

Folding versus faulting of pressure sensitive elastoplastic rocks

application to the Jura Mountains

Doctoral Thesis

Author(s):

Härrli, Markus

Publication date:

1998

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001956030>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH Nr. 12541

FOLDING VERSUS FAULTING OF PRESSURE SENSITIVE ELASTOPLASTIC ROCKS

Application to the Jura Mountains

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Markus Härrri

Dipl. natw. ETH Zürich, Switzerland

born 15. Juli 1965

citizen from Birrwil AG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J.P. Burg	ETH Zürich	examiner
Dr. M. Casey	University of Leeds	1. co-examiner
Dr. Y. Podladchikov	ETH Zürich	2. co-examiner
Prof. Dr. G. Mandl	Technische Universität Graz	3. co-examiner

1998

Abstract

Competing instabilities between folding and faulting are investigated analytically using a pressure sensitive elastoplastic rheology. The analytical results are used to explain deformations in the Jura Mountains.

A thick plate is subjected to different loading conditions. The analysis leads to a homogeneous, partial differential equation of fourth-order. The mathematic feature of the solution are investigated in order to distinguish continuous, periodic folding (buckle folding, pinch-and-swell) from discontinuous reverse and normal faulting.

The boundary between the folding and faulting modes is discussed in a 2-dimensional space where ordinate axes are h/G with h the hardening modulus (loading modulus) and G the elastic shear modulus (unloading modulus), and the abscissa is the normalized differential stress $P = \Delta\sigma/2G$ with $\Delta\sigma$ the differential stress. The folding (diffuse deformation) / faulting (localized deformation) boundary can be approximately defined by $\frac{h}{G} \cong \frac{1}{4}\sin^2(\phi) + \frac{1}{2}P\sin(\phi)$ with ϕ the internal friction angle. At larger internal friction angles ϕ or higher pressure sensitivity this boundary shifts in favour of faulting. Thus, there are more favorable conditions for faulting than for folding at large friction angles. Towards extensional differential stress regimes the boundary shifts slightly in favour of faulting.

For a faulting instability, the angle θ between the axis of maximum compressive principal stress and the potential fault plane deviates from the angle predicted by the Coulomb theory, in particular if faulting does not develop at peak strength ($h/G = 0$). In the strain hardening regime ($h/G > 0$) the potential angle θ is larger for Coulomb type shear bands than that predicted by the Coulomb theory. Conversely, in the strain softening regime, smaller θ angles are obtained.

Buckle folds in an isolated layer develop with a wavelength that decreases with both increasing plastic strain and pressure sensitivity. Even for small compressive differential stresses, the ratio of the buckle fold wavelength to the thickness of the isolated layer is small. For example, a friction angle ϕ of 30° , a normalized hardening modulus h/G of 0.1 and a normalized differential stress $\Delta\sigma/2G$ of -0.005 result in a dominant wavelength/layer-thickness ratio λ/T equal to 9. A comparison to classic buckling theories shows that a pressure sensitive elastoplastic rheology predicts the smallest wavelength/thickness ratios λ/T . Thus, our results produce dominant wavelength/thickness ratios that are closer to those observed in nature. It is common that natural folds have wavelength/thickness ratios that are less than 10, and often about 3 or 2. Therefore, the agreement between theory and nature suggests that a pressure sensitive elastoplastic rheology is applicable to folding in the upper crust.

A more general analytical experiment consists in subjecting a thick plate to oblique loading. Principal stresses are no longer layer parallel and perpendicular. Results show that obliquity has no influence on the boundary between folding and faulting.

A geological application is sought in the Jura Mountains.

In the Jura initial thrusts are reported at 20° to layering. At the onset of faulting, layer parallel and perpendicular principal stresses were very probable. This indicates that localized deformation which is identifiable as a thrust in the field developed in the strain softening regime.

Jura folds show wavelength to total thickness ratios that are between 2 and 3. Therefore, Jura folds may be best explained by deformation of pressure sensitive elastoplastic layers. Many Jura folds developed from preexisting irregularities (e.g. monoclinical flexures). However, at these locations, there was no preference either for folding or for faulting.

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die beiden Deformationsmoden Faltung und Bruchbildung in einer druckabhängigen elastoplastischen Rheologie analytisch zu untersuchen. Die analytischen Resultate werden gebraucht, um die Deformation des Juragebirges zu erklären.

Dazu wird ein einfaches Modell einer dicken Platte angewendet, die verschiedenen Belastungsbedingungen ausgesetzt wird. Mathematisch führt dies auf eine homogene, partielle Differentialgleichung 4. Ordnung. Das Verhalten dieser Differentialgleichung wurde untersucht, um zwischen kontinuierlichen, periodischen Faltenlösungen ("Buckle-Falten", "Pinch-and-Swell") und diskontinuierlichen Bruchlösungen (Überschiebungen, Abschiebungen) zu unterscheiden.

