

Finite Elemente-Simulationen von Sandboxversuchen zur Untersuchung des Clay Smear-Prozesses

Finite Element-Simulations of Sandboxexperiments to analyse the clay-smear-process

Gisa Kleine Vennekate¹, Martin Ziegler², Sohrab Noorsalehi-Garakani³, Janos L. Urai⁴

¹ Dipl.-Ing. Gisa Kleine Vennekate, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, vennekate@geotechnik.rwth-aachen.de

² Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen, ziegler@geotechnik.rwth-aachen.de

³ Dipl.-Geol. Sohrab Noorsalehi-Garakani, Geologie – Endogene Dynamik, RWTH Aachen, s.noorsalehi@ged.rwth-aachen.de

⁴ Univ.-Prof. Dr. Janos L. Urai, Geologie – Endogene Dynamik, RWTH Aachen, j.urai@ged.rwth-aachen.de

Zusammenfassung

Kenntnisse über den Eintrag von Ton in eine Störungszone sind bei der Lagerstättenerkundung und Erdölförderung von entscheidender Bedeutung. In einem interdisziplinären Forschungsprojekt wird dieser Prozess mit Felduntersuchungen, Sandboxexperimenten und numerischen Simulationen untersucht. In diesem Beitrag werden die numerischen Simulationen der Sandboxexperimente vorgestellt. Zunächst wird anhand eines simulierten Trap-door-Versuchs gezeigt, dass die verwendete numerische Methode zur Simulation der Scherfugenbildung geeignet ist. Anschließend werden die Ergebnisse von Sandboxversuchen mit reinem Sandmaterial und mit Sand-Ton-Sequenzen vorgestellt. Es zeigt sich, dass die Ausdünnung der Tonschicht innerhalb der Scherfuge sehr gut mit den Laborversuchen übereinstimmt. Mit unterschiedlichen Tonparametern lässt sich schließlich zeigen, dass schieferer Ton schneller ausdünt und außerdem mit weichem Ton die Simulation eines sogenannten squeezing blocks möglich ist. Die maßgeblichen Einflussparameter Tonschichtdicke, Versatz, Scherfestigkeit, Spannungsniveau und Kinematik finden schließlich Eingang in eine neue Berechnungsmethode zur Vorhersage des Clay Smear-Prozesses.

Schlüsselworte: Clay Smear, FE-Berechnungen, Sandboxversuche, Trap-door, Shale Gouge Ratio

Abstract

The prediction of the distribution of clay in a fault zone is of crucial importance for the exploration and production of hydrocarbons. In our research project this process is being investigated using field work, sandbox experiments and numerical simulations. In this paper, numerical simulations of sandbox experiments are presented. A validation of the applied numerical method with a trap-door test shows that the method is capable of simulating the development of shear bands in sand. Subsequently the results of sandbox experiments with pure sand and with layered sand-clay-sequences are presented. From these results, it can be observed that the thinning of the clay layer in the fault zone corresponds with the laboratory measurements as long as the stresses in the clay layer remain compressive. By using different clay parameters it is shown that the clay with higher shear strength thins out faster with less offset, and that also a so called squeezing block is formed during the simulation. A new calculation method to predict the clay smear is presented which takes into consideration the relevant influencing parameters: thickness of the clay layer, fault displacement, shear strength, stress level and kinematics.

Keywords: Clay Smear, FE-calculations, sandbox-experiments, trap-door, shale gouge ratio

1 Einleitung

Bei der Lagerstättenerkundung und Erdölförderung sind Kenntnisse über die Strömung von Fluiden im Untergrund von entscheidender Bedeutung. Die Erdkruste ist oft aus horizontalen Schichten aufgebaut. Diese Schichten (z.B. Tone und Sande) unterscheiden sich in ihren Durchlässigkeits- und Festigkeitseigenschaften. Durch tektonische Bewegungen können Störungszone entstehen, an denen Schichten gegeneinander verschoben sind. An diesen Störungszone können die Strömungsvorgänge durch Eintrag von Ton („Clay Smear“) behindert werden. Zur Vorhersage des Clay Smears existieren verschiedene Ansätze, die die

Mächtigkeit der Ausgangstonschichten und den Versatz in der Störungszone berücksichtigen (z.B. *Shale Gouge Ratio*: $SGR = \frac{\Sigma \text{Tonschichtdicke}}{\text{Fugenversatz}} \cdot 100\%$, FRISTAD ET AL. 1997). YIELDING ET AL. (1997) ermitteln anhand von Felduntersuchungen für den SGR-Wert einen Grenzbereich von 15 bis 20 %. Oberhalb dieser Werte kommt es meistens zu einer Abdichtung. In Laborversuchen wird allerdings festgestellt, dass sowohl das Spannungsniveau als auch die Scherfestigkeitseigenschaften einen erheblichen Einfluss darauf haben, ob der Ton kontinuierlich bleibt oder aufreißt (SPERREVIK ET AL. 2000, CLAUSEN & GABRIELSEN 2002, SCHMATZ ET AL. 2010A, SCHMATZ ET AL. 2010B). ZEE



ET AL. (2003) entwickeln das Kriterium „MCIP“, bei dem geprüft wird, ob die kleinere Hauptspannung bei der Scherfugenbildung eine Druckspannung ist und es folglich zu einer Toninjektion kommt. Zusätzlich beschreiben sie die Erhöhung der Tonmenge in einer Scherfuge durch die Bildung eines sogenannten *squeezing blocks*, bei dem Ton lateral in die Scherfuge gepresst wird. Bei der Vorhersage der Abdichtung nur mit Hilfe des SGR-Werts werden alle diese wichtigen Einflussparameter bisher noch nicht berücksichtigt.

