

**GDMB News inside**

# Surface **World of Mining** Underground



64/2012 No. 4 · July/August  
GDMB Informationsgesellschaft mbH  
ISSN 1613-2408 · [www.GDMB.de](http://www.GDMB.de)

**4/2012**



## Zukunft braucht Ingenieure!



**Montanstiftung.  
Zukunft sichern. Nachwuchs fördern.**

Montanstiftung · Telefon 0 53 23 / 937 90

BLZ 268 500 01 · Kto.-Nr. 96 117 973 · Sparkasse Goslar/Harz

**Internationale Fachzeitschrift für den Bergbau  
International Journal of Mining**

# Sustainable recultivation and wastewater treatment in Vietnamese coal mining

## Nachhaltige Rekultivierung und Behandlung von Abwässern im vietnamesischen Steinkohlenbergbau

SONJA KNAPP, ANDRÉ GERTH, STEFAN KLOTZ, Germany

### 1 Introduction

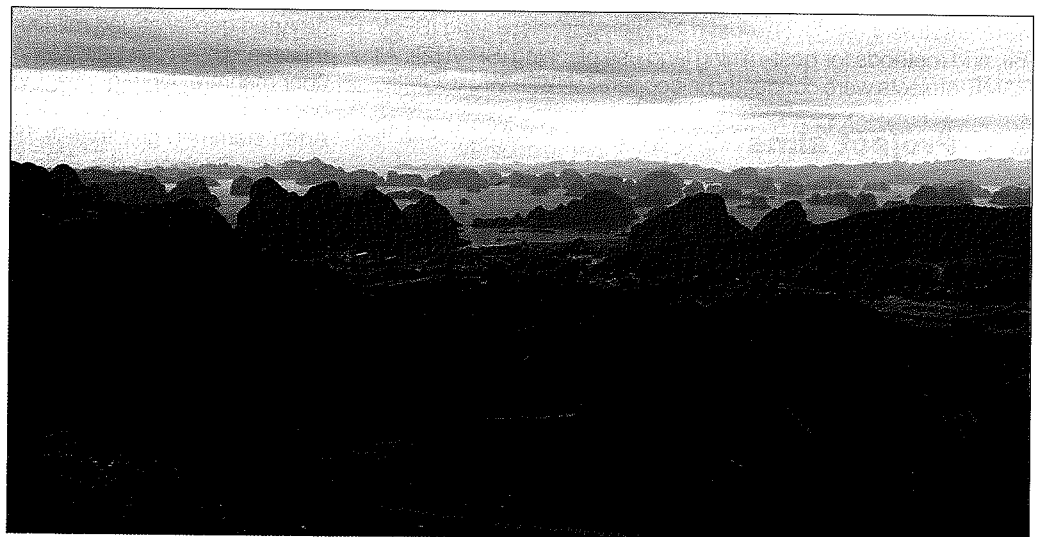
Since the colonial era, the Quang Ninh province in north-eastern Vietnam is home to opencast and belowground hard coal mining. The amount of coal produced in Quang Ninh covers 95 % of total Vietnamese coal production, which is excavated by VINACOMIN, the Vietnam National Coal and Mineral Industries Group. Quang Ninh is located at the sea side, but 80 % of its area is covered by forested mountains. Coal mining concentrates on the small coastal area and competes with other industries, settlements, forests, agriculture, lakes, and rivers. Consequently, coal mining impacts natural resources and human well-being: Mine water and

### 1 Einleitung

In der Provinz Quang Ninh im Nordosten Vietnams wird seit der Kolonialzeit Steinkohle über und unter Tage abgebaut. Die dort von der „Vietnam National Coal and Mineral Industries Group“ (VINACOMIN) gewonnene Kohle deckt 95 % der vietnamesischen Kohleproduktion ab. Der Abbau in Quang Ninh beschränkt sich auf den schmalen Küstenstreifen der Provinz, die zu 80 % von Bergland bedeckt ist. Diesen Küstenstreifen teilt sich der Bergbau mit Siedlungen, Industriegebieten, Landwirtschaft, Gewässern und Waldgebieten – eine Konkurrenz, die Konflikte birgt: Die Bewohner der anliegenden Siedlungen sind von Staubeinträgen belastet,

Fig. 1:  
Mining (front) takes place in the immediate vicinity of Ha Long city and UNESCO World Heritage Ha Long Bay, north-eastern Vietnam (background) (Picture by Petra Finkenbein, RAME)

Abb. 1:  
Der Kohlebergbau (Vordergrund) findet in direkter Nachbarschaft zur Stadt Ha Long und zum UNESCO-Weltnaturerbe Ha-Long-Bucht in Nordostvietnam (Hintergrund) statt (Foto: Petra Finkenbein, RAME)



Dr. SONJA KNAPP,  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ,  
Theodor-Lieser-Str. 4, 06120 Halle (Saale), Germany  
Tel. +49 (0) 345-5585308, Fax +49 (0) 345-5585329  
sonja.knapp@ufz.de

Dr. ANDRÉ GERTH,  
BioPlanta GmbH, Deutscher Platz 5, 04103 Leipzig, Germany  
Tel. +49 (0) 341-2245830  
info@bioplanta-leipzig.de

Dr. STEFAN KLOTZ,  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ,  
Theodor-Lieser-Str. 4, 06120 Halle (Saale), Germany  
Tel. +49 (0) 345-5585302; Fax +49 (0) 345-5585329  
stefan.klotz@ufz.de

Grundwasser, Oberflächengewässer und die Meeresbucht werden durch die Bergbauabwässer verschmutzt. Aufgrund der geringen Flächenverfügbarkeit werden die Abraummalden steil geschüttet; starke Erosion und Hangrutschungen sind die Folge. Zudem konkurriert der Bergbau mit einem anderen wichtigen Wirtschaftszweig: Seit 1994 ist die in Quang Ninh gelegene Ha-Long-Bucht UNESCO-Weltnaturerbe und ein Anziehungspunkt für Touristen aus aller Welt (Abbildung 1; siehe auch [1]).

Um die Nutzungskonflikte und Umweltbelastungen in der Region zu reduzieren, hat VINACOMIN die staatliche Auflage, stillgelegte Abraummalden zu rekultivieren und in eine Nachnutzung zu überführen. Die Bepflanzung der Halden soll Erosion und Staubeinträge eindämmen, die von der Vegetation geförderte Bodenentwicklung zur Senkung der Schadstofflasten in den Haldenabwässern beitragen. Langfristig kann eine nachhaltige Rekultivierung verschiedene Formen der Nachnutzung ermög-

dust emissions pollute water bodies and air. Moreover, because space is rare mine heaps need to be built steeply, which in turn increases erosion intensity. Among tourists, Quang Ninh is not known for coal mining but for the famous Ha Long Bay that became UNESCO World Heritage in 1994 (Figure 1). Thanks to Ha Long Bay, tourism is an increasingly important economic factor in Quang Ninh – and competing with coal mining [1].

To reduce environmental conflicts, the Vietnamese government decided that VINACOMIN has to recultivate waste rock dumps and find sustainable solutions for post-mining land use. Recultivation will decrease erosion intensity, dust emission rates and water pollution, and activate soil development. On the long-term, recultivated mining sites can be used by forestry and tourism. Besides recultivation, mine water cleaning is essential to reach sustainability. Both recultivation activities and mine water treatment should occur environmentally friendly and cost-effective.

From 2008 to 2011, the Helmholtz-Centre for Environmental Research – UFZ and the BioPlanta Corporation (BioPlanta GmbH) developed plant-based techniques for recultivation and mine water treatment on two waste rock dumps in Quang Ninh. The project "Plant-based methods" was part of the Research Association Mining and Environment in Vietnam – RAME. RAME is led by the Institute of Environmental Engineering and Ecology at Ruhr-University Bochum and funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Altogether, there are six subprojects in RAME, which are all related to the main environmental problems of hard coal mining (BILEK et al. [2] give a detailed description of all subprojects). Besides the subproject (SP) on plant-based methods (SP V), RAME deals with environmental management, environmental information systems, and capacity development (SP I [3]), the stabilization of waste rock dumps (SP II [4]), mine water treatment (SP III [5]), dust mitigation and monitoring (SP IV [6]), and methods for post-mining land use planning (SP VI [2]). All RAME-projects were conducted in cooperation with VINACOMIN.

