

DIE UNTERSUCHUNGEN DER DEFORMATIONEN MIT RHOMBISCHER UND MONOKLINER SYMMETRIE IN DEN TONKÖRPERN

Erkan TANYOLU

D.M.M. Akademisi, Zonguldak-Turkei

ZUSAMMENFASSUNG. — In der vorliegenden Arbeit wurden die natürlichen tektonischen Vorgänge im Experiment mit Tonkörpern nachvollgezogen, um die Beziehung zwischen dem Gefüge und den das Gefüge beeinflussenden Faktoren zu klären. Bei diesen Versuchen unter Scher- und Druck-Zug Kräften wurden die fließende und rupturale Deformation, ihre gegenseitige Beeinflussung qualitativ und quantitativ untersucht. Es wurde festgestellt, dass das tektonische Gefüge nicht von der Deformationsart, sondern von der Anisotropie beeinflusst werden kann. Ausserdem wurde bewiesen, dass im Gegensatz zu bisherigen Meinungen, eine Schar von Verschiebungsbriichen nicht nur unter den Scherkräften, sondern auch unter den Druck-Zug Kräften auftreten kann. Ziel der Untersuchungen war es festzustellen, ob signifikante Unterschiede der Gefügebildung bei den beiden Deformationsarten auftreten, die es erlauben, die Deformationsart an Hand von im Gelände beobachteter Gefüge zu unterscheiden.

EINLEITUNG

Die Genese der tektonischen Bewegungen, die sich in der Natur über lange Zeiten hinweg abspielen, können nicht nur mit Geländeuntersuchungen erfasst werden. Das tektonische Gefüge kann die Bewegungen, die während der Deformation in dem betrachteten Bereich abgelaufen sind, nur teilweise wiedergeben, da es oft nur die letzten Bewegungsabschnitte widerspiegelt. Ausserdem können verschiedenartige Deformationen zu ähnlicher Gefügebildung führen. Eine wesentliche Hilfe bei der Deutung der Gefüge bietet die Möglichkeit, natürliche Vorgänge im Experiment nachzuvollziehen, um die Beziehung zwischen dem Gefüge und den das Gefüge beeinflussenden Faktoren zu klären. Da die Deformationen in der Natur häufig rhombische und monokline Symmetrie haben, d.h. unter Druck-Zug und Scherkräften auftreten, wurden sie für diese Arbeit ausgewählt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das bei diesen Deformationen entstehende Gefüge qualitativ und quantitativ zu untersuchen, und zwar sowohl das rupturale Gefüge wie auch das Gefüge der fließenden Deformation sowie die gegenseitige Beeinflussung dieser beiden Gefüge.

Die Versuchskörper wurden mit Hilfe des Bochumer Deformationstisches (R. Hoepfner, 1969) den Deformationen R und M unterworfen. Nach R. Hoepfner (1964) bezeichnen wir die reine Schiebung, die rhombische Symmetrie besitzt, als Deformation R, und die einfache Schiebung, die monokline Symmetrie besitzt, als Deformation M.

Als Versuchsmaterial wurden Ton-Wasser Mischungen benutzt, deren Eigenschaften mit der Erdkruste sehr grosse Ähnlichkeiten aufweisen.

DEFORMATION R

Bei der Deformation R entsteht aus einem homogenen Körper ein dreiaxsiges Ellipsoid, dessen langste Achse c parallel zu Z , dessen mittlere Achse b parallel zu Y , und dessen kürzeste Achse a parallel zu X liegen. Die Achsen des Deformationsellipsoides behalten diese

Lage gegenüber X, Y und Z während der Deformation bei. Das Verhältnis der Längenänderung der Achsen des Deformationsellipsoides zu ihrer Ausgangslänge $e_{1,2,3}$ ergibt:

$$e_1 = \frac{a' - a_0}{a_0} = \frac{\Delta a}{a_0} \quad e_2 = \frac{b' - b_0}{b_0} = \frac{\Delta b}{b_0} \quad e_3 = \frac{c' - c_0}{c_0} = \frac{\Delta c}{c_0}$$

wobei a_0, b_0, c_0 die Ausgangslängen, a', b', c' die Endlängen sind. Als Mass für die Grosse der Deformation wird der Quotient aus dem Verhältnis der Kurzachse zur Langachse $q = \frac{a}{c}$ ge-

wählt. Während der Deformation R ändert sich die Länge der mittleren Achse nicht, und demnach ist Deformation R volumkonstant. Bei der Deformation R treten zwei Ebenen maximaler Scherung auf, die parallel zu Y unter 45° zu X und Z liegen. Alle Materialfasern rotieren intern bis auf diejenigen, die parallel zu X, Y und Z liegen. Die Grosse der Internrotation der Materialfasern der XZ-Ebene in Abhängigkeit von der Grosse a/c errechnet sich nach folgender Formel (J.Ramsay, 1967):

$$\tan \alpha' = \frac{a}{c} \tan \alpha$$

Dabei bedeutet α den Winkel zwischen Materialfaser und der positiven Richtung der X-Achse vor der Deformation, α' denselben Winkel nach der Deformation. Als Anfangsgeschwindigkeit der Deformation wurde $e_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ beschleunigend ausgewählt, so dass die Versuchskörperoberfläche ständig konstant bleibt (Abb. 1).

DEFORMATION M

Bei der Deformation M entsteht, wie bei der Deformation R, aus einer Kugel ein dreiaxsiges Ellipsoid mit den Achsen a, b, c , wobei $a < b < c$ ist. Das Koordinatensystem XYZ wird daher auf die Ebene maximaler Scherung und die Verschiebungsrichtung in ihr bezogen. X liegt parallel zur Verschiebungsrichtung, Y normal zu X in der Ebene maximaler Scherung, und Z normal zu dieser Ebene. In der Ausgangslage befinden sich die Achsen a und c in der XZ-Ebene unter 45° zu X und zu Z, und rotieren während der Deformation in positiver Richtung, d.h. entgegen dem Uhrzeigersinn. Da die b Achse parallel zu Y liegt und ihre Lage und Länge mit der Deformation nicht ändert, ist Deformation M auch volumkonstant. Bei dieser Deformation entsteht nur eine Ebene maximaler Scherung. Als Mass für die Grosse der Deformation wird der Tangens des Rotationswinkels j der Ebene benutzt, deren Ausgangslage der YZ- Ebene entspricht (Abb.2). $\tan j = g$

