
Professur für Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal

**Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barriereintegritäts-
und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien
mit besonderer Berücksichtigung von
Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung
auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie**

**Abschlussbericht zum BMBF- Forschungsvorhaben
mit dem Förderkennzeichen 02 C 0720
- Zeitraum 01.10.2000 – 31.3.2006 -**

**Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux - Professur für Deponietechnik und Geomechanik
Erzstraße 20 - 38678 Clausthal-Zellerfeld - Tel.: 05323/72-2242 - Telefax: 05323/72-2341**



Abschlussbericht

zum BMBF- Forschungsvorhaben

**Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barriereintegritäts- und
Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien
mit besonderer Berücksichtigung von
Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung
auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie**

Förderkennzeichen 02 C 0720

Zeitraum 01.10.2000 – 31.3.2006

Projektleiter: Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. S. Eberth

Dr.-Ing. U. Düsterloh

Clausthal, im September 2006

Dipl.-Ing. S. Eberth

Dr.-Ing. U. Düsterloh

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux



Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 02 C 0720, Laufzeit 01.10.2000 bis 31.3.2006 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Abstract zu den Forschungsergebnissen

Das in den achtziger Jahren entwickelte Stoffmodell *LUBBY2* ist Ende der neunziger Jahre um ein *Stoffmodell zur Modellierung der Gefügeschädigung* und später noch um ein *Stoffmodell zur Modellierung der Schädigungsrückbildung (Verheilung)* erweitert worden. Dabei hatte das Stoffmodell für die Schädigungsrückbildung noch eher hypothetischen Charakter. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist dieses nunmehr als Stoffmodell *Hou/Lux* bezeichnete Stoffmodell mit Hilfe der Ergebnisse neuerer laborativer Untersuchungen (Kurzzeit- und Langzeitversuche) validiert und im erforderlichen Maße modifiziert worden.

So ist als ein wesentliches Ergebnis des Forschungsvorhabens das Stoffmodell *Hou/Lux* um einen neu entwickelten Ansatz zur Modellierung der Schädigungsrückbildung, der als *phs-Stoffmodell* (auch Verheilungs-Stoffmodell) bezeichnet wird, erweitert worden. Dieser Ansatz ist in das vorhandene FEM-Programm *MISES3* implementiert worden.

Der von *Hou (2002)* vorgeschlagene Verheilungsansatz hat bei näherer Betrachtung noch einige grundlegende Defizite gezeigt:

Die in *Hou (2002)* verwendete Potentialfunktion Q beschränkt sich auf die Anwendung von Sonderfällen (TE- und TC-Versuchsbedingungen). Die Spannungskomponente σ_2 wurde nicht berücksichtigt. Darüber hinaus muss die Schädigungsvorgeschichte durch Vorgabe der Rissrichtung mit in den Schädigungs-Rückbildungsprozess einbezogen werden, damit sich entsprechend den in der Schädigungsphase gebildeten Haupt-Fissuren auch die Verformungsrichtung in der Verheilungsphase einstellen kann (\rightarrow Schädigungsrückbildung anisotrop). Durch die Entwicklung einer neuen Potentialfunktion Q wurde die Beschränkung auf die Beanspruchungs-Sonderfälle der TE- und TC-Versuchsbedingungen aufgehoben und die korrekte Berechnung von mehraxialen Beanspruchungszuständen während des Verheilungsprozesses ermöglicht, da nun auch die Richtungen der verheilungsinduzierten Verzerrungen einbezogen und entsprechend den Rissrichtungen korrekt erfasst werden.

