

Zeitabhängige effektive Scherfestigkeit am Beispiel überkonsolidierter Böden aus dem Tagebau Amsdorf

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III - Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,

vorgelegt

von Herrn Christian Soellig
geb. am 01.11.1981 in Weimar

1. Gutachter: Prof. Dr. Christof Lempp

2. Gutachter: Prof. Dr. Ivo Herle

Verteidigungsdatum: 13.01.2023

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	4
1 Zielstellung	6
2 Wissenschaftlicher Kenntnisstand	8
2.1 Scherfestigkeit bindiger Böden	8
2.2 Zeitabhängiges Scherverhalten.....	12
2.3 Zeitabhängigkeit der effektiven Scherfestigkeit.....	16
2.4 Langzeitstandfestigkeit von Böschungen	18
3 Kennzeichnung der untersuchten Böden	20
3.1 Geologische Einordnung	20
3.2 Probenahme	24
3.3 Beschreibung und Klassifizierung der untersuchten Proben.....	27
4 Beschreibung der durchgeführten Versuche	34
4.1 Rahmenscherversuche	34
4.1.1 Rahmenschergerät	34
4.1.2 Probeneinbau.....	35
4.1.3 Normal- und Relaxationsversuche	36
4.1.4 Versuche mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit.....	37
4.2 Großrahmenscherversuch	38
4.3 Triaxialversuche	41
4.3.1 Triaxialgerät	41
4.3.2 Probeneinbau.....	41
4.3.3 Versuche mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit	42
4.3.4 Relaxationsversuch	43
5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	44
5.1 Allgemeines Scherverhalten	44
5.2 Maßstabsabhängiges Scherverhalten der Kippe	51
5.3 Verhalten bei sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit.....	54
5.3.1 Verhalten im Rahmenscherversuch.....	54
5.3.2 Vergleichsversuche im Triaxialgerät	63
5.3.3 Auswertung der Viskositätsindizes	66
5.4 Verhalten bei Relaxation im Grenzzustand.....	70

5.4.1	Verhalten im Rahmenschergerät	70
5.4.2	Vergleichsversuch im Triaxialgerät	79
6	Schlussfolgerungen	81
7	Zusammenfassung	86
	Literaturverzeichnis.....	89
	Eidesstattliche Erklärung.....	94
	Lebenslauf.....	95
	Danksagung.....	97

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

$\dot{\Gamma}$	Gleitgeschwindigkeit
ε	Stauchung
$\dot{\varepsilon}$	Stauchungsgeschwindigkeit
$\dot{\varepsilon}_0/\dot{\varepsilon}_1$	Stauchungsgeschwindigkeit vor/nach einem Geschwindigkeitssprung
λ_{cs}	Kohäsionskonstante
ρ	Feuchtdichte
ρ_d	Trockendichte
ρ_s	Korndichte
σ'	effektive Normalspannung
σ'_c	effektive Konsolidierungsspannung
σ_1, σ_3	totale Hauptspannungen $\sigma_1 > \sigma_3$
σ'_1, σ'_3	effektive Hauptspannungen $\sigma'_1 > \sigma'_3$
$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$	Scherwiderstand im Triaxialversuch
σ'_1/σ'_3	effektives Hauptspannungsverhältnis
τ	Scherfestigkeit/Scherwiderstand
τ_f	maximale Scherfestigkeit/Peakscherfestigkeit
τ_k	kritische Scherfestigkeit
τ_R	Restscherfestigkeit
τ_0/τ_1	Scherwiderstand vor/nach einem Geschwindigkeitssprung
φ'_S	Winkel der Gesamtscherfestigkeit
φ'	effektiver Reibungswinkel
φ'_R	effektiver Reibungswinkel der Restscherfestigkeit
φ'_{S0}	Winkel der Gesamtscherfestigkeit bei der Stauchungsrate $\dot{\varepsilon}_0$
φ'_{S1}	Winkel der Gesamtscherfestigkeit bei der Stauchungsrate $\dot{\varepsilon}_1$
a	Seitenlänge der Probe mit quadratischem Probengrundriss
c'	effektive Kohäsion
c'_R	effektive Kohäsion der Restscherfestigkeit
c_u	undrainierte Scherfestigkeit
d	Durchmesser der Probe
e	Porenzahl
e_k	kritische Porenzahl
GZ	Grenzzustand
h	Höhe der Probe
I_P	Plastizitätszahl
I_C	Konsistenzzahl
I_A	Aktivitätszahl
I_V	Viskositätsindex
n	Anzahl der Versuchswerte
r	Korrelationskoeffizient

s	Scherweg
u	Porenwasserdruck
u_0	Sättigungsdruck
v	Schergeschwindigkeit
v_0/v_1	Schergeschwindigkeit vor/nach einem Geschwindigkeitssprung
V_{gl}	Glühverlust
w	Wassergehalt
w_L	Fließgrenze
w_P	Ausrollgrenze
x	Scherweg (DIN 18137-1, 2010)

1 Zielstellung

Die rechnerische Standsicherheitsbewertung von Böschungen setzt neben zutreffenden Rechenverfahren eine möglichst genaue Kenntnis der ansetzbaren Scherfestigkeitsparameter voraus. Insbesondere bei der Bewertung von Endböschungssystemen in Tagebauen muss dabei eine mögliche Zeitabhängigkeit der Scherfestigkeit betrachtet werden. Das als *viskos* bezeichnete Materialverhalten bindiger Lockergesteine bedingt möglicherweise eine verminderte Langzeitfestigkeit gegenüber den bei hohen Schergeschwindigkeiten beziehungsweise kurzen Versuchszeiten im Labor ermittelten Scherparametern. So gehen PRINZ & STRAUß (2018) davon aus, dass bei langsam ablaufenden Hangbewegungen rheologische Effekte auftreten, durch welche die Scherparameter um 10 % bis 15 % gegenüber den üblichen Werten absinken.

Das viskose Scherverhalten wurde bislang vorwiegend in undrainierten Triaxialversuchen mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit untersucht (u. a. LEINENKUGEL, 1967; GRAHAM et al., 1983; KRIEG, 2000; SORENSEN et al., 2007). Der Einfluss der viskosen Eigenschaften auf die effektive Scherfestigkeit ist dabei bislang noch nicht vollständig geklärt (GOLDSCHIEDER, 2014). Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit bestand daher darin, den Kenntnisstand zur Zeitabhängigkeit der effektiven Scherfestigkeit anhand direkter Scherversuche im Rahmenschergerät zu erweitern. Dazu wurden zum einen Versuche mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit ausgeführt. Diese sollten zeigen, inwieweit sich das in Triaxialversuchen beobachtete geschwindigkeitsabhängige Scherverhalten auch in direkten Scherversuchen unter drainierten Bedingungen äußert. Um die Ergebnisse besser in den bisherigen Forschungsstand einordnen zu können, erfolgten neben den Rahmenscherversuchen auch zwei vergleichende Sprungversuche im Triaxialgerät bei undrainierten Bedingungen.

Zum anderen wurden experimentelle Relaxationsversuche durchgeführt, bei denen der Schervorgang im Grenzzustand angehalten und die anschließende Entwicklung des Scherwiderstands beobachtet wurde. Anhand der Relaxationsversuche sollte der zeitabhängige Anteil der gemessenen effektiven Scherfestigkeit und der effektiven Scherparameter als Grundlage für eine langzeitstabile Bemessung beziffert werden. Neben den direkten Scherversuchen wurde ein weiterer Vergleichsversuch im Triaxialgerät unter drainierten Bedingungen und mit Porenwasserdruckkontrolle durchgeführt. Dieser sollte zeigen, ob das beobachtete Relaxationsverhalten auf die Bedingungen im Triaxialversuch übertragbar ist sowie weiteren Aufschluss darüber geben, welche Vorgänge dem Verhalten zugrunde liegen.

Die Untersuchungen erfolgten an drei bedeutenden bindigen Deckgebirgsschichten aus dem Tagebau Amsdorf: Dem oligozänen Rupelton, dem eozänen Braunkohlenton und dem ebenfalls eozänen Braunkohlenschluff. Aufgrund der am Standort erfolgten Erosion der jüngeren tertiären Sedimente oberhalb des Rupeltons sowie auch der eiszeitlichen Überprägung sind die Schichten in situ als überkonsolidiert anzusehen.

Da die Deckgebirgsschichten im Zuge der Auskohlung im Tagebaubetrieb verkippt werden, müssen nicht nur Böschungen in gewachsenen Schichten, sondern auch Kippenböschungen

bemessen werden. Daher wurde auch eine Vergleichsprobe der Kippe hinsichtlich der zeitabhängigen Scherfestigkeit untersucht. Sowohl in den gewachsenen als auch in den verkippten Böschungssystemen im Tagebau lassen sich Kriechvorgänge und zeitverzögerte Bruchverformungen beobachten, was auf viskoses Materialverhalten und zeitabhängige Entfestigungen hinweist (Abbildung 1).

Die bindige Mischbodenkippe im Tagebau Amsdorf ist neben dem hohen Feinkorngehalt vor allem durch kleinräumige Material- und Dichteinhomogenitäten geprägt. Diese Inhomogenitäten entstehen dadurch, dass beim Verkipppungsprozess keine vollständige Durchmischung der wechselhaft aufgebauten Ausgangssedimente entsteht (LMBV, 1999). Die überwiegend stark kohäsiven Tone verbleiben dabei in Form von größeren Klumpen und bilden die sogenannte Pseudokornstruktur. Rahmenscherversuche können diese Pseudokornstruktur mit üblichen Probedurchmessern nicht erfassen. Um einen möglichen Maßstabeffekt zu betrachten, wurde daher beispielhaft ein Großrahmenscherversuch in Zusammenarbeit mit der Materialforschungs- und -prüfanstalt Weimar (MFPA) durchgeführt.



Abbildung 1: Zeitverzögerte Bruchvorgänge im nördlichen, gewachsenen Endböschungssystem/Baufeld Westen III (Foto: Anne Meffert)

2 Wissenschaftlicher Kenntnisstand

2.1 Scherfestigkeit bindiger Böden

Grundlegende Vorstellungen zur Scherfestigkeit bindiger Böden und insbesondere ihres zeitabhängigen Verhaltens gehen auf Überlegungen von BJERRUM (1973) unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse von HVORSLEV zurück. Die Scherfestigkeit setzt sich danach aus einem Reibungs- und einem Kohäsionsanteil zusammen. Der Reibungsanteil geht auf den Widerstand gegen Kornverschiebungen an direkten Kornkontaktpunkten der Mineralbestandteile zurück. Er nimmt linear mit der effektiven Normalspannung zu. Der Kohäsionsanteil basiert auf dem Widerstand gegen Kornverschiebungen, bei denen sich die Bodenteilchen nicht direkt berühren, sondern durch eine Hülle aus gebundenem Porenwasser voneinander getrennt sind. Nach BJERRUM trifft dies wahrscheinlich vorwiegend auf Kontaktpunkte zwischen den kleinen Tonteilchen zu, zwischen denen aufgrund ihrer großen Anzahl nur geringe Kräfte übertragen und die Wasserhüllen nicht verdrängt werden. Die Kohäsion ist abhängig vom Wassergehalt beziehungsweise von der Porenzahl. Sie nimmt damit bei einem normalkonsolidierten Boden ebenfalls linear mit der effektiven Normalspannung zu.

Diese Vorstellung findet sich auch in der DIN 18137-1 (2010) wieder. Bei einem normalkonsolidierten Boden verläuft die effektive Schergerade im Scherspannungs-Normalspannungsdiagramm annähernd durch den Koordinatenursprung (Abbildung 2). Die effektive Scherfestigkeit τ wird dann durch den Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s beschrieben:

$$\tau = \sigma' \cdot \tan \varphi'_s \quad (1)$$

Der Gesamtscherwinkel φ'_s fasst die normalspannungsabhängige Zunahme der inneren Reibung als effektiver Reibungswinkel φ' sowie der Kohäsion als Kohäsionskonstante λ_{cs} zusammen:

$$\tan \varphi'_s = \tan \varphi' + \lambda_{cs} \quad (2)$$

Bei einem überkonsolidierten Boden liegt der betrachtete effektive Normalspannungsbereich unterhalb der maximal aufgetretenen Normalspannung (Vorbelastungsspannung). Bei der Entlastung nimmt die effektive Reibung zwischen den direkten Kontaktpunkten der festen Bodenteilchen ebenfalls wieder ab, was durch die elastische Rückverformung der festen Teilchen und damit einer Verringerung der Reibungsfläche erklärt werden kann. Bei den indirekten Kontaktpunkten, bei denen sich die festen Bodenteilchen nicht unmittelbar berühren, finden solche elastischen Rückverformungen nicht statt. Bei einer Erhöhung der Normalspannung erfolgt daher eine dauerhafte Vergrößerung der Kontaktflächen, die auch nach einer Entlastung erhalten bleibt (BJERRUM, 1973). Bei einem überkonsolidierten Boden ist die Scherfestigkeit gegenüber einem normalkonsolidierten Boden bis zum Erreichen der Vorbelastungsspannung erhöht, und die Schergerade schneidet bei Annahme eines linearen Verlaufs die Ordinate (Abbildung 2). Die Schergerade wird dann durch die Grenzbedingung

nach COULOMB mit dem effektiven Reibungswinkel φ' und der effektiven Kohäsion c' beschrieben:

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan\varphi' \quad (3)$$

Die effektive Kohäsion eines bindigen Bodens ist proportional zur größten Normalspannung und ist mit dieser nach DIN 18137-1 (2010) über die Kohäsionskonstante λ_{cs} verknüpft:

$$c' = \sigma'_{\max} \cdot \lambda_{cs} \quad (4)$$

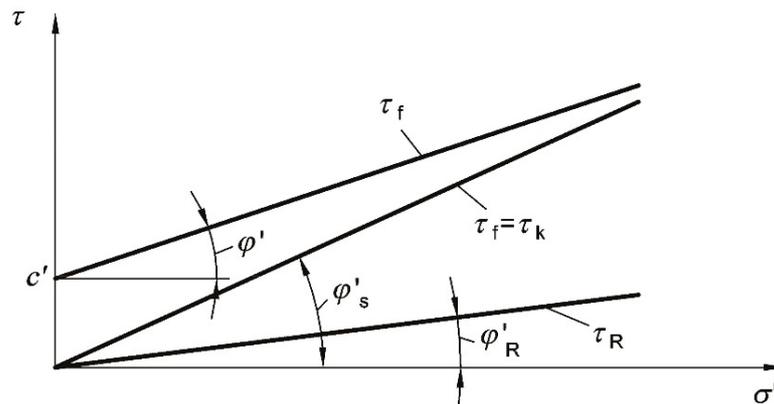


Abbildung 2: Scherspannungs-Normalspannungsdiagramm einer Scherfuge in einem bindigen Boden (DIN 18137-1, 2010)

Das scherwegabhängige Verhalten normal- und überkonsolidierter Böden wird in der DIN 18137-1 (2010) entsprechend einem unter- beziehungsweise überkritisch dichten nichtbindigen Boden betrachtet: Bei Scherung eines normalkonsolidierten Bodens steigt der Scherwiderstand stetig an und erreicht schließlich die kritische Scherfestigkeit τ_k . Die Porenzahl e in der Scherfuge nimmt dabei ab. Der Boden verhält sich kontraktant, beziehungsweise er verfestigt sich. Ein überkonsolidierter Boden erreicht dagegen nach kurzen Scherwegen einen Maximalwert der Scherfestigkeit τ_f , welcher auch als Peakscherfestigkeit bezeichnet wird. Die Scherfestigkeit fällt bei Fortführung des Scherwegs auf die kritische Scherfestigkeit ab, welche der Scherfestigkeit des normalkonsolidierten Bodens τ_k entspricht. Die Porenzahl eines überkonsolidierten Bodens nimmt dabei zu. Der Boden verhält sich dilatant bzw. entfestigt sich. Ein normalkonsolidierter Boden und ein überkonsolidierter Boden erreichen im kritischen Grenzzustand bei gleicher effektiver Normalspannung die gleiche kritische Porenzahl e_k .

Bei bindigen Böden kann es über eine Dilatation hinaus auch zu einer Entfestigung durch die zunehmende Einregelung von Tonmineralen in der Scherfuge kommen. Dadurch fällt die Scherfestigkeit bei normal- und überkonsolidierten Böden nach langen Scherwegen auf die Restscherfestigkeit τ_R ab, welche durch den Restreibungswinkel φ'_R beschrieben wird (Abbildung 3).

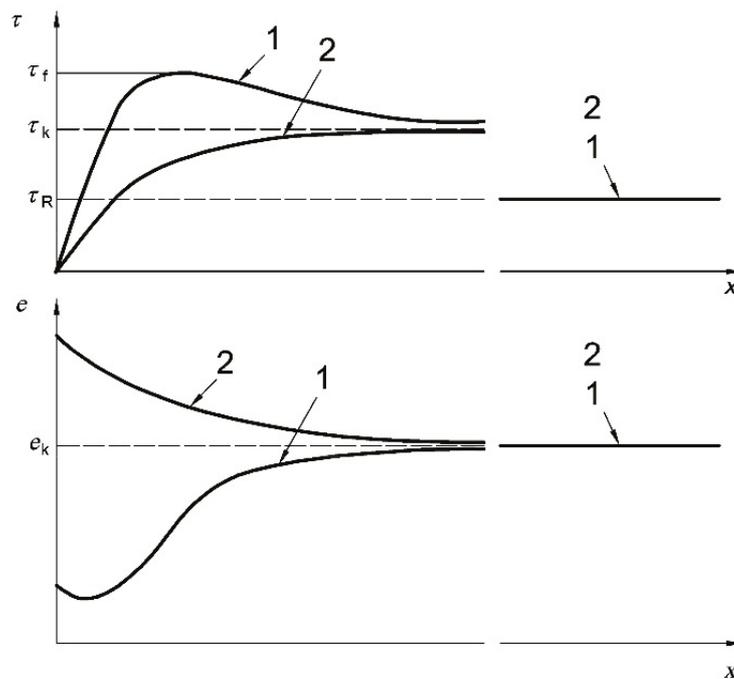


Abbildung 3: Scherspannung-Scherwegdiagramm (oben) und Porezahl-Scherwegdiagramm (unten), 1: überkritisch dichter (überkonsolidierter) Boden, 2: unterkritisch dichter (normalkonsolidierter) Boden (DIN 18137-1, 2010)

Aufgrund der nur geringen elektrostatischen Anziehungskräfte der Bodenteilchen wird davon ausgegangen, dass die bei überkonsolidierten Böden gemessene effektive Kohäsion nicht auf eine echte Kohäsion im physikalischen Sinne zurückgeht, sofern keine Zementierung vorliegt (SORENSEN & OKKELS, 2013). Auch BJERRUM (1973) deutet bereits an, dass der Scherwiderstand der indirekten Kontaktpunkte nur insofern als kohäsiv bezeichnet wird, als dass er bei Entlastung durch die fehlende elastische Rückverformung erhalten bleibt. An künstlich hergestellten, überverdichteten Tonproben wurde experimentell gezeigt, dass die Scherfestigkeit ohne Normalspannung unter Wasser verloren geht (LADE, 2010). Darüber hinaus konnte auch in Triaxialversuchen beobachtet werden, dass die Grenzbedingung im niedrigen Normalspannungsbereich stark gekrümmt ist und durch den Koordinatennullpunkt verläuft (BURLAND, 1990; RAMAMURTHY, 2001; LADE, 2010). Die effektiven Scherparameter φ' und c' sind durch die Krümmung der Grenzbedingung von dem betrachteten Normalspannungsbereich abhängig und keine Bodenkonstanten (RAMAMURTHY, 2001). Eine zutreffendere Beschreibung der effektiven Scherfestigkeit besonders im niedrigen Spannungsbereich kann mit einer Potenzfunktion erfolgen (LADE, 2010). Für den in der Praxis üblicherweise betrachteten Normalspannungsbereich von etwa 50 kPa bis 400 kPa kann die effektive Scherfestigkeit dennoch gut mit der linearen Grenzbedingung angenähert werden (LADE, 2010; SORENSEN & OKKELS, 2013).

Die Krümmung der Grenzbedingung wird darauf zurückgeführt, dass ein überkonsolidierter Boden unterhalb der Vorbelastungsspannung überkritisch dicht vorliegt. Durch die notwendige Überwindung der Dilatanz ist die Peakscherfestigkeit dadurch gegenüber der kritischen Scherfestigkeit erhöht (POWRIE, 2014). Mit zunehmender Normalspannung verringert sich die kritische Porezahl und nähert sich der vorhandenen Porezahl des Bodens an. Dadurch nimmt die Peakscherfestigkeit gegenüber der kritischen Scherfestigkeit ab, und die Grenzbedingung

des überkonsolidierten Bodens gleicht sich der Grenzbedingung des normalkonsolidierten Bodens an (Abbildung 4).

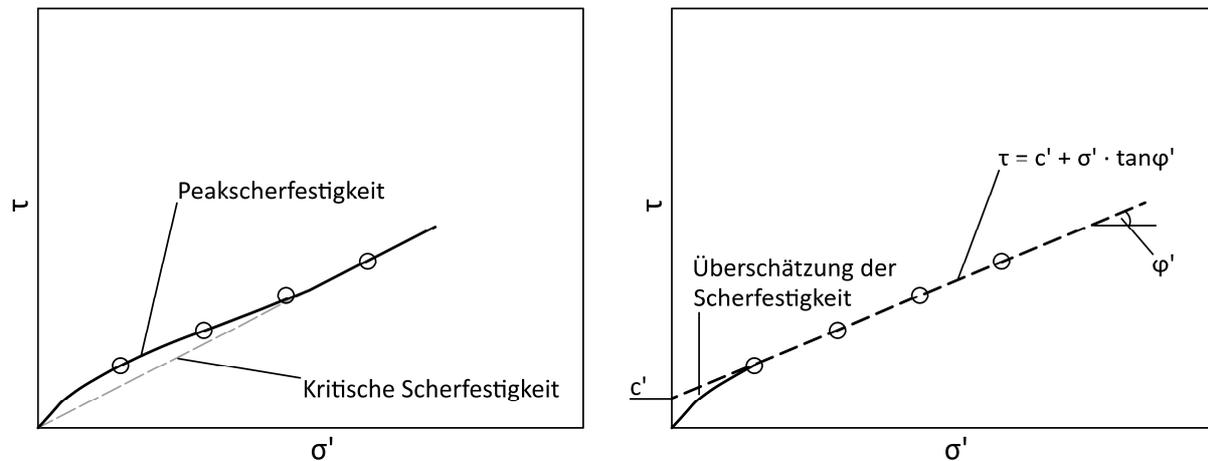


Abbildung 4: gekrümmte Grenzbedingung bei Auswertung der Peakscherfestigkeit (links), Anpassung der linearen Grenzbedingung mit Überschätzung der Scherfestigkeit im niedrigen Normalspannungsbereich (rechts), nach POWRIE (2014)

Das Scherverhalten bindiger Böden wird nach MÜLLER-VONMOOS & KOHLER (1993) dennoch stark von der Mineralart und der Flächenladung der enthaltenen Tonteilchen beeinflusst. Kaolinit weist eine verhältnismäßig hohe Scherfestigkeit auf. Diese basiert aufgrund der größeren, nur einseitig geladenen Teilchen vorwiegend auf direkter Kornreibung und ist weitgehend unabhängig von der Art und Konzentration der angelagerten Kationen. Die Kaolinitplättchen regeln sich beim Scheren nicht vollständig ein und bilden eine raue Scherfläche. Illit und Montmorillonit bilden im Gegensatz zum Kaolinit dünnere und stärker plättchenförmige Teilchen mit einer hohen Flächenladung. Bei angelagerten Ca^{2+} -Ionen ist die Scherfestigkeit höher, da bei höherwertigen Kationen die Dicke der die Tonteilchen umgebenden Doppelschicht abnimmt, und die Teilchen sich durch die zunehmenden Van-der-Waals-Kräfte beginnen anzuziehen (Koagulation). Bei angelagerten Na^+ -Ionen beziehungsweise bei geringerer Elektrolytkonzentration überwiegen die Abstoßungskräfte der Doppelschichten, und die Scherfestigkeit nimmt, wahrscheinlich unter deutlicher Fläche-zu-Fläche-Anordnung, ab. Das Scherverhalten von Montmorillonit wird darüber hinaus vom schwachen Zusammenhalt seiner quellfähigen Zwischenschichten geprägt. MÜLLER-VONMOOS & KOHLER (1993) nehmen an, dass die Montmorillonitteilchen beim Scheren in einzelne Schichtpakete zerfallen und sich unter Bildung einer glatten Scherebene einregeln. Dementsprechend ist Montmorillonit bei Scherung durch einen starken Abfall auf eine Restscherfestigkeit gekennzeichnet.

2.2 Zeitabhängiges Scherverhalten

In der vorliegenden Arbeit wird das zeitabhängige Scherverhalten infolge der viskosen Eigenschaften des Korngerüsts betrachtet. Darüber hinaus können zeitabhängige Verformungen oder Spannungsänderungen auch durch den Strömungswiderstand des Porenwassers auftreten. Im Folgenden ist mit zeitabhängigem Scherverhalten stets das Verhalten aufgrund der viskosen Materialeigenschaften gemeint.

Das zeitabhängige Scherverhalten von Böden wird von BJERRUM (1973) auf thermisch aktivierte Platzwechsel der Wassermoleküle in den gebundenen Wasserhüllen zurückgeführt. Diese bedingen eine Instabilität der vorwiegend zwischen Tonteilchen liegenden, indirekten Kontaktpunkte, so dass es bei einer äußeren Belastung zu Verschiebungen zwischen den Teilchen kommt. Die Geschwindigkeit dieser Verschiebungen nimmt mit der Scherspannung und der Dicke der gebundenen Wasserhüllen zu. Die direkten Kontaktpunkte zwischen größeren Kornpartikeln werden dagegen als zeitlich stabil betrachtet (BJERRUM, 1973; HÖWING & KUTTER, 1985). Auch nach aktueller Vorstellung geht man von thermisch angeregten Vorgängen aus, so dass das zeitabhängige Verhalten von Böden temperaturabhängig ist (KOLYMBAS & HERLE, 2008). Thermisch aktivierte, gerichtete Platzwechsel finden bis auf atomarer Ebene statt und dienen auch in der Materialwissenschaft und der Werkstofftechnik als Erklärungsmodell für Fließ- und Kriechvorgänge (GOTTSTEIN, 2014; ROOS et al., 2017).

Das zeitabhängige Verhalten kann in den drei miteinander verknüpften Phänomenen des Kriechens, der Relaxation sowie der Geschwindigkeitsabhängigkeit beobachtet werden. Beim Kriechen kommt es zu anhaltenden Verformungen unter konstanter Spannung. Relaxation beschreibt einen allmählichen Abfall der Spannung unter konstant gehaltener Verformung. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit wiederum äußert sich in einer Abhängigkeit der Spannung von der einer Probe aufgezwungenen Verformungsgeschwindigkeit. Zeitabhängiges Materialverhalten kann nicht nur bei Scherung, sondern auch unter ödometrischer Zusammendrückung (Volumenkriechen) beobachtet werden.

In Anlehnung an die Rheologie wird das zeitabhängige Materialverhalten als Viskosität bezeichnet. Die Untersuchung der Viskosität von Fluiden erfolgt durch die Messung der Scherspannung in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit in einem Rheometer. In Abbildung 5 sind die Scherspannungs-Schergeschwindigkeitskurven für verschiedene Fluidtypen dargestellt. Umso größer der Anstieg desto höher ist die Viskosität (Zähflüssigkeit) des Fluids. Man erkennt, dass die Viskosität nicht bei allen Fluidtypen konstant ist, sondern bei größeren Schergeschwindigkeiten abnehmen (Scherverdünnung) oder zunehmen (Scherverdickung) kann.

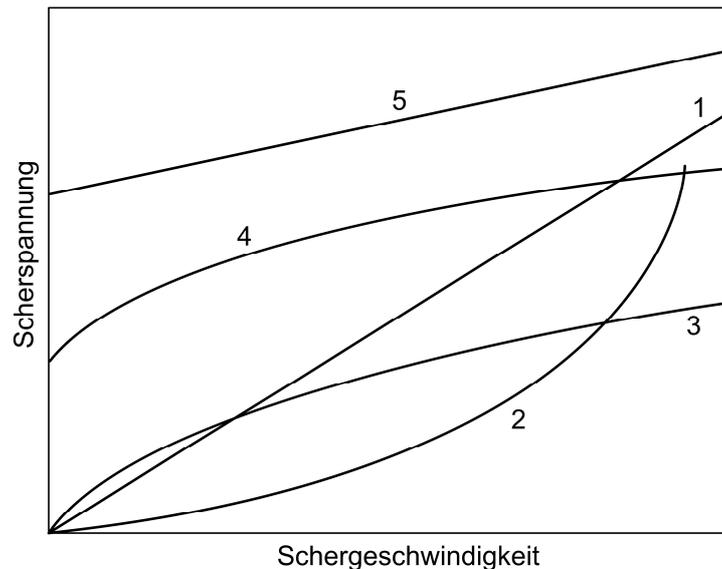


Abbildung 5: Fluidtypen: (1) Newtonsches Fluid, (2) Scherverdickendes Fluid, (3) Scherverdünnendes Fluid, (4) Casson-Fluid, (5) Bingham-Fluid (nach LOCAT & DEMERS, 1988)

LOCAT & DEMERS (1988) führten Rheometerversuche an gestörten sensitiven Tönen durch, wozu die Tone durch Wasserzugabe in einen flüssigen Zustand (Liquiditätszahlen zwischen 2 und 6) überführt wurden. Sie beobachteten das Verhalten vom Typ *Bingham-Fluid* sowie *Casson-Fluid*. Beide Typen sind durch das Vorhandensein einer Fließgrenze (im rheologischen Sinn) gekennzeichnet, sie weisen also eine kleinste Scherspannung auf, unterhalb derer kein Fließen auftritt. Ein Bingham-Fluid weist bei zunehmender Schergeschwindigkeit eine konstante Viskosität auf. Das Casson-Fluid ist dagegen durch eine Abnahme der Viskosität bei größerer Schergeschwindigkeit gekennzeichnet. Bei einer Erhöhung des Salzgehalts des Porenwassers beobachteten LOCAT & DEMERS einen Übergang vom Verhalten eines Bingham-Fluids zum Verhalten eines Casson-Fluids.

Das Vorhandensein einer Fließgrenze bei Tondispersionen wird auf die Bildung von Gerüststrukturen zurückgeführt, welche den Scherspannungen unterhalb der Fließgrenze widerstehen (LAGALY, 1993). Die Gerüststrukturen bilden sich durch Aggregation der Tonteilchen über gemeinsame Kationen und können als Bänder- oder Kartenhausstruktur ausgebildet sein. Die Fließgrenze steigt daher mit zunehmendem Anteil mehrwertiger Kationen und mit Erhöhung des Salzgehalts, da die Wechselwirkungen zwischen den Tonteilchen dann anziehend werden (siehe Punkt 2.1) und sich verstärkt Gerüststrukturen bilden. Die Fließgrenze und die Viskosität steigen außerdem mit zunehmendem Massenanteil des Tons an der Dispersion.

Oberhalb der Fließgrenze beginnen sich die Gerüststrukturen zu zerlegen. Wenn die Neubildung der Gerüststrukturen bei Abnahme der Schergeschwindigkeit verzögert stattfindet, wird die Viskosität der Dispersion durch die Scherung herabgesetzt (Thixotropie). Fördert die Scherung dagegen die Gerüstbildung durch Zusammenführen der Gerüstfragmente, findet eine Versteifung statt (Antithixotropie). Bei langsamer Scherung von Tonmineraldispersionen zeigt sich häufig antithixotropes Verhalten, das bei schnellerer Scherung in thixotropes Verhalten übergeht (LAGALY, 1993).

Die Untersuchung der Viskosität von plastischen Bodenproben erfolgt üblicherweise in undrainierten Triaxialversuchen durch die Messung der Abhängigkeit des Scherwiderstands von der Stauchungsgeschwindigkeit. Dabei können mehrere Einzelversuche mit jeweils unterschiedlicher Stauchungsgeschwindigkeit ausgeführt werden (u.a. BERRE & BJERRUM, 1973). Um den Einfluss von Streuungen durch die nie ganz vermeidbaren Unterschiede zwischen den Einzelproben zu eliminieren, werden jedoch bevorzugt Versuche mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit durchgeführt (u.a. LEINENKUGEL, 1967; GRAHAM et al., 1983; KRIEG, 2000; SORENSEN et al., 2007). Durch die Interpolation der Scherspannung zwischen den Abschnitten mit gleicher Geschwindigkeit lassen sich Scherspannungslinien gleicher Stauchungsgeschwindigkeit (*Isotachen*) konstruieren (Abbildung 6).

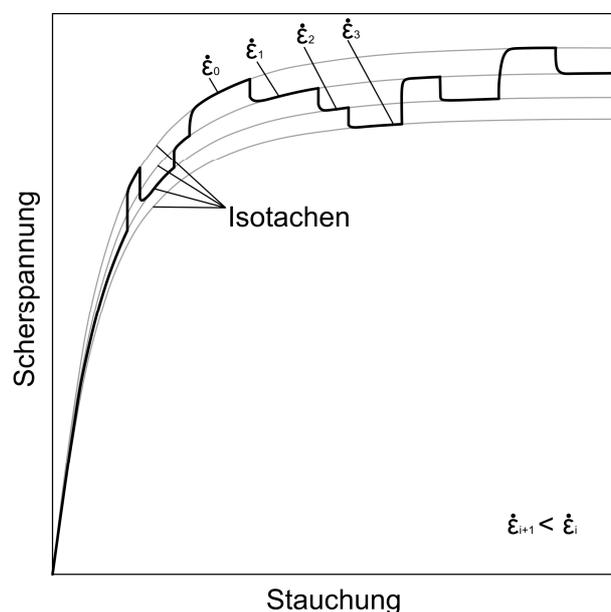


Abbildung 6: Abhängigkeit der Scherspannung von der Stauchungsgeschwindigkeit (nach KRIEG, 2000)

Der Großteil der bislang durchgeführten Versuche legt eine lineare Abhängigkeit des Scherwiderstands von dem dekadischen Logarithmus der Stauchungsgeschwindigkeit nahe (u.a. LEINENKUGEL, 1967; BERRE & BJERRUM, 1973; GRAHAM et al., 1983). Dies entspricht bezugnehmend auf die Fluidtypen der Rheologie einem scherverdünnenden Verhalten. Eine untere Grenzgeschwindigkeit, unterhalb derer keine weitere Abnahme des Scherwiderstands erfolgt (also eine Fließgrenze im rheologischen Sinn), konnte von BERRE & BJERRUM (1973) an plastischem *Drammen-Ton* festgestellt werden. Die Grenzgeschwindigkeit betrug etwa 0,05 %/h. Das Verhalten wäre damit in Anlehnung an die Rheologie dem Verhalten eines *Casson-Fluids* vergleichbar. In anderen Arbeiten konnte im Rahmen der verwendeten Geschwindigkeitswerte keine Grenzgeschwindigkeit festgestellt werden (GRAHAM et al., 1983; KRIEG, 2000).

In der deutschsprachigen Fachliteratur wurde von LEINENKUGEL (1967) als Kenngröße für die Viskosität der Viskositätsindex I_v eingeführt, welcher die lineare Abhängigkeit des Scherwiderstands τ vom Logarithmus der Stauchungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ beschreibt:

$$\tau_1 = \tau_0 \cdot (1 + I_v \cdot \log(\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_0})) \quad (5)$$

KRIEG (2000) stellte fest, dass die Scherspannung leicht überlinear mit dem Logarithmus der Geschwindigkeit zunimmt und schlägt einen veränderten Ansatz vor, welcher auf das sogenannte Gesetz von *Norton* zurückgeht:

$$\tau_1 = \tau_0 \cdot (\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_0})^{I_v} \quad (6)$$

In der internationalen Fachliteratur wurden ähnliche, auf den gleichen Zusammenhängen beruhende Kenngrößen mit anderen Bezeichnungen eingeführt (GRAHAM et al., 1983; HINCHBERGER & QU, 2007; TATSUOKA et al., 2008).

In der deutschsprachigen Fachliteratur wird der Viskositätsindex als Bodenkonstante angesehen und mit dem Wassergehalt an der Fließgrenze korreliert (GUDEHUS & LEINENKUGEL, 1978; GOLDSCHIEDER, 2014). Es wurde jedoch in einer Vielzahl von Arbeiten gezeigt, dass das Verhalten komplizierter ist. Zum einen wurde festgestellt, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit vom Scherweg abhängig ist und mit diesem deutlich abnimmt (SORENSEN et al., 2007; TATSUOKA et al., 2008). Zum anderen ergibt sich bei Versuchen mit sprunghaft veränderter Stauchungsgeschwindigkeit häufig ein differenzierteres Verhalten als die Vorstellung der *Isotachen*. Nach TATSUOKA et al. (2008) lassen sich vier Viskositätstypen unterscheiden:

- a) *Isotachen-Viskosität*: Dieser Typ verhält sich entsprechend der Annahme, dass bei Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit die Scherspannung auf eine der Stauchungsgeschwindigkeit zugehörige Scherwiderstandslinie springt und weiterhin entlang dieser verläuft. Scherspannungslinien höherer Geschwindigkeit verlaufen oberhalb und annähernd parallel zu Scherspannungslinien geringerer Geschwindigkeit. Die *Isotachen-Viskosität* wurde bei normal- und überkonsolidierten Tonen vor Erreichen des Grenzzustands (OKA et al., 2003, SORENSEN et al., 2007; TATSUOKA et al., 2008) sowie bei organischen Böden (KRIEG, 2000) beobachtet.
- b) *TESRA-Viskosität*: Die Abkürzung *TESRA* steht für *temporary effects of strain rate and strain acceleration*. Die Scherspannung steigt ebenfalls bei Erhöhung der Stauchungsgeschwindigkeit. Der Effekt ist jedoch nur vorübergehend, und die Scherspannung gleicht sich im weiteren Verlauf wieder der Scherspannungslinie vor Änderung der Geschwindigkeit an. Bei Versuchen mit konstanten (aber unterschiedlich hohen) Geschwindigkeiten würde sich also keine Geschwindigkeitsabhängigkeit ergeben. Die *TESRA-Viskosität* wurde bei verschiedenen weit gestuften, kantigen Sanden beobachtet (TATSUOKA et al., 2008, ENEMOTO et al., 2009).
- c) *Kombinierte Isotachen- und TESRA-Viskosität*: Wie bei der *TESRA-Viskosität* ist der Anstieg bzw. der Abfall der Scherspannung nicht dauerhaft. Die Scherspannung gleicht sich aber nicht wieder vollständig der Scherspannungslinie vor Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit an, sondern verläuft entsprechend der *Isotachen-Viskosität* weiter ober- bzw. unterhalb. Dieser Viskositätstyp wurde an Tonen nach Erreichen der

Peak-Scherfestigkeit beobachtet (OKA et al., 2003; SORENSEN et al., 2007; TATSUOKA et al. 2008)

- d) *P&N-Viskosität*: Die Abkürzung P&N steht für *positive and negative*. Bei Erhöhung der Stauchungsgeschwindigkeit steigt der Scherwiderstand zunächst temporär an (*positive*) und fällt anschließend wie bei der TESRA-Viskosität wieder ab. Die resultierende Scherspannungslinie verläuft jedoch unterhalb der Scherspannungslinie vor Änderung der Geschwindigkeit (*negative*). Bei Versuchen mit unterschiedlichen, aber konstanten Stauchungsgeschwindigkeiten würden die Scherspannungslinien bei höherer Stauchungsgeschwindigkeit unterhalb derer mit niedrigerer Geschwindigkeit verlaufen. Die P&N-Viskosität wurde bei nichtbindigen Böden mit enger Stufung und hohem Rundungsgrad beobachtet (TATSUOKA et al., 2008; ENEMOTO et al., 2009; ENEMOTO et al., 2016).