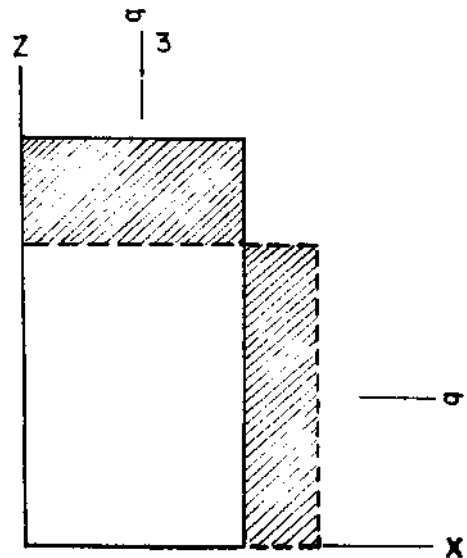


Abb. 1 - Schematische Skizze der Deformation R.

Bei den Versuchen wurde eine konstante Deformationsgeschwindigkeit von $g = 1 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ ausgewählt, die der Geschwindigkeit bei der Deformation R entspricht.

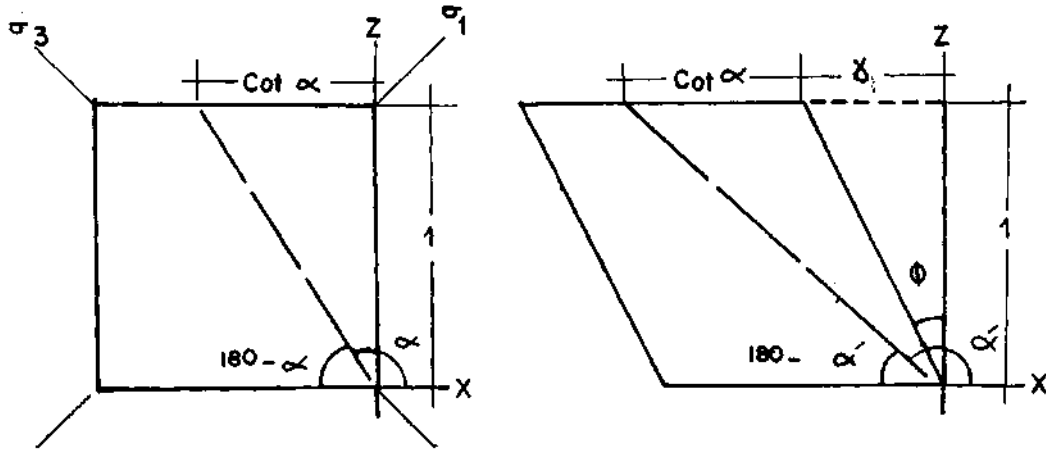


Abb. 2 - Rotation der Materialfasern auf xz-Ebene bei der Deformation M.

Bei der Deformation M rotieren alle Materialfasern bis auf diejenigen, die in der XY-Ebene liegen, intern. Die Grösse der Internrotation der Materialfasern der XZ-Ebene in der Abhängigkeit von der Grösse von γ errechnet sich nach der Formel (A. Nadai, 1950):

$$\text{Cotan } \alpha' = \frac{\text{Cotan } \alpha}{1 + \gamma^2}$$

Die Rotation der Achsen a und c von ihrer Ausgangslage unter 45° zu X und Z in Abhängigkeit von γ errechnet sich nach der Formel (J. Ramsay, 1967):

$$\text{Tan } \alpha = \frac{\gamma}{1 + \frac{\gamma^2}{(1 + e_3)^2}}$$

Um die Deformationsarten bei den Versuchen mit den Deformationen R und M vergleichen zu können, wird nach J. Ramsay (1967) die Formel;

$$1 + e_{1,3} = \frac{\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 + 4}}{2}$$

benutzt, die die Beziehung zwischen den Grössen von e und γ herstellt.

DER VERSUCHSKÖRPER UND SEIN AUFBAU

Um eine möglichst homogene Ton-Wasser-Mischung zu erzielen, wurde die Mischung zuerst mit einem Mixer, danach von Hand so lange verrührt, bis sie homogen und luftblasenfrei war. Das Material wurde auf den Bochumer Deformationstisch (R. Hoepfner u.a., 1969) aufgetragen, der es erlaubt, leicht deformierbare Substanzen verschiedenen homogenen Deformationen zu unterwerfen. Vier horizontal liegende Stangen begrenzen das beim Versuchsbeginn 50×50 cm grosse quadratische Versuchsfeld, auf dem ein Gummituch gespannt ist, das an den Rändern den Versuchskörper umhüllt. Die Oberfläche des sich im Gummituch befindenden Versuchskörpers wurde mit einem Lineal glattgezogen, bis eine gleichmässige Höhe und glatte Oberfläche entsteht. Um die Deformation zu verfolgen, wurde auf dem Tonkuchen ein farbiges Silikatpulver als quadratisches Netz mit einer Maschenweite von 1 cm aufgestreut. So entstehen Quadrate, die sich im Versuchsablauf zu Parallelogrammen verschieben und damit die fließende Deformation anzeigen oder bei ruptueller Deformation durch Versetzung der Linien Verschiebungsrichtung und -betrag erkennen lassen.

DIE AUSWERTUNGSMETHODEN

Alle Messungen wurden in einem bei Versuchsbeginn mit 20 cm Seitenlänge quadratischen Bereich durchgeführt, der in der Mitte des Versuchskörpers lag. Um die fließende Deformation zu ermitteln, wurde die Deformation des auf die Versuchskörperoberfläche aufgetragenen quadratischen Netzes vermessen und dabei zum einen die den zu Parallelogrammen deformierten Quadraten einbeschriebenen Ellipsen berechnet, zum anderen die Internrotation der Netzlinien festgestellt.

Von ca. 300 Parallelogrammen innerhalb des Messbereichs wurden die Koordinaten von drei Eckpunkten mit einem elektronischen Koordinatenerfassungsgerät mit einer Genauigkeit von 0,05 mm vermessen. Der vierte Eckpunkt des Parallelogramms wurde mit einem Rechenprogramm erzeugt und die diesen Parallelogrammen einbeschriebenen Ellipsen ermittelt.

