

Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte

Die Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen ist nicht nur für klassische Aufgabenstellungen des untertägigen Bergbaus und der untertägigen Speicherung von Interesse, sondern besitzt auch für die sichere, untertägige Endlagerung radioaktiver Abfälle eine große Bedeutung. Aufgrund nachfolgend aufgeführter, für die Versiegelung und damit auch für die Querschnittsabdichtung radioaktiver Endlager wesentlicher Prämissen werden innerhalb des Multibarrierenkonzepts an die technische Barriere „Querschnittsabdichtung“ besonders hohe Anforderungen gestellt:

1. Durch radioaktiven Abfall und Endlager dürfen keine zusätzlichen Belastungen zukünftiger Generationen auftreten, d. h.,
 - der anfallende Abfall muß beseitigt werden,
 - die zukünftige Belastung von Mensch und Umwelt darf die heute gültigen Vorschriften nicht überschreiten,
 - die Sicherheit des Endlagers darf nicht von Überwachungen und Kontrollen der Barrierenwirksamkeit abhängen.
2. Die technisch konstruktive Gestaltung des Endlagers hat auf

der Grundlage des Langzeitcharakters der radioaktiven Abfälle zu erfolgen, d. h.,

- hochradioaktiver Abfall erfordert Isolationszeiten im Wirtsgestein von etwa 10^4 bis 10^5 Jahren (weitere Verdünnung dann durch Deckgebirge und Biosphäre),
- der niedrig- und mittelradioaktive Abfall erfordert Isolationszeiten in der Größenordnung von ungefähr 100 bis 200 Jahren.

Das Thema wird in folgenden fünf Teilthemen abgehandelt:

- | | |
|----------|---|
| Teil I | Anforderungen an die Abdichtung und prinzipielle konstruktive Möglichkeiten, |
| Teil II | Statische Berechnung mit Hilfe von FE-Programmsystemen für elastisches und inelastisches Materialverhalten, |
| Teil III | Berücksichtigung von Zusatzlastfällen bei der Bemessung der statischen Widerlager, |
| Teil IV | Auswahl und Untersuchung von Abdichtmaterialien, |
| Teil V | Die Abdichtung von Bohrlöchern. |

Teil I: Anforderung an die Abdichtung und prinzipielle konstruktive Möglichkeiten

1. Gegenwärtiger Stand

Bei der Querschnittsabdichtung untertägiger Hohlräume wurden in den vergangenen 20 Jahren neue Wege beschritten, die im wesentlichen durch folgende Maßnahmen gekennzeichnet sind [1, 2]:

- Strenge Trennung zwischen statischem Widerlager zur Aufnahme und Einleitung der Kräfte in das Gebirge und den Abdichtelementen zur Gewährleistung der Dichtheit der Konstruktion;
- Nachweis der Widerlagerbeanspruchungszustände mittels numerischer Berechnungsmethoden (FEM-Methode) unter Be-

rücksichtigung des Zusammenwirkens von Widerlager und Gebirge;

- Einführung gleitfähiger Widerlagerkonstruktionen verschiedener Geometrien zur Erzielung günstiger Beanspruchungszustände im Gebirge und im statischen Widerlager (dreiaxiale Druckspannungszustände);
- Einsatz modifizierter Bitumen-, Asphalt- und Tonabdichtpakungen unterschiedlicher Zusammensetzung als Abdichtelemente für den Querschnitt und den ausbruchsnahen Gebirgsbereich.

Nach diesen Grundprinzipien wurden in einer Reihe von Schächten erfolgreich Querschnittsabdichtungen errichtet und absolute Flüssigkeitsdichtheit erzielt [3, 4, 5]. In horizontalen Grubenbauen werden zur Zeit solche Konstruktionen eingebaut bzw. projektiert. Eine Reihe von konstruktiven Details sind patentrechtlich geschützt [6 bis 14].

¹ Prof. Dr. rer. nat. habil. Wolfgang Förster, Dozent Dr. sc. techn. Peter Sitz und Dr.-Ing. Volker Köckritz, Bergakademie Freiberg, Sektion Geotechnik und Bergbau

Fortsetzung von Seite 170

Für die Erklärung des Prinzips ist die Arbeit mit einer Schablone anschaulich. Praktisch wird man jedoch auch diese hier vorgestellte Methode mit EDV-Programmen ausführen.

3. Zusammenfassung

Die Vorhersage von Lagerstättenparametern ist bei der Interpolation genauer als bei der Extrapolation. Deshalb werden Vorschläge gemacht, wie man beim Abbau einer Lagerstätte den Extrapolationsanteil verringern kann. Für die Extrapolation wird empfohlen, die geostatistische Vorhersage durch eine lineare Extrapolation unter Berücksichtigung von Schwellwertüberschreitungsängen zu stützen. Diese Verfahrensweise wird erklärt.

