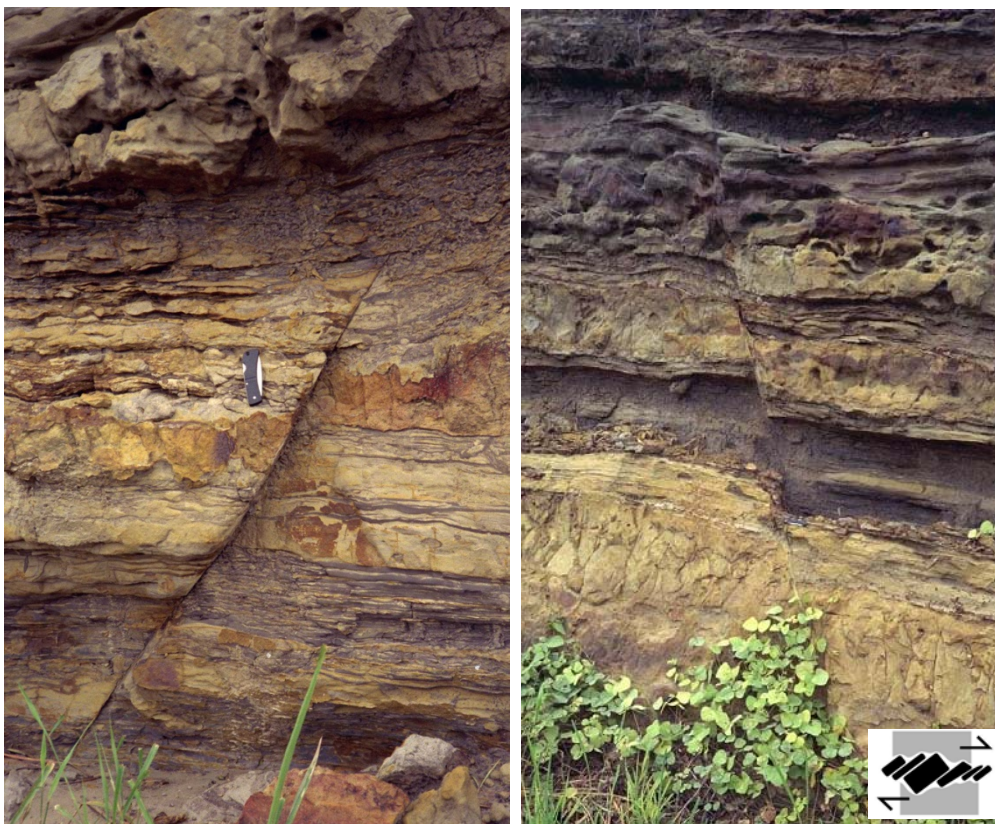


**Forschungsprojekt**

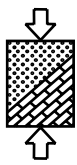
**Evolution of shear zones in layered sand-clay sequences**

**Scherfugenentwicklung in Sand-Ton-Wechselfolgen**



**Scherfugen in Miri, Malaysia**

**Gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)  
Gemeinschaftsprojekt mit Geologie – Endogene Dynamik (GED)**



## Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts wird in Zusammenarbeit mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Geologie - Endogene Dynamik der RWTH-Aachen das Abscheren großer Schichtpakete aus Sand-Ton-Sequenzen infolge tektonischer Prozesse untersucht.

Besondere Bedeutung kommt hierbei dem Materialverhalten der bindigen Schichten zu. Infolge der Relativverschiebung der Scherufer, die ein Mehrfaches der Schichtdicke erreichen kann, wird der Ton in die Störungszone eingeschleppt (sog. laterale Toninjektion), was zu einer Abdichtung der Scherfuge führen kann.

Aufgrund der horizontalen Schichtung und geringen Durchlässigkeit der bindigen Schichten besteht im Untergrund eine Abdichtung gegenüber Strömungsvorgängen in vertikaler Richtung. Durch den in die Scherfuge eingeschleppten Ton kann sich zusätzlich eine Abdichtung in horizontaler Richtung entwickeln, die z.B. einen vorhandenen Grundwasserleiter vollständig durchtrennen kann. Die zuverlässige Vorhersage, ob es zu einer Abdichtung kommt, ist von größtem Interesse für die Erkundung von GW-Vorkommen und die Erdölexploration.