Das Achsenverhältnis der Deformationsellipsen $q_f = a/c$ wurde berechnet, wobei a die Kurzachse und c die Langachse ist, weiterhin der Winkel α_f den die Langachse c mit der positiven Richtung der x -Achse einschliesst. Die gemittelten Werte von q_f und U_f wurden als Diagramme dargestellt, wobei q_f und α_f auf der Ordinate, die Grösse der Deformation auf der Abszisse abgetragen wurden. Um den Einfluss der ruptureilen Deformation auf die fließende Deformation feststellen zu können, wurden die theoretisch errechneten Werte (Sollwert) von q_g und α_g auch auf den gleichen Diagrammen gezeichnet.

Um die ruptureile Deformation zu untersuchen, wurden die Koordinaten der Schnittpunkte der Verschiebungsbrüche mit den Netzlinien festgestellt, und ein Rechenprogramm lieferte die Länge der Brüche in Richtungsklassen von 1° im Messbereich.

GEFÜGEBILDUNG BEI DER DEFORMATION R

Wird ein Versuchskörper mit 36 % Wasseranteil, 2 cm Höhe, in der Richtung der x - bzw. z -Achse geglättet und mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $e_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ der Deformation R unterworfen, tritt zuerst eine fließende Deformation auf, deren Verlauf wir an Hand der Änderung von q_f und α_f verfolgen, wie in Abb.3 dargestellt wurde. Bis $e_3 = 0,161$ verringern sich die Werte von q_f proportional zu e_3 auf 0,75, wobei sich die Werte von α_f in dieser Phase nicht ändern und bei 90° bleiben. Zwei Scharen von Verschiebungsbrüchen treten schon bei $e_3 = 0,116$ in Erscheinung, aber sie sind erst bei $e_3 = 0,161$ in einer für statistische Auswertung genügenden Zahl vorhanden. Sie schliessen in diesem Stadium mit der x -Achse einen Winkel von 32° bzw. 148° ein, und liegen symmetrisch zur Richtung der grössten Dehnung bzw. Einengung. In diesem Stadium, bei $e_3 = 0,161$ beträgt die Gesamtausstrichlänge im Messbereich von 400 cm^2 etwa 14 cm für jede Schar. Die Werte von q_f fallen von $e_3 = 0,161$ bis zum Versuchsende, d.h. bis $e_3 = 0,306$ nur noch um 0,06 auf 0,69 (Abb. 3). Die erste Schar der Verschiebungsbrüche, die unter einem Winkel von 32° auftrat, rotiert intern von ihrer Entstehung ab in positiver, die zweite in negativer Richtung ca. $6-7^\circ$ bis zum Versuchsende.

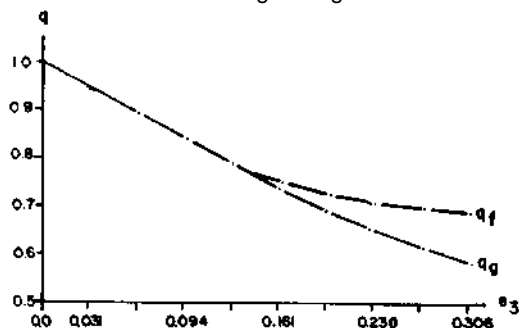


Abb. 3 - Änderung von q in Abhängigkeit von e_3 bei der Deformation R mit zwei Bruchscharen.

Bei einem Vergleich von q_f mit q_g (Sollwert)..zeigt sich, dass q_f dem Wert von q_g bis $e_3=0,161$ d.h. bis zur Entstehung der Brüche, folgt. Dann tritt eine Differenz auf, die sich bis zum Versuchsende vergrößert und am Versuchsende ca. 0.10 erreicht. Die Ursache hierfür liegt in der Ausbildung der Verschiebungsbrüche.,

Der Schwerpunkt von α_f bleibt bis zum Versuchsende unter 90° , wie er theoretisch sein sollte.

EINFLUSS DER ANISOTROPIE AUF DIE GEFÜGEBILDUNG BEI DER DEFORMATION R

Bei der Deformation R eines homogenen, isotropen Körpers erwartet man das gleichberechtigte Auftreten der zwei Scharen von Brüchen. Die Glättungsrichtung der Versuchskörperoberfläche beeinflusst wesentlich die Entstehung der Bruchscharen, weil eine Festigkeitsanisotropie während der Glättung in Tonkörpern hergestellt wird*. Weicht die Glättungsrichtung um ca. 5° von der Richtung der grössten Einengung bzw. Dehnung ab, so werden die Verschiebungsbrüche, die den kleineren Winkel mit der Glättungsrichtung einschliessen, bevorzugt ausgebildet. Wird der Versuchskörper abweichend von den Grundversuchen unter 45° geglättet und der Deformation R unterworfen, verläuft die fließende Deformation bis ca. $e_3=0,161$ wie bei den Grundversuchen (Abb.4). Die ersten Brüche treten bei $e_3=0,116$ auf und liegen bei $e_3=0,161$ unter 32° , d.h. sie gehören der ersten Schar an. In dieser Phase hat q_f einen Wert von 0,75 und $\alpha_f = 90^\circ$. Mit der Entstehung der Brüche nimmt die Grösse der Änderung von q_f mit steigenden Werten von e_3 ab. q_f fällt von $e_3=0,161$ bis $e_3=0,306$ um 0,01 auf 0,74 ab und behält von da ab seinen Wert bis zum Versuchsende bei (Abb. 4). α_f wandert nach dem Beginn der Bruchbildung in positiver Richtung linear und bei $e_3=0,306$ unter 100° (Abb.5).

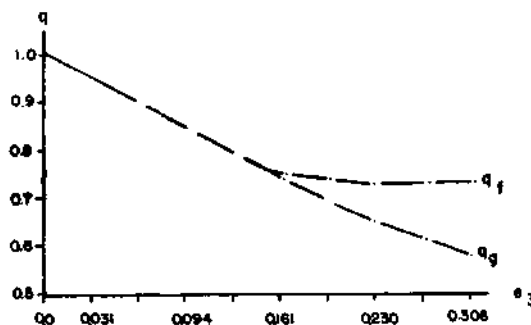


Abb. 4 - Deformation R. Nur die erste Bruchchar ist vorhanden. Änderung von q in Abhängigkeit von e_3 .