## 2 Project aims

### 2.1 Recultivation

Up to now, VINACOMIN recultivated waste rock dumps by filling up top soil, planting fast-growing plant species and applying fertilizer [7]. This mainly resulted in plant monocultures that require maintenance over several years. Altogether, this conventional way of recultivation is a cost-intensive process [8]. Most plant species used for recultivation are not native to Vietnam but originate from other parts of the world. As recultivation requires high planting frequencies of these "exotic" species, it increases the risk of biological invasions: Invasive plant species are plants that establish in natural habitats where they are not native to and proliferate aggressively, for example after escaping cultivation. Moreover, monocultures are homogeneous habitats that provide only small amounts of resources to other plants and animals – several animal species are specialised on native plants, which they use as food resource or habitat. These animals cannot survive in non-native monocultures. In addition, the plant species used by VINACOMIN increase the risk of fire. Amongst others, VINACOMIN uses *Acacia mangium* WILLD. (Mangium), *Acacia auriculiformis* A.Cunn. ex Benth. (Earleaf acacia), and *Pinus merkusii* Jungh./Vriese (Sumatran Pine) for waste rock dump recultivation. All of these species produce leaf litter that decomposes slowly, accumulates on dumps and increases the risk of dump fires as dry leaf litter burns well. Biological invasions are one of the main threats to global biodiversity [9]. In contrast, the use of native plant species, which are evolutionary adapted to the prevailing environmental conditions, offers solutions to these problems.

The aim of UFZ and BioPlanta was to establish sustainable, cost-effective recultivation techniques. Therefore, we tested plant species that are native to Vietnam and naturally occur on the mining

lichen, z.B. forstlicher und touristischer Art. Parallel dazu muss die Reinigung der verschiedenen im Bergbau anfallenden Abwässer erfolgen. Das soll, ebenso wie die Rekultivierung, möglichst umweltfreundlich und kostengünstig geschehen.

Von 2008 bis 2011 entwickelten das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ und die BioPlanta GmbH nachhaltige Konzepte zur Rekultivierung und pflanzenbasierten Abwasserreinigung auf zwei Abraumhalden in Quang Ninh. Sie decken damit das Teilprojekt „Anwendung pflanzenbasierter Methoden“ des Forschungsverbundes Research Association Mining and Environment in Vietnam (RAME) ab. RAME wird von der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Umwelttechnik und Ökologie im Bauwesen koordiniert und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert. Der Forschungsverbund besteht aus insgesamt sechs Teilprojekten, die sich mit den durch den Steinkohlenabbau verursachten Umweltproblemen befassen (BILEK et al. [2] beschreiben die Teilprojekte im Detail). Neben dem Teilprojekt (TP) zu pflanzenbasierten Methoden (TP V) befassen sich die Arbeiten in RAME mit Umweltmanagementsystemen, Weiterbildung und der Gesamtkoordination des Projektes (TP I [3]), der Stabilisierung von Abraumhalden (TP II [4]), der Abwasserbehandlung im Bergbau (TP III [5]), Staubbinderung und -monitoring (TP IV [6]), sowie mit Planungsmethoden für die Bergbaufolgenutzung (TP VI [2]). Alle Arbeiten des RAME-Verbundes erfolgten in Kooperation mit VINACOMIN.

## 2 Zielsetzung

### 2.1 Rekultivierung

VINACOMIN rekultiviert stillgelegte Halden bislang durch den Auftrag von Mutterboden, auf dem anschließend schnellwüchsige Arten gepflanzt und mit Dünger versorgt werden [7]. Zum Teil müssen diese meist als Monokulturen angelegten Pflanzungen über mehrere Jahre gepflegt werden. Insgesamt kommen relativ hohe Kosten zustande [8]. Die für die Rekultivierung verwendeten Arten stammen größtenteils nicht aus Vietnam, sondern sind in anderen Regionen der Erde heimisch. Die Anpflanzung dieser Arten in großem Stil erhöht die Gefahr biologischer Invasionen, also die Verwilderung der Arten verbunden mit ihrer starken Ausbreitung und einer möglichen Verdrängung einheimischer Arten. Zudem bieten Monokulturen nur wenigen wildlebenden Pflanzen- und Tierarten Lebensraum – einige Tierarten sind auf bestimmte einheimische Pflanzenarten als Nahrungsquelle und Lebensraum spezialisiert. Sie können sich in aufgeförmten Monokulturen aus exotischen Pflanzen nicht behaupten. Zusätzlich erhöhen die von VINACOMIN verwendeten Arten die Gefahr von Haldenbränden. So werden u.a. *Acacia mangium* WILLD. (Samtblättrige Akazie), *Acacia auriculiformis* A.Cunn. ex Benth. (Ohrförmige Akazie) und *Pinus merkusii* Jungh./Vriese (Sumatra-Kiefer) angepflanzt, deren Blattstreu sich langsam zersetzt (nicht zuletzt weil die einheimischen Destruenten die Streu exotischer Arten schlechter zersetzen können), so dass sich größere Mengen trockener, leicht brennbarer Streu auf den Halden ansammeln. Biologische Invasionen gelten als eine der größten Bedrohungen für die weltweite Vielfalt der Arten [9]. Einheimische Arten haben demgegenüber den Vorteil, dass sie sich im Verlauf der Evolution an die örtlichen klimatischen Bedingungen anpassen konnten und somit langfristig stabile Vegetationsbestände zu erwarten sind.

Das UFZ und die BioPlanta GmbH verfolgen eine alternative Rekultivierungsstrategie, die eine langfristige Kostensenkung und die Reduktion der genannten Risiken ermöglichen soll: das Konzept umfasst die Unterstützung der natürlichen Bodenbildung durch Einsatz vor Ort verfügbarer Zusatzstoffe und die Ansiedlung stabiler Pflanzengemeinschaften unter Nutzung der in Vietnam einheimischen, natürlicherweise auf den Abraumhalden vorkommenden Vegetation [7]. Die Rekultivierung soll nicht flächendeckend erfolgen, sondern in Form von Vegetationsinseln (d.h. in Gruppen);

sites for their ability to form stable plant communities on waste rock dumps. Simultaneously, natural soil development processes were triggered by applying natural, locally available additives [7]. Recultivation plantings did not cover the whole waste rock dump area but were planted as “vegetation islands” (in groups). From these islands, natural species dispersal is supposed to fill up gaps among islands such that the reduction of planting material reduces recultivation costs. We tested a range of plant species in order to create diverse communities and no monocultures.

## 2.2 Plant-based mine water treatment

Pyrite oxidation processes within waste rock dumps produce acidic mine waters. These acidic waters transport heavy metals in dissolved form or bound to particles and suspended in water, for example manganese. Therefore, mine water needs to be purified before it can be discharged into open water bodies. Constructed Wetlands are a sustainable and cost-effective technology that uses phyto-remediation to purify wastewater [10]: The technology takes advantage of biological, physical, and chemical processes to purify wastewater, and it does not depend on power supply. Within a Constructed Wetland, marsh plants enrich the rhizosphere with oxygen and organic carbon sources. By adapting the technology to the prevailing environmental conditions, those microbiological and physical-chemical processes that are responsible for the immobilisation of heavy metals and the neutralisation of pH-values can be enhanced.

The aim of UFZ and BioPlanta was to adapt the Constructed Wetland technology to the environmental conditions in South-East Asia (heavy rain falls in the rainy season, drought in the dry season) and the specific conditions of Quang Ninh mining sites (acidic wastewater containing high loads of manganese and other heavy metals). Therefore, we planned the construction of a pilot plant, based on laboratory tests, which was then built in Quang Ninh by VINACOMIN.

