

Aufbereitungsrückstände des Uranerzbergbaues – Konsolidation und Stoffaustrag

Dipl.-Ing. Klaus-Dieter Beyer,
Dr.rer.nat. Ralf Herrmann,
Dipl.-Ing. Frank Ohlendorf,
Dipl.-Ing. Thilo Sembdner,
PD Dr.-Ing. Peter-Andreas von Wolffersdorff,
BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH,
Dr.-Ing. Ivo Herle, Akademie der Wissenschaften der Tschechischen Republik, Institut für theoretische und angewandte Mechanik,
Prof. Dr.-Ing. Dimitrios Kolymbas, Universität Innsbruck, Institut für Geotechnik und Tunnelbau

Im Ergebnis von Erzaufbereitungen fielen Rückstände an, die aus Wasser sowie absetzbaren Stoffen bestanden und in Industriellen Absetzanlagen (Sedimentationsbecken) eingelagert werden.

Die in Sachsen im Zeitraum von 1946 bis 1990 im Ergebnis der Uranerzaufbereitung angefallenen Rückstände wurden so gelagert. Diese mechanisch und chemisch beeinflussten Rückstände bedürfen einer dauerhaften Verwahrung. Der Anspruch nach Dauerhaftigkeit erfordert u.a. die wissenschaftlich-technische Auseinandersetzung mit stationären und instationären Prozessen innerhalb der Ablagerung.

Die in den Absetzbecken lagernden feinkörnigen Aufbereitungsrückstände (Tailings) unterliegen langfristigen Konsolidierungsvorgängen, instationären Durchsickerungen und geochemischen Reaktions- und Stofftransportvorgängen. Die damit verbundenen Veränderungen der Tailings werden unter dem Oberbegriff „Alteration“ zusammengefaßt.

Für gegenwärtige und künftige behördliche Entscheidungen sind die Kenntnisse zur Alteration von grundlegender Bedeutung. Deshalb wurde vom Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben finanziert. Die Schwerpunkte sind:

- ⇒ Charakterisierung der Industriellen Absetzanlagen des Uranbergbaues
- ⇒ Konsolidation und Stoffaustrag als Grundlagen der Alteration
- ⇒ Modellierung von Tailingsablagerungen
- ⇒ Darstellung eines Rechenbeispiels

Die in Sedimentationsbecken lagernden feinkörnigen Erzaufbereitungsrückstände „(Tailings)“ unterliegen verschiedenen mechanischen und chemischen Prozessen, die unter dem Begriff „Alteration“ zusammengefaßt werden. Die Kenntnis der Alterationsvorgänge ist Grundlage für technische und behördliche Entscheidungen zur dauerhaften Verwahrung solcher Industriellen Absetzanlagen. Hauptsächlich wird die Alteration durch zeitabhängige Setzungen infolge Konsolidation geprägt. Die Stofftransporte sind an den Porenwasser- ausstrag gekoppelt. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Industriellen Absetzanlagen des Uranerzbergbaues in Sachsen und beschreibt die wesentlichen Grundlagen zur Konsolidation und zum Stoffaustrag, die Modellbildung und Lösungswege. Es werden die Ergebnisse von Beispielrechnungen dargestellt und bewertet. Schließlich werden rechnerische Prognosen zur Setzungsentwicklung und zum Stoffaustrag von vollständig wassergesättigten Tailings erstellt.

- ⇒ Setzungsprognosen der Tailingsoberflächen und Prognosen für den Stoffaustrag
- ⇒ Darstellung des weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfes.

Industrielle Absetzanlagen des Uranerzbergbaues

Europaweit einmalig ist die große Anzahl von Absetzanlagen des Uranbergbaues in Sachsen.

Die Absetzanlagen der ehemaligen Gebiete des Uranerzbergbaues befinden sich im Erzgebirge in der Umgebung von Zwickau, Aue und Dresden. Es existieren 18 Absetzanlagen, die in der Regel noch keine dauerhafte Abdeckung erhalten haben.

Die Industriellen Absetzanlagen bestehen in Abhängigkeit der morphologischen Situation aus einem oder mehreren Absperrbauwerken, von deren Kronen aus das Tailings-Wasser-Gemisch in das Becken eingespült wurde. Das Freiwasser wurde mittels Entlastungsanlagen (Mönche bzw. Pumpen) abgezogen. Die Tailings verblieben in allen Fällen im Beckenraum. Der gegenwärtige Zustand einer IAA ist in Bild 1 dargestellt. Die Sedimentation der Tailings erfolgte in den in Bild 1 gezeigten drei Tailingsbereichen, die sich aus unterschiedlichen Ablagerungen der Körngrößen vom Groben (Sandkorn) zum Feinen (Tonkorn) darstellen. Die Ausbildung und Lage der Bereiche innerhalb eines Beckens sind von der Einspültechnologie abhängig.

Die Industriellen Absetzanlagen in Sachsen umfassen eine Gesamtfläche von ca. 350 ha und beinhalten etwa 63 Mill m³ Uranerztailings. In der Regel sind die Tailings nach Ableitung des Freiwassers mit Asche, Müll, Bodenaushub, Ausbruch- und Haldenmaterial überschüttet worden. Nur eine geringe Anzahl der Anlagen ist noch mit Freiwasser bedeckt. Die Oberflächen dieser aufgelassenen Absetzanlagen sind wild bewachsen, befinden sich in der Sanierung oder werden gewerblich als Mülldeponien, Waldflächen, Lagerplätze bzw. Freizeitanlagen genutzt.

Die Belastungsgeschichte der Tailingsablagerungen setzt sich aus der Einspülphase, aus den sich anschließenden mehrjährigen Liegezeiten ohne äußere Belastungsänderung sowie aus danach folgenden Zeiträumen der Überschüttung mit und ohne Pausen zusammen. Trotz der langen Liegezeiten sind die Tailings der Ton-/Schluffraktion in der Regel noch vollständig bzw. nahezu wassergesättigt.

Die entscheidenden Einwirkungen auf die Alteration sind: die Belastungsgeschichte der Tailings, die Strömungsverhältnisse in den Tailings, die Entwässerungsbedingungen in den Auflagerflächen, die geochemische Ausgangssituation sowie die Nutzung nach der Stilllegung.

Konsolidation und Stoffaustrag

Die Alteration ist hauptsächlich geprägt durch zeitabhängige Setzungen der wassergesättigten Tailings (Konsolidation) infolge Eigenlast bzw. Überschüttung und dem damit verbundenen Porenwasseraustrag, mit dem Stofftransporte und chemische Stoffumsetzungen gekoppelt sind.

Die Komplexität der Alteration erfordert es, Konsolidationsvorgänge mit belastungsabhängiger Steifigkeit und dichteabhängiger Durchlässigkeit des Tailingsmaterials zu modellieren.

Die klassische Konsolidationstheorie mit ihren zu restriktiven Annahmen der konstanten Durchlässigkeit und des linear-elastischen Spannungs-Verformungs-Verhalten des Bodens ist hierfür ungeeignet.

Da es nur auf der Grundlage dieser zu starken Vereinfachungen analytische Lösungen gibt (z.B. nach TERZAGHI/FRÖHLICH), mußten die Konsolidationsvorgänge in den Tailings von vornherein numerisch nach der Methode der finiten Elemente (FEM) berechnet werden.

Solche numerischen, nichtlinearen Konsolidationsberechnungen, die auch Mehrdimensionalität einschließen, basieren auf der numerischen Kopplung der Gleichung für die Masseerhaltung des Wassers unter Berücksichtigung des DARCYschen Gesetzes und einem entsprechenden Stoffgesetz für das Spannungs-Verformungs-Verhalten des Korngerüsts der Bodenteilchen.

