

Kostengünstige passive Nachsorgelösung mit einem Constructed Wetland auf der Grundlage von Prognosen der Entwicklung des Flutungswassers der Grube Pöhla

Gunter Kießig¹, Christian Kunze¹, Annette Küchler¹, Anja Zellmer¹, Jürgen Meyer², Margarete Kalin³

¹ WISUTEC Wismut Umwelttechnik GmbH, Jagdschänkenstraße 33, 09711 Chemnitz, Email: c.kunze@wisutec.de

² Wismut GmbH, Jagdschänkenstraße 33, 09711 Chemnitz, Email: info@wismut.de

³ Boojum Research Ltd, Toronto, Canada, Email: margarete.kalin@utoronto.ca

In der seit Ende 1995 gefluteten Urangrube Pöhla der Wismut GmbH sind natürliche Verdünnungsprozesse durch spezifische hydrochemische Prozesse überlagert. Diese führen zur quantitativen Demobilisierung des Urans, während Radium und Arsen weiterhin emittiert werden. Die Behandlung der anfallenden Grubenwässer in einer konventionellen Wasserbehandlungsanlage führt aufgrund der abnehmenden Schadstofffrachten zu zunehmenden spezifischen Kosten, so dass der Übergang zu einer alternativen Nachsorgelösung erforderlich ist.

Seit 1998 werden an einer Pilotanlage intensive Untersuchungen zur passiven Behandlung des Flutungswassers mittels eines Constructed Wetland durchgeführt. Der Durchsatz der Pilotanlage variierte zwischen $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ bis $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Ausgehend von den stabil positiven Ergebnissen erfolgte 2003 die Planung und Errichtung einer Anlage, mit der das gesamte Flutungswasser der Grube Pöhla-Tellerhäuser (ca. $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) passiv behandelt werden kann. Zeitpunkt der Inbetriebnahme ist Juni 2004.

1 Einleitung

Während und nach der Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus und der Aufbereitung der gewonnenen Erze in den Freistaaten Thüringen und Sachsen der Bundesrepublik Deutschland fallen mit toxischen Elementen und Radionukliden belastete Wässer an, die nicht unbehandelt in die Vorflut eingeleitet werden können. Dazu zählen Wässer aus gefluteten Gruben, Frei- und Porenwässer aus Absetzbecken für Tailings sowie Haldensickerwässer.

Typische Inhaltsstoffe der belasteten Wässer sind neben den Radionukliden Uran und Radium vor allem Arsen, Eisen, und Mangan sowie weitere Schwermetalle.

Zur Abtrennung der Kontaminanten werden gegenwärtig konventionelle Wasserbehandlungstechnologien, wie z. B. die selektive Fällung und Flockung und der Ionenaustausch eingesetzt. Die Kosten für die Behandlung dieser Wässer werden ca. 1 Mrd. € betragen.

Infolge der Sanierungsarbeiten kommt es zu Veränderungen im Chemismus und in der Menge der zu behandelnden Wässer, die mit einer Senkung der abzutrennenden Radionuklid- und Schwermetallfrachten verbunden sind.

Aufgrund der geringer werdenden Frachten steigen trotz Optimierung die spezifischen Kosten für die Abtrennung einer Schadstoffeinheit der konventionellen Wasserbehandlung.

Passive, auf biologischen und physikochemischen Prozessen basierende Verfahren stellen ab einem bestimmten Niveau der abzutrennenden Frachten eine kostengünstige Alternative gegenüber konventionellen Verfahren dar. Die Abbildung 1 verdeutlicht diese Aussage.

Eine wichtige Aufgabe besteht somit in der Entwicklung und Einführung alternativer "low cost"-Technologien.

Die WISMUT GmbH und die WISUTEC GmbH befassen sich daher seit 1998 intensiv mit der Entwicklung von passiv/biologischen Verfahren zur Behandlung von Wässern aus der Sanierung des Uranerzbergbaus.

Dabei werden folgende Technologien einbezogen:

- Filter aus reaktivem Material zur Behandlung von Oberflächenwasser,
- permeable reaktive Wände zur Behandlung von Grundwasser,

- Constructed Wetlands.