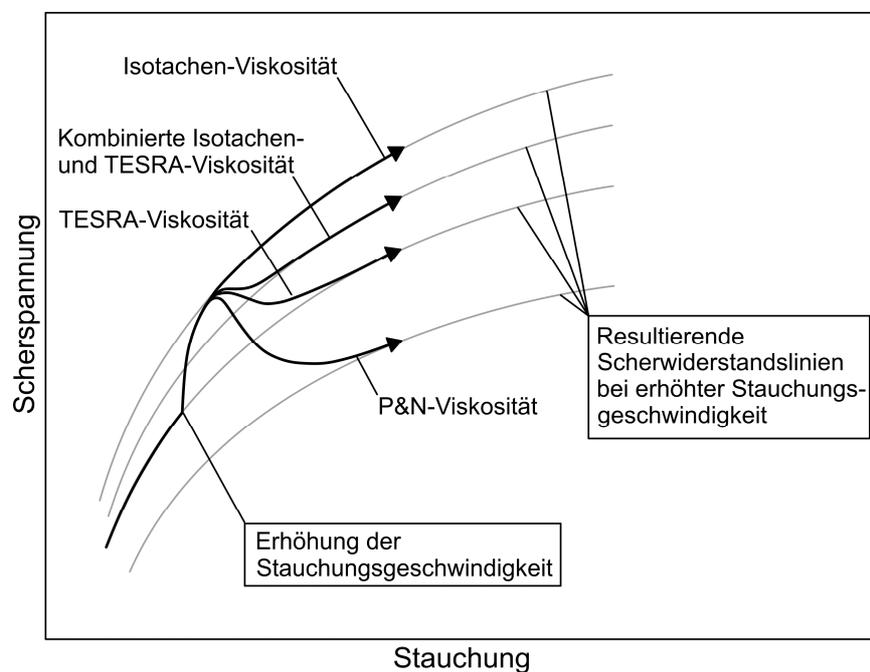


Abbildung 7: Schematische Scherspannungs-Stauchungslinien bei sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit für die vier Viskositätstypen (nach TATSUOKA et al., 2008, verändert).

2.3 Zeitabhängigkeit der effektiven Scherfestigkeit

Das viskose Scherverhalten bindiger Böden wurde bislang vorwiegend in undrainierten Triaxialversuchen untersucht. Die Entwicklung des Porenwasserdrucks und der effektiven Spannungen wurde dabei meist nicht betrachtet. Der Einfluss der Viskosität ist damit zunächst nur für die undrainierte Scherfestigkeit c_u belegt. Für die vorliegende Arbeit ist der Einfluss der Geschwindigkeitsabhängigkeit auf die effektive Scherfestigkeit von Interesse, um eine verringerte Langzeitfestigkeit gegenüber der im Laborversuch ermittelten Kurzzeitfestigkeit aufgrund des viskosen Materialverhaltens zu erfassen. Hierzu sind drainierte Versuche beziehungsweise bei undrainierten Versuchen die Betrachtung der effektiven Spannungspfade erforderlich.

Nach BJERRUM (1973) zeigen drainierte Triaxialversuche mit verschiedenen, aber innerhalb der Einzelversuche konstanten Stauchungsgeschwindigkeiten, dass bei normalkonsolidierten Böden die Abnahme des viskosen Scherwiderstandsanteils bei langsamer Stauchungsgeschwindigkeit teilweise oder vollständig durch die Verfestigung infolge von Sekundärkonsolidation kompensiert wird. BJERRUM weist aber darauf hin, dass die im Laborversuch beobachtete Überlagerung dieser beiden Einflüsse nicht ohne weiteres auf den Anwendungsfall im Feld übertragbar ist. Dagegen ist bei überkonsolidierten Proben eine Sekundärschwellung und damit eine zusätzliche zeitliche Entfestigung zu erwarten. Der Einfluss der Stauchungsgeschwindigkeit auf den Scherwiderstand ist dann genauso groß oder sogar größer als in undrainierten Versuchen.

Nach GUDEHUS & LEINENKUGEL (1978) ergibt sich der logarithmische Zusammenhang zwischen Scherwiderstand und Stauchungsgeschwindigkeit auch in drainierten Versuchen. Sie schlagen eine geschwindigkeitsabhängige Korrektur des Winkels der Gesamtscherfestigkeit auf Grundlage von Gleichung (5) vor:

$$\Delta \tan \varphi'_{s1} = I_v \cdot \tan \varphi'_{s0} \cdot \log \left(\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (7)$$

WÄLZEL & OSTERMAYER (1990) untersuchten die Langzeitfestigkeit in Triaxialversuchen ebenfalls mit verschiedenen, innerhalb eines Versuchs aber konstanten Stauchungsgeschwindigkeiten (siehe auch FLOSS et al., 1992). Durch Extrapolation der gemessenen Scherfestigkeiten auf eine Stauchungsrate von 0 wurde versucht, die Langzeitscherfestigkeit zu ermitteln. Anhand von Versuchen an einem tertiären, ausgeprägt plastischen Ton konnte die Geschwindigkeitsabhängigkeit der effektiven Scherfestigkeit jedoch nur an einer Versuchsreihe mit ungestörten Proben (D-Versuche) nachgewiesen werden. Weitere Versuchsreihen an gestört eingebautem Material (D- und CU-Versuche) zeigten keine Geschwindigkeitsabhängigkeit, so dass gefolgert wurde, dass bei diesen Proben die Kurzzeitfestigkeit der Langzeitfestigkeit entspricht.

KRIEG (2010) untersuchte den Einfluss der Stauchungsgeschwindigkeit auf die effektive Scherfestigkeit an ungestörten Proben von Mudde, Klei, Seeton und Wiesenkaol. Er nutzte dafür CU-Triaxial-Versuche mit der oben beschriebenen Sprungtechnik. Er stellte fest, dass sich die für verschiedene Stauchungsgeschwindigkeiten ergebenden Isotachen der effektiven Spannungspfade jeweils entlang der Grenzgeraden verlaufen, also kein Geschwindigkeitseinfluss auf die effektive Scherfestigkeit besteht. Zu dem gleichen Ergebnis kommt auch BECKER (2009) anhand von CU-Versuchen an gestört eingebauten Kaolinproben.

GOLDSCHIEDER (2014) geht anhand von drainierten und undrainierten Triaxialversuchen davon aus, dass der Kohäsionsanteil der effektiven Scherfestigkeit geschwindigkeitsabhängig ist, während der kritische Reibungswinkel geschwindigkeitsunabhängig ist. Inwieweit der Kohäsionsanteil der Gesamtscherfestigkeit eines normalkonsolidierten Bodens geschwindigkeitsabhängig ist, wird dabei aufgrund fehlender experimenteller Nachweise zur Diskussion gestellt.

2.4 Langzeitstandfestigkeit von Böschungen

Das viskose Scherverhalten bindiger Böden ist für eine Vielzahl von bautechnischen Fragestellungen relevant. Im Folgenden wird auf die Bedeutung für durch Abgrabungen hergestellte Böschungen eingegangen, wie sie im Tagebaubetrieb regelmäßig zu bemessen sind.

Durch die Entlastung des Bodens beim Herstellen der Böschung entsteht zunächst ein Porenwasserunterdruck, der in der Folge unter Schwellen ausgeglichen wird. Durch die Abnahme der effektiven Spannung nehmen die mobilisierbare Scherfestigkeit und damit die Standsicherheit der Böschung bis zum Ausgleich des Porenwasserdrucks ab (BJERRUM, 1973; GUDEHUS, 1981). Der Porenwasserdruckausgleich führt zu einer zeitabhängigen Abnahme der Kurzzeitfestigkeit (SCHULZ, 1981). Diese Abnahme geht jedoch nicht auf viskose Umlagerungen im Korngerüst, sondern auf die verzögerte Porenwasserströmung zurück. Sie wird mit üblichen Scherversuchen zur Ermittlung der effektiven Scherparameter weitestgehend erfasst, da die Proben vor dem Abschervvorgang unter den betrachteten Normalspannungen schwellen können.

Zeitgleich mit der Entlastung kommt es durch die Herstellung der Böschung zu einer Zunahme der Scherspannung. Die Scherspannung wird zunächst über die indirekten, viskosen Kontaktpunkte übertragen, wodurch es zu einer Kriechbewegung kommt. Im weiteren Bewegungsverlauf wird durch Umlagerungen im Korngerüst der Anteil der mobilisierten Reibung erhöht. Dabei wird die Scherspannung zunehmend von den instabilen Kontaktpunkten auf die stabilen, direkten Kontaktpunkte übertragen (BJERRUM, 1973). Hiermit kommt es zunächst zu einer Abnahme der Kriechgeschwindigkeit, was einen Vergleich mit dem primären Kriechen in der Werkstofftechnik (GOTTSTEIN, 2014) nahelegt. Wenn die mobilisierbare Reibung zur Aufnahme der Scherspannung ausreicht, kommt die Kriechbewegung zum Stillstand. Übersteigt die Scherspannung jedoch die Reibung, so wird der darüber hinaus gehende Anteil weiterhin über viskose Kontaktpunkte übertragen. In dem Fall findet weiterhin ein Kriechen statt (BJERRUM, 1973). Dieser Zustand ist vergleichbar mit dem sekundären (stationären) Kriechen in der Werkstofftechnik.

Die Kriechgeschwindigkeit ist entsprechend den viskosen Eigenschaften abhängig von der Größe der Scherspannung gemäß den Gleichungen (5) beziehungsweise (6). Sie schwankt unter gleichbleibender Belastung außerdem mit den Schwankungen des Grundwasserspiegels aufgrund der damit verbundenen Änderung der effektiven Normalspannung in der Scherfuge (GÄRTNER, 2001; NIX, 2003; SCHNEIDER-MUNTAU, 2013; GOLDSCHIEDER, 2014). Um die Änderung der Kriechgeschwindigkeit in Tonhängen und -böschungen bei Änderung des Grundwasserspiegels zu prognostizieren, schlägt GOLDSCHIEDER (2014) die folgende Gleichung vor:

$$\dot{\Gamma} = \dot{\Gamma}_0 \cdot \left(\frac{\tau_1 / \sigma'_1}{\tau_0 / \sigma'_0} \right)^{1/l_v} \quad (8)$$

Die Gleichung ist eine Abwandlung von Gleichung (6). Dabei wird zum einen die Stauchungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ durch die Gleitgeschwindigkeit $\dot{\Gamma}$ ersetzt, wobei angenommen wird, dass der Viskositätsindex für beide Geschwindigkeiten übereinstimmt. Zum anderen wird

die Scherspannung τ durch das Verhältnis aus Scherspannung und effektiver Normalspannung τ / σ' ersetzt. Die Kriechgeschwindigkeit ist danach eine Funktion des Ausnutzungsgrads der Böschung. Nach GOLDSCHIEDER gilt die Gleichung nur für den Bereich der sicheren Spannungen. Auf der Grenzgeraden ist das Verhalten rein plastisch und die Gleitgeschwindigkeit unbestimmt.

Bei anhaltendem Kriechen fällt die Scherfestigkeit in der Scherfuge durch Entfestigung infolge von Dilatation und Einregelung der Tonteilchen ab. Dadurch kommt es zu einer erneuten Zunahme der Kriechgeschwindigkeit und zum Versagen der Böschung (BJERRUM, 1973). Dies ist vergleichbar mit dem tertiären Kriechen und dem Kriechbruch in der Werkstofftechnik. Außerdem bewirkt das Zusammenspiel von Kriech- und Relaxationsprozessen (Kriechrelaxation) eine Ausbreitung und Entfestigung von Scherfugen, was als progressiver Bruch bezeichnet wird (GOLDSCHIEDER, 2014).

3 Kennzeichnung der untersuchten Böden

3.1 Geologische Einordnung

Der Tagebau Amsdorf befindet sich im nördlichen Bereich der Oberröblinger Braunkohlenmulde, welche durch maximal etwa 70 m mächtige tertiäre Sedimente des Oberen Miozän (Bartonium) bis Unteren Oligozän (Rupelium) gekennzeichnet ist. Die Oberröblinger Braunkohlenmulde befindet sich am Nordostrand der Querfurter Mulde und wird im Norden und Osten durch den NW-SE streichenden Teutschenthaler Sattel begrenzt. Der Kern des Teutschenthaler Sattels wird durch den Ausstrich des Unteren Buntsandsteins gekennzeichnet und liegt als Einsturzgebirge vor, was auf die Ablaugung des aus den Sattelflanken in den Satteln zugewanderten Zechsteinsalzes zurückzuführen ist (RADZINSKI et al., 2008). Die prätertiären Festgesteinsschichten fallen entsprechend der Lage der Oberröblinger Braunkohlenmulde zwischen dem Teutschenthaler Sattel und der Querfurter Mulde etwa in südwestliche Richtung ein. Das Schichteneinfallen wird von BLUMENSTENGEL et al. (2002) für den nördlichen Bereich der Braunkohlenmulde mit 25° bis 70° angegeben. Im Bereich der tertiären Sedimente liegt ein Schichteneinfallen zum Muldenzentrum vor, welches im nördlichen Bereich der Braunkohlenmulde, etwa 1 km südlich der Ortschaft Amsdorf liegt.

Die Oberröblinger Braunkohlenmulde wurde zunächst als eigenständiges, limnisches Sedimentationsbecken angesehen, welches durch die Salzabwanderung in den Teutschenthaler Sattel entstanden ist. Spätere Untersuchungen haben jedoch marinen Einfluss der braunkohleführenden Sedimente und damit die Verbindung zur mitteldeutschen Bucht sowie den paralischen Bildungscharakter der Braunkohlenflöze nachgewiesen (BLUMENSTENGEL & VOLLAND, 2002). Die Oberröblinger Braunkohlenmulde war wie auch das Weißelsterbecken südlich von Leipzig eine von mehreren Randbuchten des tertiären nordwesteuropäischen Schelfmeeres im *Mitteldeutschen Ästuar*. Die Anbindung an das Schelfmeer erfolgte zunächst westlich des Halleschen Vulkanitkomplexes direkt nach Nordwesten. Mit der Hebung der Halle-Hettstedter-Gebirgsbrücke schloss sich die direkte Verbindung mit Beginn des Obereozäns. Die Anbindung erfolgte dann östlich des Halleschen Vulkanitkomplexes über den Anhalter Raum (BLUMENSTENGEL & KRUTZSCH, 2008).

Die muldenartige Einsenkung ist als postgenetisch und das Tertiärvorkommen von Oberröblingen als isolierter Erosionsrest anzusehen (BLUMENSTENGEL et al., 2002). Die klassische Einteilung in die Amsdorf-Folgen A-F wird daher im Folgenden nicht verwendet, da es sich nicht um einen eigenständigen Sedimentationsraum handelt.

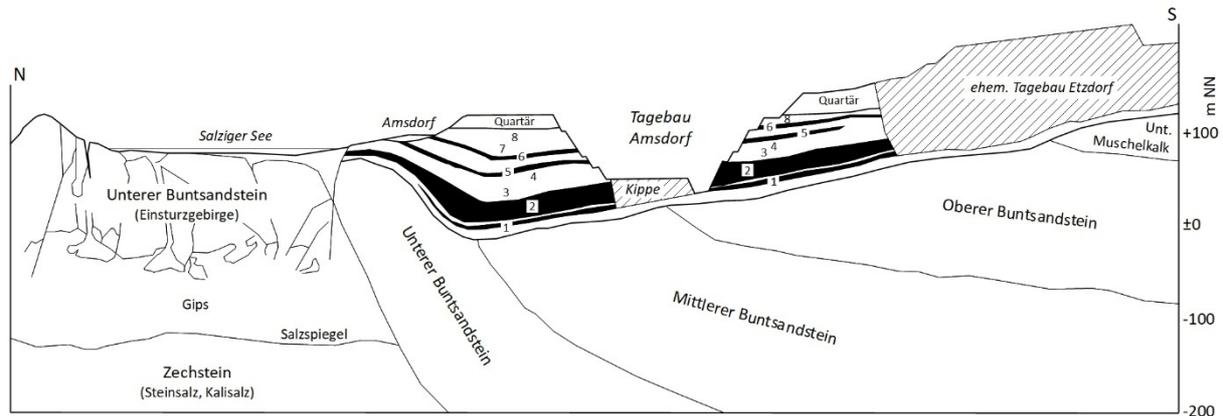


Abbildung 8: Schematischer geologischer Schnitt durch die Oberröblinger Braunkohlenmulde und den südlichen Teil des Salzigen Sees nach BLUMENSTENGEL et al. (2002), 1: Unterflöz, 2: Hauptflöz, 3: Decksand, 4: Braunkohlenschluff und Braunkohlenton, 5: Oberflöz 2.1, 6: Oberflöz 1, 7: Rupelsand, 8: Rupelton

Das Tertiärprofil beginnt am Standort mit den Liegendsedimenten des Unterflözes aus dem Miozän (Bartonium). Über dem nur lokal ausgebildeten, 1-7 m mächtigen Wanslebener Ton folgen ein bis 15 m mächtiger Liegendsand und ein bis 8 m mächtiger Liegendschluff. Das Unterflöz ist eine bankige, gebänderte Kohle mit einer Mächtigkeit von 0-7 m. Im oberen Drittel ist ein toniges bis kiesiges Zwischenmittel eingeschaltet, durch welches das Unterflöz zweigeteilt ist. Gegenüber dem Hauptflöz ist das Unterflöz durch das Hauptmittel getrennt. Die Liegendsedimente, das Unterflöz sowie der untere Teil des Hauptmittels werden der *Wallendorf-Formation* zugerechnet (BLUMENSTENGEL et al., 2002).

Das bis zu 23 m mächtige Hauptflöz ist plattig bis bankig ausgebildet und ebenfalls gebändert. Die helleren Bänder stellen eine Riedgrasfazies dar und weisen einen besonders hohen Bitumengehalt auf. Über dem Hauptflöz folgt zunächst der 2-3 m mächtige Decksand als schluffiger Feinsand. Daran schließen der Braunkohlenschluff und der Braunkohlenton an. Diese bis 43 m mächtigen Schichten sind als tonig-schluffige Wechsellagerung ausgebildet, wobei ein ständiger Wechsel der Korngrößen vertikal sowie auch lateral erfolgt. Die Korngrößen nehmen innerhalb dieses Schichtkomplexes außerdem von unten nach oben sowie auch vom Muldenrand zum Muldenzentrum ab. Gleichzeitig nimmt der organische Anteil von unten nach oben insgesamt zu. Es sind bis zu 3 Oberflöze enthalten. Dadurch kann der Braunkohlenton weiter in einen unteren, oberen und obersten Kohlenton unterteilt werden (BLUMENSTENGEL et al., 2002). Das Hauptflöz, die Hangendsedimente und die Oberflöze sind dem Obereozän (Priabonium) zuzuordnen. Sie repräsentieren durch Meeresspiegelschwankungen gesteuerte Sedimentationszyklen. Die Kohlebildung ist demnach paralisch, und die Hangendsedimente sind als brackisch-ästuarine Rückstaubildungen zu kennzeichnen (BLUMENSTENGEL & KRUTZSCH, 2008). Das Hauptflöz ist der *Bruckdorf-Formation* und die Oberflöze der *Schkeuditz-Formation* und der *Zöschen-Formation* zuzuordnen (MÜLLER, 2013).

Das Unterflöz und das Hauptflöz wurden und werden im Tagebau Amsdorf zur Extraktion von Montanwachs aus der besonders bitumenhaltigen Kohle abgebaut. In der Vergangenheit wurde

die Braunkohle auch unter Tage gewonnen. Aus diesem Grund finden sich im Bereich der Flöze häufig Verstürze der Deckschichten und alte Streckenausbauhölzer (*Alter Mann*).

Oberhalb der beschriebenen obereozänen Sedimente folgen im Zuge der einsetzenden Rupeltransgression abgelagerte, zunächst noch kalkfreie, brackisch-ästuarine bis marine Sedimente des Unteroligozän (Rupelium 1). Zu dieser sogenannten Oligozänen Wechselfolge gehören der Basissand (Rupelbasissand), der Basiston sowie ein Oberflöz (Flöz Lochau). Der Basissand wird als Sediment einer Regressionsphase gedeutet. Der Basiston wird als Rückstau-Sediment angesehen, welches sich bei steigendem Meeresspiegel abgelagert hat. Er entspricht etwa dem Haselbacher Ton im Weißelsterbecken. Das bis zu 3 m mächtige Oberflöz wird von einem kohligen, an der Basis geröllführenden Feinsand überdeckt, welcher wiederum als Regressions sediment gedeutet wird (BLUMENSTENGEL et al., 2002). Die oligozäne Wechselfolge wird der *Zörbig-Formation* zugeordnet (BLUMENSTENGEL & VOLLAND, 2002).

Mit der Rupelhaupttransgression wurde zunächst eine schwach geröllführende Lage aus Fein- bis Mittelkiesen als marine-brackische Transgressionsschicht abgelagert. Diese Schicht hat aufgrund von reichlich enthaltenen Haifischzähnen Bekanntheit erlangt. Über der Transgressionsschicht folgt der ebenfalls marin-brackische, bis zu 6 m mächtige Rupelsand. Er wird mit den Magdeburger Sanden korreliert. Den oberen Abschluss des Tertiärprofils bildet am Standort der im Bereich der Sattelflanke bis zu 28 m mächtige, marine Rupelton. Der Rupelton ist als Wechsellagerung von feinsandigen, schwach tonigen Schluffen und schluffigen Tonen ausgebildet. Er wird in der tagebaueigenen Gliederung als Rupelschluff oder oligozäner Schluff bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird der überregional üblichere Begriff Rupelton verwendet. Etwa 3 m über der Basis befindet sich ein Horizont mit bis zu 0,5 m mächtigen Septarien (Kalkkonkretionen). Daher ist auch die Bezeichnung Septarienton geläufig. Weiterhin sind für den Rupelton Schalen von Muscheln und Schnecken sowie Gipsnadelchen kennzeichnend (BLUMENSTENGEL et al., 2002). Die beschriebenen Sedimente der Rupelhaupttransgression sind ebenfalls dem Unteroligozän (Rupelium 2) zuzuordnen. Die Schichtoberkante des Rupeltons stellt eine Diskordanzfläche dar. Die heutige West- und Südwestverbreitung des Rupels ist durch die spätere Erosion bedingt (BLUMENSTENGEL & KRUTZSCH, 2008).

In Tabelle 1 ist das beschriebene Tertiärprofil vereinfacht zusammengefasst. Das Profil basiert auf den Angaben von BLUMENSTENGEL et al. (2002) sowie auf tagebauinternen, unveröffentlichten Daten. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Schichten sind in der Tabelle dunkel hervorgehoben.

Über dem Rupelton folgen diskordant die quartären Deckschichten. Diese beginnen mit bis zu 1 m mächtigen präglazialen Kiesen. Darauf folgen die glazigenen Sedimente der Elsterkaltzeit (Dehlitz-Leipziger Bänderton, 1. Elstergrundmoräne) und der Saalekaltzeit (Weida-Schotter/Hauptterrasse, Lochauer Bänderton, 1. Saalegrundmoräne, Schmelzwassersande und -kiese). Lokal stehen darüber weichselkaltzeitliche Weida-Schotter (Niederterrasse) und ebenfalls weichselkaltzeitlicher Löss an.

Tabelle 1: Vereinfachtes Tertiärprofil im Tagebau Amsdorf

Serie		Stufe	Lithologie	Tagebaukürzel
Oligozän	Unteroligozän	Rupelium	Rupelton	U1
			Rupelsand	fS1
			Transgressionsschicht	-
			Oberflöz 1	Bk1
			Basiston	T2, U2
			Rupelbasissand	S2
Eozän	Obereozän	Priabonium	Braunkohlenton (oberer Teil)	BkTo
			Oberflöz 2	Bk2
			Braunkohlenton (unterer Teil)	BkTu
			Braunkohlenschluff	U3
			Decksand	fS3
			Hauptflöz	FI
			Hauptmittel	HM
	Mitteloazän	Bartonium	Unterflöz (mit unterem Zwischenmittel)	FII/FIII
			Liegendton, Liegend Schluff, Liegendsand	T5, U5, fS5

Im Tagebaubetrieb entstehen durch den Abbau und die Umlagerung der über der Braunkohle anstehenden Deckgebirgsschichten mächtige Kippen. Das Deckgebirge wird im Tagebau Amsdorf mit einem Schaufelradbagger gelöst und anschließend im Bandbetrieb zum Bandabsetzer befördert und als Absetzerkippe verkippt. Da die Deckgebirgsschichten zu einem großen Teil aus bindigen Lockersedimenten bestehen, und es technologisch bedingt bei Abbau und Verkipfung zu einer Vermischung der Ausgangsschichten kommt, entstehen am Standort die sogenannten *bindigen Mischbodenkippen*. Abbau und Transport führen durch die Entlastung und die mechanischen Einwirkungen gegenüber dem gewachsenen Ausgangsmaterial zu einer Festigkeitsabnahme (GABRIEL, 1982). Eine Verschlechterung der Konsistenz erfolgt möglicherweise auch durch die Verschiebung des Plastizitätsbereichs infolge der Vermischung der unterschiedlichen bindigen Ausgangsböden (SCHWITEILO et al., 2016). Die bindigen Mischbodenkippen sind außerdem durch das Vorhandensein von größeren Tonbrocken gekennzeichnet, die beim Verkipfungsprozess intakt bleiben. Diese Pseudokörner

begünstigen beim Schütten eine Entmischung des Kippenmaterials und die Bildung eines Makroporengefüges. Am Ende der Verkippung entsteht ein anthropogenes Lockergestein, dessen Eigenschaften gegenüber dem Ausgangsmaterial stark verändert sind und das durch eine geringe Dichte und stoffliche Inhomogenität gekennzeichnet ist (GABRIEL, 1982; FÖRSTER, 2001).

3.2 Probenahme

In der vorliegenden Arbeit werden 7 Probenreihen betrachtet, welche 3 bindige Deckgebirgsschichten (oligozäner Rupelton, eozäner Braunkohlenton und eozäner Braunkohlenschluff) sowie eine Vergleichsprobe der im Tagebaubetrieb anfallenden Kippe umfassen. Die Proben wurden aus Schürfen und Bohrungen im aktiven Tagebaugelände gewonnen. Die Probenahme aus den Schürfen wurde mit Ausstechzylindern mit einer Höhe von 12 cm und einem Innendurchmesser von 9,6 cm vorgenommen. Eine Probenreihe umfasst dabei mehrere Ausstechzylinder, die aus einem zusammenhängenden, nach manuell-visuellen Kriterien homogenen Bereich entnommen wurden. Für die Probenahme aus den Bohrungen wurden im Betriebsablauf durchgeführte Erkundungsbohrungen begleitet. Die Bohrungen erfolgten jeweils als Rotationskernbohrung mit Doppelkernrohr. In den beprobten Teufenabschnitten wurden die Bohrungen mit Kunststofflinern durchgeführt. Die Ausstechzylinder und die Liner wurden nach der Probenahme luftdicht verschlossen und erst im Labor vor der Probenpräparation für die Scherversuche geöffnet. Die Proben können der Probenahmekategorie A gemäß DIN EN ISO 22475-1 (2007) zugeordnet werden. Die Lage der Schurf- und Bohrpunkte ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Probenahmen sind außerdem in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Probenahmen

Material	Bezeichnung Probenreihe	Entnahmestelle	Geländehöhe [m NHN]	Entnahmetiefe [m]
Rupelton	R1	Schurf, Nördliches Endböschungssystem	82,0	0,7
Braunkohlenton	BkT1	Bohrung B1953/17, Vorfeld Baufeld Kupferhammer	106,6	19,0-20,0
	BkT2	Bohrung B1953/17, Vorfeld Baufeld Kupferhammer	106,6	21,0-22,0
	BkT3	Bohrung B1962/17, Vorfeld Baufeld Kupferhammer	105,7	18,0-19,0
Braunkohlenschluff	BkU1	Schurf, Kohlegrube Baufeld Kupferhammer	53,2	1,6
	BkU2	Bohrung B1965/17, Baufeld Kupferhammer	56,0	1,0-2,0
Kippe	K1	Schurf, Innenkippe südlich Wasserhaltung	76,9	1,2

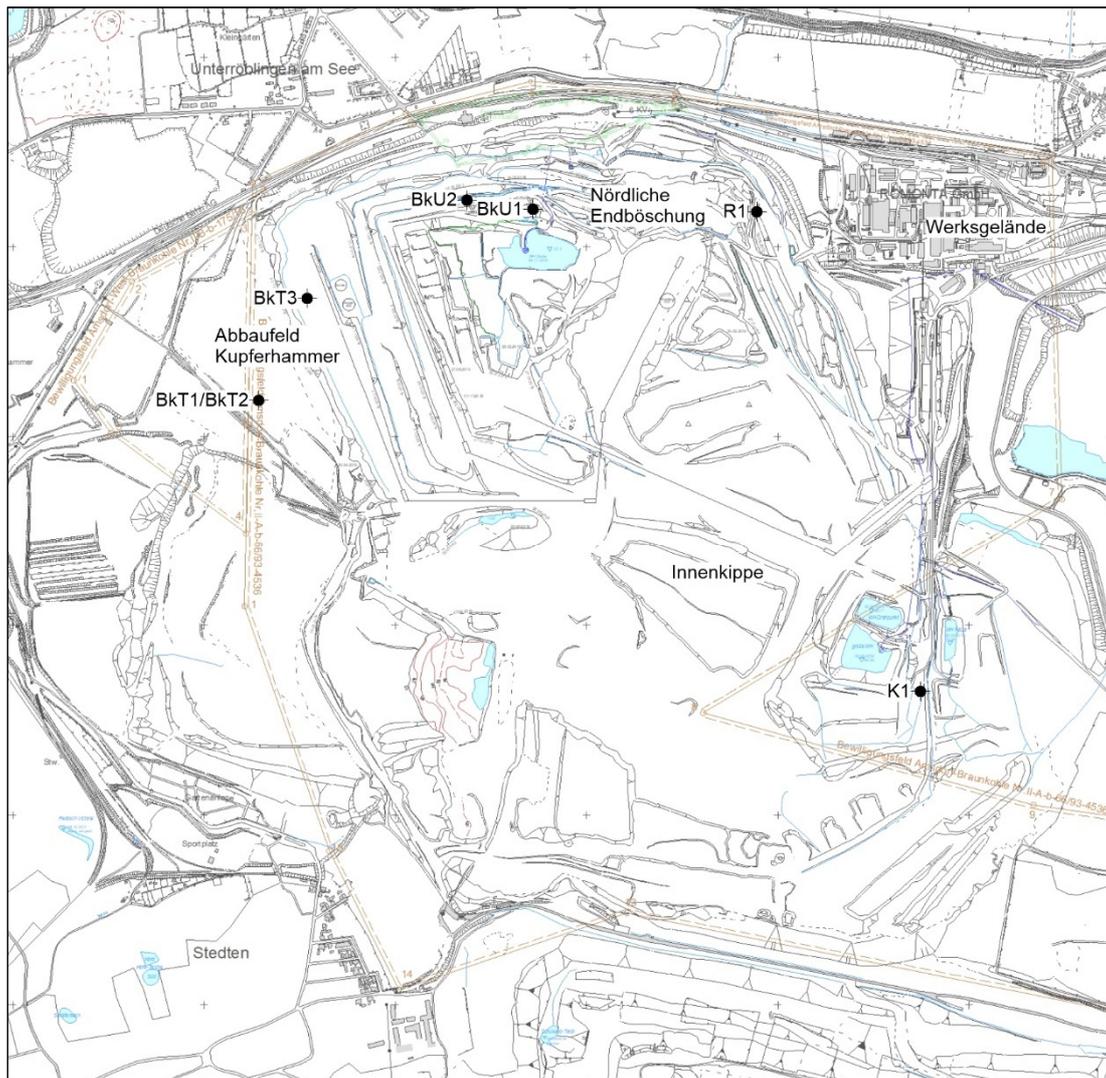


Abbildung 9: Übersichtsplan Tagebau (Stand 2019) mit Probenahmepunkten, Maßstab 1:20.000

Die Probenreihe R1 des *Rupeltons* wurde aus einem oberflächennahen Schurf aus der nördlichen Endböschung (ehem. Abbaufeld Westen III) entnommen. In dem zum Zeitpunkt der Probenahme neu aufgeschlossenen Abbaufeld Kupferhammer wurde der Rupelton nicht angetroffen. Durch das Auskeilen der Schichten zum Muldenrand setzte die tertiäre Schichtenfolge unter den quartären Schichten unmittelbar mit oligozänen Feinsanden ein.

Die Proben Bkt1, Bkt2 und Bkt3 des *Braunkohlentons* wurden aus den Erkundungsbohrungen B1953/17 und B1962/17 im Vorfeld des Abbaufelds Kupferhammer gewonnen. Beide Bohrungen wurden bis in die Liegendschichten des Unterflözes abgeteuft (Abbildung 10). Die Proben Bkt1 und Bkt2 aus der Bohrung B1953/17 können dem unteren Teil des Braunkohlentons zugeordnet werden. Die Probe Bkt3 aus der Bohrung B1962/17 vertritt den oberen Teil.

Die Proben BkU1 und BkU2 des *Braunkohlenschluffs* wurden im aktiven Abbaubereich (Kohlegrube) des Abbaufelds Kupferhammer gewonnen. Die Probenreihe BkU1 wurde aus der Sohle eines Baggerschurfs entnommen und vertritt den unteren Teil des Braunkohlenschluffs. Die Probe BkU2 wurde aus der Kohleuntersuchungs-Bohrung B1965/17 gewonnen und ist dem oberen Teil des Braunkohlenschluffs zuzuordnen. Die Bohrung B1965/17 wurde ausgehend

vom 5. Abraumschnitt ebenfalls bis in die mitteleozänen Liegendschichten abgeteuft (Abbildung 10).

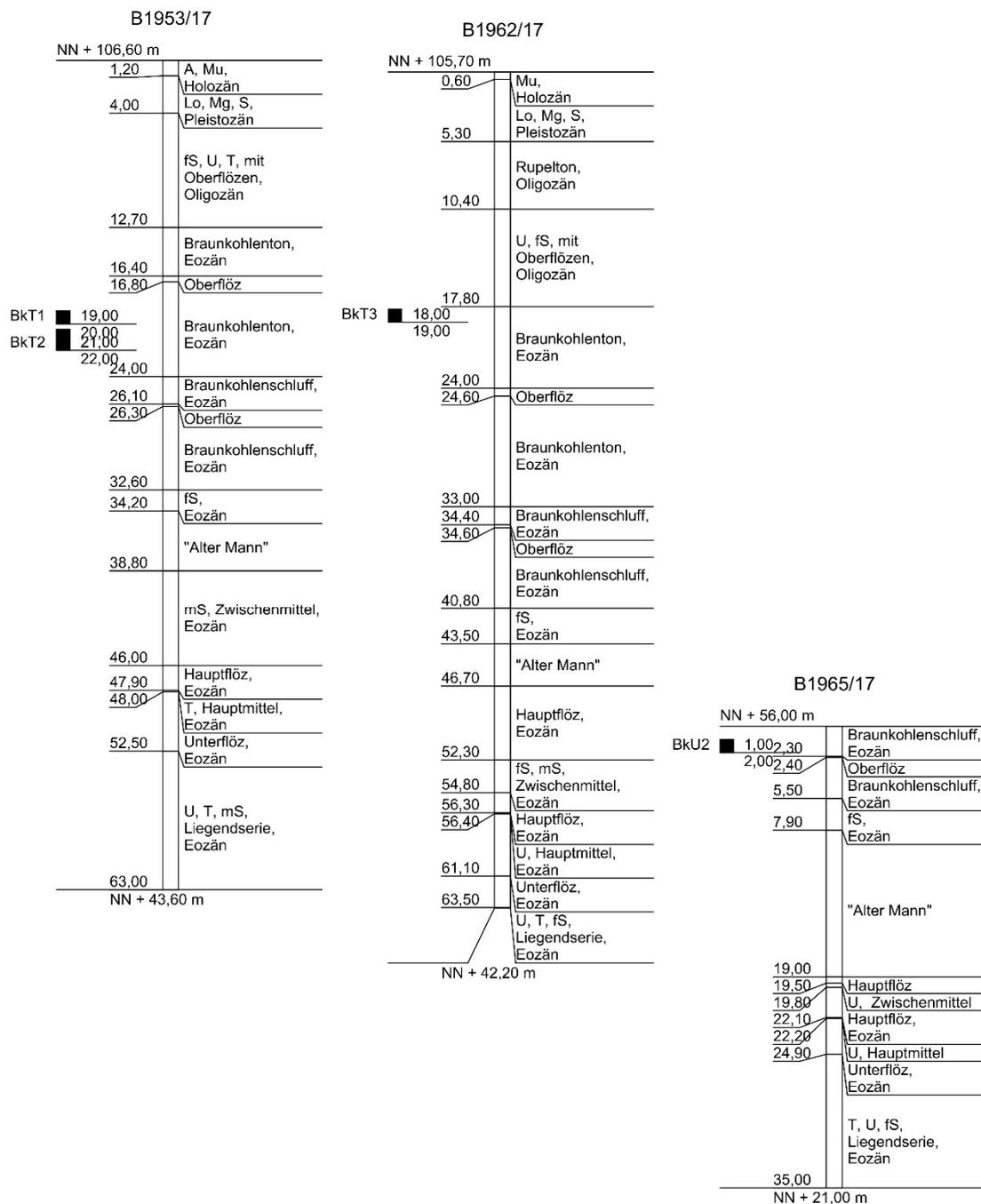


Abbildung 10: Bohrprofile der beprobten Bohrungen, höhenmäßig nebeneinandergestellt, ohne Maßstab

Die Probenreihe K1 der Kippe wurde aus der Sohle eines Baggerschurfs in der Innenkippe im südöstlichen Teil des Tagebaus gewonnen. Die beprobte Kippe wurde etwa im Jahr 2009 abgelagert und war durch die aktive Tagebautwässerung und die oberflächennahe Lage noch nicht aufgesättigt. Es handelte sich nach der Bodenansprache fast ausschließlich um verkippten Braunkohlenton. Unweit westlich des beprobten Bereichs fand in der Nacht vom 05.01. bis 06.01.2014 eine großflächige Kippenrutschung ausgehend von der Südböschung in das Tagebauinnere statt. Der beprobte Bereich wurde durch die Rutschung nicht erfasst.

