



Wei Xing (Autor)

Untersuchung des geomechanischen Verhaltens von Schichtsalzen aus China in Abhängigkeit von Verunreinigungen

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen



TU Clausthal

Untersuchung des geomechanischen Verhaltens von Schichtsalzen aus China in Abhängigkeit von Verunreinigungen

Wei Xing

Promotion an der Technischen Universität Clausthal
Arbeitsgruppe Rock Mechanics in Petroleum Engineering
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Z. Hou

Band 37



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7266>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



1 Einführung

Als eine umweltschonende Maßnahme stellt Energiespeicherung im Untergrund einen wichtigen Aspekt bei der Strategie zur Energieversorgungssicherheit und effektiven Energienutzung dar. Der Untergrundspeicher für Energieträger, z. B. Erdöl und -gas (Dusseault 2004), kann zur Befriedigung von Angebot und Nachfrage, zur Glättung von saisonalen Schwankungen in der Gasnachfrage (Energieträger wird dort im Sommer eingespeichert und während der Winterzeit ausgespeichert.), zur Reduzierung der Spitzenlast, zur Sicherung einer flexiblen Handhabung und Zuverlässigkeit der Energieversorgung und somit zu einer nachhaltigen Versorgung mit Energie und Steigerung der Wirtschaftlichkeit dienen.

Zur Untertagespeicherung können erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, Aquifere, ausgeförderte Bergwerke, Felskavernen und Salzkavernen verwendet werden. Wegen den besonderen Eigenschaften von Steinsalz, z. B. wegen der niedrigen Permeabilität (hydraulische Dichtigkeit im unbeschädigten Zustand), den Schädigungseigenschaften oder dem Verheilungsvermögen, wird Erdöl und -gas bevorzugt in Salzkavernen gespeichert. Salzkavernen haben viele weitere Vorteile: z. B. weniger benötigtes KISSENGAS als in Porenspeichern, eine besonders hohe Ausföderungsrates und die vollständige Ausföderung des KISSENGASES nach der endgültigen Stilllegung der Kaverne.

Neben der Nutzung als Speicher für Erdöl und -gas werden untertägige Hohlräume in den Salzlagerstätten wegen ihrer vielseitigen Anwendungsbereiche heutzutage immer bedeutungsvoller und sie werden zudem genutzt zur unterirdischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) (Dusseault 2004), zur Entsorgung von Abfällen sowie als Druckluftspeicherkaverne (Düsterloh 2013). Die Verwendung von Hohlräumen als Druckluftspeicherkaverne existiert schon lange Zeit, wird aber in Kombination mit der Nutzung erneuerbarer Energien wieder verstärkt erforscht.

Aufgrund der vielseitigen ingenieurtechnischen Anwendungsmöglichkeiten der Salzlagerstätten haben sich viele Wissenschaftler seit Jahrzehnten auf die beim Kriechen zusammenwirkenden komplexen Mechanismen des Steinsalzes konzentriert. So wurden beispielsweise von 1981 bis 2015 acht internationale Salzmechanik-Tagungen „Mechanical Behavior of Salt“ durchgeführt. Je nach Schwerpunkt der Tagung wurden unterschiedliche Problemstellungen diskutiert. Eine strukturierte und ausführliche Zusammenfassung ist jeweils in (Günther 2009, Düsterloh 2009, Lerche 2012, Wolters 2014) zu finden.



1.1 Die Salzkaverne als ein untertägiger Speicherraum für gasförmige Energieträger

Im Salinargebirge können im Wesentlichen zwei Formen von Kavernen als untertägige Hohlräume klassifiziert werden, nämlich (1) die als Folge der Mineralgewinnung entstandenen oder (2) die zielorientiert im Solverfahren hergestellten Salzkavernen.