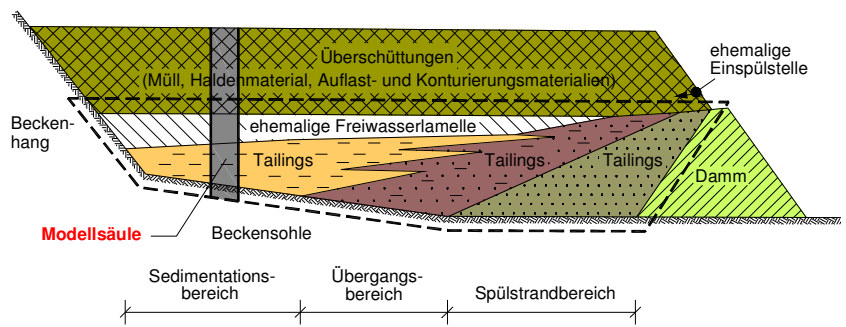


Bild 1. Schnitt durch eine Industrielle Absetzanlage (IAA) mit Überschüttungen

Unter der Annahme vollständiger Wassersättigung liegt ein Zweiphasensystem vor, bestehend aus Bodenteilchen (Korngerüst) und Wasser. Die totale Spannung σ^{tot} setzt sich somit aus der Korngerüstspannung σ und dem Porenwasserdruck p zusammen.

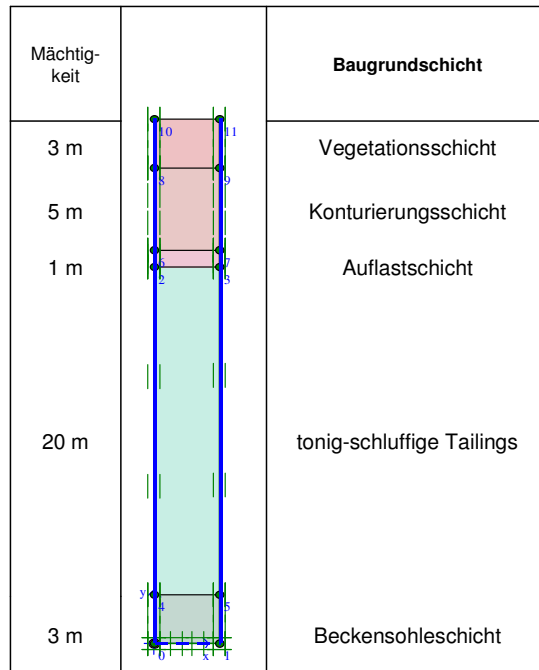
$$\sigma^{\text{tot}} = \sigma + p \dots\dots\dots [1]$$

In umfangreichen Voruntersuchungen wurden verschiedene bodenmechanische Stoffgesetze im Hinblick auf ihre Eignung für die Konsolidationsvorgänge von Tailings bewertet. Im Ergebnis zeigte sich, daß das nichtlineare elasto-plastische Modified-CAM-CLAY-Modell die starke Zusammendrückbarkeit der Tailings ausreichend genau beschreibt. Bei den Konsolidationsvorgängen in den IAA ist für große Bereiche eine eindimensionale Betrachtung (Säulenmodelle) ausreichend. Es liegen dann die gleichen Randbedingungen wie im Ödometerversuch vor. Da bei allen simulierten Belastungsvorgängen, wie z.B. Einspülen der Tailings, Wasserauflast oder Überschüttung nur ausschließlich Setzungen entstehen, ist das Erstbelastungsverhalten der Tailings maßgebend. Unter den Randbedingungen des Ödometerversuches reduziert sich die ansonsten komplexe mathematische Struktur des elasto-plastischen Stoffmodells auf das folgende einfache Kompressionsgesetz.

$$e - e_0 = -\lambda \cdot \ln\left(\frac{p'}{p_0}\right) \dots\dots\dots [2]$$

Die Steifigkeit wächst gemäß [2] mit zunehmendem Druckniveau p' logarithmisch an, wobei p_0 der Referenzdruck ist. Der Steifigkeitsbeiwert λ – auch Kompressionsindex genannt – bestimmt die Größe der Zusammendrückbarkeit des Materials. Die Porenzahl e_0 stellt die Anfangsporenzahl vor der Zusammendrückung beim Referenzdruck p_0 dar und e ist die Porenzahl bei dem entsprechenden Druckniveau.

Bild 2. Säulenmodell für eine 20 m mächtige Tailingschicht



Legende Randbedingungen

Stützungen:

• | horizontal unverschiebliche Auflager

⊠ horizontal und vertikal unverschiebliche Auflager

Fließbränder:

Säulenseiten:

| geschlossene Konsolidierungsbränder

Säulenboden:

- - offener Konsolidierungsrand

Für numerische Konsolidationsberechnungen kann die Wasserdurchlässigkeit auch abhängig von der Dichteänderung eingeführt werden. Für die Konsolidationsberechnungen der Tailings wurde folgender Ansatz für eine porenzahlabhängige Durchlässigkeit verwendet:

$$\log k = \log k_0 + \frac{\Delta e}{c_k} \dots\dots\dots [3]$$

Dabei ist Δe die Änderung der Porenzahl und k die Durchlässigkeit während der Konsolidation. Der Eingabewert k_0 für die Durchlässigkeit gilt für den Zeitpunkt zu Beginn der Konsolidationsberechnung. Der Parameter c_k wurde gemäß der im PLAXIS-Manual gegebenen Empfehlung gleich dem Kompressionsbeiwert C_c angenommen.

Die an die Konsolidationsvorgänge gekoppelte Freisetzung von Porenwasser mit seinen Inhaltsstoffen bewirkt den Stoffaustrag aus den Tailings. Die maßgebenden Eingangsgrößen für seine Abschätzung sind die Menge des verdrängten Porenwassers und die Konzentrationen der im Porenwasser gelösten Stoffe. Die ausgetragene Porenwassermenge ergibt sich aus der Porenzahländerung Δe bei vorausgesetzter voller Wassersättigung. Die Konzentrationen der Stoffe im Porenwasser sind für den IST-Zustand analytisch bestimmbar. Für

die Berechnung des Stoffaustrages notwendige Eingangsgrößen sind: die Stoffmengen n_i in einem definierten Tailingsvolumen V_{tot} bzw. die Konzentrationen c_i der Stoffe i in den Tailings und im Porenwasser sowie deren Bindungsformen.

Bei ausreichend langer Kontaktzeit des Porenwassers mit den Tailings stellt sich ein chemischer Gleichgewichtszustand zwischen der Feststoffzusammensetzung und der Porenwasserkonzentration ein. Die notwendigen Kontaktzeiten zur Einstellung des Gleichgewichtszustandes können von Sekunden bis Stunden bei Reaktionen in Lösungen und von Stunden bis Monate bei Reaktionen der Mineralbildung reichen (APELLO/POSTMA). Bei den langen Konsolidationszeiträumen der schluffigen bzw. tonigen Tailings mit geringeren Wasserdurchlässigkeiten ist von dem o.g. Gleichgewichtszustand auszugehen.

Der Stoffbestand der Tailings und der Porenwasser ist durch die Art der Uranerze, deren Aufbereitungsmethoden und durch die Materialien der späteren Überdeckung in den Absetzanlagen geprägt (DZOMBAK/MOREL, MORRISON/SPRENGLER/TRIPHATHI). Die in den Absetzanlagen ablaufenden Hauptreaktionen sind die Lösungsreaktionen, Mineralbildung, die Reduktions-Oxidations-Reaktionen, die Oberflächenadsorption und die Komplexbildung.

Für die Verknüpfung von der Konsolidation und dem Stoffaustrag wird von einem definierten Volumenelement in einer vorgegebenen Tiefe der Tailingsablagerung ausgegangen. Das Volumenelement V_{tot} besteht aus dem Anteil des Korngerüstvolumens V_S und dem vom Konsolidationszustand abhängigen Porenvolumen V_P , welches hier vollständig mit Porenwasser V_W erfüllt ist.

$$V_{tot} = V_S + V_W \dots\dots\dots [4]$$

Analog dem Volumenelement setzt sich die Gesamtstoffmenge $n_{i,tot}$ aus dem Anteil der Stoffmenge im Korngerüst $n_{i,S}$ und dem Anteil der gelösten Stoffmenge im Porenwasser $n_{i,W}$ zusammen.

$$n_{i,tot} = n_{i,S} + n_{i,W} \dots\dots\dots [5]$$

Während der Konsolidierung verringert sich das Porenvolumen unter gleichzeitiger Abgabe von Porenwasser, so daß sich im definierten Volumenelement der Korngerüstanteil erhöht. Unter den oben beschriebenen Bedingungen (volle Wassersättigung, lange Kontaktzeiten) ist in dem Modell der chemische Gleichgewichtszustand immer eingestellt. Die Konzentrationen der mit dem Porenwasser ausgetragenen Stoffe entspricht damit ein und derselben Gleichgewichtskonzentration.