## 3 Approach and results

### 3.1 Recultivation

#### 3.1.1 Choosing test species based on natural mining site vegetation

First, we mapped species that spontaneously (= naturally by themselves) occurred on mining sites in vegetation formations of different age. In addition, we took soil samples within each vegetation formation to characterise soil development. Altogether, we identified 180 plant species from which we selected several study species. The study species included trees, shrubs and grasses, for example *Melia azedarach* L. (Chinaberry), *Rhus chinensis* MILL. (Chinese Sumac), *Saccharum spontaneum* L. (Kans grass) and *Thysanolaena maxima* (Roxb.) Kuntze (Tiger grass). Selection was based on species frequency on the mining sites and the availability of planting material – at the beginning of our study, Vietnamese tree nurseries only sold the “exotic” species usually used for recultivation by VINACOMIN (called conventional species further on).

Out of all study species, we chose two tree and one grass species to test their general suitability for recultivation (“Plateau study”), and two grass species to test their suitability for recultivation of slopes (“Slope study”). For all study species and a subset of the conventional species already used by VINACOMIN, we measured several ecologically relevant parameters, for example leaf litter decomposition rate and resistance to drought. Moreover, to assess how study species perform in comparison to conventional species, we monitored several existing plantations of conventional species. In addition to field studies in Vietnam, we tested *in vitro* propagation methods at the German laboratories of BioPlanta to determine the most efficient possibilities in provid-

dabei kann die Nutzung des natürlichen Ausbreitungspotentials der Arten die Kosten der Rekultivierung senken. Durch den Einsatz verschiedener Pflanzenarten sollen die Risiken der Monokulturen gesenkt und vielfältige Nutzungsoptionen geschaffen werden.

## 2.2 Pflanzenbasierte Reinigung von Haldenabwässern

Durch die in den Haldenkörpern ablaufende Pyritoxidation entsteht saures Sickerwasser, das beim Austritt aus den Halden partikelgebundene suspendierte und gelöste Schwermetalle mit sich führt, u.a. Mangan. Eine kostengünstige und effektive Möglichkeit derart belastete Abwässer zu klären, bieten Constructed Wetlands. Das sind Wasserbehandlungsanlagen, die ohne Energiezufuhr und unter Ausnutzung natürlicher biologischer, physikalischer und chemischer Prozesse zur Schadstoffreduzierung verwendet werden, also die vielfältigen Prozesse der Phytoremediation und Mikrobiologie nutzen [10]: In Constructed Wetlands werden Sumpfpflanzen gesetzt, die den Wurzelraum mit Sauerstoff und organischen Kohlenstoffverbindungen versorgen. Die Technologie wird an die örtlichen Bedingungen angepasst, sodass gezielt mikrobiologische und chemisch-physikalische Vorgänge gefördert werden, die u.a. zu einer Immobilisierung von Schwermetallen und einer Neutralisierung des sauren Haldensickerwassers führen.

Die Arbeiten des UFZ und der BioPlanta GmbH umfassten die Entwicklung und Optimierung von Constructed Wetlands, die auf die spezifischen Bedingungen in Südostasien (mit Starkregen in der Regenzeit und geringen Niederschlagsmengen in der Trockenzeit) und die Anforderungen des Steinkohlenbergbaus in Quang Ninh angepasst sind. Dazu wurde vor Ort eine Pilotanlage errichtet; parallel erfolgten Labor- und Technikumsversuche in Deutschland.

## 3 Vorgehen und Ergebnisse

### 3.1 Rekultivierung

#### 3.1.1 Erfassung der Haldenvegetation und Auswahl der Versuchsarten

In einem ersten Schritt erfolgte die Charakterisierung der spontanen (d.h. natürlicherweise vorkommenden) Vegetation und der Bodenbildung auf Halden unterschiedlichen Alters. Insgesamt konnten dabei über 180 Pflanzenarten identifiziert werden. Aus diesem Artenpool wurden mehrere Versuchsarten aus unterschiedlich alten Vegetationseinheiten für die Rekultivierung ausgewählt, welche Bäume, Sträucher und Gräser umfassen. Zu den ausgewählten Arten gehörten u.a. *Melia azedarach* L. (Zedrachbaum), *Rhus chinensis* MILL. (Chinesischer Sumach), *Saccharum spontaneum* L. (Wildes Zuckerrohr) und *Thysanolaena maxima* (Roxb.) Kuntze (Tigergras). Neben der Häufigkeit der Arten in der spontanen Haldenvegetation war die Verfügbarkeit von Pflanzgut ein entscheidendes, einschränkendes Kriterium für die Auswahl – das Angebot der vietnamesischen Baumschulen beschränkte sich zu Beginn der Versuche weitgehend auf die gegenwärtig von der VINACOMIN für die Rekultivierung verwendeten („konventionellen“) Arten.

Drei der Versuchsarten (zwei Baumarten und ein Gras) wurden in Kombination mit unterschiedlichen Bodenbehandlungen in einem Feldversuch hinsichtlich ihrer Eignung für die Rekultivierung untersucht (Plateauversuch [7]). Für die Rekultivierung von Hängen wurden Gräser getestet (Hangversuch). Für alle Versuchsarten und einen Teil der von VINACOMIN verwendeten konventionellen Arten wurden relevante ökologische Parameter bestimmt (z.B. Geschwindigkeit des Streuabbaus, Resistenz gegenüber Trockenheit). Um die Rekultivierungseignung der Versuchsarten mit derjenigen der konventionellen Arten zu vergleichen, erfolgte zudem ein Monitoring mehrerer konventioneller Pflanzungen. Parallel zu den Feldversuchen in Vietnam wurden in Deutschland Labor- und Technikumsversuche zum Aufbau von Pflanzenbeständen über

ing sufficient amounts of plants for recultivation. All results were incorporated into a general recultivation concept to be provided for VINACOMIN.

### 3.1.2 Plateau study

We established our main field study on a plateau of Chinh Bac dump, located east of Ha Long city and operated by VINACOMIN's daughter company NUI BEO. On the plateau, we planted two tree species and one grass species in combination with four soil treatment additives (Figure 2). These additives were used to improve soil quality by accumulating organic material and by increasing soil pH. The additives were selected based on local availability and cost-effectiveness, and their effects on plant growth were compared to the effects of untreated waste rock dump material. Each plant species was tested in combination with each soil treatment. Study plots (each containing one species and one soil treatment) were placed randomly. Over a two-year study period, we monitored plant species' growth and collected climate and soil data (KUKA & FINKENBEIN [7] describe the study design and results in more detail).

The experiment showed that the study species are well suited for the recultivation of mining sites in north-eastern Vietnam: Between the establishment of the plateau study in spring 2009 and July 2011, most of the planted individuals grew well (Figures 2 and 3). The species showed specific reactions to soil treatment additives. In contrast, local site conditions had similar effects on all species, with mine subsidence decreasing plant establishment success.

Generally, it is not advisable to plant the species in monoculture plantations; this will likely increase the risk of pests. Moreover, some of the study species are deciduous, and monocultures of these species will leave recultivated mining sites leafless for a yearly period of time. In contrast, if species are planted in mixed cultures, recultivated sites will stay green throughout the year, which is one of the main aims of VINACOMIN. Mixed cultures will also decrease the risk of pests.



Fig. 2: Partial view of the plateau study on the recultivation of mining sites on Chinh Bac dump, north-eastern Vietnam, in March 2010 (Picture by RAME)

Abb. 2: Teilansicht des Plateauversuchs zur Rekultivierung von Bergbauhalden auf der Halde Chinh Bac, Nordostvietnam, März 2010 (Foto: RAME)

The grass species that we tested in the plateau experiment grows in populations that make it hard for other species to invade. However, in the early stages of recultivation, grass populations will prove beneficial because they increase humus production. This way, they pave the way for other species to follow in later

In-vitro-Vermehrung durchgeführt. Alle Ergebnisse flossen in ein Rekultivierungskonzept ein.