- (1) Die Gewinnung der im Allgemeinen fürs Leben und in der chemischen Industrie bedeutenden Salze hat ihre Spur hinterlassen. Sowohl beim Steinsalz als auch beim Kaliabbau entstanden große untertägige Hohlräume, die als Speicherräume für Erdgas genutzt werden können. Die schon in Betrieb genommenen Salzkavernen in Jintan, China, gehören zu dieser Form und werden nachstehend detaillierter beschrieben.
- (2) Heutzutage sind die ingenieurtechnisch nutzbaren unterirdischen Hohlräume in den Salzlagerstätten wegen verbreiteter spezieller Anwendungsbereiche noch bedeutender als früher und werden demzufolge zielorientiert im Solverfahren hergestellt.

Schon bereits im Jahr 1916 wurde das Aussolverfahren zur Herstellung von Salzkavernen patentiert. Während des zweiten Weltkrieges wurde in Kanada der erste Salzkavernenspeicher der Welt in Betrieb genommen. Die ersten Kavernen zur Speicherung von gasförmigen Kohlenwasserstoffen wurden in den USA (1961) und Kanada (1963) gebaut. Der Baubeginn der ersten Salzkaverne in Deutschland (Kaverne Heide 101) war 1962. Im darauffolgenden Jahr, 1963, erfolgte die Inbetriebnahme dieser Salzkaverne zur Flüssiggasspeicherung (mit Butan). Die erste Erdgasspeicherkaverne (Kaverne Kiel 101) wurde 1966 gebaut und im Jahr 1971 in Betrieb genommen (Lux 1984). Bis Ende 2013 (LBEG 2014) gingen in Deutschland 21 Erdgas-Porenspeicher mit einem gesamten Arbeitsgasvolumen von 10,8 Milliarden Kubikmetern und 244 Erdgas-Salzkavernenspeicher mit einem Arbeitsgasvolumen von 13,7 Milliarden Kubikmetern in Betrieb, außerdem waren 111 Erdgas-Salzkavernenspeicher mit ca. 6,1 Milliarden Kubikmetern Arbeitsgasvolumen in Planung oder Bau. In Deutschland ist momentan der Beginn eines neuen Aktivitätshochs bei dem Bau von Salzkavernen zu erleben.

Im Vergleich dazu befindet sich die Forschung zum Thema der unterirdischen Energiespeicherung in Salzkavernen in China noch in der Anfangsphase. Sie begann um die Jahrtausendwende, ist aber wegen der geplanten Umstrukturierung der Energieversorgung bzw. der erheblichen Gasanteilserhöhung des Primärenergieverbrauches von 5% (2012) auf über 10% im Jahr 2020 (<http://www.eia.gov>) zurzeit hochaktuell, da eine große Menge von Salzkavernen zur Zwischenspeicherung von Erdgas dringend benötigt wird.

1.2 Entwicklung des Salzkavernenbaus in Schichtsalz mit hohem Verunreinigungsanteil in China

Salzlagerstätten in Deutschland treten häufig in Form von Salzstöcken mit Höhen von bis zu 1000 m auf und sind wegen ihrer hohen Reinheit sehr günstig für die Konstruktion einer Salzkaverne. Im Gegensatz dazu sind in China ausschließlich horizontale Salzlagerstätten mit einer Mächtigkeit von weniger als 300 m und einem hohen Anteil an Verunreinigungen vorhanden. Sie bestehen aus einer Wechsellagerung von Steinsalzschiefern und Anhydrit-, Dolomit- oder Salzionenbänken. Der Abstand zwischen Salzspiegel und Salzbasis ist klein im Vergleich zur Situation in Deutschland. So befindet sich beispielsweise der Salzspiegel in Jintan in 900 m Tiefe, die Mächtigkeit der Salzlagerstätte beträgt nur ca. 168 m. Die flächenhafte Ausbreitung der Salzschiefer ist groß. Der Steinsalzgehalt schwankt allerdings zwischen 35 % und 95 % und es gibt in der Salzlagerstätte mehrere Schwächeschichten (z. B. Tonschichten) mit Dicken von einigen Zentimetern bis einigen Metern (Yang et al. 2012). In Abbildung 1-1 sind die unterschiedlichen Salzlagerstätten in Deutschland (Salzstock) und China (Schichtsalz) entsprechend mit einem typischen Salzprüfkörper aus der jeweiligen Salzlagerstätte exemplarisch dargestellt.



