



1 Einführung

In der Fachwelt sowie der Umweltpolitik wird in der heutigen Zeit die mit Beginn der industriellen Revolution einsetzende und anthropogen höchstwahrscheinlich verursachte globale Klimaerwärmung sowie deren Auswirkungen auf die Menschheit vehement diskutiert. In den in diesem Zuge aufgestellten Klimaschutzkonventionen ist von den Nationen eine Beschränkung der für die Klimaerwärmung als verantwortlich angesehenen Treibhausgase beschlossen worden. Kohlenstoffdioxid (CO_2), das gemäß Brock et al. (2010) als natürlicher Bestandteil der Atemluft in mittleren Konzentrationen von ca. 0,04 % vorkommt und zudem aus bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht, wird in diesen Diskussionen als ein Hauptbestandteil der Treibhausgase angesehen. Hierbei ist unbestritten, dass der Anstieg des in die Atmosphäre emittierten Kohlenstoffdioxids neben Methan (CH_4) den zweithöchsten Einfluss von ca. 59 % auf die globale Erwärmung hat (vgl. Hansen et al., 2005). Im Zuge dieser global geführten politischen Diskussionen sind im Rahmen der Klimarahmenkonventionen der Vereinten Nationen im sog. Kyoto-Protokoll Klimaschutzziele definiert worden, die eine länderspezifische, jährliche Senkung der CO_2 -Emissionen vorsieht. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich darauf verständigt, diese bis spät. 2012 um rd. 21 % zu senken und konnte dies gemäß einem Bericht des Umweltbundesamtes zum Treibhausgasinventar 2009 bereits im Jahr 2007 realisieren. Bis zum Jahr 2020 hat die Bundesregierung beschlossen die Emissionen bis 2020 um rd. 40 % zu reduzieren. Eine wesentliche Fragestellung ist demzufolge, ob dieses Ziel allein dadurch erreicht werden kann, dass der Anteil an erneuerbaren Energieträgern ohne Treibhausgasemissionen erhöht, während gleichzeitig die Stromversorgung aus der Kernenergie auf Bundesebene bis 2022 vollständig zurückgefahren wird. Fraglich ist, ob diese Bestrebungen ohne Zurückgreifen auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe realisiert werden können. Aktuelle Zahlen aus dem Steinkohlebergbau verdeutlichen einen gegenläufigen Trend. Derzeit hat in der Bundesrepublik Deutschland konjunkturbedingt der Primärenergiebedarf gemäß dem Jahresbericht der Deutschen Steinkohlevereinigung 2011 um rd. 4,6 % zugenommen. Dem Bericht zufolge weist die Steinkohle als Energieträger die höchste Zuwachsrate von 14,6 % auf, wodurch ein Trend der Abkehr aus der Energieerzeugung fossiler Brennstoffe und somit der Reduktion von Kohlenstoffdioxid auf Bundesebene derzeit nicht erkennbar ist. Diese Entwicklung wird untermauert durch eine Neubewertung der Steinkohlevorkommen aus dem Jahre 2011 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), wonach der Anteil an technisch gewinnbaren Steinkohlevorräten in Deutschland bei ca. 2,5 Mrd. t SKE liegt. Hierdurch ist die Steinkohle nach der Braunkohle die größte heimische Energierohstoffreserve. Ein Ausgleich der fluktuierenden Verfügbarkeit aus den Erneuerbaren Energien ist nur durch den Ersatz der Stromerzeugerkapazitäten durch fossile Energieträger möglich [i1].



Aufgrund dieser vorweg genannten Aussichten und Entwicklungen ist auf nationaler Ebene mit einem Anstieg der CO₂-Emissionen zu rechnen. Zur Erreichung der Klimaschutzziele des Kyoto-Protokolls und der Beschlüsse der Weltklimakonferenz in Durban (u.a. Begrenzung des glob. Temperaturanstiegs um 1-2°C) sind auf nationaler Ebene unterschiedliche technische Verfahrensweisen wissenschaftlich untersucht worden. Eine dieser Technologien ist die Injektion von emittiertem CO₂ in geeignete geologische Formationen (z.B. durch die Abscheidung der Verbrennungsgase aus Kohlekraftwerken). Dieser Vorgang wird als CO₂-Sequestrierung oder Carbon Capture & Storage bezeichnet (CCS). Ist mit der CO₂-Tiefeninjektion in nahezu ausgeschöpfte Erdgasfelder gleichzeitig ein wirtschaftlicher Nutzen in Form einer Förderratenerhöhung angestrebt, so wird dieser Prozess als **Enhanced Gas Recovery (CO₂-EGR)** oder allgemein als **Carbon Capture Utilization & Storage (CCUS)** bezeichnet.

Das dieser Dissertation zu Grunde liegende Projekt ist Bestandteil des Forschungsvorhabens **CLEAN (CO₂ Large-Scale Enhanced Gas Recovery at the Altmark Natural Gas Field)**. Das CLEAN-Projekt ist integriert in das Sonderprogramm Geotechnologien des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Ziel dieses Projektes ist die wissenschaftliche Untersuchung des vorweg genannten CO₂-EGR-Verfahrens im Erdgasfeld Altmark. Für die ursprünglich vorgesehene und mangels länderrechtlicher Genehmigung unterlassene Erprobung einer In-situ-Injektion von rd. 100.000 t CO₂ ist das Teilreservoir Altensalzwedel innerhalb der Altmark-Lagerstätte ausgewählt worden. Dieses bietet als hydraulisch und strukturell isoliertes Teilreservoir mit tiefliegenden porösen Rotliegend Sandsteinen und dem Zechsteinsalinär als Barrierengestein im Hangenden gute Voraussetzungen für den langfristigen Einschluss von CO₂ in einem Porenspeicher.

Von signifikanter Bedeutung für diese langfristige Verwahrung von CO₂ ist die Gewährleistung der Integrität des Speichers hinsichtlich der Verhinderung jeglicher Gasmigration aus den Speicherformationen (Rotliegend Sandstein) über den Bohrungspfad (durch Stahl und Zementation), durch das Barrierengestein (Zechstein) in die Atmosphäre. Aufgrund der chemischen, geomechanischen und geohydraulischen Unterschiede zwischen einer vormals auf Förderung betriebenen Erdgaslagerstätte und der Umfunktionalisierung in einen CO₂-Speicher kommt der Neuentwicklung eines Verschlusskonzepts für Injektionsbohrungen eine signifikante Bedeutung zu.

