

Die Fry- und Intercept-Methode: Sinnvolle Werkzeuge zur Deformationsanalyse von Festgesteinen?

The Fry- and Intercept-Method: Useful tools for strain analysis in solid rocks?

Annika Förster¹, Christof Lempp¹

¹ Dr. A. Förster, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; annika.foerster@geo.uni-halle.de

Zusammenfassung

Untersuchungen des mechanischen Verhaltens von Festgesteinen unter kompressivem und unter extensionalem Stress-Regime spielen eine fundamentale Rolle in der Risikobewertung u.a. beim Bau und anschließender Überwachung von Tunnelbauten, Brückenkonstruktionen oder Bohrungen. Mit Hilfe finiter Deformationsanalysen kann der Betrag von Verformungen im Festgestein quantitativ abgeschätzt werden. Ausschlaggebend bei der Betrachtung des Deformationsverhaltens bis zur Rissbildung ist das kleinmaßstäbliche inhomogene Gefüge des Gesteins. Mit der Intercept-Methode erfolgt eine Berechnung einer Deformationsellipse anhand der Korngrößen und der Kornformen. Dabei spiegelt die Größe der Deformationsellipse die Veränderung während der Kompaktion bzw. den Deformationsprozessen wider (Lage der Hauptspannungsrichtung σ_1), während die Orientierung der Ellipse Hinweise auf die Hauptausrichtung der Partikel im Vergleich zum Probenkörper gibt. Erste Ergebnisse aus im Labor durchgeführten einaxialen Druckversuchen zeigen im kleinen Maßstab eine Abhängigkeit der Ausrichtung von σ_1 vom Korngefüge während der Beanspruchung.

Schlüsselworte: Finite Deformationsanalyse, Intercept-Methode, Fry-Methode

Abstract

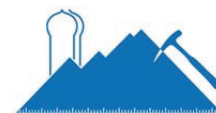
Analysis of the mechanical behavior of rocks under compressive and extensional stress plays a fundamental role in the crucial risk assessment with respect to construction of e.g. tunnels, bridges or boreholes. With finite strain analysis the amount of deformation can be estimated quantitatively in solid rocks. Thereby the small-scale inhomogeneous structure of the rock is the decisive factor in the consideration of the mechanical deformation behavior before cracking. Following the Intercept-Method, a strain ellipse will be generated based on particle sizes and shapes. The size of the strain ellipse is an indicator for the deformation degree during compaction or deformation processes and can be described as the ratio of the long axis to short axis of the strain ellipse and indicate the position of the principal stress direction σ_1 . However, the orientation of the strain ellipse indicates the position of the mean direction of the particles direction relative to the sample core direction. Initial results from laboratory conducted uniaxial compression tests show the dependency on the orientation of σ_1 according to the grain structure in a small scale.

Keywords: Finite Strain Analysis, Intercept-Method, Fry-Method

1 Einleitung

Beobachtungen und Untersuchungen des mechanischen Verhaltens von Festgesteinen und Gebirgen spielen eine fundamentale Rolle in der Risikobewertung von u.a. Tunnel- und Brückenbauten, Geothermiebohrungen oder bei der Verlegung von Kabeltrassen. Bauwerksreaktionen können u.a. mit photogrammetrischen Messtechniken (ALBERT & SEYLER, 2004) beobachtet werden. Hingegen ist bei Ermittlungen und Überwachungen von Bauwerk-Gesteins-Wechselwirkungen und des Gebirges selbst meistens noch ein messtechnischer Einbau von u.a. Extensionometern oder Inklinometern erforderlich. Um eine minimalinvasive Methode handelt es sich dagegen bei der finiten Deformationsanalyse. Dadurch kann anhand der quantitativen Abschätzung des Betrages der Verformung im Festgestein auf das

mechanische Verhalten von Gebirgs- und Festgesteinsproben unter kompressivem und unter extensionalem Stress-Regime rückgeschlossen werden. Dabei sind der plastische und rupturable Anteil beim Verformungsverhalten des Gebirges voneinander zu unterscheiden. Zu diesen Analysemethoden zählen u.a. die Fry-Methode (FRY, 1979) und die aus petrographischen Verformungsanalysen bekannte Intercept-Methode (LAUNEAU ET AL., 1990; LAUNEAU & ROBIN, 1996). Dabei werden die Verschiebung bzw. die Form- und Volumenveränderungen von Referenzmerkmalen im Gestein ermittelt (MULCHRONE, 2007). In Bezug auf ihre Handhabung, Vor- und Nachteile und Plausibilität der Ergebnisse sollen die beiden obigen Methoden außerdem verglichen werden.



1.1 Laborversuche und Probenkörperbeschaffenheit

Zur Untersuchung des Deformationsverhaltens mit Hilfe der finiten Deformationsanalyse wurden im Labor einaxiale Druckversuche an zwei verschiedenen Gesteinstypen durchgeführt (Abb. 1A und B).

Zylindrische Probenkörper mit einem Durchmesser von ~70 mm und einer Höhe von 120-140 mm wurden stufenweise bis ~ 40 MN/m² für eine Zeit von mindestens 24 Stunden belastet und nach jeder Belastungsstufe fotografiert. So kann für jeden Gesteinstyp bei jeder einzelnen Belastungsstufe eine Deformationsellipse erstellt werden.