Erst äußere Einflüsse, wie z.B. eindringendes Sickerwasser oder Gase, ergeben eine Neueinstellung der chemischen Gleichgewichte. Dabei kommt es zu einem Stoffumsatz zwischen Korngerüst und Porenwasser, z.B. Auflösung oder Ausfällung von Mineralien. Dieser Fall wurde im Rahmen der

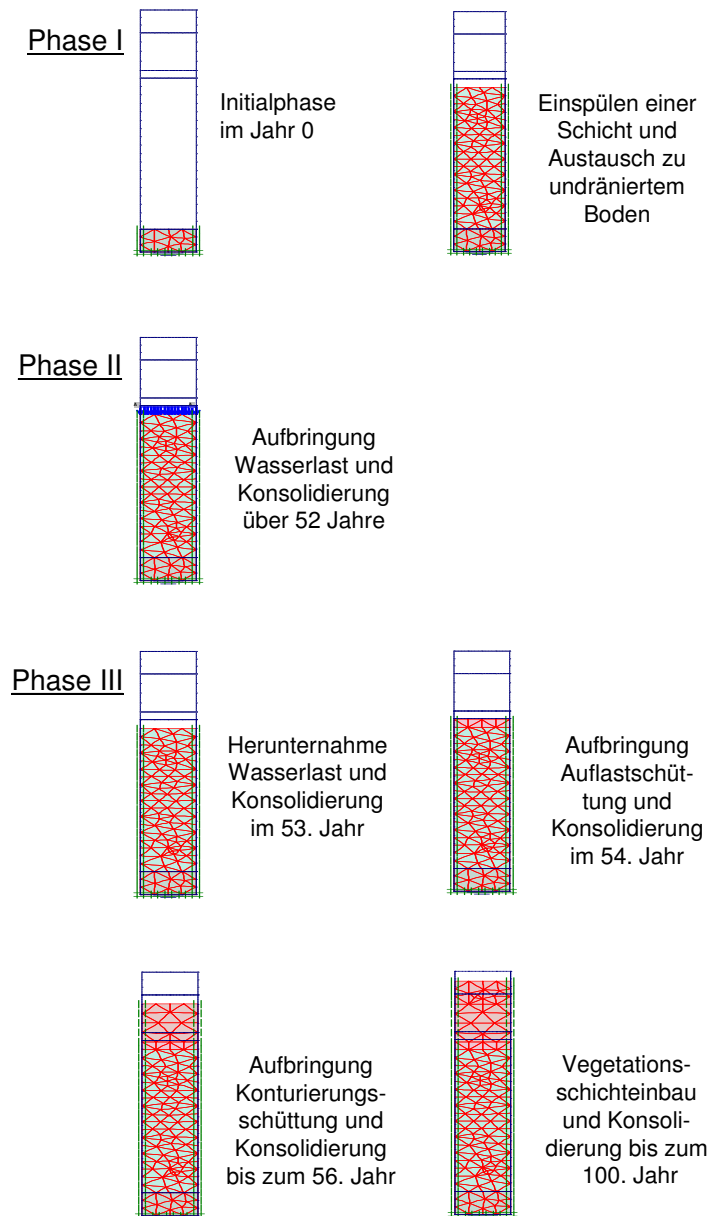
vorliegenden Untersuchungen nicht betrachtet, weil entsprechende Eingangsdaten von teilgesättigten Tailings unter Sickerwasserströmungen nicht zur Verfügung stehen. Solche komplexen Berechnungen der Konsolidation und des Stoffaustrages konnten bisher nicht realisiert werden.

Die Stoffmengen n_i sind in Mol definiert. Durch Umrechnung können auch Masse und Aktivität für radioaktive Stoffe als äquivalente Angaben verwendet werden.

Säulenmodelle

Um die Konsolidations- und Stoffaustragsvorgänge innerhalb einer industriellen Absetzanlage überschaubar modellieren zu können, wurden eindimensionale Säulenmodelle zugrunde gelegt. Ein solches Modell ist für den Sedimentationsbereich der in Bild 1 dargestellten IAA ausreichend genau, wobei die sicher vorhandenen seitlichen Bewegungen und Bodenströmungen vernachlässigt wurden. Bild 2 zeigt ein 4 m breites Säulenmodell für eine 20 m mächtige Tailingschicht. Es hat folgenden Schichtenaufbau: Beckensohleschicht, eingespülte Tailings und darauf definiert aufgebraute Schichten, wie Auflast-, Konturierungs- und Vegetationsschicht. Die für die Berechnungen mit finiten Elementen notwendigen Randbedingungen sind ebenfalls in Bild 2 dargestellt.

Innerhalb des Zeitraumes zwischen Einspülbeginn und der Endverwahrung können verschiedene statische Belastungszustände der Tailings zu verschiedenen Zeitpunkten definiert werden. Sie können in drei Hauptphasen zusammengefaßt werden, die für eine zeitunabhängige Berechnung der Konsolidierung sinnvoll sind. Die Darstellung der Berechnungsphasen enthält Bild 3.



Die Phase I ist der Einspülvorgang, die Phase II umfaßt die Eigenkonsolidierung mit aufliegender Wasserlamelle und die Phase III beinhaltet die Aufbringungsvorgänge definierter Abdeckschichten. Die verwendeten Zeitangaben entsprechen Praxisbeispielen.

Das geochemische Modell basiert ebenfalls auf der in Bild 2 dargestellten Tailingsäule mit allen seinen Bestandteilen insbesondere den verschiedenen umweltrelevanten Stoffe, wie z.B. Uran, Schwermetalle, Arsen und deren Konzentrationen im Porenwasser und Korngerüst. Die Stoffaustragsberechnungen wurden mit typischen Bestandteilen und Konzentrationen für zwei ausgewählte Absetzanlagen durchgeführt.

Die Betrachtung der Veränderungen infolge von infiltrierendem Niederschlagswasser ist möglich, wird jedoch hier nicht weiter vertieft.

Im Rahmen der geochemischen Modellierung wurde angenommen, daß die Konzentration der Stoffe im Porenwasser unabhängig vom Feststoff-Wasser-Verhältnis und damit unabhängig von der

Bild 3. Darstellung der Berechnungsphasen

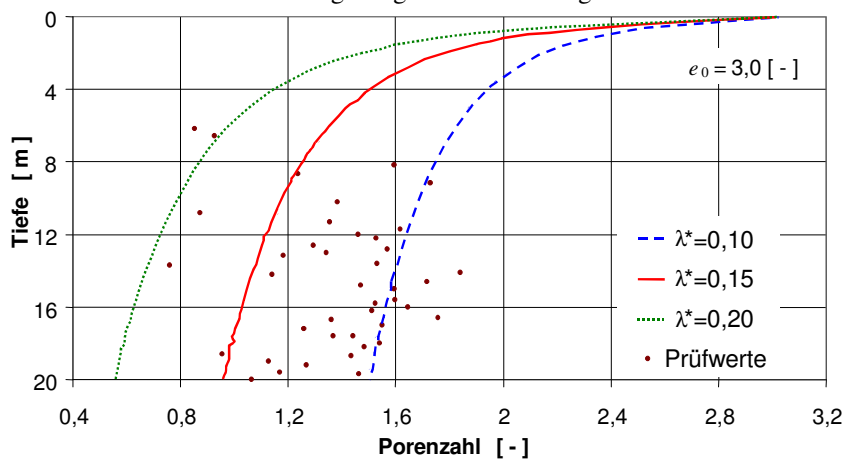
Porenzahl e ist. Der Austrag eines Stoffes z.B. von Uran-238 ergibt sich aus der Konzentration des Stoffes im Porenwasser und dem infolge Konsolidierung ausgetragenen Porenwasservolumen.