2. Aufgaben von Querschnittsabdichtungen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle

Im Weltmaßstab nimmt die Nuklearenergie eine bedeutende Stellung ein, z. Z. werden etwa 15 % der gesamten Elektroenergie in Atomkraftwerken erzeugt, dies entspricht z. B. der Weltelektroenergieerzeugung des Jahres 1954 [15]. Der Anteil an der Primärenergieerzeugung ist derzeit noch im Wachsen begriffen. Unabhängig von zukünftigen Entwicklungen auf dem Energieerzeugungssektor sind jedoch gegenwärtig bzw. in allernächster Zeit schon nennenswerte Mengen radioaktiver Abfälle bzw. radioaktiv kontaminierter Stoffe mit sehr unterschiedlichen Strahlungsintensitäten aus Kernkraftwerken, aber auch von anderen Anwendungen radioaktiver Stoffe für wissenschaftlich-technische und Ausbildungszwecke den direkten Wechselwirkungen mit der Umwelt zu entziehen.

Die gegenwärtig beste Methode für die sichere, langzeitliche Ver-

Querschnittsabdichtungen von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte

Teil II: Statische Berechnung mit Hilfe von FE-Programmsystemen für elastisches und inelastisches Materialverhalten

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die statischen Widerlager der Querschnittsabdichtungen müssen allen zu erwartenden Einwirkungen und Belastungen widerstehen. Diese Belastungen resultieren hauptsächlich aus den sich entwickelnden Flüssigkeitsdrücken und den sich u. U. zeitabhängig aufbauenden Gebirgsdrücken (Grundlastfälle). Mit Hilfe von Finite-Elemente-Modellen lassen sich, unter Verwendung von Computern mit hoher Rechengeschwindigkeit und Speicherkapazität, diese statischen Widerlager hinsichtlich ihrer Beanspruchungszustände untersuchen. An der Bergakademie Freiberg stehen derzeit drei Programmsysteme (PS) zur Verfügung, die für zweidimensionale Berechnungen mit unterschiedlichen Stoffgesetzen konzipiert sind:

- PS COSAR-ROBDIS für linear elastisches Materialverhalten [1] (Entwicklung und Übernahme von der TU Magdeburg, WB Festkörpermechanik),
- PS ROBDIS-VIKONE für inelastisches, zeitabhängiges (thermoelastisches viskoses) Materialverhalten [2] (Entwicklung und Übernahme von der TU Magdeburg, WB Festkörpermechanik),
- PS FEEREPGT für inelastisches, zeitunabhängiges (elastoplastisches) Materialverhalten (Weiterentwicklung eines von der HS für Architektur und Bauwesen Weimar übernommenen Programmsystems [3]).

Damit können für axialsymmetrische Konstruktionen und näherungsweise für Bauwerke mit quadratischem bzw. rechteckigem Querschnitt, in Abhängigkeit von den realen Bedingungen (Geometrie, Lagerungsbedingungen, Materialverhalten, Flüssigkeits- und Gebirgsdrücke), die Spannungs- und Deformationszustände berechnet werden.

Nachfolgend soll die Widerlagerbemessung auf der Grundlage inelastischer Programmsysteme besprochen werden, da bei der Bemessung unter Ansatz eines linear elastischen Verhaltens ein ausreichender Kenntnisstand erreicht ist [4]. Bild 1 gibt einen Überblick über die genutzten FE-Programme für inelastisches Materialverhalten.

2. Grundlastfälle

Aufgrund der Vielzahl der Eingangsparameter, der sich u. U. im Laufe der Zeit ändernden Einflußgrößen sowie der technologischen Vorgaben ist eine direkte Berechnung der Widerlagergeometrie derzeit nicht möglich. Die Festlegung und Optimierung der Widerlagergeometrie erfolgt deshalb durch Variation einer nach heuristischen Methoden und analytischen Übersichtsrechnungen vorgegebenen Form. Die Dimensionierung basiert in der ersten Phase auf der Nachrechnung von Grundlastfällen unter Ansatz linear elastischen Materialverhaltens. Dabei werden Spannungsverteilungen errechnet und darauf aufbauend Sicherheitsabstände für ausgewählte bzw. vorgegebene Materialien (z. B. Beton und Gebirge) ermittelt. Grundlastfälle werden einzeln oder als Lastfallkombinationen so angesetzt, daß sie in Größenordnung und Tendenz auch die Beanspruchungsgrenzfälle

(z. B. maximale Gebirgsdruckeinwirkung infolge inelastisch zeitabhängigen Materialverhaltens) widerspiegeln. Dabei werden die Berechnungen entsprechend den realen Rand- und Kontaktbedingungen durchgeführt (z. B. kraftschlüssiger Verbund, gleitfähige, reibungsfreie oder gleitfähige, reibungsbehaftete Lagerung zwischen Widerlager und Gebirge). Nachfolgend werden die wichtigsten Grundlastfälle (GLF) kurz erläutert.

GLF 1: Sekundärer Gebirgsspannungszustand (Widerlagerausbruch)

Die mit der elastischen Lösung ermittelten Spannungen liefern Spannungsspitzen, die bei inelastischem Gebirgsverhalten infolge Spannungsumlagerung abgebaut werden.