Um eine Abhängigkeit der Verschiebung der Hauptspannungsrichtung (σ_1) von den Korn-Matrix-Strukturen während der Beanspruchungen aufzuzeigen, wurden zwei unterschiedliche Gesteinstypen gewählt:

- ein permokarbonisches Konglomerat aus dem Saar-Nahe-Becken (Abb. 1A). Die untersuchte Konglomerat-Probe besitzt ein korngestütztes Gefüge mit einem calcitischen/sparitischen Zement. Die Körner bestehen zu 20-30% aus Quarz und zu 70-80% aus Gesteinsfragmenten (HECHT ET AL., 2005).
- ein Kalkstein aus der Unteren Muschelkalk-Abfolge der Querfurter Mulde (RADZINSKI ET AL., 2008). Das Gefüge besteht aus feinkörniger karbonatischer Matrix, in die karbonatische und tonige Klasten eingebettet sind (Abb. 1B).

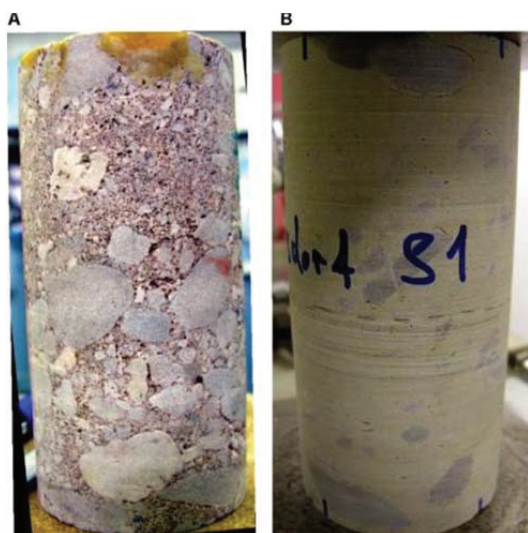


Abb. 1: Probenkerne, vor der Durchführung von einaxialen Druckversuchen, von einem permokarbonischen korngestützten Konglomerat mit calcitischem Zement und B) einem triassischen (Unterer Muschelkalk) Kalkstein mit karbonatischer Matrix, in die karbonatische und tonigen Klasten eingebettet sind.

Fig. 1: Core samples before compression tests of a permocarboniferous grain supported conglomerate, calcite cemented (A) and a triassic (lower Muschelkalk) matrix supported limestone with imbedded carbonatic and argillaceous clasts (B).

Zur weiteren Charakterisierung der Proben wurde zu jeder Stufe der einaxialen Druckversuche gesteinsphysikalische Parameter (u.a. Dichte, Porosität und Wassergehalt) und als

Hinweis auf das Verformungsverhalten das Verformungsmodul bestimmt (Tab. 1A und B). Die unterschiedlichen Spannungen bei ein und derselben Belastungsstufe resultieren aus der leicht unterschiedlichen Probenkörpergeometrie, da die einaxialen Druckversuche mit einer konstanten Kraft durchgeführt worden sind.

1.2 Problematik der Fry-Methode

Die konventionelle Fry-Methode (FRY, 1979) nutzt zur Berechnung einer Deformationsellipse die Mittelpunkte von Referenzpartikeln und deren Lage im Verhältnis zueinander. Für eine sinnvolle Nutzung der Fry-Methode sollten die Partikel vor der Verformung gleichmäßig verteilt, elliptisch geformt sein und einen großen mechanischen Unterschied zur Matrix besitzen. Allerdings werden bei der Deformationsanalyse mit der konventionellen Fry-Methode die Kornform und die Korngröße nicht beachtet, die bei den untersuchten Probekörpern zwischen 0,18 und 7,5 mm (Konglomerat) bzw. 0,18 und 17 mm (Kalkstein) schwankt. Die normalisierte Fry-Methode (ERSLEV & GE, 1990) löst das Problem der Korngröße, indem die Distanz zwischen Partikelmittelpunkten auf die Summe der Durchschnittsradien normiert wird. Für elliptisch geformte Partikel ist die normalisierte Fry-Methode gut anwendbar. In vielen Gesteinen treten aber nicht nur elliptische sondern auch polygonal geformte Partikel auf. MCNAUGHT (1994) hat dafür die normalisierte Fry-Methode modifiziert, um auch die Kornform in die Deformationsanalyse mit einfließen zu lassen.

Tab.1: Gesteinsphysikalische Parameter (Dichte ρ , Porosität ϕ , Wassergehalt w) und Verformungsmodul (E_v) der Probenkörper des Konglomerats (A) und des Kalksteins (B), die vor und während der einzelnen Laststufen bestimmt worden sind

Tab.1: Rockphysical parameters (density ρ , porosity ϕ , water content w) and the modulus of deformation (E_v) of the conglomerate (A) and the limestone (B). These parameters were determined before and during the compression tests.