Hauptziel des Projekts, ist die Untersuchung, wie und unter welchen Voraussetzungen in geschichtetem Untergrund bindiges Material in eine Scherfuge mit zunehmendem Versatz eingeschleppt wird.



**Abbildung 1: Natürliche Störungszone in geschichtetem Untergrund**

## Stand der Wissenschaft

### Clay Smear

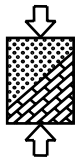
„Clay Smear“ beschreibt den Prozess, bei dem Ton aus dem umliegenden Gestein auf irgendeine Weise in die Störzone transportiert wird. In angewandten Studien gibt es semi-empirische Methoden für die clay-smear-Analyse („clay smear potential“, „shale smear factor“ und „shale gouge ratio“, Bouvier et al. 1989, Lindsay et al. 1993, Yielding et al. 1997, Fristad et al. 1997, Yielding 2002, van der Zee et al., 2003, Doughty 2003, Faereth 2006). Die meisten dieser Methoden basieren auf der Annahme, dass die Störungszone das Äquivalent des Festgesteins ohne Zugabe oder Entfernung von Material sind. Keine dieser Methoden basiert auf ein detailliertes Modell der Entwicklung von Scherfugen und beinhaltet darum einen hohen Grad an Unsicherheiten.

Andere Autoren nehmen an, dass „clay smear“ in der Lage ist, mehr Ton in der Störung anzureichern als das Tonstein-Sand Verhältnis im Festgestein erwarten lässt (Lehner & Pilaar 1997).

### Analoge Sandboxmodellierung

Skalierte Sandboxexperimente haben sich als ein effektives Hilfsmittel zur Simulation spröder Deformationsprozesse in Störungen bewährt (Cloos 1930, McClay & Ellis 1987, Dahlen & Suppe 1988, Huiqui et al. 1992, Gutscher et al. 1996, McClay 1996, Wang & Davis 1996, Koyi 1997, Kukowski et al. 2002, Lohrmann 2003, Maser et al. 2006, Wolf 2005).

Ein großer Fortschritt in der Auswertung der Sandbox-Experimente wurde durch die Nutzung der „Particle Image Velocimetry analysis“ kurz PIV erzielt (Adam et al. 2005). Nach der



fotografischen Dokumentation der Verformung der Ober- oder Seitenflächen können anschließend Verformungs- und Dehnungsfelder berechnet werden.

In der „Benchmark-Group“ wird aktuell die Reproduzierbarkeit von verschiedenen analogen Sandbox-Experimenten untersucht (Schreurs et al. 2006, Benchmark 2008).

### Numerische Modellierung

Die Simulation der Lokalisierung von Scherfugen stellt besondere Anforderungen an ein numerisches Modell. Es existieren zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze: Lösungsmöglichkeiten mittels diskreter Partikel und den kontinuumsmechanischen Ansatz mit finiten Elementen.

Bei der numerischen Modellierung mittels diskreter Partikel, die auf Cundall und Strack (1979) zurückgeht, wird das mechanische Verhalten granularer Medien durch diskrete, starre Scheiben oder Kugeln simuliert. Typische Erscheinungen innerhalb des Scherbandes wie Dilatanz und Partikelrotationen können beobachtet werden (Giese et al. 2006). Die Partikelmethode ist jedoch besonders wegen der notwendigen Rechenleistungen stark eingeschränkt. Bei der Modellierung der Sandbox können die Sand- und insbesondere die Tonpartikel nicht in realistischer Größe dargestellt werden.