Vom Fachbereich „Rock Mechanics in Petroleum Engineering“ unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Z. Hou ist am Energie Forschungszentrum Niedersachsen in Goslar im Rahmen des Themenverbundes TV 2.4 in Zusammenarbeit mit den Projektbeteiligten ein Langzeit-Bohrungsverschlusskonzept entwickelt worden. Das Ziel war es, dieses Grundkonzept durch eine numerische Vorstudie hinsichtlich seiner Eignung in einem rd. 3.000m tiefen Zielhorizont in der Erdgaslagerstätte Altmark zu untersuchen,



durch einen Feldversuch grundsätzlich zu erproben und durch Vergleich der Feldmessergebnisse mit den numerischen Simulationsergebnissen zu verifizieren. Im Falle eines erfolgreichen Projektergebnisses ließe sich diese Entwicklung auf andere Gasspeicher und damit andere geotechnische und geologische Gegebenheiten anwenden, wodurch sich ein Zugewinn an Bergwerkssicherheit hinsichtlich dem langfristigen Verschluss von Gasspeichern erzielen ließe.

Die vorliegende Dissertation beschreibt den Rahmen der wissenschaftlichen Forschungstätigkeiten, dokumentiert die inhaltliche Bearbeitung der Forschungsziele und fasst die Ergebnisse der Forschungsvorhaben zusammen. Hierbei wird insbesondere auf eigene wissenschaftliche Untersuchungen eingegangen und weniger die praktische Umsetzung des Feldversuchs beschrieben. Die erzielten Ergebnisse konnten mit denjenigen der Projektpartner verglichen werden, um somit einer kritischen Beurteilung der eigenen Arbeitsweise Rechnung zu tragen. Es wird in dieser Arbeit ausdrücklich gekennzeichnet, welche Arbeiten einen Eigenanteil darstellen und welche Ergebnisse durch Zuarbeit der Projektpartner erzielt und von mir kritisch bewertet wurden.

Mit dem Fokus auf die Beschreibung der wissenschaftlichen Analysen und Ergebnisse und weniger auf dem administrativen Projektablauf sei hierfür an dieser Stelle auf den von mir für das Teilprojekt TV2.4 angefertigten Abschlussbericht verwiesen (vgl. Hou et al. 2012).

1.1 Fragestellungen und Zielsetzung dieser Arbeit

In Bezug auf die bereits geschilderten erhöhten Anforderungen eines CO₂-Speichers, insbesondere in der sich an die Betriebsphase eines CO₂-Speichers zeitlich anschließende Nachbetriebsphase (=Stilllegungsphase) bedarf es der Neuentwicklung eines langfristig wirksamen Bohrungsverschlusskonzepts. Dieses hat den lokationsspezifischen geologischen Gegebenheiten der Altmark Rechnung zu tragen und integriert die positiven verschlusswirksamen Eigenschaften des die Bohrung umgebenden salinaren Barrierengesteins in rd. 3.100m Teufe. Das Grundgerüst zur Entwicklung und Erprobung des Konzepts bildeten bereits etablierte tiefbohrtechnische Verfahrensweisen aus dem Explorations- und Produktionsbetrieb unter Berücksichtigung bergrechtlicher Reglementierungen seitens der GDF SUEZ, konzeptioneller Ideen und Kenntnisse in der numerischen Simulation, der Salzmechanik und dem geomechanischen Laborversuchswesen (TUC-Hou) sowie der untertägigen Speichertechnik (DBI).

Die wesentlichen Fragestellungen, die im Rahmen dieser Dissertation beantwortet werden konnten lauten wie folgt:

- Mit welchen Materialien bzw. welchen geotechnischen Maßnahmen lässt sich ein Verschluss herstellen, der im Endzustand eine Kompatibilität unter strukturellen,



chemischen, geomechanischen und hydraulischen Gesichtspunkten mit dem umgebenden Steinsalzgebirge aufweist?

- Unter welchen geomechanischen und geohydraulischen Bedingungen bzw. Vorgängen und in welchen Zeiträumen lässt sich diese Kompatibilität erreichen?
- Welche numerischen Modelle müssen generiert werden, um den Feldversuchsbedingungen zu entsprechen und wie ist der Berechnungsablauf einzurichten, damit eine zeitliche Analyse des Bohrungsverschlussvorganges (Bohrungskonvergenz) ermöglicht werden kann?
- Welche Salzparameter liegen den Simulationen zugrunde und inwieweit sind diese mit dem realen Deformationsverhalten des Steinsalzgebirges in Einklang zu bringen bzw. auf ihre Plausibilität zu überprüfen?
- Wie ist ein Feldversuchsmessprogramm zu planen und auszuführen, in dem die durch das Kriechverhalten von Steinsalz induzierte Bohrenskonvergenz unter den technischen Möglichkeiten hinreichend exakt über einen langen Zeitraum erfasst werden kann

und somit zu einem Prozessverständnis der gebirgsmechanischen Vorgänge im tiefliegen Verschlusshorizont beiträgt?

- In welcher Form lassen sich die versuchsbegleitenden, numerischen Simulationsergebnisse anhand der gewonnenen Feldmessdaten validieren bzw. verifizieren, um somit eine Übereinstimmung zwischen numerisch prognostizierter und in situ nachgewiesener Konvergenzentwicklung zu erzielen?
- Lassen sich anhand der numerischen Modelle Konvergenz-, Kriechkompaktions- und evtl. Rekristallisationsprozesse im Steinsalz über Zeiträume jenseits der Projektlaufzeit abbilden und inwieweit lassen sich diese Modelle auf andere Lokationen übertragen?
- Welche geomechanischen sowie geotechnischen Nachweise sind für die Ermittlung der Bohrungs- sowie Barrierenintegrität erforderlich bzw. welche Messgrößen belegen diese Entwicklungen?
- Inwieweit stimmen die an Gesteinsprobekörpern aus dem Verschluss zum Versuchsende ermittelten hydraulischen Eigenschaften mit denjenigen der numerischen Simulation überein?