Im folgenden Beitrag wird auf die Entwicklung und Einführung eines Constructed Wetlands zur Behandlung von Grubenwasser des ehemaligen Bergbaustandortes Pöhla der WISMUT GmbH eingegangen.

2 Ausgangssituation am Standort Pöhla

Pöhla ist ein Bergbaustandort der WISMUT im Westen des Erzgebirges.

Im September 1995 wurde mit dem Austritt der Grubenwässer an der Oberfläche die Flutung der Grube abgeschlossen. Die Grubenwassermenge betrug ca. $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Das Grubenwasser war mit Uran, Radium, Arsen, Mangan und Eisen belastet, so dass es ohne vorherige Behandlung nicht in den Vorfluter

eingeleitet werden konnte. Die Behandlung erfolgt in einer konventionellen Wasserbehandlungsanlage durch selektive Fällung und Flockung der Kontaminanten.

Die Tabelle 1 zeigt die Entwicklung der Konzentrationen von Uran, Radium, Arsen und Mangan im Zeitraum 1995 bis 2004.

Es wird deutlich, dass die Mangan- und Urankonzentrationen vergleichsweise schnell abnahmen und bereits 1998 unterhalb der behördlichen Grenzwerte für die Einleitung in den Vorfluter lagen. Die Arsen- und Radiumkonzentrationen dagegen stiegen im gleichen Zeitraum an. Sie überschreiten gegenwärtig die Grenzwerte noch erheblich.

Mittel- bis langfristig wird von einer Aufrechterhaltung behandlungsrelevanter Stoffkonzentrationen ausgegangen. Der zum stabilen Betrieb der Wasserbehandlungsanlage Pöhla erforderliche

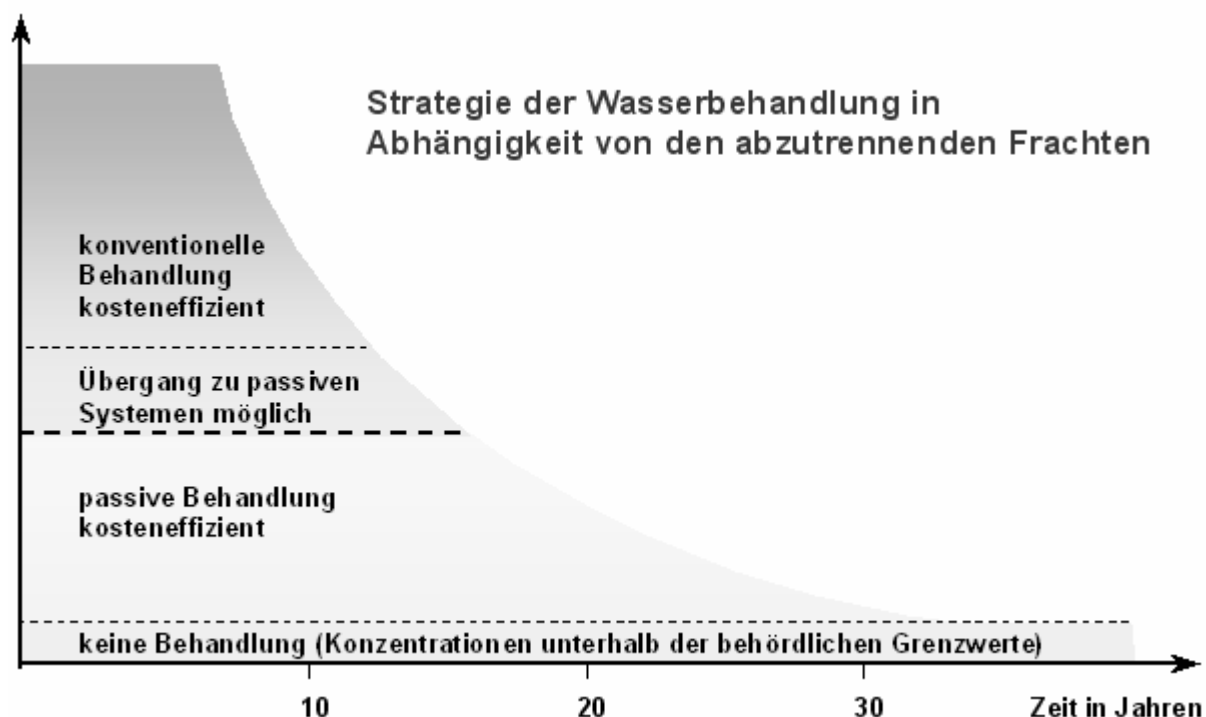


Abb. 1: Effizienz konventioneller und passiver Wasserbehandlungssysteme.