In einem interdisziplinären Forschungsprojekt zwischen dem Institut für Geotechnik im Bauwesen (GiB) und dem Institut für Geologie – Endogene Dynamik (GED) an der RWTH Aachen University werden die Vorgänge beim *Clay Smear*-Prozess untersucht. Methodisch werden dabei die drei Ansätze Feldarbeit, skalierte Labormodelle und Numerik miteinander verknüpft. Die vom GED experimentell durchgeführten Labormodelle sind Sandboxversuche, bei denen in geschichteten Materialsequenzen eine Abschiebung erzeugt wird. Anschließend wird untersucht, inwieweit Ton in die Scherfuge eingeschleppt wird und diese abdichtet (vgl. Abb. 1). Diese Sandboxversuche werden am GiB numerisch simuliert. Nach sorgfältiger Validierung ist es möglich, den Einfluss verschiedener Materialeigenschaften und Randbedingungen numerisch zu erfassen.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der zweidimensionalen Finite Elemente-Berechnungen vorgestellt, mit denen die Sandboxversuche simuliert wurden.

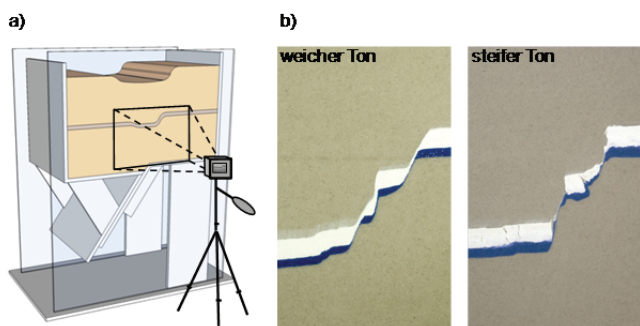


Abb. 1: Sandboxmodell und Ergebnis von Laborversuchen mit weichem und steifem Ton.

Fig. 1: Sandbox-model and results of laboratory experiments with soft and firm clay.

2 Numerisches Modell

Die Prozesse bei der Scherfugenbildung mit numerischen Simulationen stellen eine besondere Herausforderung dar. Bei FE-Berechnungen führen große Verformungen in der Regel zu numerischen Problemen und insbesondere ist die Simulationen von Scherfugen netzabhängig. Bei dem hier eingesetzten Programm ELFEN der Firma Rockfield wird die Methode der adaptiven Netzverfeinerung und Neuvernetzung angewendet, um große Verformungen abbilden zu können. Zusätzlich wurde zur Vermeidung der Netzabhängigkeit die bruchenergetische Regularisierung implementiert, bei dem die Bruchenergie unabhängig von der Diskretisierung gleich bleibt. Im Hinblick auf die Simulation der Scherfugenbildung zeigt sich zudem, dass das Stoffgesetz

insbesondere die Entfestigung und die Dilatanz-eigenschaften der Materialien gut wiedergeben muss. Im Rahmen dieser Simulationen wird das in ELFEN implementierte Stoffgesetz SR3 eingesetzt, das eine Art Cam-Clay-Modell darstellt und den oben beschriebenen Anforderungen genügt. Der Aufbau des numerischen Modells ist in Abb. 2 dargestellt.

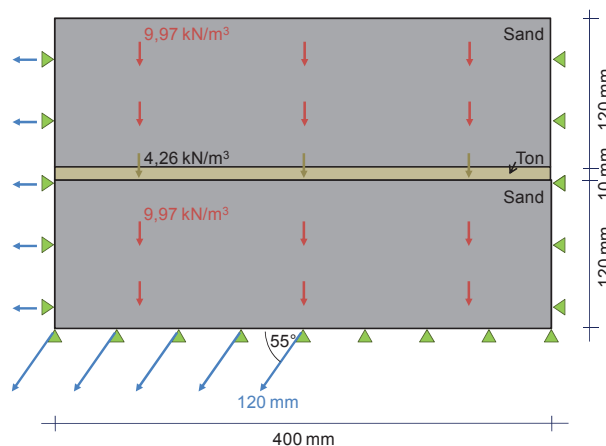


Abb. 2: Aufbau des FE-Sandboxversuchs.

Fig. 2: Set-up of the finite element sandbox-model.