Die Zielsetzung dieser wissenschaftlichen Fragestellungen lässt sich am geeignetsten durch die Aufzählung der folgenden Arbeitspunkte beschreiben:



1. Entwicklung eines Konzepts zum langfristig wirksamen Verschluss einer CO₂-Injektionsbohrung im Zechstein unter Nutzung der verschlusswirksamen Steinsalzeigenschaften (Kriechverhalten, Bohrungskonvergenz, Versatzkompaktion, Schädigungsrückbildung von Auflockerungszonen, Rekristallisation, Rückführung in den Ursprungszustand). In diesem Konzept wird nur das Steinsalz selbst als Verschlussmaterial angesehen und etwaige Bohrungsaussteifungen in Form von Stahl und Zement bereichsweise entfernt.
2. Durchführung von numerischen Simulationen in Vorstudien vor Beginn des Feldversuchs, in denen die Auswirkungen der Verschlussgeometrie und der Einsatz einer Bohrungsverfüllung in Form von Salzgrus untersucht sowie die Kompaktionszeiträume prognostiziert werden. Hierdurch weisen sie somit eine richtungweisende Funktion auf die Konzeption des Feldversuchs auf, indem sie durch einen Optionenvergleich zwischen einer Bohrungsverfüllung und einsetzender Versatzkompaktion und einer unverfüllten Bohrungssektion mit einhergehender Bohrungskonvergenz ein entscheidendes Instrumentarium zur finalen Konzeptfestlegung darstellen.
3. Planung und Umsetzung eines Feldversuchs auf Basis des Verschlusskonzepts sowie der numerischen Vorstudien.
4. Erarbeitung und Durchführung eines auf die tiefbohrtechnischen Altmarkbedingungen angepassten Messprogrammes, anhand dessen die zeitliche Entwicklung der Konvergenz durch Messung von Kopfdrücken, hydrostatischen Drücken verdrängter Sole, Fluidtemperatur, Hohlraumgeometrie und Bohrungsfluideigenschaften ermöglicht wird.
5. Vergleich der ausgewerteten Feldmessdaten mit den numerischen Konvergenzerggebnissen zwecks Validierung und Verifikation der Simulationsmodelle.
6. Lieferung der geforderten Dichtheitsnachweise von Bohrung und Barrierengestein während und nach Abschluss der Konvergenzbeobachtungsphase anhand der Feststellung der Bohrungs- und Barrierenintegrität und somit der Plausibilität der gewonnenen Feldversuchsergebnisse.
7. Zur weiteren Verifikation der indirekten Bohrungsmessverfahren zur Feststellung der Konvergenzentwicklung sind Laborversuche an Bohrkernmaterial aus dem Verschlusshorizont durchzuführen, dessen Ergebnisse die Eigenschaften des Gesteins innerhalb des Bohrungsverchlusses feststellen lassen.
8. Erklärung, inwieweit sich diese gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse auf andere Lokationen und Anwendungsfälle übertragen lassen, wodurch sich weitere Nutzungs- und Untersuchungsmöglichkeiten ergeben, die zur Akzeptanz der



CO₂-Sequestrierung oder zur generellen untertägigen Gasspeicherung beitragen würden.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Grundlegendes zum Steinsalz als geologisches Barrierengestein

Das im Norddeutschen Becken in großer Mächtigkeit und hoher Überlagerungsteufe vorkommende Steinsalz wird grundsätzlich als Evaporit- oder Sedimentgestein bezeichnet, da es geochemisch infolge Meerwassersedimentation oder Grundwasserverdunstung entstanden ist. Die Entstehung der sich zyklisch in langen geologischen Zeiträumen wiederholenden salinaren Sedimentationsfolgen ist auf die sogenannte Barrentheorie zurückzuführen, die Carl Ochsenius (1839-1906) in seiner wissenschaftlichen Arbeit über die Entstehung der Salzlagerstätten 1877 in Halle veröffentlichte und die bis heute Gültigkeit besitzt (vgl. Ochsenius, 1877). Dieser Theorie zufolge sind vor ca. 258 Millionen Jahren innerhalb des vom Ozean durch tektonische Vorgänge abgetrennten Zechsteinmeeres und darauf folgender Verdunstungsprozesse Sedimentschichten aus Halitmineralien, Kalisalzen und Anhydrit in wechselhafter Lagerung in Abhängigkeit ihrer Löslichkeit entstanden.

Gemäß Okrusch & Matthes (2009) besitzt Halit die Härte 2, eine Dichte von 2,1-2,2 g/cm³, ist in Reinform farblos und erscheint rötlich durch Einlagerung von Hämatit, grau durch Einschlüsse von Ton und braun durch Verunreinigungen mit Bentonit. Es ist leicht wasserlöslich und setzt sich in molekularer Ebene aus dem Mineral Halit (Natriumchlorid, aus Na⁺ und Cl⁻ - Ionen bestehend) sowie geringen Mineralbeimengungen von Anhydrit, Sylvin und Gips zusammen. Die Ionen dieses Moleküls lagern sich in Form von flächenzentrierten Würfeln an und bilden somit eine kubische Kristallform (vgl. Abb. 2.1-1).

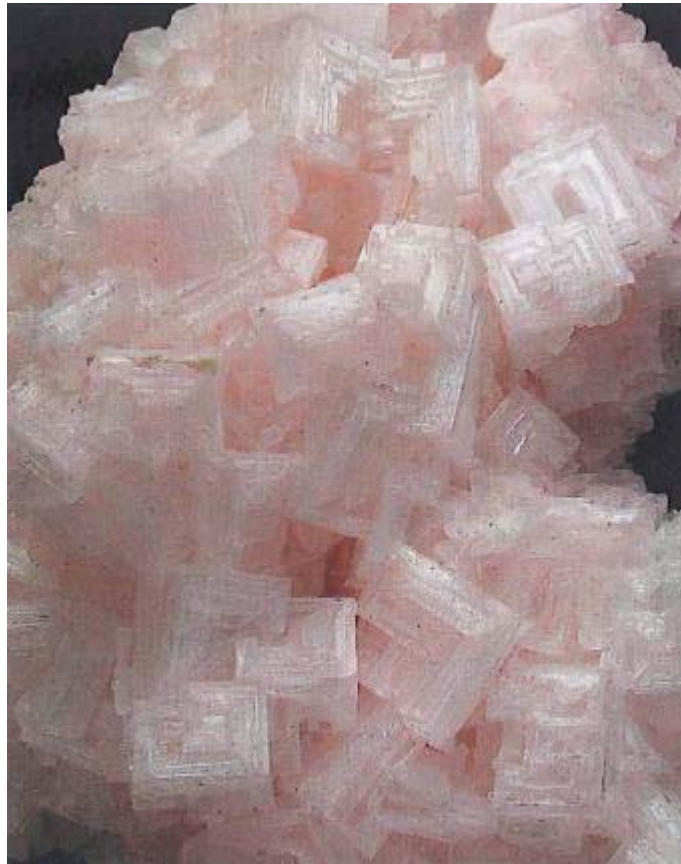


Abb. 2.1-1: Verbund von Halit-Mineralien in Form von kubischen Elementen, Bildbreite rd. 5 cm, Okrusch und Matthes (2009)

2.2 Das Festigkeitsverhalten von Steinsalz

Eine Beschreibung des generellen Deformations- und Festigkeitsverhaltens erscheint zweckmäßig, bevor auf das Kriechverhalten von Steinsalz eingegangen wird.