Abbildung 1-1: Unterschied der Salzlagerstätte zwischen Deutschland (links; Salzstock und hohe Reinheit) und China (rechts; Schichtsalz und hoher Verunreinigungsanteil)

China ist im internationalen Vergleich relativ spät im Bereich der Energieuntertage-speicherung gestartet (Kolditz et al. 2015) und hat bisher nur wenige Voruntersuchungen durchgeführt. Mit der Forschung zur Erdgasspeicherung in Kavernen wurde erst 1998 begonnen. Bis jetzt hat China nur sieben Kavernen in Betrieb genommen, die sich in Jintan (Jiangsu-Provinz) befinden und im Rahmen des West-Ost-Erdgasprojektes der Petro China Corporation genutzt werden. Davon sind sechs alte Salzgewinnungskavernen, die umgerüstet wurden und seit 2007 zur Erdgasspeicherung verwendet werden. Nur die siebente (JZ-1) wurde zum Zweck der Gasspeicherung neu ausgesolt. Im Juni 2010 erfolgte hier die erste Gasinjektion. Somit besaß dieses Kavernenfeld bis 2011 mit sieben Kavernen bereits ein Speichervolumen (Arbeitsgasvolumen + Kissengasvolumen) von 112 Millionen Kubikmetern. Dabei



Einführung

betrug die Ausspeicherkapazität zur Deckung des Spitzenbedarfs 45 Millionen Kubikmetern, in Notfallsituationen sogar 56 Millionen Kubikmetern. Zukünftig soll dieses Feld auf 100 - 120 Gaskavernen und 50 - 60 Erdölkavernen erweitert werden. (Yang et al. 2012)

Weitere fünf Salzkavernenfelder in China werden geplant: in Yunying und Qianjiang in der Hubei-Provinz, in Pingdingshan in der Henan-Provinz, in Anning in der Yunnan-Provinz und in Huan'an in der Jiangsu-Provinz. Obwohl viele Autoren (Yang 2012, Xie et al. 2011, Zhou et al. 2011) zahlreiche Untersuchungen durchgeführt haben, gibt es bis heute in China noch keine spezifischen technischen Regeln zum Salzkavernenbau. Es mangelt an Erfahrungen beim Kavernendesign und Kavernenbetrieb sowie an lokationsspezifischen Materialparametern. Es müssen Untersuchungen zur langzeitigen, mechanischen Stabilität, zur langzeitigen Dichtheit, zur akzeptierbaren Oberflächenabsenkung, zum zulässigen Kavernenvolumen, zur Umweltverträglichkeit und zur Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden. Zudem sollten Regeln zur Standortsuche für mögliche Kavernenfelder entwickelt werden, wobei unter anderem folgende Kriterien zu berücksichtigen sind: Eignung der Salzlagerstätte; Entfernung zu Verbrauchern; Entfernung zu Frischwasser; Möglichkeiten zur Solerverwertung/ -beseitigung/ -entsorgung und Entfernung zu anderen Untertageobjekten.

Besonders wichtig ist, dass wegen der erwähnten Besonderheiten der Salzlagerstätten in China neue in situ- bzw. Laboruntersuchungen durchgeführt werden müssen, um das Verhalten von Salzsichten mit Verunreinigungen (z. B. Tonschichten) zu bestimmen und den Einfluss der Verunreinigung auf mechanische und hydraulische Eigenschaften festzustellen.