3.3 Beschreibung und Klassifizierung der untersuchten Proben

Die untersuchte Probe R1 des *Rupeltons* zeigte die regionalgeologisch typische Ausbildung als relativ massiges, bindiges Sediment mit grauer Farbe und häufigen kleinen Schalenresten. Weiterhin waren Gipsrosen enthalten. Die Proben zeigten unter Lufteinfluss ein deutliches Nachdunkeln von grau zu dunkelgrau bis fast schwarz.

Im Plastizitätsdiagramm liegt die Probe mit einer Fließgrenze von 48 % und einer Ausrollgrenze von 27 % knapp oberhalb der A-Linie und ist nach DIN 18196 (2011) als mittelplastischer Ton zu klassifizieren. Im Rahmen einer tagebauinternen Kennwertanalyse (VEB BKW Geiseltal, 1980) wurde an 35 Proben des *Rupeltons* ein Mittelwert für die Fließgrenze von 46 ± 7 % und für die Ausrollgrenze von 28 ± 3 % ermittelt. Damit umfasst der im Tagebau anstehende *Rupelton* mittelplastische Schluffe und Tone sowie ausgeprägt plastische Schluffe. Die untersuchte Probe ordnet sich damit gut in die Kennwertanalyse ein und repräsentiert eine etwas stärker plastische Ausbildung des *Rupeltons*. Die Konsistenzzahl wurde mit 1,01 ermittelt. Die Konsistenz liegt damit knapp im halbfesten Bereich.

Bei der Korngrößenverteilung des *Rupeltons* dominiert der Schluff- gegenüber dem Tonanteil. Außerdem liegt ein schwacher Nebenanteil an Feinsand vor (Abbildung 12). Der organische Anteil ist anhand des Glühverlusts von 5,3 % nach DIN EN ISO 14688-2 (2018) als gering zu klassifizieren.

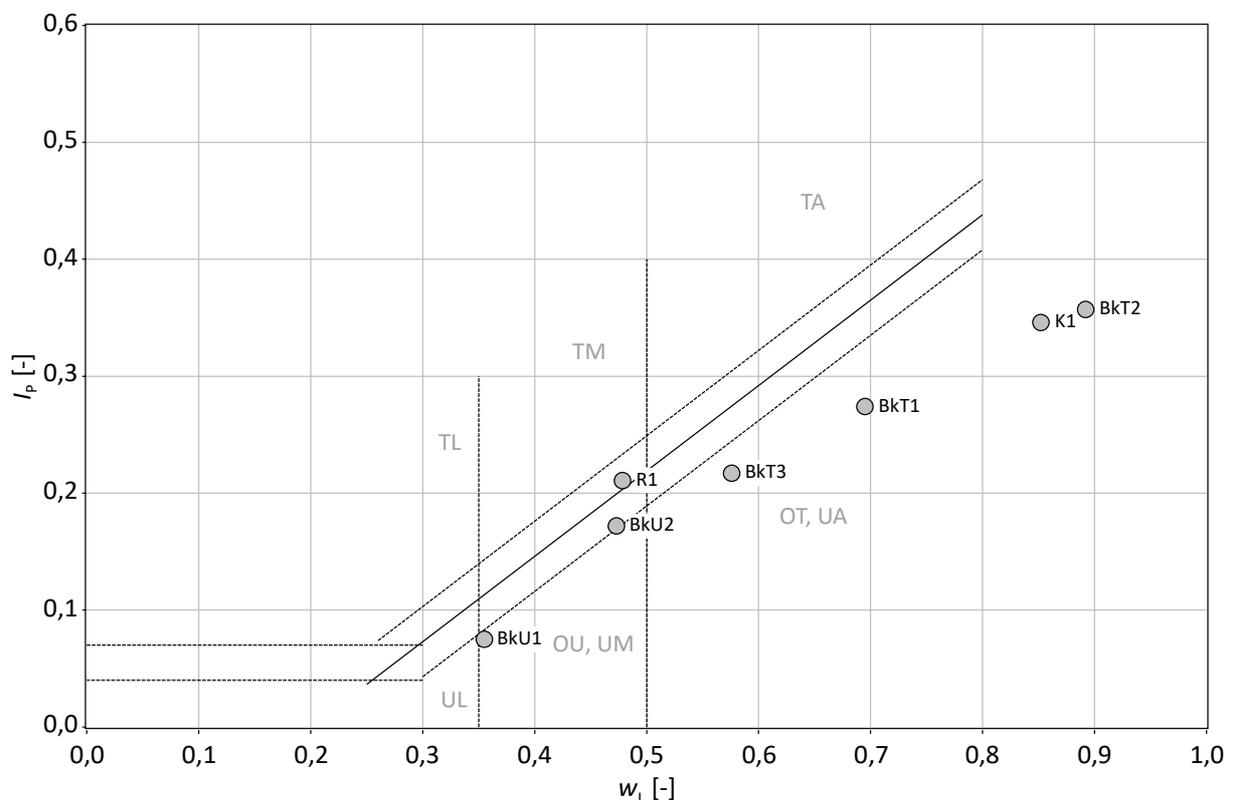


Abbildung 11: Lage der untersuchten Proben im erweiterten Plastizitätsdiagramm

Der *Braunkohlenton* setzt sich im Anschnitt an den Tagebauböschungen durch eine insgesamt hellere Färbung und eine grobe Bänderung von den darüber liegenden tertiären Schichten ab (Abbildung 14). Die helle Färbung ist durch die Austrocknung des Tons bedingt. Im frischen Anschnitt ist das Material vorwiegend braun bis dunkelbraun. Wie beim Rupelton sind häufig Gipsrosen sowie ein starkes Nachdunkeln frischer Bruchflächen an der Luft zu beobachten. Der Braunkohlenton zeigt ein sprödes Verhalten und zerbricht beim Bearbeiten schnell in kleinere „Kluftkörper“. Er weist teilweise Spuren mechanischer Beanspruchung in Form von Versatzflächen und Spiegelharnischen auf (Abbildung 16, siehe auch Abbildung 20), was auf die tektonische Beanspruchung durch die örtliche Salztektunik hinweist. Die Lagerungsverhältnisse sind außerdem durch Bergsenkungen über Abbaufeldern des vormaligen untertägigen Braunkohlebergbaus gestört, die sich an den Tagebauböschungen anhand des Einfallens der Bänderung nachvollziehen lassen (Abbildung 15).

Die plastischen Eigenschaften der 3 untersuchten Proben schwanken relativ stark, was darauf zurückzuführen ist, dass der Braunkohlenton als Wechsellagerung zwischen tonigeren und schluffigeren Lagen ausgebildet ist. Dies ist auch an der Bänderung im Böschungsanschnitt zu erkennen. Die Fließgrenzen liegen zwischen 58 % und 89 %. Die Ausrollgrenzen liegen zwischen 36 % und 54 %. Alle 3 Proben liegen unterhalb der A-Linie und können nach DIN 18196 als Tone mit organischen Beimengungen (Bodengruppe OT) klassifiziert werden. Die Konsistenzzahlen liegen zwischen 0,82 (steif) und 1,37 (halbfest-fest). Die manuelle Bodenansprache ergab für alle 3 Proben halbfeste Konsistenz.

Die tagebauinterne Kennwertanalyse ergab für den oberen Braunkohlenton bei $n = 42$ einen Mittelwert für die Fließgrenze von 83 ± 9 % und für die Ausrollgrenze von 48 ± 6 %. Für den unteren Braunkohlenton ergab sich bei $n = 45$ ein Mittelwert für die Fließgrenze von 79 ± 13 % und für die Ausrollgrenze von 47 ± 10 %. Die plastischere Probe BkT2 repräsentiert damit etwa die durchschnittliche Ausbildung des Braunkohlentons. Mit den geringer plastischen Proben BkT1 und BkT3 wurden eher schluffigere Lagen beprobt. Dies deutet sich auch anhand der Körnungslinien an. Der Tongehalt der plastischeren Probe BkT2 beträgt 59 %. Die geringer plastischen Proben BkT1 und BkT2 weisen einen Tongehalt von 51 % bis 52 % auf.

Anhand des Glühverlusts von 17,7 % bis 22,6 % sind die Proben als mittelstark bis stark organisch zu klassifizieren. Der organische Anteil war auch organoleptisch anhand des stark kohligen, aromatischen Geruchs und der charakteristischen braunen Farbe wahrzunehmen.

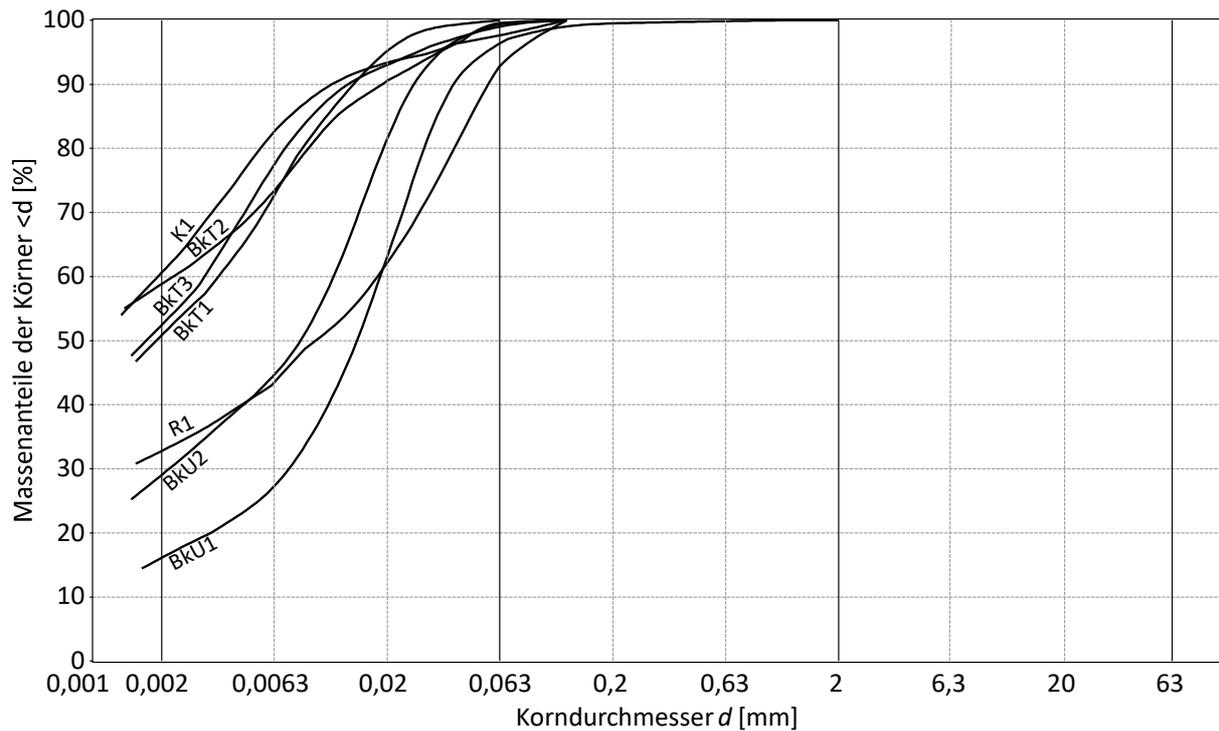


Abbildung 12: Körnungslinien der untersuchten Proben

Der *Braunkohlenschluff* ist im Böschungsanschnitt kaum vom Braunkohlenton zu unterscheiden (Abbildung 15). Er weist ebenfalls eine Bänderung durch die wechselnd schluffigeren oder tonigeren Lagen auf. Die Schichtgrenze zwischen Braunkohlenton und Braunkohlenschluff ist am Bohrkern schwer festzulegen und verläuft fließend. Der Braunkohlenschluff ist ebenfalls braun, aber am frischen Bohrkern insgesamt deutlich heller als der Braunkohlenton. Er weist außerdem häufig dünne Feinsandlagen auf. Wie beim Braunkohlenton machte sich eine Neigung zum klüftigen Zerfall etwa senkrecht zur Schichtung bemerkbar. Bei der Probe BkU1 waren außerdem inkohlte Wurzelreste enthalten.

Die beiden untersuchten Proben unterschieden sich bereits bei der manuellen Bodenansprache deutlich hinsichtlich ihrer Plastizität und ihrer Kornverteilung. Die Probe BkU1 ist geringer plastisch. Sie weist eine Fließgrenze von 36 % und eine Ausrollgrenze von 28 % auf. Die Probe BkU2 ist dagegen deutlich plastischer mit einer Fließgrenze von 47 % und einer Ausrollgrenze von 30 %. Die Unterschiede machen wie beim Braunkohlenton den wechsellagernden Aufbau deutlich. Beide Proben liegen unterhalb der A-Linie und können nach DIN 18196 als Schluffe mit organischen Beimengungen (Bodengruppe OU) klassifiziert werden. Die Konsistenzzahl der Proben liegt für BkU1 bei 1,55 (halbfest-fest) und für BkU2 bei 1,20 (halbfest). Nach der manuellen Bodenansprache waren beide Proben als halbfest zu beurteilen.

In der tagebauinternen Kennwertanalyse wurde der Braunkohlenschluff wie der Braunkohlenton in einen oberen und einen unteren Horizont unterteilt. Die beiden Horizonte werden durch ein Oberflöz (Bk3) geteilt. Für den oberen Horizont ergab sich bei $n = 20$ ein Mittelwert für die Fließgrenze von 44 ± 7 % und für die Ausrollgrenze von 29 ± 6 %. Für den unteren Horizont ergab sich bei $n = 8$ ein Mittelwert für die Fließgrenze von 44 % und für die Ausrollgrenze von 31 %. Die beiden untersuchten Proben ordnen sich damit recht gut ein,

wobei BkU1 eine etwas geringer plastische und BkU2 eine etwas stärker plastische Ausbildung darstellt. Dementsprechend ist auch der Tongehalt der Probe BkU1 mit 16 % geringer als BkU2 mit 29 %. Der Tongehalt beider Proben liegt dennoch deutlich unterhalb des Braunkohlentons. Der Glühverlust von 7 % bis 9 % weist beide Proben als mittelstark organisch aus.

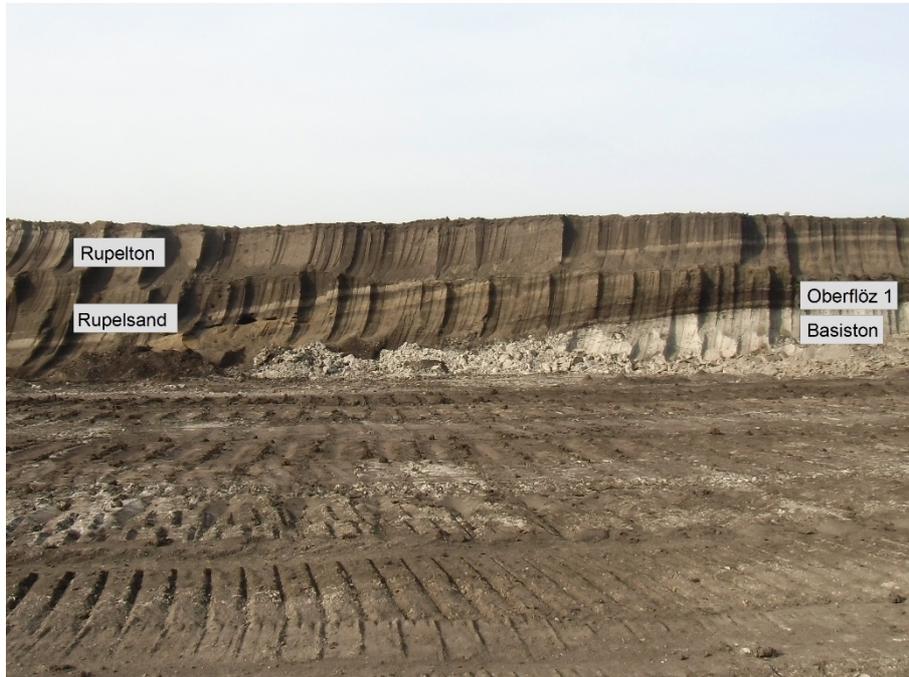


Abbildung 13: Rupelton im Baufeld Westen III, 2. Abraumschnitt (Foto: Frank Knoche)

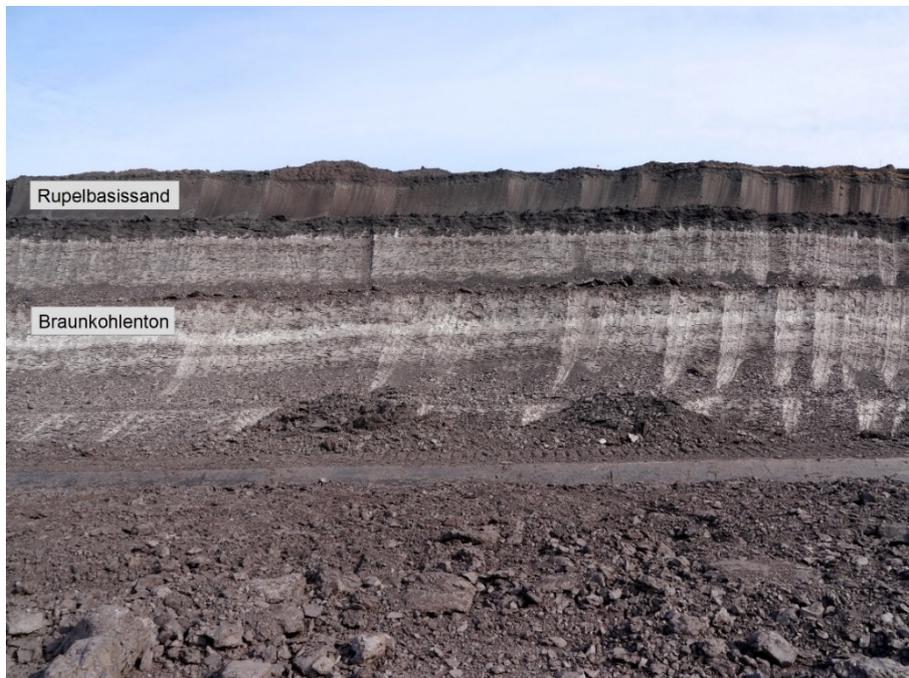


Abbildung 14: Braunkohlenton im Abbaufeld Kupferhammer, 3. Abraumschnitt



Abbildung 15: Braunkohlenton und Braunkohlenschluff im Abbaufeld Kupferhammer, 4. bis 5. Abraumschnitt



Abbildung 16: Spiegelharnisch im Braunkohlenton, Bohrung B1962/17

Die untersuchte Probe der *Kippe* setzte sich makroskopisch nahezu vollständig aus verkipptem Braunkohlenton zusammen. In dem Entnahmeschurf konnte deutlich das für die bindige Kippe typische Pseudokorngefüge aus Ton-Bruchstücken beobachtet werden (Abbildung 17). Die Pseudokörner wiesen verschiedene Größen bis höchstens etwa 20 cm auf. Durch die entmischten und teils eingeregelteten Bruchstücke erscheint die Kippe im Anschnitt texturiert, und es lassen sich die vormaligen Schüttkegel erkennen (Abbildung 18).

Im Plastizitätsdiagramm liegt die Kippenprobe mit einer Fließgrenze von 85 % und einer Ausrollgrenze von 35 % unterhalb der A-Linie und nah an den Mittelwerten der

Kennwertanalyse für den Braunkohlenton. Das bestätigt die manuell-visuelle Ansprache als verkippter Braunkohlenton. Die Probe ist ebenfalls als Ton mit organischen Beimengungen (Bodengruppe OT) zu klassifizieren. Die Konsistenzzahl der Probe wurde mit 1,21 ermittelt, was einer halbfesten Konsistenz entspricht. Die Konsistenz der beprobten Kippe ist demnach vergleichbar mit der des gewachsenen Braunkohlentons. Es ist noch keine nennenswerte Plastifizierung eingetreten, da die Probenahme in einem nicht aufgesättigten Bereich der Kippe erfolgte.

Die Korngrößenverteilung der Kippenprobe ist mit einem Tongehalt von 59 % ebenfalls ähnlich der des Braunkohlentons (Abbildung 12). Die Probe enthielt außerdem reichlich Bruchstücke aus Braunkohle bzw. stark kohligem Ton (verkippte Oberflöze). Diese Bruchstücke sind verhältnismäßig fest, sie sind aber mit der Hand zu zerbrechen und nicht beständig. Sie verändern beim nassen Abtrennen ihre Größe und Form. Eine genaue Bestimmung des Massenanteils war daher nicht möglich. Die Bruchstücke sind aufgrund der fehlenden Formbeständigkeit und der geringen Druckfestigkeit ebenfalls als Pseudokorn zu betrachten. Die Körnungslinie in Abbildung 12 bildet nur die Anteile bis 0,125 mm ab.

Der Glühverlust wurde mit 23,5 % ermittelt. Das Material ist damit als stark organisch zu klassifizieren. Die bodenmechanischen Kennwerte der beprobten Kippe sind damit insgesamt der plastischeren Probe BkT2 des Braunkohlentons sehr ähnlich.



Abbildung 17: Pseudokorngefüge der Kippe im Entnahmeschurf der Probe K1



Abbildung 18: Kippe mit Schüttungstextur im südlich-zentralen Bereich der Innenkippe

Die anhand der Plastizitätszahlen und der Tongehalte ermittelten Aktivitätszahlen I_A liegen für alle untersuchten Böden relativ nah beieinander. Die Werte schwanken zwischen 0,42 und 0,64, wodurch die Böden als inaktiv zu kennzeichnen sind. Der Tonanteil setzt sich demnach wahrscheinlich vorwiegend aus Kaolinit und Illit und nur untergeordnet aus Montmorillonit zusammen.

Die bodenmechanischen Kennwerte der untersuchten Proben sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Kennwerte wurden teilweise im Rahmen der im Literaturverzeichnis aufgeführten, vom Verfasser betreuten Abschlussarbeiten ermittelt.

Tabelle 3: Übersicht über die bodenmechanischen Kennwerte der untersuchten Proben

Material	Probe	Boden- gruppe	w_L [-]	I_P [-]	w [-]	I_C [-]	I_A [-]	ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	V_{gl} [%]
Rupelton	R1	TM	0,478	0,211	0,264	1,018	0,643	1,96	2,69	5,3
Braunkohlen- ton	BkT1	OT	0,695	0,274	0,363	1,209	0,539	1,82	2,49	17,9
	BkT2	OT	0,892	0,357	0,403	1,369	0,607	1,71	2,31	22,6
	BkT3	OT	0,576	0,217	0,397	0,822	0,415	1,73	2,54	17,7
Braunkohlen- schluff	BkU1	OU	0,355	0,075	0,239	1,552	0,466	1,95	2,59	6,8
	BkU2	OU	0,473	0,172	0,267	1,196	0,593	1,90	2,57	9,3
Kippe	K1	OT	0,852	0,346	0,432	1,214	0,570	1,65	2,42	23,5

4 Beschreibung der durchgeführten Versuche

4.1 Rahmenscherversuche

4.1.1 Rahmenschergerät

Die Rahmenscherversuche erfolgten mit dem vollautomatischen Rahmenschergerät SL 100 z des Herstellers Wille-Geotechnik im bodenmechanischen Labor des Instituts für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Die Normal- und die Scherkraft werden bei dem verwendeten Gerät elektromechanisch aufgebracht. Die Messung der Scherkraft erfolgt über einen Kraftmessbügel mit einem Messbereich von 5 kN und einer Auflösung von 0,01 kN. Das Rahmenschergerät entspricht der Gerätebauweise b) gemäß DIN 18137-3 (2002). Das heißt, der obere Rahmen und der Belastungsstempel werden zur Verhinderung von Verkippungen parallel geführt. Zwischen den Rahmen wurde ein Scherspalt von 0,5 mm eingestellt. Zur besseren Übertragung der Scherkraft auf die Proben wurden Filterplatten mit eingelassenen Schneiden verwendet. Die Schneiden ragten 2 mm aus den Filterplatten heraus.

Der Versuchsraum war klimatisiert. Die Raumtemperatur wurde mit einem Messintervall von 10 min aufgezeichnet. Der maximale Schwankungsbereich der Temperatur lag über den gesamten Versuchszeitraum zwischen 22,5 °C und 27,0 °C. Während der einzelnen Versuche schwankte die Temperatur in der Regel in einem Bereich von bis zu 1,5 °C. Die Schwankungen waren vorrangig durch einen 24-stündigen Zyklus gekennzeichnet.

Die Steuerung und die Aufzeichnung der Versuche erfolgten digital mit dem EDV-Programm WinBod des Herstellers Wille-Geotechnik. Die Auswertung erfolgte manuell mit einer Tabellenkalkulation.

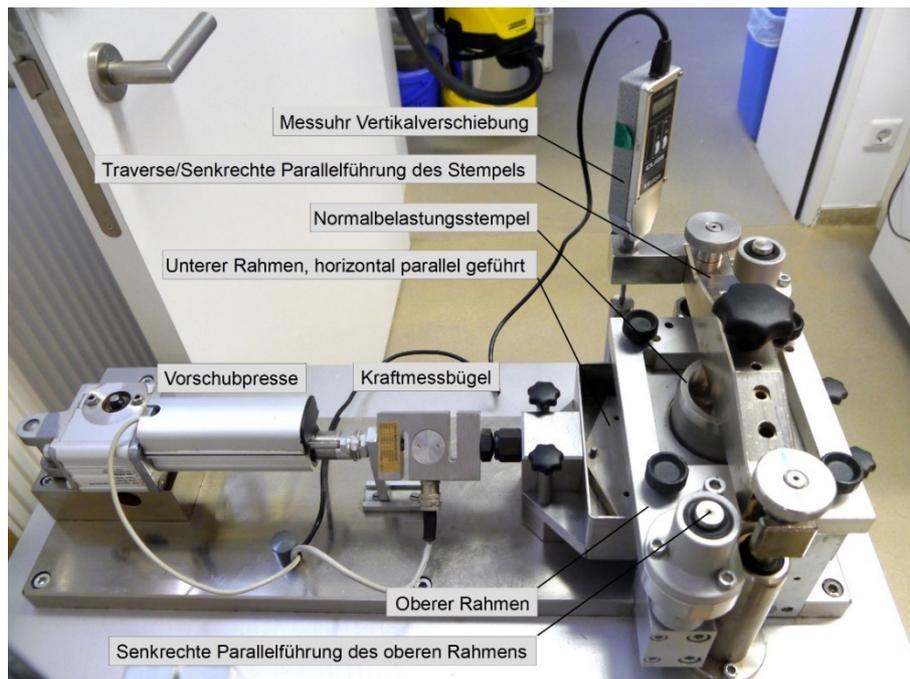


Abbildung 19: Verwendetes Rahmenschergerät

4.1.2 Probeneinbau

Es wurden zylindrische, weitgehend ungestört eingebaute Probenkörper mit einer Höhe von 2 cm und einem Durchmesser von 7,1 cm untersucht. Die Probenherstellung erfolgte durch vorsichtiges Ausstechen mit einem Schneidring aus den entnommenen Ausstechzylinder- und Linerproben. Aus dem Schneidring wurden die Proben anschließend in den Rahmen des Schergeräts eingedrückt.

Bei der Herstellung der ebenen Probenendflächen ließen sich insbesondere bei den spröderen Proben des Braunkohlentons und des Braunkohlenschluffs sowie bei der Kippe Einbaustörungen nicht vermeiden (Abbildung 20 und Abbildung 21). Die sich dabei ergebenden Fehlstellen wurden vorsichtig mit dem entsprechenden Bodenmaterial ausgefüllt.



Abbildung 20: Braunkohlenton (Probe BkT1) im Schneidring mit Einbaustörungen (vor Ausbesserung). Der farbliche Absatz geht auf eine durch die Probe verlaufende Störungsfläche zurück.



Abbildung 21: Kippe im Schneidring mit Einbaustörungen (vor Ausbesserung) und Pseudokornstruktur.

4.1.3 Normal- und Relaxationsversuche

Der Versuchsablauf der Normalversuche orientierte sich an den Vorgaben der DIN 18137-3 (2002). Je Versuchsreihe wurden mindestens 3 Einzelversuche mit unterschiedlichen Konsolidierungsspannungen durchgeführt. Die Konsolidierungsspannungen lagen in der Regel zwischen 100 bis 600 kPa. Bei Proben mit starker Streuung der Versuchsergebnisse wurden zusätzliche Einzelversuche mit abweichenden Konsolidierungsspannungen durchgeführt. Mit der Wahl der verhältnismäßig hohen Konsolidierungsspannungen wurde berücksichtigt, dass auf mögliche Gleitflächen im tief eingeschnittenen Tagebau hohe Normalspannungen wirken. Die maximalen Konsolidierungsspannungen von 400 kPa bis 600 kPa entsprechen einer Bodensäule auf der Gleitfläche von etwa 20 m bis 30 m, unter Auftrieb von 40 m bis 60 m. Durch die hohen Spannungen wird außerdem der Einfluss von Probenstörungen und Gerätereibung minimiert. Eine Rekonsolidation mit anschließender Entlastung auf die im Versuch eingestellten Konsolidierungsspannungen wurde nicht vorgenommen.

Die Konsolidierungsdauer lag für alle Proben bei 24 h. Die Proben waren während der Konsolidierung und des Abschervorgangs geflutet, wobei die Flutung unmittelbar nach Aufbringen der Konsolidierungsspannung erfolgte. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde für alle Versuche mit 0,002 mm/min gewählt. Dies entspricht der geringsten zulässigen Vorschubgeschwindigkeit entsprechend der Richtwerte der DIN 18137-3 (2002).

Bei den Normalversuchen wurde der Abschervorgang jeweils bis zum deutlichen Überschreiten der Peakscherfestigkeit oder bis zu einem Scherweg von maximal 15 % der Probenkörperlänge (entspricht einem Scherweg von 10,65 mm) durchgeführt. Bei den Relaxationsversuchen wurde der Abschervorgang dagegen durch Stoppen des Vorschubs in dem Moment angehalten, in dem erkennbar war, dass die Scherspannung nicht weiter zunimmt. Dabei kam es bei allen Versuchen zu einer deutlichen Abnahme der gemessenen Scherspannung (Relaxation). Der Vorschub wurde solange angehalten, bis anhand von Zwischenauswertungen ein Abflachen des Scherspannungskurve erkennbar war. Anschließend wurde der Abschervorgang mit gleicher Vorschubgeschwindigkeit fortgesetzt. Bei der Probe K1 (Kippe) wurde beim Teilversuch mit der Normalspannung 600 kPa eine weitere Relaxationsphase im späteren Scherverlauf durchgeführt. Die durchgeführten Normal- und Relaxationsversuche sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht zu den Normal- und Relaxationsversuchen

Material	Probe	Tiefe [m]	ρ_d [g/cm ³]	w [-]	σ'_c [kPa]	v [mm/min]	Relaxation [d]
Rupelton	R1	0,7	1,54	0,264	200	0,002	14
			1,58	0,264	400	0,002	12
			1,53	0,264	600	0,002	12
Braun- kohlen- ton	BkT1	20,0	1,35	0,363	100	0,002	-
			1,38	0,363	200	0,002	-
			1,33	0,363	400	0,002	-
			1,36	0,363	600	0,002	-
			1,28	0,363	800	0,002	-
			1,33	0,363	1000	0,002	-
	BkT3	18,9	1,25	0,405	100	0,002	19
			1,23	0,405	200	0,002	21
			1,22	0,405	400	0,002	26
Braun- kohlen- schluff	BkU1	1,6	1,55	0,239	100	0,002	-
			1,56	0,239	200	0,002	-
			1,60	0,239	400	0,002	-
			1,58	0,239	600	0,002	-
			1,56	0,239	800	0,002	-
	BkU2	2,0	1,47	0,267	200	0,002	14
			1,46	0,267	400	0,002	14
			1,56	0,267	600	0,002	16
Kippe	K1	1,2	1,13	0,428	200	0,002	-
			1,16	0,428	400	0,002	-
			1,17	0,428	600	0,002	-
			1,14	0,428	800	0,002	-
	K1 (Relax)	1,2	1,15	0,428	200	0,002	14
			1,16	0,428	400	0,002	15
			1,17	0,428	600	0,002	5/3

4.1.4 Versuche mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit

Der Versuchsablauf der Versuche mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit entsprach grundsätzlich den Normalversuchen. Jedoch wurde die Schergeschwindigkeit ausgehend von der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 von 0,002 mm/min abschnittsweise auf 0,0002 mm/min erniedrigt oder auf 0,02 mm/min erhöht. Um die Scherwiderstandslinien gleicher Schergeschwindigkeiten (Isotachen) in der Auswertung hinreichend sicher verbinden zu können, durfte der Scherweg für einen Geschwindigkeitsabschnitt nicht zu lang sein. Andererseits musste der Scherweg lang genug sein, um die bei größeren Scherwegen oft nur vorübergehende Wirkung auf den Scherwiderstand (TESRA-Viskosität) abklingen zu lassen.

Ein geeigneter Scherweg für einen Geschwindigkeitsabschnitt musste daher zunächst durch Vorversuche ermittelt werden. Dabei erwies sich ein Scherweg von 0,5 mm als geeignet. Die Schergeschwindigkeiten wurden daher bei allen Versuchen für einen Scherweg von etwa 0,5 mm konstant gehalten. Dies bedeutete eine Änderung der Schergeschwindigkeit in Abständen von etwa 25 bis 2.500 Minuten.

Bei drainierten Scherversuchen kann der gemessene Scherwiderstand bei zu hoher Schergeschwindigkeit durch verzögerten Porenwasserdruckausgleich beeinflusst sein. Daher wurden bis zum Erreichen des Grenzzustands der höchsten Scherfestigkeit nur Geschwindigkeitsabschnitte mit 0,002 mm/min und 0,0002 mm/min ausgeführt. Erst nach dem Überschreiten der Peakscherfestigkeit wurden auch Sprünge auf 0,02 mm/min vorgenommen.

Für alle 4 Böden wurden an einer Probenreihe Sprungversuche durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Teilversuch mit einer Normalspannung von 200 kPa und ein Teilversuch mit einer Normalspannung von 600 kPa vorgenommen. Eine Übersicht zu den Versuchen gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Übersicht zu den Versuchen mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit

Material	Probe	Tiefe [m]	ρ_d [g/cm ³]	w [-]	σ'_c [kPa]	v_0 [mm/min]
Rupelton	R1	0,7	1,54	0,264	200	0,002
			1,57	0,264	600	0,002
Braun- kohlen- ton	BkT1	20,0	1,25	0,363	200	0,002
			1,37	0,363	600	0,002
Braun- kohlen- schluff	BkU2	1,6	1,58	0,239	200	0,002
			1,55	0,239	600	0,002
Kippe	K1	1,2	1,16	0,432	200	0,002
			1,12	0,432	600	0,002

4.2 Großrahmenscherversuch

Der Vergleichsversuch mit der Kippenprobe im Großrahmenschergerät erfolgte mit dem vollautomatischen Schergerät SP 304-E des Herstellers Wille-Geotechnik im geomechanischen Labor der Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar. Die Normalspannung wird bei dem verwendeten Gerät pneumatisch über ein Druckkissen aufgebracht und über 4 Kraftsensoren geregelt. Die Scherkraft wird elektromechanisch aufgebracht. Die Messung der Scherkraft erfolgt über einen Kraftmessbügel mit einem Messbereich von 60 kN. Der obere Rahmen und der Belastungsstempel werden ebenfalls parallel geführt (Gerätebauweise b).

Das Gerät erlaubt die Untersuchung von Proben mit quadratischem Grundriss und einer Kantenlänge a von 30 cm. Eine ungestörte Probenahme war bei dem lockeren Kippenmaterial in dieser Dimension nicht möglich. Daher wurde das Material gestört und unter vorsichtiger manueller Verdichtung in den Scherrahmen eingebaut. Dabei wurde versucht, die Ton-Pseudokörner möglichst zu erhalten (Abbildung 22, Abbildung 23). Die In-situ-Dichte wurde

dabei nicht erreicht. Die Einbautrockendichte lag mit $0,91 \text{ g/cm}^3$ noch recht deutlich unterhalb der angestrebten Insitu-Trockendichte von $1,15 \text{ g/cm}^3$.

Die Steuerung und die Aufzeichnung der Versuche erfolgten digital mit dem EDV-Programm WinBod des Herstellers Wille-Geotechnik. Die Auswertung erfolgte manuell mit einer Tabellenkalkulation.

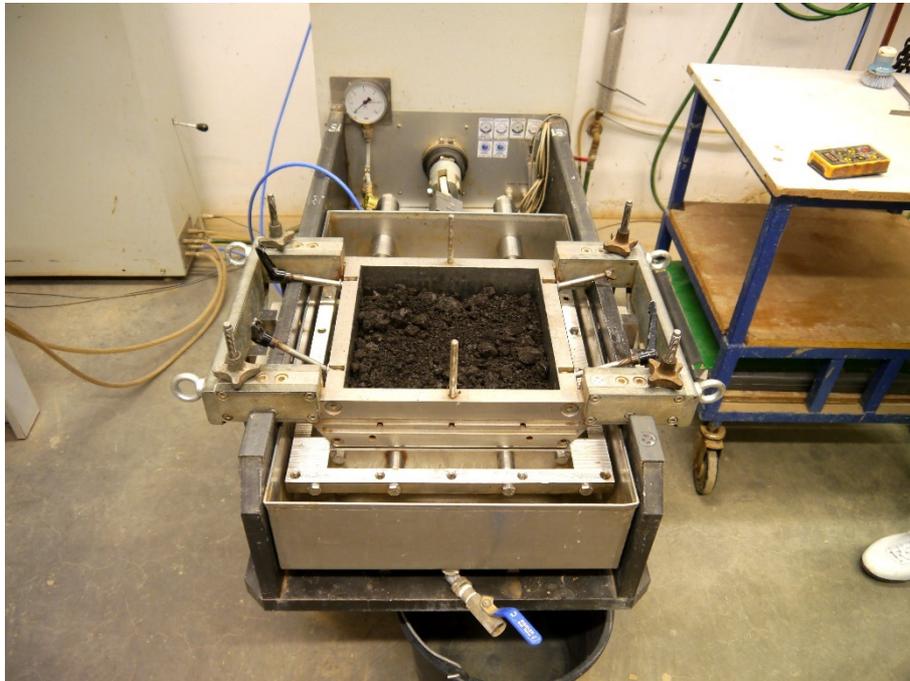


Abbildung 22: Großrahmenschergerät mit im Scherrahmen eingefüllter, noch unverdichteter Probe



Abbildung 23: Struktur der Probe nach Einbau und manueller Verdichtung. Der obere Scherrahmen wurde unmittelbar nach dem Einbau wieder entfernt (Testeinbau)

Die Konsolidierungsstufen wurden unter Berücksichtigung der gerätetechnisch möglichen Höchstspannung mit 100 kPa, 200 kPa und 400 kPa festgelegt (Tabelle 6). Die Konsolidierungsdauer betrug jeweils 5 Tage. Die Probensetzung war dabei bereits nach etwa 1-2 Tagen abgeklungen. Die Proben waren wie die Normalversuche während der Konsolidierung und des Abschervorgangs geflutet, wobei die Flutung ebenfalls nach Aufbringen der Konsolidierungsspannung vorgenommen wurde. Aufgrund der gegenüber den Normalversuchen größeren Probenhöhe von 7,5 cm und der damit ungünstigeren Entwässerungsbedingungen wurde die Vorschubgeschwindigkeit verringert. Sie wurde für alle Versuche mit 0,0005 mm/min festgelegt. Daraus ergab sich eine Dauer der Teilversuche von 19 bis 27 Tagen.