A permokarbonisches Konglomerat				
Auflast (MN/m ²)	ϕ (%)	ρ (g/cm ³)	w (%)	E_v (GPa)
0	5,73	2,460	2,39	-
13,096	5,74	2,457	2,39	8,39
26,787	5,73	2,457	2,39	15,08
42,041	5,73	2,457	2,39	18,33

B Kalkstein (Unterer Muschelkalk)				
Auflast (MN/m ²)	ϕ (%)	ρ (g/cm ³)	w (%)	E_v (GPa)
0	3,49	2,593	1,41	-
13,097	3,33	2,595	1,31	19,74
26,168	3,29	2,602	1,29	15,93
39,233	3,26	2,603	1,28	22,03

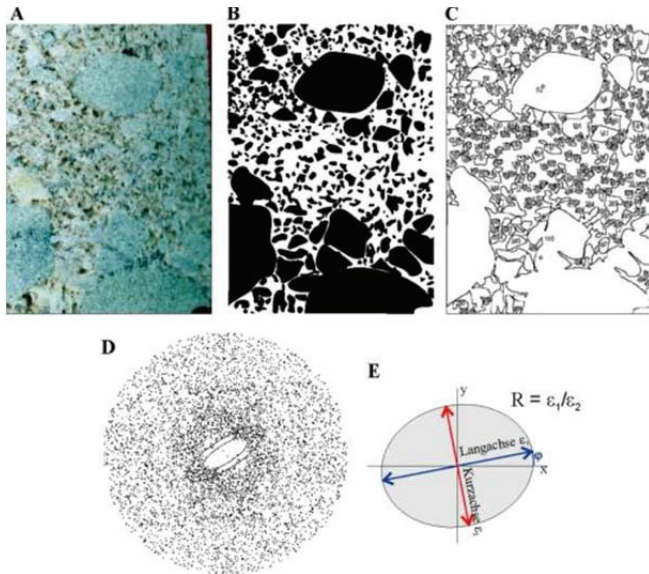


Abb. 2: Auswertung von Markerpartikeln zur Erstellung einer Deformationsellipse mit Hilfe der modifizierten normalisierten Fry-Methode (MCNAUGHT, 1994). Die Markierung der Partikel erfolgt anhand von Kernphotographien (A, B). Zur objektiven Auswertung der Deformationsellipse wird die Bildbearbeitungssoftware ImageJ (ABRAMOFF ET AL., 2004) herangezogen. Die Konturen der Partikel werden vom Programm erkannt und jeweiligen Lagen jedes Mittelpunktes erfasst (C). Diese Mittelpunkte werden unter Anwendung der Softwaretools FryJ und FryJFit (WALDRON & WALLACE, 2007) auf der Grundlage der normalisierten Fry-Methode ausgewertet. Das Resultat ist eine Ellipse, die die Form und die Orientierung der Deformationsellipse repräsentiert (D). Die Elliptizität ($R = \varepsilon_1/\varepsilon_2$) ist als das Verhältnis der Lang- zur Kurzachse der Deformationsellipse definiert, während der Winkel φ ($^\circ$) die Abweichung der Langachse von der x-Richtung angibt (E).

Fig. 2: Evaluation of marker particles to create a strain ellipse with the aid of the modified normalized Fry-Method (MCNAUGHT, 1994). Tracing of the particles are based on core pictures (A, B). For objective evaluation of the strain ellipse the image processing software ImageJ (ABRAMOFF ET AL., 2004) was used. The contours of the particles are detected by the program and the position of each center-point can be determined (C). With these center-points the software tools FryJ and FryJFit (WALDRON & WALLACE, 2007) calculate an ellipse, evaluated on the basis of normalized Fry method. This ellipse represents the shape and orientation of the deformation ellipse (D). The ellipticity ($R = \varepsilon_1/\varepsilon_2$) is defined as the ratio of long to short axis of the strain ellipse, while the angle φ ($^\circ$) indicated the deviation of the long axis of the x-direction (E).

Um eine objektive Auswertung der Deformationsellipse zu gewährleisten, haben WALDRON & WALLACE (2007) zwei Softwaretools für das Bildverarbeitungsprogramm ImageJ (ABRAMOFF ET AL., 2004) entwickelt, die die normalisierte und modifizierte Fry-Methode von ERSLEV & GE (1990) und MCNAUGHT (1994) beinhalten. Dafür wurden an den einaxial beanspruchten Gesteinsproben die Markerpartikel markiert (Abb. 2A und B). Mit Hilfe der Softwaretools FryJ und FryJFit (WALDRON & WALLACE, 2007) werden die Lagen der Partikelmittelpunkte automatisch ausgewertet und es wird eine Deformationsellipse erstellt (Abb. 2C und D). Die Elliptizität R wird durch das Verhältnis von Lang- zu Kurzachse der Deformationsellipse definiert. Der Winkel φ ($^\circ$) gibt die Richtung bzw. Abweichung der Langachse

von der x-Richtung an (Abb. 2E). Bei der automatischen Auswertung der hier vorliegenden Markerpartikel tritt das Problem auf, dass zum Teil einzelne Partikel zusammengeführt werden und die daraus resultierenden Lagen der Partikelmittelpunkte verschoben werden (Abb. 2B und C). Dadurch werden weniger Partikel als tatsächlich vorhanden zur Auswertung herangezogen (siehe Abschnitt 2.1). Außerdem tritt stellenweise ein zu geringer mechanischer Unterschied der vorliegenden Markerpartikel zur umgebenden Matrix auf. Aufgrund dieser beiden Problematiken wurde nach einer weiteren Auswertungsmethode für eine quantitative Auswertung des Deformationsverhaltens gesucht.