Aufgrund der Tatsache, dass Steinsalz unter einer Beanspruchungserhöhung ein sehr hohes Verformungsvermögen aufweist und seine Tragfähigkeit erst nach vergleichsweise hohen Verformungsendwerten verliert, wird es in der Fachwelt als duktiler Gestein bezeichnet (Eberth, 2007). Demgegenüber ist das Deformationsverhalten von elastisch spröden Gesteinen durch ein abruptes Versagensverhalten gekennzeichnet. In Abb. 2.2-1 ist der vorweg erläuterte Sachverhalt anhand eines Axialspannungs-Axialverzerrungsdiagramms dargestellt. In dieses Diagramm sind die Ergebnisse von triaxialen Druckfestigkeitsversuchen in Form von Axialspannungen und zugehörigen Axialverzerrungen an Anhydrit-, Ton- und Steinsalzprobekörpern für eine Mantelspannung (=Minimalspannung) von 2 MPa eingefügt worden. Der zur Steinsalzprobe zugehörigen Versuchskurve (Abb. 2.2-1, rot) kann entnommen werden, dass sich die maximale Beanspruchbarkeit, die sich als Spannungsmaximum der Kurve einstellt und als

Druckfestigkeit bezeichnet wird, erst nach vergleichsweise hohen axialen Verzerrungen einstellt (hier: $\sigma \approx 42 \text{ MPa}$ für $\epsilon \approx 11 \%$). Insbesondere der Nachbruchbereich ist von einem nur geringen Spannungsabfall und hohem Verformungspotential gekennzeichnet, wodurch sich eine nur geringfügig kleinere Restfestigkeit von $\sigma \approx 40 \text{ MPa}$ für $\epsilon \approx 14\%$ einstellt.

Werden die Versuchsergebnisse der Anhydritprobe den vorherigen Betrachtungen gegenübergestellt, so ist auffällig, dass zwar für den Anhydrit eine höhere Festigkeit erreicht wird, der Bruchzustand jedoch einem schlagartigen Spannungsabfall unter geringeren Axialverzerrungen unterworfen ist. Dieser entsprechende Kurvenverlauf der Anhydritprobe ist kennzeichnend für elastisch sprödes Deformationsverhalten.

Der Kurvenverlauf der Tonsteinprobe ist annähernd mit demjenigen der Anhydritprobe vergleichbar, auch wenn die erreichten Festigkeiten nicht übereinstimmen. Im Vergleich beider Nachbruchbereiche ist auffällig, dass Tonstein im entfestigten Zustand eine Restfestigkeit (\ll primäre Festigkeit) unter plastischer Verformung aufrechterhalten kann, wodurch es als Gestein mit elasto-plastischem Deformationsverhalten ausgewiesen werden kann.

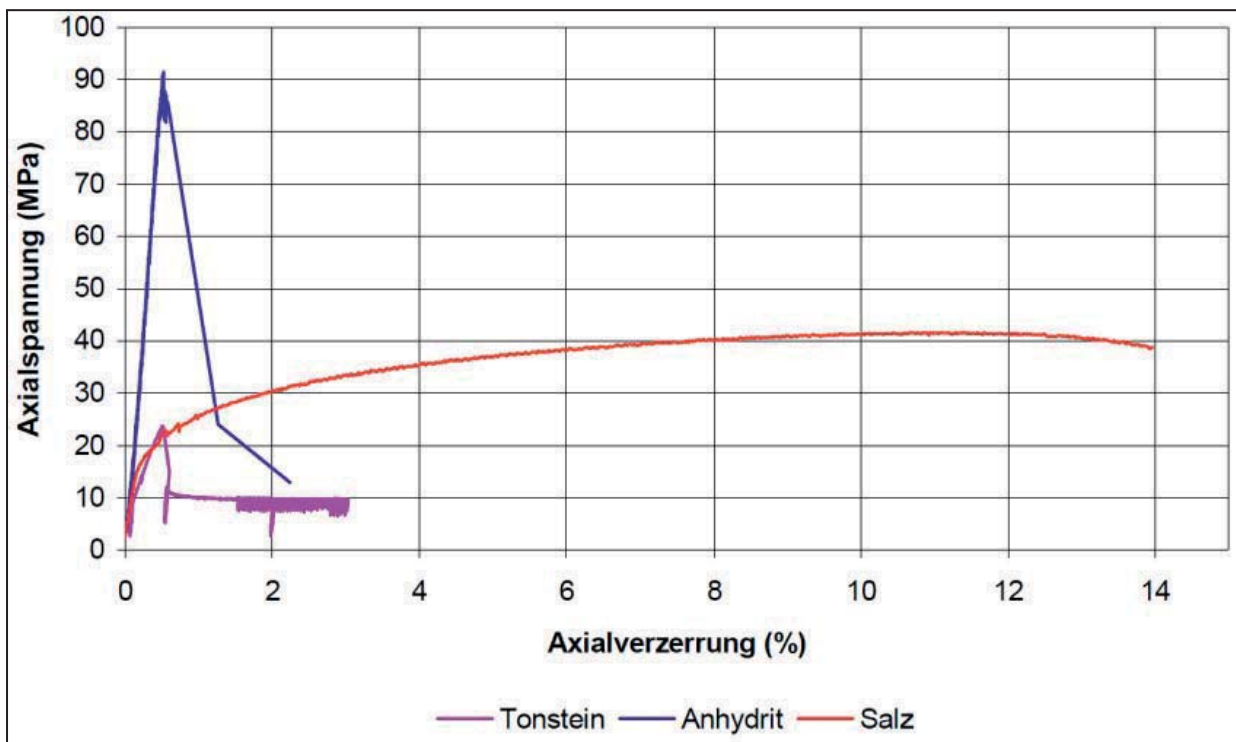


Abb. 2.2-1: Beispielhafte Darstellung der Spannungs-Verzerrungsbeziehungen für die elastisch-spröden Gesteine Anhydrit, elasto-plastischer Tonstein sowie des duktilen Gesteins Steinsalz, Eberth (2007).