GLF 2: Alleinige radiale Gebirgsdruckbelastung

Mit diesem Lastfall werden die Beanspruchungszustände des Widerlagers bei alleiniger Gebirgsdruckbelastung untersucht. Dabei kann mit Hilfe des linear elastischen Ansatzes eine Maximalwertbetrachtung bzw. eine darauf aufbauende Sicherheitsanalyse auch für die sich nach sehr langen Widerlagerstandzeiten einstellenden Spannungszustände ($t \rightarrow \infty$) durchgeführt werden. Diese Betrachtungen sind jedoch für viele Materialien (z. B. Steinsalz mit zeitabhängig inelastischem Verhalten) nicht ausreichend und führen u. U. zu falschen Schlußfolgerungen. Die zeitliche Gebirgsdruckentwicklung auf das Widerlager, die wesentlich von Materialparametern, technologischen Gegebenheiten und zeitlichen Vorgaben abhängt (z. B. Zeitraum zwischen Hohlraumherstellung und Widerlagereinbau) und die somit stets in Verbindung mit dem GLF 1 zu betrachten ist, läßt sich nur mit inelastischen, zeitabhängigen Programmsystemen verfolgen.

GLF 3: Einseitige stirnseitige Flüssigkeitsdruckbelastung u. U. in Kombination mit radialem Gebirgsdruck

Dieser Lastfall dient zur Untersuchung der verschiedenen Beanspruchungszustände bei Funktion des Widerlagers. Unter Ansatz eines linear elastischen Materialverhaltens sind auch hier nur Grenzfälle der Beanspruchung darstellbar. So werden z. B. durch Kombination des sekundären Spannungszustandes (GLF 1) und Einwirkung eines Flüssigkeitsdrucks auf das statische Widerlager die Beanspruchungen von Widerlager und Gebirge (nach Superposition mit GLF 1) unter den Bedingungen einer sofort nach Widerlagereinbau eintretenden Flüssigkeitsdruckbelastung simuliert.

3. Programmsysteme für inelastisches Materialverhalten und ihre Anwendungsbereiche bei der Widerlagerbemessung

Den nachfolgend beschriebenen Programmsystemen fallen die Aufgaben zu, durch wirklichkeitsnähere Beschreibung von Gebirgs- und Widerlagerbaustoffverhalten Spannungsumlagerungen zu verfolgen, die mit den elastischen Stoffgesetzen nicht erfaßt werden, wodurch die Tragfähigkeiten von Widerlager und Gebirge realistischer eingeschätzt werden können.

Die FE-Berechnungen mit den verschiedenen Programmsystemen liefern im Ergebnisdruck neben den Verschiebungen die Normalspannungen, die Schubspannung, die Hauptspannungen und die Richtung der Hauptnormalspannungen für jeden ge-

¹ Doz. Dr. sc. techn. Peter Sitz, Dr.-Ing. Volker Köckritz, Bergakademie Freiberg, Sektion Geotechnik und Bergbau, und Dr.-Ing. Michael Lersow, Ingenieurschule an der Bergakademie Freiberg (Teil I im Heft 5 d. J.)

Inelastisches Materialverhalten

Instantanes (zeitunabhängiges) Verhalten
PS: FEEREPGT
plastisches Verhalten

- pseudo-hypoelastisch
- linear elastisch, ideal plastisch
- linear elastisch, einfach verfestigend
- nicht linear elastisch, doppelt verfestigend

Stantanes (zeitabhängiges) Verhalten
PS: VIKONE
viskoses Verhalten

- linear thermoelastisch, viskos
- linear thermoelastisch, viskos verfestigend

geotechnische Besonderheiten

- Ausschließen von Zugspannungen
- Erzeugung eines Ausgangsspannungszustandes
- Auftrags- und Aushubvorgänge

Service-Routinen

- graphische Auswertung
- Netz
 - verzerrtes Netz
 - Trajektorien
 - plastizierte Zonen
 - Isolinien (Spannungen, Sicherheiten)

geotechnische Besonderheiten

- zeitabhängige Kontaktbedingungen

Bild 1
Übersicht über an der Bergakademie Freiberg vorhandene inelastische FE-Programme

wünschten Knoten entsprechend der Vernetzung der gesamten Struktur. Aufbauend auf dem Ergebnisprotokoll (als Datenfile) ist unter Nutzung eines Auswertemoduls (post processing) wahlweise die Darstellung des FE-Netzes und der Spannungstrajektorien (nach Richtung, Vorzeichen und Betrag) sowohl als Hardcopy als auch als Plot möglich. Des Weiteren können im Dialogbetrieb folgende Möglichkeiten zur Spannungsanalyse genutzt werden:

- Schnitte in r- bzw. x- und z- bzw. y-Richtung,
- 3-D-Ansichten,
- Isolinien (auf der Basis eines an die beliebige Kontur angepaßten Rechteckelementenetzes).

Bei entsprechender Hardware-Konfiguration lassen sich mit Hilfe eines speziellen Grafikmoduls des PS COSAR-ROBDIS Darstellungen des verzerrten Netzes sowie der Spannungs- und Temperaturfelder über dem FE-Netz realisieren.