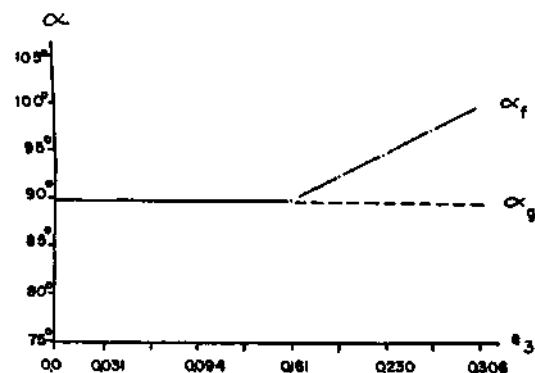


Abb. 5 - Deformation R. Nur die erste Bruchchar ist vorhanden. Änderung von α in Abhängigkeit von e_3 .

Wird der Körper unter 135° geglättet, ist der Versuchsablauf der gleiche, wie bei einer Glättung von 45° (Abb.6). Nur entsteht statt der ersten Bruchchar ausschliesslich die zweite Schar unter 148° . Die Werte von α_f verringern sich von $e_3=0,161$ bis $e_3=0,306$ um ca. 10° in negativer Richtung auf 80° (Abb.7). Die Werte von q_f ändern sich bei diesem Versuch wie bei dem Versuch, bei dem nur die erste Bruchchar entsteht.

Die Verschiebungsbrüche liegen am Versuchsende unter einem Winkel von 141° , wie sie theoretisch sein sollten und haben im Messbereich eine Gesamtlänge von ca. 350 cm.

Über dieses Thema ist eine Veröffentlichung in Vorbereitung.

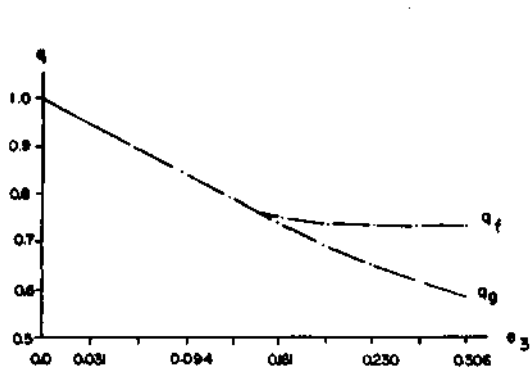


Abb. 6 - Deformation R. Nur die zweite Bruchschär ist vorhanden. Änderung von q in Abhängigkeit von e_3 .

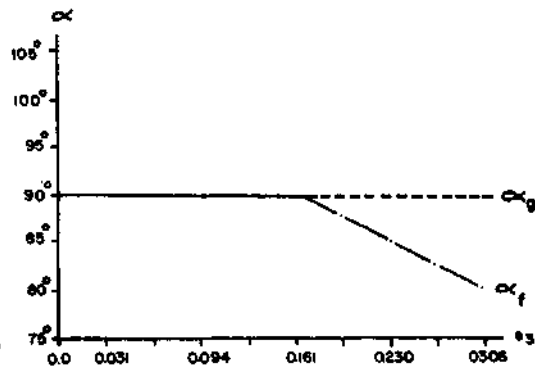


Abb. 7 - Deformation R. Nur die zweite Bruchschär ist vorhanden. Änderung von α in Abhängigkeit von e_3 .

ERGEBNISSE DER DEFORMATION R

Durch die verschiedenen Glättungsrichtungen wurden im Körper drei unterschiedliche Gefüge von Verschiebungsbrüchen erzeugt:

1. Zwei gleichwertige Scharen von Verschiebungsbrüchen durch eine Glättung unter 0° bzw. 90° .
2. Eine Schar von Brüchen bei einer Glättung von 45° bzw. 135° .
3. Zwei Bruchscharen, wobei aber die gesamte Länge einer Schar deutlich überwiegt.

Bei allen Versuchen kommen bis zur Entstehung der Brüche gleiche fließende Deformationen vor, d.h. während der nur fließenden Deformation spielt die Anisotropie keine Rolle. In dieser Phase, d.h. bis $e_3=0,161$ stimmen die gesamte und fließende Deformationen völlig überein.

In der zweiten Phase der Deformation, wenn die Rupturen entstehen und sich entwickeln, dauert eine geringere fließende Deformation bei den Versuchen mit zwei Bruchscharen an und sie hört bei den Versuchen mit nur einer Bruchschär auf. Da bei den Versuchen mit einer Bruchschär während der rupturellen Deformation die fließende Deformation nicht mehr andauert, übernimmt die rupturelle Deformation auch diese Teile der Deformation, und mehr Brüche entstehen. Am Versuchsende erreicht die gesamte Ausstrichlänge der Brüche im Messbereich eine Länge von ca. 350 cm bei der Entstehung nur einer Bruchschär, wobei diese Länge ca. 50 cm geringer ist, falls zwei Bruchscharen zusammen auftreten. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass die Schollen bei der Entstehung nur einer Bruchschär leicht aneinander gleiten, wobei die wie ein Parkett aussehenden Schollen bei der Entstehung zwei verschiedener Bruchscharen gegenseitig ihre Bewegung behindern, und somit wird in den Schollen eine fließende Deformation notwendig. Bei den Versuchen nur mit einer Bruchschär beträgt q_f am Versuchsende 0,74 während er bei den Versuchen mit zwei Bruchscharen den Wert von 0,69 annimmt. In beiden Fällen beträgt der Sollwert 0,5,9. Die Werte der Internrotation der Deformationselellipse weicht in der zweiten Phase der Deformation, d.h. während der rupturellen Deformation, von den theoretischen Werten ab. Sie rotieren mit den Schollen entsprechend der Internrotation der sie begrenzenden Brüche um $6-7^\circ$. Somit weichen die Werte der Achsen der Defor-

mationsellipsen bis zum Versuchsende von dem theoretischen Wert um ca. 6-10° in positiver, bzw. in negativer Richtung bei der Entstehung nur der ersten, bzw. zweiten Bruchschär durch Internrotation der Schollen ab.