Die für Steinsalz charakteristische Zunahme der Verformungen, insbesondere im Entfestigungsbereich wird gemäß Eberth (2007) dadurch erklärt, dass Steinsalz aufgrund seines mikrostrukturellen, mineralogischen Aufbaus in der Lage ist, Spannungsumlagerungen zu erlauben. In der vorliegenden Literaturstelle wird auf die sog. Dilatanzgrenze von Steinsalz hingewiesen, dessen Kurvenverlauf sich generell unterhalb der in Abb. 2.2-1 dargestellten Festigkeitskurve befindet. Diese Dilatanzgrenze ist erreicht, wenn ein triaxial beanspruchter Steinsalzprüfkörper unter einem deviatorischen Spannungszustand eine positive Volumenänderung erfährt; das Prüfkörpervolumen sich folglich infolge schädigungsinduzierter Rissöffnung erhöht.

Grundsätzlich bieten sich gemäß Eberth (2007) zur Erfassung der Gefügeschädigung und somit auch der Dilatanz von Steinsalz die Messung von Ultraschallwellen (Longitudinal- und Transversalwellen) sowie die Registrierung des Prüfkörpervolumens zur Messung der Volumenveränderung an. Eine signifikante Erhöhung der Wellenlaufzeiten vom am Prüfkörper befestigten Empfänger zum gegenüber befindlichen Sender wird hierbei als Beginn der Gefügeschädigung eines vormals ungeschädigten Probekörpers definiert. Für detailliertere Erläuterungen der diesbezüglichen Thematik um die Dilatanzgrenzen- und Schädigungsbestimmung von Steinsalz und deren Zusammenhänge mit Ultraschalllaufzeiten sei an dieser Stelle auf Krautkrämer & Krautkrämer (1986), Brodsky & Munson (1994), Brodsky (1990) sowie Popp & Kern (2001) verwiesen.

In Abhängigkeit von der Minimalspannung können sich zeitabhängig signifikant hohe Beanspruchungen z.B. an der Hohlraumkontur einer aufgefahrenen Strecke im Salinar in der Form umlagern, dass eine Dilatanz nicht mehr auftritt, wodurch eine Rissbildung vermindert werden kann. Wird die sog. Dilatanzfestigkeit überschritten, so wird das Steinsalzgefüge unter Rissbildung geschädigt. Ausgesprochen vorteilhaft erweist sich jedoch das Vermögen, unter Veränderung der Beanspruchungssituationen die vorhandenen, geschädigten Bereiche durch Risssschließung wieder zu verheilen. Diese Veränderung kann z.B. im Steinsalzgebirge eintreten, wenn sich an der Kontur eines vorher aufgefahrenen Hohlraums ein Stützdruck aufbauen kann. Die Stützung tritt ein, wenn die Hohlraumkontur infolge des Kriechvermögens von Steinsalz in Richtung eines eingebrachten Versatzes (z.B. Salzgrus) konvergiert.

Der geomechanische Sachverhalt lässt sich am geeignetsten anhand der Verläufe der Bruchfestigkeit, der Dilatanzgrenze (=Schädigungsgrenze) sowie der Verheilungsgrenze von Steinsalz in Abhängigkeit der Minimalspannung in Abb. 2.2-2 darstellen. Die Zonen zwischen den jeweiligen Grenzkurven repräsentieren Zonen, in denen signifikante hydraulische und geomechanische Eigenschaftsveränderungen auftreten. Zu diesen sind die Permeabilität, die kumulative Anzahl der Mikrorisse, die Schädigung, die Dilatanz, die Ultraschalllaufzeiten sowie die Kriechrate zu nennen.



Für eine deviatorische Beanspruchungssituation, in der die zugehörigen Spannungen oberhalb der Schädigungsgrenze (Kurve B in Abb. 2.2-2) liegen, tritt dilatantes Materialverhalten auf, das durch eine Erhöhung der Anzahl an Mikrorissen, der Schädigung D , der Permeabilität sowie der Kriechrate gekennzeichnet ist. Zudem führt diese Beanspruchungssituation zu einer positiven Volumenverzerrung (Volumenvergrößerung) und somit zur Dilatanz.

Mit dem Einsetzen von Kriechdeformationen kann sich im Steinsalzgebirge die Beanspruchungssituation verändern (z.B. infolge einer Spannungsumlagerung infolge Stützdrucksaufbaus). Die sich nun einstellenden Wertepaare aus Minimalspannung σ_3 (repräsentiert eine Einspannung, auf der Ordinate aufgetragen) sowie dem deviatorischen Spannungsanteil aus σ_1 , σ_2 und σ_3 mit $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (auf der Abszisse aufgetragen) befinden sich nun in Zonen entweder zwischen der Schädigungsgrenze (Kurve B in Abb. 2.2-2) und der Verheilungsgrenze (Kurve C in Abb. 2.2-2) oder unterhalb der Verheilungsgrenze. Im zuerst genannten Fall tritt keine Volumenveränderung im beanspruchten Steinsalzgefüge statt. In gleicher Form verhält es sich mit den Entwicklungen von Rissen, Schädigungen und Permeabilitäten, was darauf hindeutet, dass sich schädigungs- und verheilungsinduzierte Mechanismen die Waage halten und somit ein Gleichgewicht in geomechanischer Hinsicht besteht.

Für Beanspruchungssituationen unterhalb der Verheilungsgrenze (Kurve C) kann eine Verheilung vormals geschädigter Risse in der Salinarstruktur stattfinden. Innerhalb dieses Prozesses vollzieht sich eine Reduktion der entsprechenden mechanischen sowie hydraulischen Kenngrößen (hier z.B.: Kriechrate, und Permeabilität) sowie der schädigungsrelevanten Kennwerte (Schädigung, Dilatanz, Ultraschalllaufzeiten).