Tab. 1: Entwicklung relevanter Schadstoffkomponenten im Grubenwasser.

Element/Einheit	Grenzwert	1995	1997	1998	2004
Mn $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2,0	3,68	1,6	1,14	0,3
As $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	100	487	2017	2200	2375
U $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,2	1,75	0,2	0,19	0,04
Ra-226 $\text{mBq} \cdot \text{L}^{-1}$	300	1057	3910	4520	3532

Aufwand kann jedoch trotz geringer werdender Belastung des Wassers nicht beliebig verringert werden.

Die spezifischen Kosten der Wasserbehandlung betragen ca. $4 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$, demzufolge fallen jährlich Kosten von 0,6 Mio. € an. Die Kosten der Wasserbehandlung erfordern somit aus wirtschaftlicher Sicht die Einführung einer effizienten Nachsorgelösung für einen Behandlungszeitraum von ca. 15 Jahren.

3 Pilotanlage Pöhla

Um Optionen einer kostengünstigen passiven Behandlung des Grubenwassers untersuchen zu können, wurde 1998 eine Pilotanlage eines Constructed Wetlands errichtet und in Betrieb genommen. Der Aufbau erfolgte in einem am Standort vorhandenen Betonbecken. Der aktuelle Aufbau der Pilotanlage wird in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Seit 1988 wird die Pilotanlage mit einem mittleren Durchsatz von $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ betrieben. Bis April 2004 wurden mehr als 90.400 m^3 Grubenwasser passiv/biologisch behandelt.

Das Constructed Wetland umfasst fünf durch Trennwände unterteilte Reaktionszonen und eine vorgeschaltete Belüftungskaskade.

Das zu behandelnde Wasser passiert die einzelnen Stufen im eigenen Gefälle über Überläufe und am Beckenboden verlegte Drainagen.

In der Belüftungskaskade erfolgt die Oxidation des im Flutungswasser gelösten zweiwertigen

Eisens. Im neutralen Flutungswasser fällt Eisenhydroxid aus, an das adsorptiv Arsen und Radium gebunden wird. Die Eisenhydroxidflocken sedimentieren in den Becken 1 und 2 des Constructed Wetlands. Das Becken 2 ist mit speziellen Einbauten ausgerüstet.

Anschließend passiert das Flutungswasser zwei mit Kies und Schotter unterschiedlicher Körnung gefüllte Becken, wobei das Wasser am Beckenboden vom ersten zum zweiten Becken geführt wird. Das Material dient als Besiedlungsfläche für Mikroorganismen und als Filter.

Um die Ausbildung von Biofilmen zu fördern, wurde die Oberfläche des zweiten Kiesbeckens mit Helophyten bepflanzt.

Die letzte Stufe der Pilotanlage bildet ein bepflanztter Bodenfilter. Der Reaktionsraum ist mit Kompost und Kies gefüllt. Die Durchströmung erfolgt horizontal.

Für die Bepflanzung des zweiten Kiesbeckens und des Bodenfilters wurden nach vorlaufenden Tests einheimische Helophyten ausgewählt: *Typha latifolia*, *Juncus inflexus*, *Juncus effusus*, *Phragmites communis* und *Iris pseudacorus*. Neben der Funktion, mikrobiologische Prozesse zu aktivieren, wurde die Aufnahme von Schadstoffen in die pflanzliche Biomasse untersucht.

Dem Constructed Wetland nachgeschaltet, sind Filter mit reaktiven Materialien zur Reduzierung von Restkonzentrationen von Arsen und Radium. Eine reale Ansicht enthält die Abbildung 3.