Die Scherung wurde bei den Spannungsstufen 200 kPa und 400 kPa bis zum deutlichen Überschreiten der maximalen Scherfestigkeit gefahren. Dies war bei einem Scherweg von jeweils 10,1 mm der Fall. Bei der Spannungsstufe von 100 kPa stieg die Scherspannung darüber hinaus weiterhin sehr langsam an. Der Versuch wurde unter Berücksichtigung der Laborkapazitäten bis zu einem Scherweg von 16 mm gefahren. Die Scherspannung nahm an dem Punkt weiterhin noch sehr langsam zu.

Neben der Probengröße weichen auch der quadratische Probengrundriss, die geringere Einbaudichte und die geringere Vorschubgeschwindigkeit beim Großrahmenscher Versuch von den Versuchsbedingungen an den ungestörten Proben im Rahmenscher Versuch ab. Um den Maßstabeffekt unabhängig von diesen Einflüssen beurteilen zu können, wurde ein weiterer Vergleichsversuch im Rahmenschergerät mit quadratischem Probengrundriss (Seitenlänge $a = 10$ cm) durchgeführt. Dabei wurde das Probenmaterial wie im Großrahmenscher Versuch gestört und mit einer Trockendichte von $0,91 \text{ g/cm}^3$ eingebaut. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde ebenfalls auf $0,0005 \text{ mm/min}$ vermindert (Tabelle 6).

Tabelle 6: Einbau- und Versuchsdaten, Großrahmenscher Versuch und Vergleichsversuch mit quadratischem Grundriss

Material	Probe	a [cm]	h [cm]	ρ_d [g/cm ³]	w [-]	σ'_c [kPa]	v [mm/min]
Kippe	K1	30,0	7,5	0,91	0,432	100	0,0005
			7,6	0,91	0,432	200	0,0005
			7,5	0,91	0,432	400	0,0005
		10,0	2,0	0,91	0,432	100	0,0005
			2,0	0,91	0,432	200	0,0005
			2,0	0,91	0,432	300	0,0005
			2,0	0,91	0,432	400	0,0005

4.3 Triaxialversuche

4.3.1 Triaxialgerät

Die Vergleichsversuche mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit (Rupelton R1 und Braunkohlenton BkT2) und bei Relaxation im Grenzzustand (Braunkohlenschluff, BkU2) erfolgten mit der vollautomatischen Triaxialprüfpresse LO 7025 TR des Herstellers Wille-Geotechnik. Die Axialkraft der Presse wird elektromechanisch aufgebracht. Die Messung der Axialkraft erfolgte außerhalb der Druckzelle über einen Kraftmessbügel mit einem Messbereich von 0 bis 10 kN und einer Auflösung von 0,01 kN.

Die Steuerung des Zellen- und des Porenwasserdrucks erfolgte pneumatisch mittels zweier vollautomatischer Druckspeicher mit einem maximalen regelbaren Druck von 1400 kPa (Zellendruck) beziehungsweise 1000 kPa (Porenwasserdruck) und einer Auflösung von 1 kPa. Als Zellenflüssigkeit wurde Wasser verwendet. Die Messung von Zell- und Porenwasserdruck erfolgte über zwei elektronische Präzisionsdrucksensoren mit Frontmembran und integriertem Messverstärker (Messsystem ohne Volumenkompensation nach DIN 18137-2, 2011).

Zur Volumenmessung des ein- und auslaufenden Porenwassers kam eine Messeinrichtung nach dem Differenzdruck-Prinzip mit einer 100 ml-Messbürette zum Einsatz.

Die Steuerung und die Aufzeichnung der Versuche erfolgten digital mit dem EDV-Programm GeoLAB Version 3.2.30 der Fa. GIESA mbH, Wilsdruff. Die Auswertung erfolgte manuell mit einer Tabellenkalkulation.

4.3.2 Probeneinbau

Die Proben wurden direkt nach dem Auspressen aus den Ausstechzylindern beziehungsweise nach Entnahme aus den Linern und Einkürzen in das Triaxialgerät eingebaut. Bei der mit dem Ausstechzylinder gewonnenen Probe R1 (Rupelton) lag das Verhältnis von Probenhöhe zu Probendurchmesser bei 1,25. Die Probe war damit nach DIN 18137-2 (2011) als gedrunzen zu kennzeichnen. Die Verminderung der Endflächenreibung erfolgte durch das Einlegen einer Teflonfolie zwischen den Probekörperendflächen und den Filterplatten. Zur Zentrierung der Probekörper wurde in die Teflonfolie eine mittige Aussparung eingebracht. Die Linerproben BkT2 (Braunkohlenton) und BkU2 (Braunkohlenschluff) wurden so eingekürzt, dass schlanke Probekörper vorlagen. Das Verhältnis von Probenhöhe zu Probendurchmesser lag bei der Probe BkT2 bei 2,08. Bei der Probe BkU2 konnte das angestrebte Verhältnis von 2 durch örtliche Störungen im Linerbohrkern nicht ganz erreicht werden. Das Verhältnis lag hier bei 1,86. Die Probe wurde dennoch wie BkT2 in Anlehnung an DIN 18137-2 (2011) als schlanker Probekörper behandelt. Bei beiden Proben wurden die Filterplatten direkt auf die Probenendflächen aufgebracht (Abbildung 24).

Zur Verbesserung der Probendränage wurden seitlich an den Probekörpern vier jeweils 1 cm breite Filterpapierstreifen mit Anschluss an die Filterplatte eingelegt. Die Trennung des Probekörpers gegenüber der Zellflüssigkeit erfolgte mit Hilfe einer 0,35 mm starken Gummihülle.

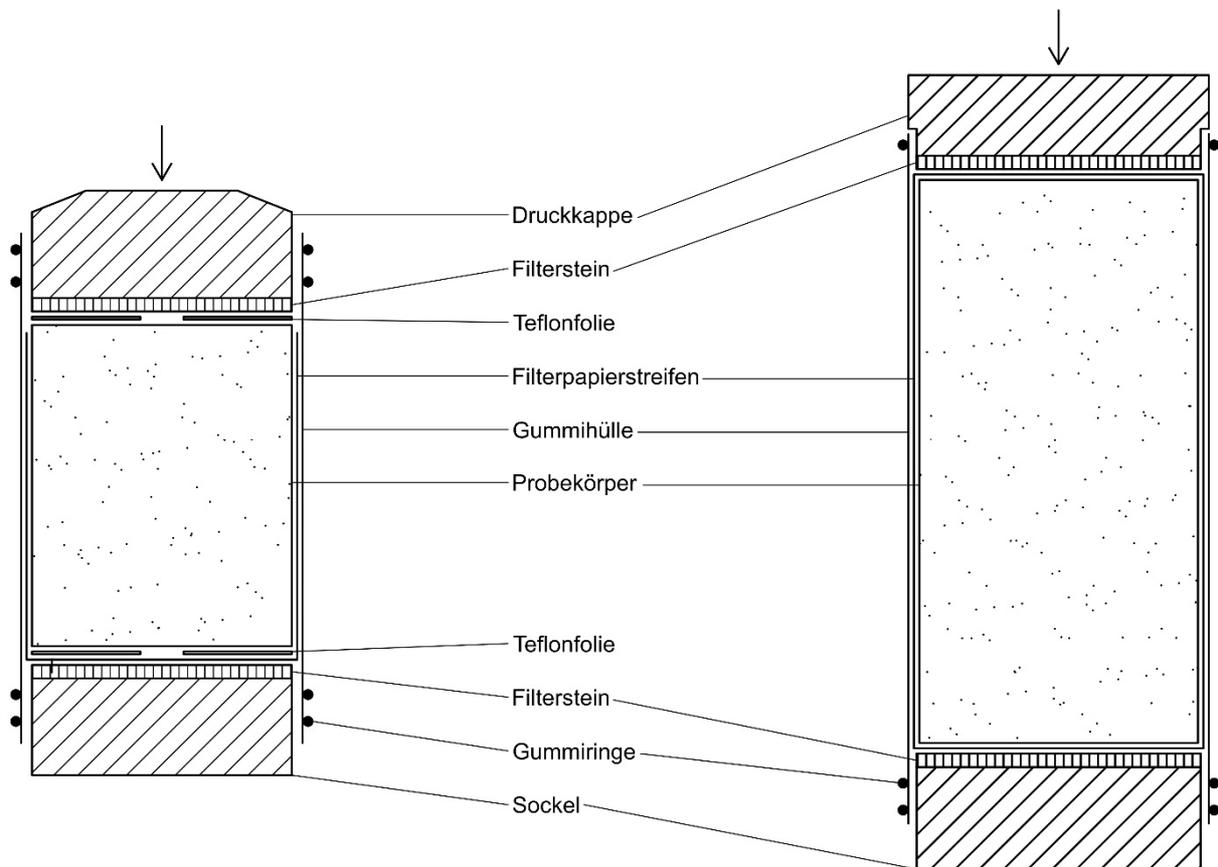


Abbildung 24: Schema Probeneinbau im Triaxialgerät, gedrungene Probekörper (links, Probe R1) und schlanke Probekörper (rechts, Proben BkT2 und BkU2)

4.3.3 Versuche mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit

Die Vergleichsversuche mit Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit am Rupelton und am Braunkohlenton erfolgten als konsolidierte undrainierte Versuche (CU-Versuch). Die Sättigung der Proben erfolgte vor der Probenkonsolidierung bei offener Drainageleitung und einer effektiven Spannung von 20 kPa. Der erforderliche Sättigungsdruck u_0 zum Erreichen eines B-Werts von 0,95 lag jeweils bei 200 kPa.

Die Konsolidierung der Probekörper erfolgte isotrop. Die Konsolidierungsspannung lag bei der Probe R1 (Rupelton) bei 600 kPa. Der Versuch an der Probe BkT2 (Braunkohlenton) wurde als Mehrstufenversuch mit 3 Stufen durchgeführt, wobei die ersten beiden Stufen nur etwa bis zum Erreichen des Grenzzustands gefahren wurden. Die Konsolidierungsspannung betrug 200 kPa bei der ersten Stufe, 400 kPa bei der zweiten Stufe und 600 kPa bei der letzten Stufe. Die Auswertung in Kapitel 5.3 wird an der letzten Stufe mit einer Konsolidierungsspannung von 600 kPa vorgenommen.

Während des Abschervorgangs wurde die Stauchungsgeschwindigkeit sprunghaft um den Faktor 10 erhöht beziehungsweise erniedrigt. In Anlehnung an die Rahmenscherversuche wurden die Referenzgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_0$ mit 0,002 mm/min und die Abschnitte gleicher Stauchungsgeschwindigkeit mit einer Stauchung von 0,5 mm gewählt. Die Versuche sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Übersicht zu den Vergleichsversuchen im Triaxialgerät mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit

Material	Probe	d [cm]	h [cm]	ρ_d [g/cm ³]	w [-]	σ'_c [kPa]	u_0 [kPa]	$\dot{\epsilon}_0$ [mm/min]
Rupelton	R1	9,6	12,0	1,55	0,264	600	200	0,002
Braunkohlent- ton	BkT2	10,2	21,2	1,22	0,344	200/400/ 600	200	0,002

4.3.4 Relaxationsversuch

Der Vergleichsversuch mit Relaxation im Grenzzustand am Braunkohlenschluff wurde als konsolidierter drainierter Versuch (CD-Versuch) mit Porenwasserdruckkontrolle vorgenommen. Die Konsolidierung erfolgte ebenfalls isotrop. Es wurde ein Einzelversuch mit einer Konsolidierungsspannung von 200 kPa durchgeführt. Die Sättigung der Probe erfolgte nach der Probenkonsolidierung. Der erforderliche Sättigungsdruck u_0 zum Erreichen eines B-Werts von 0,95 betrug 300 kPa.

Die Kontrolle des Porenwasserdrucks erfolgte an der Probenoberseite. Die Steuerung des Gegendrucks beziehungsweise die Drainage erfolgten an der Probenunterseite. Der Abschervorgang wurde mit einer Stauchungsgeschwindigkeit von 0,002 mm/min gestartet. Der Porenwasserdruck stieg dabei bis zu einer Stauchung von 0,02 % von 300 kPa auf 306 kPa an. Daher wurde die Stauchungsgeschwindigkeit auf 0,0005 mm/min verringert, worauf der Porenwasserdruck wieder langsam auf 300 kPa absank.

In Anlehnung an die Relaxationsversuche im Rahmenschergerät wurde der Abschervorgang in dem Moment angehalten, in dem erkennbar war, dass der Scherwiderstand nicht weiter ansteigt. Wie bei den Rahmenscherversuchen nahm der Scherwiderstand zunächst schnell ab und näherte sich anschließend langsam einem etwa konstanten Wert an. Nach einer Relaxationszeit von 53 Tagen wurde der Abschervorgang fortgesetzt. Der Versuch wurde anschließend bis zum deutlichen Überschreiten des höchsten Scherwiderstands gefahren. Die Kenndaten des Relaxationsversuchs sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Vergleichsversuch im Triaxialgerät mit Relaxation im Grenzzustand

Material	Probe	d [cm]	h [cm]	ρ_d [g/cm ³]	w [-]	σ'_c [kPa]	u_0 [kPa]	$\dot{\epsilon}$ [mm/min]
Braunkohlenschluff	BkU2	10,4	19,3	1,46	0,267	200	300	0,0005

5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Allgemeines Scherverhalten

Im Folgenden werden zunächst das allgemeine Scherverhalten und die konventionell abgeleiteten Scherparameter anhand der Normalversuche und der bis zum Beginn der Relaxationsphase ausgewerteten Relaxationsversuche betrachtet. In den Diagrammen in Abbildung 25 bis Abbildung 34, Teil a sind die Scherspannungs-Scherwegkurven der Versuche dargestellt. In Teil b erfolgt die Darstellung der Grenzbedingungen. Die Grenzbedingungen wurden bei den Normalversuchen anhand der maximalen Scherspannungen (Peakscherfestigkeit) konstruiert. Bei den Relaxationsversuchen wurde die maximale Scherspannung bis zum Stoppen des Vorschubs verwendet. Da der Vorschub erst gestoppt wurde, wenn erkennbar war, dass die Scherspannung nicht mehr wesentlich ansteigt, entsprechen die ermittelten Grenzbedingungen etwa der Auswertung eines Normalversuchs.

Beim *Rupelton* wird die maximale Scherfestigkeit nach Scherwegen von etwa 2 bis 4 mm erreicht. Ein Abfallen auf eine Restscherfestigkeit ist nur schwach ausgeprägt. Die sich bildenden Scherflächen waren homogen und wiesen einen leichten Glanz auf (Abbildung 26). An die Peakscherfestigkeiten lässt sich sehr gut eine lineare Grenzbedingung anpassen. Der effektive Reibungswinkel ergibt sich dann mit $22,0^\circ$ und die effektive Kohäsion mit $48,3 \text{ kPa}$.

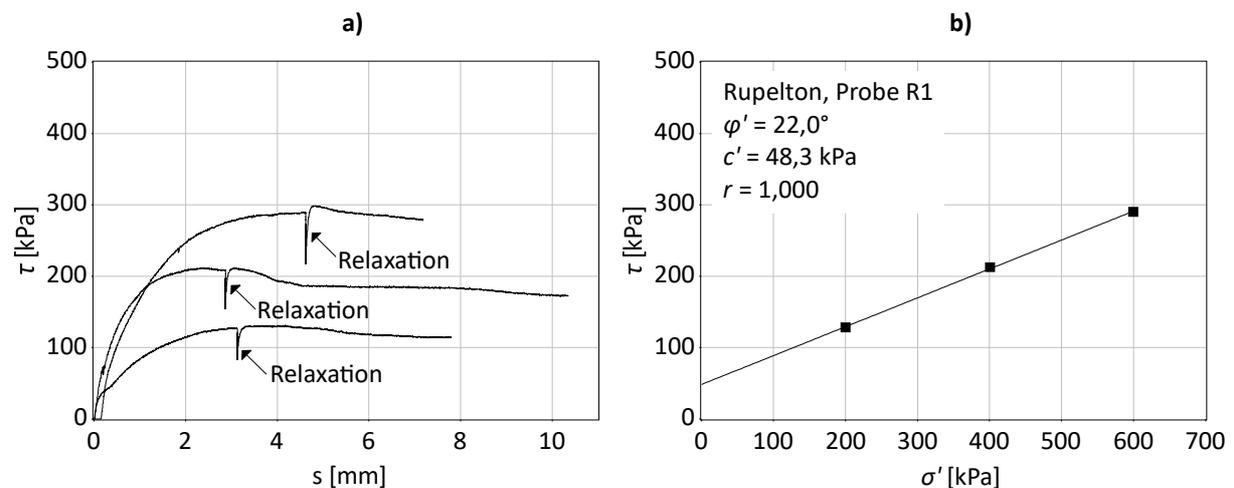


Abbildung 25: Rupelton (Probe R1), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter



Abbildung 26: *homogene, schwach glänzende Scherfläche beim Rupelton*

Der Braunkohlenton erreicht die maximale Scherfestigkeit bereits nach Scherwegen von etwa 1 mm bis 2 mm. Er zeigt damit das sprödeste Verhalten der untersuchten Proben. Im weiteren Scherverlauf ist eine deutliche Entfestigung zu erkennen. Die Entfestigung war auch makroskopisch an den Proben nach dem Ausbau aus dem Schergerät erkennbar. Der obere Probenteil konnte unter Freilegung der Scherfuge leicht vom unteren Teil abgelöst werden. Die Scherflächen wiesen eine deutliche Striung und Glättung (Spiegelharnisch) auf, was auf den deutlich größeren Tonanteil des Braunkohlentons hinweist (Abbildung 29). Die Scherflächen waren außerdem wellig und unregelmäßig ausgebildet.

Eine lineare Grenzbedingung kann ebenfalls gut angepasst werden. Beim Braunkohlenton zeigt sich im Vergleich zu den übrigen Proben jedoch eine etwas größere Streuung der Einzelwerte. Dies ist wahrscheinlich in erster Linie auf das sprödere Verhalten zurückzuführen, durch das sich kleinräumige Festigkeitsunterschiede innerhalb der Proben stärker auswirken. Dieses Verhalten spiegelt sich teilweise auch in den ungleichmäßigen Verläufen der Scherspannungslinien wider.

Die Scherparameter der beiden Proben des Braunkohlentons unterscheiden sich entsprechend der Materialausbildung. An der etwas plastischeren Probe BkT1 ergibt sich ein effektiver Reibungswinkel von $15,2^\circ$ und eine effektive Kohäsion von 63,8 kPa. An der weniger plastischen Probe BkT3 wurde ein effektiver Reibungswinkel von $18,7^\circ$ und eine effektive Kohäsion von 39,2 kPa ermittelt.

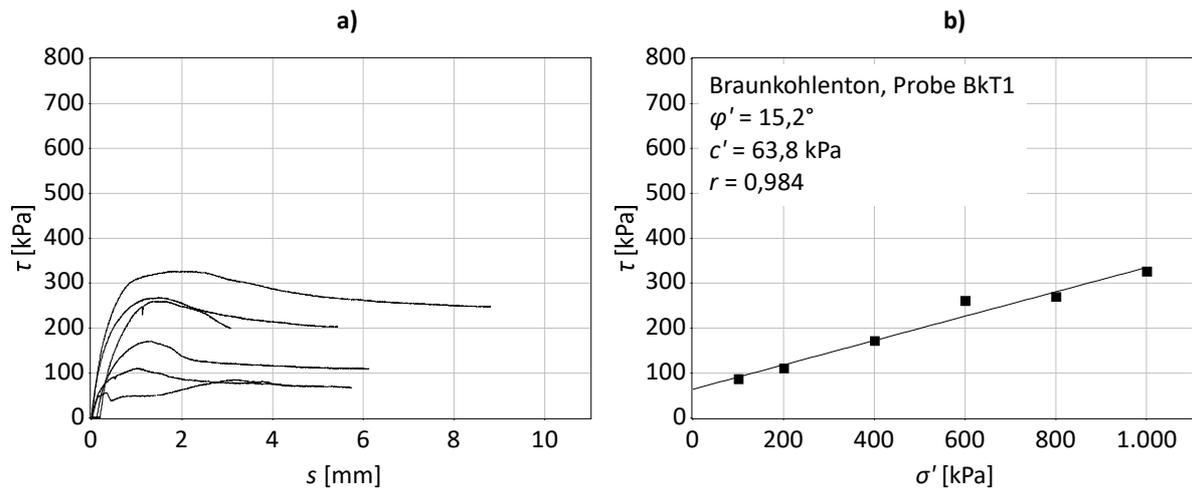


Abbildung 27: Braunkohlenton (Probe BkT1), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter

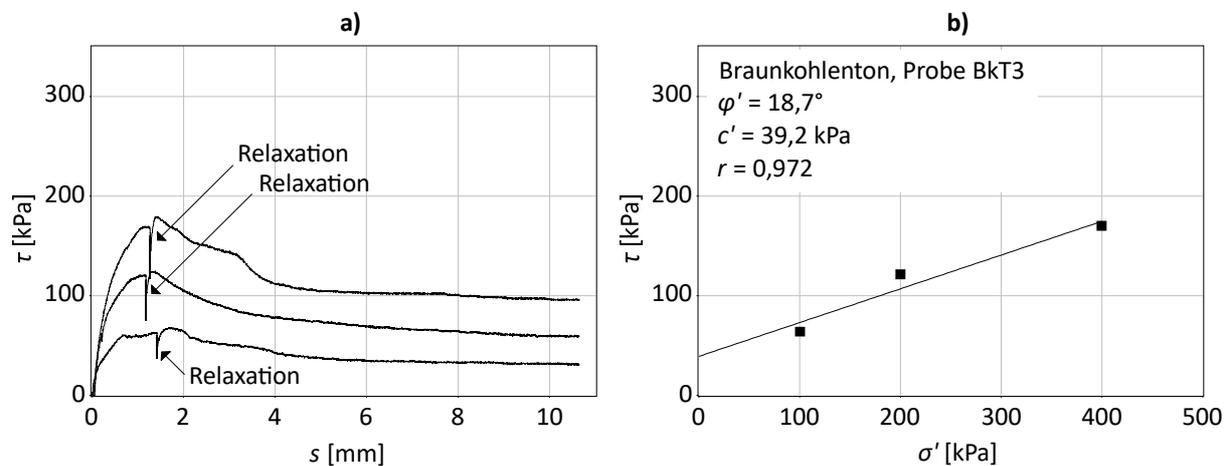


Abbildung 28: Braunkohlenton (Probe BkT3), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter



Abbildung 29: Durch Abheben des oberen, abgeschnittenen Probenteils freigelegte Scherfläche (rechter Bildbereich) beim Braunkohlenton (Probe BkT1), gewellt und mit Striemung und Glättung

Die beiden Proben des *Braunkohlenschluffs* unterscheiden sich entsprechend der abweichenden Materialausbildung deutlich in ihrem Scherverhalten. Die weniger plastische Probe BkU1 erreicht die maximale Scherfestigkeit erst nach einem Scherweg von etwa 4 mm. Eine anschließende Entfestigung ist nicht erkennbar. Die Probe zeigt damit das duktilste Scherverhalten aller untersuchten Proben. Es ergibt sich außerdem mit $25,8^\circ$ der größte ermittelte Reibungswinkel und mit 7,1 kPa die kleinste Kohäsion. Die stärker plastische Probe BkU2 erreicht die maximale Scherfestigkeit bereits nach einem Scherweg von 1-2 mm und verhält sich damit deutlich spröder. Es findet im weiteren Scherverlauf eine Entfestigung statt. Der effektive Reibungswinkel beträgt $22,1^\circ$, und die effektive Kohäsion beträgt 37,9 kPa. Eine lineare Grenzbedingung lässt sich für beide Proben sehr gut anpassen.

Die Scherflächen sind ähnlich wie beim Rupelton homogen und nur leicht glänzend. Bei der stärker tonigen Probe BkU2 war eine leichte Striemung zu erkennen (Abbildung 32).

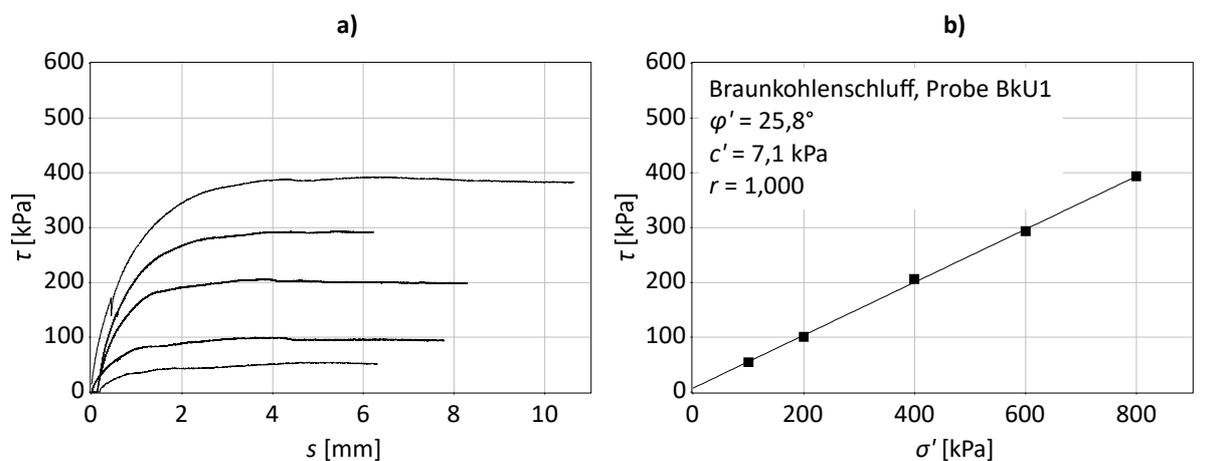


Abbildung 30: Braunkohlenschluff (Probe BkU1), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter

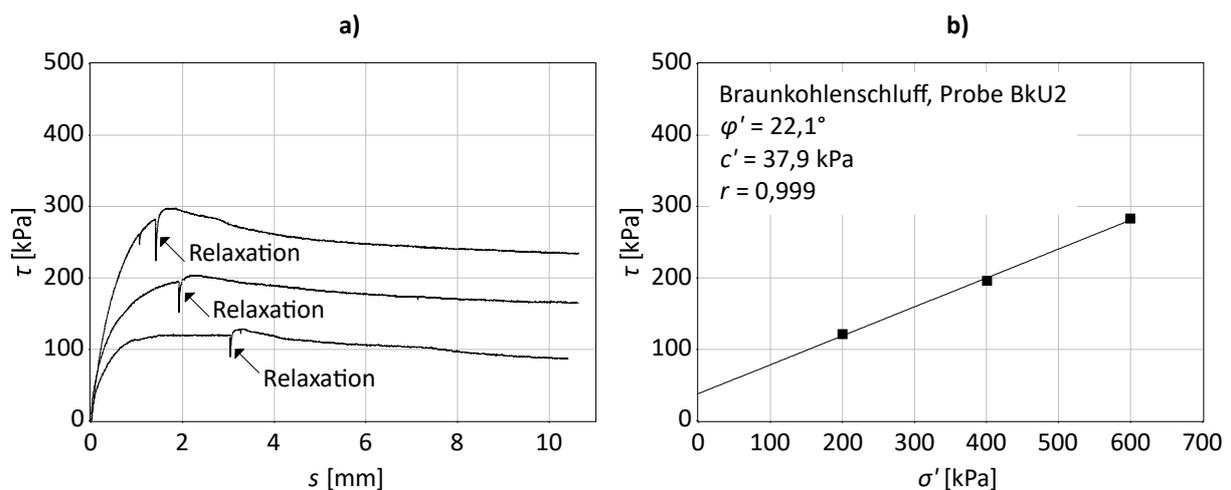


Abbildung 31: Braunkohlenschluff (Probe BkU2), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter



Abbildung 32: homogene, schwach glänzende und schwach gestriemte Scherfläche beim Braunkohlenschluff (oberer Bildbereich, Probe BkU2)

Die *Kippe* erreicht im Normal- und im Relaxationsversuch jeweils nach etwa 2-3 mm die maximale Scherfestigkeit. Im Gegensatz zum Braunkohlenton verhielt sich die Kippenprobe also weniger spröde. Sehr ähnlich zum Braunkohlenton ist dagegen die Entfestigung des Materials nach Erreichen der Peakscherfestigkeit. Dementsprechend war auch bei der Kippenprobe eine deutliche Striemung und Glättung der Scherflächen zu beobachten (Abbildung 35). Der Braunkohlenton und die Kippenprobe weisen die höchsten Tongehalte und die höchsten Plastizitätszahlen der untersuchten Böden auf. Die Einregelung der in größerem Maße enthaltenen Tonminerale trägt dementsprechend bei beiden Materialien zum deutlichen Abfallen der Scherfestigkeit auf die Restscherfestigkeit bei.

Eine lineare Grenzbedingung lässt sich auch bei der Kippe sehr gut anpassen. Die effektiven Scherparameter der beiden Versuche aus der gleichen Probenreihe unterscheiden sich mit einem Reibungswinkel von $18,9^\circ$ und $17,7^\circ$ und einer Kohäsion von 25,0 kPa und 49,5 kPa recht deutlich. Die Abweichungen spiegeln die kleinräumig wechselhafte Kippenausbildung wider.

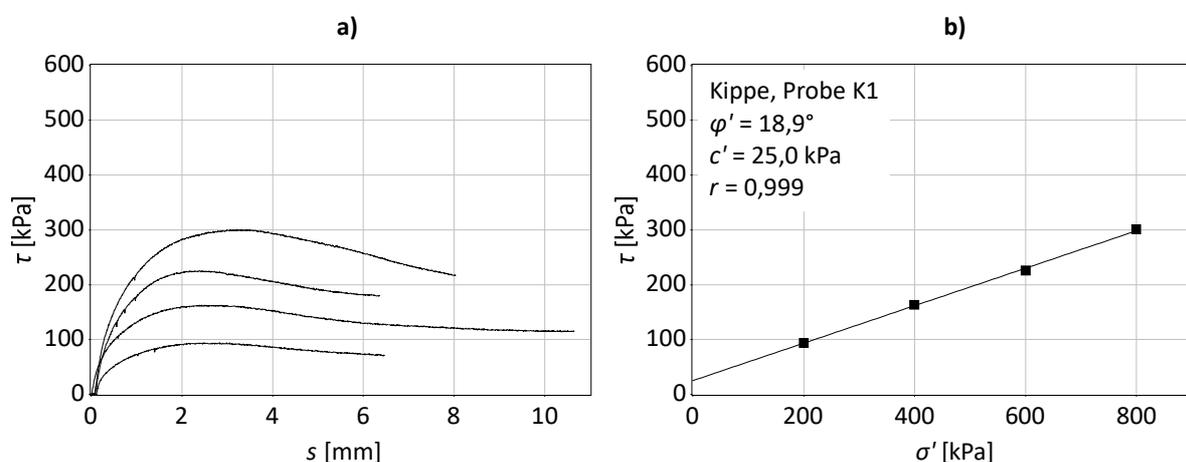


Abbildung 33: Kippe (Probe K1), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter

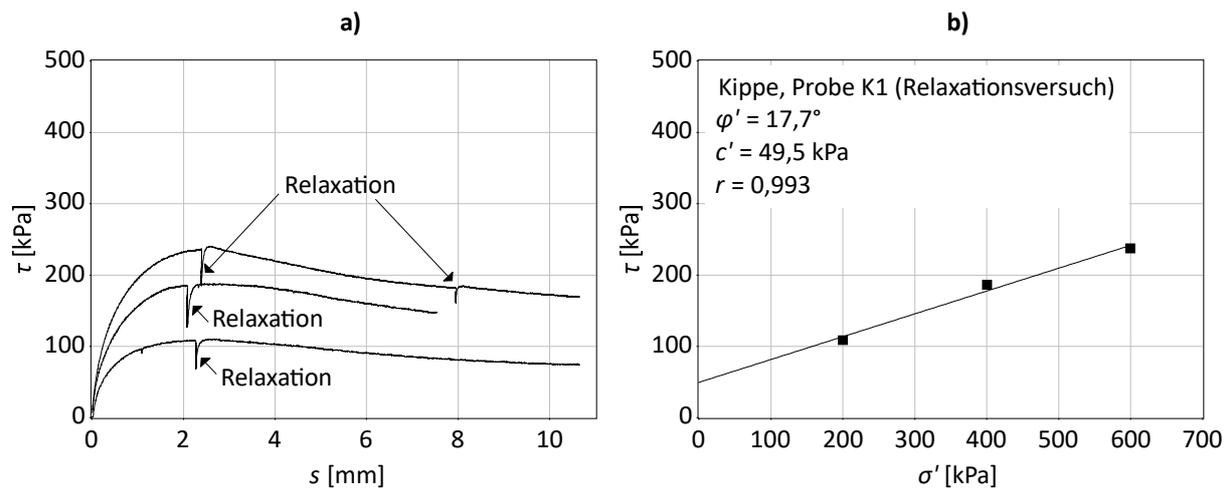


Abbildung 34: Kippe (Probe K1, Relaxationsversuch), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter



Abbildung 35: Striemung und Glättung der Scherfläche bei der Kippenprobe K1 (oberer Bildbereich)

Die Höhenänderungen der Proben während des Schervorgangs wurden in den Scherdiagrammen aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Sie können jedoch den Diagrammen der Relaxationsversuche in Abschnitt 5.4 entnommen werden. Dabei zeigt sich, dass im Scherverlauf keine Hebung stattfindet. In der Regel wurde auch über die Peakscherfestigkeit hinaus durchgehend eine Setzung der Proben gemessen. Zwar werden die Messergebnisse beim Rahmenscherversuch bei größeren Scherwegen durch die Überschiebung des bewegten Rahmenteils zwangsläufig verfälscht. Eine aufgetretene Dilatanz spiegelt sich dadurch möglicherweise nicht in den Messwerten wider. Aus der Porenwasserdruckentwicklung in den undrainierten Triaxialversuchen (Abschnitt 5.3) und der Volumenänderung im drainierten Triaxialversuch (Abschnitt 5.4) lässt sich aber auch nur eine schwache Tendenz zu dilatantem Verhalten nach Erreichen der Peakscherfestigkeit ableiten. Die Überwindung von Dilatanz trägt also wahrscheinlich nur wenig zu den gemessenen Peakscherfestigkeiten bei.

Tabelle 9: Übersicht zu den ermittelten effektiven Scherparametern

Material	Probe	Bodengruppe	Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kPa]
Rupelton	R1	TM	22,0	48,3
Braunkohlenton	BkT1	OT	15,2	63,8
	BkT3	OT	19,3	36,9
Braunkohlenschluff	BkU1	OU	25,8	7,1
	BkU2	OU	22,1	37,9
Kippe	K1	OT	18,9	25,0
	K1 (Relaxversuch)	OT	17,7	49,5

Die ermittelten effektiven Scherparameter sind in Tabelle 9 zusammengefasst. In Tabelle 10 sind die Scherparameter der gewachsenen Böden außerdem den Ergebnissen der tagebauinternen Kennwertanalyse (VEB BKW Geiseltal, 1980) sowie landestypischen Kennwerten von STROBEL (2008) gegenübergestellt. Die Werte aus der Kennwertanalyse des Tagebaus wurden nach stichprobenhafter Sichtung von Prüfberichten im Kreisringschergerät ermittelt. Der Probeneinbau wurde als ungestört angegeben. Der Normalspannungsbereich entsprach etwa den eigenen Versuchen. Die Schergeschwindigkeiten waren mit 0,03 mm/min jedoch höher und im Vergleich mit den Richtwerten der DIN 18137-3 (2002) zu hoch. Die Kennwerte von STROBEL wurden im Rahmen von Baugrunduntersuchungen und geotechnischen Arbeiten zur Erkundung und Gewinnung von Braunkohle im sachsen-anhaltinischen Teil des westelbischen Lagerstättenbezirks ermittelt. Hier liegen keine Informationen zu den Versuchsbedingungen vor. Möglicherweise sind auch Ergebnisse aus der tagebauinternen Kennwertanalyse in die Werte von STROBEL eingeflossen.

Im Mittel sind die Reibungswinkel der eigenen Versuche mit den Werten aus der Kennwertanalyse des Tagebaus gut vergleichbar. Tatsächlich streuen die Werte aus den Einzelversuchen für den Braunkohlenton und den Braunkohlenschluff jedoch relativ stark um die Mittelwerte aus der Kennwertanalyse. Die Einzelwerte liegen jeweils außerhalb der Standardabweichung. Dies ist wahrscheinlich auf die recht ausgeprägte Wechsellagerung der beiden Schichten zurückzuführen. Die Abweichungen von den Mittelwerten der Scherparameter stimmen mit Ausnahme der Probe BkT1 (Braunkohlenton) jeweils mit den Abweichungen von den Mittelwerten der Zustandsgrenzen aus der Kennwertanalyse (siehe Punkt 3.3) überein. Das heißt, die im Vergleich zum Mittel geringer plastischen Proben weisen einen größeren Reibungswinkel und die stärker plastischen Proben einen kleineren Reibungswinkel auf. Die Probe BkT1 weist jedoch trotz der geringeren Plastizität im Vergleich zum Mittel der Kennwertanalyse einen kleineren Reibungswinkel auf.