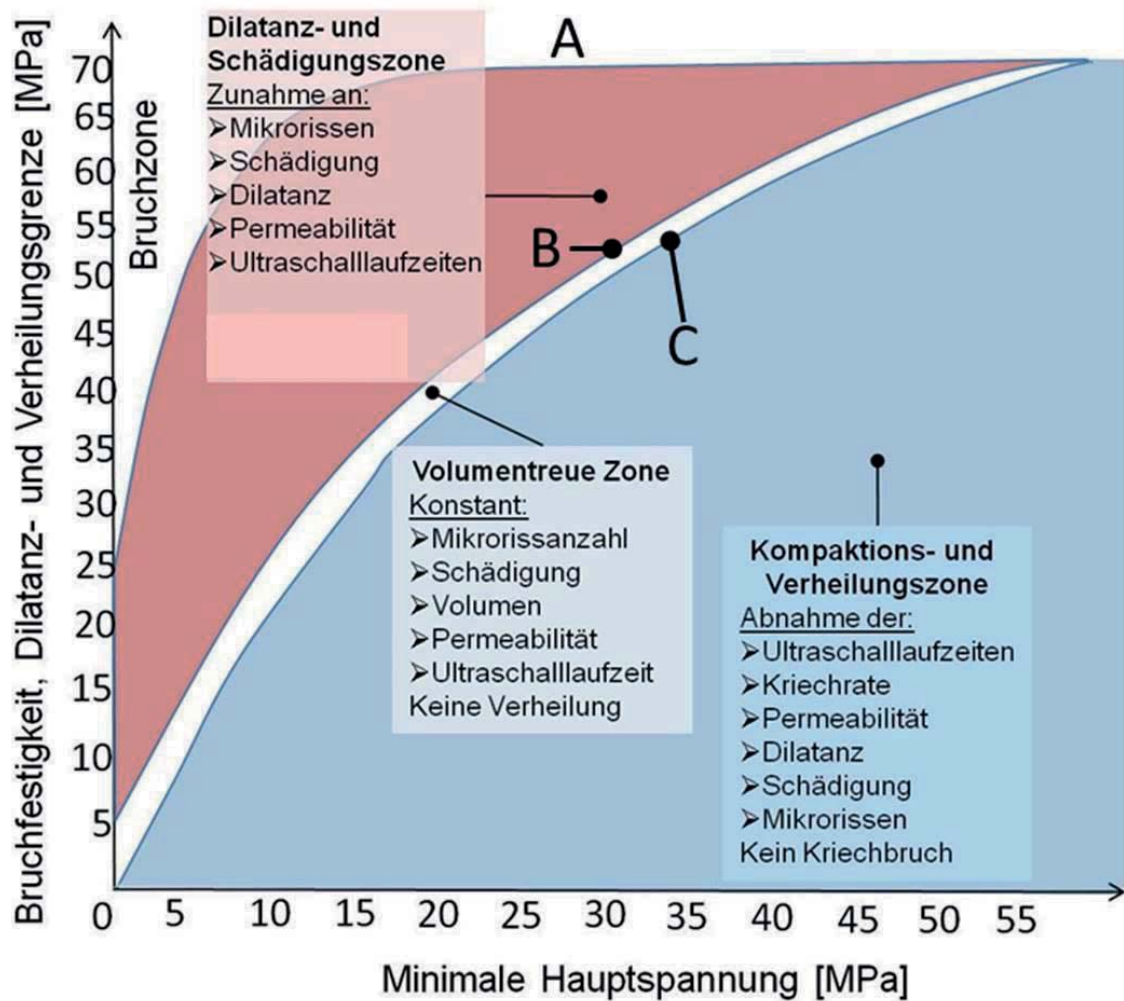


Abb. 2.2-2: Schematische Darstellung der Entwicklung von Bruchfestigkeit (Kurve A), der Schädigungsgrenze (Kurve B) sowie der Verheilungsgrenze C von Steinsalz in Abhängigkeit der minimalen Hauptspannung σ_3 sowie Kennzeichnung von Beanspruchungszonen, in denen hydraulische und geomechanische Eigenschaftsveränderungen auftreten. Erweitertes Diagramm nach Hou (2002).

2.3 Das Kriechverhalten von Steinsalz

Im vorherigen Abschnitt ist bereits auf das Vermögen von Steinsalz eingehend hingewiesen worden, das zur Riss-schließung und anschließender Verheilung führt. Grundsätzlich beruht die Überführung des anfänglich schädigungsinduzierenden hin zu einem hinsichtlich der Verheilung günstigeren Spannungszustands (Verheilungszone unterhalb der Kurve C in Abb. 2.2-2) auf dem für Steinsalz signifikant charakteristischen viskoplastischen Deformationsverhalten, zu dem auch das Steinsalzkriechen gehört.

Grundsätzlich treten die folgenden drei Deformationsformen im Steinsalz auf:



Das elastische Materialverhalten ist gekennzeichnet von einer vollständigen Deformationsrückbildung nach einer Beanspruchungsverringerung (Reversibilität).

Treten beanspruchungsinduzierte, zeitunabhängige irreversible Deformationen auf, so liegt im Steinsalz plastisches Deformationsverhalten vor.

Das viskose Deformationsverhalten, das Kriechverhalten, ist geprägt von zeitabhängigen, teilweise reversiblen Deformationen in der **transienten** (=anfänglichen) Kriechphase und von irreversiblen Verformungen in der **stationären** und **tertiären** (=dritte und letzte) Phase.

Generelle Einflussfaktoren auf die Viskoplastizität sind äußeren Ursprungs, worunter die Feuchtigkeit und die Temperatur fallen sowie die geomechanische Beanspruchungssituation, die vom deviatorischen Spannungszustand gebildet wird.

Liegen diese Bedingungen vor, so treten zeitabhängige, irreversible Deformationen in Form von Kriechverzerrungen ε bzw. dessen zeitliche Ableitung in Form einer Kriechrate $\dot{\varepsilon}$ auf. Eine Bestimmung des Parameters ε kann laborativ im Kriechversuch (konstante Minimalspannung σ_3 , stufenweise Erhöhung des deviatorischen Spannungsanteils $\sigma_{1,2}-\sigma_3$) durch Bestimmung des Quotienten aus der axialen Stauchung einer zylindrischen Steinsalzprobe Δl und seiner ursprünglichen Länge l_0 ermittelt werden.