3 Ergebnisse der Simulation der Laborversuche ohne Tonschicht

Zunächst wird gezeigt, dass es mit ELFEN und mit dem gewählten Stoffgesetz grundsätzlich möglich ist, die Entwicklung von Scherfugen zu simulieren. Dazu wird der bekannte Trap-door-Versuch ausgewählt, den bereits Terzaghi durchgeführt hat, um die Gewölbewirkung in Sand zu untersuchen (TERZAGHI & PECK 1967). Beim aktiven Trap-door-Versuch bewegt sich ein Block in der Mitte eines Modellkastens senkrecht nach unten. Im darüber liegenden Sand entwickeln sich zunächst Scherfugen, die nach innen gekrümmt sind und es entwickeln sich anschließend sukzessiv steilere Scherfugen bis vertikale Scherbänder sichtbar werden. VARDOULAKIS ET AL. (1981) beschreiben, dass der Endzustand, bei dem die Scherbänder vertikal verlaufen, nur erreicht werden kann, wenn die Deformation bei konstantem Volumen geschieht. Der Endzustand ist somit konsistent mit der Annahme, dass der Sand in den Scherfugen einen kritischen Zustand erreicht hat und die Dilatanz auf null zurückgegangen ist. Trap-door-Versuche wurden beispielsweise von WALTERS & THOMAS (1982) mit einem Stoffgesetz mit assoziierter Fließregel und von TEJCHMAN (1997) und NÜBEL (2002) mit dem hypoplastischen Stoffgesetz berechnet, wobei es jeweils aufgrund der großen Verformungen nicht möglich war, mehrere sich nacheinander entwickelnde Scherfugen abzubilden. Die Ergebnisse der Simulation mit ELFEN zeigt Abb. 3. Sie werden mit Laborversuchen von STONE & MUIR WOOD (1992) verglichen, wobei die Stoffparameter nicht an deren Laborversuche angepasst werden, sondern diejenigen verwendet werden, die auch bei den nachfolgend beschriebenen Sandboxversuchen eingesetzt werden.

Es zeigt sich, dass es mit ELFEN sehr gut möglich ist, den Trap-door-Versuch abzubilden. Zunächst entsteht eine gebogene Scherfuge, die nicht weiter anwächst. Sequentiell

bilden sich steilere Scherfugen aus. Beim Vergleich mit den Laborversuchen von STONE & MUIR WOOD (1992) ist bemerkenswert, dass die Materialparameter offensichtlich keinen so starken Einfluss haben, da die Strukturen in erster Ordnung gleich sind. Auch NOLLET ET AL. (2012) beschreiben sogenannte *structural domains* bei Sandboxversuchen, bei denen die Scherfugensysteme nur wenig sensitiv auf Änderungen der Materialparameter reagieren. Sie führen numerische Sandboxversuche, wie in Abb. 2 dargestellt, mit reinem Sand ohne Tonschicht durch und variieren den Abschiebewinkel.

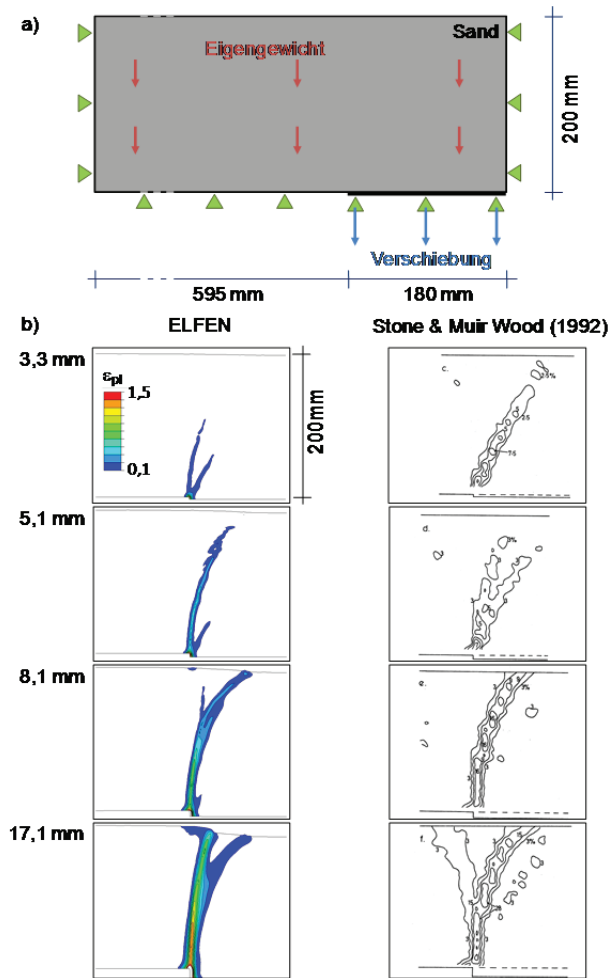


Abb. 3: a) Aufbau des Trap-door-Modells, b) numerische Ergebnisse und Vergleich mit Laborversuchen.

Fig. 3: a) Set-up of the trap-door-model, b) results and comparison with laboratory experiments.

Es zeigt sich, dass bei Abschiebewinkeln $\theta < 60^\circ$ Grabenstrukturen entstehen, während bei größeren Abschiebewinkeln Precursor-Strukturen entstehen, bei denen - ähnlich wie beim Trap-door-Versuch - die Scherfugen zunächst steiler sind und dann sukzessive in die natürliche Scherfugenrichtung wandern. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Dilatanzwinkeln sind in Abb. aufgeführt. Durch Symbole werden die sich bei bestimmten Parameterkombinationen ergebenden Scherfugenstrukturen verdeutlicht. Für jede Scherfugenstruktur ist jeweils ein Beispiel dargestellt. Das dargestellte Versatzmaß der Sandbox D_{SB} ist in der Zeichnung angegeben. Bei kleinerem Versatzmaß ist die Berechnung früher abgebrochen. Trotzdem ist es

auch in diesen Fällen möglich, die sich entwickelnde Scherfugenstruktur zu erkennen.