Tabelle 10: Vergleich der ermittelten Scherparameter mit Werten aus der Kennwertanalyse des Tagebaus Amsdorf und aus der geotechnischen Kennzeichnung landestypischen Baugrundes von STROBEL (2008)

Material	Probe	ermittelte Scherparameter	Kennwertanalyse Tagebau Amsdorf	Scherparameter nach STROBEL (2008)
Rupelton	R1	$\varphi' = 22,0^\circ$ $c' = 48,3 \text{ kPa}$	$\varphi' = 22,8 \pm 0,4^\circ$ $c' = 31,7 \pm 3,2 \text{ kPa}$ (n = 41)	$\varphi' = 22-25^\circ$ $c' = 20-30 \text{ kPa}$ (Rupelton, Oligozän, Gruppen TM, UM, TA)
Braunkohlenton	BkT1	$\varphi' = 15,2^\circ$ $c' = 63,8 \text{ kPa}$	$\varphi' = 16,2 \pm 0,3^\circ$ $c' = 16,4 \pm 2,3 \text{ kPa}$ (oberer, n = 42)	$\varphi' = 15-18^\circ$ $c' = 20-30 \text{ kPa}$ (limnische Tone und Silte, Paläozän/Eozän, Gruppen TA, TM, OT)
	BkT2	$\varphi' = 19,3^\circ$ $c' = 36,9 \text{ kPa}$	$\varphi' = 17,6 \pm 0,6^\circ$ $c' = 23,1 \pm 2,4 \text{ kPa}$ (unterer, n = 46)	
Braunkohlenschluff	BkU1	$\varphi' = 25,8^\circ$ $c' = 7,1 \text{ kPa}$	$\varphi' = 23,8 \pm 0,6^\circ$ $c' = 23,6 \pm 2,8 \text{ kPa}$ (oberer, n = 22)	
	BkU2	$\varphi' = 22,1^\circ$ $c' = 37,9 \text{ kPa}$	$\varphi' = 24,0^\circ$ $c' = 25,0 \text{ kPa}$ (unterer, n = 9)	

Mit den eigenen Versuchen wurde überwiegend eine größere effektive Kohäsion als in der Kennwertanalyse ermittelt. Möglicherweise sind die Ergebnisse aus Rahmen- und Kreisringerscherversuchen durch die unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen nicht unmittelbar vergleichbar. In einer Vergleichsstudie zu den Scherparametern von Ton konnte gezeigt werden, dass bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen besonders die Kohäsion eine breite Streuung aufweist (SCHWITEILO & HERLE, 2017).

In die Werte nach STROBEL (2008) lassen sich die ermittelten Reibungswinkel ebenfalls gut einordnen. Die Reibungswinkel des Braunkohlenschluffs liegen zwar oberhalb der angegebenen Werte für die limnischen Tone und Silte. Nach den angegebenen Bodengruppen TA, TM, OT ist jedoch davon auszugehen, dass die Werte nach bodenmechanischer Definition nur für Tone gelten. Für geringer plastische Schluffe (Bodengruppe OU für den Braunkohlenschluff) sind die größeren Reibungswinkel dann passend. Bei der effektiven Kohäsion zeigt sich die gleiche Abweichung wie bei den Werten aus der Kennwertanalyse des Tagebaus.

5.2 Maßstabsabhängiges Scherverhalten der Kippe

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse des Großrahmenscherversuchs (Seitenlänge 30 cm) an der Kippenprobe K1 dargestellt. Die Ergebnisse des Vergleichsversuchs im Rahmenschergerät (Seitenlänge 10 cm) sind in Abbildung 37 dargestellt. Die beiden Versuche an den ungestörten Proben mit kreisförmiger Grundfläche und etwas größerer Trockendichte wurden bereits in Abbildung 33 und Abbildung 34 gezeigt.

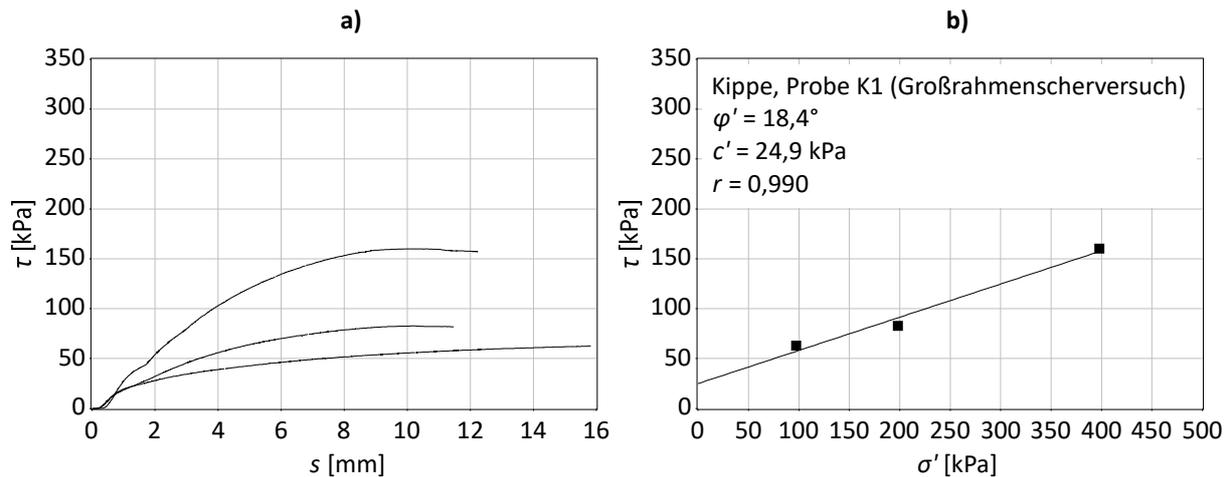


Abbildung 36: Großrahmenscherversuch mit quadratischem Probengrundriss, Seitenlänge 30 cm (Kippe, Probe K1), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter

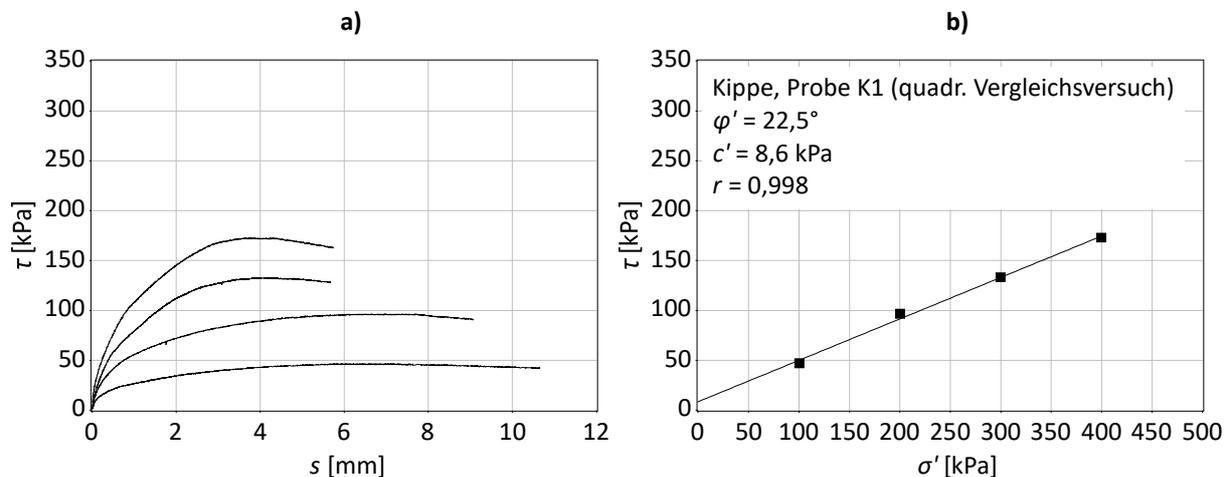


Abbildung 37: Vergleichsversuch mit quadratischem Probengrundriss, Seitenlänge 10 cm (Kippe, Probe K1), a) Scherspannung τ gegen Scherweg s , b) Grenzbedingung und Scherparameter

Im Großrahmenscherversuch wird der maximale Scherwiderstand im Vergleich zu den Rahmenscherversuchen erst nach deutlich längeren Scherwegen ab etwa 10 mm erreicht (Vergleichsversuch: 3-6 mm, ungestörte Proben: 2-3 mm). Beim Teilversuch mit der Normalspannung von 100 kPa (unterste Kurve in Teil a der Abbildung) wird auch nach einem Scherweg von 16 mm (Abbruch des Versuchs) noch kein Maximum erreicht. Im Vergleichsversuch mit quadratischem Probengrundriss und kleinerer Seitenlänge zeigt sich ebenfalls ein längerer Scherweg in den niedrigeren Spannungsstufen. Bei den ungestörten, kreisförmigen Proben sind die Scherwege bis zum Erreichen des höchsten Scherwiderstands dagegen bei allen Normalspannungen etwa gleich groß. Die Ursache liegt wahrscheinlich in erster Linie in den geringeren Einbaudichten bei den gestörten Proben im Großrahmenscherversuch und im Vergleichsversuch. Bei kleinerer Normalspannung verbleibt dadurch nach der Konsolidierung ein größerer Makroporenanteil in der Probe. Dieser führt beim Abscheren zunächst zu einer kontraktanten Umlagerung der Pseudokörner, wodurch der Scherweg bis zum Erreichen der Peakscherfestigkeit länger wird. Bei größerer Normalspannung wird der Makroporenraum bereits bei der Konsolidierung vermutlich unter plastischer Verformung der Pseudokörner in stärkerem Maße verkleinert. Die Pseudokörner

werden dann bereits nach kleineren Scherwegen direkt abgeschert. Dementsprechend zeigen die Versuche an den ungestörten Proben mit einer größeren Einbaudichte insgesamt kleinere Scherwege bis zum Erreichen des größten Scherwiderstands.

Für die Auswertung der effektiven Scherparameter im Großrahmenscherversuch wurde für die Spannungsstufe 100 kPa der Höchstwert des Scherwiderstands am Ende des Teilversuchs verwendet. Der effektive Reibungswinkel ergibt sich dann mit $18,4^\circ$ und die effektive Kohäsion mit 24,9 kPa. Für praktische Fragestellungen wäre es sicherer, alle Teilversuche bei einem vergleichbaren Scherweg auszuwerten, so dass die in Rechnung gestellte Scherfestigkeit auch in allen Bereichen einer betrachteten Scherfuge mobilisiert werden kann. Bei einer Auswertung der Spannungsstufe 100 kPa nach einem Scherweg von 10 mm würden sich ein etwas höherer Reibungswinkel ($19,5^\circ$) und eine etwas niedrigere Kohäsion (17,8 kPa) ergeben.

Die Auswertung der Scherparameter aus dem Vergleichsversuch mit einer Seitenlänge von 10 cm ergibt mit $22,5^\circ$ einen größeren Reibungswinkel und mit 8,6 kPa eine kleinere Kohäsion als beim Großrahmenscherversuch. Betrachtet man jedoch die Einzelwerte aller an der Kippe ausgeführten Versuche, scheinen die abweichenden Scherparameter vorrangig auf die starke Streuung der Einzelversuche zurückzugehen (Abbildung 38). Sofern eine maßstabsabhängige Tendenz hin zu kleineren oder größeren Scherfestigkeiten vorhanden ist, so geht diese bei den durchgeführten Versuchen in der generellen Streuung der Versuchsergebnisse unter. Die Streuung der Ergebnisse ergibt sich aus der entstehungsbedingten Ungleichförmigkeit der Kippenproben und wahrscheinlich auch aus einer ungleichmäßigen Dichteverteilung beim gestörten Einbau.

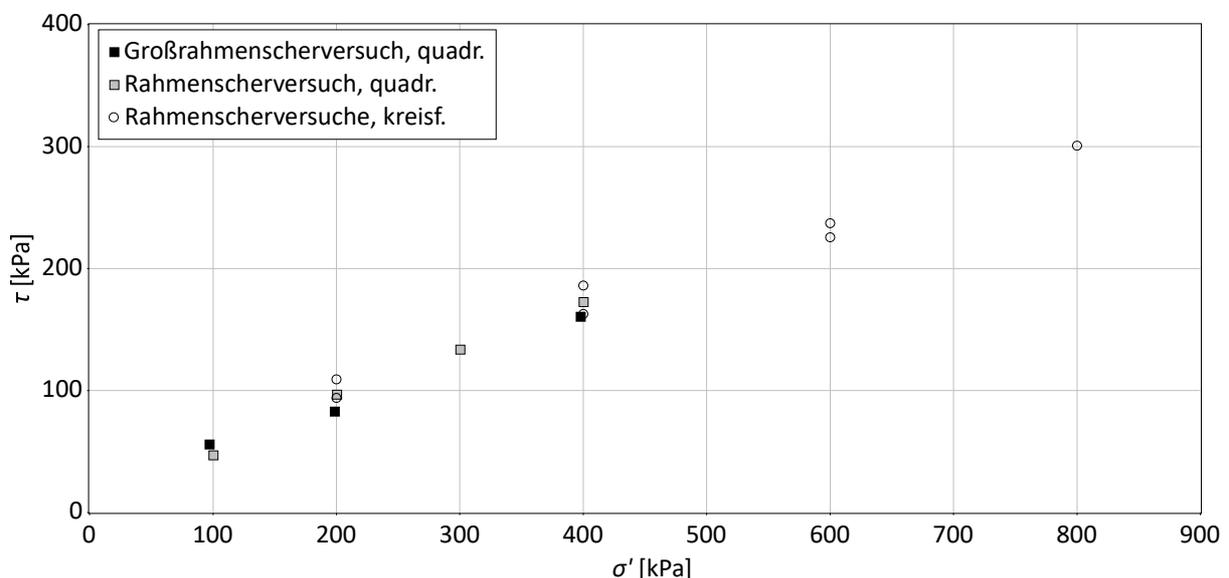


Abbildung 38: Darstellung aller Einzelwerte aus dem Großrahmenscherversuch ($a = 30$ cm), dem Vergleichsversuch ($a = 10$ cm) und den Versuchen an ungestörten Proben mit kreisförmiger Probenfläche im Scherspannungs-Normalspannungsdiagramm

Im Rahmen der betrachteten Probengrößen lässt sich demnach kein Maßstabseffekt ableiten. Die Kippe ist zwar durch ein grobkörniges Pseudokorngefüge gekennzeichnet. Die Tonklumpen weisen aber nur eine verhältnismäßig geringe innere Festigkeit auf. Bei den betrachteten Normalspannungen scheren die Tonklumpen in sich ab, so dass das granulare

Verhalten der Pseudokörner nur einen geringen Einfluss auf das Scherverhalten hat. Die Schlussfolgerung muss dahingehend eingeschränkt werden, dass auch beim Großrahmenscherversuch die Probengröße im Verhältnis zur Größe der Tonklumpen noch sehr klein war. In situ waren Pseudokörner mit einer Größe von bis zu 20 cm zu beobachten. Nach der Probenahme und dem gestörten Einbau der Proben in das Großrahmenschergerät waren noch Korngrößen von bis zu etwa 5 cm intakt. Bei einem wesentlich größeren Gebirgsausschnitt ist ein zunehmender Maßstabeffekt dennoch denkbar, da sich Scherfugen dann wahrscheinlich bevorzugt entlang von Pseudokorngrenzen ausbilden. Im Laborversuch wird dieser Maßstabeffekt schwer zu erfassen sein. Im Schlussbericht zum Forschungsvorhaben *Bauen auf Mischbodenkippen des Braunkohlenbergbaus im mitteldeutschen Revier* (LMBV, 1999) werden zur realistischen Ermittlung der Scherfestigkeit bindiger Kippen mit Pseudokornstruktur Großtriaxialversuche mit Probendurchmessern von 40 bis 50 cm und Probenhöhen von 50 cm vorgeschlagen. Veröffentlichte Versuchsergebnisse liegen hierzu jedoch nicht vor. Eine weitere Möglichkeit könnten Vergleichsversuche sein, bei denen die Pseudokörner auf eine Größe von z.B. höchstens 0,5 cm zerkleinert werden. Auf diese Weise könnte auch bei kleiner Probengröße der Einfluss der Trennflächen zwischen den Körnern untersucht werden. Da das Augenmerk der vorliegenden Arbeit auf der Zeitabhängigkeit der Scherfestigkeit liegt, wurde diese Idee jedoch nicht weiterverfolgt.

Tabelle 11: Vergleich der effektiven Scherparameter im Großrahmenscherversuch und im Rahmenscherversuch

Material	Probe	Versuch	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	Reibungswinkel ϕ' [°]	Kohäsion c' [kPa]
Kippe	K1	Großrahmenscherversuch, quadratisch, a = 30 cm	0,91	18,4	24,9
		Rahmenscherversuch (Vergleichsversuch), quadratisch, a = 10 cm	0,91	22,5	8,6
		Rahmenscherversuch (Normalversuch), kreisförmig, d = 7,1 cm	1,13-1,17	18,9	25,0
		Rahmenscherversuch (Relaxationsversuch), kreisförmig, d = 7,1 cm	1,15-1,17	17,7	49,5

5.3 Verhalten bei sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit

5.3.1 Verhalten im Rahmenscherversuch

Die Scherwiderstandskurven der Rahmenscherversuche mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit sind in Abbildung 39 bis Abbildung 42 dargestellt. Alle untersuchten Proben zeigen ein geschwindigkeitsabhängiges Scherverhalten: Bei Erhöhung der Schergeschwindigkeit steigt der Scherwiderstand sprunghaft an. Bei Verringerung der Schergeschwindigkeit fällt der Scherwiderstand ab. Um das geschwindigkeitsabhängige Scherverhalten zu verdeutlichen, wurden durch abschnittsweises Anpassen von Polynomfunktionen Linien gleicher Schergeschwindigkeit (Isotachen) gebildet. Die Isotachen

sind in den Abbildungen gestrichelt dargestellt. Sie wurden so angepasst, dass gegebenenfalls nur vorübergehende Effekte unmittelbar nach dem Geschwindigkeitssprung (TESRA-Verhalten) nicht berücksichtigt werden.

Alle untersuchten Proben zeigen am Anfang der Scherung eine *Isotachen-Viskosität*. Der Scherwiderstand verändert sich bei Änderung der Schergeschwindigkeit sprunghaft und verläuft dann parallel zur Scherwiderstandslinie vor dem Geschwindigkeitssprung. Bei größeren Scherwegen wird die anfängliche Änderung des Scherwiderstands im weiteren Scherverlauf jedoch teilweise wieder kompensiert. Der Scherwiderstand nähert sich nach der sprunghaften Änderung dem Verlauf vor dem Sprung an. Das Verhalten entspricht dann der *kombinierten Isotachen- und TESRA-Viskosität* nach TATSUOKA et al. (2008). Beim Braunkohlenschluff erfolgt nach dem Grenzzustand scheinbar eine vollständige Kompensation, so dass kein dauerhafter Einfluss der Schergeschwindigkeit verbleibt. Dies entspricht einem reinen *TESRA-Verhalten*. Die Ausnahme von dem beschriebenen Übergang vom Isotachen-Verhalten zum TESRA-Verhalten bildet der Braunkohlenton. Dieser weist auch bei fortschreitendem Scherverlauf ein reines Isotachen-Verhalten auf.

Mit dem Übergang vom Isotachen-Verhalten zum TESRA-Verhalten geht ein Verlust des dauerhaften viskosen Scherwiderstandsanteils einher. Dies verdeutlichen die ebenfalls in den Abbildungen bei ausgewählten Scherwegen dargestellten Viskositätsindizes I_v . Die Ermittlung der Indizes erfolgte jeweils anhand der Isotachen und auf Grundlage des logarithmischen Viskositätsgesetzes entsprechend Gleichung (5). Die Stauchungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ wurde dabei mit der Schergeschwindigkeit v ersetzt. Als Ausgangswert τ_0 wurde jeweils der Scherwiderstand der Isotache für die Schergeschwindigkeit 0,002 mm/min angesetzt. Sofern am Auswertungspunkt sowohl die Isotache für die Schergeschwindigkeit 0,02 mm/min als auch für die Schergeschwindigkeit 0,0002 mm/min gebildet werden konnten, wurde der Mittelwert beider auswertbarer Indizes berechnet. Bei allen Proben zeigt sich eine Abnahme der Viskositätsindizes mit zunehmendem Scherweg. Die Abnahme ist am deutlichsten am Beginn der Scherung bis zum Erreichen des Grenzzustandes ausgeprägt, also bis zum Übergang vom Isotachen-Verhalten zum TESRA-Verhalten. Die Abnahme der Indizes erfolgt aber auch beim Braunkohlenton, der keinen Übergang zum TESRA-Verhalten erkennen lässt.

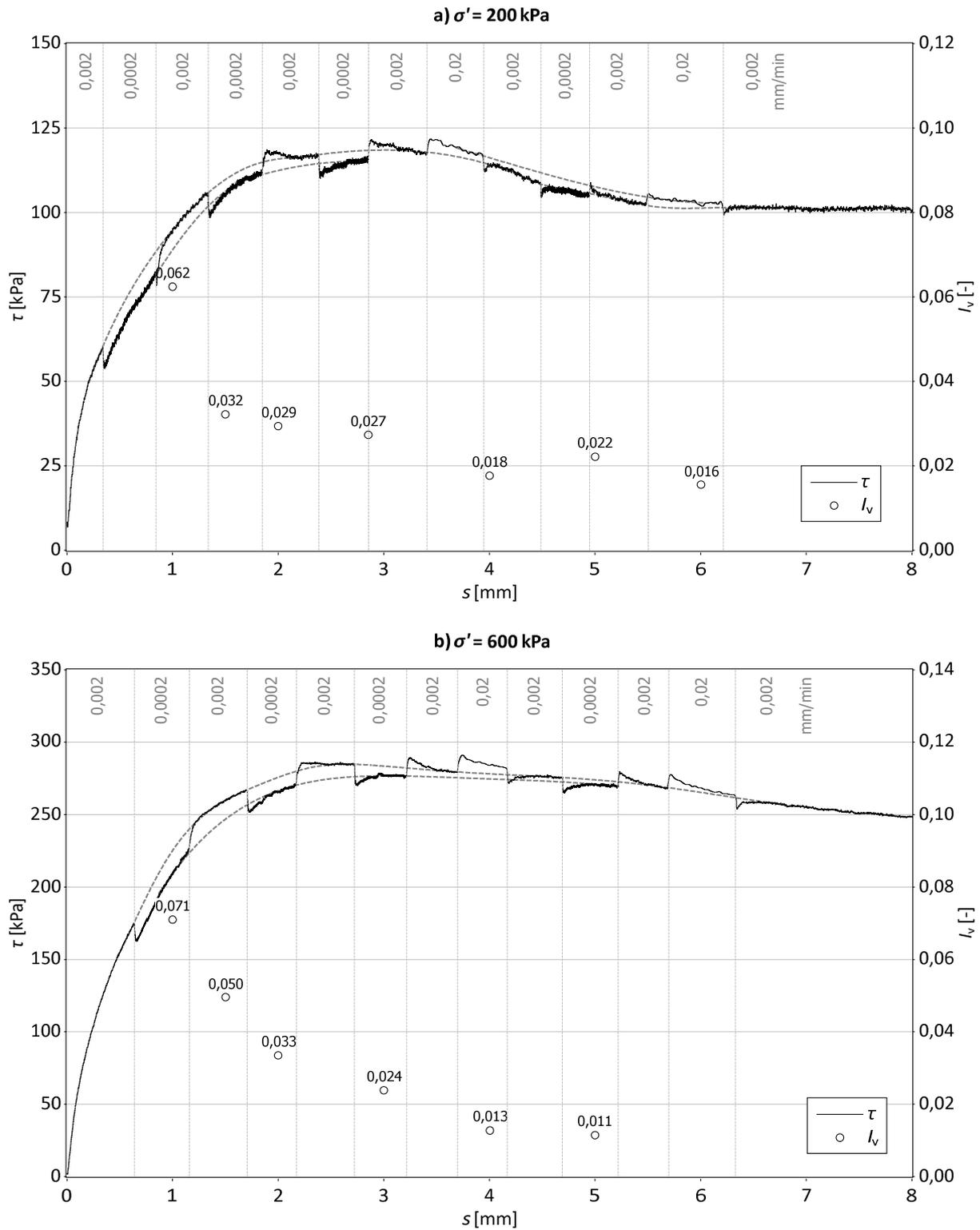


Abbildung 39: Rupelton (Probe R1) im Versuch mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit, Scherspannung τ und Viskositätsindex I_v gegen Scherweg s bei a) $\sigma' = 200$ kPa und b) $\sigma' = 600$ kPa

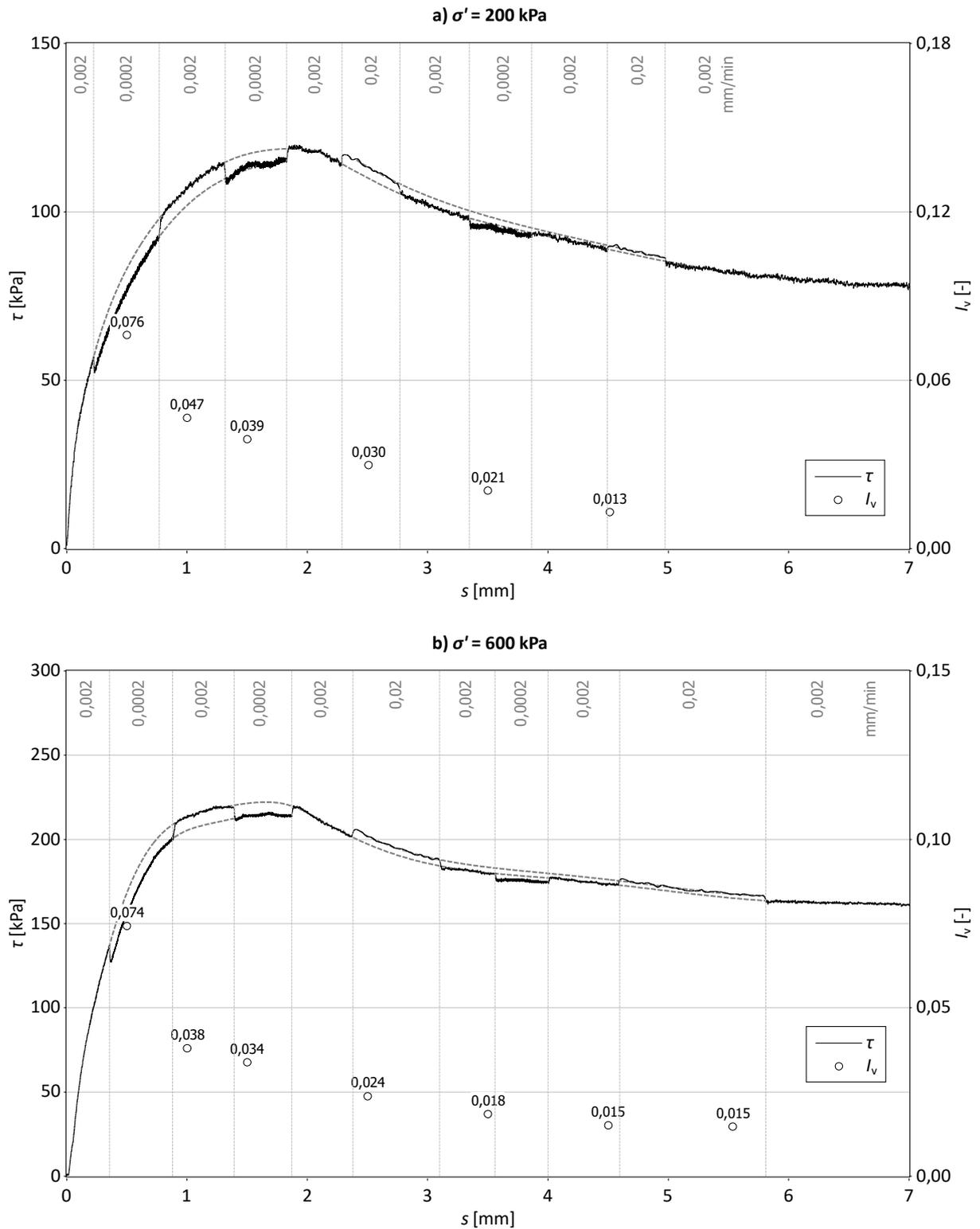


Abbildung 40: Braunkohlenton (Probe BkT1) im Versuch mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit, Scherspannung τ und Viskositätsindex I_v gegen Scherweg s bei a) $\sigma' = 200$ kPa und b) $\sigma' = 600$ kPa

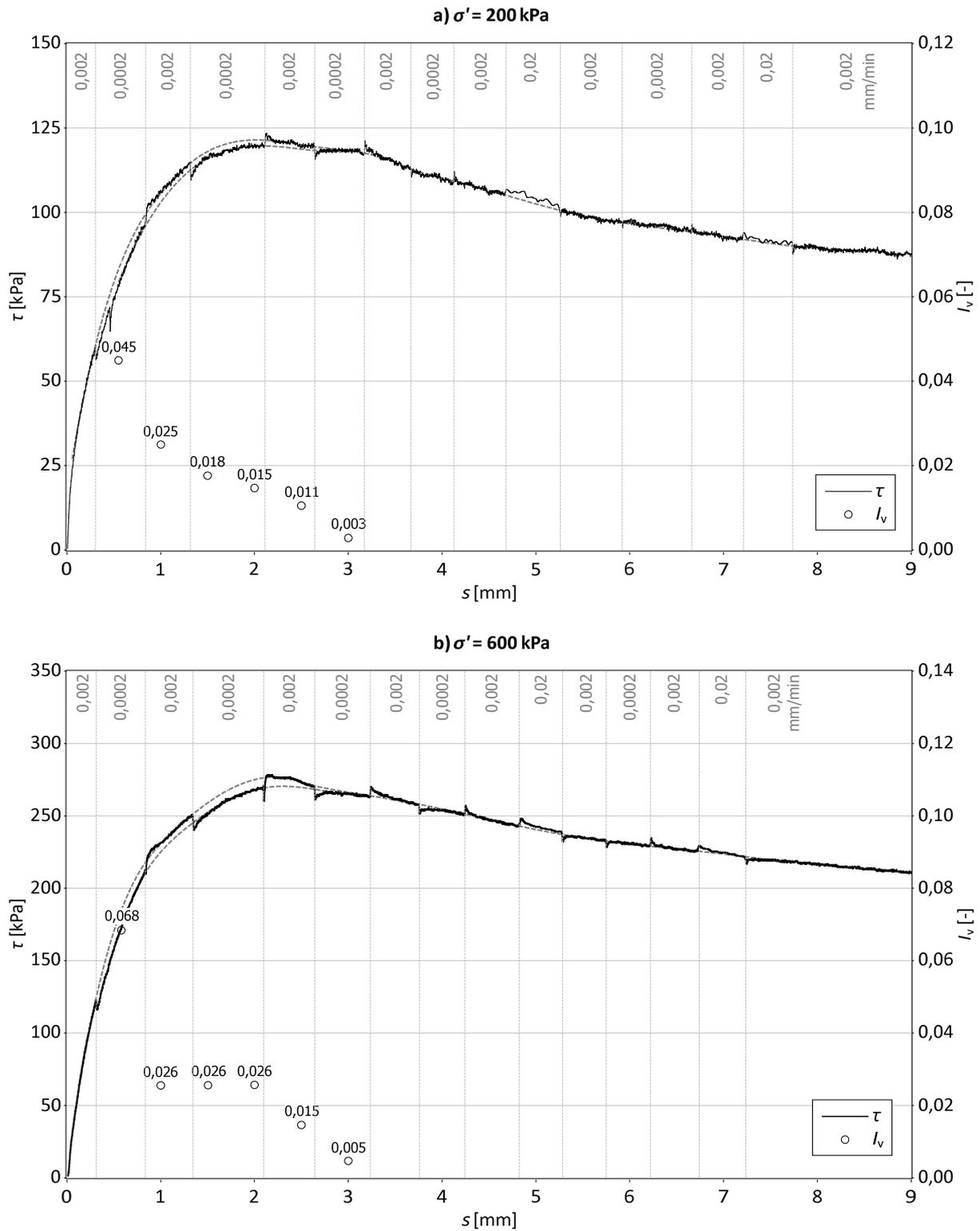


Abbildung 41: Braunkohlenschluff (Probe BkU2) im Versuch mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit, Scherspannung τ und Viskositätsindex I_v gegen Scherweg s bei a) $\sigma' = 200$ kPa und b) $\sigma' = 600$ kPa

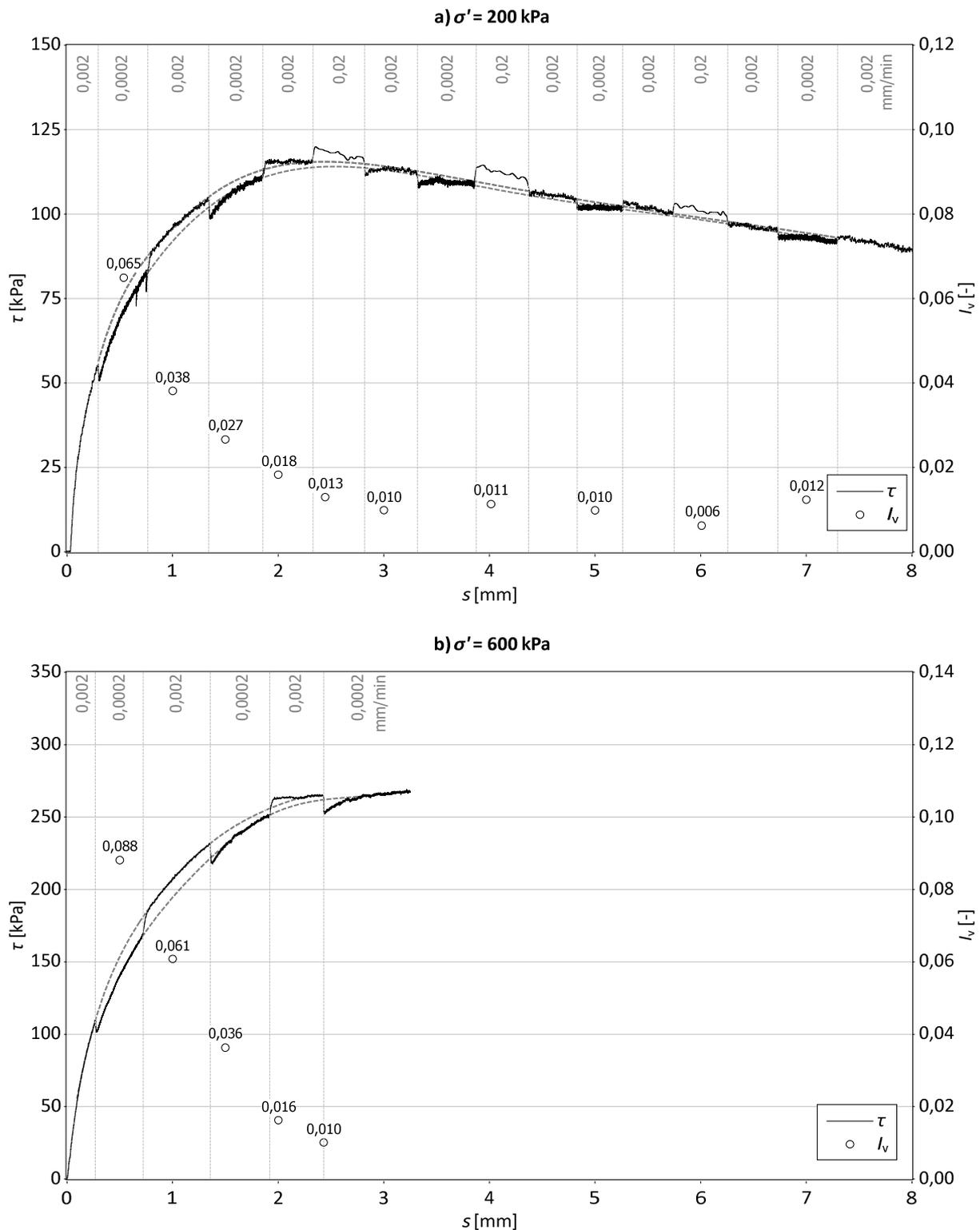


Abbildung 42: Kippe (Probe K1) im Versuch mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit, Scherspannung τ und Viskositätsindex I_v gegen Scherweg s bei a) $\sigma' = 200$ kPa und b) $\sigma' = 600$ kPa

Der Übergang vom Isotachen-Verhalten zum TESRA-Verhalten und die Abnahme der Geschwindigkeitsabhängigkeit wurden bei vergleichbaren Böden auch in Triaxialversuchen beobachtet: Eine Abnahme des Viskositätsindex mit zunehmendem Scherweg wurde an weichem, leicht überkonsolidiertem *Belfast-Ton* (organisch-ästuarin, quartär) festgestellt (GRAHAM et al., 1983). Der *Belfast-Ton* zeigt dabei jedoch wie der Braunkohlenton weiterhin

reines Isotachen-Verhalten. Am *London-Ton* (steifer mariner Ton aus dem Eozän) wurde ebenfalls eine Abnahme der Geschwindigkeitsabhängigkeit mit zunehmendem Scherweg sowie auch ein Übergang vom Isotachen-Verhalten zum kombinierten Isotachen-/TESRA-Verhalten festgestellt, und zwar sowohl an ungestörten überkonsolidierten als auch an aufbereiteten normal- und überkonsolidierten Proben (SORENSEN et al., 2007, HINCHBERGER & QU, 2007). Auch an künstlich hergestellten Proben von *Fukakusa-Ton* (marin, pleistozän) wurde sowohl an normal- als auch an überkonsolidierten Proben ein Übergang vom Isotachen-Verhalten zum kombinierten Isotachen- und TESRA-Verhalten etwa beim Erreichen des Grenzzustands beobachtet (OKA et al., 2003).

Die Abnahme der Viskositätsindizes erfolgt zum wesentlichen Teil unmittelbar am Anfang der Scherung und noch vor Erreichen der Peakscherfestigkeit. Der absolute Betrag des geschwindigkeitsabhängigen Scherwiderstands bleibt dabei scheinbar annähernd gleich groß. Die stark abnehmenden Viskositätsindizes am Anfang der Scherung ergeben sich demnach nur durch den Anstieg der Bezugsspannung τ_0 gemäß Gleichung (5). Offenbar führt die Verschiebung der Scherfuge zu einer zunehmenden Mobilisierung stabiler Kontaktpunkte. Dies fügt sich in die Annahme ein, nach der die effektive Reibung und die effektive Kohäsion nicht gleichzeitig mobilisiert werden. Von SCHMERTMANN (1964, 2012) konnte in speziellen Triaxialversuchen (*IDS-Tests*) gezeigt werden, dass der von der Normalspannung unabhängige Anteil der Scherfestigkeit (effektive Kohäsion) bereits nach kurzen Scherwegen mobilisiert wird und anschließend deutlich abnimmt. Der von der Normalspannung abhängige Scherfestigkeitsanteil (effektive Reibung) wird dagegen erst nach größeren Scherwegen mobilisiert. Dies ist nach BJERRUM (1973) darauf zurückzuführen, dass der aus Reibung resultierende Anteil zunächst Umlagerungen im Korngerüst erfordert. Mit der erst nach längeren Scherwegen mobilisierten Reibung, welche den nichtviskosen Anteil des Scherwiderstands erhöht, könnte die beobachtete Abnahme der Viskositätsindizes erklärt werden. Entsprechend den Betrachtungen in Abschnitt 2.1 sollte diese Vorstellung aber dahingehend angepasst werden, dass der als effektive Kohäsion ermittelte Scherfestigkeitsanteil keine Bodenkonstante ist und nur im Rahmen der üblicherweise im Versuch betrachteten Spannungen als unabhängig von der Normalspannung erscheint. Der frühzeitig geweckte, viskose Scherwiderstand geht möglicherweise auf die Verzahnung der kleinen Tonteilchen zurück, deren Widerstand gegen Verdrehungen und Umordnungen bereits nach sehr kurzen Scherwegen zum Scherwiderstand beiträgt, durch die fehlenden direkten Kontaktpunkte aber viskosen Charakter hat.