Der aktuelle Aufbau der Pilotanlage ist das Er-

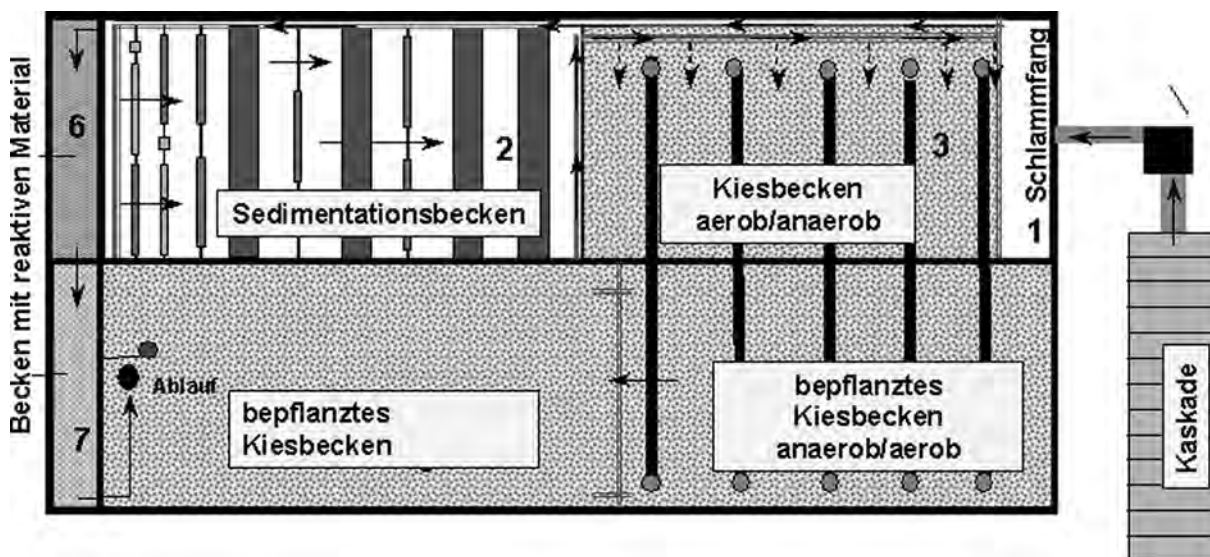


Abb. 2: Schematische Darstellung des Aufbaus der Pilotanlage.

gebnis einer konsequenten Optimierung des Behandlungsprozesses. Die letzten verfahrenstechnischen Änderungen wurden Anfang des Betriebsjahres 2002 vorgenommen.

Der Hauptanteil der Schadstoffabtrennung erfolgt in den Prozessstufen Oxidation, Fällung und Sedimentation/Filtration. Parallel zur Eisenabtrennung erfolgt eine effektive Reduzierung der Konzentrationen von Arsen und Radium. Eine nahezu vollständige Eisenabtrennung wurde im Zeitraum 1998 bis 2001 erst nach der Filtration des zu behandelnden Grubenwassers im mit Kies gefüllten Becken 3 erreicht. In diesem Zeitraum waren im vorgelagerten Sedimentationsbecken, das Becken 2, keine Einbauten installiert.

Eine weitere Reduzierung der Arsen- und Radium-226-Konzentrationen erfolgt über biologische und physiko-chemische Prozesse wie Adsorption und Akkumulation in den bepflanzten Stufen. Prozentual höhere Abtrennraten werden dabei für Ra-226 erreicht. Bei Eisen wird in den Sommermonaten eine geringfügige Freisetzung im Becken 5, dem bepflanzten Bodenfilter, analysiert.

Innerhalb des Betriebszeitraumes 1998 bis 2001 konnte eine hohe Stabilität und Zuverlässigkeit der Prozessstufen nachgewiesen werden. Trotz der guten Ergebnisse überschritten jedoch die Ablaufwerte der Pilotanlage für Radium-226 und Arsen die für den Standort behördlich genehmigten Einleitwerte in die Vorflut.

Im Hinblick auf die sichere Einhaltung der behördlichen festgelegten Ablaufwerte wurden Alternativen zur bestehenden Technologie entwickelt und erprobt:

- Im Becken 2 der Pilotanlage wurden spezielle Filter- und Aufwuchsmaterialien installiert,



Abb. 3: Ansicht der Pilotanlage Pöhla.