3.1. Thermoelastisch viskoses Modell ROBDIS-VIKONE

Mächtige Steinsalzablagerungen, die bevorzugt für die Errichtung von untertägigen Deponien ausgewählt werden, zeigen eine ausgeprägte nichtlineare Zeitabhängigkeit der Verformung. Dabei wirken erhöhte Temperaturen ähnlich wie hohe Spannungsdifferenzen. Ein umfassendes, theoretisch fundiertes rheologisches Stoffgesetz für Steinsalz kann derzeit nicht formuliert werden. Es ist deshalb notwendig, phänomenologische bzw. empirisch begründete Ansätze zu benutzen. Für bestimmtes Steinsalz kann das Spannungs-Verformungs-Verhalten im wesentlichen als thermoelastisch viskos charakterisiert werden. Für die stationäre Kriechphase, der bei solchen Betrachtungen die überragende Bedeutung zukommt, wird davon ausgegangen, daß die Gesamtdehnungsrate gleich der Summe aus der thermoelastischen und der viskosen Dehnungsrate ist. Es gilt:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}(\text{TE}) + \dot{\epsilon}_{ij}(\text{V}) \quad (1)$$

Für die thermoelastischen Verformungen gelten die Ansätze der linearen Elastizitätstheorie [1, 5, 6, 7, 8]. Die viskose Dehnungsrate wird nach [2, 9] durch ein vereinfachtes Gesetz beschrieben:

$$\dot{\epsilon}_{ij}(\text{V}) = \frac{2}{3\sigma_v} \cdot f(\sigma_v) \cdot g(p) \cdot s_{ij} \quad (2)$$

σ_v effektive Spannung,

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (3)$$

s_{ij} Deviator des Spannungstensors,

$g(p)$ Verfestigungsfunktion.

Das Materialgesetz im engeren Sinn wird durch $f(\sigma_v)$ dargestellt. Im Programmsystem sind dafür zwei Varianten enthalten:

$$f(\sigma_v) = \begin{cases} A_1(T) \cdot (\sigma_v)^n \\ A_1(T) \cdot \sinh(\sigma_v/b) \end{cases} \quad (4)$$

$n, A_1(T), b$ Materialparameter.

Die Einführung der Verfestigungsfunktion $g(p)$ ermöglicht die Nachbildung der transienten Kriechphase. Die Temperaturabhängigkeit der Dehnungsrate wird durch den Koeffizienten $A_1(T)$ berücksichtigt.

Für bestimmte Steinsalzablagerungen kann die effektive Dehnungsrate unter Vernachlässigung der Verfestigungsfunktion ($g(p) = 1$) wie folgt angesetzt werden [6, 7, 8, 10]:

$$\dot{\epsilon}_{eff} = A \exp(-Q/RT) (\sigma_v/\sigma^*)^n \quad (5)$$

A Materialparameter,

Q Aktivierungsenergie,

R allgemeine Gaskonstante,

T Temperatur,

$\sigma^* = 1 \text{ MPa}$.

Diese Gleichung stellt eine Analogie zu den einachsigen Kriechgesetzen von *Norton* bzw. *Odquist* und *Hult* dar, die z. B. für Metalle bei höheren Temperaturen angewendet werden. Nach dieser Gleichung findet der Kriechprozeß bei jeder endlichen Spannung statt, er ist nicht an das Erreichen einer Fließgrenze gebunden.

Die Berücksichtigung des zeit- und temperaturabhängigen Materialverhaltens führt auf nichtlineare Gleichungssysteme. Analytische Lösungen liegen nur für einfache geometrische Körper vor [11]. Das vorliegende Einschlußproblem – statisches Widerlager im Gebirge – kann nur iterativ, z. B. mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM), behandelt werden. Die zu untersuchende Struktur wird in endliche Elemente, z. B. Dreieck- und Viereck-Ringelemente mit jeweils 6 bzw. 8 Knoten unterteilt. In jedem Element können Materialparameter und Temperaturen nach Gleichung 5 vorgegeben werden. Die Stützstellen der numerischen Integration bilden die sog. *Gaußpunkte* im Inneren der Elemente. Aus den (zeitlich) veränderlichen Oberflächen- und Volumenkräften wird für die Gesamtstruktur der Vektor der Knotenkräfte gebildet. Die konstant bleibende Steifigkeitsmatrix wird mit Hilfe der Programmmoduln für elastische Berechnungen des PS ROBDIS aufgebaut.

Je nach dem Belastungsverlauf werden sowohl die Zeit als auch der Kraftvektor in Zeit- und Lastschritte unterteilt. Die Zustandsänderungen σ_{ij} , $\epsilon_{ij}(\text{TE})$ und $\epsilon_{ij}(\text{V})$ werden in den *Gaußpunkten* berechnet. Die Werte für die Knotenpunkte werden durch Extrapolation ermittelt. In jedem *Gaußpunkt* beginnt die Änderung der Zustandsgrößen erst dann, wenn $\sigma_v \neq 0$ ist. Liegen keine Anfangs- bzw. thermischen Dehnungen vor, die einen Spannungszustand erzeugen können, entspricht der erste Berechnungsschritt der elastischen Berechnung, und die Berechnung viskoser Dehnungen wird übersprungen.