Treten die beiden Schären etwa gleich häufig auf, weisen die Deformationsellipsen, die sich auf den von beiden Bruchschären begrenzenden Schollen befinden, keine Abweichung von dem Sollwert auf. Obwohl ein Teil der Deformationsellipsen, die sich auf den von der ersten bzw. zweiten Bruchschär begrenzten Schollen befinden, durch Internrotation eine Abweichung von ca. 6° in positiver, bzw. in negativer Richtung zeigen, stimmt ihr Mittelwert mit dem Sollwert überein.

GEFÜGEBILDUNG BEI DER DEFORMATION M

Wird ein Körper, wie der bei dem Grundversuch mit der Deformation R, in der Richtung der grössten Einengung bzw. Dehnung geglättet und anschliessend mit einer konstanten Schergeschwindigkeit von $g = 1 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ monoklin deformiert, d.h. Scherkräften unterworfen, dauert eine fließende Deformation bis $g=0,30$ an, wobei q_f einen Wert von 0,75 und $\alpha_f = 139^\circ$ erreicht (Abb. 8,9). In diesem Stadium treten zwei Schären von Verschiebungsbrüchen auf, obwohl monokline Symmetrie nur eine Ebene maximaler Scherung hat. Die elastischen Spannungen bei der Deformation M besitzen also eine rhombische Symmetrie. Die Bruchschär, die mit der Bewegungsrichtung einen Winkel von 15-20° bildet, bezeichnen wir in Anlehnung an H.Cloos (1931) als synthetische Schar; die Schar, die mit der Bewegungsrichtung einen Winkel von ca. 80° bildet, bezeichnen wir als antithetische Schar. Sie kreuzen sich unter einem Winkel von ca. 60°. Im weiteren Ablauf der Deformation entwickeln sich die Brüche rasch und die antithetischen Brüche rotieren dabei intern. Sie liegen bei $g=0,54$ unter 92°, wobei ihr Sollwert 94° beträgt. Die synthetischen Brüche behalten ihre Lage während der Deformation bei und liegen am Versuchsende unter 16-18°. Im Messbereich beträgt die gesamte Länge der Brüche ca. 350 cm. q_f verringert sich von $g=0,30$ bis $g=0,48$ um 0,04 auf 0,71 und behält danach seinen Wert bis zum Versuchsende bei, wobei q_g am Versuchsende 0,59 beträgt (Abb,8).

Die durchschnittlichen Werte von α_f stimmen in jedem Stadium mit α_g überein (Abb.9).

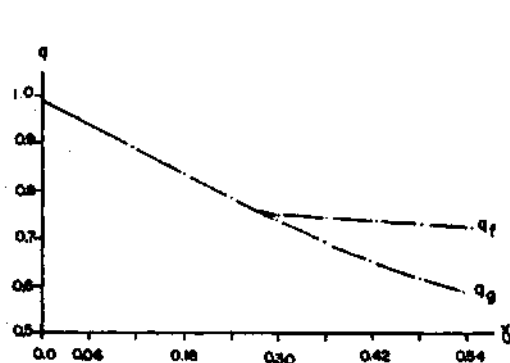


Abb. 8 - Deformation M. Zwei Bruchschären sind vorhanden. Änderung von q in Abhängigkeit von γ .

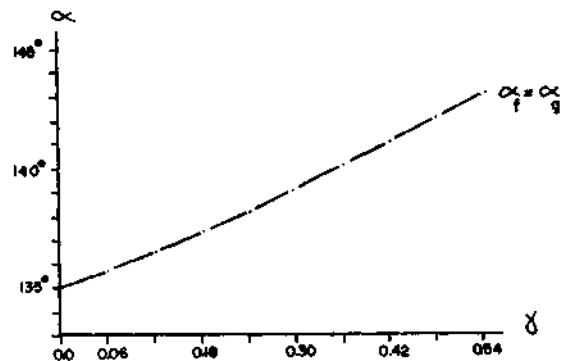


Abb. 9 - Deformation M. Zwei Bruchschären sind vorhanden. Änderung von α in Abhängigkeit von γ .

EINFLUSS DER ANISOTROPIE AUF DIE GEFÜGEBILDUNG BEI DER DEFORMATION M

Wie wir schon wissen, entsteht während der Glättung der Tonkörperoberfläche im Körper eine Festigkeitsanisotropie, wie sie meistens in der Natur zu finden ist. Um den Einfluss der Festigkeitsanisotropie auf die Gefügebildung zu vermeiden, wurde bei den Grundversuchen diese Anisotropierichtung parallel zu der Winkelhalbierenden beider Bruchscharen hergestellt. Um den Einfluss der Anisotropierichtung auf die Gefügebildung festzustellen, wurde diesmal diese Richtung parallel zu den synthetischen, bzw. antithetischen Verschiebungsbrüchen hergestellt und anschliessend monoklin deformiert. Wird ein Körper unter sonst gleichen Bedingungen wie beim Grundversuch, aber in der Richtung der synthetischen Bruchchar geglättet und monoklin deformiert, dauert eine fließende Deformation bis $g=0,22$ an und in diesem Stadium erscheinen nur die synthetischen Brüche, die erst bei $y=0,30$ für eine Auswertung genügend sind und zwischen $16-20^\circ$ liegen, q_f hat in diesem Stadium einen Wert von $0,75$, $\alpha_f = 139^\circ$, wie die Sollwerte (Abb. 10, 11). Von $g=0,30$ bis zum Versuchsende behalten die synthetischen Brüche ihre Richtungen in etwa bei und q_f ändert sich geringfügig, d.h. fällt nur noch um $0,02$ auf $0,73$ ab. α_f nimmt nach Beginn der Bruchbildung bis $g=0,48$ ab und erreicht einen Wert von 135° , der bis $g=0,54$ beibehalten wird. Am Versuchsende beträgt die gesamte Länge der Brüche im Messbereich 350 cm.