Allerdings erwies sich die Berechnung der durch die verheilungsinduzierten Verzerrungen bewirkten Spannungsumlagerungen im FE-Programm *MISES3* zunächst als problematisch (numerische Instabilitäten und nicht plausible Ergebnisse). Erst durch eine Modifikation im Berechnungsalgorithmus des FE-Programms *MISES3* konnte dieses Problem gelöst werden. Gleichzeitig zur FE-programminternen Modifikation wurde die Durchführung von



Kurzzeitversuchen zur Ermittlung des Schädigungsrückbildungs-(Verheilungs-)verhaltens beendet. Stattdessen sind realitätsnähere, aber deutlich aufwendigere Langzeitversuche mit Reduzierung der Wiederbelastungsrate durchgeführt worden. Da in der Verheilungsphase infolge einer signifikant geringeren Belastungsrate bei der Erhöhung der Radialbelastung auch geringere Raten der verheilungsinduzierten Verzerrungen resultieren, konnten letztendlich auch die numerischen Instabilitäten eliminiert werden. Anhand dieser Langzeitversuche konnte darüber hinaus auch eine *dritte Phase im Verheilungsprozess identifiziert* werden, die in die mathematisch-mechanische Formulierung des Verheilungsansatzes implementiert worden ist. Diese Befunde zusammen haben zu dem von Grund auf neu entwickelten phs-Verheilungsansatz geführt.

Aufgrund der neuen Potentialfunktion Q sowie der Identifikation von nunmehr drei Phasen des Schädigungsrückbildungs-(Verheilungs-)prozesses im Laborversuch ist zusätzlich zur Behebung vorstehender Defizite die Entwicklung je einer Funktion zur Beschreibung der Dilatanzrückbildung einerseits und der Schädigungsrückbildung andererseits während des Verheilungsprozesses notwendig geworden.

Experimentell sind die *Schädigungsgrenze und die Verheilungsgrenze* anhand von Messungen sowohl der Volumendilatanz wie auch der Ultraschallwellengeschwindigkeitsänderung ermittelt worden. Zusammen mit der Bruchfestigkeitsgrenze sind diese beanspruchungsbezogenen Bereichsgrenzen für die Identifizierung der jeweiligen Deformationsprozesse in das Stoffmodell *Hou/Lux* integriert. Damit ergeben sich nunmehr vier charakteristische Beanspruchungszonen: Bruchzone, Schädigungs- bzw. Dilatanzzone, volumentreue Zone (weder Schädigung noch Schädigungsrückbildung) sowie Schädigungsrückbildungszone (auch Kompaktions- bzw. Verheilungszone).

Schädigung D und Dilatanz ϵ_{vol} treten nur bei einer Überschreitung der Schädigungsgrenze (Beanspruchungszustand in der Dilatanzzone) auf. Der Abstand des aktuellen Beanspruchungszustandes zur Schädigungsgrenze im Spannungsraum und die aktuell vorliegende Schädigung bestimmen die Schädigungsrate und die schädigungsinduzierte zusätzliche Kriechrate und damit auch die Standzeit bis zum Eintritt des Kriechbruches. Liegt der aktuelle Beanspruchungszustand im Bereich der Schädigungsrückbildungszone, dann bestimmen der Abstand des aktuellen Beanspruchungszustandes zu der Verheilungsgrenze im Hauptspannungsraum sowie die aktuelle Schädigung D und Dilatanz ϵ_{vol} die Rückbildungsrate



der Schädigung und der Dilatanz, verbunden mit entsprechenden Deformationen und Spannungsumlagerungen.

Neben diesen Mechanismen- bzw. Prozessgrenzen ist eine Beziehung für die Schädigung D , die von der messbaren Dilatanz ε_{vol} und von den im Versuch messbaren Ultraschallwellengeschwindigkeiten abhängt, abgeleitet und in das Stoffmodell integriert worden. Mit dieser Beziehung kann somit die Gefügeschädigung D auf laborativer Grundlage (Messung von ε_{vol} und v_p und v_s) quantifiziert werden. Damit ist ein geeigneter Parameter zur Charakterisierung der Schädigungsintensität vorhanden.