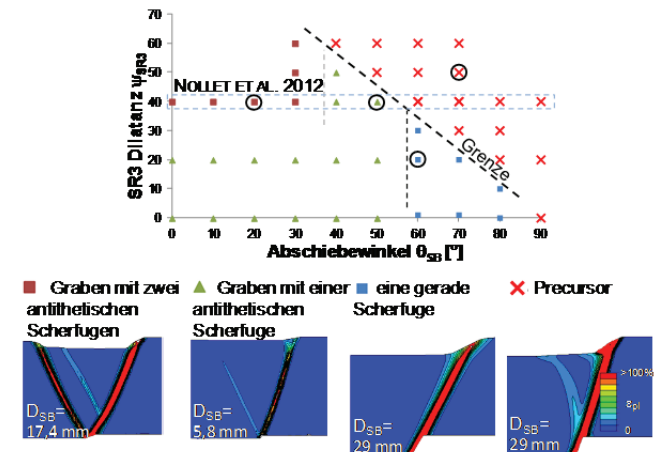


Abb. 4: Scherfugenstrukturen in der Sandbox bei Variation des Abschiebewinkels und der Dilatanz.

Fig. 4: Fault structures in sandbox-simulations by varying the basement-fault-dip angle and the dilatancy.

Die Grenze zwischen den Precursor- und den Grabenstrukturen ergibt sich für größere Dilatanzwinkel bei einem kleineren Abschiebewinkel und für kleinere Dilatanzwinkel bei einem größeren Abschiebewinkel. Eine detaillierte Auswertung der Bewegungsrichtungen zeigt, dass sich genau dann eine gerade Scherfuge entwickelt, wenn der Sandboxabschiebewinkel θ_{SB} gleich der Scherfugenrichtung θ_{NF} reduziert um den Dilatanzwinkel ψ ist. Somit ergibt sich der in Abb. 5 dargestellte Entscheidungsbaum für die Sandboxstrukturen.

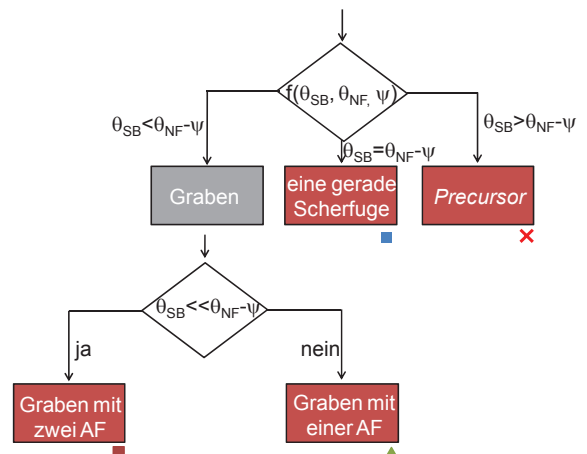
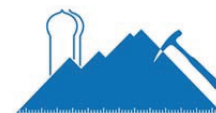


Abb. 5: Entscheidungsbaum für die Sandboxstrukturen (AF: antithetische Scherfuge).

Fig. 5: Decision-tree for sandbox-structures (AF: antithetic fault).

Der Dilatanzwinkel ist dabei als $\sin \psi = \delta \varepsilon_v / \delta \varepsilon_q$ einzusetzen, mit $\delta \varepsilon_v$ als Änderung der Volumendehnung und $\delta \varepsilon_q$ als Änderung der Scherdehnung. Aus dem SR3-Dilatanzwinkel $\psi_{SR3} = 40^\circ$ folgt dann abhängig vom Spannungspfad zur Fließfläche beim Sandboxversuch ein Dilatanzwinkel von $\psi = 12,55^\circ$, mit dem die numerischen Ergebnisse genau die Strukturen wiedergeben, wie sie sich aus dem Entscheidungsbaum ermitteln lassen. Dabei wird jedoch jeweils die Richtung der Hauptscherfuge θ_{NF} als Er-



gebnis der numerischen Berechnung in die Anwendung des Entscheidungsbaums mit einbezogen. Diese Scherfugenrichtung lässt sich aktuell noch nicht ohne numerische Berechnungen vorhersagen. Für den Biaxialversuch existieren Gleichungen der Scherfugeneigung von Coulomb ($\theta_C = 45^\circ + \varphi/2$) und Roscoe ($\theta_R = 45^\circ + \psi/2$). Ein Vergleich der Sandboxergebnisse mit diesen Werten in Abb. 6 zeigt, dass für einen Abschiebewinkel von $\theta = 0^\circ$ die Scherfugeneigung annähernd mit der theoretischen Lösung von Coulomb übereinstimmt, hingegen mit größerem Abschiebewinkel die Scherfugen steiler werden. Es wird somit deutlich, dass neben den Größen Reibungswinkel und Dilatanzwinkel auch der Abschiebewinkel einen Einfluss auf die Scherfugenrichtung hat. Dieser Einfluss steigt mit größerer Kohäsion (EGHOLM ET AL. 2007).