### 3.1.2 Plateauversuch

Auf einem Plateau der von der VINACOMIN-Tochter NUI BEO betriebenen Halde Chinh Bac unmittelbar östlich der Stadt Ha Long wurden zwei Baumarten und eine Grasart in Kombination mit vier Bodenbehandlungen angepflanzt (Abbildung 2). Ziel der Bodenverbesserungsmaßnahmen war es, organisches Material anzureichern und den pH-Wert des Substrates zu erhöhen. Dazu wurden lokal verfügbare, preisgünstige Zusatzstoffe gewählt und deren Wirkung mit der Wirkung des unbehandelten Haldensubstrates verglichen. Der Versuch wurde so angelegt, dass jede Pflanzenart mit jeder Bodenbehandlung getestet werden konnte.

Die einzelnen Untersuchungs-Plots (jeder mit einer Pflanzenarten/Bodenbehandlungs-Kombination) wurden nach dem Zufallsprinzip angeordnet. Über einen Zeitraum von zwei Jahren wurde das Wuchsverhalten der Arten erfasst. Begleitend wurden Klima- und Bodendaten aufgenommen (KUKA & FINKENBEIN [7] geben eine ausführliche Beschreibung des Versuches und der Versuchsergebnisse).

Zwischen der Anlage des Versuchsfeldes Anfang 2009 und Juli 2011 entwickelten sich die gepflanzten Individuen gut (Abbildung 2 und 3). Auf die Bodenbehandlungen reagierten die Pflanzenarten spezifisch. Die lokale Beschaffenheit der Halde hatte dagegen generelle Auswirkungen: In einem Teil des Versuchsfeldes führten Setzungen und Verkippungen zu einer schlechteren Etablierung der Pflanzen.

Eine Pflanzung der Baumarten in Monokultur ist nicht empfehlenswert, da dadurch das Risiko durch Schädlingsbefall erhöht wird. Zudem sind einige Arten laubwerfend und würden in Monokulturen zu zeitweise kahlen Halden führen. Da ein wesentliches Ziel von VINACOMIN die Schaffung einer dauerhaft grünen Bergbaufolgelandschaft ist, sind Mischkulturen aus Arten, die zu verschiedenen Zeiten Laub werfen, empfehlenswert.



Fig. 3: Partial view of the plateau study on the recultivation of mining sites on Chinh Bac dump, north-eastern Vietnam, in July 2011 (Picture by Tran Hai Ha, RAME)

Abb. 3: Teilansicht des Plateauversuchs zur Rekultivierung von Bergbauhalden auf der Halde Chinh Bac, Nordostvietnam, Juli 2011 (Foto: Tran Hai Ha, RAME)

Die getestete Grasart entwickelt Bestände, die eine Einwanderung anderer Arten fast vollständig unterbinden. In den Anfangsstadien der Rekultivierung fördern diese Bestände die Bildung von Humus und bereiten so den Boden für die Ansiedelung weiterer Arten vor. Darüber hinaus deutet die Ausbildung der relativ dichten

stages of recultivation. Moreover, dense grass populations might be efficiently used in biomass production but this needs further testing, which should also include other grass species.

### 3.1.3 Slope study

Grass species that grow in dense populations and build extensive root systems should have positive effects on slope stability and erosion control. Therefore, we decided to test several grass species on waste rock dump slopes. VINACOMIN provided a slope where we planted grasses on the top, middle and toe/bottom of the slope. In cooperation with RWTH Aachen we planned to measure erosion rates. Further, we measured plant growth as done in the plateau study. To compare the performance of the studied grasses to those of *Vetiveria zizanioides* (L.) NASH. (Vetiver), a grass that is used by VINACOMIN in conventional recultivation, we also measured growth parameters for Vetiver.

We established the slope experiment in June 2009. Six months later, all grass species – the study species as well as the exotic Vetiver developed similarly: They had well established on the top and middle of the slope but not on slope toe because eroded rock material gathered there and reduced plant growth (the eroded material is not compressed, yet, and the pore volume is still large). The insights gained so far suggest that native grass species that occur spontaneously on waste rock dumps are suitable for stabilising slopes. Additionally, the monitoring of conventional species showed that Vetiver does not form stable communities on the long term. In comparison to Vetiver, which is sterile, native grass species can reproduce by themselves and consequently reduce the costs of recultivation.

### 3.1.4 Leaf litter decomposition rate and resistance to drought

Leaf litter that decomposes slowly accumulates on the mining sites. This increases the risk of dump fires and decelerates soil development. Therefore, it should be advantageous to use plant species with a broad range of leaf litter decomposition rates for the recultivation of mining sites. This should enable continuous humus and nutrient provision. We measured leaf litter decomposition rates in two experiments: In Germany, we run a greenhouse test where we applied standardised conditions; in Vietnam, we tested decomposition rates on waste rock dumps at Chinh Bac (real conditions). For both tests we deposited leaf material of both native study species and conventional species and measured decomposition rates over a period of two years. Subsequently, we compared the study species' leaf litter decomposition rates to the conventional species' decomposition rates.

Leaf morphology differs among the study species. Consequently, they covered a broad spectrum of decomposition rates. In comparison, leaf litter decomposition was significantly slower for the conventional species. To provide both a high nutrient availability and the formation of humus, which is important for plant water budget, we suggest using plant mixtures of species with different decomposition rates.

During the dry season, vegetation in north-eastern Vietnam suffers from drought, which is enforced by the low water holding capacity of waste rock material. Therefore, it is essential that species for recultivation are drought resistant. We tested drought resistance for several study species and conventional species in a greenhouse test in Germany under standardised conditions. Within the test, we applied two different treatments: good growing conditions with normal water supply and dry conditions with reduced water supply. We measured growth performance and compared it between study species and conventional species.

Different study species had different strategies to grow under dry conditions. One strategy is to increase root biomass in order to extract more water from soil; another strategy is to reduce leaf area in order to decrease water loss by evapotranspiration. With both strategies, the decrease in total biomass (above and belowground

Bestände auf eine gute Nutzbarkeit als Biomasselieferant zur Energiegewinnung hin und eröffnet somit eine weitere Option der Nachnutzung. Allerdings sind hierzu weitere Untersuchungen mit zusätzlichen Grasarten erforderlich.

### 3.1.3 Hangversuch

Die Ausbildung dichter Bestände und Wurzelsysteme sollte sich auch günstig auf die Eindämmung der Erosion an Hängen auswirken. Um dies in Kooperation mit der RWTH Aachen zu testen, wurden im Juni 2009 an dem Hang einer weiteren Testhalde zwei Grasarten gepflanzt – jeweils an Hangschulter, -mitte und -fuß. In Übereinstimmung mit dem Plateauversuch wurde das Wuchsverhalten der Arten erfasst und ihre Rekultivierungseignung mit derjenigen der bei der konventionellen Rekultivierung eingesetzten Grasart *Vetiveria zizanioides* (L.) NASH. (Vetiver) verglichen.

Im Verlauf eines halben Jahres entwickelten sich die beiden Versuchsarten und Vetiver ähnlich: an der Schulter und Mitte des Hangs konnten sie sich etablieren, am Fuß des Hangs nicht. Dort wird immer wieder erodiertes Material abgelagert, das den Wuchs der Pflanzen erschwert. Die bis jetzt gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass einheimische Gräser, die spontan auf den Halden wachsen, zur Stabilisierung der Hänge eingesetzt werden können. Im Verlauf des parallel durchgeführten Monitorings der von VINACOMIN angelegten Pflanzungen konnte außerdem festgestellt werden, dass Vetiver sich auf Dauer nicht stabil entwickelt. Einheimische Gräser stellen Alternativen dar, die sich, im Gegensatz zu dem sterilen Vetiver, selbst fortpflanzen – so können die Kosten der Rekultivierung gesenkt werden.