Beispielrechnungen für Konsolidation und Stoffaustrag

Berechnungsmethoden

Für die Konsolidationsberechnungen wurde das in Bilder 2 und 3, zweite Abbildungsreihe dargestellte Finite-Elemente-Modell verwendet. Es wurde davon ausgegangen, daß die Tailingsssäule durch Einspülung ohne zeitliche Unterbrechung entstanden ist und mit einer Schicht angenommen wird (einschichtige Tailingsssäule). Da die Zielvorgabe für die Betreibung einer industriellen Absetzanlage die Füllhöhe und nicht die Füllmenge war, ist die Annahme gerechtfertigt, daß die Setzungsbeträge infolge Eigenkonsolidierung

Bild 4. Rechnerische Porenzahlverteilung bei unterschiedlichen Steifigkeiten λ^* für den Tailingszustand am Ende der Berechnungsphase II im Vergleich zu Prüfer-



fortlaufend durch Nachfüllen von Tailings ausgeglichen werden. Dadurch können die Anfangssetzungen am Ende des Einspülvorganges zu Null gesetzt werden. Auf diese Weise konnte eines der Hauptprobleme, nämlich die Modellierung des Einspülvorganges mit einer realistischen Porenzahlverteilung über die Tiefe, gelöst werden.

Für die Beispielrechnungen wurden zwei Berechnungsweisen angewendet:

1. Entkoppelte Berechnungen:
Es wurden zeitunabhängige elasto-plastische Berechnungen unter undrained Bedingungen nach Aufbringen von Schichten bzw. Lasten und zeitabhängige Konsolidationsberechnungen jeweils nacheinander ausgeführt.
2. Gekoppelte Berechnungen:
Es wurden kombinierte zeitabhängige elasto-plastische Spannungs-Verformungs-Konsolidations-Berechnungen für die verschiedenen Ablaufphasen ausgeführt.

Für die beiden Berechnungsweisen wurden unterschiedliche Finite-Elemente-Programme verwendet.

Das FE-Programm PLAXIS kann z.Zt. nur entkoppelte Berechnungen ausführen. Dagegen können mit dem FE-Programm TOCHNOG auch gekoppelte Berechnungen durchgeführt werden.

Bei beiden Berechnungsweisen wirkt sich entscheidend aus, ob ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert $k = \text{const}$ oder ein porenzahlabhängiger Durchlässigkeitsbeiwert $k = f(e)$ angenommen wird.

Der Kompressionsindex λ , der neben der Durchlässigkeit der relevante Parameter für die Konsolidationsberechnungen ist, wurde nicht auf der Basis von Laborversuchen bestimmt, sondern anhand gemessener Porenzahlen aus unterschiedlichen Tiefen einer Absetzanlage nach Beendigung der Einspülung kalibriert. Hierzu wurden entsprechende FE-Berechnungen mit dem v.g. Säulenmodell für die Phase I und II gemäß Bild 3 mit unterschiedlichen λ -Werten durchgeführt und die rechnerische Porenzahlverteilung über die Tiefe mit den gemessenen Porenzahlen verglichen. Bild 4 zeigt Porenzahlverteilungen für drei unterschiedliche Steifigkeitsbeiwerte im Vergleich zu Prüfergebnissen einer Industriellen Absetzanlage. Für weitere Rechnungen wurde mit dem mittleren Wert des Steifigkeitsbeiwertes gerechnet. In PLAXIS wird anstatt des Kompressionsindex λ der sogenannte modifizierte Kompressionsindex λ^* verwendet. Zwischen λ und λ^* gilt folgender Zusammenhang:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1 + e} \dots\dots\dots [6]$$

Ein modifizierter Kompressionsindex $\lambda^* = 0,20$ beschreibt ein Material mit vergleichsweise geringer Steifigkeit.

Den nachfolgenden Ergebnissen der Beispielrechnung liegt eine Belastungsgeschichte zugrunde, die eine vorhandene Industrielle Absetzanlage charakterisiert. Es gelten die Angaben in Bild 2 für den Schichtenaufbau und für die Belastungsgeschichte wurden die Zeitschritte aus Bild 3 verwendet. Die Ergebnisauswertung orientierte sich im wesentlichen auf die Setzungsverläufe der Tailingsoberfläche mit der Zeit, die Porenwasserdruckentwicklung in einer bestimmten Tiefe mit der Zeit und die Porenzahlverteilungen über die Tiefe mit fortschreitender Oberflächenbelastung.

Ergebnisse entkoppelter Berechnungen

Bild 5 zeigt die 3 Berechnungsergebnisse für eine 20 m mächtige Tailingsssäule unter der Annahme der konstanten Durchlässigkeit (hier $k = 10^{-8}$ m/s). Bild 5a zeigt den schnellen Eintritt einer Maximalsetzung nach Aufbringen der Überdeckung, die in der folgenden Liegezeit kaum noch zunimmt. Bei der Porenwasserdruckentwicklung, die in Bild 5b für die Mitte der Tailingssschicht dargestellt ist, ist dementsprechend ein sehr schneller Porenwasserdruckabbau in wenigen Jahren nach Lastaufbringung zu erkennen. Porenzahlverteilungskurven über die Tiefe sind für unterschiedliche Belastungszustände der Tailings in Bild 5c dargestellt. Dabei wird deutlich, daß die gravie-

renden Porenzahlveränderungen nur etwa im oberen Drittel der Tailingsmächtigkeit auftreten.

In Bild 6 wird deutlich, daß sich bei Konsolidationsberechnungen mit einer porenzahlabhängigen Durchlässigkeit $k=f(e)$ andere Ergebnisse im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf von Setzungen und Porenwasserdruckabbau ergeben. Das Bild 6a zeigt, daß die Endsetzung erst in geologischen Zeiträumen erreicht sein werden. Die Ursache ist der geringe Porenwasserdruckabbau mit langen Konsolidierungszeiten. In Bild 6b ist diese Porenwasserdruckentwicklung für die Schichtmitte der Tailings dargestellt. Die Änderung der Porenzahlverteilungen konzentrieren sich im Vergleich zum Ansatz mit konstantem Durchlässigkeitsbeiwert noch mehr im oberen Teufenbereich (siehe Bild 6c). Ergebnisse gekoppelter Berechnungen

Ergebnisse gekoppelter Berechnungen

In Bild 7 sind die Zeitsetzungen der Tailingsoberfläche, die Porenwasserdruckentwicklungen in der Tailingsmitte und die rechnerische Porenzahlverteilung über die Tiefe dargestellt, die sich aus den gekoppelten Spannungs-Verformungs-Konsolidationsberechnungen ergeben haben. Wie Bild 7 zeigt, unterscheiden sich diese Ergebnisse nicht grundsätzlich von denen entkoppelter Berechnungen. Der Aufwand für die gekoppelten Berechnungen ist insofern geringer, weil für die Modellierung der Belastungsgeschichte weniger Berechnungsphasen notwendig sind. Für die hier gezeigten gekoppelten Berechnungen, die mit dem FE-Programm TOCHNOG ausgeführt wurden, ist ein konstanter Durchlässigkeitsbeiwert der Tailings angenommen worden.

Da von Beginn an gekoppelt gerechnet wurde, konnten die großen Setzungen während des Einspülens nicht separiert und wie bei den entkoppelten Berechnungen zu Null gesetzt werden. Bild 7 zeigt diese großen Setzungen infolge des Einspülens. Zum besseren Vergleich mit den entkoppelten Berechnungen wurden die Anfangssetzungen nach 20 Jahren zu Null gesetzt. Der in Bild 7b dargestellte Anstieg des Porenwasserdruckes in der Einspülphase ist auch darauf zurückzuführen, daß der Einspülvorgang als gekoppelte Berechnung gestartet wurde. Dieser Porenwasserdruckanstieg ist nach ca. 20 Jahren fast vollständig abgeklungen. Die weitere Porenwasserdruckentwicklung entspricht im wesentlichen der der entkoppelten Berechnung gemäß Bild 5. In Bild 7c sind die Porenzahlverteilungen über die Tiefe am Ende des Einspülvorganges nach gekoppelter und entkoppelter Berechnungen mit dem FE-Programm TOCHNOG dargestellt. Es ergeben sich bei gleicher Ausgangsporenzahl an der Tailingsoberfläche von $e_0 = 3,0$ etwa um 1/3 größere Porenzahlen als bei der entkoppelten Berechnung mit dem Programm PLAXIS.