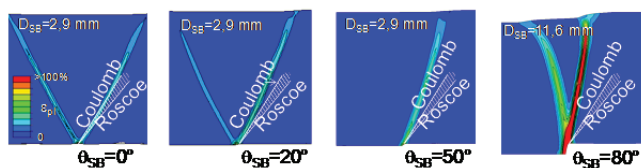


Abb. 6: Entwicklung der Scherfuge für Abschiebewinkel von $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 50^\circ$ und 80° im Sandboxversuch und Vergleich mit den theoretischen Lösungen von Coulomb und Roscoe für den Biaxialversuch.

Fig. 6: Faults with basement-fault-dip angles of $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 50^\circ$ and 80° in sandbox-tests and its comparison with the theoretical solutions of Coulomb and Roscoe for biaxialtests.

Somit kann die Wahl der Materialparameter zur Abbildung der Sandboxversuche daran überprüft werden, ob sich numerisch und im Laborversuch jeweils die gleichen Scherfugenwinkel ergeben. Die Schwierigkeit bei der Festlegung der Materialparameter liegt darin, dass mit existierender Apparatur im niedrigen Sandboxspannungsniveau keine Standardlaborversuche (wie z.B. Triaxialversuche) durchgeführt werden können. Darum werden Sandboxversuche mit reinem Sand mit einem Abschiebewinkel von $\theta_{SB} = 55^\circ$ und $\theta_{SB} = 70^\circ$ herangezogen. Abb. 7 zeigt eine Überlagerung der numerischen Ergebnisse mit Fotos der Laborversuche nach der Kalibrierung, wobei in beiden Modellen der gleiche Datensatz für die Sandparameter verwendet wird. Die verwendeten Parameter sind in Tab. 1 angegeben.

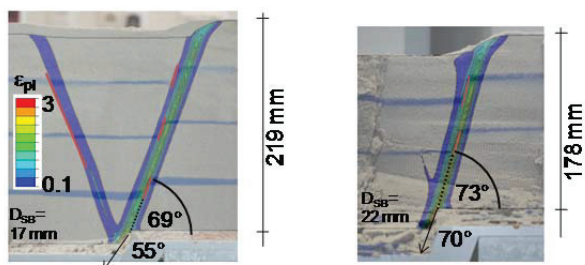


Abb. 7: Vergleich der experimentellen Sandboxversuche (in der Mitte ausgegraben) mit numerischen Berechnungen für die Abschiebewinkel $\theta_{SB} = 55^\circ$ und $\theta_{SB} = 70^\circ$.

Fig. 7: Comparison of the sandbox-experiments with numerical results for basement-fault-dips of $\theta_{SB} = 55^\circ$ and $\theta_{SB} = 70^\circ$.

Es wird deutlich, dass die Scherfugeneigungen im Laborversuch und in den numerischen Ergebnissen nahezu exakt übereinstimmen. Analog und numerisch ergibt sich bei einer

Abschiebung von $\theta_{SB} = 55^\circ$ ein Scherfugenwinkel von $\theta_{NF} = 69^\circ$ und bei einer Abschiebung von $\theta_{SB} = 70^\circ$ ein Scherfugenwinkel von $\theta_{NF} = 73^\circ$. Im 55° -Modell ist analog wie numerisch deutlich die Entwicklung eines Grabens zu sehen, für $\theta_{SB} = 70^\circ$ deutet sich numerisch ein Graben an, der im analogen Modell noch nicht erkennbar ist.

4 Ergebnisse der Simulation der Laborversuche mit Tonschicht

4.1 Materialparameter

Wie oben beschrieben, erfolgte die Festlegung der Materialparameter für den Sand über eine Kalibrierung an Sandboxversuchen mit reinem Sand. Die Fließfläche des Tons hingegen wird anhand der undrainierten Kohäsion, die mittels Flügelscherversuchen ermittelt wird, bestimmt. Die Sandboxlaborversuche wurden mit flüssigem Ton durchgeführt. Im Rahmen der numerischen Simulationen werden zusätzlich breiiger Ton, steifer Ton, ein sehr flüssiger Ton ohne Kohäsion und eine Emulsion, die noch flüssigeres Material repräsentiert, eingesetzt. Die Parameter zur Berechnung der Laborversuche sind in Tab. 1 dargestellt, zusätzlich sind Abb. 8 alle eingesetzten Fließflächen zu entnehmen.

Tab. 1: Materialparameter bei der Nachrechnung der Sandboxversuche.

Tab. 1: Materialparameter für die Simulation der Sandbox-experiments.