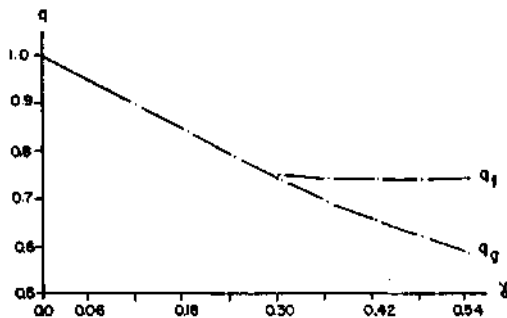


Abb. 10 - Deformation M. Nur die synthetische Brüche sind vorhanden. Änderung von q in Abhängigkeit von γ

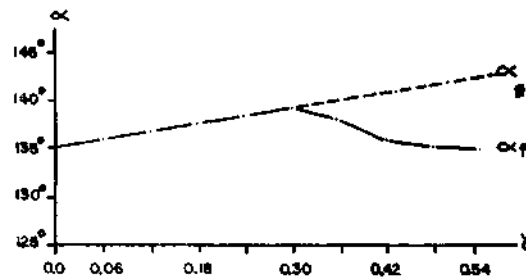


Abb. 11 - Deformation M. Nur die synthetische Brüche sind vorhanden. Änderung von α in Abhängigkeit von γ

Wird der oben beschriebene Versuchskörper anstatt parallel zu den synthetischen Brüchen parallel zu den antithetischen Brüchen geglättet und anschliessend Deformation M unterworfen, kommt zuerst eine ähnliche Deformation bis $g=0,30$, wie oben, vor, es sei denn nur dass anstatt der synthetischen Brüche die antithetischen auftreten, die in diesem Stadium unter 80° liegen. Von da ab bis zum Versuchsende rotieren die Verschiebungsbrüche um ca. 14° in positiver Richtung auf 94° intern, wie sie theoretisch sollten. Die gesamte Länge der Brüche beträgt im Messbereich

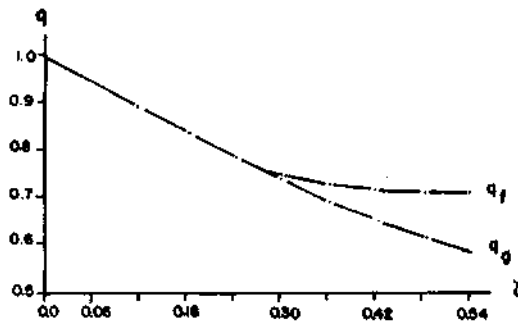


Abb. 12 - Deformation M. Nur die antithetische Brüche sind vorhanden. Änderung von q in Abhängigkeit von γ .

ca. 350 cm q_f fällt in diesem Deformationsablauf um 0,01 auf 0,74 (Abb. 12) ab, so entsteht eine Differenz von 0,15 zwischen q_f und q_g . Die Werte von a_f und a_g stimmen bis $g=0,30$ überein (Abb. 13). Danach vergrößert sich a_f gegenüber a_g und erreicht am Versuchsende einen Wert von 151° , wobei die Differenz ca. 8° beträgt.

Um den Einfluss der Bruchbildung auf die fließende Deformation festzustellen, setzen wir die Werte von q_f , a_f mit ihren theoretischen Werten, d.h. mit q_g , a_g in Beziehung.

Die Werte q_f folgen den Werten von q_g bis 0,30 unabhängig von der Glättungsrichtung. Danach beginnt q_f von q_g abzuweichen. Die Differenz erreicht am Versuchsende bei 0,54 einen Wert von 0,15 bei beiden Versuchen.

Einen ähnlichen Ablauf zeigen a_f und a_g . Sie stimmen bis $g=0,30$ unabhängig von der Glättungsrichtung überein und betragen dort 139° . Entstehen nur die synthetischen Brüche, verringert sich a_f von $g=0,30$ bis $g=0,54$ von 139° auf 135° . In dieser Phase vergrößert sich a_g mit Internrotation und erhält am Versuchsende einen Wert von 143° .

Entstehen nur die antithetischen Brüche, vergrößert sich a_f von $g=0,30$ bis $g=0,54$ um ca. 12° in positiver Richtung und erreicht am Versuchsende einen Wert von 151° .

Obwohl die Abb. 11 zwischen $g=0,30$ und $g=0,54$ eine Gegenrotation der Achsen der Deformationsellipsen zur Internrotation zeigen, entnehmen wir der Abb. 14, dass die Parallelogramme, die die Deformationsellipsen beschrieben, keine entsprechende Rotation aufweisen, sondern sie ändern ihre Kantenlänge. Die in der Bewegungsrichtung liegenden Kanten der Parallelogramme nehmen in dieser Phase ca. 3% zu und die anderen Kanten ca. um 3% ab (Abb. 14). So scheint eine Rotation der Ellipsachsen von 4° in negativer Richtung in Abb. 11 vorzuliegen, obwohl sie theoretisch in positiver Richtung rotieren sollten. Der Unterschied zwischen dem Ergebnis des Versuchs und dem der geometrischen Analyse ist darauf zurückzuführen, dass die synthetischen Schollen nur eine minimale Scherung parallel zur Bewegungsrichtung erleiden. Die fließende Deformation der Schollen geht also während der Bruchbildung weiter, doch wechselt mit ihrem

Beginn die Art der Deformation. Bis $g=0,30$ wird der Bereich entsprechend der Deformation M deformiert und anschliessend wird sie zunehmend von der Deformation R überlagert.

Bei den Versuchen mit nur antithetischen Verschiebungsbrüchen vergrößert sich a_f von $g=0,30$ bis $g=0,54$ um ca. 12° , während a_g nur um 4° anwächst. Diese Differenz lässt sich damit erklären, dass die Schollen bzw. die Deformationsellipsen mit dem Beginn der Bruchbildung bis zum Versuchsende entsprechend den Verschiebungsbrüchen gemäss der Internrotation in positiver Richtung um ca. 12° rotieren (Abb. 15).

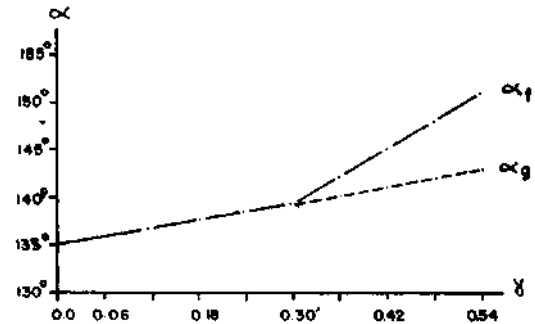


Abb. 13 - Deformation M. Nur die antithetische Brüche sind vorhanden. Änderung von α in Abhängigkeit von

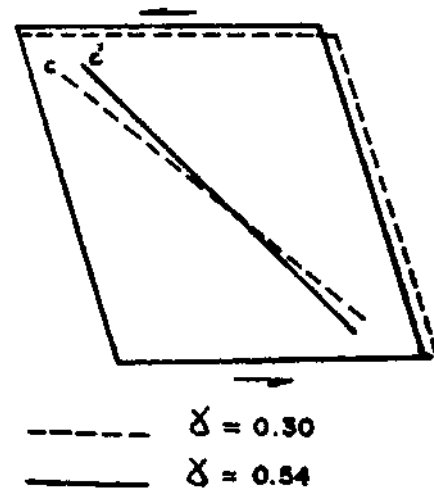


Abb. 14 - Die Deformation eines Parallelogramms auf einer synthetischen Scholle bei der Deformation M und die damit verbundene Richtungsänderung der c-Achse.