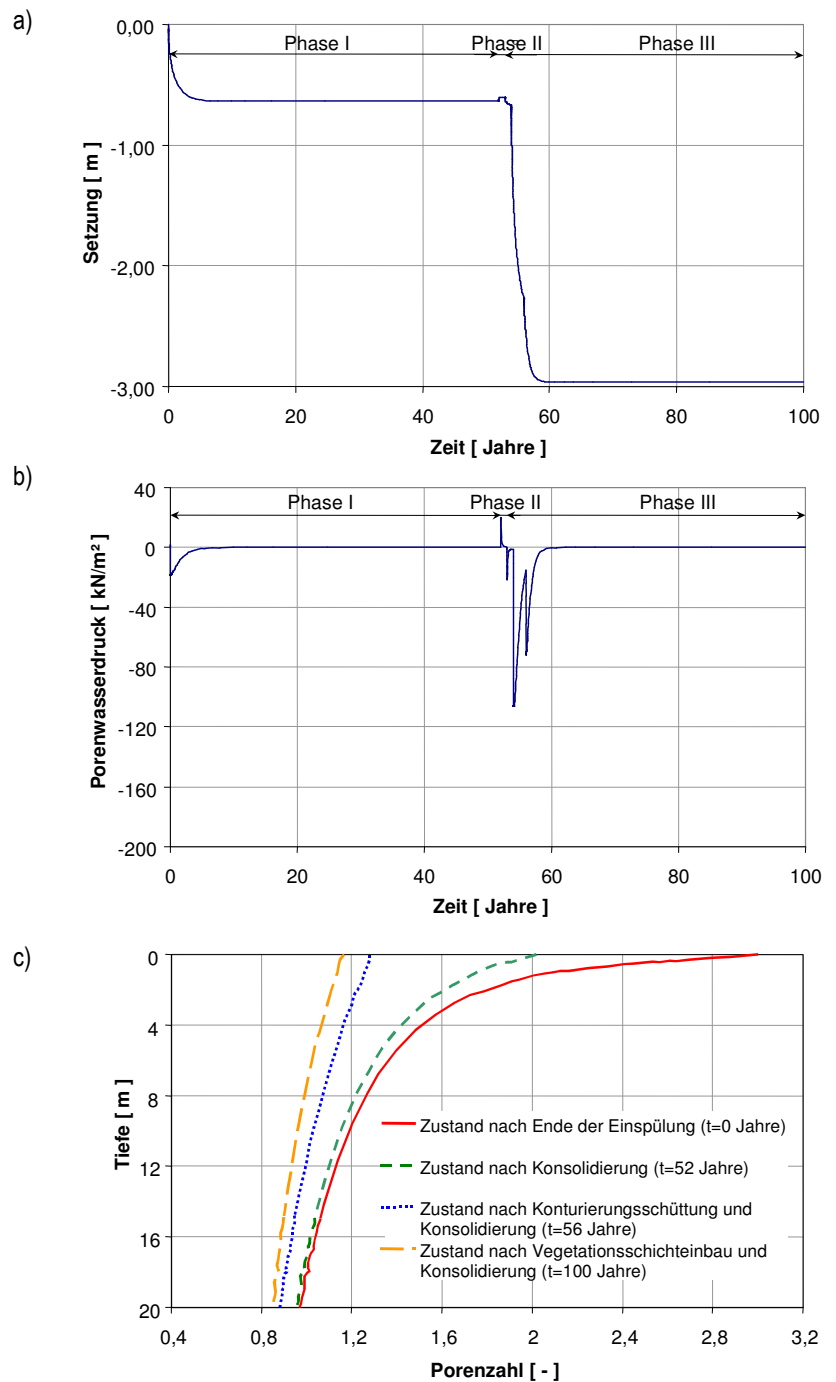


Bild 5. Ergebnisse entkoppelter Berechnung bei konstanter Durchlässigkeit

- Zeitsetzung der Tailingsoberfläche
- Porenwasserdruckentwicklung in Tailingsmitte
- Porenzahlverteilung über die Tiefe für verschiedene Belastungszustände

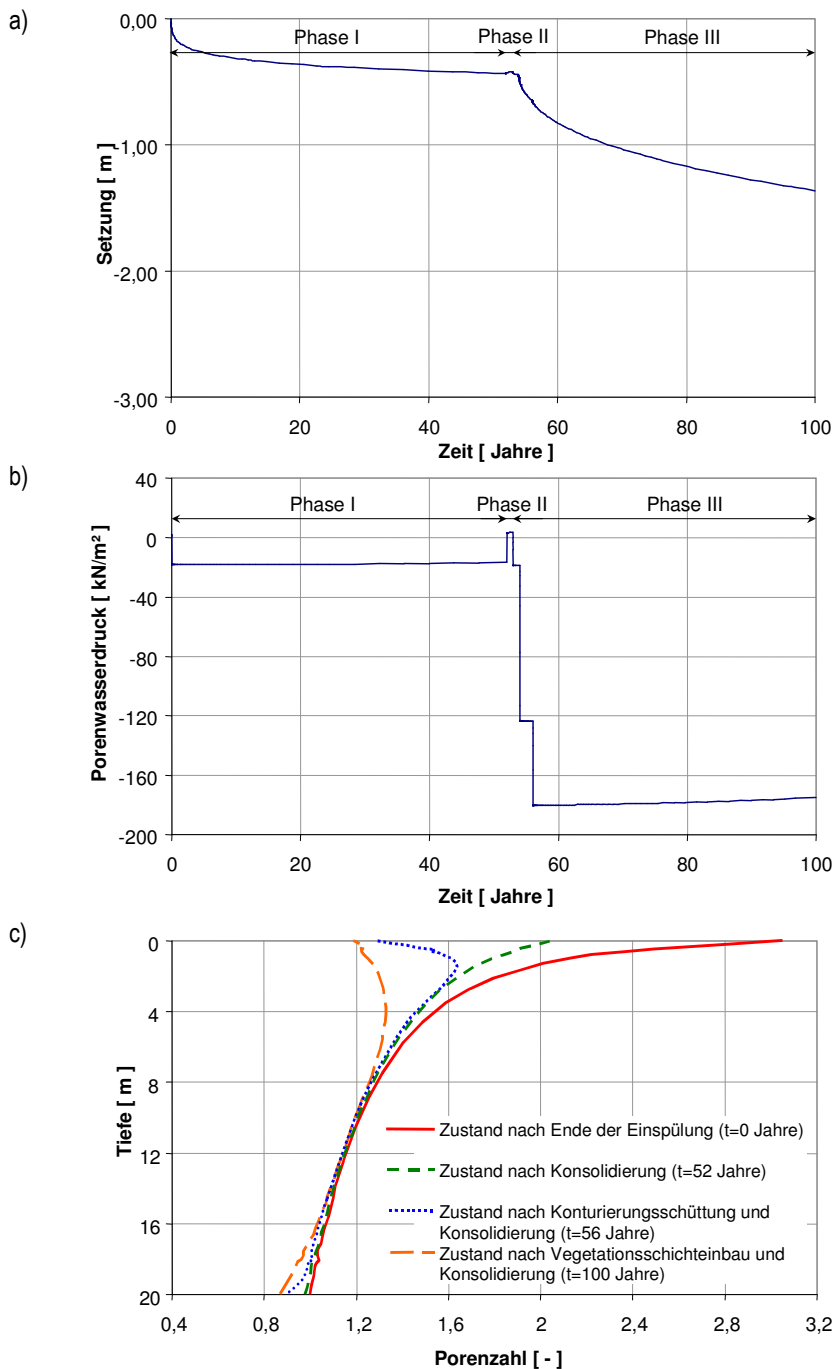


Bild 6. Ergebnisse entkoppelter Berechnung bei porenzahlabhängiger Durchlässigkeit
 a) Zeitsetzung der Tailingsoberfläche
 b) Porenwasserdruckentwicklung in Tailingsmitte
 c) Porenzahlverteilung über die Tiefe für verschiedene Belastungszustände

Diese Unterschiede sind darauf zurückzuführen, daß in den beiden FE-Programmen zwei zwar sehr ähnliche, jedoch nicht identischen Stoffgesetze (Modified-CAM-CLAY-Modell, Soft-Soil-Modell) verwendet werden und in PLAXIS die Verschiebungen auf der Grundlage infinitesimaler Verformungen berechnet wurden.