### 3.1.4 Streuabbau und Trockenresistenz

Blattstreu, die sehr langsam abgebaut wird, erhöht das Risiko von Haldenbränden und verlangsamt die Bodenentwicklung. Es ist deshalb günstig, Arten mit verschiedenen hohen Streuabbauraten zu pflanzen, so dass eine kontinuierliche Humusbildung und Freisetzung von Nährstoffen stattfindet. Vor diesem Hintergrund wurden die Streuabbauraten mehrerer der in Vietnam einheimischen Pflanzenarten und der von VINACOMIN verwendeten konventionellen Arten bestimmt: zum einen in einem Gewächshausversuch in Deutschland zum Test des Streuabbaus unter standardisierten Bedingungen, zum anderen in einem Freilandversuch auf der Halde Chinh Bac zum Test des Streuabbaus unter realen Bedingungen. Dabei wurde Blattmaterial in Netzbeutel verpackt und im Gewächshaus bzw. auf der Halde ausgelegt. Im Verlauf von zwei Jahren wurde der Zerfallsprozess erfasst. Anschließend wurden der Streuabbau aller Arten sowie der Streuabbau der Versuchsarten und der konventionellen Arten verglichen.

Entsprechend ihrer unterschiedlichen Blattmorphologien zeigten die Versuchsarten verschiedene Streuabbauraten. Im Vergleich dazu wurde die Streu der konventionellen Arten relativ langsam abgebaut. Um sowohl eine hohe Nährstoffverfügbarkeit als auch die für den Wasserhaushalt der Pflanzen notwendige Humusbildung sicherzustellen, empfiehlt es sich, die bestehenden Pflanzungen um Arten mit sehr verschiedenen Streuabbauraten zu ergänzen.

In der Trockenzeit ist die Vegetation auf den Halden starkem Wassermangel ausgesetzt, der durch das geringe Wasserhaltevermögen des Haldenmaterials noch verstärkt wird. Die Resistenz der Pflanzen gegenüber Trockenstress ist daher ein entscheidendes Kriterium für die Rekultivierungseignung. Folglich wurden Gewächshausversuche unter standardisierten Bedingungen durchgeführt, um für eine Auswahl an Versuchsarten und der konventionellen Arten die Wuchsleistung unter feuchten und trockenen Bodenverhältnissen zu vergleichen.

Alle Versuchsarten reagierten auf den Trockenstress, wendeten dabei aber unterschiedliche Strategien an: Ein Teil der Arten erreicht eine bessere Wasseraufnahme durch Erhöhung der Wurzelbiomasse, andere Arten reduzieren den Verdunstungsverlust von

biomass together) is small. In comparison to the conventional species, the study species produced a higher amount of biomass under dry conditions, which means that they grew better.

3.1.5 *In vitro* propagation

The recultivation of large mining areas requires a lot of planting material, even if plantations are implemented in vegetation islands from which species disperse autonomously. Therefore, we performed an *in vitro* propagation experiment to determine how a successful and rapid propagation of potential recultivation plants can be achieved. In the experiment, we tested different kinds of culture media for their suitability for *in vitro* propagation of *Commersonia bartramia* (L.) Merr. (Brown Kurrajong), *Rhus chinensis* MILL. (Chinese Sumac) und *Sesbania spec.* (a genus belonging to the pea family). These species are all native to Vietnam. After eight weeks, growth rates and root development were tested and compared among applications with and without phytohormones. The *in vitro* propagated shoots of *C. bartramia* were then acclimatised to greenhouse conditions and further growth was tested in topsoil and in a mixture of topsoil with sand (2:1). Six weeks later, we again measured the plants' growth rate.

Using a propagation medium without phytohormones both *R. chinensis* and *S. spec.* were vital and showed growth of initial roots after a period of eight weeks. The addition of phytohormones for inducing plant growth resulted in reduced growth and rooting, and in callus formation. For the propagation of *C. bartramia* shoots, when using a nutrient medium without phytohormones a multiplication rate of 1:2.5 was determined after a culture period of eight weeks. More than 50 % of all shoots were rooted at that time. Again, phytohormones had no positive effects on the multiplication rate. After six weeks under greenhouse conditions, 100 % of those *in vitro C. bartramia* shoots, which had at least 6 cm rootlength, were alive. In the mixture of topsoil and sand, 67 % of *C. bartramia* shoots were alive. Shoots with a rootlength <6 cm had significantly lower survival rates.

Moreover, we tested whether the Kans grass (*Saccharum spontaneum*) can be cultivated *in vitro* as well. When Thidiazuron was added to the culture medium, the germination rate increased from 16 % to 33 %. In contrast, the addition of Gibbelerin acid had no effect. Subsequently, we tested the reproduction rate of *S. spontaneum*, which reached 3.5 after three generations. *S. spontaneum* shoots were then transferred to greenhouse conditions, where they were grown for six weeks. All individuals grew well and developed several shoots.

3.2 Plant-based wastewater treatment

Based on monitoring results provided by VINACOMIN, we selected the mining area of Dong Trieu, which is located west of Ha Long city, to build up a Constructed Wetland pilot plant for wastewater treatment. Test measurements showed that mine water at Dong Trieu was characterised by high loads of heavy metals and sulphates and by low pH-values (Table 1), resulting from weathering and leaching processes of mine soils that activate heavy metals.

Table 1: Results of the chemical analysis of mine water at Dong Trieu, north-eastern Vietnam ("maximum" is based on one single point of measurement)

Parameter	from	to	maximum
pH	5	3	-
Manganese [mg/l]	1.7	9.9	49
Nickel [mg/l]	0.2	0.8	4
Aluminium [mg/l]	0.7	4.3	9
Iron [mg/l]	0.5	8.3	32
Sulphate [mg/l]	120	624	3875

Wasser durch Verkleinerung der Blattoberflächen. Die Gesamtbiomasse der Arten wurde auf diese Weise bei Trockenheit nur wenig eingeschränkt. Zudem bildeten die Versuchsarten unter trockenen Bedingungen mehr Biomasse als die konventionellen Arten.

3.1.5 *In-vitro*-Vermehrung

Die Rekultivierung großer Haldengebiete erfordert die Bereitstellung großer Mengen an Pflanzgut. Zwar können Vegetationsinseln, von denen sich die Vegetation selbstständig ausbreitet, diesen Bedarf reduzieren; dennoch ist eine kontrollierte Anzucht notwendig. In diesem Kontext stand die Machbarkeitsstudie zum Aufbau von Pflanzenbeständen über *In-vitro*-Vermehrung auf verschiedenen Nährmedien. Dazu wurden die *In-vitro*-Vermehrung von *Commersonia bartramia* (L.) Merr. (Brauner Kurrajong), *Rhus chinensis* MILL. (Chinesischer Sumach) und *Sesbania spec.* (zu den Schmetterlingsblütlern gehörende Gattung) untersucht (alle drei Arten sind in Vietnam einheimisch). Nach einer Vermehrungszeit von acht Wochen wurden die Wachstumsraten sowie die Wurzelentwicklung der Arten erfasst und zwischen Behandlungsalternativen mit und ohne Phytohormonen verglichen. Die bewurzelten Sprosse von *C. bartramia* wurden anschließend im Gewächshaus in Mutterboden sowie ein Gemisch aus Mutterboden und Sand (2:1) gesetzt. Nach einer Kulturdauer von sechs Wochen erfolgte eine erneute Bestimmung der Wachstumsrate.