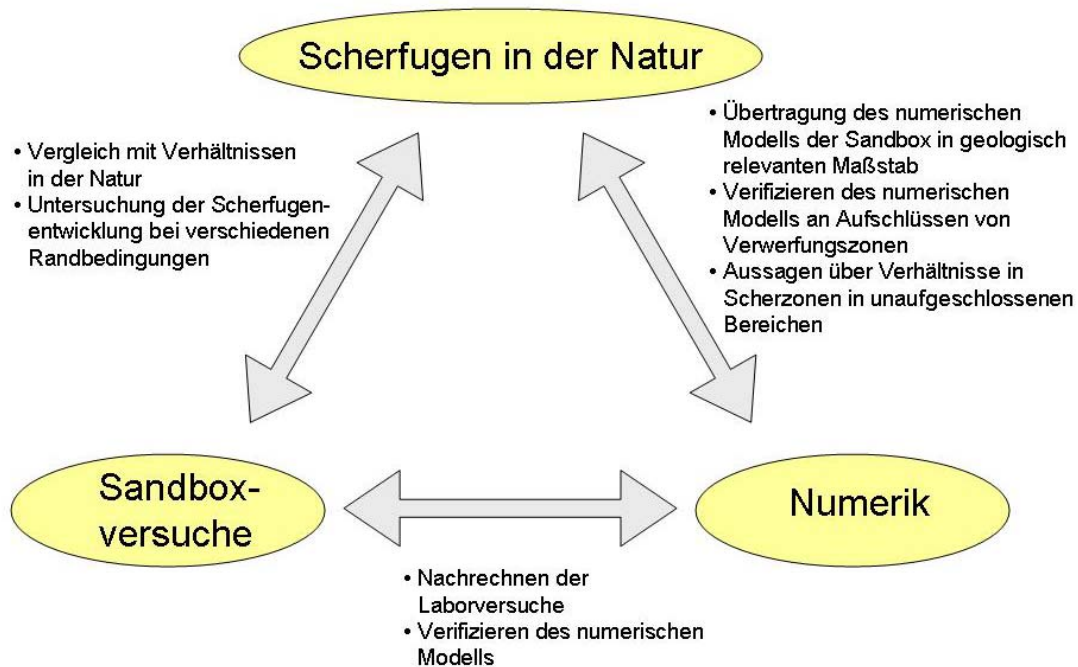
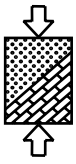
Es gibt zahlreiche Arbeiten zu Finite-Elemente Simulationen, die die besonderen Probleme der Scherfugenentwicklung, wie hohe Spannungs- und Verzerrungsgradienten und starke Netzabhängigkeiten der Lokalisierung, darstellen (Herle und Feda 2001, Hügel 1995). Um die Scherbandbreite unabhängig von der Diskretisierung zu erhalten, existieren verschiedene Regularisierungsmethoden. Dazu gehören das Cosserat Kontinuum (Mühlhaus 1986, Tejchman 1995, Tejchman 1997, Ehlers und Volk 1999) die Gradientenmethode (Mindlin 1965) die Nichtlokale Methode (Eringen 1972, Bažant & Pijauder-Cabot 1987) und der „Fracture-Energy Approach“ (Crook et al. 2003, Crook et al. 2006).

Bei der numerischen Simulation der Entstehung der Niederrheinischen Bucht erzielt Karcher (2003) gute Ergebnisse, jedoch können weiterhin große Relativverschiebungen, wie sie in Verwerfungszonen auftreten, nicht erzeugt werden. Auch Simulationen von Scherfugen mit „clay smear“ (Gudehus und Karcher 2006) zeigen gute Ergebnisse und führen sogar zu einem Zusammenhang der Tonschichtbreite in Abhängigkeit des Scherwegs. Doch auch diese numerischen Berechnungen sind auf einen kleinen Maßstab angewiesen.

Crook et al. (2006) zeigen, dass mit Hilfe der adaptiven Netzverfeinerung auch große Relativverschiebungen simuliert werden können.

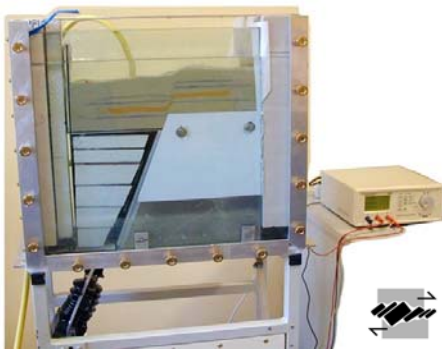
### **Vorgesehener Lösungsweg**

In der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Geologen und Ingenieuren werden die drei Themenblöcke Feldarbeit, Sandboxversuche und numerische Modellierung miteinander verknüpft.