- Versuche zur Anzucht von makrophytischen Algen zur Radiumabtrennung sowie zum
- Einsatz eines Filters mit reaktiven Materialien wurden durchgeführt.

Um das Aggregieren und die Sedimentation der Eisenflocken zu fördern, wurden im April 2002 folgende Einbauten im Becken 2 installiert:

- bepflanzte Schwimmmatten(deutsches Produkt)
- Koskosmatten (deutsches Produkt)
- AQUA-mats® (amerikanisches Produkt, Polymergewebe)

Neben der Funktion als Filtermedium stellen die Einbauten und das Wurzelsystem der bepflanzten Schwimmmatten eine ideale Besiedlungsfläche für Algen und Bakterien (Periphytonträger) dar. Der Biofilm trägt zur Vergrößerung der wirksamen Oberfläche für die Rückhaltung der feindispersen Eisenflocken bei. Weiterhin verfügt der Biofilm nach Literaturangaben über ein hohes Akkumulations-/Sorptionspotential für Arsen und Radium. Mit dem zusätzlichen Einbau der bepflanzten Schwimmmatten, Koskosmatten und AQUA-mats® konnte die Schadstoffabtrennung im Bereich des Beckens 2 deutlich verbessert werden. Obwohl nur eine begrenzte Anzahl von Testeinbauten installiert wurde, stieg die prozentuale Schadstoffabtrennung für Arsen um ca. 21 %, für Ra-226 um ca. 13 % und für Eisen um ca. 45 % an.

Ausgehend von vorlaufenden Tests wurde bei der Planung der Pilotanlage davon ausgegangen, dass die eingesetzten Helophyten neben der Unterstützung mikrobiologischer Prozesse ebenfalls zur Schadstoffaufnahme beitragen. Überschlägige Berechnungen ergeben jedoch, dass lediglich ca. 1 % des in den Becken 4 und 5 abgetrennten Radiums und Arsens in der sich erneuernden und erntebaren oberirdischen Biomasse der Helophyten festgelegt sind.

Ausgehend von diesen Ergebnissen werden Alternativen zu bepflanzten Bodenfiltern untersucht. Vorrangig besteht die Aufgabe, sowohl die Radiumabtrennung als auch die Arsenabtrennung über biologische Effekte zu intensivieren. Mit diesem Ziel wurden 2000 Untersuchungen zum Einsatz von makrophytischen Algen aufgenommen. Die Akkumulation von Radium-226 durch unterschiedliche Spezies von Algen ist Gegenstand intensiver Untersuchungen. In Untersuchungen von Boojum Research Ltd. konnte nachgewiesen werden, dass einzelne Arten von

Armleuchteralgen (Characeae) in der Lage sind, wesentlich höhere Aktivitäten an Radium zu akkumulieren.

Zum Nachweis der Radiumabtrennung mittels Characeen wird seit dem Herbst 2002 eine Containeranlage, bestehend aus 4 Container á 1m² Fläche, betrieben. Die vorliegenden Daten belegen, dass durch die Passage eine durchschnittliche Radiumabtrennung von ca. 680 mBq·L⁻¹ erreicht wird. Die mittlere Zulaufkonzentration im Untersuchungszeitraum beträgt ca. 1920 mBq·L⁻¹. Es wurde der Nachweis erbracht, dass Characeae sicher in der Lage sind, Radium und Arsen aus dem Grubenwasser abzutrennen. Die in der Biomasse ermittelten Schadstoffgehalte sind denen höherer Pflanzen weit überlegen.

Die Technologien der Oxidation, Fällung und Sedimentation sowie der Schadstoffabtrennung durch spezielle Einbauten in Freiwasserbereichen können als gesichert angesehen werden.

Um die Betriebssicherheit eines Constructed Wetlands auch in Zeiträumen sicherzustellen, bis algen- oder pflanzenbesetzte Areale ihre volle Leistungsfähigkeit erreicht haben oder saisonale Schwankungen in der Abtrennleistung auftreten, müssen zusätzliche Maßnahmen zur Einhaltung der Ablaufwerte in die Vorflut ergriffen werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden von der WISUTEC reaktive Materialien speziell zur Abtrennung von Radium und Arsen aus bergbaulich kontaminierten Wässern entwickelt und erprobt.