Das Steinsalzkriechen lässt sich in die drei zeitliche Phasen einteilen, in denen Veränderungen hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Verzerrung ε bzw. der Kriechrate $\dot{\varepsilon}$ auftreten. In Abhängigkeit von einer messbaren Veränderung treten in zeitlicher Reihenfolge die Phasen des transienten, stationären und tertiären Kriechens auf.

Zu Anfang des Kriechversuchs wird der Versuchskörper einem isotropen Spannungszustand ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$) ausgesetzt, wodurch eventuelle Vorschädigungen aus der Probenentnahme und Lagerung sowie Präparation zurückgebildet werden. Darauf folgend wird der deviatorische Spannungszustand ($\sigma_{1,2}-\sigma_3$) auf ein definiertes Niveau erhöht und konstant gehalten. Hierbei zeigt sich in dieser **transienten** Anfangsphase des Kriechversuchs nach einer anfänglich rapide anwachsenden Verzerrung ε ein degressiver Verzerrungsverlauf (Abb. 2.3-1, 1a). Folgerichtig ist diese Phase durch anfängliche hohe Verzerrungsraten $\dot{\varepsilon}$ gekennzeichnet, die im weiteren Zeitverlauf dieser Phase geringer werden (Abb. 2.3-1, 2a).

In der nun folgenden stationären Kriechphase treten annähernd lineare Zuwächse der Kriechverzerrung und somit konstante Verzerrungsraten auf (Abb. 2.3-1, 1b und 2b).

Wird der Kriechversuch bis zum Bruch des Probekörpers durchgeführt, ist eine tertiäre Kriechphase zu beobachten, in der progressive Zuwächse der Verzerrungen und Verzerrungsraten auftreten, die von dilatanten Deformationsprozessen geprägt sind (Abb. 2.3-1, 1c und 2c).

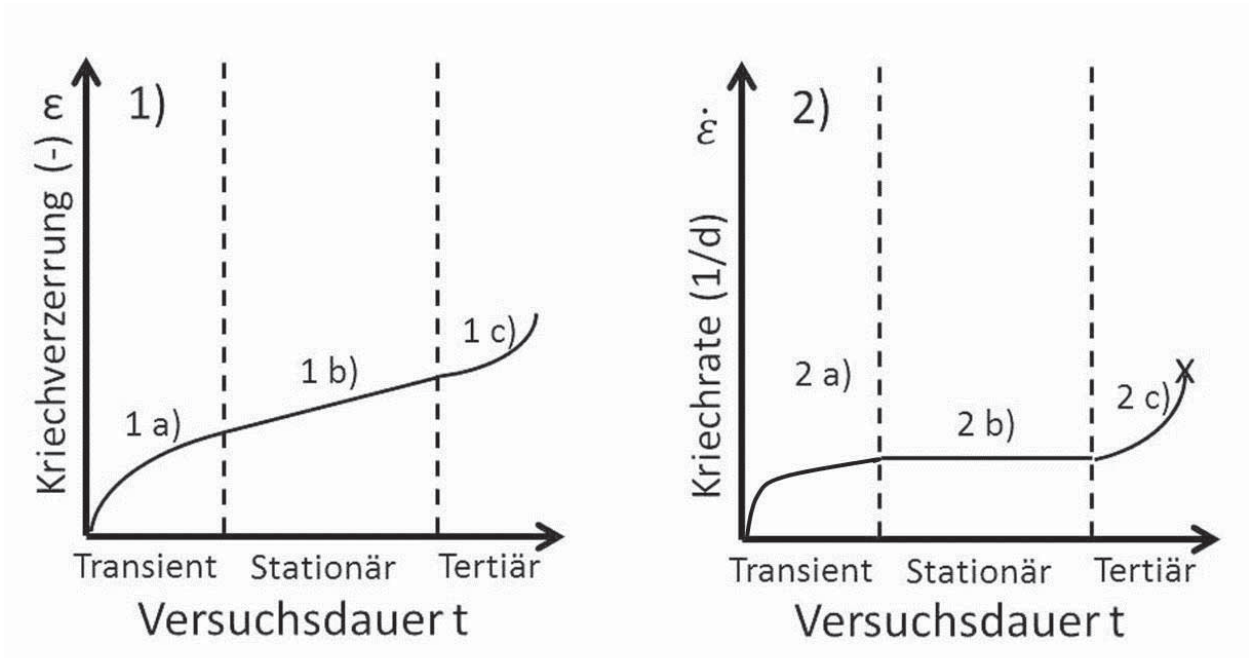


Abb. 2.3-1: Schematische Darstellung der zeitabhängigen Entwicklung der Kriechverzerrung (links) und der Kriechverzerrungsrate (rechts) während der drei zeitabhängigen Phasen eines Kriechversuchs an Steinsalzprobekörpern.

2.3.1 Stoffmodelle zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Steinsalz

Aufgrund der Tatsache, dass sich der in dieser wissenschaftlichen Arbeit untersuchte Bohrungsverschluss innerhalb einer Steinsalzformation befindet, ist die numerische Simulation der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Deformationsmechanismen ein geeignetes Instrument. Die wesentlichen Vorteile der Methodik der numerischen Simulation innerhalb dieses Forschungsvorhabens lauten wie folgt:

- Numerische Vorstudien lassen sich durchführen, in denen auf literaturbasierte Eingangsparameter zum Kriechverhalten von Steinsalz zurückgegriffen werden kann, bevor kostenintensive und komplexe Feldversuche bzw. Laborversuche an Steinsalzproben überhaupt durchgeführt worden.
- Die numerischen Modelle lassen sich gemäß dem aktuellen Bestand an Feldversuchsmessdaten entsprechend anpassen und verifizieren.
- Eine Fortführung der numerischen Berechnungen ist über eine Zeitdauer hinaus möglich, die jenseits des Feldversuchs liegt. Hierdurch sind zeitliche Prognosen über die Entwicklung des Bohrungsverschlusses möglich, die für Zeiträume gelten, die weit hinter dem Ende der Projektlaufzeit liegen.