1.3 Zielsetzung und Fragestellung der Arbeit

In Kooperation mit dem Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik an der TU-Clausthal, dem Institut für Gebirgsmechanik GmbH in Leipzig und dem State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering an der Sichuan University werden Steinsalzprüfkörper aus vier chinesischen Standorten, Jintan (JT), Anning (AN), Pingdingshan (PDS) und Huai'an (HA), untersucht. Das Ziel dieser Arbeit besteht aus den folgenden Punkten:

- der Laboruntersuchung des viskosen, schädigungsinduzierten und schädigungsrückbildungsinduzierten Verhaltens der verunreinigten Schichtsalz-Prüfkörper aus Jintan und Feststellung einiger Materialparameter vom mechanischen Teilmodell des Stoffmodells *Lux/Wolters* (Wolters 2014);
- der Ermittlung hydraulischer Eigenschaften der beschädigten und unbeschädigten zylindrischen Prüfkörper aus Jintan in axialer und radialer Richtung unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Spannungsgeometrie;
- der Untersuchung des Einflusses der Verunreinigung auf das kurzzeitige Verhalten (Bruchfestigkeit und -verzerrung) der Steinsalzprüfkörper aus den drei weiteren Standorten Anning, Pingdingshan und Huai'an;
- der Modifikation eines geeigneten Stoffmodells anhand obiger Versuchsergebnisse zur Beschreibung des Einflusses der Verunreinigung auf die Festigkeitseigenschaften von Steinsalz mit hohem Verunreinigungsgrad.

Um einen Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik zu erhalten, werden in der vorliegenden Arbeit in Kapitel 2 die Entwicklung der Salzmechanik und besondere Eigenschaften des Steinsalzes vorgestellt. Der ingenieurtechnischen Untersuchung der untertätigen Hohlräume im Salinargebirge wird die Salzmechanik als wissenschaftliches Werkzeug zugrunde gelegt. Als Teilgebiet der Geomechanik hat sich die Salzmechanik in den vergangenen Jahrzehnten weltweit sehr stark entwickelt. Die aus der mechanischen Beanspruchung folgende Kriechverformung hat maßgebenden Einfluss auf alle weiteren Effekte. Denn ob die Dilatanzgrenze schon überschritten ist, spielt eine entscheidende Rolle bei der Entstehung bzw. dem Öffnen von Mikrorissen aber auch bei ihrem Verschließen, wovon z. B. die Permeabilitätsänderung sehr stark abhängig ist.

In Kapitel 3 werden laborative Untersuchungen (Kriech-, triaxiale Kompressions- und Extensionsversuche sowie Verheilungsversuche) mit den Steinsalzprüfkörpern aus Jintan vorgestellt. Mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen werden Stoffparameter vom mechanischen Teilmodell des Stoffmodells *Lux/Wolters* bestimmt. Auch die hydraulischen Eigenschaften der zylindrischen Schichtsalzprüfkörper aus Jintan wurden unter TC und TE Bedingungen durch Ermittlung der axialen und radialen Permeabilität unter- und oberhalb der Dilatanzgrenze untersucht. Bedingt durch verschiedene Spannungsgeometrie unterscheidet sich die Entstehung und Entwick-



Einführung

lung der Mikrorisse (Schädigung). Deswegen ist die Spannungsgeometrie für die Änderung der hydraulischen Eigenschaft beim Überschreiten der Dilatanzgrenze entscheidend.

Die Untersuchung zum Einfluss der Verunreinigungen auf die kurzzeitigen mechanischen Eigenschaften vom Schichtsteinsalz aus drei weiteren Lokationen (AN, PDS und HA) wird in Kapitel 4 vorgestellt. Dazu zählen ein- und triaxiale Kompressionsversuche sowie Wasserlöslichkeitsversuche. Der Rückstand von den Löslichkeitsversuchen wird auch chemisch analysiert. Der unlösliche Anteil wird in der vorliegenden Arbeit als Index für den Gehalt der Verunreinigung angesehen. Eine Bewertung dieser Annahme erfolgt im Verlaufe des entsprechenden Kapitels. Anhand der Versuchsergebnisse wird das Teilstoffmodell des Stoffmodells *Lux/Wolters* für die Festigkeit, nämlich das Festigkeitsmodell *Hou*, bezüglich des Einflusses der Verunreinigung modifiziert.