**Abbildung 2: Zusammenspiel zwischen den unterschiedlichen Teilen des Projekts**

In Rahmen der Feldarbeit werden Scherfugen in geschichtetem Untergrund untersucht und Materialproben gewonnen, um in geotechnischen Laborversuchen Materialparameter zur numerischen Modellierung zu bestimmen.



**Abbildung 3: Sandbox**

Am Institut für Geologie - Endogene Dynamik werden Modellversuche in einer eigens hierfür entwickelten Sandbox durchgeführt. Mit diesen Versuchen lassen sich typische Scherprozesse in natürlichen Störungen unter kontrollierten Randbedingungen modellieren.

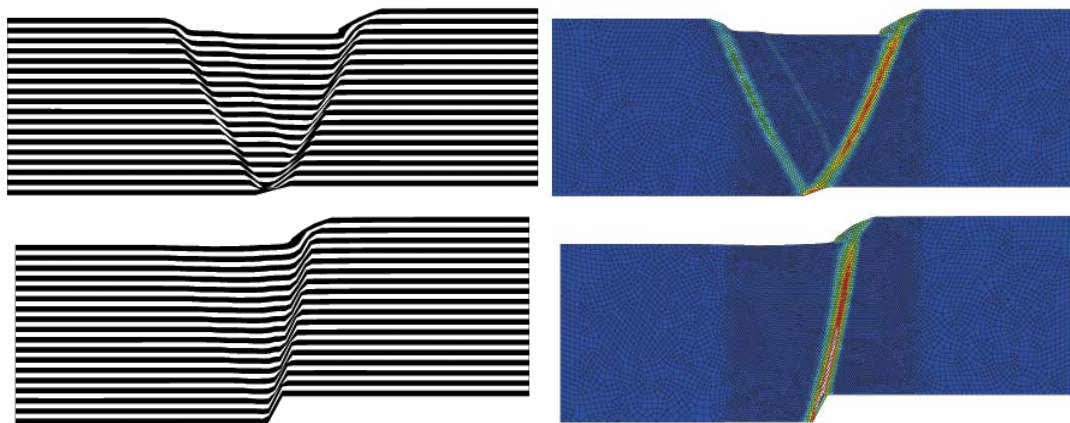
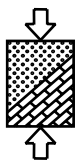
Aufbauend auf die Modellversuche soll am Institut für Geotechnik ein numerisches Modell erstellt werden, mit dem nicht nur die Sandbox-Versuche sondern auch die Scherfugenbildung in geologische Strukturen übertragen werden kann.

Die numerische Simulation mit Finiten Elementen erfolgt mit dem Programm ELFEN von Rockfield® software, das dank einer adaptiven Netzverfeinerung fähig ist, große Relativverschiebungen in Scherfugen abzubilden. Dabei ist ein Stoffgesetz zu verwenden, das das Spannungs-Verformungsverhalten sowohl bei niedrigem Spannungsniveau in dem Modellkasten als auch bei den hohen Überlagerungsspannungen in der Natur zutreffend wiedergeben kann.

