiv festgelegt hat, wird eine große Anzahl (mindestens 50) von Simulationsläufen gestartet. In jedem Simulationslauf nehmen unsichere Größen einen spezifischen Wert an, der ihnen entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung zugewiesen wird (Monte-Carlo-Verfahren, siehe *Niederreiter und Spanier, 1998*).

Im Ergebnis aller Simulationsläufe kann eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Gesellschaft zu einem gegebenen Zeitpunkt in der Zukunft ermittelt werden. Die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens aller Gesellschaften (einschließlich des unbewachsenen Substrates) zu einem Zeitpunkt summieren sich selbstverständlich zu eins.

Über die Funktion eines Instrumentes der Verwaltung und Verarbeitung des verfügbaren Wissens zur Sukzession und die Abbildung stochastischer Prozesse hinaus eignet sich ein Werkzeug wie *RecuSim* auch zur Einbindung von realitätsnah visualisierten Darstellungen einzelner typischer und in den Simulationen häufig vorkommender Vegetationsformen, beispielsweise für Zwecke der Öffentlichkeitsarbeit. Die Visualisierung von Waldgesellschaften in ihrem topographischen Umfeld einschließlich einer Auswahl von „Stammdaten“ wie mittlerer Ertrag unter Standortbedingungen, alterabhängige Wuchshöhe und Stammdurchmesser sowie ggf. weitere Informationen können effektiv zur Unterstützung von komplexen Entscheidungsprozessen in interdisziplinären Arbeitsgruppen beitragen.

4 Anwendungsbeispiel - Zeitliche Entwicklung des Bewuchses und des Wasserhaushaltes an Bergbaustandorten

Die Abbildung der Entwicklung eines pflanzlichen Ökosystems auf Bergbau- und Altstandorten geschieht, wie bereits in der Einleitung umrissen, meist mit dem Ziel, verschiedene Rekultivierungsstrategien miteinander zu vergleichen und dabei technische Zielstellungen einzubeziehen. Dies ist beispielsweise für die gemeinsame Optimierung der Gestaltung von Abdecksystemen/des Bewuchses und einer erforderlichen Fassung und Behandlung kontaminierter Sickerwässer von Bedeutung, bei der die Invest- und Langzeitkosten jeder dieser Systemkomponenten gegeneinander abgewogen

werden. In vielen Fällen werden in die Optimierungsbetrachtungen mit geeigneten Methoden noch eine Vielzahl anderer Faktoren wie die Kontamination natürlicher Schutzgüter, Gesundheitsrisiken etc. einbezogen (Pelz et al. 1996).

Aus wasserhaushaltlicher Sicht besteht das Ziel an Bergbaustandorten in der Regel in der Minimierung der Versickerung in die unterlagernden Schichten. Das bedeutet, dass die Verdunstung durch die Vegetation möglichst hoch sein soll. Über die Auswahl und Steuerung der Vegetation ist demzufolge eine gezielte Beeinflussung der Infiltrationsrate in den Untergrund möglich.

Bei der Prognose der natürlichen Sukzession lassen sich im Rahmen der ökosystemaren Vorhersage standortspezifisch angepasste Wasserhaushaltsmodelle einbinden, die die Randbedingungen der gewählten Vegetation entsprechend wiedergeben können. Als Eingangsdaten werden je nach Wasserhaushaltsmodell die in Tabelle 2 zusammengestellten Kennwerte sowie das Lokalklima benötigt.

Tabelle 2: Eingangsdaten und Ergebnisse für die Wasserhaushaltsberechnung von Altbergbaustandorten

Table 2: Input data and results of the hydrogeological calculations at mining sites

Input-Parameter			
Klima	Boden	Vegetationskennwerte	Oberflächenkennwerte
Niederschlag Temperatur Globalstrahlung Luftfeuchtigkeit Windgeschwindigkeit	Bodenkennwerte Abfolge der Schichten eines Abdecksystems Schichtmächtigkeiten	Transpiration Blattflächen Wurzeltiefen Alter Deckungsgrad	Rauhigkeit Bearbeitungstechniken Neigung
Output-Parameter			
Grundwasserneubildung	aktuelle Verdunstung	hypodermischer Abfluss	Oberflächenabfluss

Die Eingangskennwerte müssen im Rahmen der Modellrechnungen über die möglichen sich in der Natur einstellenden Spannbreiten variiert werden, um eine sinnvolle Streubreite mit entsprechender Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Berechnungsergebnisse zu erhalten.