Schließlich befindet sich in Kapitel 5 eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und ein Ausblick über weitere mögliche Forschungsthemen zur Untersuchung vom Einfluss der Verunreinigung auf das kurz- und langzeitige Verhalten und der hydraulischen Eigenschaften des Schichtsalzes.



2 Stand der Wissenschaft zum mechanischen Verhalten von Steinsalz

Salzgesteine entstanden infolge langanhaltender Verdunstungsprozesse. Deshalb werden sie als Verdunstungsgesteine bzw. Evaporite bezeichnet. Abhängig von ihrer (Wasser-) Löslichkeit fielen die im Meerwasser gelösten Salzminerale zu verschiedenen Zeitpunkten aus. Dadurch sind unterschiedliche Salzgesteine innerhalb einer Salzlagerstätte zu entdecken. Weltweit sind ca. 90 % aller Salzgesteine Steinsalz, (Hunsche & Schulze 1994). Die mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Salzgesteine unterscheiden sich erheblich voneinander. Darum dürfen sie unter dem Aspekt des Bergwerkdesigns nicht gleich betrachtet werden. Beispielsweise verhält sich Carnallit beim triaxialen Kompressionsversuch bei einem Manteldruck von bis zu ca. 100 MPa sehr elastisch aber auch spröde. Steinsalz, Sylvit und Anhydrit zeigen bei niedrigem Manteldruck nur Sprödebruchverhalten, bei hohem Manteldruck verhalten sie sich hingegen duktil und verlieren bzw. reduzieren ihre Tragfähigkeit erst unter großen Verformungen (Höfer & Thoma 1968). Außerdem können sich die Kriechraten bis zum 100fachen bei verschiedenen Salztypen während der stationären Kriechphase unterscheiden (Hunsche 2003).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Steinsalz, das ein komplexes mechanisches Verhalten besitzt. Der grundlegende Prozess des duktilen Deformationsverhaltens ist das Kriechen, das hauptsächlich durch Versetzungen im Kristall verursacht und gesteuert wird, bzw. von vielen Faktoren abhängig ist, wie z. B. der Feuchtigkeit (Hunsche et al. 2003), der Temperatur und der Art des Beanspruchungszustandes (Lux 1984). Das Kriechverhalten von Steinsalz wurde von vielen Wissenschaftlern studiert und analysiert (Cristescu & Hunsche 1998, Aubertin 1996, Munson & Dawson 1984, Lux & Heuserman 1983).

2.1 Langzeitverhalten (Kriechen)

Kriechen bezeichnet eine zeit- und temperaturabhängige plastische Verformung unter konstanten oder nichtkonstanten Belastungszuständen. Eine typische „Kriechkurve“ unter konstanten Spannungsbedingungen zeigt Abbildung 2-1, wobei der zeitliche Verlauf der Verzerrung ε_{cr} als Funktion der mechanischen und thermischen Versuchsbedingung wiedergegeben wird (Lux 1984). Das Kriechen wird im Allgemeinen in folgende drei, eng miteinander verknüpfte Kriechphasen unterteilt:

- I. transientes (primäres)
- II. stationäres (sekundäres)
- III. tertiäres (beschleunigtes) Kriechen.