### **Bisherige Arbeiten und Ergebnisse**

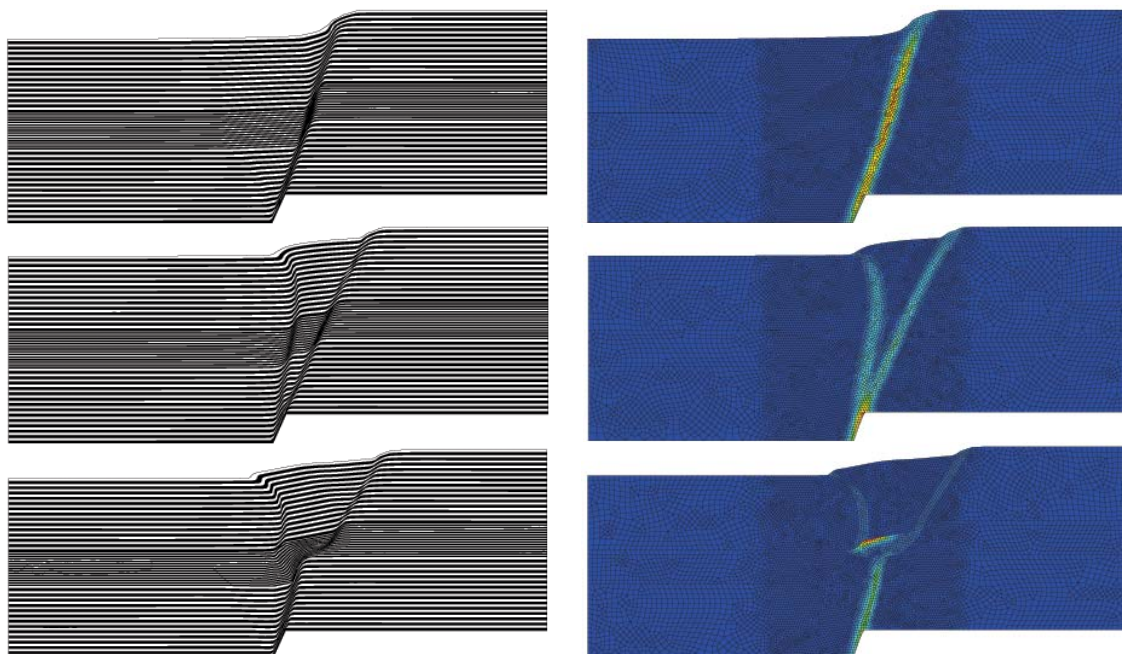
Die Modellierung von Sandboxversuchen an homogenem Sand mit unterschiedlichen Abschiebewinkeln zeigt, dass sich bei flacher Abschiebung eine V-förmige Scherfuge und bei steilerer Abschiebung eine einzelne Scherfuge entwickeln.





**Abbildung 4: Ergebnisse (Streifen und plastische Dehnungen) der numerischen Modellierung von Sandboxexperimenten mit homogenem Sand und einer Abschiebung im Untergrund von 20° (obere Bilder) bzw. 70° (untere Bilder).**

Bei der Modellierung von Sandboxversuchen an geschichteten Böden zeigt sich, wie das Material der Tonschicht (steif oder weich) die Scherfugenbildung beeinflusst.



**Abbildung 5: Ergebnisse (Streifen und plastische Dehnungen) der numerischen Modellierung von Sandboxexperimenten mit drei verschiedenen Tonschichten (steif, weich und sehr weich) und einer Abschiebung im Untergrund von 70°.**

An weiteren Modellen wird untersucht, wie sich eine Scherfuge in homogenem Material unabhängig von einer vorgegebenen Abschieberichtung im Untergrund entwickelt. Dazu werden im Modell die seitlichen Ränder auseinandergezogen. Genau in der Mitte des Modells befindet sich ein Element mit sehr weichen Materialparametern, damit sich eine einzelne Scherfuge und nicht ein Scherfugenmuster entwickelt. In diesem Modell kann der Einfluss der Stoffgesetzparameter weitestgehend unabhängig von weiteren äußeren Randbedingungen untersucht werden.