Die für das Verheilungs-Stoffmodell erforderlichen Materialparameter können durch Laborversuche an Vollprüfkörpern mit gezielter Schädigung in der Größenordnung von einigen Prozent und anschließender Verheilung ermittelt worden. Ausgehend von den theoretischen Vorüberlegungen von *Hou (2002)* und *Chan (1998)* sind zunächst Kurzzeitlaborversuche durchgeführt worden. Nach der Bestimmung der relevanten Materialparameter wurden diese Versuche mit dem Stoffmodell nachgerechnet. Diese Reanalysen zur Überprüfung des Stoffmodellansatzes schlugen wie zuvor schon beschrieben fehl, da wegen der großen Zuwachsraten der verheilungsinduzierten Verzerrungen in jedem Zeitschritt der Risschließungsphase die Sekundärspannungen nicht mehr korrekt berechnet werden konnten. Als erster Ansatz zur Lösung dieses Problems wurden **Langzeitversuche als Grundlage für die Validierung** mit erheblich geringeren Belastungsraten von $\dot{\sigma}_{2,3} = 0,5 - 1 \text{ MPa/d}$ durchgeführt. Gleichzeitig wurde mit der Herabsetzung der Beanspruchungsraten in den Laborversuchen auch eine größere Nähe zur Realität geschaffen, da die bisherigen hohen Beanspruchungsraten im Rahmen der Kurzzeitversuche von $\dot{\sigma}_{2,3} = 1 \text{ MPa/min}$ bei der Erhöhung des Manteldrucks in situ nicht auftreten.

Mit den nunmehr durchgeführten Langzeitversuchen konnte erstmalig auch eine dritte Phase im Verheilungsprozess beobachtet werden, die als die eigentliche Verheilungsphase nach zwei vorangegangenen Risschließungsphasen identifiziert wurde. Im Verheilungsansatz nach *Hou (2002)* wie auch in den in der Literatur veröffentlichten Daten zu Verheilungsversuchen von *Chan (1998)* ist nur von einer Risschließungsphase und einer Verheilungsphase ausgegangen worden. Im Gegensatz zum ursprünglich von *Hou (2002)* vorgeschlagenen Verheilungsansatz berücksichtigt der phs-Verheilungsansatz nunmehr die drei im Laborversuch identifizierten Phasen des Verheilungsprozesses.



Beim *Entwurf von geotechnischen Barrieren* steht die *Ermittlung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Abdichtungsbauwerke in ihrer Zeitabhängigkeit* im Vordergrund. Vor diesem Hintergrund ist neben dem in das FEM-Berechnungsprogramm *MISES3* implementierten phs-Verheilungsansatz auch die von *Hou (2002)* entwickelte *Poro-Perm-Beziehung* überprüft, überarbeitet und ebenfalls in dieser modifizierten Version in das FEM-Programmpaket implementiert worden.

Da im Rahmen der Querschnitts-Abdichtungsmaßnahmen dem Strecken- oder Schachtversatz neben der mechanischen oft auch eine zusätzliche Aufgabe als erst langfristig wirksam werdende und dann allerdings auch als langfristig funktionstüchtig sein müssende Barriere zugewiesen wird, sind zusätzlich ein *Kompaktionsstoffmodell* und ein *Poro-Perm-Modell für Salzgrus* in das FEM-Programmpaket integriert worden (*Korthaus/Hein, 1998*), (*GRS, 1999*).

In Kombination mit dem phs-Verheilungsansatz und der Poro-Perm-Beziehung für Salzgestein kann nunmehr die *Schädigungs- und Dilatanzrückbildung in der Auflockerungszone im Salzgestein* im Bereich von Abdichtungsbauwerken (z.B. Streckendämme, Strecken-Versatz) berechnet werden und gleichzeitig die zugehörige *Sekundärpermeabilitätsentwicklung* quantifiziert werden. In Kombination mit dem Kompaktionsstoffmodell und dem Poro-Perm-Ansatz für Salzgrus können außerdem die *konvergenzbedingte Porositätsabnahme und die Permeabilitätsentwicklung im Salzgrusversatz* gleichzeitig mit der Entwicklung der Auflockerungszone im Salzgebirge quantifiziert werden.