Bei einigen Versuchskurven (z. B. Abbildung 39, Teil b) wird erkennbar, dass der absolute Betrag des viskosen Scherwiderstands und die Viskositätsindizes auch nach dem Grenzzustand weiterhin leicht abnehmen. Dies ist wahrscheinlich mit der zunehmenden Einregelung der Tonteilchen zu erklären. Dadurch nimmt die Verzahnung der Tonteilchen und damit der viskose Scherwiderstandsanteil weiter ab.

Mit der Abnahme der Viskosität bei größeren Scherwegen zeigt sich bei den untersuchten Proben in unterschiedlichem Maß zunehmend ein nur vorübergehender Geschwindigkeitseinfluss. Diese temporären Effekte unmittelbar nach den Geschwindigkeitssprüngen können sehr ausgeprägt in Reibungsversuchen an Festgesteinen und anderen Festkörpern beobachtet

werden (SCHOLZ, 1998). Zum einen zeigt sich auch hier eine Abhängigkeit der Scherspannung (hier entsprechend der klassischen Reibungslehre als Gleitreibungskoeffizient) von der Gleitgeschwindigkeit, wobei diese in Abhängigkeit von der Gesteinsart auch negativ sein kann (analog zur *P&N-Viskosität* nach TATSUOKA et al., 2008). Zum anderen ist der Haftreibungskoeffizient abhängig von der Bewegungsgeschichte der Gleitfläche. Beim Halten statischer Bedingungen steigt der Haftreibungskoeffizient mit dem Logarithmus der Zeit. Diese Alterung der Reibung sowie auch die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten werden auf eine Vergrößerung der Kontaktfläche durch Kriechen erklärt. Diese Kriechprozesse bedingen bei einer sprunghaften Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit den Reibungsanstieg. Bei weiterer schnellerer Gleitung nimmt die Kontaktfläche im Zuge der Neuordnung der Kontaktpunkte wieder ab, was die anschließende Kompensation des Reibungsanstiegs erklärt.

Eine ähnliche Interpretation in Bezug auf die temporären Geschwindigkeitseffekte in Böden geben TATSUOKA et al. (2008). Danach kann das differenzierte geschwindigkeitsabhängige Scherverhalten mit zwei Mechanismen erklärt werden. Mechanismus A ist das mit höherer Schergeschwindigkeit steifer werdende Verformungsverhalten an den Kornkontaktpunkten. Dieser Mechanismus bedingt das Isotachenverhalten und entspricht dem in der vorliegenden Arbeit als viskoser Scherwiderstand bezeichneten Festigkeitsanteil. Mechanismus B ist das verstärkte Volumenkriechen bei geringerer Schergeschwindigkeit, welches zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche in der Scherebene und damit zu einer Kompensation des Geschwindigkeitseffekts führt. Nach TATSUOKA et al. weisen Böden mit kantigen Körnern und weiter Stufung sowie bindige Böden einen eher geringen Einfluss von Mechanismus B auf, da bei diesen Böden durch den hohen Grad an Verzahnung und/oder Haftkräften ein geringer Einfluss des Volumenkriechens auf den Scherwiderstand besteht. Der Scherwiderstand ist dann bei hoher Geschwindigkeit größer (Isotachen-Viskosität). Bei Böden mit runden Körnern und enger Stufung ist der Widerstand gegen Korngleitung und -rotation dagegen gering, so dass Mechanismus B einen größeren Einfluss hat, und der Scherwiderstand bei kleinerer Geschwindigkeit größer ist (P&N-Viskosität). Bei TESRA-Viskosität gleichen sich beide Mechanismen aus. Die Änderung des Viskositätstyps von Isotachen-Viskosität zu TESRA-Viskosität wird von TATSUOKA et al. (2008) mit einer irreversiblen Zerstörung von Bindungskräften an Kornkontaktpunkten und damit einer Abnahme des Einflusses von Mechanismus A erklärt.

Grundsätzlich lassen sich die eigenen Versuchsergebnisse in die Vorstellungen von TATSUOKA et al. (2008) einordnen. Der Braunkohlenton weist reines Isotachen-Verhalten auf, was für einen hohen Grad an Verzahnung der zahlreichen, plattigen Tonminerale spricht. Der Braunkohlenschluff geht dagegen in ein reines TESRA-Verhalten über, was auf den Einfluss des deutlich höheren Anteils an gedrungenen, runderen Schluff- und Feinsandkörnern hinweist. Der Rupelton und die Kippe liegen in ihrem Verhalten (Übergang zu kombiniertem Isotachen- und TESRA-Verhalten) in einem Zwischenbereich.

Bei genauer Betrachtung des TESRA-Verhaltens ist jedoch bemerkenswert, dass die Kompensation der Scherfestigkeit eine Funktion des Scherwegs und nicht der Zeit ist. Wäre die Kompensation eine Funktion der Zeit, müsste sie in den Scherwiderstands-Scherwegkurven in

den Abschnitten mit kleinerer Schergeschwindigkeit nach einem um ein Vielfaches kürzeren Scherweg abklingen. Der Begriff TESRA-Viskosität (*temporary effects of strain rate and strain acceleration*) ist dahingehend irreführend. Aus Sicht des Verfassers kann das Verhalten so gedeutet werden, dass ab dem Grenzzustand jeder Schergeschwindigkeit eine eigene Porenzahl zugeordnet ist, die nach einem Geschwindigkeitssprung durch eine Neuordnung der Bodenteilchen erreicht wird. Diese Porenzahl nimmt bei kleinerer Schergeschwindigkeit ab, da im Verhältnis zum Scherweg mehr Zeit für die Alterung der Scherfuge zur Verfügung steht. Diese Alterung wirkt der scherbedingten Auflockerung und Umlagerung der Bodenteilchen in der Scherfuge entgegen. Bei Erhöhung der Geschwindigkeit steigt zunächst der Scherwiderstand durch die zuvor bei langsamer Geschwindigkeit stärkere Alterung der Scherfuge an. Infolge der Erhöhung der Schergeschwindigkeit kann die Alterung aber nicht mehr im gleichen Maß mit den scherbedingten Umlagerungen der Bodenteilchen mithalten. Die Bodenteilchen ordnen sich neu, und die Porenzahl erhöht sich. Dadurch nimmt der Scherwiderstand als Funktion des Scherwegs wieder ab. Das TESRA-Verhalten äußert sich wahrscheinlich erst im Grenzzustand, weil zunächst die Kornreibung zwischen den Schluff- und Feinsandteilchen mobilisiert werden muss. Ein Schema zu der beschriebenen Vorstellung ist in Abbildung 43 dargestellt.

Wie im Folgenden anhand der vergleichenden Triaxialversuche noch gezeigt wird, findet diese Anpassung der Porenzahl an die Schergeschwindigkeit auch beim Braunkohlenton mit seinem reinen Isotachen-Verhalten statt. Diese hat aber offenbar keinen nennenswerten Einfluss auf den Scherwiderstand. Der Scherwiderstand wird wahrscheinlich in erster Linie durch Verzahnungen der plattigen Tonteilchen gebildet. Bei den schluffigeren Böden Rupelton und Braunkohlenschluff trägt die Reibung der Schluff- und Feinsandteilchen wesentlich zum Scherwiderstand bei, so dass dieser zunehmend durch die geschwindigkeitsabhängige Verdichtung bzw. Auflockerung beeinflusst wird.

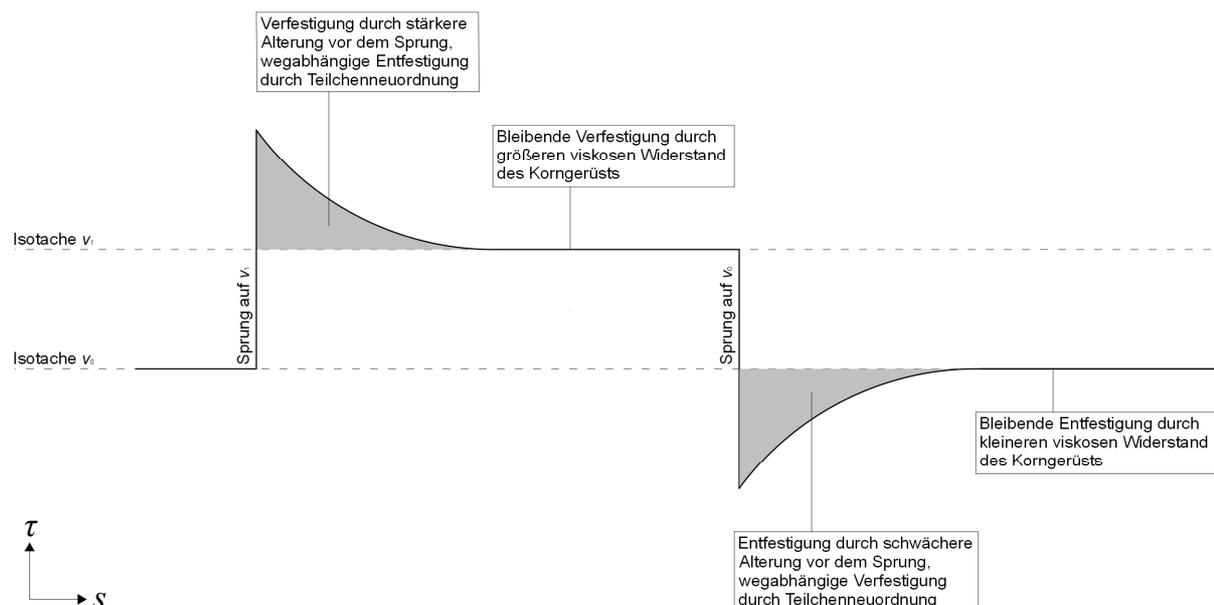


Abbildung 43: Schema zum Verhalten bei sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit und kombinierter Isotachen-/TESRA-Viskosität, $v_1 > v_0$

Einen anderen Erklärungsansatz für die vorübergehenden Geschwindigkeitseffekte gibt GUDEHUS (2021). Danach wird die kurzzeitige Wirkung auf eine Änderung des Porenwasserdrucks und damit der effektiven Spannung aufgrund des durch die Viskosität des Korngerüsts verzögerten Porenwasserdruckausgleichs zurückgeführt. Die im Folgenden ausgewerteten undrainierten Triaxialversuche zeigen jedoch, dass bei Erhöhung der Schergeschwindigkeit eine Verfestigung des Korngerüsts und in dem Zusammenhang ein Anstieg des Porenwasserdrucks und des effektiven Hauptspannungsverhältnisses erfolgt. Der sprunghaft erhöhte Scherwiderstand ist danach auf den erhöhten Widerstand des Korngerüsts und nicht auf eine Änderung der effektiven Spannung zurückzuführen. Dies wird auch durch drainierte Triaxialversuche am London-Ton (SORENSEN et al., 2007) und an verschiedenen Sanden (TATSUOKA et al., 2008, ENEMOTO et al., 2009, ENEMOTO et al., 2016) belegt.

5.3.2 Vergleichsversuche im Triaxialgerät

Im undrainierten Triaxialversuch steigt beziehungsweise fällt der Scherwiderstand bei Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit in einem ähnlich hohen Maß wie in den Rahmenscherversuchen. Die Änderung des viskosen Verhaltens mit dem Scherweg unterscheidet sich beim Rupelton jedoch deutlich (Abbildung 44). Die ausgewerteten Viskositätsindizes bleiben über den gesamten Stauchungsbereich annähernd konstant. Es findet offenbar auch kein Übergang von Isotachen-Viskosität zu TESRA-Viskosität statt. Der wesentliche Unterschied zwischen den Rahmenscherversuchen und den CU-Triaxialversuchen liegt in den undrainierten Bedingungen im Triaxialversuch. Dadurch können keine Volumenänderungen in den wassergesättigten Probekörpern auftreten. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass bei dem schluffigeren Rupelton die strukturellen Vorgänge, welche die Abnahme der Viskosität sowie den Übergang zur TESRA-Viskosität bedingen, mit Volumenänderungen einhergehen.

Hinsichtlich des Übergangs vom Isotachen- zum TESRA-Verhalten lässt sich dies auch an den Kurven der Porenwasserdruckänderung und des effektiven Hauptspannungsverhältnisses nachvollziehen. Bei einer Erhöhung der Stauchungsgeschwindigkeit kommt es mit dem Anstieg des Scherwiderstands zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks. Die höhere Stauchungsgeschwindigkeit führt zu einer Verfestigung des Korngerüsts. Etwa ab dem Grenzzustand wird der initiale Anstieg des Porenwasserdrucks jedoch im weiteren Verlauf überkompensiert, was eine Entfestigung anzeigt. Wie bereits aus den Rahmenscherversuchen abgeleitet wurde, wirkt sich ab dem Grenzzustand bei Erhöhung der Stauchungsgeschwindigkeit zunächst auch die stärkere Verfestigung durch die Alterung aus dem vorhergehenden langsameren Geschwindigkeitsabschnitt aus. Im weiteren Verlauf erfolgt eine wegabhängige Entfestigung durch die Neuordnung der Bodenteilchen. Aufgrund der undrainierten Bedingungen äußert sich das Streben nach Ver- und Entfestigung jedoch nur in einer Änderung des Porenwasserdrucks und der effektiven Spannung. Da sich die Porenzahl nicht ändert, zeigt der Scherwiderstand durchgehend Isotachen-Verhalten und keine scherwegabhängige Abnahme der Viskositätsindizes. Die Kurve des effektiven Hauptspannungsverhältnisses, welches die Änderung der effektiven Spannungen berücksichtigt, zeigt dagegen einen Verlauf, der dem Scherwiderstand in den Rahmenscherversuchen ähnlich

ist. Am Anfang des Versuchs verläuft das Hauptspannungsverhältnis scheinbar noch entlang von Isotachen. Im weiteren Scherverlauf erfolgt dagegen eine Kompensation durch die das TESRA-Verhalten bestimmende Ver- und Entfestigung infolge der geschwindigkeitsabhängigen Alterung.

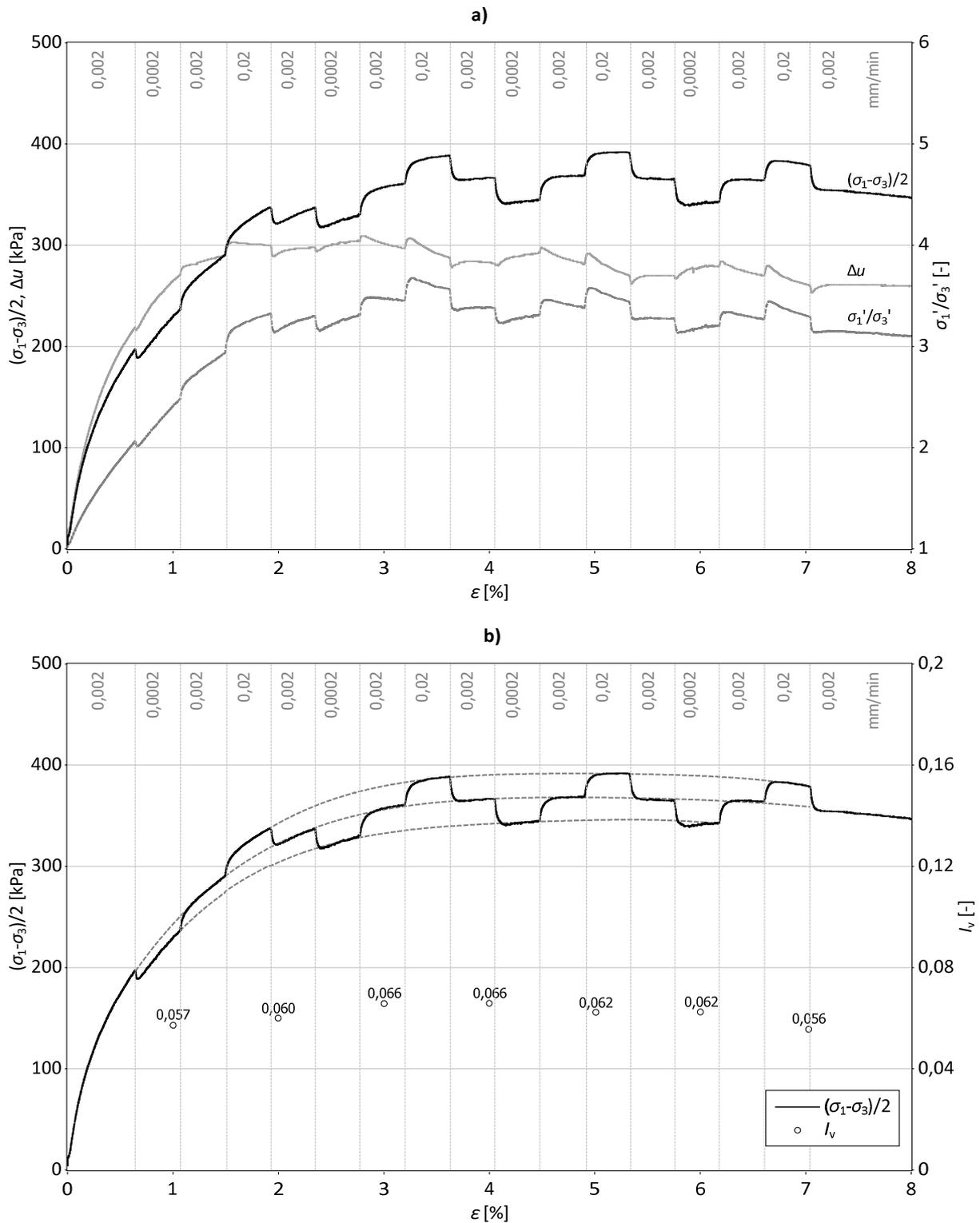


Abbildung 44: Rupelton (Probe R1) im Triaxialversuch mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit, a) Scherwiderstand $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, Porenwasserdruckänderung Δu und Hauptspannungsverhältnis σ'_1/σ'_3 gegen Stauchung ε , b) Scherwiderstand $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ und Viskositätsindizes I_v gegen Stauchung ε

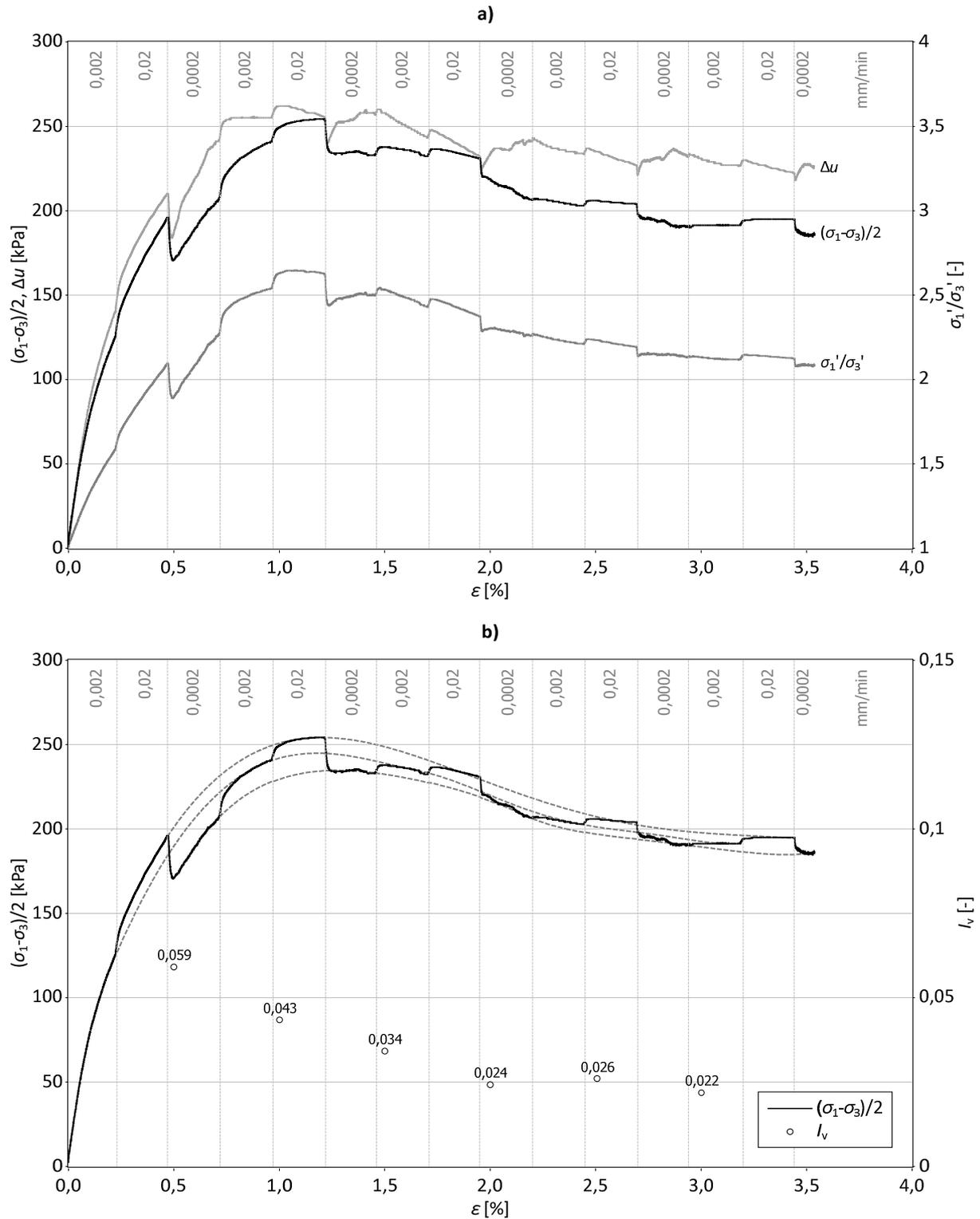


Abbildung 45: Braunkohlenton (Probe BkT2) im Triaxialversuch mit sprunghafter Änderung der Stauchungsgeschwindigkeit, a) Scherwiderstand $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, Porenwasserdruckänderung Δu und Hauptspannungsverhältnis σ'_1/σ'_3 gegen Stauchung ϵ , b) Scherwiderstand $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ und Viskositätsindizes I_v gegen Stauchung ϵ

Der Braunkohlenton zeigt im undrainierten Triaxialversuch bezogen auf den Scherwiderstand das gleiche geschwindigkeitsabhängige Verhalten wie im Rahmenscherversuch (Abbildung 45). Die Viskositätsindizes nehmen im Verlauf der Scherung in einer gut vergleichbaren Größenordnung ab. Im Gegensatz zum Rupelton scheint die Abnahme des viskosen Scherwiderstandsanteils daher nicht auf eine Änderung des Volumens beziehungsweise der Porenzahl zurückzugehen. Wie im Rahmenscherversuch tritt beim Braunkohlenton auch im undrainierten Triaxialversuch kein Übergang zur TESRA-Viskosität auf. Die Scherwiderstandslinie verläuft durchgehend entlang von Isotachen. Der Porenwasserdruck reagiert auf die Änderungen der Stauchungsgeschwindigkeit ab dem Grenzzustand zwar ähnlich wie beim Rupelton: Bei Erhöhung der Stauchungsgeschwindigkeit nimmt der Porenwasserdruck erst zu und wird anschließend überkompensiert. Das heißt, dass auch beim Braunkohlenton mit Isotachen-Viskosität eine geschwindigkeitsabhängige Alterung der Scherfuge stattfindet. Das effektive Hauptspannungsverhältnis verläuft aber dennoch weiterhin entlang von Isotachen und zeigt keine Kompensation. Diese Beobachtung bestätigt die Annahme, dass das viskose Verhalten des Braunkohlentons nicht durch Änderungen der Porenzahl, sondern in erster Linie durch den Widerstand der miteinander verzahnten, plattigen Tonteilchen gegen Verschiebungen bestimmt wird.

5.3.3 Auswertung der Viskositätsindizes

Aus den durchgeführten Versuchen ist zu folgern, dass der Viskositätsindex nicht als Bodenkonstante zu betrachten ist. Er ist vom Scherweg abhängig. In Bezug auf die Frage der Geschwindigkeitsabhängigkeit der effektiven Scherfestigkeit ist vor allem der Viskositätsindex im Grenzzustand interessant. Dieser ermöglicht auch einen standardisierten Vergleich der Proben untereinander. Daher wurde der Viskositätsindex bei allen Versuchen gesondert am Höchstwert der Isotache für die Referenzgeschwindigkeit von 0,002 mm/min ermittelt. Dieser Viskositätsindex im Grenzzustand ist für alle Versuche in Tabelle 12 zusammengefasst. Der Rupelton und der Braunkohlenton zeigen dabei ähnlich hohe Indizes zwischen 2,7 % und 3,3 %. Am geringer plastischen Braunkohlenschluff ergeben sich die Indizes mit 1,5 % bis 2,1 %. Die Kippe weist mit 1,3 % den geringsten ermittelten Viskositätsindex im Grenzzustand auf.

Mit Ausnahme der Kippe ist der Viskositätsindex bei der Normalspannung von 600 kPa jeweils etwas größer als bei der Normalspannung von 200 kPa. Da die Ermittlung der Indizes anhand der interpolierten Isotachen eine gewisse Ungenauigkeit aufweist, ist dieser Befund unter Beachtung der nur geringen Abweichungen möglicherweise zufällig. Die bislang durchgeführten Triaxialversuche an vergleichbaren Böden wie dem *London-Ton* (SORENSEN et al., 2007), dem *Belfast-Ton* (GRAHAM et al., 1983), dem *Fukakusa-Ton* (OKA et al. (2003) und dem marinen, pleistozänen *Drammen-Ton* (BERRE & BJERRUM, 1973) lassen keine Abhängigkeit des geschwindigkeitsabhängigen Scherverhaltens von der Normalspannung bzw. vom Überkonsolidierungsgrad erkennen.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchen mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit

Material	Probe	σ' [kPa]	Viskositätstyp	I_v (Grenzzustand) [-]
Rupelton	R1	200	Isotachen / Isotachen+TESRA	0,027
		600	Isotachen / Isotachen+TESRA	0,033
Braunkohlenton	BkT1	200	Isotachen	0,031
		600	Isotachen	0,033
Braunkohlenschluff	BkU2	200	Isotachen / TESRA	0,015
		600	Isotachen / TESRA	0,021
Kippe	K1	200	Isotachen / Isotachen+TESRA	0,013
		600	Isotachen / Isotachen+TESRA	0,013
Vergleichsversuche im Triaxialgerät (CU-Versuch)				
Rupelton	R1	600	Isotachen	0,063
Braunkohlenton	BkT2	600	Isotachen	0,041

In Abbildung 46 sind die ermittelten Indizes zusammen mit Literaturwerten in Abhängigkeit der Fließgrenze dargestellt. Die Literaturwerte wurden ausschließlich in undrainierten Triaxialversuchen ermittelt. Für den *London-Ton* konnte dabei gezeigt werden, dass in drainierten Triaxialversuchen weitestgehend die gleichen Indizes erhalten werden (HINCHBERGER & QU, 2007). Die Viskositätsindizes von GUDEHUS & LEINENKUGEL (1978) wurden anhand des logarithmischen Zusammenhangs gemäß Gleichung (5) ermittelt. Für die Werte von KRIEG (2000) und von HINCHBERGER & QU (2007) wurde der Potenzansatz nach *Norton* gemäß Gleichung (6) verwendet. Beide Ansätze sind für nicht allzu große Geschwindigkeitssprünge vergleichbar (KRIEG, 2000; GOLDSCHIEDER, 2014).

Die in den Rahmenscherversuchen ermittelten Viskositätsindizes passen sich trotz der abweichenden Versuchsbedingungen und der festgestellten Abhängigkeit vom Scherweg überwiegend gut in die Literaturwerte ein. GUDEHUS & LEINENKUGEL (1978) und KRIEG (2000) gingen bei der Ermittlung der Indizes davon aus, dass der Verformungszustand keinen Einfluss auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Scherwiderstands hat. Genaue Angaben zur Bestimmung der Werte finden sich dort nicht. Wären die eigenen Indizes bei kleineren oder größeren Scherwegen ermittelt worden, dann würden sie aufgrund der oben dargelegten Abhängigkeit vom Scherweg im Vergleich zu den Literaturwerten deutlich zu hoch beziehungsweise zu niedrig liegen. Die dargestellten Indizes von HINCHBERGER & QU (2007) wurden beim Höchstwert des Scherwiderstands ermittelt.

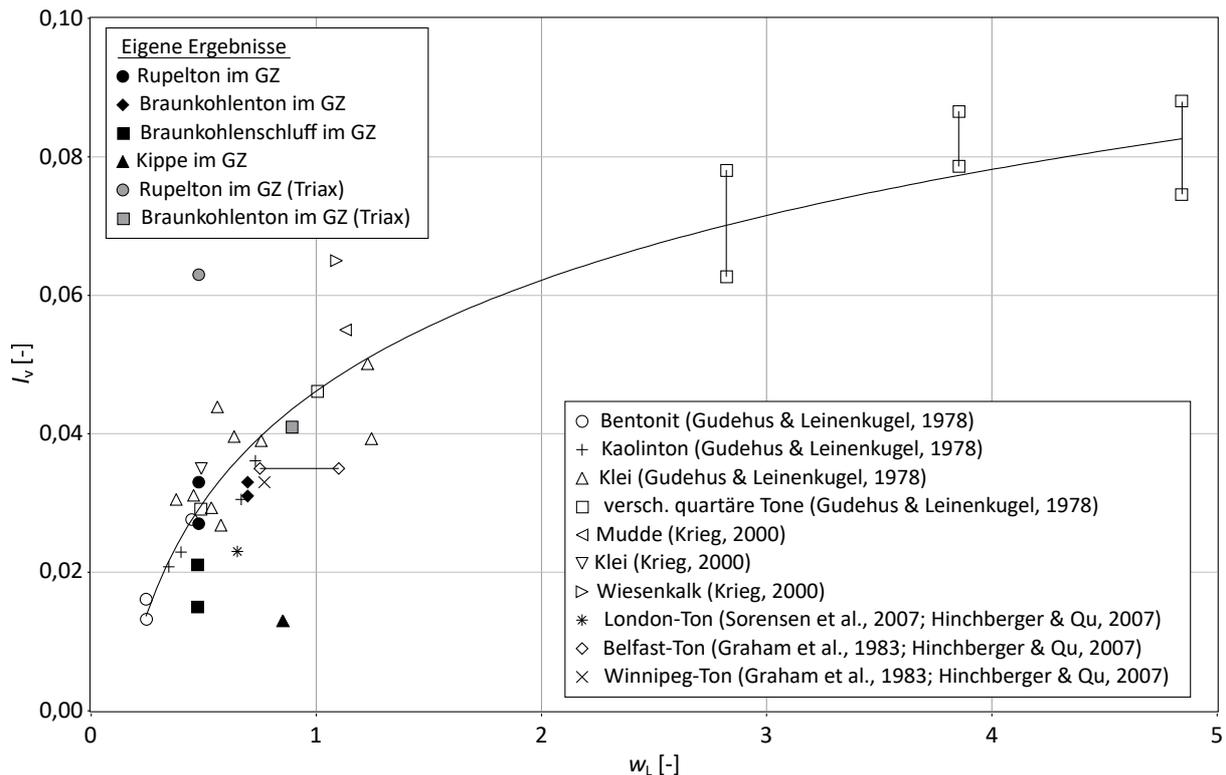


Abbildung 46: Einordnung der ermittelten Viskositätsindizes im Grenzzustand (GZ) in Literaturwerte in Abhängigkeit der Fließgrenze w_L . Die dargestellte logarithmische Ausgleichskurve bezieht sich auf die Daten von GUDEHUS & LEINENKUGEL (1978)

Der Braunkohlenschluff und der Braunkohlenton weisen gegenüber dem Rupelton im Verhältnis zur Fließgrenze eine geringere Viskosität auf. Dies liegt möglicherweise an dem höheren Gehalt an kohligem Nebenanteilen. Diese vergrößern die Wasseraufnahmefähigkeit und damit den Wassergehalt an der Fließgrenze ohne gleichzeitig den viskosen Scherwiderstand zu erhöhen. Dagegen geht KRIEG (2000) davon aus, dass der organische Anteil eines Bodens die Viskosität deutlich erhöht. Bei den von KRIEG untersuchten Erdstoffen handelte es sich jedoch um geologisch junge, holozäne Böden. Die organischen Bestandteile waren in Form von Kieselalgenskeletten und Resten von Pflanzenfasern noch gut erhalten. Sie bewirken nach KRIEG eine Art Verfilzung, was sich auch in einer sehr hohen Scherfestigkeit äußerte. Bei den in der vorliegenden Arbeit untersuchten tertiären Böden wurden die pflanzlichen Bestandteile über lange Zeiträume stärker zersetzt. Die organischen Bestandteile tragen daher wahrscheinlich nicht zum Scherwiderstand und dessen viskosen Anteil bei. GUDEHUS & LEINENKUGEL (1978) gehen allgemein von einer stärkeren Streuung des Viskositätsindex organischer Böden aus.

Die Kippe weicht mit ihrem niedrigen Viskositätsindex bei verhältnismäßig hoher Fließgrenze deutlich von den übrigen Proben und auch von den Literaturwerten ab. Dabei fällt jedoch auf, dass die Indizes am Beginn der Scherung vor Erreichen des Grenzzustands durchaus vergleichbar hohe Werte wie beim Braunkohlenton aufweisen (Abbildung 40 und Abbildung 42). Der Index nimmt jedoch bis zum Grenzzustand stärker ab, beziehungsweise es wird ein längerer Scherweg bis zum Erreichen des Grenzzustands benötigt. Eine mögliche Erklärung sind die Makroporen der Kippe, welche größere Verschiebungen bis zum Erreichen der

Peakscherfestigkeit erfordern. Durch den inhomogenen Aufbau der Kippe könnten dann bereits einzelne Pseudokörner intern abscheren. Der unregelmäßige Schervorgang verringert den noch vorhandenen viskosen Scherwiderstandsanteil beim Erreichen der Peakscherfestigkeit.

In Tabelle 12 und Abbildung 46 sind auch die in den undrainierten Triaxialversuchen am Rupelton und am Braunkohlenton bestimmten Viskositätsindizes dargestellt. Die Indizes wurden am Höchstwert der Isotache des Scherwiderstands $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ für die Stauchungsgeschwindigkeit von 0,002 mm/min ermittelt. Beim Braunkohlenton fällt das Erreichen des höchsten Scherwiderstands etwa mit dem effektiven Grenzzustand zusammen, da der Porenwasserdruck und das effektive Hauptspannungsverhältnis etwa gleichzeitig mit dem Scherwiderstand ihr Maximum erreichen. Beim Rupelton steigt der Scherwiderstand auch nach den Höchstwerten des Porenwasserdrucks und des Hauptspannungsverhältnisses weiterhin leicht an. Der Grenzzustand der effektiven Scherfestigkeit wird daher wahrscheinlich schon vorher erreicht. Da die Viskositätsindizes beim Rupelton während der Stauchung aber ohnehin annähernd konstant bleiben, wird der am Höchstwert des Scherwiderstands ermittelte Index dennoch als kennzeichnend für den effektiven Grenzzustand angesehen.

Der am Braunkohlenton ermittelte Index passt gut zum Wert aus dem Rahmenscherversuch. Der Index ist zwar höher, jedoch weist die im Triaxialversuch untersuchte Probe BkT2 auch eine höhere Fließgrenze als die im Rahmenscherversuch untersuchte Probe BkT1 auf. Beide Indizes passen sich gut in die Literaturwerte ein.

Beim Rupelton liegt der Viskositätsindex aus dem Triaxialversuch dagegen deutlich über dem Wert aus dem Rahmenscherversuch. Dies ist wie zuvor erläutert wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass beim undrainierten Triaxialversuch im Gegensatz zum drainierten Rahmenscherversuch keine scherwegabhängige Abnahme des Viskositätsindex bis zum Grenzzustand erfolgt. Die Abnahme der Viskosität erfordert beim Rupelton offenbar eine Änderung der Porenzahl, welche sich beim volumentreuen Triaxialversuch nur in einer Änderung des Porenwasserdrucks und der effektiven Spannungen, aber nicht im Scherwiderstand äußert. Bemerkenswerterweise passt sich der Wert aus dem Rahmenscherversuch besser in die Literaturwerte ein als der Wert aus dem undrainierten Triaxialversuch, obwohl die Literaturwerte ebenfalls in undrainierten Triaxialversuchen ermittelt wurden. Der Viskositätsindex ist im Vergleich zur Fließgrenze sehr hoch. Dies ist möglicherweise ebenfalls darauf zurückzuführen, dass die Viskosität des Rupeltons im volumentreuen Triaxialversuch nicht abnimmt. An vergleichbaren Böden wie dem Belfast-Ton (GRAHAM et al., 1983), dem London-Ton (SORENSEN et al., 2007, HINCHBERGER & QU, 2007) und dem Fukakusa-Ton (OKA et al., 2003) wurde im Gegensatz zum hier untersuchten Rupelton auch im undrainierten Triaxialversuch eine Abnahme des Viskositätsindex bzw. ein Übergang zum TESRA-Verhalten beobachtet. Aus dem Vergleich mit den bodenmechanischen Kennwerten dieser Böden lässt sich jedoch keine materialbezogene Begründung für das unterschiedliche Verhalten ableiten.

Unterschiede zwischen den in Rahmenscherversuchen und Triaxialversuchen ermittelten Viskositätsindizes sind auch aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen zu erwarten. In Rahmenscherversuchen verläuft die Scherfuge bei der üblichen lotrechten

Beprobung und entsprechendem Probeneinbau parallel zur Schichtung. In dieser Ebene ist eine bevorzugte Einregelung der Bodenteilchen durch syngenetische (Ablagerung) und postgenetische (Konsolidierung, Alterung) Vorgänge zu erwarten. Der Verzahnungsgrad in der Scherfuge ist im Rahmenscherversuch also möglicherweise geringer als beim Triaxialversuch, bei dem die entstehenden Scherfugen etwa diagonal zur Schichtung verlaufen. Dies lässt eine geringere Viskosität im Rahmenscherversuch erwarten.

5.4 Verhalten bei Relaxation im Grenzzustand

5.4.1 Verhalten im Rahmenschergerät

In Abbildung 47 bis Abbildung 50, Teil a) bis c) sind die in den Relaxationsversuchen ermittelten Scherspannungs- und Höhenänderungskurven gegen die Zeit dargestellt. Durch das Anhalten des Vorschubs bei Erreichen des maximalen Scherwiderstands kommt es bei allen Versuchen zunächst zu einer raschen Abnahme des Scherwiderstands (Relaxation). Im weiteren Verlauf der Zeit flacht die Scherspannungskurve allmählich ab und strebt scheinbar einem konstanten Wert entgegen. Bei den meisten Versuchen ist jedoch erkennbar, dass auch am Ende der bis zu 26 Tage andauernden Relaxationsphasen noch kein stationärer Zustand erreicht wurde. Der Scherwiderstand nimmt scheinbar weiterhin sehr langsam ab.