Ohne Zusatz von Phytohormonen waren die *In-vitro*-Sprosse von *R. chinensis* und *S. spec.* nach einer Kulturperiode von acht Wochen grün und bewurzelt. Dagegen wuchsen sie bei Verwendung von Phytohormonen kaum. Stattdessen trat Kallusbildung auf. Für die *In-vitro*-Sprossvermehrung von *C. bartramia* ohne Phytohormonzusatz lag die Vermehrungsrate nach acht Wochen bei einem Verhältnis von 1:2,5. Mehr als 50 % der neuen Sprosse waren bewurzelt. Die Verwendung von Phytohormonen hatte keinen positiven Einfluss auf die Vermehrungsrate. Nach sechs Wochen unter Gewächshausbedingungen lag die Überlebensrate der *In-vitro*-Sprosse von *C. bartramia*, die eine Mindestwurzellänge von 6 cm aufwiesen bei 100 % in Mutterboden und 67 % in der Mischung aus Mutterboden und Sand. Sprosse mit kürzeren Wurzeln zeigten deutlich geringere Überlebensraten.

Weiterhin wurde überprüft, inwieweit von *Saccharum spontaneum* Bestände *in vitro* aufgebaut werden können. Die Zugabe von Thidiazuron zum Nährmedium der Sterilaussaat bewirkte eine Erhöhung der Keimrate von 16 % auf 33 %. Dagegen zeigte die Zugabe von Gibbelerinsäure keine Erhöhung der Keimrate. Nach Überführung der Pflanzen in die Vermehrungskultur wurden nach drei Subkulturen Vermehrungsraten von 3,5 erreicht. Bei der Überführung der *In-vitro*-Pflanzen vom Bewurzelungsmedium in die Gewächshauskultur waren nach sechswöchiger Akklimatisierung keine Ausfälle zu verzeichnen. Es konnten mehrtriebige Jungpflanzen von kräftigem Wuchs erzeugt werden.

3.2 Pflanzenbasierte Reinigung von Haldenabwässern

Die Auswahl des Versuchsstandortes für die Errichtung der Constructed Wetland Pilotanlage erfolgte anhand der Ergebnisse eines Monitorings der VINACOMIN. Gewählt wurde der Bergbaustandort Dong Trieu westlich der Stadt Ha Long. Testmessungen zeigten eine hohe Schwermetall- und Sulfatbelastung und geringe pH-Werte des Bergbauwassers am Standort (Haldensickerwasser und Grubenwasser; Tabelle 1). Die höchsten Konzentrationen von Schwermetallen und Sulfat traten zum Zeitpunkt der Messung lokal im Abstrom einer ehemaligen Abraumhalde (s. Tabelle 1) auf. Die Ursache der generell hohen Schwermetallkonzentrationen liegt in der Verwitterung des Haldenmaterials. Durch die damit einhergehende Versauerung kommt es zur Mobilisierung der Schwermetalle. Auf Basis der Standortkenntnisse wurden Labor- und Techniksversuche zu Metallfixierungs- und Neutralisationsprozessen

To adapt the Constructed Wetland technology to local conditions at Dong Trieu, we tested the immobilisation of heavy metals and pH-neutralisation at laboratory scale. Based on our laboratory results, VINACOMIN built up a pilot plant at Dong Trieu in spring and summer 2010 (Figure 4). Between August 2010 and end of 2011, covering both the wet and the dry season, we tested all relevant parameters and worked to optimise the pilot plant. This included the adaptation to climate-induced changes in water availability and hydrochemical conditions. The data can be used for scaling up, transfer to another area, and budgeting.

In the laboratory-scale experiments, carbon input by plants was too low to initiate a microbial dissimilatory sulphate reduction high enough for wastewater purification. In contrast, limestone mixed with organic waste materials such as rice straw, cattle manure and compost increased pH-values from <3 to 7.2 and decreased the water's sulphate content.

VINACOMIN needs to fulfil the legal criteria for surface water quality standard (TCVN 5942-1995) in Vietnam. Thus, these criteria were set as the baseline for the pilot plant at Dong Trieu. Based on our laboratory results, the concept for the pilot plant included two cells, one with a combination of limestone with a layer of organic waste material (compost; cell 1), and the other with gravel planted with reed plants (cell 2). The compost layer provides an additional carbon source which supplies plants and microbes in the Constructed Wetland with nutrients. In cell 2, residues from the compost source in cell 1 are removed. Cell 1 was planted with floating water plants (*Eichhornia grassipes* (Mart.) Solms, Common Water Hyacinth). The cell has an area of 950 m<sup>2</sup>. Cell 2 was planted with reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.). It has an area of 600 m<sup>2</sup>.

Altogether, the pilot plant was designed for a flow rate of 100 m<sup>3</sup>/d water. Water enters the pilot plant by freely following the downward slope. The flow rate is regulated by a dam and by the diameter of incoming pipes, which is continuously adjustable. We started monitoring the pilot plant in August 2010. Relevant parameters were measured monthly until autumn 2011. The parameters developed as follows (only selected results shown):

- pH – With a maximum flow rate of 4.4 m<sup>3</sup>/h, pH increased from 4.5 to 6.7. Thus, heavy metals can be immobilised when passing the limestone in cell 1.
- Manganese – According to the Vietnamese legal criteria for surface water quality standard, maximal manganese concentrations are allowed to be 1 mg/l. By treating wastewater in the pilot plant, concentrations of manganese fall below that value: Early in 2011, manganese concentrations in the effluent pipe

Tab. 1: Ergebnisse der chemischen Analytik des Bergbauwassers am Standort Dong Trieu ("Maximum" zeigt die Werte einer einzelnen Messstelle)

Parameter	von	bis	Maximum
pH-Wert	5	3	–
Mangan [mg/l]	1,7	9,9	49
Nickel [mg/l]	0,2	0,8	4
Aluminium [mg/l]	0,7	4,3	9
Eisen [mg/l]	0,5	8,3	32
Sulfat [mg/l]	120	624	3875

durchgeführt. Diese dienten der Konzeption und Planung der Pilotanlage, die 2010 von der VINACOMIN errichtet wurde (Abbildung 4). Die Anlage wurde von August 2010 bis Ende 2011 beprobt und optimiert. Messungen in der Regen- und Trockenzeit ermöglichten den Test und die Anpassung der Anlage an klimatisch bedingte Änderungen des Wasserdargebots und wechselnde hydrochemische Bedingungen. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für ein „Scale-up“ und eine Standortübertragung. Zudem kann VINACOMIN die für die Pilotanlage erforderlichen Kosten als Grundlage einer Finanzierungsplanung verwenden.

Die Laborversuche zeigten, dass die Kohlenstoffproduktion der Pflanzen in den Constructed Wetlands zu gering ist, um die dissimilatorische Sulfatreduktion auf eine für die Abwasserreinigung geeignete Aktivität zu bringen. Dagegen bewirkte der Einsatz von Kalkstein in Kombination mit verschiedenen organischen Abfallstoffen (Reisstroh, Stallung, Kompost) den Anstieg des pH-Wertes von <3,0 auf 7.2 und eine Verringerung des Sulfatgehalts des Wassers.