Das auf diese Weise erweiterte Stoffmodell *How/Lux-phs* ermöglicht damit einen vertieften Einblick in die bei geotechnischen Barrieren ablaufenden Prozesse (umgebendes Gebirge, technische Bauwerke). Mit Hilfe der erarbeiteten theoretischen, numerischen und methodischen Weiterentwicklungen und der ermittelten Ergebnisse kann der konstruktive Entwurf von Abdichtungsbauwerken auf verbesserter rechnerischer Grundlage vorgenommen und mit Blick auf deren Funktion als geotechnische Barrieren dadurch auch ein *realitätsnäherer Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien/Endlager* erarbeitet werden.

Zur *Demonstration der Anwendungsfähigkeit des modifizierten Verheilungs-Stoffmodells und der weiteren Neuentwicklungen* sind zum Abschluss des Forschungsvorhabens numerische Simulationen zum Tragverhalten des Dammbauwerks Sondershausen in der Grube „Glückauf“ *Sitz et al. (1998)* und zum Tragverhaltens des Salzgebirges im Umgebungsbereich einer Strecke des Forschungsbergwerks Asse bei Wolfenbüttel durchgeführt worden. Diese Strecke ist einige



Jahre nach ihrer Auffahrung in einem Teilabschnitt mit einem Gußeisenausbau mit Betonhinterfüllung versehen worden.

- **Dammbauwerk Sondershausen:** Das Dammbauwerk befindet sich in einer Teufe von $z = 684$ m in der der Grube „Glückauf“ in Sondershausen und ist im Rahmen eines Forschungsvorhabens von *Sitz et al. (1998)* entworfen und in der Ausführung begleitet worden. Das Berechnungsmodell für die numerische Simulation wurde vereinfacht als rotationssymmetrisch angenommen unter Berücksichtigung der tatsächlichen Abmessungen des Dammbauwerks. Die zeitliche Abfolge der numerischen Simulation ist den Bauabschnitten in situ entsprechend festgelegt worden. Die Strecke, in der das Dammbauwerk erreicht wurde, stand 30 Jahre lang offen. Anschließend wurde die aufgelockerte Zone in der Streckenkontur im Bereich des Dammbauwerks ausgebrochen und innerhalb von 303 Tagen wurden Widerlager und Dichtelement des Dammbauwerks errichtet. Abweichend von der tatsächlichen untertägigen Situation wurde luftseitig des Dammbauwerks ein fiktiver Streckenversatz angeordnet, um einen moderaten Übergang zwischen Bauwerk und offenem Querschnitt zu schaffen und so mechanisch bedingte und hydraulisch verstärkte Konturbrüche in den Endbereichen des Bauwerks auszuschließen.

Es ist bekannt, dass das konvergierende Gebirge zu einem Druckaufbau (Kontaktdruck) zwischen Gebirge und Dammbauwerk bzw. Salzgrusversatz führt. Daraus folgen dann eine Schädigungs- und Dilatanzrückbildung in den Auflockerungszonen sowie eine Dichtmaterial- bzw. Versatzkompaktion. Diese Schädigungs- und Dilatanzrückbildung in den Auflockerungszonen ist über einen Simulationszeitraum von 1000 Jahren mit Hilfe des phs-Verheilungsstoffmodells quantifiziert und zu mehreren Zeitpunkten ausgewertet worden. Mit Hilfe des Kompaktionsstoffmodells für Salzgrus von *Korthaus/Kein (1998)* konnte die Abnahme des Porenraums im Versatz durch die konvergenzbedingte Versatzkompaktion quantifiziert werden. Durch die Anwendung der neu implementierten Poro-Perm-Relation für Steinsalz und der Poro-Perm-Beziehung für Salzgrus der *GRS (1999)* konnten sowohl die Permeabilitätsentwicklung in den Auflockerungszonen wie auch im Versatz berechnet werden. Durch den simulierten Konturausbruch vor dem Einbau des Dammbauwerks war die Auflockerungszone in diesem Bereich nahezu vollständig entfernt worden, so dass die Schädigung und die Dilatanz dort sehr gering waren und durch den Stützdruck des Dammbauwerks noch weiter zurückgebildet worden sind. Im Bereich