Im weiteren Rechengang wird von jedem Zeitschritt nur der Zustand ($\epsilon_{ij}(\text{TE})$, σ_{ij} , $\epsilon_{ij}(\text{V})$) an den nächsten übergeben. Eine weitere Vermittlung der Vorgeschichte ist infolge dieses Materialverhaltens nicht notwendig. Die Zeitschrittweite Δt (Intervalllänge) wird vom Bearbeiter vorgegeben. Für den gesamten Zeitraum ist die Intervalleinteilung als arithmetische oder geometrische Reihe frei wählbar.

Innerhalb eines Zeitschrittes erfolgt die Iteration über die Dehnungen. Die Größe der Zeitschritte beeinflusst sehr stark die Fehler in der Berechnung der viskosen Dehnungen und damit auch in der Spannungsberechnung. Es empfiehlt sich deshalb, jede Belastungsänderung mit kleinen Zeitschritten zu beginnen. Im Programm sind Bedingungen enthalten, die bei Überschreitung von Fehlergrenzen bzw. bei zu großen Werten von σ_v zum Abbruch führen. Die Lastaufbringung auf Konturen innerhalb eines Lastzyklus kann durch Steuerparameter von schlagartiger Einwirkung über linearen Anstieg bis zu sinusförmiger Aufbringung variiert werden. Diese Programmsysteme COSAR-ROBDIS bzw. ROBDIS-VIKONE können auf größeren Personalcomputern (AT-kompatible) implementiert werden. Für die Lösung des Gleichungssystems (Cholesky-Verfahren) ist die Arbeit mit doppelter Genauigkeit notwendig. Die Rechenzeit steigt näherungsweise linear mit der Anzahl der Unbekannten (Knotenzahl) und quadratisch mit der Bandbreite der Steifigkeitsmatrix [2].

Aufgrund der relativ großen Rechenzeiten besonders für die Langzeitsimulation der Widerlagerbeanspruchung wurden ein Datenrettungs- und ein Neustart-Programm angefügt. Dieser Modul gestattet, ausgehend von einer bestimmten Vorgeschichte, z. B. GLF 1, Variationen zu weiteren Lastfällen (GLF 2, GLF 3) mit relativ geringem Zeitaufwand. Zur Nachbildung der realen Bedingungen sind weiterhin Modifizierungen im Programm enthalten, die z. B. den Übergang vom sekundären Spannungszustand (GLF 1 mit freier Verformung der inneren Kontur) zur Phase des Aufkriechens des viskosen Gebirges auf das elastische Widerlager nach dessen Einbau betreffen. Dieser Vorgang wird durch Angabe der Zeit bis zum Einsetzen des Kontaktes Widerlager-Gebirge gesteuert.

Einige einfache Beispielrechnungen für den GLF 1 (sekundärer Gebirgsspannungszustand) sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt. Bei Ansatz eines hydrostatischen Grundspannungszustandes zeigt Bild 2 den Spannungsverlauf zu verschiedenen Zeiten (zeitabhängige Spannungsumlagerung) und Bild 3 die zeitabhängige Konvergenzrate und die effektive Spannung an der Kontur des kreiszylindrischen Hohlraumes.

3.2. Elasto-plastisches Modell FEEREPT

Wird für die Beurteilung der Tragfähigkeit einer Verschlußkonstruktion angenommen, daß diese einerseits infolge einer zu hohen Beanspruchung und andererseits infolge zu großer Deformation erschöpft sein kann, so werden die zu erwartenden Spannungen in erster Linie unter Ansatz eines zeitunabhängigen elastisch nichtlinear plastischen Stoffgesetzes theoretisch ermittelt, während die möglichen Verformungen mit einem elastisch nichtlinear viskosen Stoffgesetz abgeschätzt werden. Für den gegebenen Grenzzustand liefert ein zeitunabhängiges Stoffgesetz eine zu konservative Prognose des Beanspruchungszustandes, im Vergleich zu den tatsächlichen Verhältnissen, während ein elastisch viskoses Stoffgesetz eine zu konservative Prognose des Verzerrungszustandes ergibt [7].

Für die Untersuchungen zum zeitunabhängigen elasto-plastischen Verhalten steht das PS FEEREPT zur Verfügung. Damit kann der Einfluß elasto-plastischer Materialeigenschaften auf die Beanspruchung bzw. die damit verbundenen Spannungsumlagerungen untersucht werden. Mit diesem Programm, das speziell zur Lösung geotechnischer Aufgabenstellungen bei inelastischem Materialverhalten entwickelt wurde, lassen sich Probleme des ebenen Verzerrungszustandes und des axialen rotationsymmetrischen Spannungszustandes bearbeiten. Die Netzeinteilung erfolgt, wie bereits unter 3.1. beschrieben, mit Drei- und Viereck-Scheiben- bzw. Ring-Elementen.