Für die verschiedenen Nutzungsszenarien, Bewuchstypen und zeitlichen Veränderungen des Bewuchses und des Bodens/Abdecksystems ist eine große Anzahl von Daten (jeweils mit ihren Spannbreiten) bereitzustellen, welche

dann entsprechend dem aktuellen Zustand des Substrates und Ökosystems ausgewählt und ausgegeben bzw. angezeigt werden. Das Simulationssystem RecuSim übernimmt damit die Funktion einer Verwaltung der wasserhaushaltlichen Daten und ihrer Visualisierung entsprechend den vom Nutzer vorgegebenen Szenarios.

Die Infiltrationsrate zum Zeitpunkt t wird gebildet aus den Infiltrationsraten der einzelnen Gesellschaften, die mit ihrer jeweiligen Auftretenswahrscheinlichkeit gewichtet werden. Ein typisches Ergebnis zeigt Abbildung 3. Daran kann sich eine statistische Auswertung anschließen, welche Mittelwert, Perzentile und ähnliche statistische Parameter im Zeitverlauf liefert.

Es ist plausibel, dass ähnlich wie die Einbindung wasserhaushaltlicher Erkenntnisse auch andere Datenstrukturen und Teilmodelle eingebunden werden können, beispielsweise Ertragsmodelle, Kostenmodelle für die Einrichtung und Pflege von Beständen oder Prozess- und Kostenmodelle für eine Wasserfassung und -behandlung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das regelbasierte Simulationswerkzeug RecuSim ermöglicht die Verwaltung umfangreichen und komplexen Wissens zur Sukzessionsdynamik auf Extrem- und Bergbaustandorten. Es bietet dadurch eine Entscheidungsunterstützung in der Phase der konzeptionellen Planung von Rekultivierungs- und Sanierungsvorhaben in Bergbaufolgelandschaften und an Sonderstandorten, wie z.B. Deponien, aber auch für die Durchführung von Begrünungsarbeiten beispielsweise an Trassen und Verkehrswegen. RecuSim wurde für Nutzer entwickelt, die nicht in jedem Fall die Zeit finden, sich in komplexe ökosystemare Zusammenhänge, wie sie bei der Begrünung von Extremstandorten auftreten einzuarbeiten, aber trotzdem kurzfristige und belastbare Entscheidungen zur grundsätzlichen Rekultivierungsstrategie sowie Pflege- und Nutzungsvarianten treffen müssen.

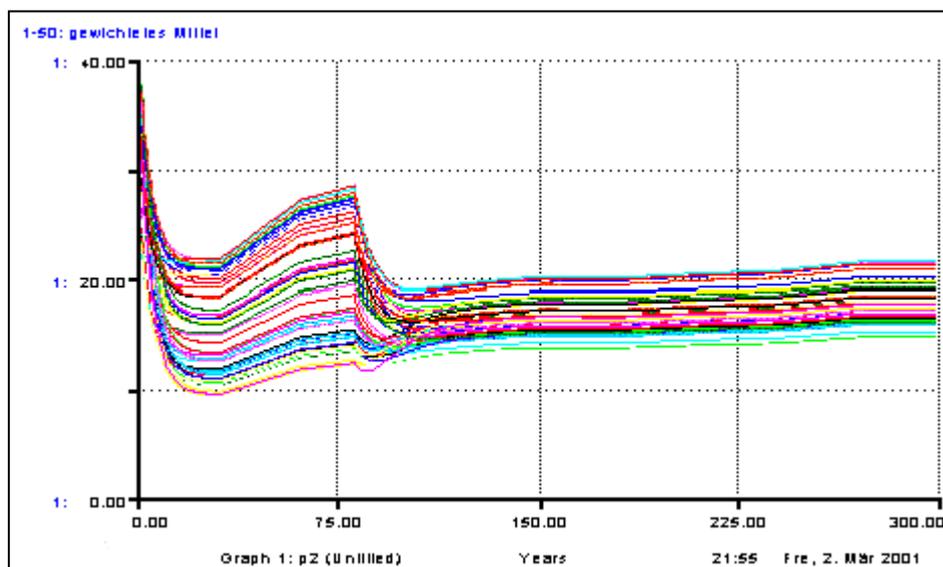


Abb. 3: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Infiltrationsrate von 50 Läufen einer probabilistischen Simulation
Fig. 3: Dynamics of the infiltration rate over 50 probabilistic simulation runs

In der gegenwärtigen Entwicklungsstufe werden jeweils Einzelstandorte mit homogenen Bedingungen betrachtet. In einer nächsten Ausbaustufe ist geplant,

- die Einbeziehung mehrere Horizonte in Waldgesellschaften
- die Kopplung mehrerer Teilstandorte

zu ermöglichen. In einem weiteren Schritt kann auch eine Integration des Simulationssystems in ein Geographisches Informationssystem (GIS) erfolgen. Das Interesse an einer solchen Kopplung ist vor dem Hintergrund einer integrierten Landschafts- und Raumplanung außerordentlich groß, wie der Erfolg ähnlicher Schritte in dieser Richtung zeigt (*van Horssen*, 1996).