Materialeigenschaften		flüssiger Ton	Sand
Elastische Eigenschaften	E [kN/m ²]	300	500
	ν	0,45	0,3
Fließfläche	p_c [kN/m ²]	40	20
	p_t [kN/m ²]	-12,7	-0,01
	Reibungswinkel [°]	6	59,5
	Exponent n_2	1	1,2
Dilatanz	Dilatanzwinkel	1	16
	α	0,25	0,25
	β_0	0,6	0,6
	β_1 [1/kN/m ²]	0,3	0,3
Fließflächenentwicklung	p_c residual [kN/m ²]	39,5	1
	p_t residual [kN/m ²]	-12,699	-0,001
	λ	0,045	0,03
	κ	0,0065	0,008
	ε_{vp} (min)	-0,045	-0,1
	ε_{vp} (max)	0,15	0,4

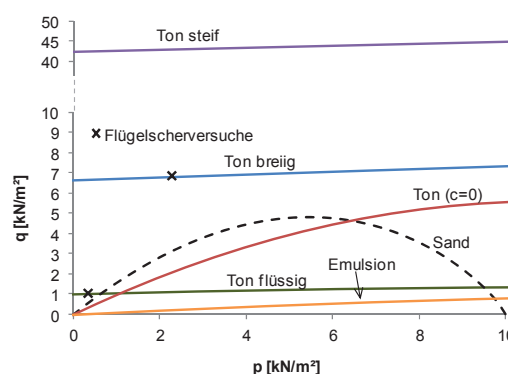


Abb. 8: Fließflächen der eingesetzten Materialien.

Fig. 8: Yield-surfaces of the materials.

4.2 Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Tonarten

Die Ergebnisse von zwei identischen Laborversuchen zeigt Abb. 9a. Die Entwicklung der Scherfuge kann durch die Glasscheiben in der Sandbox betrachtet werden. Die Tonschicht verläuft aufgrund der Precursor-Bildung in mehreren Stufen. Diese Ausbildung der Precursor ist an der Glasscheibe stärker als im Inneren des Laborversuchs (Abb. 9b).

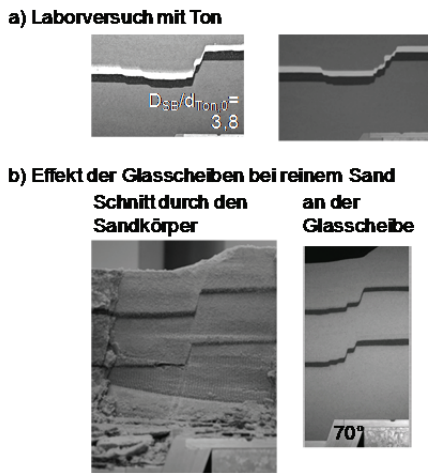


Abb. 9: Ergebnisse der Laborversuche.
 Fig. 9: Results of the laboratory-tests.

In Abb. 10 sind die numerischen Ergebnisse dargestellt. Es ergeben sich die gleichen Strukturen und es zeigt sich, dass bei einer Erhöhung der Dilatanz ebenfalls die Stufen in der Tonschicht simuliert werden können. Bei zunehmendem Versatz wird die Tonschicht innerhalb der Scherfuge dünner. Abb. 11 zeigt die Entwicklung der Tonschicht in den Laborversuchen und im numerischen Modell, wobei die Simulation das tatsächliche Verhalten sehr gut wiedergibt.

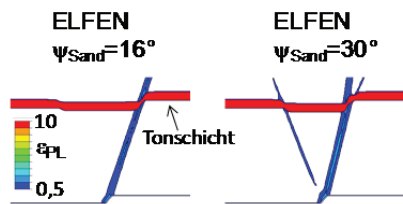


Abb. 10: Ergebnisse der Nachrechnung der Laborversuche.
 Fig. 10: Results of the numerical simulations of the laboratory-tests.

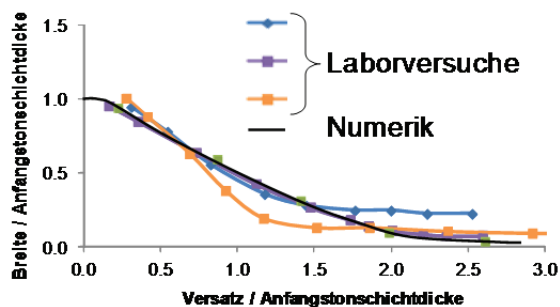


Abb. 11: Tonschichtdicke über den Versatz in ELFEN und im Laborversuch.
 Fig. 11: Clay-thickness in ELFEN and in laboratory-tests.

Werden steifere Tonparameter in der Simulation eingesetzt, dünnt die Tonschicht schneller aus, wie Abb. 12 zeigt. Bereits in KLEINE VENNEKATE (2012) wurde gezeigt, dass die Entwicklung von Zugspannungen in der Tonschicht für das Ausdünnen der Tonschicht verantwortlich ist. Je größer die Kohäsion ist, umso größer sind dann die Zugspannungen in der Tonschicht, die zum Aufreißen führen. Im Laborversuch entstehen bei steiferen Tonen Zugrisse und Tonfragmente werden in die Scherfuge eingeschleppt, so dass der Ton die Scherfuge nicht abdichtet. Dieses Verhalten kann numerisch besser mit diskreten Partikeln statt mit einer FE-Methode abgebildet werden (z.B. ABE ET AL. 2011, RAITH 2012). Der Zusammenhang zwischen der Tonschichtmächtigkeit und den Materialparametern ist im Bereich, wo keine effektive Zugspannungen auftreten, gut zu simulieren.