des Streckenversatzes kam es aufgrund des anfänglich nur sehr geringen Stützdrucks des noch nicht kompaktierten Salzgruses zu einer weiteren Schädigungs- und Dilatanzzunahme im Bereich der Streckenkontur und erst im weiteren Simulationsverlauf nach ausreichendem Stützdruckaufbau im Salzgrusversatz zu einer einsetzenden Schädigungs- und Dilatanzrückbildung.

Als Fazit ist festzuhalten, dass mit dem um den *phs*-Verheilungsansatz erweiterten Stoffmodell *Hou/Lux-phs* die Prozesse Schädigung und Rückbildung der Schädigung (Verheilung) entsprechend den gebirgsmechanischen Erfahrungen plausibel simuliert werden können. Mit Hilfe der Poro-Perm-Relationen ist auch eine Berechnung der Sekundär-Permeabilität möglich, so dass das Stoffmodell *Hou/Lux-phs* auch für die Berechnungen von Fluidflüssen durch Abdichtungsbauwerke eingesetzt werden kann.

- ***Forschungsbergwerk Asse, Tübbingausbau in einer alten Strecke aus dem Jahr 1910/1914:*** Die GRS hat im Rahmen des Forschungsvorhabens *ALOHA2* Permeabilitätsmessungen in einer Strecke in der Asse durchgeführt. Diese Strecke ist zu einem Teil 3 Jahre nach ihrer Auffahrung im Jahr 1911 mit Gusseisen ausgebaut worden. Die Messungen sind in diesem Streckenbereich in der Sohle und im Stoß erfolgt. Darüber hinaus wurde in der benachbarten offenen Strecke vor dem Streckenteil mit Ausbau die Permeabilität in der Sohle gemessen. Der Vergleich der Messwerte zeigt eine Permeabilitätsrückbildung in der ausgebauten Strecke im Lauf ihrer Standzeit von 82 Jahren. Mit Hilfe des neu implementierten *phs*-Verheilungsansatzes und der ebenfalls neu implementierten Poro-Perm-Beziehung für Steinsalz konnten im Rahmen einer Back-Analysis mit dem erweiterten Stoffmodell *Hou/Lux-phs* die Permeabilitätsmesswerte der GRS in der Größenordnung zufrieden stellend nachempfunden werden. Mit Hilfe dieser Berechnung konnte die generelle Eignung des Stoffmodells *Hou/Lux-phs* zur rechnerischen Ermittlung von Schädigung/Dilatanz und ihrer Rückbildung sowie Umsetzung der Sekundärporosität in eine Sekundärpermeabilität belegt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Forschungsvorhaben dazu beigetragen hat, die Möglichkeiten zur physikalischen Modellierung und zur numerischen Simulation des Tragverhaltens von geotechnischen Barrieren (= Querschnittsabdichtungen) im Salzgebirge wesentlich zu verbessern. Hervorzuheben sind ein modifiziertes Schädigungs-Rückbildungsstoffmodell, das erstmalig den anisotropen Charakter der Rissbildung und damit



auch der Riss-Rückbildung erfasst sowie die nunmehr mögliche vollständige Analyse des zeitabhängigen mechanischen Tragverhaltens und rechnerische Ermittlung der zeitabhängigen hydraulischen Eigenschaften von geotechnischen Barrieren wie Streckendämmen und Schachtverschlussbauwerken im Salzgebirge. Betrachtet werden dabei die Phasen Excavation, Konturentfestigung, Bauwerkseinbau, Kontaktdruckaufbau und Rückbildung der Konturentfestigungen.