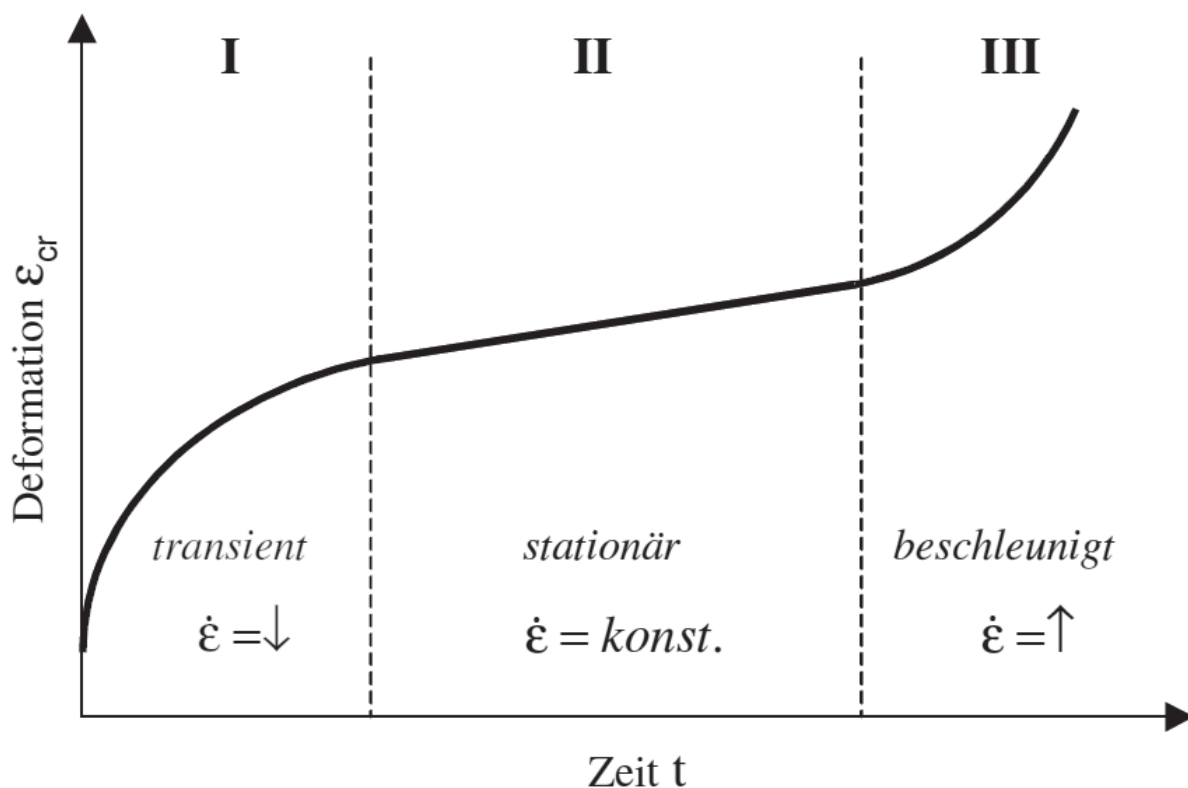


Abbildung 2-1: Kriechversuchskurve (aus Kriechversuch) mit drei Kriechphasen (Günther 2009)

Direkt nach dem Aufbringen einer Belastung entsteht eine elastische Verformung, anschließend geht der Verformungsprozess in das transiente Kriechen (I) über, in dem die Verformungsrate mit fortschreitender Deformation wegen der sich erhöhenden Materialverfestigung rasch kleiner wird. In der stationären Kriechphase (II) bleiben die Verzerrungsgeschwindigkeit und deshalb auch die Kriechrate konstant, weil die Verfestigungs- und Entfestigungsvorgänge im Gleichgewicht stehen, was beim transienten Kriechen nicht gegeben ist. Das stationäre Kriechen ist kein eigenständiger Prozess, sondern ein Sonderfall vom transienten Kriechen (Günther 2009).

Im Anschluss an Phase II ist die tertiäre Kriechphase (III) mit schnell zunehmender Verzerrungsgeschwindigkeit, insbesondere bei hoher Belastung, zu erkennen, wobei die zunehmende Verzerrungsgeschwindigkeit auf die allmähliche Materialentfestigung zurückzuführen ist. In dieser Phase wird die Dilatanzgrenze im Spannungsraum überschritten (Hunsche 2003) und es entsteht ein Kriechbruch. Um diese Grenze festzustellen, wird im Labor eine Kombination von Volumenänderungs- und Ultraschallwellengeschwindigkeitsmessungen durchgeführt, (Düsterloh 2009). Auf die Versuchstechnik wird in Kapitel 2.3.3 näher eingegangen.