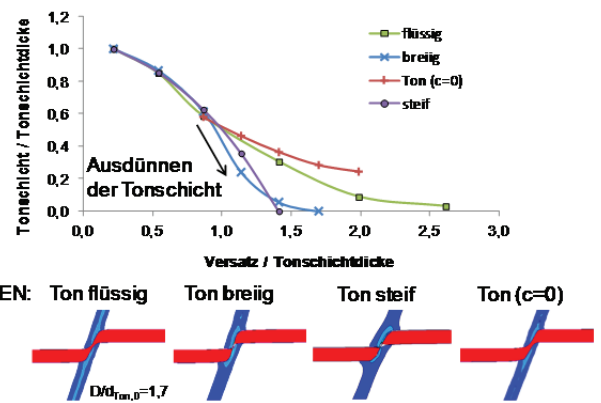


Abb. 12: Entwicklung der Tonschichtdicke innerhalb der Scherfuge bei vier verschiedenen Tonarten.
 Fig. 12: Clay-thickness using different clay-materials.

Wird statt des Tons eine sehr weiche Emulsion eingesetzt (Abb.13), bildet sich zunächst durch den Scherfugenversatz nach links ein dehnender Übergang und anschließend wird die Tonschicht durch einen *squeezing block* in die Scherfuge hineingepresst. Bei weiterem Versatz bildet sich sogar ein zweiter *squeezing block*. Dieser kinematische Prozess wird auch anhand von Felduntersuchungen und Laborversuchen von ZEE ET AL. (2003) beschrieben.

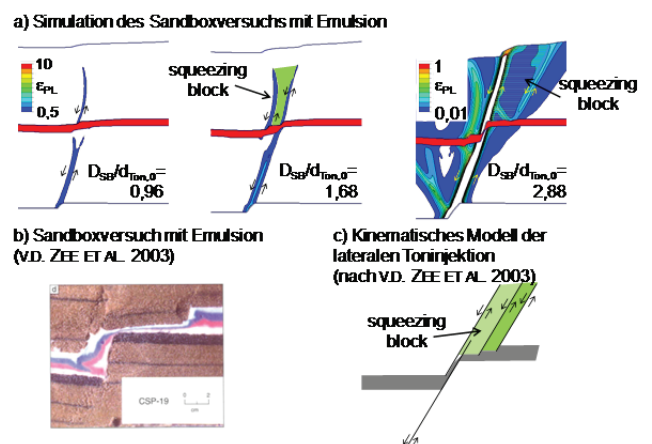
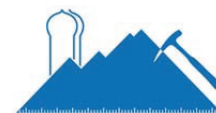


Abb. 13: Ergebnis des Sandboxversuchs mit Emulsion und Vergleich mit dem squeezing block von ZEE et al. (2003).
 Fig. 13: Results of simulations with crème and comparison with squeezing-block-theory by ZEE et al. (2003).



5 Entwicklung einer neuen Gleichung zur Beurteilung der Abdichtung von Scherfugen

Durch die Simulationen der Sandboxversuche wurden die in der Literatur genannten Einflussfaktoren auf den Clay-Smear bestätigt. Diese Einflussfaktoren werden nun in einer neuen Methode zur Ermittlung der Grenzwerte für SGR integriert. Dazu werden als Hilfwerte die beiden Winkel α und β im σ_1 - σ_3 -Diagramm definiert (s. Abb. 14). Der Winkel α ändert sich abhängig von der Scherfestigkeit des Tons und dem Spannungsniveau. Der Winkel β ist abhängig von der Kinematik. Entscheidend für die Beurteilung des Clay-Smears ist, ob in der Tonschicht Zugspannungen oder Druckspannungen entstehen. Für den Fall $\beta/\alpha < 1$ entstehen Zugspannungen, für den Fall $\beta/\alpha > 1$ Druckspannungen.

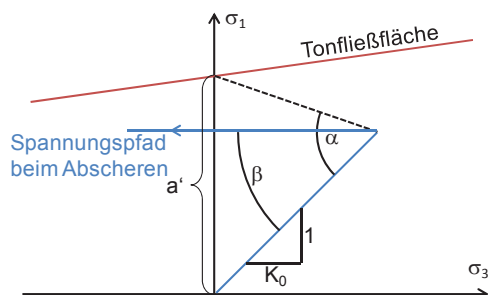


Abb. 14: Beziehungen α und β .

Fig. 14: Definition of α and β .

Für die vorgestellten Simulationen werden die SGR-Werte berechnet, bei denen gerade ein Loch entsteht und über die jeweiligen β/α -Werte aufgetragen. Ergänzt werden diese Werte um Simulationen an gleichen Materialien in höheren und niedrigeren Spannungsniveaus. Die numerisch streuenden Werte werden durch eine Approximationskurve angenähert, die nun den Grenzwert für SGR in Abhängigkeit von β/α darstellt. Somit ist es möglich, sofern α und β bekannt sind, einen Grenzwert für SGR zu berechnen, bei dem die Tonschicht gerade nicht mehr kontinuierlich ist. Die Grenzwerte von YIELDING ET AL. (1997) sind ebenfalls in dem Diagramm eingetragen. Im Gegensatz zu YIELDING ET AL. (1997) ist nach den numerischen Ergebnissen für kleine β/α -Werte bereits bei kleinerem Versatz die Tonschicht nicht mehr kontinuierlich (schraffierter Bereich). Die hier skizzierte Ausgleichskurve wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\text{SGR} = \frac{d_{\text{Ton},0}}{D} \cdot 100\% = \left(\frac{\beta/\alpha}{177,62}\right)^{-0,73}$$

Hiermit wird also ein Weg aufgezeigt, wie beurteilt werden kann, ob eine Scherfuge durch Ton abgedichtet wird oder nicht. Die Verifizierung dieser Gleichung muss allerdings noch durch Laborversuche und Felduntersuchungen erfolgen.