Zur Nachbildung des inelastisch zeitunabhängigen Materialverhaltens kann auf unterschiedliche Stoffgesetze zurückgegriffen werden, von denen die wichtigsten nachfolgend aufgeführt sind:

- pseudo-hypoelastisch nach *Duncan/Chang*,

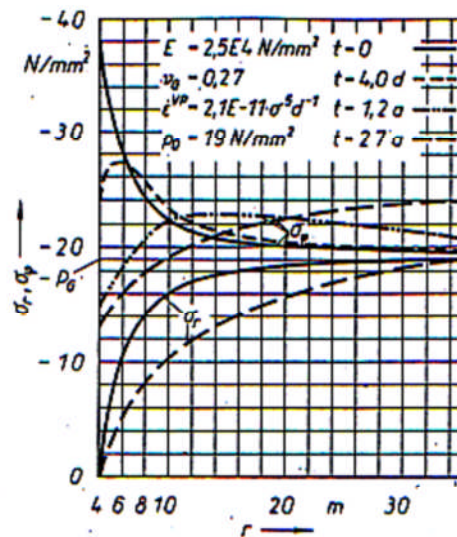


Bild 2
Spannungen in
Abhängigkeit von
der Zeit um einen
kreisförmigen
Ausbruch -
PS ROBDIS-
VIKONE

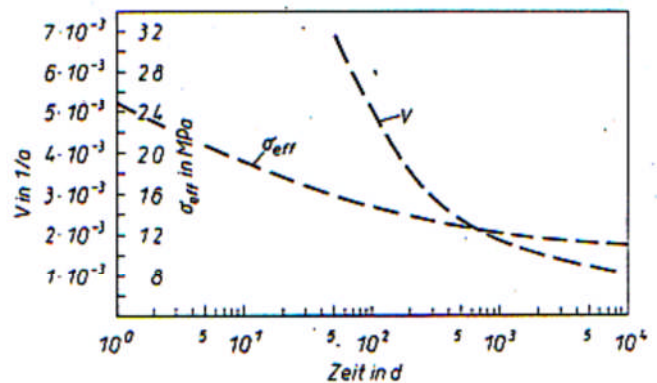


Bild 3. Effektive Spannungen und Konvergenzrate um einen Streckenausbruch - PS ROBDIS-VIKONE

- linear elastisch, ideal plastisch nach *Drucker/Prager, Mohr/Coulomb, Zienkiewicz/Pande/Schad* oder *Zienkiewicz/Pande/Gudehus*,
- elasto-plastisch, einfach verfestigend nach *Lade/Duncan*,
- elasto-plastisch, doppelt verfestigend nach *Lade/Arslan*.

Das PS ist durch folgende Besonderheiten gekennzeichnet:

- Vor Beginn der eigentlichen FE-Rechnung können in den Elementen lineare und konstante Anfangs- bzw. Eigenspannungszustände mit und ohne zugeordnete Verzerrungen erzeugt und bei der weiteren Berechnung berücksichtigt werden.
- Durch Einführung eines Zusatzkriteriums können auftretende Zugspannungen in den betreffenden Elementen (nach Erreichen der Fließgrenze) ausgeschlossen werden.
- Zur Simulation von technologischen Abläufen (Auftrags-, Einbau- und Aushubvorgänge) können zur aktuellen Struktur Elemente hinzugefügt bzw. entfernt werden. Durch Eingabe von Pseudohöhen für einzelne Gebirgsschichten werden adäquate Gebirgsdrücke aufgerufen.
- Durch Auftreten von Wasser können Dichteänderungen in den Elementen simuliert werden.

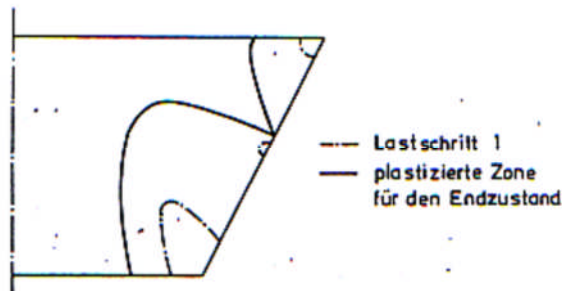
Als Lösungsverfahren wird die Frontlösmethode eingesetzt. Zur Approximation der physikalischen Nichtlinearität wird als Iterationsverfahren die Methode der Anfangsspannungen mit verallgemeinerter regula falsi verwendet. Die Steifigkeit der Konstruktion wird dabei sowohl in den Lastinkrementen konstant gehalten (reine Methode der Anfangsspannungen) als auch innerhalb des Iterationszyklus (Lastinkrement) verändert (Konvergenzbeschleuniger).

Die Anwendung des PS für die Modellierung und Untersuchung des Beanspruchungszustandes von Querschnittsdichtungen

im Gebirge erfordert die Entscheidung für eine Fließbedingung. Aus Literaturrecherchen und Vergleichsrechnungen konnte festgestellt werden, daß das Fließkriterium nach *Drucker/Prager* für diese Materialien ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Durch das Aufprägen von Verschiebungsinkrementen kann näherungsweise das Spannungs-Verformungsverhalten des Steinsalzes nachgebildet werden. Der dadurch erzielte Verschiebungszustand ist mit dem für das Steinsalz maßgeblichen sekundären Kriechzustand vergleichbar. Den Verschiebungen können in einer Nachlaufrechnung bestimmte Zeitabschnitte zugeordnet werden. Der günstige Einfluß eines Betons mit elasto-plastischen Eigenschaften, der ebenfalls der Fließbedingung von *Drucker/Prager* mit anderen Fließparametern (gegenüber Steinsalzgebirge) genügt, konnte nachgewiesen werden. Die mit der Berücksichtigung von inelastischem Materialverhalten verbundene Spannungsumlagerung verändert den sich im Betonbauwerk ausbildenden Spannungszustand in Richtung eines günstigeren Beanspruchungszustandes. Bild 4 zeigt Ergebnisse einer Beispielrechnung. Auf die Darstellung der Theorie wird hier verzichtet, einige wichtige Beziehungen sind im Bild 4 aufgetragen.