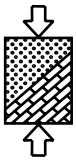


Abbildung 6: Scherfugenentwicklung nach einer Bewegung der Ränder von 3mm

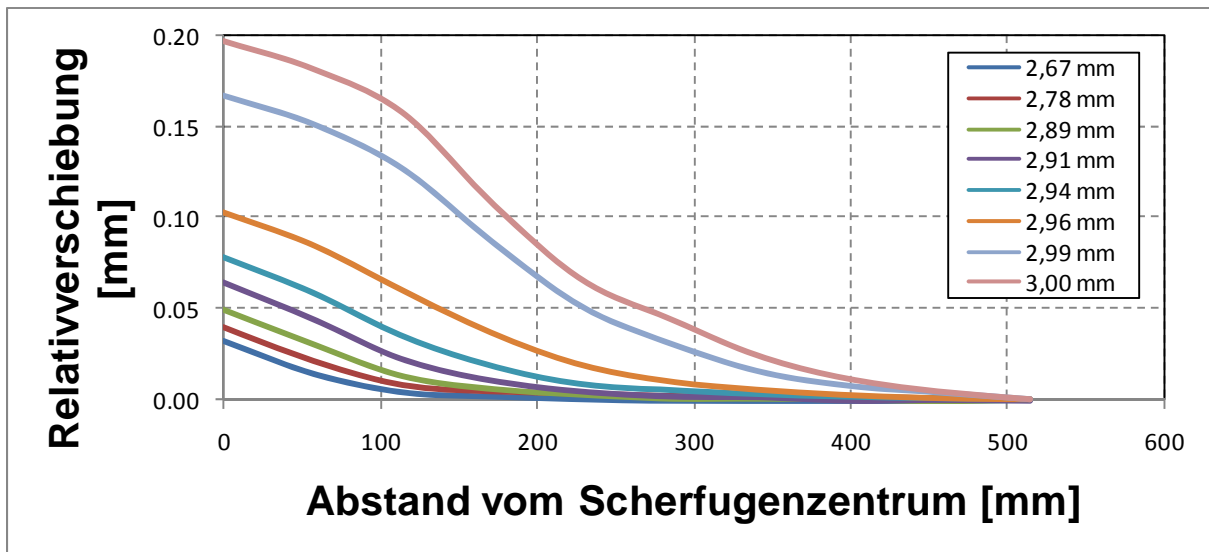
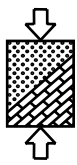


Abbildung 7 Entwicklung der Relativverschiebung entlang der Scherfuge mit steigender Scherfugenentwicklung

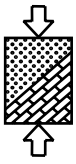
### Ausblick

Nachdem Verschiebungs- und Spannungsfelder der numerischen Modelle und Analogmodelle gegenseitig verifiziert werden, sollen die numerischen Modelle auf geologisch relevante Maßstäbe und Rahmenbedingungen ausgeweitet werden. Dies geschieht mit dem Ziel, die numerischen Modelle und die Ergebnisse der Feldarbeiten direkt vergleichen zu können.