Für die Alteration von Tailings wird empfohlen, nach Möglichkeit gekoppelte Spannungs-Verformungs-Konsolidations-Berechnungen unter Berücksichtigung endlicher Verformungen anzuwenden.

Ergebnisse der Stoffaustragsabschätzungen

Wegen der Bedeutung von Uran-238 für den Strahlenschutz, beschränkt sich die Ergebnisdarstellung

hier auf dieses mobilste Radionuklid. Um die Effekte des Stoffaustrages zu veranschaulichen, wird beispielhaft von einer hohen Urankonzentration im Porenwasser von 495 Bq/l ausgegangen. Die Porenwasserkonzentrationen in den sächsischen Absetzanlagen liegen im Bereich von 1 bis 500 Bq/l. Das umgebende Tailingskorngerüst weist ca. die 10fache Urankonzentration von etwa $5,4 \cdot 10^6$ Bq/m³ auf. Unter Vernachlässigung des Einspülvorganges verringert sich im Zeitraum der größten Auflastschüttungen, d.h. in den Jahren 54 bis 56 die Porenzahl am stärksten. Diese Veränderung der Porenzahl für den oberflächennahen Tiefenbereich ist in Bild 9 dargestellt.

In dem in Bild 9 betrachteten Zeitraum verringert sich die Porenzahl von $e = 2$ auf $e = 1,3$. Die damit verbundene Porenwasserfreisetzung beträgt etwa 300 l pro 1 m³ Tailings. Bei der Konzentration von 495 Bq/l Uran-238 im Porenwasser beträgt somit der Aktivitätsaustrag von Uran-238 ca. $1,5 \cdot 10^5$ Bq pro 1 m³ Tailings.

Setzungs- und Stoffaustragsprognosen

Prognosen der Setzungsentwicklung

Für die Erstellung von Setzungsprognosen für Absetzanlagen hat die Modellierung des Ausgangszustandes der Tailings unmittelbar nach dem Einspülen die zentrale Bedeutung. Insbesondere sind dabei die starken Veränderungen der Porenzahlen über die Tailingsmächtigkeit zu erfassen. Setzungsprognosen auf der Grundlage von numerischen Konsolidationsberechnungen sind nur dann erfolgversprechend, wenn Ausgangsspannungszustand und Porenzahlverteilung über die Tiefe mit den angewendeten Steifigkeitsparametern des Stoffgesetzes konsistent sind.

Für Setzungsprognosen für IAA's sind außerdem folgende Einflußfaktoren zu berücksichtigen:

- ⇒ Mächtigkeit der Tailingsablagerung,
- ⇒ Größe und zeitliche Abfolge von Oberflächenbelastungen infolge der Überschüttungen,
- ⇒ Wasserdurchlässigkeit und Sättigungsgrad der Tailings (ggf. tiefenabhängig),
- ⇒ Wasserdurchlässigkeit der Berandung des Tailingskörpers, wie z.B. Sohle, seitliche Dämme oder Abdeckungen

Es wird empfohlen, Bereiche gleicher Tailingseigenschaften zu bilden und hierfür repräsentative Modellsäulen zu definieren (siehe Bild 1). Für die Zuverlässigkeit einer Setzungsprognose sind zwei Eingangsgrößen für die Berechnung entscheidend:

1. Die Steifigkeitsparameter des verwendeten Stoffgesetzes:
Der Steifigkeitsparameter sollte anhand gemessener Porenzahlverteilungen über die Tiefe kalibriert werden.
2. Der Durchlässigkeitsbeiwert oder bei Verwendung eines porenzahlabhängigen Durchlässigkeitsmodells die entsprechenden Parameter:

Bei Verwendung eines porenzahlabhängigen Durchlässigkeitsmodells sollten die hierfür notwendigen Parameter aus Durchlässigkeitsversuchen bei unterschiedlicher Lagerungsdichte ermittelt werden.

Bild 9 zeigt am Beispiel drei verschiedener Tailingsmächtigkeiten von 5 m, 10 m und 20 m die Setzungsverläufe der Tailingsoberfläche. Für die Berechnungen wurde der porenzahlabhängige Durchlässigkeitsansatz nach [3] und ein Steifigkeitsbeiwert $\lambda^* = 0,15$ verwendet. Die Setzungsverläufe der drei unterschiedlich hohen Tailingsäulen zeigen, daß die Endsetzungen um so eher erreicht werden je geringer die Mächtigkeit der Tailingsäule ist. So wird für die 5 m Tailingsäule die Endsetzung bereits zu einem Zeitpunkt von 100 Jahren nach Einspülbeginn bzw. von 40 Jahren nach Abschluß der Abdeckungsmaßnahmen erreicht. Dagegen sind bei einer 20 m Tailingsäule die Endsetzungen zu einem Zeitpunkt von 1000 Jahren nach Einspülbeginn noch nicht eingetreten. Vergleichsberechnungen mit konstantem Durchlässigkeitsbeiwert für die Tailings ergaben viel kürzere Konsolidationszeiten bis zum Eintritt der Maximalsetzungen bzw. zu einem nahezu vollständigen Porenwasserdruckabbau (ca. 10 Jahre). Die berechneten Größen der Endsetzungen für die drei Tailingsäulen sind unabhängig davon, ob eine konstante oder eine porenzahlabhängige Durchlässigkeit angenommen wurde.

Da Setzungsprognosen nicht für geologische Zeiträume sondern für die nächsten 50 bis 100 Jahre interessant sind, müssen die hierfür verwendeten Konsolidationsberechnungen zuverlässige Ergebnisse liefern. Dabei spielt die Durchlässigkeit der Tailings die entscheidende Rolle. Wegen der starken Zusammendrückbarkeit ergeben sich für Tailings realistische Zeit-Setzungsverläufe nur bei Anwendung porenzahlabhängiger Durchlässigkeiten.

Die Setzungsprognosen sind anhand von Meßüberwachungen im Sinne der Beobachtungsmethode ständig zu überprüfen und zu ertüchtigen.

Prognosen zum Stoffaustrag

Die chemischen Gleichgewichte zwischen Konzentrationen im Porenwasser und im Korngerüst haben sich weitgehend bereits am Ende der Einspülzeit eingestellt. Durch die danach eintretenden statischen Belastungen und Konsolidierungsvorgänge werden diese Gleichgewichte nicht mehr gestört. Unter diesen Bedingungen ergeben sich konstante Konzentrationen der Inhaltsstoffe für den angenommenen Prognosezeitraum von 1000 Jahren.

Der Stoffaustrag läßt sich aus der Setzungsprognose, dem daraus berechneten Porenwasseraustrag und den konstanten Konzentrationen der Inhaltsstoffe ermitteln. Zu beachten ist allerdings, daß es innerhalb einer Industriellen Absetzanlage flächen- und teufenabhängige Konzentrationsunterschiede gibt.