4. Sicherheitseinschätzung

Ein Maß für die Sicherheit des Bauwerkes ist die Angabe der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. die Angabe des Produktes aus Versagenswahrscheinlichkeit und Schadenssumme. Aufgrund des derzeitigen Erkenntnisstandes, der großen Anzahl von Einflußgrößen (etwa 25), der unbekanntenen Verteilungsfunktionen dieser Einflußgrößen, der Unkenntnis über deren gegenseitige



Grundgleichungen der Plastizitätstheorie

$$F = k_0 \cdot \sigma_{pp} + \sqrt{J_2} - k_1 = 0 \quad \text{Fließbedingung nach DRUCKER / PRAGER}$$

$$k_0 = \frac{2 \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad ; \quad k_1 = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad \text{Außenkreis}$$

$$d \epsilon_{ij} = \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \cdot d \lambda \quad \text{Fließregel}$$

$$G = \alpha \cdot \sigma_{pp} + \sqrt{J_2} - \beta = 0 \quad \text{plastisches Potential}$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \sin \psi}{\sqrt{3} (3 - \sin \psi)} \quad ; \quad \beta = \frac{6 \cdot c \cdot \cos \psi}{\sqrt{3} (3 - \sin \psi)}$$

- λ - nicht negativer skalarer Faktor
- J_2 - 2. Invariante des Spannungsdeviators
- σ_{ij} - Komponente des Spannungstensors
- c - Kohäsion
- ψ - Dilatanzwinkel
- σ_{pp} - 1. Invariante des Spannungstensors
- ϕ - Winkel der Inneren Reibung

Bild 4: Zeitliche Änderung der plastizierten Zonen

Beeinflussung und deren Einfluß auf das Endergebnis sind Angaben zur Versagenswahrscheinlichkeit nicht möglich.

Zu einer Abschätzung der statischen Zulässigkeit der mit FE-PS errechneten Spannungsfelder werden daher auf der Basis mehrachsiger Festigkeiten Sicherheitsabstände ermittelt. Als Hauptproblem tritt hierbei auf, daß der Sicherheitsabstand nicht nur vom Spannungszustand und den mehrachsigen Baustoff- und Gebirgsfestigkeiten abhängt, sondern auch maßgeblich durch den unbekanntenen bzw. willkürlich festzulegenden Spannungsweg beeinflusst wird [14, 15]. Die Basis für die nachfolgend aufgeführten Sicherheitsabstände bilden wiederum die Datenfiles (Ergebnisprotokolle) der FE-Berechnungen (post processing). Dazu ist es u. a. notwendig, die Hauptnormalspannungen entsprechend ihrer Größe zu ordnen und nach bestimmten Kriterien mit vorhandenen Größen zu vergleichen.

Zur Einschätzung des Beanspruchungszustandes des Gebirges wurden zwei Sicherheitsabstände benutzt:

- Oktaedrischer Sicherheitsabstand bei konstanter Normalspannungssumme (gilt nur für Druckspannungszustände),
- Sicherheitsabstand bei konstanter Hauptnormalspannungssumme und Ansatz des Bruchkriteriums nach *Mohr* (Bruchhüllkurve).

Für die Ermittlung der Sicherheitsabstände im Betonbauwerk sind in Abhängigkeit vom Spannungsweg und Spannungszustand verschiedene Möglichkeiten gegeben:

- S_{S1} : für dreiachsige Druckspannungszustände, Spannungsweg: konstantes Hauptnormalspannungsverhältnis,
- S_{S2} : für dreiachsige Druckspannungszustände, Spannungsweg: konstante maximale und mittlere Hauptnormalspannung,
- S_{S3} : für beliebige zwei- und dreiachsige Spannungszustände (auch bei auftretenden Zugspannungen), Spannungsweg: konstante Oktaedernormalspannung,
- S_{S4} : für zweiachsige Druckspannungszustände und dreiachsige Spannungszustände (wobei der Einfluß von Zugspannungen auf das Erreichen des Grenzzustandes durch eine Bewehrung vernachlässigt wird), Spannungsweg: konstantes Hauptnormalspannungsverhältnis,
- S_{S5} : für zwei- und dreiachsige Spannungszustände unter Einschuß von Zugspannungen, Spannungsweg: konstantes Hauptnormalspannungsverhältnis $\sigma_I/\sigma_{III} = \text{const.}$ unter Vernachlässigung der mittleren Hauptnormalspannung.

Die mehrachsigen Betondeckigkeiten werden durch Anpassungsfaktoren, wie sie in [4] angeführt sind, berücksichtigt.

Mittels grafischer Auswertung, insbesondere durch die Darstellung von Linien gleicher Sicherheitsabstände, ist eine schnelle Entscheidungsfindung für bestimmte Widerlagerkonfigurationen und für die Materialauswahl möglich.