Aus den Untersuchungen wurden zwei reaktive Materialien für die weitere Erprobung am Standort Pöhla ausgewählt. Dabei handelt es sich einmal um das Material „Ferosorp“, einem Eisen(III)hydroxid-Granulat. Das Material ist insbesondere für die Arsenabtrennung geeignet. Das zweite Material trägt die Produktbezeichnung „Hedulat“. Es handelt sich dabei ebenfalls um ein Granulat, bestehend aus in eine poröse Matrix eingebundenem Schwerspat. Das Produkt ist speziell auf die Abtrennung von Radium ausgerichtet.

Im Jahr 2001 wurde ein separater Versuchsabschnitt zur Abtrennung von Restkonzentrationen von Arsen und Ra-226 im Ablauf der Pilotanlage in Betrieb genommen. Diese Stufe ist im Schema der Pilotanlage als Behandlungsbecken 6 und 7 dargestellt.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum von einem Jahr konnte die Arsenkonzentration von durchschnittlich 452 µg·L⁻¹ auf Werte

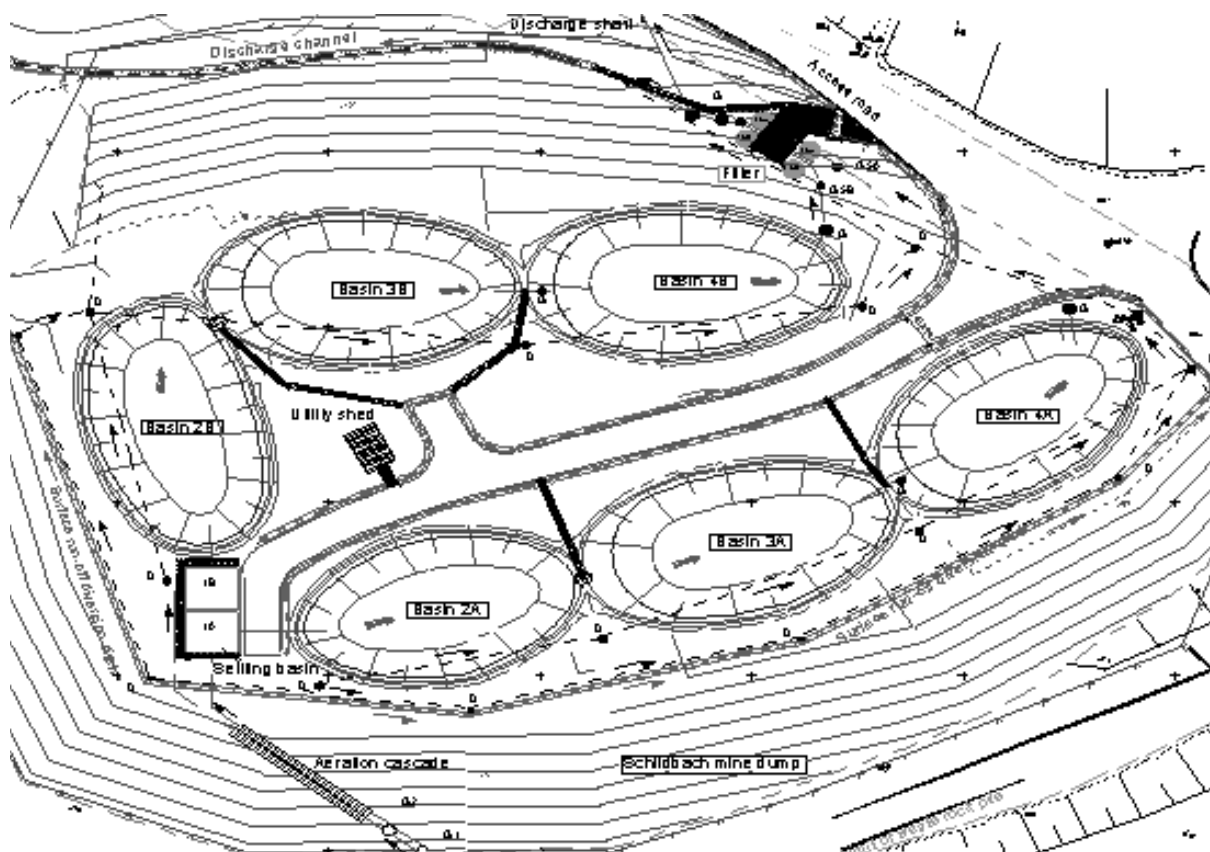


Abb. 4: Planerische Darstellung des großtechnischen Constructed Wetlands.

$< 30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ reduziert werden. Dies entspricht der Nachweisgrenze des verwendeten Analyseverfahrens. Ebenfalls kontinuierlich erfolgte eine Reduzierung der Aktivitätskonzentration von Radium. Es wurde eine Abreicherung von durchschnittlich $1210 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ auf $16 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ erreicht. Schwankungen der Gehalte im Zulauf hatten keinen Einfluss auf das Behandlungsergebnis. In der gesamten einjährigen Betriebszeit traten keine Veränderungen in der Abtrennleistung der reaktiven Materialien auf.

Nachdem die Untersuchungsergebnisse aus dem beschriebenen, umfangreichen Pilotversuch den Übergang von aktiven, konventionellen Verfahren zu passiven Verfahren der Wasserbehandlung rechtfertigen, wurde mit der Planung und dem Bau des großtechnischen Wetlands zur Behandlung der gesamten Grubenwassermenge ($17 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) begonnen. Die Inbetriebnahme erfolgt im Juni 2004. Eine planerische Darstellung enthält die Abbildung 4, eine fotografische Darstellung die Abbildung 5.