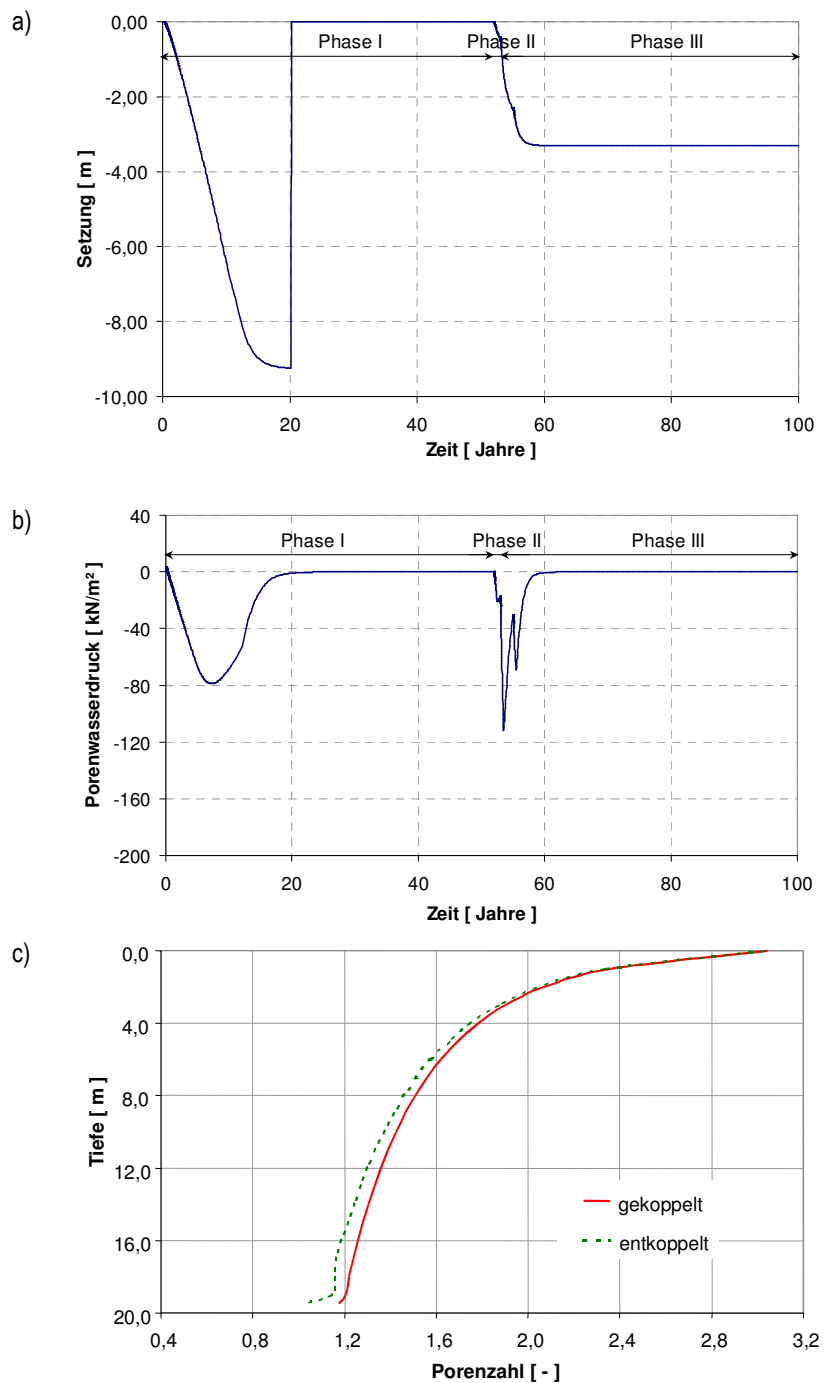


Bild 7. Ergebnisse gekoppelter Berechnung bei konstanter Durchlässigkeit

- Zeitsetzung der Tailingsoberfläche
- Porenwasserdruckentwicklung in Tailingsmitte
- Rechnerische Porenzahlverteilung über die Tiefe im Vergleich mit entkoppelter Berechnung

Diese können mit dem hier gewählten Modell der homogenen Tailingsäule nicht erfaßt werden. Für den zeitlichen Verlauf der Stofffreisetzung ergeben Rechnungen mit konstantem Durchlässigkeitsbeiwert der Tailings höhere Setzungs- und damit Porenwasserfreisetzungsraten in kürzeren Zeiträumen.

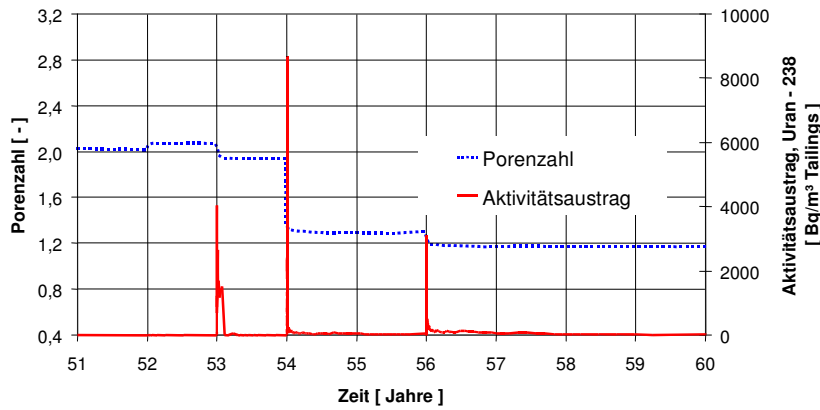


Bild 8. Stoffaustrag von Uran-238 in Abhängigkeit der Porenzahlveränderung bei Auflast im Zeitraum von 9 Jahren

Wie Bild 10 zeigt, erfolgt ein merklicher Stoffaustrag zeitgleich mit der stärksten Porenzahlverminderung. Danach sind nur unbedeutende ausgegrenzte Stoffmengen zu erwarten.

Bei Tailings aus überwiegend sandigen Kornspektren mit Durchlässigkeiten mit $k > 1 \cdot 10^{-8}$ m/s

trag von großen Stoffmengen pro Zeiteinheit beeinflusst werden.

Schlußbemerkungen und Ausblick

Die hier beschriebenen Untersuchungen zeigen, daß für die Alteration von Tailings eine Modellierung zugrunde gelegt werden muß, bei der Konsolidationsvorgänge und Vorgänge zum Stoffaustrag miteinander gekoppelt sein müssen. Voraussetzungen für Betrachtungen zum Stoffaustrag sind dabei die Ergebnisse von Konsolidationsberechnungen. Die Konsolidationsberechnungen ermöglichen gleichzeitig auch Setzungsprognosen für die Nachweise einer dauerhaften Sicherung und Sanierung.

Die Konsolidationsvorgänge in bindigen Tailings können ausreichend genau mit Stoffgesetzen auf der Basis der CAM-CLAY-Theorie beschrieben werden. Es wird empfohlen, die Steifigkeitsparameter anhand von Porenzahlen, die in verschiedenen Tiefen der Tailings innerhalb ein und derselben Phase der Absetzanlage gemessen wurden, zu kalibrieren. Es hat sich gezeigt, daß bei den Zeitsetzungsrechnungen mit einer porenzahlabhängigen Durchlässigkeit sich größere Konsolidationszeiträume ergeben als bei Verwendung eines konstanten Durchlässigkeitsbeiwertes. Da die Eingabeparameter des porenzahlabhängigen Durchlässigkeitsansatzes sich sehr stark auf die Ergebnisse auswirken, müssen diese sehr sorgfältig bestimmt werden, z.B. mit Durchlässigkeitsversuchen. Es wird empfohlen, hierzu numerische Parameterstudien durchzuführen.

Große Porenzahländerungen in kurzen Zeiträumen sind für Stoffaustragsbetrachtungen von besonderer strahlenschutzzeitiger Bedeutung. Unter diesem Aspekt liegen die hier vorgestellten Konsolidationsberechnungen mit konstantem Durchlässigkeitsbeiwert auf der sicheren Seite. Dagegen ist die Annahme eines geschlossenen Systems, in dem die Freisetzung von Radionukliden und Schwermetallen aus dem Tailingsfestkörper in das Porenwasser geringer ausfallen wird als bei einem offenen System mit Teilsättigung, Sickerwasser- und Sauerstoffeintrag als kritisch anzusehen. Für eine strahlenschutzzeitige Bewertung wird deshalb empfohlen, die Stoffaustragsberechnung mit konstanter Porenwasserkonzentration nur auf die sicher erkundeten gesättigten Teilbereiche (Sedimentationszonen) der Absetzanlagen anzuwenden und anhand der Ergebnisse von Konsolidationsberechnungen mit konstantem Durchlässigkeitsbeiwert zu ermitteln. Für Spülstrand und Übergangsbereich ist die Modellierung teil- und ungesättigter Verhältnisse notwendig.