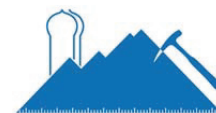
1.3 Die Intercept-Methode

Die Intercept-Methode basiert auf dem Zählen von Schnittpunkten von einem Netz von parallelen Linien mit Markerpartikel (LAUNEAU ET AL., 1990; LAUNEAU & ROBIN, 1996; LAUNEAU & ROBIN, 2003; LAUNEAU ET AL., 2010). Diese Markerpartikel können irregulär geformt und anisotrop verteilt sein. Auch ist im Gegensatz zur Fry-Methode kein großer mechanischer Kontrast zur umgebenden Matrix nötig.

Wie für die Fry-Methode werden auf der Grundlage von Kernfotos die Markerpartikel markiert (Abb. 3A und B). Das Netz aus parallelen Linien, alle mit einem gleichen Abstand zu einander, wird über jedes Partikel gelegt und am Anfang mit der Orientierung $\alpha=0^\circ$ zur x-Richtung der Markerpartikel gewählt. Als Schnittpunkt wird nur derjenige Punkt gezählt dem ein außerhalb des Netzes gelegener Punkt folgt. Zur Analyse wird das Netz in unterschiedliche Richtungen (α) ausgerichtet und es werden erneut die Schnittpunkte mit dem Markerpartikel gezählt (Abb. 3C). Die gesamte Anzahl der Schnittpunkte wird in Abhängigkeit von den Drehwinkeln des Liniennetzes in einem Rose-Diagramm dargestellt (Abb. 3D). Zählt man die Punkte die innerhalb eines Partikel liegen, und dividiert deren Anzahl durch die der Schnittpunkte erhält man die mittlere Schnittweite L (LAUNEAU ET AL., 2010).

Die Rosen-Diagramme der Schnittpunkte sind periodische Funktionen, die mit Hilfe von Fourier-Serien dargestellt werden können (LAUNEAU & ROBIN, 1996). Dadurch ergibt sich eine Ellipse, die die Ausrichtung der mittleren Schnittweite L widerspiegelt (Abb. 3E). Die Elliptizität R dieser Ellipse, die auch die Form der Deformationsellipse repräsentiert, wird durch das Verhältnis von Langachse zur Kurzachse der Deformationsellipse definiert. Im Gegensatz zur Fry-Methode gibt der Winkel φ ($^\circ$) bei der Intercept-Methode aber nicht die Orientierung der Deformationsellipse an, sondern zeigt die Hauptausrichtung der Markerpartikel mit Abweichung zur y-Richtung an. Dabei ist die Kornform der Partikel nicht ausschlaggebend, sondern nur die Richtung der Hauptachsen der Partikel.

In das Softwaretool SPO 2003 (LAUNEAU & ROBIN, 2003) wurde die Intercept-Methode implementiert um eine objektive Auswertung der Deformationsellipse durchzuführen. Die Umrisse der Klaster werden in SPO 2003 eingeladen, und anhand eines Abbildes der Klaster werden Rosen-Diagramme (Abb. 3D) und eine Deformationsellipse erstellt (Abb. 3E). Für die Erstellung der Deformationsellipse müs-



sen im Programm die Abstufungen des Winkels α (Abb. 3C) und die Klassensegmente gewählt werden. Für die Auswertung ist wichtig, dass immer die gleichen Abstufungen des Winkels α gewählt werden.