Die gesamte Anlage ist zweistraßig aufgebaut, um für Reparaturen und Instandhaltungsmaßnahmen eine Straße außer Betrieb nehmen zu können.

Das Grubenwasser durchströmt im ersten Prozessabschnitt eine Belüftungskaskade.

Die Becken 1 A und 1 B sind Sedimentationsbecken, in denen Lamellenklärer eingebaut sind. In den Becken erfolgt die Abtrennung der Eisenhydroxidschlämme. Die Becken müssen einmal im Jahr beräumt werden.

Den Sedimentationsbecken nachgeschaltet sind die Becken 2 A und 2 B, in denen mit Helophy-

ten bepflanzte Schwimmmatten und AQUA-mats® installiert sind. Die Fläche der Becken beträgt ca. 600 m^2 .

In den Becken 3 A und B sowie 4 A und B werden Characeae zur Reduzierung der Radium- und Arsenkonzentration auf einleitfähige Werte angesiedelt. Der Wasserstand in den Becken kann in einem weiten Bereich verstellt und somit dem jeweiligen Wachstum der Algen angepasst werden. Die Gesamtfläche der Becken beträgt ca. 1.200 m^2 .

Alle Becken wurden als Erdbecken mit einer Foliendichtung errichtet. Die Dichtheit der Becken wird durch Drainagen, die unterhalb der Becken verlaufen, überwacht.

Die Filter F 5 A / B und F 6 A / B sind mit reaktiven Materialien gefüllt. Das Wasser durchströmt zunächst den mit Ferrosorp gefüllten Filter zur Arsenabtrennung und anschließend den mit Hedulat gefüllten Filter zur Radiumabtrennung.

Über einen Ablaufkanal gelangt das behandelte Grubenwasser in den Vorfluter.

Die spezifischen Kosten für die Behandlung von Grubenwasser werden in der Anfangsphase, in der biologische Prozesse noch keinen Beitrag zur Schadstoffabtrennung liefern, ca. $1 \text{ €}\cdot\text{m}^{-3}$ betragen. Sie werden auf unter $0,2 \text{ €}\cdot\text{m}^{-3}$ sinken, wenn die in den Becken 2, 3 und 4 stattfindenden biologischen Prozesse, die Leistungsfähigkeit erreicht haben, die im Pilotversuch nachgewiesen werden konnte.



Abb. 5: Großtechnisches Constructed Wetland.