Das im Rahmen dieses Forschungsprojektes eingesetzte Programm zur Analyse der durch die duktilen Steinsalzeigenschaften hervorgerufenen Bohrlochkonvergenz ist das auf der Methode der finiten Differenzen basierende Programmsystem FLAC3D der Fa. Itasca, Minneapolis USA. Für eine explizite Erläuterung bzgl. des Funktionsumfangs bzw. der Anwendung dieses Programms sei an dieser Stelle auf die veröffentlichten Handbücher verwiesen (vgl. Itasca, 2009).

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sind die Stoffmodelle LUBBY2 (transientes und stationäres Kriechen ohne Schädigung) sowie Hou/Lux (transientes, stationäres und tertiäres Kriechen mit Schädigung und Verheilung) für Steinsalz, das Stoffmodell CWIPP für die Salzgrus- und Feststoffkompaktion sowie eigene Weiterentwicklungen zur Kopplung der Stoffmodelle LUBBY2 und CWIPP für Steinsalz und Salzgrus angewendet worden.

2.3.1.1 Stoffmodell LUBBY2

Heusermann et al. (1982) entwickelten ein rheologisches Stoffmodell, das zur Beschreibung des viskosen Verformungsverhaltens von Steinsalz angewendet wird. Dieses konstitutive Stoffmodell ist in der Lage, die Deformationsmechanismen des transienten und stationären Kriechens von Steinsalz abzubilden. Gemäß dem prinzipiellen Ansatz zur Bildung eines rheologischen Modells basiert LUBBY2 auf der Kombination von Federn, die ein linear-elastisches Deformationsverhalten, sowie auf viskosen Dämpfern, die ein zeit- und geschwindigkeitsabhängiges Verformungsverhalten aufweisen. Werden diese Elemente in Reihe geschaltet, so formen sie das sog. Maxwell-Modell, wohingegen sie in paralleler Anordnung ein Kelvin-Modell bilden. Diese Anordnung der unterschiedlichen Modellelemente ist in Abb. 2.3-2 dargestellt, deren integratives Zusammenwirken das sog. nichtlineare Burger's-Modell ergibt. Hierbei repräsentiert das nicht-lineare Kelvin-Modell die transiente Kriechrate $\dot{\epsilon}_{ij}^{tr}$, wohingegen die stationäre Kriechrate von Steinsalz $\dot{\epsilon}_{ij}^s$ durch das nichtlineare Maxwell-Modell wiedergegeben werden kann (vgl. Abb. 2.3-2, linkes und rechtes Teilmodell).

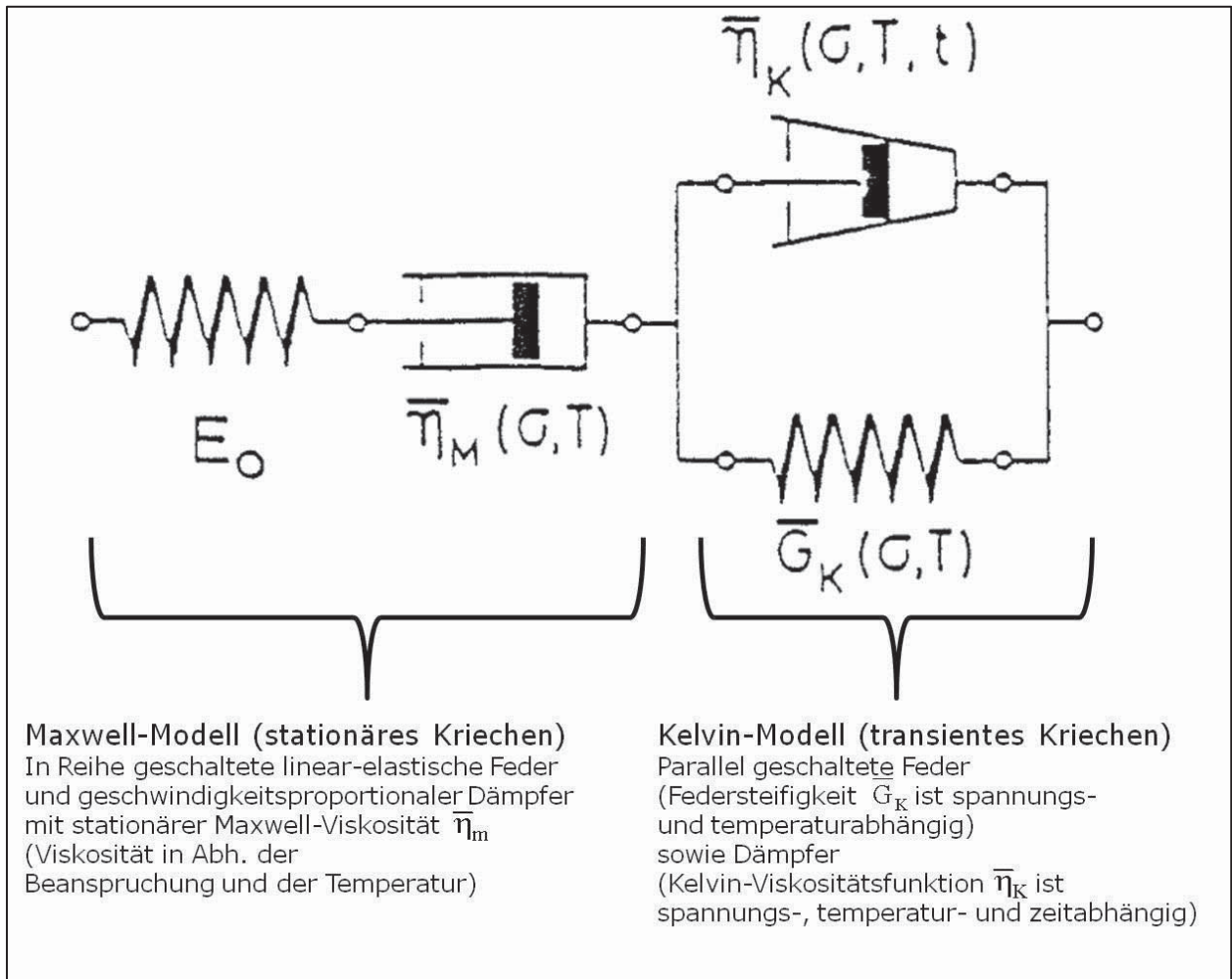


Abb. 2.3-2: Rheologisches Burger's Modell als Grundlage des Stoffmodells LUBBY2, erweitert um Bezeichnungen, nach Heusermann et al. (1982).