Hinweis: RecuSim® ist ein eingetragenes Warenzeichen von B.P.S. Engineering GmbH und BIOS Büro für Umweltgutachten Dr. Sänger.

Danksagung

Die Autoren danken den anonymen Gutachtern, die durch wertvolle Hinweise wesentlich zur Verbesserung des Artikels, insbesondere in seiner ersten Fassung, beigetragen haben.

Teile diese Arbeit entstanden im Rahmen des Exploratory Award (1235-BIOSIM) im 5. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission.

Literatur

- Bossel, H., 1992: Modellbildung und Simulation. Vieweg Verlag Braunschweig, Wiesbaden.
- Ellenberg, H., 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* **18**, 1-258.
- Hannon, B. and M. Ruth, 1996: *Dynamic Modelling*. Springer New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo.
- Horn, H.S., 1975. Markovian properties of forest successions. In: M.L. Cody and J.M. Diamond (Eds.) *Ecology and Evolution of Communities*. Belknap Press, Cambridge, Mass., pp. 196-211.
- Hermann, E., Kunze, C., Sänger, H. u. W. Thoß, 2001: Problemorientierte Auswertung biologischer Daten mit den Computerprogrammen BioKart, BioDat und RecuSim. Im Druck, Artenschutzreport, Jena.
- Knox, R.G., Kalb, V., Levine, E.R. and U. Bindingnavle, 1996: A Framework for Integrating Environmental Models to Simulate Forest Ecosystem Dynamics. *Proc. 3rd Int. Conf./Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, January 21-25, 1996, Santa Fe (NM).
- Logofet, D.O. and Lesnaya, E.V., 2000: The mathematics of Markov models: what Markov chains can really predict in forest successions. *Ecological Modelling*, **126**: 285-298.
- Niederreiter, H. and Spanier, J. (Ed.), 1998: *Monte-Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 1998*. Proceedings of a Conference held at the Claremont Graduate University, Claremont, California, USA, June 22-26, 1998.
- Pelz, F., Kunze, C., Haase, M. u. R. Kahnt, 1996: Bewertung und Optimierung von Sanierungsmaßnahmen. *Geowissenschaften*, **4**, 491 ff.
- Recknagel, F., 1989: *Applied Systems Ecology*. Akademie-Verlag, Berlin.
- Sänger, H., 1993: Die Flora und Vegetation im Uranbergbaurevier Ronneburg-Pflanzensoziologische Untersuchungen an Extremstandorten. *Ökologie und Umweltsicherung* **5**, 1-227.
- Schneider, P., Kunze, C., Sänger, H., und M. Heinze, 2001: Wirkung unterschiedlicher Folgenutzungen hinsichtlich des Wasserhaushaltes von Abdecksystemen (unveröffentlichte Studie im Auftrag der Wismut GmbH, Chemnitz)
- Usher, M.B., 1979. Markovian approaches to ecological succession. *J. Anim. Ecology*, **48**: 413-426.
- Usher, M.B., 1981. Modelling ecological succession, with particular reference to Markovian models. *Vegetatio*, **46**: 11-18.
- Van Horssen, P., 1996: Ecological Modelling in GIS. *Proc. 3rd Int. Conf./Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, January 21-25, 1996, Santa Fe (NM).

Anschriften der Verfasser:

Dr. C. Kunze, B.P.S. Engineering GmbH, Reinsdorfer Str. 29, 08066 Zwickau, e-mail: kunze@bps-zwickau.de; Dr. H. Sänger, BIOS-Büro für Umweltgutachten, Berggasse 6, 08451 Crimmitschau, e-mail: bfu_sae@t-online.de; Dipl.-Geol. P. Schneider, HYDROISOTOP-PIEWAK GmbH, Oberfrohnaer Str. 84, 09117 Chemnitz, e-mail: Hydroisotop-Piewak@t-online.de