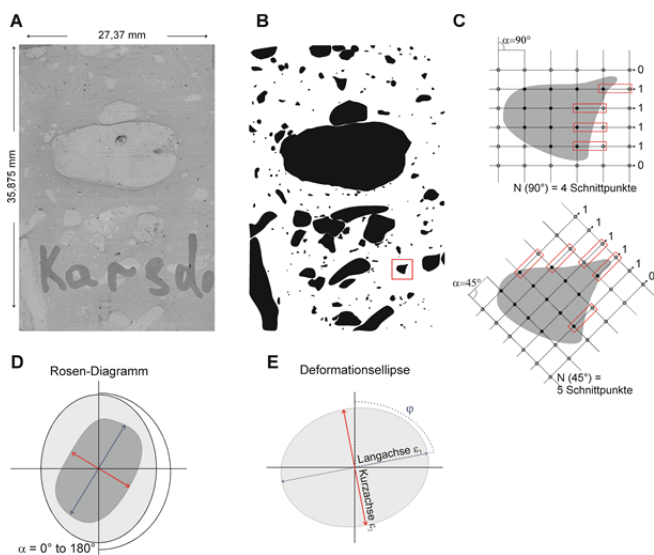


Abb.3: Ausschnitt eines digitalisierten Kernfotos von einer Kalksteinprobe (A). Die Umrisse von Klasten markiert (B) und in die Software SPO2003 (LAUNEAU & ROBIN, 2003) geladen. Diese Software nutzt die Intercept-Methode, die auf dem Zählen von Schnittpunkten von einem Netz von parallelen Linien mit den Klasten basiert. Das Netz wird in unterschiedliche Richtungen (α) ausgerichtet und es werden erneut die Schnittpunkte mit dem Markerpartikel gezählt. Als Schnittpunkt wird nur derjenige Punkt gezählt dem ein außerhalb des Netzes gelegener Punkt folgt (C). Die gesamte Anzahl der Schnittpunkte wird in Abhängigkeit von den Drehwinkeln des Liniennetzes in einem Rose-Diagramm dargestellt (D). Die Elliptizität der aus dem Rosen-Diagramm resultierenden Ellipse ($R = \epsilon_1/\epsilon_2$) gibt das Verhältnis der Lang- zur Kurzachse einer Deformationsellipse wieder. Der Winkel φ ($^\circ$) gibt die Hauptausrichtung der Partikel wieder (E).

Fig. 3: Detail of a digitized core photograph of a limestone sample with identifiable clasts (A). The shape of these clasts were marked (B) and uploaded into SPO2003 (LAUNEAU & ROBIN, 2003), which uses the Intercept-Method (C) by counting the number of intercepted segments of objects by a set of parallel lines along a number of several directions. The number of intercepts is the number of times, a cursor migrating along a line moves out of phase (LAUNEAU & ROBIN, 1996). The total number of intercepts N (α) is pictured in a Rose-diagram (D). The ellipticity R (ϵ_1/ϵ_2) is defined as the ratio of long to short axis of the strain ellipse, while the angle φ ($^\circ$) indicated the mean direction auf the particles (E).

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Vergleich Fry- und Intercept-Methode

Nach den einaxialen Druckversuchen wurde zu jeder Belastungsstufe (Tab. 1) an beiden Gesteinstypen die finite Deformationsanalyse sowohl mit der Fry-Methode als auch mit der Intercept-Methode erstellt. Für einen Vergleich der beiden Methoden wurden an beiden Gesteinstypen für die ersten drei Belastungsstufen (ohne Auflast als Referenz, 5,225-5,427 MN/m^2 und 13,097 MN/m^2) sowohl die Fry- als auch die Intercept-Methode angewandt (Abb. 4A und B).

Vor dem Vergleich der tatsächlichen Messwerte wurden, aufgrund der in Kapitel 2.2 beschriebenen Problematiken mit der softwareimplementierten Fry-Methode, die Partikelanzahlen der beiden Methode miteinander verglichen. Dabei handelt es sich um die Partikelanzahlen, die bei jeder Methode und jeder Laststufe zur Auswertung herangezogen worden. Während bei der Intercept-Methode die tatsächlich vorhandenen Partikel eingelesen und gezählt werden, weichen die Partikelanzahlen bei der Fry-Methode deutlich ab (Abb. 4 A und B). Diese Abweichung ist bei den Konglomeratproben deutlich größer als bei den Kalksteinproben. Dieser Unterschied könnte an verschiedenen Gefügezusammensetzungen der beiden Proben liegen (Abb. 1). Beim korngestützten Gefüge der Konglomeratproben liegen die einzelnen Partikel sehr nahe beieinander und können nicht so eindeutig von der Software abgegrenzt werden (Abb. 2B und C), wie in den matrixgestützten Kalksteinproben. Außerdem wurden für die vorliegende Analyse polygonal geformte Partikel benutzt, was zu Schwierigkeiten bei der Auswertung mit der Fry-Methode führen kann (MCNAUGHT, 1994; WALDRON & WALLACE, 2007).

Die beiden Aspekte der Kornform und der verminderten Partikelanzahl, und die daraus resultierende Änderung des Mikrogefüges, tragen dazu bei, dass sich die Fry-Methode für die finite Deformationsanalyse als ein leicht anwendbares Tool nicht eignet, da bei der Analyse des Deformationsverhaltens gerade das kleinmaßstäbliche Gefüge ausschlaggebend ist. Deswegen wurden alle weiteren Analysen und Vergleich der Intercept-Methode unterzogen.

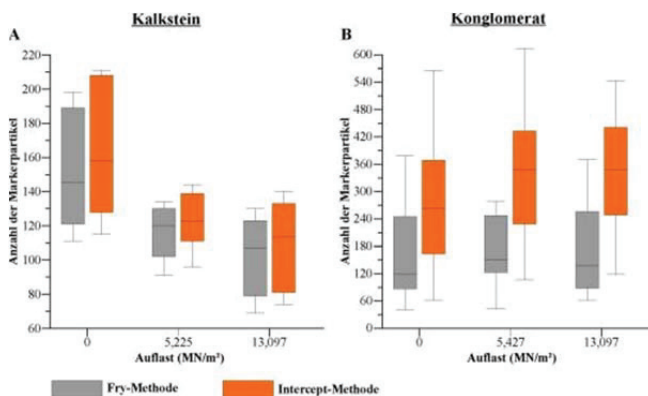


Abb. 4: Anzahlen der verwendeten Markerpartikel von den Kalksteinproben (A) und den Konglomerat-Proben (B). Dargestellt ist ein Vergleich der Fry- mit der Intercept-Methode für drei Belastungsstufen (ohne Auflast als Referenzprobe, 5,225-5,427 MN/m^2 und 13,097 MN/m^2). Die Box-Whisker-Plots zeigen die Lage der Median-Werte und der ersten Quartile an.