Weiterführende Arbeiten sollten sich auf eine verbesserte geotechnische Modellierung der Absetzanlagen konzentrieren, die im Unterschied zu den hier verwendeten Säulenmodellen Teilsättigung und Infiltration von Wasser einschließen. Als nächster Bearbeitungsschritt wird vorgeschlagen, entsprechende zweidimensionale Finite-

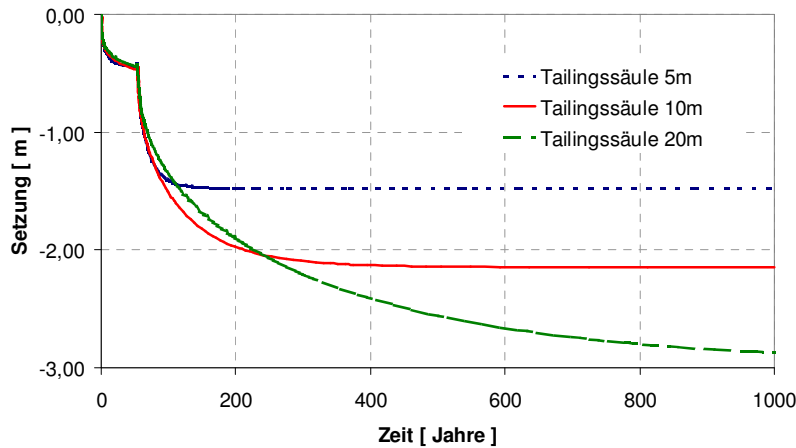
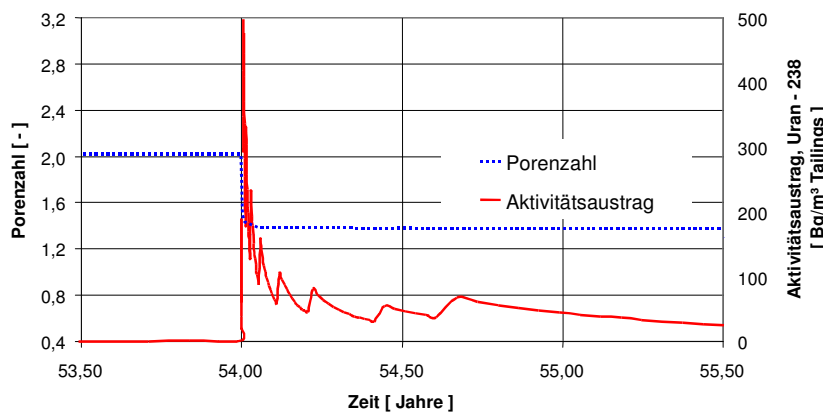


Bild 9. Zeitsetzung der Tailingsoberfläche infolge Abdeckung für verschiedene Tailingsmächtigkeiten

sind bei Prognosen die Veränderungen des chemischen Systems, z.B. infolge von Infiltrationen über die Tailingsoberfläche, zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen haben gezeigt, daß sich der Stoffaustrag durch die Wahl des Belastungsregimes in Abhängigkeit von den Randbedingungen der Absetzanlage steuern läßt. So kann z.B. durch zeitliche Verzögerung beim Aufbringen oder Lastreduzierung der Abdeckschichten der Konsolidationszeitraum gestreckt bzw. die Setzungen verringert und somit der Aus-

Bild 10. Stoffaustrag von Uran-238 in Abhängigkeit der Porenzahlveränderung bei Auflast im Zeitraum von 2 Jahren



Elemente-Modelle unter den o.g. komplexeren Randbedingungen zu erstellen. Auf der Basis der Ergebnisse solcher erweiterten Konsolidationsberechnungen sind noch präzisere Prognosen für den Stoffaustrag zu erwarten. Verfügbare geochemische Modellierungen für den advektiven und diffusiven Stofftransport können dann erst sinnvoll angewendet werden. Gegebenenfalls sind hierfür sogar dreidimensionale geotechnische Modelle für Konsolidationsberechnungen notwendig. Auf diesem Modellierungsniveau kann dann auch untersucht werden, inwieweit die in den Tailingsporenräumen ablaufenden Mineralbildungs-, Umwandlungs- und -auflösungsprozesse die bodenmechanischen Parameter wie z. B. Wasserdurchlässigkeit und Porenzahl beeinflussen.

Die Autoren bedanken sich beim Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie für die Förderung dieses Projektes. Für die zielführende Zusammenarbeit sei stellvertretend der Leiterin des Referates „Natürliche Radioaktivität“, Frau Dipl.-Geol. Hurst, sowie den Herren Dr.-Ing. Glaubitz, Dipl.-Phys. Leder und Dipl.-Geol. Palme gedankt.

Quellenverzeichnis

Abschlußbericht Projektphase I (1998) „Alteration in Tailings des Uranbergbaues. Teil: Zusammenfassung und Bestandsaufnahmeergebnisse zur Anlagencharakterisierung und Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen von Konsolidierungstheorien“, Dr.-Ing. Kast + Partner in Arbeitsgemeinschaft mit Prof. Brauns, BAUGRUND DRESDEN, Universität Innsbruck

Abschlußbericht Projektphase II (2000) zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Alteration in Tailings des Uranbergbaues, BAUGRUND DRESDEN

Ergänzung zum Abschlußbericht der Projektphase II (2000), BAUGRUND DRESDEN

Beyond 2000 in Computational Geotechnics, 10 Years of PLAXIS International, Proceedings of the International Symposium Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Amsterdam/The Netherlands/18-20 March 1999, Edited by Ronald B. J. Brinkgreve, Plaxis B.V. & Delft University of Technology, Netherlands, A. A. BALKEMA, 1999

APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. (1993): Geochemistry, Groundwater and Pollution, A. A. BALKEMA

DZOMBAK, D. A.; MOREL, F. M. (1990): Surface Complexation Modeling Hydrous Ferric Oxide, Wiley New York

MORRISON, St.; SPRENGLER, R. R.; TRIPHATHI, V. S. (1995): Adsorption of Uranium (VI) on amorphous ferric oxyhydride at high concentrations of dissolved carbon (VI) and sulfur (VI), p. 333 – 346, J. Contaminant Hydrology 17

KOLYMBAS, D. (1998): Geotechnik – Bodenmechanik und Grundbau, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Grundbau-Taschenbuch, 4. Auflage, Teil 1 (1990), Hrsg. und Schriftl. U. Smolczyk, Kapitel 1.9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

Der Ingenieurbau, Grundwissen: Hydrotechnik/Geotechnik (1995), Kapitel Bodenmechanik, Hrsg. Gerhard Mehlhorn, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

Tagungsband Workshop „Stabilisierung von Feinschlamm-tailings“ (1999), Editor WISMUT GmbH

Tagungsband Internationale Konferenz „Bergbausanierung“ (2000), Editor WISMUT GmbH

BRAUNS, J.; KAST, K.; KONOLD, W. (1995): Informationspapier zur Überprüfung und Überwachung bestehender Sedimentationsbecken, Karlsruhe

TERZAGHI, K.; FRÖHLICH, O. K. (1936): Theorie der Setzungen von Tonschichten, Verlag Franz Deuticke Leipzig und Wien

PLAXIS – Version 7, edited by R. B. J. Brinkgreve PLAXIS B.V. and P. A. Vermeer, University of Stuttgart, A. A. BALKEMA, 1998

RODDEMAN, D. (2000): TOCHNOG User's manual – a free explicit/implicit FE program <http://tochnog.sourceforge.net>