Der Auswertemodul ermöglicht weiterhin für linear elastisches Materialverhalten durch Superposition der Ergebnisse verschiedener Lastfälle eine weitere Variation der Belastungen und somit eine bessere Anpassung an die realen Gegebenheiten.

5. Zusammenfassung

Die statische Berechnung von Querschnittsabdichtungen, die als undurchlässige Barrieren in potentiellen unterirdischen Strömungsräumen für sehr lange Standzeiten errichtet werden, kann mit FE-Programmsystemen vorgenommen werden. Dabei wird das reale Verhalten von Widerlagermaterial und Gebirge durch Benutzung von Programmen für linear elastisches, elasto-viskoses (zeitabhängiges) und elasto-plastisches Materialverhalten berücksichtigt.

Auf der Grundlage von Bemessungsrichtlinien erfolgt eine Vor-dimensionierung der vorgesehenen Querschnittsabdichtungen.

Der endgültige Standsicherheitsnachweis wird mit Hilfe von FE-Nachrechnungen erstellt. Dabei kann durch Variation von Widerlagergeometrie und Baustoffeinsatz eine Optimierung vorgenommen werden.

Die Dimensionierung basiert auf der Nachrechnung von Grundlastfällen, die einzeln oder als Lastfallkombinationen so angesetzt werden, daß sie in Größenordnung und Tendenz auch die Beanspruchungsgrenzfälle widerspiegeln (je nach den vorhandenen Bedingungen: sekundärer Gebirgsspannungszustand, zeitabhängig wirkende Gebirgsdruckbelastung, einseitige Fluiddruckbelastung).

Die Sicherheitsanalyse wird auf der Basis eines mehrachsigen Festigkeits-Verformungs-Verhaltens durch den Nachweis von Sicherheitsabständen durchgeführt, wobei der reale Spannungsweg soweit wie möglich berücksichtigt wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Fischer, U., u. a.: Finite-Elemente-Programme in der Festkörpermechanik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1986.
- [2] Sprengel, D.-M.: Eine Strategie zur Berücksichtigung viskoplastischen Materialverhaltens (Kriechen) in FEM-Programmen. Dissertation A, TU „Otto von Guericke“ Magdeburg, 1989.
- [3] Ruetz, D.: Programmdokumentation für das FEM-Programm FEE-REPGT. Schriften der HS für Architektur und Bauwesen Weimar 41.
- [4] Sitz, P.: Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen. Freiburger Forschungsheft A 643, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982.
- [5] Staupendahl, G., Gessler, K., und Wallner, M.: Zusammenfassende Darstellung von Versuchsergebnissen zum spannungs- und temperaturabhängigen Festigkeits- und Verformungsverhalten von Salzsteinen. ISRM-Symposium Aachen 1982, 05.26-28, Vol. 3, S. 1115 bis 1119. Rotterdam/Boston: A. A. Balkema 1984.
- [6] Nipp, H.-K.: Temperatureinflüsse auf rheologische Spannungszustände im Salzgebirge. Dissertation, TU „Carola Wilhelmina zu Braunschweig“, FB Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1982.
- [7] Lux, K.-H.: Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau. Ein Beitrag zur Entwicklung von Prognosenmodellen für den Hohlraumbau im duktilen Salzgebirge. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag 1984.
- [8] Albers, G.-H.: Thermomechanische Beanspruchung der Umgebung von Wärmequellen unter Berücksichtigung der Festigkeits- und Versagensgrenzen von Steinsalz. Ein Beitrag zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische HS Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 1986.
- [9] Sprengel, D.-M.: Konzeption zum Aufbau eines FEM-Programmsystems für die Berechnung von Metallkriechvorgängen. Diplomarbeit, Techn. Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg, WB Festkörpermechanik, unv., 1986.
- [10] Wallner, M., und Wulf, A.: Thermomechanical calculations concerning the design of a radioactive waste repository in rock salt. ISRM-Symposium Aachen 1982, Vol. 3, Rotterdam: A. A. Balkema 1982.
- [11] Ottosen, N. S.: Viscoelastic-viscoplastic formulas for analytic of cavities in rock salt. In: Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomech. Abstracts 23 (1986) 3, S. 201-212.
- [12] Zienkiewicz, O. C.: Methode der finiten Elemente. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1975.
- [13] Sprengel, D.-M.: Ein Finite-Elemente-Programm für ebene und axial-symmetrische Strukturen mit viskoplastischem Materialverhalten. Technische Mechanik, Wiss. Zeitschrift für Grundlagen und Anwendungen der Festkörper- und Strömungsmechanik, TU Magdeburg, (1987) 4.
- [14] Oellers, T., und Sitz, P.: Entwurf und Berechnung gas- und flüssigkeitsdichter Schachtverschlüsse, Sonderdruck vom Schacht- und Tunnelbau-Kolloquium 1985. Essen: Verlag Glückauf GmbH 1986.
- [15] Döring, T.: Über Grenzzustände und Sicherheitsbeiwerte in der Geotechnik. Neue Bergbautechnik 8 (1978) 1, S. 33-37.

Manuskripteingang in der Redaktion: 9. 10. 1989

5204