## Literatur

- Adam J. J. L. Urai B. Wieneke O. Oncken K. Pfeiffer N. Kukowski J. Lohrmann S. Hoth, W. van der Zee and J. Schmatz (2005) Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting – new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques. *Journal of Structural Geology*, 27:283-301.
- Bažant & Pijauder-Cabot 1987: Nonlocal continuum model with local strain. In: D. Owen, E. Hinton, E. Onate (eds.), *International Conference of Computational Plasticity*, Barcelona, pp. 1757-1780.
- Benchmark 2008: URL: <http://www.geodynamics.no/benchmarks/index.html>
- Bouvier et al. 1989: Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun river field, Nigeria. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 73(11), 1298-1414
- Cloos 1930: Zur experimentellen Tektonik: Methodik und Beispiele. *Die Naturwissenschaften*, 34, 741-747.
- Crook, A. J. L., Willson, S. M., Yu, J. G. & D.R.J., O. 2003: Computational modeling of the localized deformation associated with borehole breakout in quasi-brittle materials, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 38, 177-186
- Crook, A. J. L., Willson, S. M., Yu, J. G. & D.R.J., O. 2006. Predictive modelling of structure evolution in sandbox experiments. *Journal of Structural Geology* 28, 729-744.
- Cundall und Strack 1979: A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 29, no. 1, 47-65.
- Doughty 2003: Clay smear seals and fault sealing potential of an exhumed growth fault, Rio Grande Rift, New Mexico: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* v. 87 pp. 427-444.
- Ehlers und Volk 1999
- Eringen 1972: Nonlocal polar elastic continua. *International Journal of Engineering Science* 10, no. 1, pp. 1-16.
- Faerseth 2006: Shale smear along large faults: continuity of smear and the fault seal capacity *Journal of the Geological Society* 163:741-751.
- Fristad, T., Groth, A., Yielding, G. & Freeman, B. 1997: Quantitative fault seal prediction: a case study from Oseberg Syd. In: *Hydrocarbon seals: importance for exploration and production* (edited by Moller-Pedersen, P. & Koestler, A.G.). NPF Special Publication 7, 107-124.
- Giese, S., Kirsch, A., Ziegler, M., 2006. Numerische Untersuchung von Schervorgängen mit der Diskrete-Partikel-Methode. In: *Bauingenieur*, Band 81, Heft 5, pp. 232-239.
- Gudehus und Karcher 2006: Hypoplastic simulation of normal faults without and with clay smears. *Journal of Structural Geology*(2006), doi:10.1016/j.jsg.2006.09.011
- Herle und Feda 2001: Interaction of spread footings with sandy subsoil. Part 1: State of the art. *Engineering Mechanics* 8, no. 2, pp. 137-148.
- Hügel 1995: Prognose von Bodenverformungen. *Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe*, Heft 136.
- Karcher 2003: Tagebaubedingte Deformationen im Lockergestein. *Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe*, Heft 160.
- Koyi 1997: Analogue modeling; from a qualitative to a quantitative technique; a historical outline. *Journal of Petroleum Geology* 20(2), 223-238.
- Kukowski, N., Lallemand, S. E., Malavieille, J., Gutscher, M.-A., Reston, T. J. 2002. Mechanical decoupling and basal duplex formation observed in sandbox experiments with application to the Western Mediterranean Ridge accretionary complex. *Marine Geology* 186, 29-42.
- Lehner & Pilaar 1997: The emplacement of clay smears in synsedimentary normal faults: inferences from field observations near Frechen, Germany. In: *Hydrocarbon seals: importance for exploration and production* (edited by Moller-Pedersen, P. & Koestler, A.G.). NPF Special Publication 7, 39-50.
- Lindsay, N.G., Murphy, F.C., Walsh, J.J., Watterson, J., 1993. Outcrop studies of shale smears on fault surfaces. *Spec. Publs Int. Ass. Sediment*, 15, 113-123.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J., Oncken, O., 2003. The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. *Journal of Structural Geology*, 25(10), pp. 1691-1711. Maser et al. 2006
- McClay, K. R. 1996. Recent advances in analogue modeling: uses in section interpretation and validation. In: *Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modeling* (edited by Buchanan, P. G., Nieuwland, D. A.) 99. *Geological Society Special Publication*, pp. 201-225.
- Mindlin, R., 1965. Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity. *International Journal for Solids Structures* 1, pp. 417-438.
- Mühlhaus, H.-B., 1986. Scherfugenanalyse bei granularem Material im Rahmen der Cosserat-Theorie. *Ingenieur-Archiv* 56, pp. 389-399. Schreurs et al. 2006:



- Tejchman, J., 1995. Grain size effect in bearing capacity of a strip foundation on sand. In: G.N. Pande, S. Pietruszczak (eds.), Numerical models in geomechanics, NUMOG V, Davos, pp. 571-576.
- Tejchman, J., 1997: Modelling of shear localisation and autogeneous dynamic effects in granular bodies. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 140.
- van der Zee, W., Urai, J.L., Richard, P.D., 2003. Lateral clay injection into normal faults. GeoArabia 8(3), 501-522. Wang & Davis 1996:
- Wolf, H., 2005. Zur Scherfugenbänderung granularer Materialien unter Extensionsbeanspruchung. Veröffentlichung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 37.
- Yielding, G. Freeman, B. & Needham, D.T. 1997. Quantitative fault seal prediction. AAPG Bulletin 81 (6), 897-917.
- Yielding, G., 2002. Shale Gouge Ratio - Calibration by geohistory. In: A.G. Koestler, R. Hunsdale (eds.), Hydrocarbon Seal Quantification, NPF Special Publication 11, Elsevier Science B.V. Amsterdam, pp. 1-15.