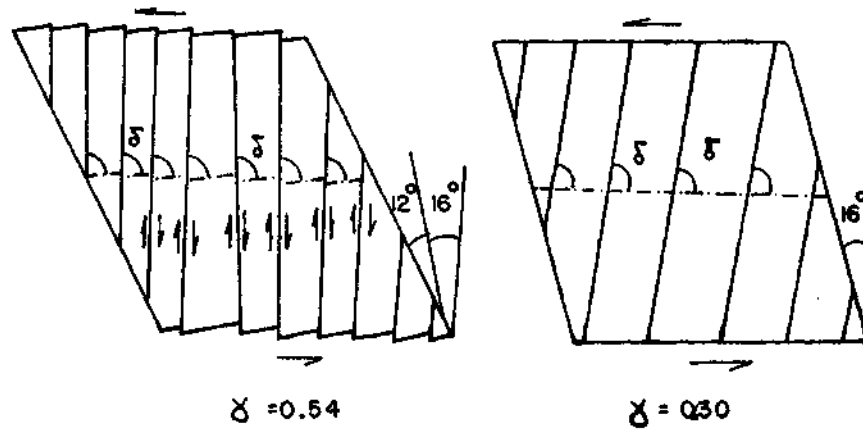


Abb. 15 - Die Zerlegung eines Körpers in antithetische Schollen und ihre Rotation bei der Deformation M.

ERGEBNISSE BEI DER DEFORMATION M

Bei den Versuchsabläufen lassen sich zwei Abschnitte herausarbeiten; die erste Phase bis zum Beginn der Rupturen und die zweite von da ab bis zum Versuchsende.

Bei den Versuchen mit der Deformation M vollzieht sich die fließende Deformation in der ersten Phase so, wie es der Gesamtdeformation oder ihrem Sollwert entspricht. Dabei wird die Deformation von Anisotropie nicht beeinflusst. Nach der Ausbildung der Brüche, d.h. in der zweiten Phase der Deformation entstehen drei verschiedene Gefüge von Brüchen:

1. Treten synthetische und antithetische Bruchscharen zusammen auf, so dauert eine schwache fließende Deformation fast bis zum Versuchsende an. Dabei wird die Differenz zwischen q_f und seinem Sollwert von den Verschiebungsbrüchen verursacht. Bilden sich beide Scharen gleich stark aus, stimmt a_f und a_g in jedem Stadium überein.

Überwiegt eine der Bruchscharen, erreicht a_f am Versuchsende einen Wert, der höchstens um 4° kleiner oder grösser als a_g ist. Die Richtung der Abweichung hängt davon ab, ob die synthetischen oder antithetischen Brüche überwiegen. In diesem Fall vollziehen die Verschiebungsbrüche bzw. die Schollen eine geringere Internrotation als der Sollwert angibt, weil sich beide Scharen gegenseitig behindern.

2. Entsteht nur die synthetische Schar von Verschiebungsbrüchen, dauert eine schwache fließende Deformation bis zum Versuchsende an. Der Wert von a_f verringert sich ständig von der Entstehung der Brüche an bis zum Versuchsende. Diese scheinbare Rotation der Deformationsellipsen entgegengesetzt zu der der Gesamtdeformation entsprechenden Internrotation rührt daher, dass die synthetischen Schollen unter 45° eingeengt und unter 135° gedehnt wurden.

3. Bilden sich nur die antithetischen Verschiebungsbrüche aus, kommt die fließende Deformation kurz nach Entstehung der ersten Brüche zum Stillstand, d.h. die rupturale Deformation übernimmt die gesamte Deformation.

Während der ruptuellen Deformation erreicht a_f grössere Werte als a_g , da die Schollen sich wie starre Körper verhalten und somit die Deformationsellipsen auf den Schollen eine Internrotation mit den die Schollen begrenzenden Verschiebungsbrüchen vollziehen.

Am Versuchsende erreicht die gesamte Ausstrichlänge der Brüche im Messbereich eine Länge von ca. 350 cm bei der Entstehung nur einer Bruchschär, wogegen sie bei dem Auftreten von zwei Schären ca. 300 cm beträgt.

ZUSAMMENFASSUNG

Nachdem die Deformation R und M getrennt untersucht wurden, sollen die bei den beiden Deformationsarten entstehenden Gefüge miteinander verglichen werden.

Bei allen Versuchen tritt in der ersten Phase, d.h. bis zu der Entstehung der Brüche, eine fließende Deformation auf, deren Grösse den Werten der Gesamtdeformation entspricht. Die Dauer der fließenden Deformation und die Änderung von q_f sind in diesem Abschnitt unabhängig von der Deformation und von der Anisotropie. q_f ändert sich in dieser Phase etwa nach der Formel:

$$q_f = l - 0,8 g$$

Die ersten Brüche treten bei $e_3=0,116$ oder bei $g=0,22$ auf. Da ihre Anzahl in diesem Stadium zum Auswerten ungenügend ist, werden die Brüche jeweils bei $e_3=0,161$ bzw. bei $a=0,30$ gemessen. Obwohl die Schollen bei verschiedenen Deformationsarten unter unterschiedlichen Winkeln entstehen, erhält man fast gleiche Ergebnisse für q_f . Die Verschiebungsbrüche beeinflussen die fließende Deformation an Hand der Änderung von q_f am Versuchsende um 0,10 bei den Deformationen, bei denen beide Bruchschären zusammen entstehen, um ca. 0,14 bei den Deformationen, bei denen nur eine Bruchschär entsteht. Bei dem Einfluss der rapturellen Deformation auf die fließende ist also nicht die Deformationsart von Bedeutung, sondern das entstehende Gefüge. Ein Vergleich zwischen a_f und seinem Sollwert zeigt, dass die Werte bei den Versuchen, bei denen die Brüche beider Schären etwa gleich häufig auftreten, übereinstimmen.