Neben der Dilatanzgrenze wird desweiteren das Kriterium der Schädigungsgrenze genutzt. Als ein übergeordneter Begriff der Dilatanzgrenze und Schädigungsgrenze wird eine Gefügefestigkeitsgrenze genannt mit der Bedeutung, dass beim Erreichen eines entsprechenden Spannungszustandes erste rissbedingte Veränderungen physikalischer Eigenschaften messbar sind. Eine Übersicht ist in folgender Darstellung abgebildet.

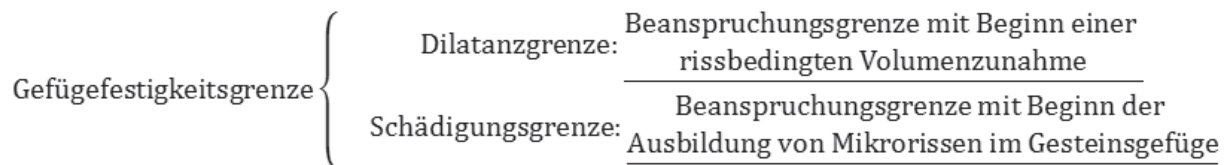


Abbildung 2-2: Bedeutung der Gefügefestigkeitsgrenze, Dilatanzgrenze und Schädigungsgrenze, (Wolters 2014)

Desweiteren ist wichtig zu erwähnen, dass die Minimalspannung alleine kaum einen Einfluss auf das Kriechverhalten hat und die konstante Kriechrate der stationären Phase nur abhängig ist von der Vergleichsspannung und der Temperatur, wohingegen die transiente Phase zudem noch von der Beanspruchungsgeschichte abhängig ist. Allerdings sind die beiden Phasen aufgrund identisch ablaufender Mikromechanismen sehr ähnlich und dürfen darum nicht separat betrachtet werden, (Hunsche & Schulze 1999).

Als Ergänzung zu der oberen Erklärung sind in der Abbildung 2-3 exemplarisch drei Kriechkurven (Kurven a, b und c) bei unterschiedlichem Druckniveau aber konstanter Spannungsbedingung dargestellt, wobei gilt: $\sigma_a > \sigma_b > \sigma_c$. Im linken Bild wird die Axialverformung und im rechten Bild separat die Axialverformungsrate dargestellt. Bei der Kurve mit der höchsten Beanspruchung (Kurve a) geht der Verformungsprozess nach dem transienten Kriechen direkt ins tertiäre Kriechen (Kriechbruch) über. Kurve b ist ein Beispiel für eine klassische und vollständige Kriechkurve, wie sie bereits in Abbildung 2-1 gezeigt wurde. Die Probe im Fall c wird immer in der transienten Kriechphase verbleiben und es wird daher kein Versagen zu erwarten sein.

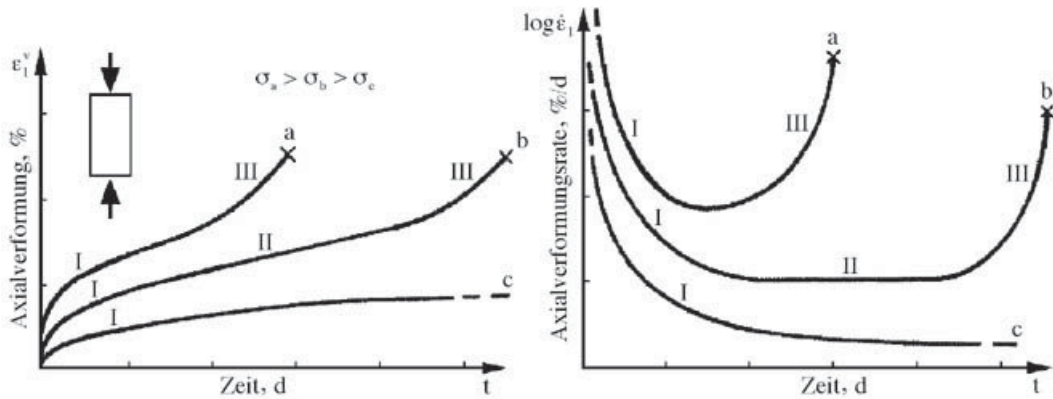


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung typischer Kriechverläufe des polykristallinen Steinsalzes bei unterschiedlichen Druckniveaus (Lux 1984)