Fig. 4: Number of marker particles from limestone (A) and conglomerate core samples. Shown is the comparison of the the Fry- with the Intercept-Method for three load levels (without load for reference, 5,225-5,427 MN/m^2 and 13,097 MN/m^2). The Box-Whisker-Plots show the median and the first quartile.

2.2 Abhängigkeit der Deformationsellipsen vom Gefüge

Für eine bessere Veranschaulichung werden die Ergebnisse 2-dimensional von einer Mantelfläche dargestellt, die sich aus einer Abrollung der Kernfläche in x-Richtung ergibt.

Dabei erkennt man die Unterschiede im Korngefüge (Abb. 5A und B): die Konglomerate zeigen ein korngestütztes Gefüge mit leicht eckigen bis gerundeten Klasten. Die meisten großen Partikel sind in der linken oberen und in der rechten unteren Ecke aufzufinden. In den Kalksteinen sind gerundete Klasten in einer feinkörnigen Matrix verteilt. Dabei sind die größeren Partikel im oberen und unteren Bereich der Prüfkörper verteilt. Um Änderungen der Deformationsellipsen zwischen den verschiedenen Belastungsstufen sichtbar zu machen, wurden die jeweiligen Elliptizitätswerte (R) und Winkeländerungen (φ) auf einen Referenzwert normiert. Dafür wurden die R -Werte der Stufe ohne Auflast auf 1 zurückgerechnet und die Differenz von $R=1$ und dem tatsächlichen R -Wert wurde von allen R -Werten der anderen Belastungsstufen subtrahiert. Die tatsächlich gemessenen φ -Werte sind auf 0° zurückgesetzt worden. Diese Differenz wurde, ähnlich wie bei den R -Werten, von allen φ -Werten der anderen Belastungsstufen subtrahiert (Abb. 5).