Als Zielkriterien für die Wasserbehandlung vor Ort in Dong Trieu wurden von der VINACOMIN die vietnamesischen Qualitätsstandards für Oberflächenwasser TCVN 5942 – 1995 festgelegt. Auf Grundlage der Laborergebnisse wurde die Constructed Wetland Pilotanlage am Standort Dong Trieu als Kombination aus Kalksteindrainage mit Kompostauflage (Modul 1) mit anschließendem horizontal durchströmtem bepflanztem Kiesfilter (Modul 2) geplant. Die Kompostauflage versorgt Pflanzen und Bakterien mit Nährstoffen; überschüssige Kohlen- und Nährstoffverbindungen werden in Modul 2 wieder abgebaut. In Modul 1 der Pilotanlage wurde eine Initialbepflanzung mit schwimmenden Wasserpflanzen (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, Dickstielige Wasserhyazinthe) gesetzt. Das Modul besitzt eine Fläche von 950 m<sup>2</sup>. Modul 2 wurde

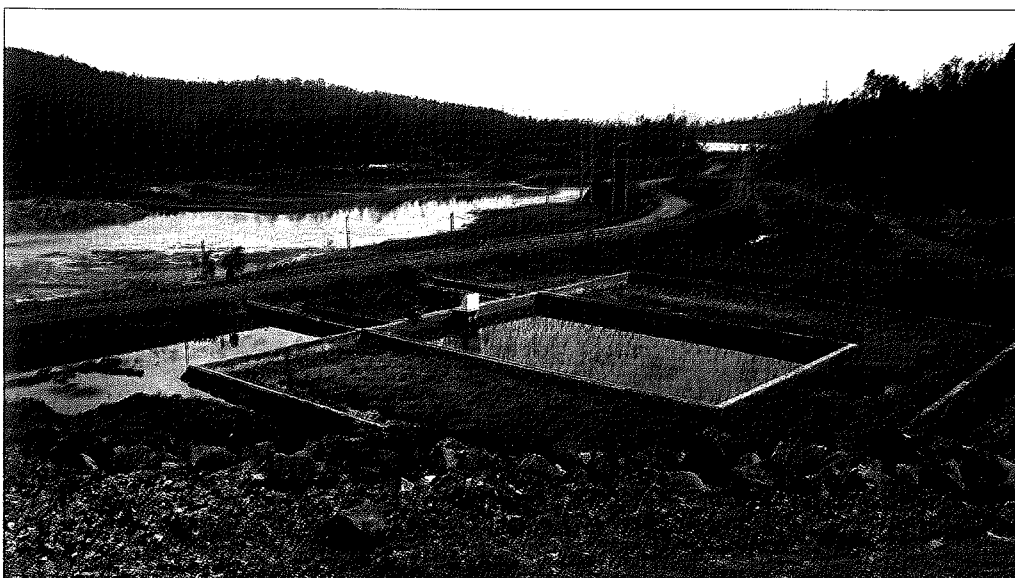


Fig. 4: Constructed Wetland pilot plant at Dong Trieu mining site, north-eastern Vietnam, March 2011 (Picture by Jochen Müller, RAME)

Abb. 4: Constructed Wetland Pilotanlage am Bergbaustandort Dong Trieu, Nordostvietnam, März 2011 (Foto: Jochen Müller, RAME)



were <0.3 mg/l. This decrease in concentrations was a general trend in the dry season (from August 2010 to November 2010, concentrations decreased from 4 to 7 mg/l to <2.5 mg/l).

- Iron – As for manganese, the concentrations of iron decreased within the dry season: It was already low in the effluent with 0.3 mg/l and further decreased within the treatment plant to 0.1 mg/l.
- Other heavy metals – The concentrations of zinc, lead, copper, nickel, cadmium, and arsenic were all significantly reduced within the pilot plant. However, their influent concentrations had already been below the limits of the Vietnamese legal criteria for surface water quality standard.
- Sulphate – Concentrations of sulphate decreased too, not only within the pilot plant, but already at the influent. It reached 150 mg/l in summer 2011 (compared to a maximal value of 3875 mg/l measured in the initial monitoring by VINACOMIN; Table 1).

Altogether, pollutant loads decreased during our measurement period. The main reason for this decrease is probably climatic differences between the dry and the wet season. During the dry season, water quality mainly depends on water from subsurface mine dewatering; during the wet season, dump seepage water plays the main role. It is also possible that changes from above to belowground mining impact the concentrations of pollutants in wastewater: Hard coal mining at Dong Trieu is changed from above to belowground mining and this change was nearly finished when measurements took place.

#### 4 Conclusions

It is possible to broaden the range of species used for the recultivation of hard coal mining sites in north-eastern Vietnam. The plant species currently used by VINACOMIN can be complemented by species that are native to Vietnam and spontaneously occur on the mining sites. Planting species in mixed plantations instead of monocultures is beneficial for soil formation, reduces the risk of dump fires and pest infestations, and supports biodiversity. For initial recultivation plantations, we suggest planting species along the edges of waste rock dump plateaus. These edge plantations should surround several plant groups (vegetation islands) planted on the plateau. To establish vegetation islands on slopes, it is advantageous if the slope has benches that can be planted. All plantations should initially be fertilized by adding organic additives.

By planting a broad range of species, diverse options for post-mining land use can be created. Several species that occur spontaneously on waste rock dumps provide timber or pharmacologically active substances. Moreover, diverse species mixtures are much more attractive to tourists than monoculture plantations.

In vitro propagation is useful to produce a lot of plant individuals for recultivation in a short space of time. This is especially beneficial for the reproduction of plant species that are not provided by nurseries. Moreover, in comparison to generative or vegetative breeding outdoor or in a greenhouse, in vitro propagation reduces loss rates.

We adapted the technology of Constructed Wetlands to the conditions of north-eastern Vietnam hard coal mining. Wastewater treatment in the pilot plant decreased all relevant parameters below the critical thresholds given by the Vietnamese legal criteria for surface water quality standard TCVN 5942-1995. Full-scale constructed wetlands with a capacity of several 100 m<sup>3</sup>/d can be built for a price of 45 €/m<sup>2</sup>. This price can be further reduced by using alternative construction materials. It is possible to adapt Constructed Wetlands to the conditions specific to different parts of a mining area (seepage water, domestic wastewater from company buildings, etc.). Generally, in the first year of operation, a Constructed Wetland should be monitored monthly in order to test operation efficiency in the course of a whole hydrological year. Afterwards, monitoring can be reduced to regular visual and func-

tion with Schilf (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) bepflanzt. Es besitzt eine Fläche von 600 m<sup>2</sup>.

Die Pilotanlage ist für einen Durchsatz von 100 m<sup>3</sup>/d Wasser ausgelegt. Der Wasserzufluss erfolgt im freien Gefälle. Die Regulierung der Durchsatzmengen wird durch Wehrbauwerke und Drosselung des Querschnittes der Zulaufrohre mittels stufenlos verstellbarer Klappen geregelt.

Das Monitoring an der fertiggestellten Pilotanlage begann im August 2010 und endete im Herbst 2011. Seitdem wurden monatlich Proben genommen und ausgewertet. Die Testparameter entwickelten sich wie folgt (Auswahl aller gemessenen Parameter):

- pH-Wert – Bei einem Durchsatz von maximal 4,4 m<sup>3</sup>/h stieg der pH-Wert von 4,5 auf 6,7. Das ermöglicht die Immobilisierung der Metalle bei der Passage der Kalksteindrainage.
- Mangan – Die vietnamesische Norm für Oberflächenwasser setzt den Grenzwert für Mangan auf 1 mg/l fest. Dieser Wert kann bei der Behandlung des Haldenwassers in der Pilotanlage unterschritten werden: Die Mangan-Konzentration im Ablauf der Anlage betrug zu Beginn des Jahres 2011 weniger als 0,3 mg/l. Wie auch für andere Parameter war die Zulaufkonzentration von Mangan in der Trockenzeit deutlich rückläufig (von August 2010 mit 4 bis 7 mg/l sank sie bis November 2010 auf <2,5 mg/l).
- Eisen – Der Gehalt an Eisen war Ende 2010, wohl ebenfalls in Folge der Trockenzeit, bereits im Zulauf der Anlage auf etwa 0,3 mg/l gefallen. Innerhalb der Anlage sank der Gehalt weiter auf 0,1 mg/l im Ablauf.
- Weitere Metalle – Die Konzentrationen von Zink, Blei, Kupfer, Nickel, Cadmium und Arsen konnten in der Pilotanlage deutlich reduziert werden. Allerdings lagen bereits die Zulaufkonzentrationen innerhalb der gesetzlichen Norm.
- Sulfat – Der Gehalt an Sulfat war von Beginn der Messungen an bereits im Zulauf rückläufig und befand sich im Sommer 2011 auf einem Niveau von etwa 150 mg/l (vergleiche dazu den Maximalwert von 3875 mg/l in Tabelle 1).