Überwiegt eine Bruchschär, entsteht am Versuchsende zwischen a_f und a_g eine Differenz, weil die Deformationsellipsen derjenigen Schollen den Schwerpunkt der Verteilung bestimmen, die von den Brüchen der überwiegenden Schär begrenzt wurden.

Überwiegt bei der Deformation R im Körper die zweite Bruchschär oder die synthetische Schär bei der Deformation M, erhält a_f nach dem Beginn der Bruchbildung einen kleineren Wert als a_f . Überwiegt dagegen die zweite Schär bei der Deformation R oder die antithetische Schär bei der Deformation M, ist a_f nach dem Beginn der Bruchbildung grösser als a_g .

Diese Differenz wird bei der Deformation R bei den Versuchen mit einer Bruchschär und bei der Deformation M mit der antithetischen Schär durch die Schollenrotation verursacht. Für die Grösse dieser Differenz ist die Lage der Brüche bzw. der Schollen von Bedeutung. Die Materialfasern, bzw. die Brüche, die mit der Richtung der grössten bzw. kleineren einen Winkel von 45° bilden, erleiden die grösste Internrotation. Da die Situation der antithetischen Brüche bzw. antithetischen Schollen ähnlich ist, vollziehen sie eine grössere Internrotation als die bei der rhombische Deformation mit einer Bruchschär.

Die Situation bei den Versuchen mit der Deformation M, bei denen nur die synthetischen Brüche entstehen, ist insofern besonders, als die Schollen bzw. die Deformationsellipse nicht rotieren, sondern in der Richtung s_1 eingeeengt und in der Richtung von s_3 gedehnt wurden, erhält a_f in diesem Fall während der rapturellen Deformation ständig kleinere Werte als a_g .

Eine andere Möglichkeit, die Deformationsart zu unterscheiden, könnte darin bestehen, dass die Winkel zwischen den Achsen der Deformationsellipsen und den Verschiebungsflächen deutliche Unterschiede aufweisen.

Die a-Achsen schliessen im Entstehungsstadium mit den Brüchen in allen Fällen einen Winkel von 30° ein. Bei der Deformation R mit zwei Bruchscharen beträgt dieser Winkel bei $e_3=0,306$ ca 37° , bei der Deformation M 35° mit der synthetischen Bruchschär und 39° mit der antithetischen. Also halbiert die a-Achse den Winkel zwischen zwei Bruchscharen bei der Deformation R, aber nicht bei der Deformation M.

Überwiegt eine Schar bei der Deformation R, rotieren die a-Achsen bis zum Versuchsende um ca. 4° und bilden so mit der überwiegenden Schar einen Winkel von ca. 41° und mit der anderen ca. 33° . Überwiegt die synthetische Bruchschär bei der Deformation M, rotieren die a-Achsen in negativer Richtung und bilden mit der synthetischen Bruchschär einen Winkel, der sich je nach der Häufigkeit der synthetischen Brüche bis 30° verkleinert. Überwiegt die antithetische Bruchschär, vergrössert sich der Winkel zwischen a-Achse und den Brüchen je nach der Häufigkeit dieser Schar von 39° bis auf 47° .

Entsteht nur eine Bruchschär, beträgt dieser Winkel bei beiden Deformationsarten ca. 30° .

Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse ist es nicht möglich, beim Auftreten nur einer Schar der Verschiebungsflächen die Art der Bruchschär zu bestimmen. Doch zeichnet sich eine Möglichkeit der Beurteilung bei Entstehung von zwei Bruchscharen ab, die in beiden Deformationsarten jeweils unterschiedliche Winkel mit den Achsen der Deformationsellipsen einschliessen.

Weiterhin soll zu diesen Ergebnissen noch einmal hinzugefügt werden, dass im Gegensatz zu bisherigen Meinungen eine Schar von Verschiebungsbrüchen nicht nur bei der Deformation M, sondern auch bei der Deformation R auftreten kann. Es ist auch möglich, dass zwei Bruchscharen bei der Deformation M entstehen können. Bei der Entstehung der tektonischen Gefüge ist nicht die Deformationsart, sondern der Winkel zwischen der Richtung der Festigkeitsanisotropie und der angreifenden Kräfte von Bedeutung.

Manuscript received 22 January, 1976

LITERATURVERZEICHNIS

- CLOOS, H. (1931): Fliessen und Brechen in der Erdkruste im geologischen Experiment. Plastische Massen in Wissenschaft und Technik, H. I, Troisdorf bei Köln.
- HOEPPENER, R. (1962): Probleme der physikalischen Tektonik. Elastische Spannungen und Reibungsspannungen.-Z. dtsh. geol. Ges., 114, s. 206-227, Hannover.
- (1964): Zur physikalischen Tektonik. Darstellung der affinen Deformationen, der Spannungs- und der Beanspruchungszustände mit Hilfe der flächentreuen Kugelprojektion. - Felsmechanik und Ingenieurgeologie, s. 22-24, Wien.
- (1972): Stellung des Experimentes im Rahmen tektonischer Forschung.-Geol. Rdsch., 61, 3, S. 789-805, Stuttgart.

- HOEPPENER, R., KALTHOFF, E. & SCHRADER, P. (1969): Zur physikalischen Tektonik. Bruchbildung bei verschiedenen affinen Deformationen im Experiment.- Geol. Rdsch., 59, I, S. 179-193, Stuttgart.
- KALTHOFF, E. (1970) Bruchbildung in Modellsubstanzen bei Deformationen mit axialer und rhombischer Symmetrie. Diss., Ruhr Universität Bochum.
- NADAI, A. (1950):-Theory of Flow and Fracture of Solides. New York, Toronto, London.
- RAMSAY, J.G., (1967): Folding and Fracturing of Rocks. McGraw-Hill Book Company, New York, San Francisco, St. Louis, Toronto, London, Sydney.
- TANYOLU, E. (1974): Rupturelle und fließende Deformation und ihre gegenseitige Beeinflussung in Modellsubstanzen, Diss., Ruhr Universität Bochum.