Die Grenze zwischen Faltung und Bruchbildung wird in einem 2-dimensionalen Parameterraum diskutiert, dass durch die Ordinatenachse h/G mit dem Verfestigungsmodul (Belastungsmodul) h und dem elastischen Schermodul (Entlastungsmodul) G und der Abszisse mit der normalisierten Differentialspannung $P = \Delta\sigma/2G$ mit der Differentialspannung $\Delta\sigma$ aufgespannt wird. Die Grenze zwischen Faltung (diffuse Deformation) und Bruchbildung (lokalisierte Deformation) kann approximativ definiert werden durch die Gleichung $\frac{h}{G} \cong \frac{1}{4}\sin^2(\phi) + \frac{1}{2}P\sin(\phi)$ mit dem inneren Reibungswinkel ϕ . Die Grenze zwischen Faltung und Bruchbildung verschiebt sich mit zunehmendem innerem Reibungswinkel ϕ oder bei starker Druckabhängigkeit zugunsten der Bruchbildung. Deshalb steigt bei zunehmender Druckempfindlichkeit die Wahrscheinlichkeit zur Bruchentwicklung gegenüber der Bildung von Falten. Die Grenze zwischen der Falten- und Bruchbildung verschiebt sich leicht mit zunehmender extensiver Differentialspannung zugunsten der Bruchbildung.

Im Falle einer Bruchinstabilität weicht der Winkel θ zwischen der maximalen kompressiven Hauptspannung und der potentiellen Bruchfläche von der klassischen Coulomb-Theorie ab, falls der Bruch sich unter verformungshärtenden ($h/G > 0$) oder verformungsschwächenden ($h/G < 0$) Bedingungen ausbildet. Unter verformungshärtenden Bedingungen ($h/G > 0$) entstehen Coulomb-Bruchwinkel θ , die grösser sind als diejenigen, welche aus der klassischen Coulomb-Theorie abgeleitet werden. Umgekehrt entstehen Coulomb-Bruchwinkel θ kleiner sind als jene der klassischen Coulomb-Theorie, falls sich eine Bruchinstabilität im verformungsschwächenden Deformationsregime formiert.

Bei der Ausbildung einer Falte in einer isolierten Schichtlage führt sowohl ein zunehmender Reibungswinkel ϕ als auch eine zunehmende (homogene) plastische Verformung zu einer Abnahme der dominanten Faltenwellenlänge. Interessanterweise sind selbst bei kleinen Differentialspannungen die Wellenlängen verhältnismässig klein. Beispielsweise führt ein Reibungswinkel ϕ von 30° , ein normalisierter Verfestigungsmodulus h/G von 0.1 und eine normalisierte Differen-

tialspannung $\Delta\sigma/2G$ von -0.005 zu einem dominanten Wellenlängen-Schichtdicken Verhältniss λ/T von 9. Im Vergleich zu anderen klassischen Faltentheorien werden Faltenwellenlängen vorausgesagt, die wesentlich kleiner sind. Dies führt zu einer besseren Übereinstimmung mit jenen Wellenlängen-Schichtdicken Verhältnissen λ/T , die in der Natur tatsächlich beobachtet werden können. In der Natur treten üblicherweise Wellenlängen-Schichtdicken Verhältnisse auf, die kleiner als 10 sind. Häufig sind Werte um 3 oder 2. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass eine druckabhängige Elastoplastizität jene Rheologie ist, die den Faltenprozess in der oberen Erdkruste am besten wiedergibt.

Eine Verallgemeinerung des analytischen Experiments besteht aus einer dicken Platte, die schiefen Belastungen ausgesetzt wird. Die Achsen der maximalen und minimalen Hauptspannungen sind weder plattenparallel noch senkrecht zur Plattenoberfläche orientiert. Das Resultat zeigt, dass die Grenze zwischen der Faltung und Bruchbildung unabhängig von der Orientierung der Hauptspannungen ist.

Eine direkte geologische Anwendung der Resultate wird am Beispiel des Juragebirges diskutiert.

Jurafalten zeigen Wellenlängenverhältnisse λ/T , die zwischen 2 und 3 liegen. Die gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Natur lässt vermuten, dass eine druckabhängige Elastoplastizität am besten die Rheologie des Juragebirges wiedergibt.

Im Juragebirge sind undeformierte Bruchwinkel durchschnittlich 20° zur Schichtung orientiert. In vielen Fällen darf davon ausgegangen werden, dass die kompressive Hauptspannung zum Zeitpunkt der Bruchbildung schichtparallel wirkte. Dies kann nur damit erklärt werden, dass die heutzutage sichtbare Instabilität als Juraüberschiebung sich im verformungschwächenden Deformationsregime ($h/G < 0$) ausgebildet hat.

Zahlreiche Jurafalten entwickelten sich aus präexistierenden, unregelmässigen Schichtverbiegungen (z.B. monoklinale Flexuren). An jenen Stellen waren weder die Bruchbildung, noch die Faltenentwicklung bevorzugt.