Wird während einer stationären Kriechphase die Vergleichsspannung weiter erhöht, kommt es in der Probe erneut zu einer Gleichgewichtsfindung zwischen Entfestigungs- und Verfestigungsprozessen, die in der Kriechkurve als weitere transiente Kriechphase mit anschließender stationärer Kriechphase sichtbar ist, Abbildung 2-4. Allerdings ist die stationäre Kriechrate in Laststufe 2 größer als in Laststufe 1, $\dot{\epsilon}_{cr,2}^s > \dot{\epsilon}_{cr,1}^s$. Bei einer teilweisen Entlastung (Laststufe 2 \rightarrow Laststufe 3), das heißt einer Verringerung der Vergleichsspannung, fällt die Verformungsrate zunächst ab, und nimmt dann nur langsam wieder zu. Dieses Phänomen wird als inverses transientes Kriechen ($\dot{\epsilon}_{cr,3}^{tr} < \dot{\epsilon}_{cr,3}^s$) bezeichnet. Wenn die Vergleichsspannung in Laststufe 3 identisch ist wie in Stufe 1 ($\sigma_{Diff,3} = \sigma_{Diff,1} < \sigma_{Diff,2}$), besitzt die stationäre Kriechrate wieder den gleichen Betrag wie in Stufe 1 ($\dot{\epsilon}_{cr,3}^s = \dot{\epsilon}_{cr,1}^s$). Eine genauere Erläuterung befindet sich unter anderem bei (Günther 2009).

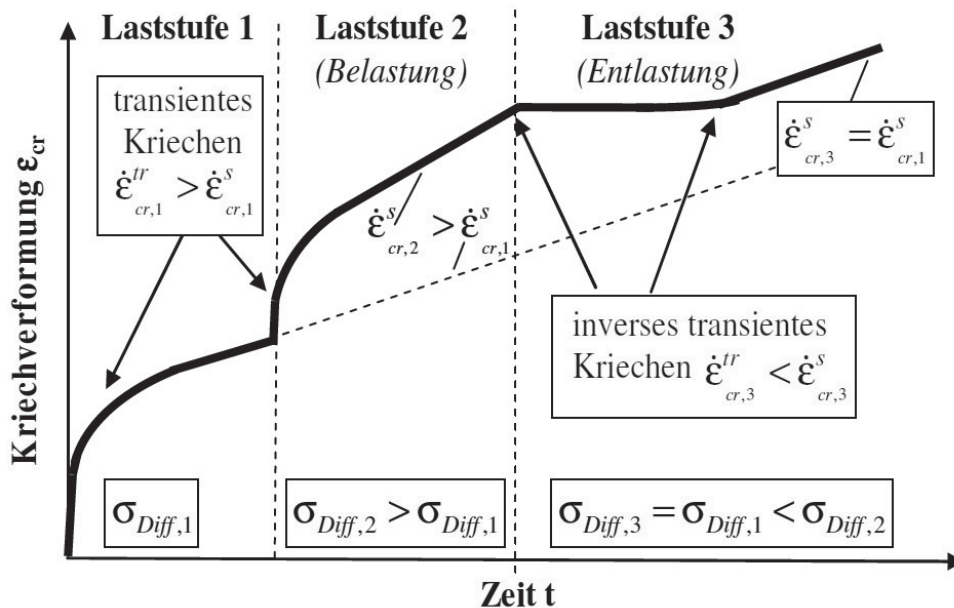


Abbildung 2-4: Prinzipielles Verhalten im Lastwechselversuch (Be- und Entlastung) (Günther 2009)