Bei Wiederaufnahme des Vorschubs steigt der Scherwiderstand bei allen Versuchen schnell wieder an. Durch das Fortsetzen der Scherbewegung wird der viskose Scherwiderstandsanteil demnach sofort wieder mobilisiert. Der Scherwiderstand erreicht dabei in der Regel einen etwas höheren Wert als vor der Relaxation. Damit zeigt sich analog zum TESRA-Verhalten in den Sprungversuchen eine Verfestigung der Scherfuge durch Alterung während der Relaxationsphase. Diese Alterung kann auch in der sehr langsamen, aber stetigen Zunahme der Probensetzung während der Relaxation beobachtet werden. Die Verfestigung ist darstellungsbedingt in den Scherspannungs-Scherwegdiagrammen der Relaxationsversuche in Abschnitt 5.1 besser zu erkennen als in den folgenden Scherspannungs-Zeitdiagrammen. Der Einfluss der Alterung zeigt sich in den Relaxationsversuchen auch beim Braunkohlenton, der in den Sprungversuchen ein reines Isotachen-Verhalten aufwies. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die im Relaxationsversuch untersuchte Probe BkT3 eine etwas geringere plastische Ausbildung aufweist als die im Sprungversuch untersuchte Probe BkT1.

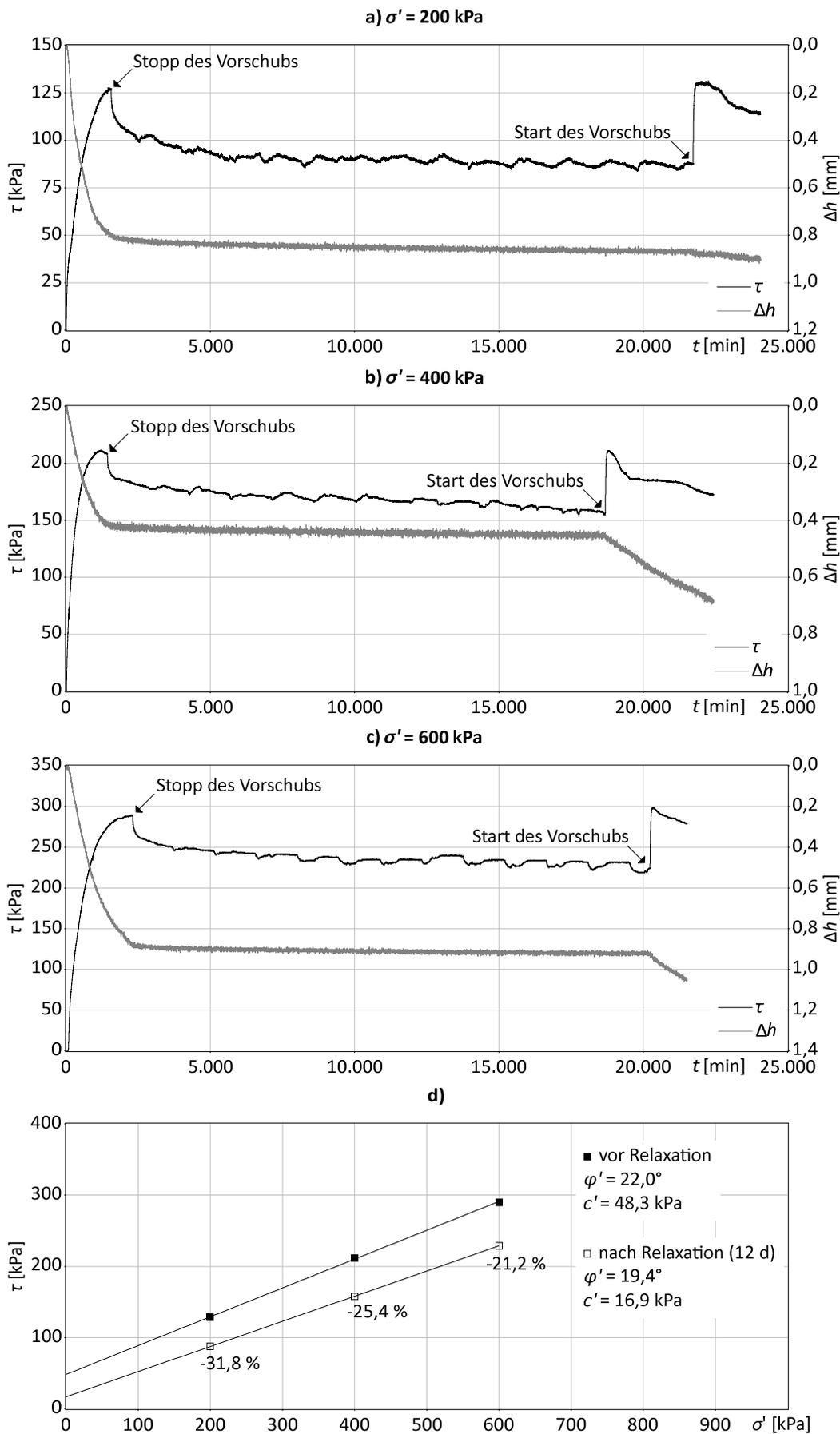


Abbildung 47: Rupelton (Probe R1) im Relaxationsversuch, a) bis c) Scherspannung τ und Höhenänderung Δh gegen Zeit t , d) Grenzbedingung vor und nach Relaxation mit relativer Abnahme der Scherfestigkeit

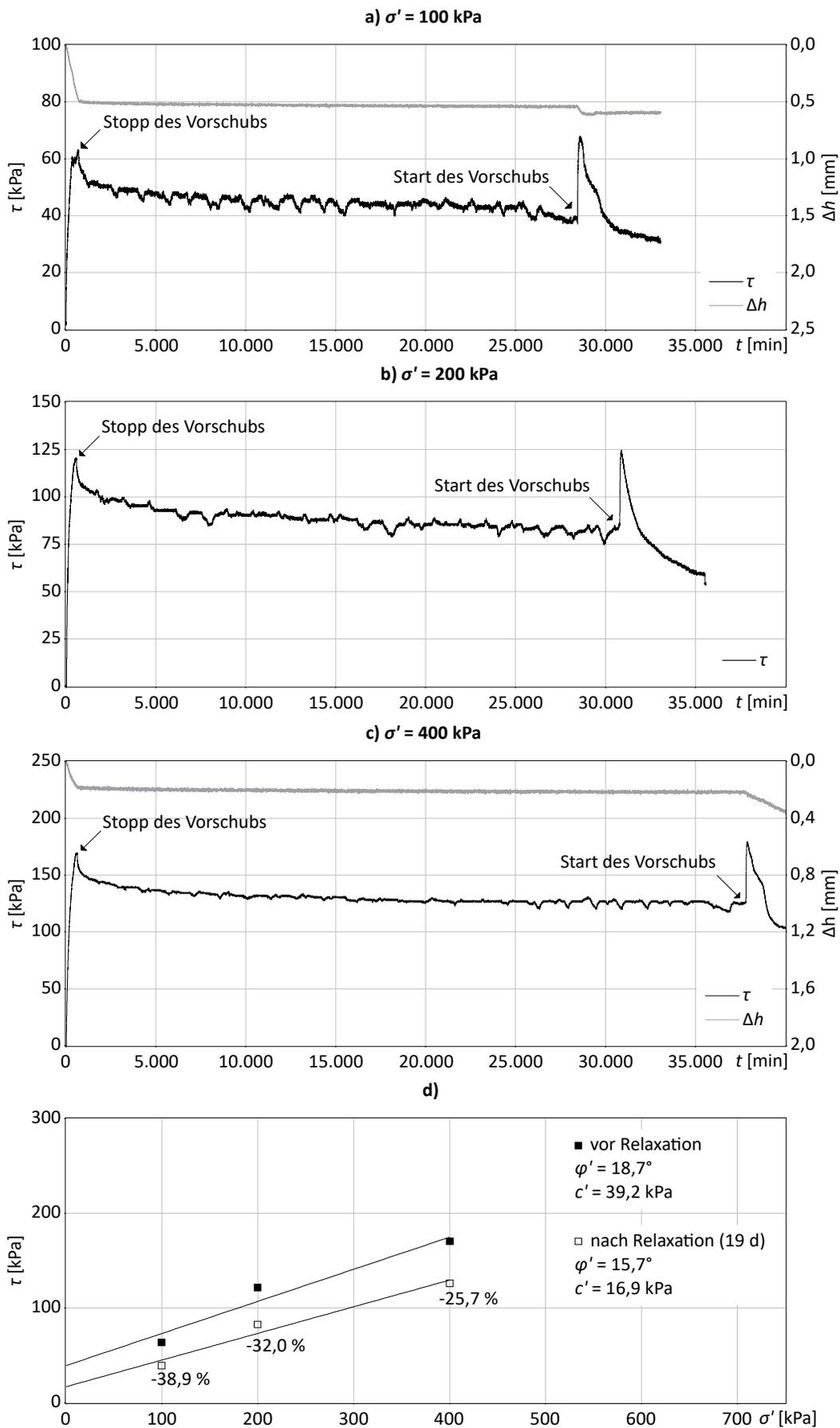


Abbildung 48: Braunkohlenton (BkT3) im Relaxationsversuch, a) bis c) Scherspannung τ und Höhenänderung Δh gegen Zeit t (Spannungsstufe 200 kPa ohne Messung Höhenänderung), d) Grenzbedingung vor und nach Relaxation mit relativer Abnahme der Scherfestigkeit

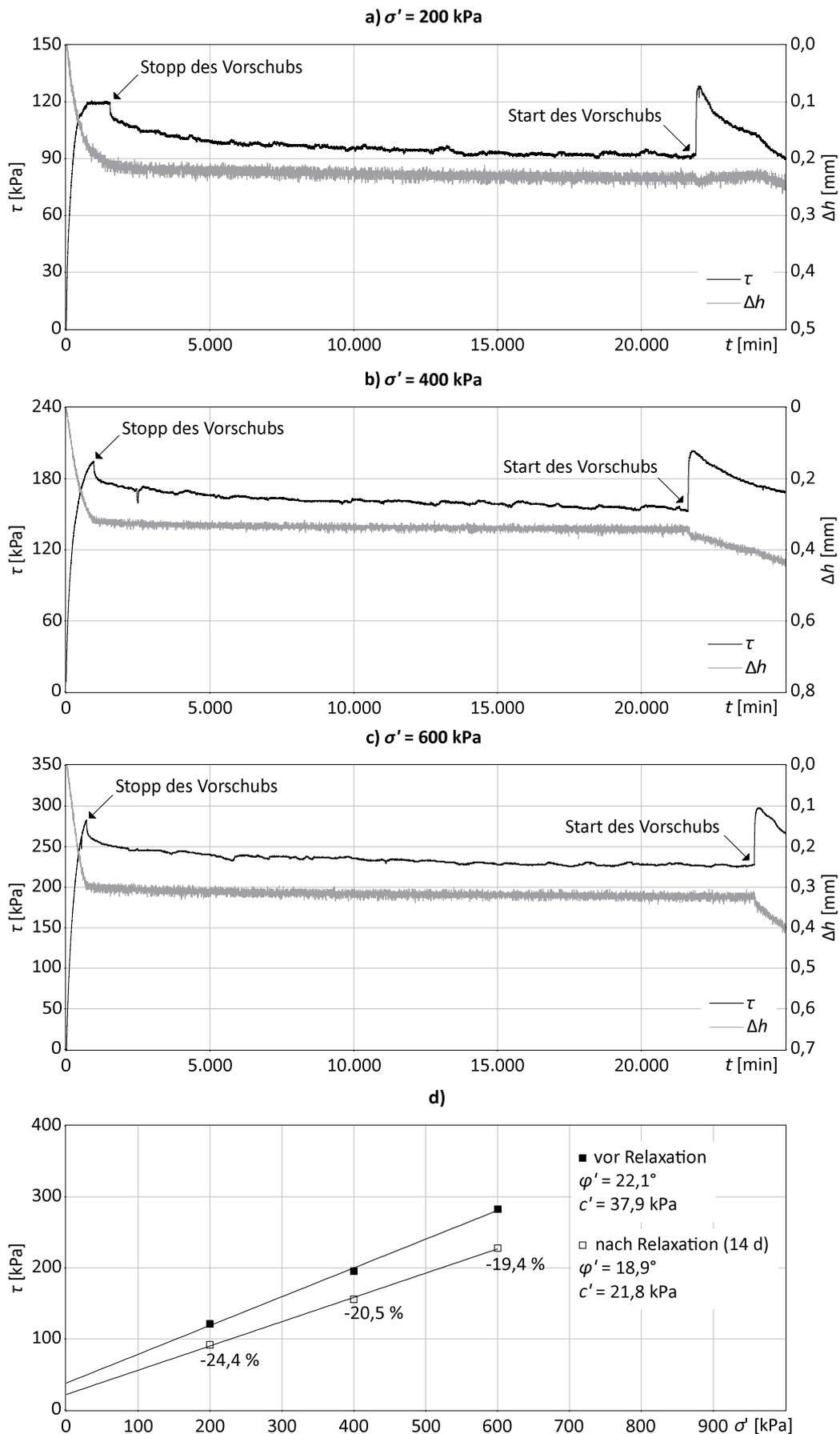


Abbildung 49: Braunkohlenschluff (Probe BkU2) im Relaxationsversuch, a) bis c) Scherspannung τ und Höhenänderung Δh gegen Zeit t , d) Grenzbedingung vor und nach Relaxation mit relativer Abnahme der Scherfestigkeit

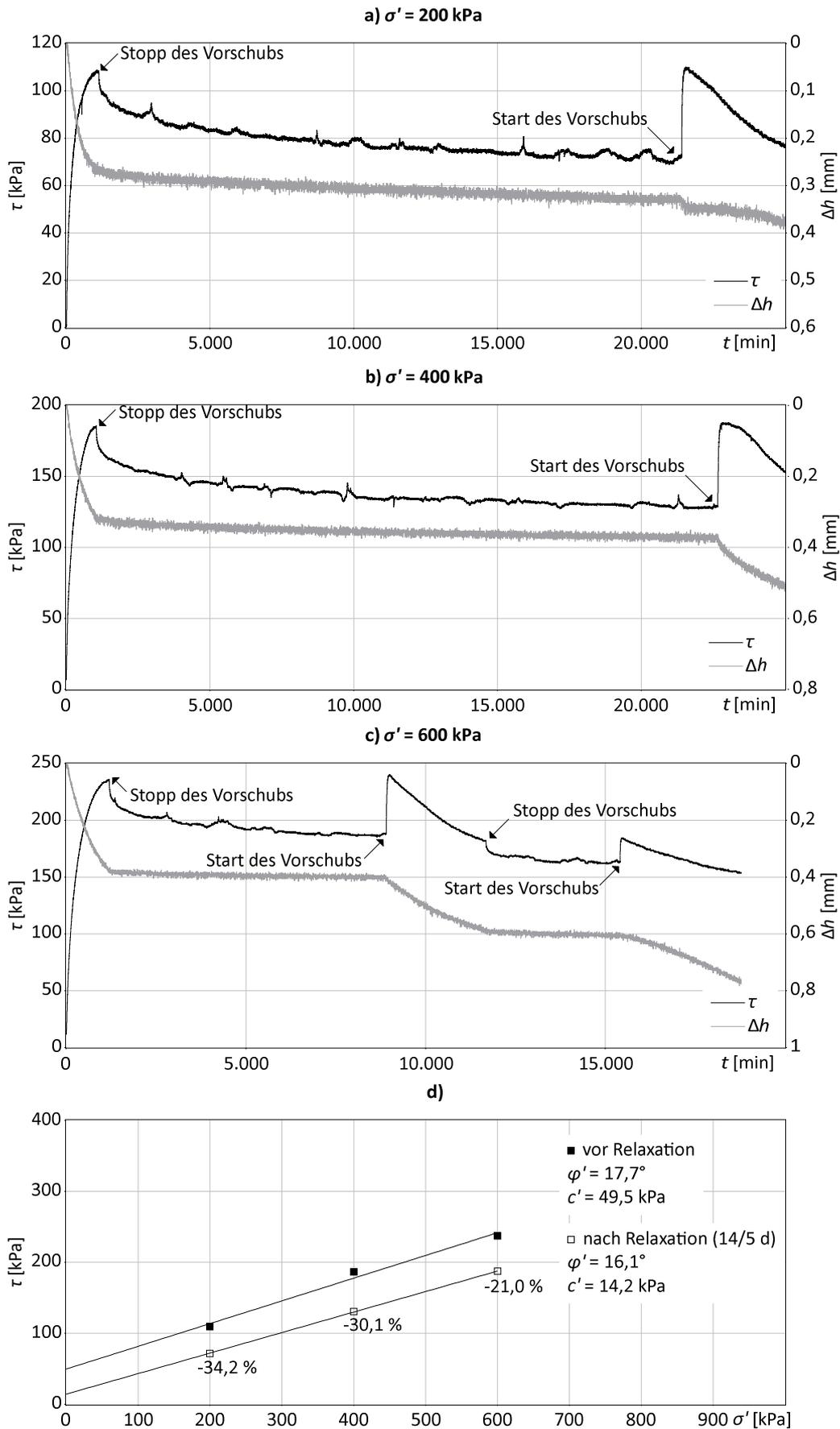


Abbildung 50: Kippe (Probe K1) im Relaxationsversuch, a) bis c) Scherspannung τ und Höhenänderung Δh gegen Zeit t , d) Grenzbedingung vor und nach Relaxation mit relativer Abnahme der Scherfestigkeit

Das Verhalten bei Relaxation kann ähnlich dem Verhalten bei sprunghafter Verringerung der Schergeschwindigkeit gedeutet werden. Beim Stoppen des Vorschubs kommt es an viskosen Kontaktpunkten zu fortgesetzten Verschiebungen und Verdrehungen der Bodenteilchen, wobei die Scherspannung abgebaut wird (Relaxation). Da keine Scherbewegung stattfindet, wird aber kein TESRA-Verhalten sichtbar. Dennoch findet eine Alterung der Scherfuge statt. Die Verfestigung durch die Alterung macht sich erst beim Fortsetzen der Scherbewegung bemerkbar, da dann der Scherwiderstand der neuen Kontaktpunkte sowie der viskose Scherwiderstandsanteils mobilisiert werden. Die anschließende wegabhängige Entfestigung durch die Neuordnung der Bodenteilchen wird in den Relaxationsversuchen weniger deutlich als in den Sprungversuchen. Möglicherweise ist der zur Kompensation erforderliche Scherweg nach der Relaxation länger, wodurch es zu einer Überlagerung mit der nach dem Grenzzustand ohnehin stattfindenden weiteren Entfestigung kommt. Der Anstieg des Scherwiderstands nach der Relaxation erfolgt auch weniger sprunghaft, vermutlich da nach der längeren Alterung zunächst wieder größere Verschiebungen zur Mobilisierung des Scherwiderstands notwendig sind. Der im Folgenden noch gezeigte Vergleichsversuch im Triaxialgerät mit Porenwasserdruckkontrolle deutet darauf hin, dass die Scherwiderstandslinie unmittelbar nach dem Starten des Vorschubs auch durch einen kurzzeitigen Porenwasserüberdruck beeinflusst sein könnte. Ein Schema zu den Vorgängen bei Relaxation im Grenzzustand ist in Abbildung 51 dargestellt.

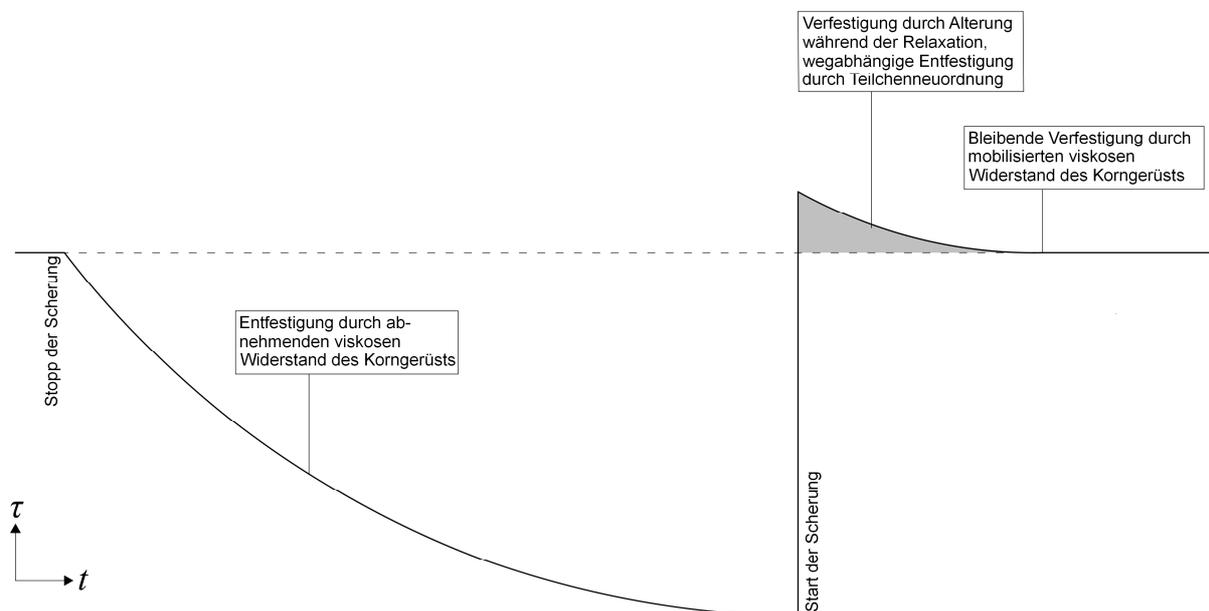


Abbildung 51: Schema zum Verhalten bei Relaxation im Grenzzustand

Die Scherspannungskurven verlaufen während der Relaxation unstet. Es ist in der Regel ein 24-stündiger Zyklus zu erkennen, welcher nach den Temperaturmessungen mit den Temperaturschwankungen im Versuchsraum in Verbindung steht. Der Scherwiderstand nimmt bei Erhöhung der Raumtemperatur leicht zu bzw. bei Verringerung ab. Entsprechend dem zyklischen Verhalten können die Schwankungen des Scherwiderstands auf die Wärmeausdehnung der Versuchsanlage zurückgeführt werden. Um die Abnahme des Scherwiderstands bis zum Ende der Relaxationsphase zu beziffern, wurde jeweils ein Endwert als arithmetisches Mittel über die letzten 24 Stunden ermittelt. Da der Relaxationszeitraum nicht bei allen Einzelversuchen einer Probenreihe identisch war, wurden die Endwerte jeweils nach einer einheitlichen, dem kürzesten Teilversuch entsprechenden Relaxationszeit ausgewertet. Eine Ausnahme bildet der Teilversuch mit der Normalspannung 600 kPa an der Kippe, bei dem zwei getrennte Relaxationsphasen vorgenommen wurden. Hier wurde der Endwert der ersten, im Grenzzustand durchgeführten Relaxationsphase trotz der kürzeren Relaxationszeit in die Auswertung übernommen.

Die Endwerte sind zusammen mit den maximalen Scherspannungen vor dem Stoppen des Vorschubs im Scherspannungs-Normalspannungsdiagramm in Abbildung 47 bis Abbildung 50, Teil d dargestellt. Die Scherwiderstände nehmen während der Relaxation um 19,4 % bis 38,9 % ab. Dabei zeigt sich bei allen Proben eine Abhängigkeit von der Normalspannung: Bei größerer Normalspannung verringert sich die relative Abnahme des Scherwiderstands. Die absolute Abnahme nimmt dagegen bei größerer Normalspannung zu. Die Größenordnung der Abnahme ist bei allen untersuchten Proben vergleichbar.

Bereits an den Versuchen mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit war erkennbar, dass trotz der Abnahme der Geschwindigkeitsabhängigkeit mit zunehmendem Scherweg noch ein Teil des im Grenzzustand gemessenen Scherwiderstands viskoser Natur ist. Die Relaxationsversuche zeigen, dass dieser viskose Scherwiderstandsanteil bei den untersuchten Proben einen erheblichen Anteil an den bei üblichen Schergeschwindigkeiten gemessenen Werten hat. Dieser Scherwiderstandsanteil wird nur bei einer Scherbewegung mobilisiert. Die effektive Scherfestigkeit ist damit aufgrund der viskosen Materialeigenschaften zeitabhängig. Um den Anteil dieser Zeitabhängigkeit an den effektiven Scherparametern abzuschätzen, wurden in Teil d der Abbildungen anhand der maximalen Scherspannungen vor dem Stoppen des Vortriebs sowie anhand der Endwerte der Relaxationsphase lineare Grenzbedingungen ermittelt. Die Ergebnisse der Relaxationsversuche und die Auswertung der Scherparameter sind außerdem in Tabelle 13 zusammengefasst.

Bei allen Versuchen ergibt sich eine deutliche Abnahme der effektiven Kohäsion. Die Abnahme liegt zwischen 16 kPa und 35 kPa beziehungsweise zwischen 42 % und 71 %. Dies entspricht der häufigen Annahme, nach der die effektive Kohäsion zeitabhängig ist (SCHULZ, 1981; VON SOOS & ENGEL, 2008; GOLDSCHIEDER, 2014). Die effektive Kohäsion geht jedoch nicht vollständig verloren, sondern weist auch am Ende der Relaxation mit 14,2 kPa bis 21,8 kPa immer noch eine für Böden bedeutsame Größenordnung auf. Bemerkenswert ist weiterhin, dass bei allen Versuchen auch die effektiven Reibungswinkel abnehmen. Die Abnahme liegt zwischen 1,6° und 3,2° beziehungsweise 9 % und 16 % und damit ebenfalls in einer für praktische Fragestellungen relevanten Größenordnung.

Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Relaxationsversuchen

Material	Probe	σ' [kPa]	$\Delta\tau$ [%]	Schерparameter vor Rel.		Schерparameter nach Rel.	
				φ' [°]	c' [kPa]	φ' [°]	c' [kPa]
Rupelton	R1	200	-31,8	22,0	48,3	19,4	16,9
		400	-25,4				
		600	-21,2				
Braun- kohlenton	BkT3	100	-38,9	18,7	39,2	15,7	16,9
		200	-32,0				
		400	-25,7				
Braun- kohlen- schluff	BkU2	200	-24,4	22,1	37,9	18,9	21,8
		400	-20,5				
		600	-19,4				
Kippe	K1	200	-34,2	17,7	49,5	16,1	14,2
		400	-30,1				
		600	-21,0				

Sowohl der als effektive Kohäsion als auch der als effektiver Reibungswinkel gemessene Scherfestigkeitsanteil der untersuchten überkonsolidierten Böden enthalten demnach einen viskosen, zeitabhängigen Anteil. Die starke Abnahme der Kohäsion deutet darauf hin, dass vor allem der aus der Überkonsolidierung resultierende Scherfestigkeitsanteil auf instabile Kontaktpunkte zurückgeht. Diese Kontaktpunkte ergeben sich möglicherweise aus einer stärkeren Verzahnung der Tonteilchen. Die Abnahme der Reibungswinkel zeigt, dass trotz der Vorbelastung noch ein Teil der normalspannungsabhängigen Zunahme der Scherfestigkeit auf einer Erhöhung viskoser Kontaktpunkte beruht. Bei der Interpretation der Zeitabhängigkeit der Scherparameter muss entsprechend Abschnitt 2.1 beachtet werden, dass diese keine Bodenkonstanten darstellen, sondern die bei überkonsolidierten Böden eigentlich gekrümmte, durch den Koordinatennullpunkt verlaufende Grenzbedingung für einen bestimmten Normalspannungsbereich mittels linearer Regression beschreiben. Die Größe und auch der viskose Anteil der Scherparameter sind damit vom betrachteten Normalspannungsbereich abhängig. Unter dieser Annahme kann die Abnahme beider Scherparameter als eine Abflachung der Grenzbedingung interpretiert werden. Diese Vorstellung ist schematisch in Abbildung 52 dargestellt. Das Schema basiert auf den Versuchsergebnissen des Rupeltons (Probe R1), an die die Grenzbedingungen als Potenzfunktion angepasst wurden.

Für einen normalkonsolidierten Boden wird die Grenzbedingung als linear angenommen. Die am Ende der Relaxation noch auswertbare Kohäsion deutet also darauf hin, dass die Erhöhung der Scherfestigkeit durch die Vorbelastung bei Relaxation nicht vollständig verloren geht. Das könnte darauf zurückzuführen sein, dass durch die Vorbelastung auch die Anzahl der bei Scherung mobilisierbaren direkten Kontaktpunkte zunimmt. Dies könnten neue Kontaktpunkte zwischen in der Tonmatrix liegenden Schluff- und Feinsandteilchen oder zwischen Tonteilchen, deren Wasserhüllen am Kontaktpunkt durch die Vorbelastung verdrängt wurden, sein. Die neuen direkten Kornkontakte weisen keine viskosen Eigenschaften auf und bilden den beobachteten nicht zeitabhängigen Anteil der effektiven Kohäsion.

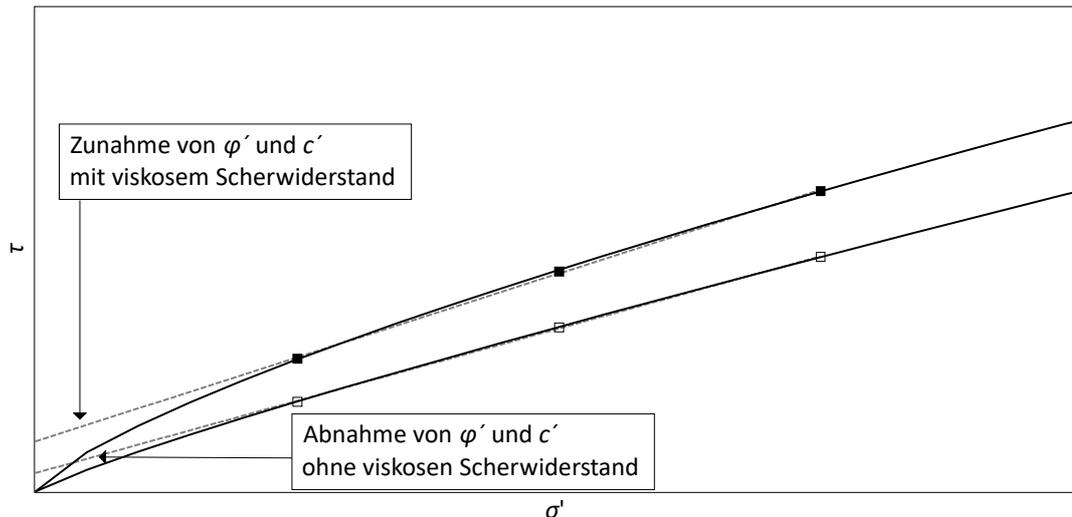


Abbildung 52: Schema zur Zeitabhängigkeit der effektiven Scherparameter bei Annahme einer gekrümmten, durch den Koordinatenursprung verlaufenden Grenzbedingung

Für die am Ende der Relaxationsphasen noch auswertbare effektive Kohäsion können allerdings weitere Gründe diskutiert werden. Am Ende der Relaxationsphasen wurde überwiegend noch kein stationärer Scherwiderstand erreicht. Es ist daher anzunehmen, dass bei Relaxation über sehr viel längere Zeiträume eine weitere Abnahme der effektiven Kohäsion erfolgt. Es ist aber erkennbar, dass sich die Kurven bereits deutlich einem stationären Verlauf angenähert haben. Zumindest in versuchstechnisch realisierbaren Zeiträumen ist daher keine übermäßige weitere Abnahme zu erwarten. Dennoch sind die ausgewerteten Scherparameter am Ende der Relaxation nur als Abschätzung zu betrachten. Dies gilt neben den noch leicht abnehmenden Scherwiderstandskurven auch wegen des deutlichen Temperatureinflusses. Eine weitere Fehlerquelle stellt dar, dass die Rahmenscherversuche keine kontrollierte Probensättigung ermöglichen. Es ist daher nicht auszuschließen, dass auch eine Kapillarkohäsion gemessen wurde.

Aus Abschnitt 5.3 ergibt sich, dass der viskose Scherfestigkeitsanteil bereits nach kurzen Scherwegen zur Verfügung steht und im anschließenden Verlauf der Scherung abnimmt. Der nicht zeitabhängige Scherfestigkeitsanteil wird dagegen erst nach längeren Scherwegen mobilisiert, da zunächst Umlagerungen im Korngerüst erfolgen. Unter der Annahme, dass beim Anhalten des Vorschubs im Grenzzustand noch nicht der vollständige zeitunabhängige Scherfestigkeitsanteil mobilisiert wurde, könnte die Auswertung die nicht zeitabhängigen Scherparameter unterschätzen. Der größte Teil der Abnahme des Viskositätsindex erfolgt jedoch bei allen Proben vor Erreichen des Grenzzustands, so dass der Reibungsanteil im Grenzzustand wahrscheinlich bereits vollständig mobilisiert wurde. Dies bestätigen in den Relaxationsversuchen auch einzelne Versuchskurven, bei denen der Schervorgang erst deutlich nach Erreichen der höchsten Scherfestigkeit angehalten wurde (Abbildung 49, Teil a), oder bei denen eine zweite Relaxationsphase im späteren Scherverlauf ausgeführt wurde (Abbildung 50, Teil c).

Die abgeleiteten Scherparameter nach der Relaxation sind durch den Einfluss der Alterung bei TESRA-Viskosität wahrscheinlich von der bis zum Grenzzustand gefahrenen Schergeschwindigkeit abhängig. Hierauf wird noch einmal in Abschnitt 6 eingegangen.

5.4.2 Vergleichsversuch im Triaxialgerät

In Abbildung 53 ist die Auswertung des Vergleichsversuchs am Braunkohlenschluff im drainierten Triaxialversuch mit Porenwasserdruckkontrolle dargestellt. Wie im Rahmenscherversuch nimmt der Scherwiderstand nach dem Stoppen des Vorschubs zunächst stark ab. Die Kurve geht dann für einen längeren Zeitraum in eine lineare Abnahme über und erreicht am Ende des Versuchs einen etwa stationären Verlauf. Der Zeitraum bis zum Erreichen eines stationären Scherwiderstands ist wesentlich länger als im Rahmenscherversuch. Die Relaxationsphase wurde über einen Zeitraum von 53 Tagen gehalten (Rahmenscherversuch: 14 Tage). Durch den größeren Probenkörper und die zusätzliche Verformungsmöglichkeit im Triaxialversuch benötigen die zum Erreichen eines stabilen Zustands erforderlichen Kornumlagerungen wahrscheinlich wesentlich mehr Zeit.

Beim Stoppen des Vorschubs sowie während der Relaxation war keine Änderung des Porenwasserdrucks messbar. Dies zeigt, dass die zeitabhängige Abnahme des Scherwiderstands nicht auf eine Änderung der effektiven Spannung durch einen verzögerten Porenwasserdruckausgleich, sondern auf den viskosen Widerstand der Kontaktpunkte im Korngerüst zurückgeht.

Während der Relaxation nimmt das Probenvolumen vergleichbar mit der Probenhöhe im Rahmenscherversuch langsam und scheinbar etwa linear ab. Damit zeigt sich wieder die Alterung der Scherfuge durch Volumenkriechen. Diese wird auch beim erneuten Starten des Vorschubs sichtbar. Durch die Verfestigung infolge der Alterung steigt der Scherwiderstand wie bei den Rahmenscherversuchen über den Höchstwert vor der Relaxation. Beim Starten des Vorschubs erfolgt zunächst ein kurzer Anstieg des Porenwasserdrucks und eine Volumenabnahme. Der Scherwiderstand wird beim Starten der Scherung unter einer Verdichtung des gealterten Korngerüsts neu mobilisiert. Im weiteren Scherverlauf geht die Scherung mit einer Zunahme des Probenvolumens (Auflockerung) einher. Dieser Übergang von kontraktantem zu dilatantem Scherverhalten nach dem Starten des Vorschubs entspricht der bereits in den Sprungversuchen beobachteten Neuordnung der Teilchen, bei der sich die Porenzahl in der Scherfuge der neuen Schergeschwindigkeit anpasst.

In Teil b) der Abbildung 53 sind die an den Anfangs- und Endwerten der Relaxationsphase gebildeten Spannungskreise nach MOHR sowie die aus den Rahmenscherversuchen am Braunkohlenschluff ermittelten linearen Grenzbedingungen vor und nach der Relaxation dargestellt. Der Spannungskreis vor der Relaxation passt sich gut in die Grenzbedingung aus dem Rahmenscherversuch ein. Der Spannungskreis nach der Relaxation verläuft dagegen deutlich unterhalb der Grenzbedingung aus dem Rahmenscherversuch. Die effektive Scherfestigkeit hätte während der Relaxation im Triaxialversuch demnach etwas stärker abgenommen. Hierbei muss bedacht werden, dass der gemessene Scherwiderstand im Triaxialversuch auch durch die Volumenabnahme der Probe infolge der Alterung während der Relaxation vermindert wird. Der viskose Scherfestigkeitsanteil wird dadurch im drainierten Triaxialversuch durch die Überlagerung mit dem abnehmenden Probenvolumen wahrscheinlich etwas überschätzt. Aufgrund weiterer abweichender Randbedingungen im Triaxialversuch, wie

der Orientierung der Scherfugen, den Verformungsmöglichkeiten oder dem Sättigungsgrad, ist aber keine sichere Interpretation der größenmäßigen Unterschiede möglich.