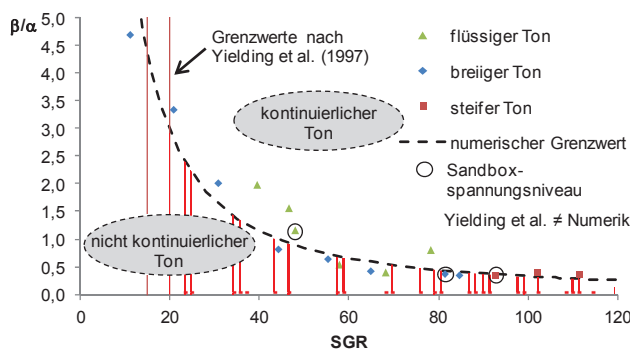


Abb. 15: Numerisch ermittelter Grenzwert für SGR.

Fig. 15: Numerical threshold for SGR.

Literatur

- ABE, S., GENT, H. VAN & URAI, J. (2011): DEM simulation of normal faults in cohesive materials. - *Tectonophysics*, **512**: 12-21.
- CLAUSEN, J.A. & GABRIELSEN, R.H. (2002): Parameters that control the development of clay smear at low stress states: an experimental study using ring-shear apparatus. - *Journal of Structural Geology*, **24**: 1569-1586.
- EGHOLM, D.L., SANDIFORD, M., CLAUSEN, O.R. & NIELSEN, S.B. (2007): A new strategy for discrete element numerical models: 2. Sandbox applications. - *Journal of Geophysical Research*, **112**: 1-12 (doi: 10.1029/2006JB004558).
- FRISTAD, T., GROTH, A., YIELDING, G. & FREEMAN, B. (1997): Quantitative fault seal prediction: a case study from Oseberg Syd. - In: MÖLLER-PEDERSEN, P. & KOESTER, A. G. (Hrsg.): *Hydrocarbon Seals: Importance for Exploration and Production*. - 7: 107-124, Amsterdam u.a. (Elsevier).
- KLEINE VENNEKATE, G. (2012): Scherfugenentwicklung in Sand-Ton-Wechselfolgen. - 32. Baugrundtagung: Forum für junge Geotechnik-Ingenieure, Mainz: 29-36 (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.).
- NOLLET, S., KLEINE VENNEKATE, G.J., GIESE, S., VROLIJK, P., URAI, J.L. & ZIEGLER, M. (2012): Localization patterns in sandbox-scale numerical experiments above a normal fault in basement. - *Journal of Structural Geology*, **37**: 199-209.
- NÜBEL, K. (2002): Experimental and Numerical Investigation of Shear Localization in Granular Material. - (159 S.) Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- RAITH, A. (2012): The evolution of fault zones in brittle-ductile layered rocks. - (83 S.) *Geologie - Endogene Dynamik*, RWTH-Aachen.
- SCHMATZ, J., HOLLAND, M., GIESE, S., ZEE, W. VAN DER & URAI, J.L. (2010A): Clay smear processes in mechanically layered sequences – results of water-saturated model experiments with free top surface. - *Journal Geological Society of India*, **75**: 74-88.
- SCHMATZ, J., VROLIJK, P.J. & URAI, J.L. (2010B): Clay smear in normal fault zones – the effect of multilayers and clay cementation in water-saturated model experiments. - *Journal of Structural Geology*, **32**: 1834-1849.
- SPERREVIK, S., FÆRSETH, R.B. & GABRIELSEN, R.H. (2000): Experiments on clay smear formation along faults. - *Petroleum Geoscience*, **6**: 113-123.

- STONE, K.J.L. & MUIR WOOD, D. (1992): Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand. - *Soils and Foundations*, **32/4**: 43-57.
- TEJCHMAN, J. (1997): Modelling of shear localisation and autogeneous dynamic effects in granular bodies. – (353 S.) Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B. (1967): *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2. Edition. – (729 S.) New York, London, Sydney (John Wiley & Sons, Inc.).
- VARDOULAKIS, I., GRAF, B. & GUDEHUS, G. (1981): Trap-door problem with dry sand: a statical approach based upon model test kinematics. - *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **5**: 57-78.
- WALTERS, J.V. & THOMAS, J.N. (1982): Shear zone development in granular materials. - *Proc. 4th Int. Conf. on Numerical methods in geomechanics*, Edmonton: 263-274 (Balkema).
- YIELDING, G., FREEMAN, B. & NEEDHAM, D.T. (1997): Quantitative Fault Seal Prediction. - *AAPG Bulletin*, **81/6**: 897-917.
- ZEE, W. VAN DER, URAI, J.L. & RICHARD, P.D. (2003): Lateral clay injection into normal faults. - *GeoArabia*, **8/3**: 501-522.