Insgesamt waren die Konzentrationen im Zulauf der Pilotanlage seit Beginn der Messungen für nahezu alle Parameter rückläufig. Die Ursachen dafür liegen wahrscheinlich in der Veränderung des Zuflusses von der Regen- zur Trockenzeit. In der Trockenzeit hängt die Wasserqualität stärker von den Sumpfungswässern des Steinkohletiefbaus, in der Regenzeit dagegen stärker vom Haldensickerwasser ab. Aber auch Veränderungen in der Wasserbeschaffenheit in Folge geänderter Abbautechnologien sind denkbar. So wurde im Abbaubereich Dong Trieu der Steinkohletagebau nahezu vollständig durch den Steinkohletiefbau ersetzt.

#### 4 Schlussfolgerungen

Der Einsatz einer breiten Palette an Pflanzenarten zur Rekultivierung stillgelegter Steinkohlenhalden in Vietnam ist möglich. Die bestehenden Rekultivierungspflanzungen können um weitere in Vietnam einheimische und natürlicherweise auf den Halden vorkommende Arten ergänzt werden. Wenn die Arten in gemischten Beständen gepflanzt werden, wird die Bodenbildung gefördert, die Gefahr von Haldenbränden gesenkt und die Artenvielfalt der Pflanzen und Tiere unterstützt. Gleichzeitig sinkt die Gefahr, dass Schädlinge Rekultivierungspflanzungen zerstören. Für die Initialbepflanzung der Plateauflächen von Abraumhalden eignet sich eine Kombination aus einem umlaufenden Vegetationssaum entlang des Plateaurands und innenliegenden Vegetationsinseln. An steilen Hängen werden, sofern vorhanden, Bermen genutzt um Vegetationsinseln anzulegen. In jedem Fall ist die Zugabe von organischen Zuschlagsstoffen im Bereich der Initialflächen zu empfehlen. Wenn eine breite Palette an Pflanzenarten für die Rekultivierung eingesetzt wird, bieten sich dementsprechend vielfältige Nutzungsmöglichkeiten: Mehrere der spontan auf den Halden wachsenden Pflanzenarten liefern Bauholz oder pharmakologisch

tion controls. The cooperation with VINACOMIN provides a basis for further research in the environmental sector and continued cooperation on an economic basis.

### Acknowledgements

The project on plant-based technologies for recultivation of waste rock dumps and mine water treatment within RAME was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) under the support codes 02WB0957 and 02WB0958 from 2008/01/01 to 2011/12/31. The authors coordinated the project together with Dipl.-Ing. Andreas Kuhne (BioPlanta GmbH). Scientific work was performed by UFZ-researchers Dipl.-Geoökol. Petra Finkenbein (choice of test species based on natural mining site vegetation, plateau study, slope study), Dr. Uwe Franko and Dr. Katrin Kuka (plateau study, soil analyses with respect to the choice of test species based on natural mining site vegetation, the plateau study, and the slope study), Dipl.-Biol. Nicole Winkler (leaf litter decomposition rate and resistance to drought), Dr. Peter Kuschik, Dipl.-Ing. Juliane Richter, and Alexander-Soran Al-Dahoodi (Constructed Wetlands). Moreover, BioPlanta-researchers Dipl.-Geogr. Alexander Litwinenko and Dr. Annika Schumann performed tests on Constructed Wetlands and in vitro propagation, and worked on the recultivation concept. Further scientific publications are currently in the making and will explain the individual experiments in more detail. We thank our partners at VINACOMIN and within RAME for cooperation.

### References/Literatur

- [1] BROEMME, K. & STOLPE, H. (2007): Developing environmental concepts for Vietnamese coal mines. – International Workshop Geocology and Environmental Technology, 25-27 October 2007 in Hanoi, Proceedings, Hanoi, Vietnam. Download: [http://www.ruhr-uni-bochum.de/ecology/FORSCHUNG\\_RAME.html](http://www.ruhr-uni-bochum.de/ecology/FORSCHUNG_RAME.html)
- [2] BILEK, F., BROEMME, K. & STOLPE, H. (2011): Active Treatment of Fe-, Mn- and Coaldust Contaminated Mine Water as Part of the RAME-Project in Vietnam. – 11<sup>th</sup> IMWA Congress „Mine water – Managing the challenges“, September 4<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> 2011, Aachen, Germany.
- [3] BROEMME, K. & STOLPE, H. (2011): Mining and Environment in Vietnam, Research Work of the Research Association Mining and Environment (RAME), Status Report 2011. – 1<sup>st</sup> international conference of advances in environmental engineering for natural resources mining. 22-24 June, Hanoi, Vietnam.
- [4] MARTENS, P. N., KATZ, T., AHMAD, S. & FUCHSSCHWANZ, M. (2011): Investigations on the stabilization of hard coal waste dumps in Vietnam. – World of Mining – Surface & Underground 5/2011: 265-274.
- [5] SCHLENSTEDT, J., BILEK, F. & KOCHAN, H.-J. (2010): Planning and building a complex mine water treatment plant for Vietnam. – World of Mining – Surface & Underground 3/2010:154-163.
- [6] MARTENS, P. N. et al. (2011): Staubminderung als ein Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung in vietnamesischen Steinkohletagebauen. – Tagungsband Energie und Rohstoff 2011 – Beitrag des Markscheidewesens, 7.-10.09.2011, Freiberg; Clausthal-Zellerfeld (Papierflieger Verlag) – ISBN 978-3-86948-160-9.
- [7] KUKA, K. & FINKENBEIN, P. (2011): Mondlandschaften werden recyclebar – ein ökologischer Ansatz für die Rekultivierung der Steinkohleabbaugebiete in Vietnam. – Forum der Geoökologie 22 (3): 17-21.
- [8] FINKENBEIN, P., HEILMEIER, H. & KLOTZ, S. (2010): Natural based technology for recultivation of mining areas – Potentials and Limitations. – “International Mining Conference 2010. Advanced Mining for Sustainable Development”, 115-121. Download: <http://www.vinamin.vn/modules.php?name=Content&op=details&mid=2381>
- [9] SALA, O. E. et al. (2000): Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. – Science 287: 1770-1774.
- [10] KUSCHIK, P., WIESSNER, A., MÜLLER, R. & KÄSTNER, M. (Hrsg.) (2005): Constructed Wetlands – Treating Wastewater with Genoses of Plants and Microorganisms.–UFZ Centre for Environmental Research Leipzig-Halle. Download: [http://www.ufz.de/data/constructed\\_wetlands3515.pdf](http://www.ufz.de/data/constructed_wetlands3515.pdf).

### Danksagung

Das hier beschriebene Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 02WB0957 und 02WB0958 im Zeitraum vom 1.1.2008 bis 31.12.2011 gefördert. Die Autoren koordinierten das Projekt gemeinsam mit Dipl.-Ing. Andreas Kuhne (BioPlanta GmbH). Die wissenschaftlichen Arbeiten wurden von den UFZ-Mitarbeitern Dipl.-Geoökol. Petra Finkenbein (Erfassung der Haldenvegetation, Plateau- und Hangversuch), Dr. Uwe Franko und Dr. Katrin Kuka (Plateauversuch, Bodenanalysen zu: Erfassung der Haldenvegetation, Plateau- und Hangversuch), Dipl.-Biol. Nicole Winkler (Versuche zu Streuabbau und Trockenresistenz), Dr. Peter Kuschik, Dipl.-Ing. Juliane Richter und Alexander-Soran Al-Dahoodi (Constructed Wetlands) sowie von Dipl.-Geogr. Alexander Litwinenko und Dr. Annika Schumann (BioPlanta GmbH; Constructed Wetlands, In-vitro-Versuche, Rekultivierungskonzept) durchgeführt. Es sind weitere Publikationen in Vorbereitung, in denen die einzelnen Experimente im Detail dargestellt werden. Wir danken unseren Kooperationspartnern bei VINACOMIN und RAME für die Zusammenarbeit.