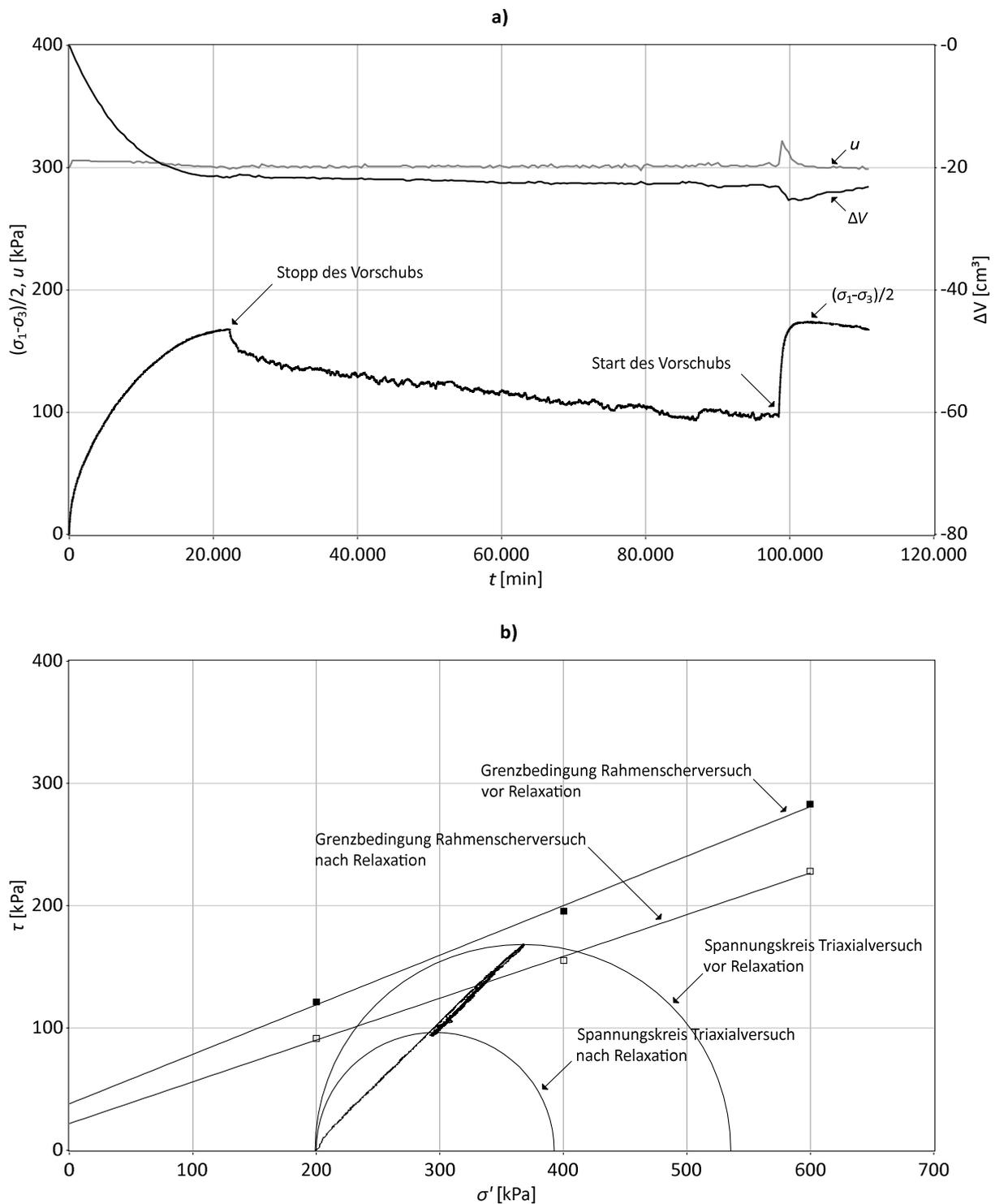


Abbildung 53: Braunkohlenschluff (Probe BkU2) bei Relaxation im drainierten Triaxialversuch, a) Scherwiderstand $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, Porenwasserdruck u und Volumenänderung ΔV gegen die Zeit t , b) Mohr'sche Spannungskreise und Grenzbedingungen aus dem Rahmenscherversuch vor und nach Relaxation im Scherspannungs-Normalspannungsdiagramm

6 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das bislang überwiegend in undrainierten Triaxialversuchen betrachtete viskose Scherverhalten auch in direkten drainierten Scherversuchen beobachtet und untersucht werden kann. Das Verhalten bei Änderung der Schergeschwindigkeit ist insgesamt gut mit den Ergebnissen aus Triaxialversuchen vergleichbar. Es liegen daher wahrscheinlich die gleichen stofflichen Eigenschaften und Vorgänge zugrunde. Dass das Verhalten auch bei drainierten Bedingungen unter sehr langsamen Schergeschwindigkeiten sowie ohne Vorschub (Relaxation) beobachtet werden kann, bestätigt, dass das zeitabhängige Scherverhalten auf einen viskosen Scherwiderstand des Korngerüsts und nicht auf die Änderung der effektiven Spannungen infolge der Porenwasserdruckentwicklung zurückzuführen ist. Dies wird auch durch die Beobachtung der Porenwasserdruckentwicklung in den Vergleichsversuchen im Triaxialgerät belegt. Bei den Sprungversuchen im undrainierten Triaxialversuch führt ein Sprung auf eine größere Stauchungsgeschwindigkeit zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks, es findet also eine Verfestigung des Korngerüsts statt. Der Relaxationsversuch im drainierten Triaxialversuch mit Porenwasserdruckkontrolle zeigt, dass die Relaxation ohne Änderung des Porenwasserdrucks erfolgt.

Durch die Konstruktion von Linien gleicher Schergeschwindigkeit (Isotachen) an den Scherwiderstandskurven der Sprungversuche kann der Einfluss der Schergeschwindigkeit unabhängig von nur vorübergehenden Effekten unmittelbar nach dem Sprung beziffert werden. Dabei nimmt der ausgewertete Viskositätsindex bei allen untersuchten Proben mit zunehmendem Scherweg ab, was mit dem erst nach längeren Scherwegen mobilisierten zeitunabhängigen Reibungsanteil und mit der zunehmenden Einregelung der Tonminerale in der Scherfuge erklärt werden kann. Daraus folgt, dass der Viskositätsindex bei den betrachteten Böden keine Bodenkonstante ist. Für wissenschaftliche Arbeiten muss diese Abhängigkeit der Viskosität von der Verformungsgeschichte beachtet werden, z. B. wenn versucht wird, den Viskositätsindex mit anderen Bodenkennwerten zu korrelieren. In der Praxis ist die Feststellung von Bedeutung, wenn nach den Methoden von GUDEHUS & LEINENKUGEL (1978), GUDEHUS et al. (1992) oder GOLDSCHIEDER (2014) versucht wird, Änderungen der Kriechgeschwindigkeit von Hängen und Böschungen infolge von Sanierungsmaßnahmen oder Grundwasserschwankungen vorherzusagen. In Kriechhängen ist aufgrund der Bewegungsgeschichte in den Scherfugen oder Scherzonen wie im Scherversuch nach längeren Scherwegen von einer Abnahme der Viskosität auszugehen. Wenn der zugrunde gelegte Viskositätsindex nach kurzen Scherwegen ermittelt wurde, wird die scherspannungsabhängige Änderung der Kriechgeschwindigkeit bei den untersuchten Böden überschätzt.

Während mit dem Scherweg die Isotachen-Viskosität abnimmt, zeigt sich zunehmend ein vorübergehender Einfluss der Schergeschwindigkeit auf den Scherwiderstand, der nach kurzen Scherwegen jedoch wieder teilweise bis vollständig kompensiert wird (TESRA-Viskosität). Der Scherwiderstand ist bei Änderungen der Schergeschwindigkeit damit nicht nur von der Geschwindigkeit und dem Scherweg, sondern auch von der Bewegungsgeschichte abhängig. Auch dies muss bei der Ermittlung von Kennwerten oder der Vorhersage von

Kriechgeschwindigkeiten berücksichtigt werden. Die vorübergehenden Effekte gehen wahrscheinlich auf einen in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit unterschiedlich starken Einfluss der Alterung auf die Porenzahl in der Scherfuge zurück, der bei Änderung der Geschwindigkeit durch eine Neuordnung der Teilchen kompensiert wird.

Das TESRA-Verhalten äußert sich beim Rupelton im undrainierten Triaxialversuch aufgrund der verhinderten Volumenänderung nur in der Porenwasserdruckentwicklung und im effektiven Hauptspannungsverhältnis. Der Scherwiderstand zeigt im Gegensatz zum drainierten Rahmenscherversuch weiterhin Isotachen-Verhalten. Für praktische Fragestellungen wie der Prognose der Kriechgeschwindigkeit von Böschungen, bei denen drainierte Bedingungen maßgeblich sind, sollten die Viskositätsindizes daher in drainierten Versuchen bestimmt werden.

An den durchgeführten Relaxationsversuchen zeigt sich, dass bei den untersuchten Böden selbst bei einer langsamen Schergeschwindigkeit von 0,002 mm/min ein erheblicher Anteil der Scherfestigkeit im Grenzzustand viskoser Natur ist. Für die Bemessung von Tagebauendböschungen oder vergleichbare Fragestellungen, bei denen die Langzeitstandfestigkeit von Bedeutung ist, ist bei Verwendung der konventionell ermittelten Scherparameter eine Unterbemessung zu erwarten. Die Scherparameter enthalten einen viskosen Festigkeitsanteil, der nur bei Scherbewegung mobilisiert werden kann. Eine so bemessene Böschung kriecht. Durch anhaltende Kriechbewegung bei Scherspannungen oberhalb der Langzeitfestigkeit ist von einer weiteren Entfestigung in der Scherfuge auszugehen, was zu einem Kriechbruch führt. Für die Bemessung von langzeitfesten Böschungen müsste demnach eine Reduzierung der angesetzten Scherparameter um den viskosen Scherfestigkeitsanteil erfolgen, so dass nur die dauerhaft verfügbare Scherfestigkeit (die Fließgrenze im rheologischen Sinn) ausgenutzt wird.

Der viskose Scherfestigkeitsanteil und die langfristig wirksamen Scherparameter können durch Relaxationsversuche, wie sie in der vorliegenden Arbeit durchgeführt und ausgewertet wurden, abgeschätzt werden. Bei den untersuchten überkonsolidierten Proben nimmt vor allem die effektive Kohäsion infolge der Relaxation ab. Demnach ist der sich aus der Überkonsolidierung ergebende Scherfestigkeitsanteil zu einem großen Teil zeitabhängig und wahrscheinlich auf eine verstärkte Verzahnung der Tonteilchen zurückzuführen. Die effektive Kohäsion nimmt aber nicht vollständig ab, vermutlich da sich durch die Vorbelastung auch eine dauerhafte Erhöhung direkter, nicht viskoser Kornkontakte ergibt. Dass auch die effektiven Reibungswinkel infolge der Relaxation abnehmen, zeigt, dass trotz der Vorbelastung auch die normalspannungsabhängige Zunahme der Scherfestigkeit noch zu einem gewissen Teil auf viskose, indirekte Kontaktpunkte zurückgeht. Unter Annahme eines gekrümmten Verlaufs der Grenzbedingung entspricht die Abnahme der effektiven Kohäsion und des effektiven Reibungswinkels einer Abflachung der Grenzbedingung.

Anhand dieser Erfahrungen kann der zeitabhängige Anteil der effektiven Scherparameter bei vergleichbaren tertiären, überkonsolidierten Böden beurteilt werden. Im Falle der untersuchten Proben aus dem Tagebau Amsdorf ist besonders beim Braunkohlenton mit seinem hohen Tonanteil von einem großen viskosen Scherwiderstandsanteil auszugehen. Aufgrund der

niedrigen Reibungswinkel stellt er ohnehin eine kritische Schicht für die Böschungstabilität und eine bekannte Gleitfläche dar. Der schluffigere Rupelton weist eine ähnlich hohe Abnahme der Scherfestigkeit auf. Der Scherwiderstand des Braunkohlenschluffs nimmt bei Relaxation zwar geringer, aber ebenfalls in einem bedeutsamen Umfang ab.

Nach der Relaxation macht sich eine Verfestigung durch die Alterung der Scherfuge bemerkbar. Es ist davon auszugehen, dass auch das Relaxationsverhalten von der Bewegungsgeschichte abhängig ist. Bei einer langsameren Schergeschwindigkeit vor der Relaxation würde der Scherwiderstand durch die bis dahin stärker wirkende Alterung vermutlich weniger stark abnehmen. Die Verfestigung durch die Alterung scheint aber gegenüber der Entfestigung durch den Wegfall des viskosen Scherwiderstands bei den untersuchten Böden klein zu sein. Dennoch wird die Langzeitfestigkeit mit den abgeleiteten Scherparametern wahrscheinlich zumindest für die schluffigeren Böden mit TESRA-Viskosität etwas unterschätzt.

Bei der Bemessung von Tagebauendböschungen innerhalb der gewachsenen überkonsolidierten Böden sollten die anhand der Peakscherfestigkeiten ermittelten Scherparameter um den zeitabhängigen Anteil reduziert werden, um einen Kriechbruch durch langfristige Kriechbewegungen zu vermeiden. Wenn entlang von bevorzugten Gleitflächen mit der aus Kreisringscherversuchen ermittelten Restscherfestigkeit gerechnet wird, ist die notwendige Korrektur dagegen deutlich geringer einzuschätzen, da die Viskosität bei langen Scherwegen abnimmt. Ob und in welchem Maße die Restscherfestigkeit noch einen zeitabhängigen Anteil enthält, könnte in Relaxationsversuchen im Kreisringschergerät nach langen Scherwegen untersucht werden. Untersuchungen zum Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Restscherfestigkeit von Tonen im Kreisringscherversuch konnten nur noch bei sehr hohen Schergeschwindigkeiten (>1 mm/min) eine Geschwindigkeitsabhängigkeit feststellen (SCARINGI & DI MAIO, 2016) und bestätigen damit die Annahme, dass der zeitabhängige Anteil bei den Scherparametern der Restscherfestigkeit stark abnimmt.

In der Kippe ist die Materialausbildung und damit der zeitabhängige Scherfestigkeitsanteil von dem jeweils verkippten Ausgangsmaterial abhängig. Bei verkippten Tonen ist der zeitabhängige Anteil nach den durchgeführten Versuchen wie in den gewachsenen Böden erheblich. Die Scherfestigkeit und der zeitabhängige Festigkeitsanteil sind durch die starke Störung des Materials gegenüber den gewachsenen Böden bei Betrachtung eines größeren Gebirgsausschnitts möglicherweise vermindert. Dieser Maßstabseinfluss lässt sich jedoch mit den im Labor möglichen Probengrößen, auch im Großrahmenscherversuch, nicht nachweisen. Aufgrund des großen Anteils an Makroporen bzw. der geringen Dichte der Kippe sind zur Mobilisierung der Scherfestigkeit lange Scherwege notwendig. Daher sollte bei der Böschungsbemessung unabhängig von der zeitabhängigen Scherfestigkeit nicht die Peakscherfestigkeit zu Grunde gelegt werden, um einen progressiven Bruch durch lokale Entfestigungen in der inhomogenen Kippe zu vermeiden.

Die untersuchten Proben sind mit Blick auf die erdgeschichtliche Entwicklung und die hohen Konsistenzzahlen als stark überkonsolidiert zu kennzeichnen. Die Größe des aus den Relaxationsversuchen abgeschätzten viskosen Scherfestigkeitsanteils lässt sich nicht ohne weiteres auf normalkonsolidierte Böden übertragen. Da wahrscheinlich auch der Winkel der

Gesamtscherfestigkeit einen Festigkeitsanteil durch eine zunehmende Verzahnung der Tonteilchen enthält, wäre anzunehmen, dass auch normalkonsolidierte Böden bei den üblichen Schergeschwindigkeiten einen gewissen viskosen Scherwiderstandsanteil aufweisen. In undrainierten Triaxialversuchen konnte dies jedoch bislang nicht festgestellt werden (BECKER, 2009; KRIEG, 2010). Möglicherweise wird der viskose Scherwiderstand bei normalkonsolidierten Böden vollständig durch die zeitabhängige Verfestigung (Alterung) kompensiert. Es erscheint lohnenswert, zukünftig auch normal- oder leicht überkonsolidierte Böden mit den in der vorliegenden Arbeit angewandten Relaxationsversuchen im direkten Scherversuch zu untersuchen.

Da Kriechen und Relaxation als thermisch angeregte Vorgänge zu betrachten sind, lässt sich die quantitative Auswertung der bei Raumtemperatur ausgeführten Relaxationsversuche möglicherweise nur bedingt auf den praktischen Anwendungsfall übertragen. Bei einer wesentlich geringeren Untergrundtemperatur von etwa 10 °C ist eine Abnahme des viskosen Scherwiderstandsanteils zu erwarten. Dieser Temperatureinfluss sollte in weiterführenden Untersuchungen betrachtet werden.

Die Beobachtung des zeitabhängigen Scherverhaltens lässt auch einige Rückschlüsse auf die Natur des Scherwiderstands der untersuchten Böden zu. Das reine Isotachen-Verhalten des Braunkohlentons deutet darauf hin, dass der Scherwiderstand vorrangig auf den Widerstand gegen Verschiebung oder Verdrehung der plattigen, miteinander verzahnten Tonminerale zurückgeht. Die gröberen Schluffanteile sind wahrscheinlich vollständig von der Tonmatrix umschlossen. Der bei Scherung mobilisierte nicht viskose Scherwiderstand geht möglicherweise auch vorrangig auf die Bildung stabiler Berührungspunkte zwischen den Tonteilchen zurück. Der Rupelton weist sowohl Isotachen- als auch TESRA-Verhalten auf. Der Scherwiderstand basiert demnach wahrscheinlich sowohl auf Verzahnungen der Tonteilchen als auch auf Reibung zwischen den gröberen Schluff- und Feinsandteilchen. Beim Braunkohlenschluff ist nach dem Überschreiten des Grenzzustandes reines TESRA-Verhalten maßgeblich. Bei Scherung bildet sich in der Scherfuge wahrscheinlich ein Gerüst aus Schluff- und Feinsandteilchen aus, dessen Korn-zu-Korn-Reibung dann den überwiegenden Scherwiderstand bildet. Die Überwindung von Dilatanz scheint trotz der Überkonsolidierung bei keinem der untersuchten Böden einen wesentlichen Anteil am Scherwiderstand auszumachen.

Es lässt sich abschließend schlussfolgern, dass die effektive Scherfestigkeit zeitabhängig ist. Diese Zeitabhängigkeit beruht auf einem kleineren viskosen Scherwiderstand des Korngerüsts bei geringerer Schergeschwindigkeit bzw. längerer Versuchszeit. Dieser zeitabhängigen Entfestigung wirkt eine zeitabhängige Verfestigung durch die Alterung der Scherfuge entgegen. Die Größe und das Verhältnis dieser gegenläufigen Vorgänge scheinen vorrangig von der Materialausbildung und möglicherweise auch vom Überkonsolidierungsgrad abhängig zu sein. Der Einfluss des viskosen Scherwiderstands nimmt vor allem mit steigendem Tonanteil zu, wahrscheinlich, da die zahlreichen plättchenförmigen Tonteilchen den Verzahnungsgrad des Korngerüsts erhöhen. Neben der Materialausbildung und der Zeit sind aber auch die Bewegungsgeschichte sowie der betrachtete Normalspannungsbereich von Bedeutung. Verallgemeinernde Aussagen zum zeitabhängigen Scherverhalten sind aufgrund der

vielfältigen Einflussgrößen nur bedingt möglich. Die Aufstellung oder Anwendung von stets vereinfachenden Stoffgesetzen sollte dahingehend immer einer kritischen Prüfung unterliegen. Es muss vor allem beachtet werden, dass die das Bodenverhalten beschreibenden Kenngrößen häufig keine echten Bodenkonstanten sind.

7 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Kenntnisstand zum zeitabhängigen Scherverhalten anhand direkter Scherversuche im Rahmenschergerät zu erweitern und eine Abschätzung des zeitabhängigen Anteils der effektiven Scherparameter vorzunehmen. Die Untersuchungen erfolgten an 4 Böden aus dem Tagebau Amsdorf: Dem oligozänen Rupelton, dem eozänen Braunkohlethon, dem eozänen Braunkohlenschluff und der im Tagebau anfallenden bindigen Mischbodenkippe. Die 3 gewachsenen Böden sind hinsichtlich ihrer erdgeschichtlichen Entwicklung als überkonsolidiert anzusehen. Die untersuchte Probe der Mischbodenkippe wurde im noch nicht aufgesättigten Innenkippenbereich gewonnen. Nach dem geringen Wassergehalt bzw. der hohen Konsistenzzahl ist sie ebenfalls noch durch die Überkonsolidierung geprägt. Durch die Störung der Ausgangsböden bei Abbau und Verkippung ist das Material jedoch stark gestört und liegt in Form von größeren Tonbrocken (Pseudokornstruktur) vor. Ein Einfluss dieser besonderen Struktur auf die effektiven Scherparameter ließ sich jedoch in einem Vergleichsversuch im Großrahmenschergerät nicht nachweisen. Es zeigt sich aber, dass zur Mobilisierung der Peakscherfestigkeit ein längerer Scherweg notwendig ist, da zunächst das Makroporengefüge verdichtet werden muss.

Zur Untersuchung des zeitabhängigen Scherverhaltens wurden zum einen Scherversuche mit sprunghafter Änderung der Schergeschwindigkeit durchgeführt. Dabei bestätigt sich die aus Triaxialversuchen bekannte Abhängigkeit des Scherwiderstands von der Schergeschwindigkeit. Es zeigt sich jedoch nur beim Braunkohlethon ein reines Isotachen-Verhalten, bei dem jeder Schergeschwindigkeit eine kennzeichnende Scherwiderstandslinie zugeordnet ist. Bei den anderen 3 Böden wird ab dem Erreichen des Grenzzustands die Änderung des Scherwiderstands nach einem gewissen Scherweg durch eine entgegenwirkende Verfestigung bzw. Entfestigung zumindest teilweise wieder kompensiert (TESRA-Viskosität). Dies kann auf eine Neuordnung der Teilchen durch die in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit unterschiedlich stark wirkende Alterung der Scherfuge zurückgeführt werden.

Die Sprungversuche zeigen weiterhin, dass die Viskositätsindizes bei Scherung bis zum Grenzzustand bei allen 4 Böden deutlich abnehmen. Dies kann auf die erst bei größeren Scherwegen mobilisierte Korn-zu-Korn-Reibung zurückgeführt werden, welche zunächst Umlagerungen im Korngerüst erfordert. Eine weitere schwache Abnahme der Indizes nach dem Grenzzustand ist wahrscheinlich mit der zunehmenden Einregelung der Tonminerale zu erklären. Durch die Abhängigkeit der Indizes vom Scherweg sowie auch das zunehmende TESRA-Verhalten sollte der Viskositätsindex nicht als Bodenkonstante angesehen werden. Bei Anwendung dieses Kennwerts muss die Bewegungsgeschichte der Scherfuge berücksichtigt werden.

Zwei undrainierte Vergleichsversuche im Triaxialgerät zeigen, dass sich das TESRA-Verhalten beim Rupelton nur in der Entwicklung des Porenwasserdrucks bzw. der effektiven Spannungen äußert. Der Scherwiderstand weist durch die behinderte Volumenänderung reines Isotachen-Verhalten auf. Außerdem nimmt der Viskositätsindex nicht wie im Rahmenscherversuch mit dem Scherweg ab. Für baupraktische Fragestellungen unter drainierten Bedingungen sollte der

Viskositätsindex daher auch in drainierten Versuchen ermittelt werden. Der Braunkohlenton weist im Triaxialversuch dagegen das gleiche geschwindigkeitsabhängige Verhalten wie im Rahmenscherversuch auf. Anhand der Porenwasserdruckentwicklung ist zu erkennen, dass auch beim Braunkohlenton eine Kompensation der Porenzahl bei Änderung der Schergeschwindigkeit erfolgt. Dennoch zeigt das effektive Hauptspannungsverhältnis wie der Scherwiderstand im Rahmenscherversuch reines Isotachen-Verhalten. Daher ist zu schlussfolgern, dass der Scherwiderstand beim tondominierten Braunkohlenton vorwiegend auf Verzahnungen der durch einen großen Porenraum gekennzeichneten Tonmatrix basiert, so dass die Änderung der Porenzahl nur einen geringen Einfluss auf den Scherwiderstand hat. Bei den schluffigeren Böden wird der Scherwiderstand dagegen stärker von Änderungen der Porenzahl bestimmt, was zu einem größeren Anteil der TESRA-Viskosität führt.

Um den Anteil des viskosen Scherwiderstands an den effektiven Scherparametern zu beziffern, wurden Relaxationsversuche durchgeführt, bei denen die Scherung etwa beim Erreichen des Grenzzustands der höchsten Scherfestigkeit angehalten wurde. In der Folge nahm der Scherwiderstand bei allen 4 Böden durch Relaxation in einer erheblichen Größenordnung ab. Sobald erkennbar war, dass der Scherwiderstand einem konstanten Wert entgegenstrebt, wurde der Schervorgang fortgesetzt. In einer Zunahme der Probensetzung und einem erhöhten Scherwiderstand bei Fortsetzung der Scherung zeigt sich wie bei den Sprungversuchen eine Alterung der Scherfuge. Anhand der Endwerte des Scherwiderstands nach der Relaxation wurden die Scherparameter ohne viskosen Scherwiderstand ermittelt und mit den am Peak vor der Relaxation bestimmten Scherparametern verglichen. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der effektiven Kohäsion zwischen 16 kPa und 35 kPa beziehungsweise zwischen 42 % und 71 %. Die effektiven Reibungswinkel nehmen zwischen $1,6^\circ$ und $3,2^\circ$ beziehungsweise zwischen 9 % und 16 % ab. Die Abnahme beider Scherparameter wird als eine Abflachung der unterhalb der Vorbelastungsspannung gekrümmten Grenzbedingung interpretiert. Der viskose Scherwiderstand resultiert demnach in erster Linie aus der stärkeren Verzahnung der Bodenteilchen infolge der Überkonsolidierung. Die am Ende der Relaxation noch messbare Kohäsion geht möglicherweise darauf zurück, dass infolge der Vorbelastung auch die Anzahl direkter, zeitlich stabiler Kontaktpunkte zunimmt. Bei einer Böschungsbemessung mit den effektiven Scherparametern überkonsolidierter Böden ist eine Korrektur für den viskosen Scherwiderstandsanteil erforderlich, da sonst mit einem anhaltenden Kriechen sowie infolge weiterer Entfestigung mit einem Kriechbruch zu rechnen ist. Aufgrund der auch im Relaxationsversuch festgestellten Alterung der Scherfuge ist davon auszugehen, dass der Wegfall des viskosen Scherwiderstands zu einem gewissen Teil durch eine zeitabhängige Verfestigung kompensiert wird, so dass die ermittelten langfristig wirksamen Scherparameter für Böden mit Anteilen an TESRA-Viskosität wahrscheinlich etwas unterschätzt werden.

Am Braunkohlenschluff wurde ein vergleichender Relaxationsversuch im Triaxialgerät unter drainierten Bedingungen und mit Porenwasserdruckkontrolle durchgeführt. Dieser bestätigt die Beobachtungen aus den Relaxationsversuchen. Die Abnahme des Scherwiderstands dauert jedoch wesentlich länger und ist größer, was auf die geometrischen Randbedingungen, aber auch auf die Überlagerung mit der alterungsbedingten Volumenabnahme der Probe zurückzuführen ist. Der während der Relaxation unveränderte Porenwasserdruck bestätigt, dass

die beobachtete zeitabhängige Abnahme der Scherfestigkeit nicht auf eine Änderung der effektiven Spannung, sondern auf den viskosen Widerstand des Korngerüsts zurückzuführen ist.

Literaturverzeichnis

- Becker, P. (2009): Zeit- und spannungspfadabhängiges Verformungsverhalten bei Baugruben in weichen Böden. Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 22
- Berre, T. & Bjerrum, L. (1973): Shear Strength of Normally Consolidated Clays. In: 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Moscow), 39-49
- Bjerrum, L. (1973): Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils. In: 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Moscow), 111-190
- Blumenstengel, H., Krutzsch, W., Volland, L. (2002): Exkursionsführer in das Tertiär des Tagebaues Amsdorf. Exkurs.f. u. Veröfftl. GGW, 216, 29-49
- Blumenstengel, H. & Volland, L. (2002): Alte und neue Ergebnisse einer Aufschlussdokumentation als Beitrag zur regionalen Geologie und zur geologischen Landesaufnahme des GLA Halle. Exkurs.f. u. Veröfftl. GGW, 216, 10-12
- Blumenstengel, H. & Krutzsch, W. (2008): Tertiär. In: Geologie von Sachsen-Anhalt, 689 S. (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)
- Burland, J. (1990): On the compressibility and shear strength of natural clays. Géotechnique 40, No. 3, 329-378
- Enomoto, T., Kawabe, S., Tatsuoka, F., Di Benedetto, H., Hayashi, T., Duttine, A. (2009): Effects of Particle Characteristics on the Viscous Properties of Granular Materials in Shear. Soils and foundations, 49:1, 25-49
- Enomoto, T., Koseki, J., Tatsuoka, F., Sato, T. (2016): Rate-dependent behaviour of undisturbed gravelly soil. Soils and foundations, 56:3, 547-558
- Floss, R., Wälzel, E., Ostermayer, H. (1992): Bestimmung der Langzeitfestigkeit von Böschungen. Straße und Autobahn, 43:4, S. 257-258
- Förster, W. (2001): Geotechnik. In: Wissenschaftliche Begleitung der ostdeutschen Braunkohlesanierung, Eigenverlag der LMBV, 17-47
- Gabriel, B. (1982): Zur Problematik der Nachnutzung der Tagebaurestlochbereiche im Raum südwestlich der Halleschen und Röthaer Störung. Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Band 7, 51-66
- Gärtner, G. (2001): Kriechbewegungen und deren Überwachung am Beispiel der Böschungsrutschung im Absetzerrestloch 13 des ehemaligen Braunkohletagebaues Zwenkau. TU Braunschweig (Dissertation)
- Goldscheider, M. (2014): Mechanik des Kriechens von Böschungen und Hängen. geotechnik, 37:4, 259-270
- Gottstein, G. (2014): Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 4. Aufl., 634 S. (Springer Vieweg)

- Graham, J., Crooks, J. H. A., Bell, A. L. (1983): Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays. *Géotechnique* 33, No. 3, 327-340
- Gudehus, G. & Leinenkugel, H.-J. (1978): Fließdruck und Fließbewegung in bindigen Böden: Neue Methoden. In: Vorträge der Baugrundtagung 1978 in Berlin, 411-429
- Gudehus, G. (1981): *Bodenmechanik*. 268 S. (Enke Verlag)
- Gudehus, G., Goldscheider, M., Lippmann, R. (1985): Ingenieurgeologische und bodenmechanische Untersuchungen an Kriechhängen. In: *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*, 316-335
- Gudehus, G., Kreuter, H., Lippmann, R. (1992): Untersuchungsmethoden zur Sanierung von Baugebieten durch Hangverdübelung, Schlussbericht. 67 S. (IRB Verlag)
- Gudehus, G. (2021): Implications of the principle of effective stress. *Acta Geotech.*, 16, 1939–1947
- Hinchberger, S. & Qu, G.-F. (2007): Discussion: Influence of structure an time-dependent behaviour of a stiff sedimentary clay. *Géotechnique* 57, No. 9, 783-787
- Höwing, K.-D. & Kutter, H. K. (1985): Kriechverhalten gefüllter Gesteinstrennflächen. In: *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*, 526-540
- Kolymbas, D. & Herle, I. (2008): Stoffgesetze für Böden. In: *Grundbau-Taschenbuch*, 814 S., (Ernst & Sohn)
- Krieg, S. (2000): Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei. *Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe*, Heft 150
- Lade, P. V. (2010): The mechanics of surficial failure in soil slopes. *Engineering Geology*, 114, 57-64
- Lagaly, G. (1993): Reaktionen der Tonminerale. In: *Tonminerale und Tone*, 490 S. (Steinkopff)
- Leinenkugel, H. J. (1967): Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. *Veröffentlichungen des Instituts für Boden- und Felsmechanik der Universität Karlsruhe*, Heft 66
- LMBV (1999): Bauen auf Mischbodenkippen des Braunkohlenbergbaus im mitteldeutschen Revier. *Verwendungsnachweis T1.2. Schlussbericht*. 150 S. (Selbstverlag)
- Locat, J. & Demers, D. (1988): Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journey*, Vol. 25, 799-806
- Müller, A. (2013): *Exkursionsführer zur Sitzung der Subkommission Tertiär-Stratigraphie*. 20.-22. März 2013 in Leipzig., 1-53
- Müller-Vonmoos, M. & Kohler, E.E. (1993): Geotechnik und Entsorgung. In: *Tonminerale und Tone*, 490 S. (Steinkopff)

- Nix, Thomas (2003): Untersuchung der ingenieurgeologischen Verhältnisse der Grube Messel (Darmstadt) im Hinblick auf die Langzeitstabilität der Grubenböschungen. TU Darmstadt (Dissertation)
- Oka, F., Kodaka, T., Kimoto, S., Ishigaki, S., Tsuji, C. (2003): Step-changed strain rate effect on the stress-strain relations of clay and a constitutive modeling. *Soils and foundations*, 43:4, 189-202
- Powrie, W. (2014): *Soil Mechanics: Concepts and Applications*. 3. Aufl., 682 S. (CRC Press)
- Prinz, H. & Strauß, R. (2018): *Ingenieurgeologie*. 6. Aufl., 899 S. (Springer Spektrum)
- Radzinski, K.-H., Ehling, B.-C., Kunert, R., Beutler, G. (2008): Südöstliches Harzvorland. In: *Geologie von Sachsen-Anhalt*, 689 S. (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)
- Ramamurthy, T. (2001): Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38:5, 683-697
- Roos, E., Maile, K., Seidenfuß, M. (2017): Thermisch aktivierte Vorgänge. In: *Werkstoffkunde für Ingenieure*, 443 S., (Springer Vieweg)
- Scaringi, G. & Di Maio, C. (2016): Influence of Displacement Rate on Residual Shear Strength of Clays. *Procedia Earth and Planetary Science*, 16, 137-145
- Schmertmann, J. H. (1964): Generalizing and Measuring the Hvorslev Components of Shear in Clays. *Engineering Progress at the University of Florida XIX*, Nr. 3 (Nachdruck aus *Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM No. 361)
- Schmertmann, J. H. (2012): New concepts for the mobilization of the components of shear resistance in clay - a review of a large experimental study to determine the behavior of Mohr-Coulomb cohesion and friction in clay. Publication 208, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo
- Schneider-Muntau, B. (2013): *Zur Modellierung von Kriechhängen*. 208 S. (Logos-Verlag)
- Scholz, C. H. (1998): Earthquakes and friction laws. *nature*, 391, 37-42
- Schulz, H. (1981): Zur Festigkeit überverdichteter Tone. *Mitt.-Bl.d.BAW*, 50,
- Schwiteilo, E., Herle, I., Dahmen, D., Karcher, C. (2016): Änderung der Konsistenzgrenzen bei Mischvorgängen an Böden. *World of Mining - Surface & Underground*, 68:6, 376-384
- Schwiteilo, E. & Herle, I. (2017): Vergleichsstudie zur Kompressibilität und zu den Scherparametern von Ton aus Ödometer- und Rahmenscherversuchen. *geotechnik*, 40:3, 204-217
- Sorensen, K. K. & Okkels, N. (2013): Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 1-6
- Sorensen, K., Baudet, B. A., Simpson, B. (2007): Influence of structure an time-dependent behaviour of a stiff sedimentary clay. *Géotechnique* 57, No. 1, 113-124
- Strobel, G. (2008): *Geologie und Umwelt*. In: *Geologie von Sachsen-Anhalt*, 689 S. (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)

Tatsuoka, F., Di Benedetto, H., Enomoto, T., Kawabe, S., Kongkitkul, W. (2008): Various viscosity types of geomaterials in shear and their mathematical expression. *Soils and foundations*, 48:1, 41-60

VEB BKW Geiseltal (1980): Kennwertanalyse, Baufeld 3E, Tgb. Amsdorf. 5 S., 7 A. (unveröffentlicht)

von Soos, P. & Engel, J. (2008): Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor. In: *Grundbau-Taschenbuch*, 814 S., (Ernst & Sohn)

Wälzel, E. & Ostermayer, H. (1990): Schlussbericht zum Forschungsvorhaben "Bestimmung der Langzeitfestigkeit von Böschungen. Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, Technische Universität München

Betreute Abschlussarbeiten:

Glatzel, J. (2018): Sedimentologie einer bindigen Mischbodenkippe und ihrer tertiären Ausgangsmaterialien im Tagebau Amsdorf. Unveröffentlichte Masterarbeit am Institut für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Kühnast, C. (2020): Vergleich von verschiedenen Tonvorkommen im südlichen Sachsen-Anhalt anhand bodenmechanischer Parameter. Unveröffentlichte Bachelorarbeit am Institut für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Meffert, A. (2018): Methodenvergleich zur Bestimmung der Sensitivität von Böden. Unveröffentlichte Masterarbeit am Institut für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Verwendete DIN-Normen:

DIN 18121-1 (1998): Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung (zurückgezogen)

DIN 18122-1 (1997): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze (zurückgezogen)

DIN 18123 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung (zurückgezogen)

DIN 18124 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer (zurückgezogen)

DIN 18128 (2002): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes

DIN 18137-1 (2010): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 1: Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen

DIN 18137-2 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 2: Triaxialversuch (zurückgezogen)

DIN 18137-3 (2002): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 3: Direkter Scherversuch (zurückgezogen)

DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

DIN EN ISO 14688-1 (2020): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018

DIN EN ISO 14688-2 (2020): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-2:2018

DIN EN ISO 22475-1 (2007): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung (zurückgezogen)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Halle (Saale), 01.02.2023

Unterschrift

Lebenslauf

Persönliche Daten

Vor- und Zuname: Christian Soellig

Geburtsdatum: 01.11.1981

Geburtsort: Weimar

Staatsangehörigkeit: deutsch

Familienstand: ledig

Berufliche Tätigkeit

2016 bis heute Lehraufträge an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Module:

Ingenieurgeologische Erkundung (bis 2018)

Grundlagen der Bodenmechanik (bis 2018)

Grundlagen der Angewandten Geologie II (seit 2018)

2010 bis heute freiberufliche Tätigkeit als Geowissenschaftler

Schwerpunkte: Ingenieurgeologie und geotechnische Berechnungen

2006 bis 2010 Projektbearbeiter

Ingenieurbüro für Umwelt- und Hydrogeologie GmbH (Halle, Saale)

Bildungsweg

Hochschulausbildung

2010 bis 2013 Studium der Angewandten Geowissenschaften (M.Sc.)

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

2002 bis 2007 Studium der Angewandten Geowissenschaften (B.Sc.)

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Zivildienst

2001 Heil- und Sozialpädagogisches Heim Wippra

Schulausbildung

1993 bis 2000 Friedrich-Schiller-Gymnasium in Sangerhausen

Abschluss: Abitur

1988 bis 1993 Grundschule in Meiningen und Sangerhausen

Veröffentlichungen

Pöllmann, H., Karfunkel, J., Debrot, P., Soellig, C. (2014). Staurolith mit Granat und Monazit aus dem Pegmatitgebiet von Linópolis, Minas Gerais. *Der Aufschluss*, 65:1, 54-60

Soellig, C. & Lempp, C. (2014): Laboruntersuchungen zum Verformungsverhalten saalekaltzeitlicher Geschiebemergel. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, 36, 21-32

Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Christof Lempp für die geduldige Betreuung der Arbeit und die Anregung zur Beschäftigung mit dem zeitabhängigen Bodenverhalten.

Herrn Prof. Dr. Ivo Herle, Leiter des Instituts für Geotechnik an der TU Dresden, möchte ich für die kurzfristige Bereitschaft zur Begutachtung der Arbeit danken.

Für die finanzielle Unterstützung und die gebotenen Möglichkeiten zur Probenahme danke ich der Romonta GmbH als Betreiber des Tagebaus Amsdorf. Hierbei gilt mein besonderer Dank Herrn Frank Knoche für seine unermüdliche Unterstützung.

Der Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar danke ich für die Möglichkeit zur Ausführung des Großrahmenscherversuchs und die dabei gebotene Unterstützung. Mein Dank gilt insbesondere Frau Dr. Anja Damaschke.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei Herrn Juri Buchantschenko vom Institut für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg für seine technische Unterstützung im bodenmechanischen Labor bedanken.