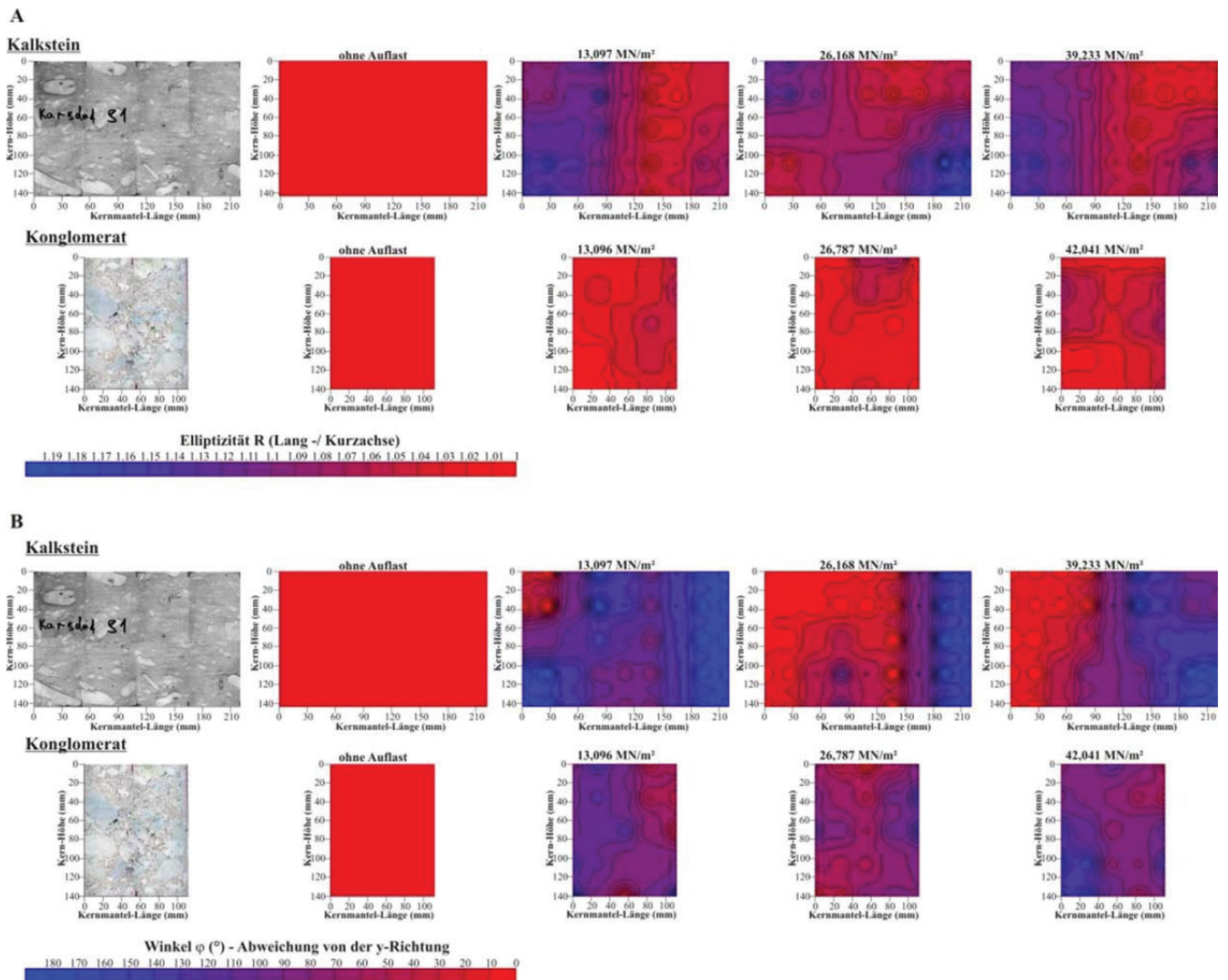


Abb. 5: Normierte Elliptizitätswerte R (A) und Winkeldrehungen φ (B) der Deformationsellipsen (A), die mit der Intercept-Methode an beiden Gesteinstypen nach jeder verschiedenen Belastungsstufe der einaxialen Druckversuche (ohne Auflast bis ~ 40 MN/m²) erstellt wurde. Die ersten beiden Bilder zeigen die dazugehörigen abgerollten Kernfotos mit den jeweiligen Gefügestrukturen (Kalkstein und Konglomerat).

Fig. 5: Normalized ellipticity values R (A) and angle rotation φ (B) of the deformation ellipse, which have been created on both rock types for each different load level of the uniaxial compression tests (without load to ~ 40 MN/m²). The first two pictures show the corresponding unrolled core photos with the respective microstructures (limestone and conglomerate).

Vergleicht man die R -Werte der beiden Gesteinstypen (Abb. 5A), zeigen die Kalksteine mit $R < 1.9$ deutlich höhere Werte als die Konglomerate mit $R < 1.09$. Die Abbildung 5B zeigt hingegen die Hauptausrichtung der Partikel mit Abweichung zur y -Richtung an. Die größeren R -Werte in den Kalksteinen deuten auf eine größere σ_1 -Spannung innerhalb der Proben hin. Das matrixgestützte Gefüge der

Kalksteinproben nimmt mehr Spannung auf und leitet sie nicht über die Körner ab, wobei es dann zu Verschiebungen der Körner selber kommen würde. Die R -Werte zeigen beim Kalkstein nach der ersten Laststufe (13,097 MN/m²) eine deutliche Änderung, wohingegen zu den nachfolgenden Laststufen kaum noch eine Erhöhung der R -Werte festzustellen ist. Für den oberen Bereich des Kernes ist eine Erhöhung der R -Werte im Zuge der Laststufenerhöhung zu



erkennen (Abb. 5A). Auf das Gefüge kann diese Beobachtung nicht zurückzuführen sein, da die Klaster in der Matrix gut verteilt sind. Dies ist vielleicht ein Effekt einer nicht gleichmäßig verteilten Spannung im Probenkörper. Die Kalksteinproben zeigen Hauptausrichtungen der Partikel in 0-180°-Richtung.

Hingegen sind Verschiebungen von Körner in den Konglomeraten zu beobachten mit Hauptausrichtungen der Partikel zwischen 60° und 110° in positiver Abweichung von der y-Richtung. Neben Partikelverschiebung ist auch ein vermehrtes Auftreten von größeren Partikeln in der linken oberen und in der rechten unteren Ecke zu beobachten. Zwischen diesen beiden Lagen beginnt ab der zweiten Laststufe (26,767 MN/m²) eine Winkelverdrehung der Hauptausrichtung von der 90°-Orientierung in Richtung der y-Achse (Abb. 5B). Auch die R-Werte zeigen eine Abhängigkeit vom Korngefüge bei den Konglomeraten. Im mittleren Bereich treten die meisten größeren Körner auf, und genau dort ist auch eine Erhöhung der R-Werte mit Erhöhung der Laststufen zu erkennen (Abb. 5A).

3 Anwendbarkeit und mögliche Anwendungsbe- reiche der Intercept-Methode

Aus der Petrographie sind Verformungsanalysen von Mineralen u.a. in Myloniten bekannt (u.a. TIKOFF & TEYSSIER, 1994). Ebenfalls ist das Einregelverhalten von biegesteifen Partikeln in viskosen Medien unter bestimmten Auflastspannungen zum größten Teil bekannt (ILDEFONSE & MANCKTELOW, 1993). Auch bei mechanischer Beanspruchung von Gesteinen fangen diese an sich zu Verformungen bzw. es können Einregelungen von Partikeln im Gestein beobachtet werden (MULCHRONE, 2007). Anhand dieser Einregelungen und Verformungen soll eine Aussage darüber getroffen werden, wie sich die Spannung und Verformung im Gestein ändert. Diese Arbeit zeigt erste Ergebnisse aus Laborversuchen, bei denen finite Deformationsanalysen mit Hilfe der in der Software SPO2003 (LAUNEAU & ROBIN, 2003) implementierten Intercept-Methode (LAUNEAU ET AL., 1990; LAUNEAU & ROBIN, 1996) an verschiedenen Gesteinstypen durchgeführt worden sind. Die Ergebnisse sollen zur Entwicklung einer minimalinvasiven und anwendbaren Methode zur Überwachung vom Deformationsverhalten von Gebirgen beitragen. Die bisherigen Ergebnisse dieser Arbeit zeigen eine eindeutige Abhängigkeit der Elliptizitätswerte der Deformationsellipse vom Korngefüge. Inwieweit dies auch auf andere Korngefüge zutrifft, muss noch eingehender untersucht werden. Außerdem zeigt diese Arbeit, dass die Intercept-Methode im Gegensatz zur Fry-Methode auch bei polygonalen Partikeln gut anwendbar ist. Nur muss noch die Markierung der Partikel einfacher gestaltet werden, z.B. mit dem Softwareprogramm SAPE von MULCHRONE ET AL (2005). Es handelt sich bei den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit um eine 2-dimensionale Auswertung. Eine Betrachtung der 3-dimensionalen Verformung und der Effekt der Probengröße sowie der Belastungsdauer und -geschwindigkeit auf die Ergebnisse (MEERE & MULCHRONE, 2003) sollen später erfolgen.

Um in Zukunft bei Tunnelbauten finite Spannungsanalysen mit Hilfe der Intercept-Methode zur Überwachung des Deformationsverhaltens des Gebirges durchführen zu können,

werden über einen längeren Zeitraum immer der gleiche Gesteinsausschnitt benötigt. Dies wäre bei möglichen Verschalungen der Tunnelinnenwände zu beachten, hätte aber den Vorteil, dass dies ohne Einbau von Messgeräten vorstatten gehen könnte.

Literatur

- ERSLEV, E.A. & GE, H. (1990): Least-squares center-to-center and mean object ellipse fabric analysis. – *J Struct Geol*, **12**: 1047-1059.
- FRY, N. (1979): Random point distributions and strain measurement in rocks. – *Tectonophysics*, **60**: 89-105.
- HECHT, C.A., BÖNSCH, C. & BAUCH, E. (2005): Relations of Rock Structure and Composition to Petrophysical and Geomechanical Rock Properties: Examples from Permian-carboniferous Red-Beds. – *Rock Mech. Rock Engng.*, **38** (3): 197-216.
- ILDEFONSE, B. & MANCKTELOW, N.S. (1993): Deformation around rigid particles: the influence of slip at the particle / matrix interface. – *Tectonophysics*, **221**: 345-359.
- LAUNEAU, P., BOUCHEZ, J.-L. & BENN, K. (1990): Shape preferred orientation of object populations: automatic analysis of digitized images. – *Tectonophysics*, **180**: 201-211.
- LAUNEAU, P. & ROBIN, P.-Y. (1996): Fabric analysis using the intercept method. – *Tectonophysics*, **267**: 91-119.
- LAUNEAU, P. & ROBIN, P.-Y. (2003): SPO 2003 - Shape Preferred Orientation 2003. <http://www.sciences.univ-nantes.fr/geol/SPO>.
- LAUNEAU, P., ARCHANJO, C.J., PICARD, D., ARBARET, L. & ROBIN, P.-Y. (2010): Two- and three-dimensional shape fabric analysis by the intercept method in grey levels. – *Tectonophysics*, **492**: 230-239.
- MCNAUGHT, M. (1994): Modifying the normalized Fry method for aggregates of non-elliptical grains. – *J Struct Geol*, **16**: 493-504.
- MEERE, P.A. & MULCHRONE, K.F. (2003): The effect of sample size on geological strain estimation from passively deformed clastic sedimentary rocks. – *J Struct Geol*, **25**: 1587-1595.
- MULCHRONE, K.F., MEERE, P.A. & CHOUDHURY, K.R. (2005): SAPE: A PROGRAM FOR SEMI-AUTOMATIC PARAMETER EXTRACTION FOR STRAIN ANALYSIS. – *J Struct Geol*, **27**: 2084-2098.
- MULCHRONE, K.F. (2007): Shape fabrics in populations of rigid objects in 2D: Estimating finite strain and vorticity. – *J Struct Geol*, **29**: 1558-1570.
- RADZINSKI, K.H., EHLING, B.C., KUNERT, R., & BEUTLER, G. (2008): Südöstliches Harzvorland. - In: BACHMANN, G., EHLING, B.C., EICHNER, R. & SCHWAB, M.: *Geologie von Sachsen-Anhalt*. – 1. Auflage, 458-472, Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- TIKOFF, B. & TEYSSIER, C. (1994): Strain and fabric analyses based on porphyroclast interaction. – *J Struct Geol*, **16**: 477-491.
- WALDRON, J.W.F.; WALLACE, K.D. (2007): Objective fitting of ellipses in the centre-to-centre (Fry) method of strain analysis. – *J Struct Geol*, **29**: 1430-1444.