

Dynamic recrystallisation and microfabric development in single crystals of quartz during experimental deformation

Doctoral Thesis

Author(s):

Vernooij, Martine G.C.

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004993194>

Rights / license:

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

Diss. ETH No. 16050

**DYNAMIC RECRYSTALLISATION AND MICROFABRIC DEVELOPMENT
IN SINGLE CRYSTALS OF QUARTZ DURING EXPERIMENTAL DEFORMATION**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

For the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

Presented by

Martine G.C. Vernooij
drs. Geologie, Universiteit Utrecht

Born on November 19, 1977
Citizen of the Netherlands

Recommended by:

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg
Dr. Bas den Brok
Dr. Karsten Kunze
Prof. Dr. Dave J. Prior

ETH Zürich
ETH Zürich
ETH Zürich
University of Liverpool

examiner
co-examiner
co-examiner
co-examiner

Zürich, 2005

ABSTRACT

Crystallographic preferred orientations (CPOs) are common in deformed rocks, and especially in deformed *quartz-rich* rocks. They provide important information on tectono-metamorphic processes. The best-developed CPOs are found in dynamically recrystallised quartz aggregates. Yet, it is only partly understood how dynamic recrystallisation affects the development of these CPOs.

To investigate the effect of dynamic recrystallisation on CPO development, natural quartz single crystals were experimentally deformed under conditions where dynamic recrystallisation and CPO development are known to occur (temperature 800°C, confining pressure ~1.2 GPa, strain rate 10^{-6} - 10^{-7} s⁻¹, bulk finite strain 5-50%, 1 vol% added water). Samples were uniaxially deformed in different crystallographic starting orientations. The highly heterogeneous microstructures and textures of the deformed samples were analysed by light microscopy, electron backscatter diffraction (EBSD) analysis, transmission electron microscopy (TEM), secondary electron imaging and cathodoluminescence.

It could be shown that the experimentally produced microstructures and CPOs, reported in this thesis, result from three different reorientation processes:

1. *Crystal reorientation by glide controlled lattice rotation.*

Within domains with *no* dynamic recrystallisation, characterised by undulatory extinction and deformation lamellae, gradual rotations of the crystal lattice are observed. The rotation axes are always about perpendicular to the compression direction and approximately parallel to low-index crystallographic directions. These axes are mostly compatible with rotation axes of basal and prism glide systems. Deformation is therefore interpreted to be crystal-plastic.

2. *Crystal reorientation by precipitation and growth of new grains.*

Within domains of dynamic recrystallisation characterised by aggregates of new grains, the *c*-axes show strong CPOs consisting of maxima at ~45° to the compression direction. This is the case in *all* experiments, irrespective of initial crystallographic orientation and irrespective of the amount of strain. The crystals are not continuously rotated out of the initial orientation towards these maxima. The CPO in the domains with new grains is unrelated to the gradual lattice rotations within the domains with undulatory extinction. New grains have a subeuhedral shape and numerous microcavities, voids, fluid channels and fluid inclusions at their grain boundaries. This suggests that the new grains developed by precipitation from a solution. Subsequently, the CPO must have developed by selective fluid assisted growth of new grains that were best suited for intracrystalline deformation at the imposed experimental conditions, i.e. *c*-axis at 45° to the compression direction.

3. *Crystal reorientation by rotation of fracture fragments.*

Within domains of dynamic recrystallisation characterised by intracrystalline shear zones, the grains show a strong CPO with *c*-axes perpendicular to the shear zone. EBSD and TEM data show evidence for shear zone development along planar microcracks oriented parallel to rhomb planes. It is suggested that further microcracking results in cataclastic shear zone development. Consequently, new grains developed by rotation of fracture fragments, facilitated by the high water pressure and the relatively high porosity within the shear zones. Subsequent selective growth of the new grains with *c*-axes oriented approximately perpendicular to the shear zone finally lead to the development of a CPO.

In the literature it is generally assumed that dynamic recrystallisation takes place as a consequence of dislocation creep. New grains are considered to develop by progressive subgrain rotation and further evolve by grain boundary migration. The experiments show, however, that new recrystallised grains can also be created by precipitation from solution as well as by rotation of fracture fragments along crystallographically oriented microfractures. The recrystallised grains do not inherit the CPO from their host grains, but assume orientations most suitable for glide during progressive grain boundary migration.

KURZFASSUNG

Kristallographische Vorzugsorientierungen, sogenannte *crystallographic preferred orientations (CPO's)*, sind verbreitet in deformierten Gesteinen, insbesondere in quarzreichen Gesteinen. Sie sind von entscheidender Bedeutung, da sie Aufschluss über tektono-metamorphe Prozesse geben. Die am besten ausgebildeten CPO's treten hauptsächlich in dynamisch rekristallisierten Quarz-Aggregaten auf. Es ist jedoch nur teilweise bekannt, wie die dynamische Rekristallisation die Bildung von CPO's beeinflusst.

Natürliche Quarz-Einkristalle wurden experimentell deformiert um den Einfluss der dynamischen Rekristallisation auf die CPO-Bildung zu untersuchen. Es wurden dazu Bedingungen gewählt, von denen man weiss, dass dabei dynamische Rekristallisation und CPO-Entwicklung stattfinden (Temperatur: 800°C, Umgebungsdruck: ~1.2 GPa, Verformungsrate: 10^{-6} - 10^{-7} s⁻¹, durchschnittliche finite Verformung: 5-50%; 1 vol% beigefügtes Wasser). Die Proben wurden in verschiedenen kristallographischen Ausgangsorientierungen uniaxial deformiert. Die stark heterogenen Mikrostrukturen und Texturen der deformierten Proben wurden mittels Polarisationsmikroskopie, Elektronenrückstreubeugung (EBSD), Transmissionselektronenmikroskopie (TEM), Sekundärelektronen-Abbildung und Kathodenlumineszenz untersucht.

Es konnte gezeigt werden, dass die in dieser Arbeit beschriebenen, experimentell erzeugten Mikrostrukturen, aus drei verschiedenen Umorientierungsprozessen entstehen.

1. *Kristall-Umorientierung durch Gitterrotation mittels Gleiten.*

Innerhalb von Bereichen *ohne* dynamische Rekristallisation, charakterisiert durch undulöse Auslöschung und Deformationslamellen, werden graduelle Kristallgitterrotationen beobachtet. Die Rotationsachsen sind immer ungefähr senkrecht zur Kompressionsachse und ungefähr parallel zu niedrig indizierten kristallographischen Richtungen. Die Achsen sind meist kompatibel mit Rotationsachsen von basalen und prismatischen Gleitsystemen. Die Deformation wird als kristall-plastisch interpretiert.

2. *Kristall-Umorientierung durch Keimbildung und Wachstum von neuen Körnern.*

Innerhalb von Bereichen *mit* dynamischer Rekristallisation, charakterisiert durch Aggregate aus neuen Körnern, zeigen c-Achsen starke CPO's mit Maxima ~45° geneigt zur Kompressionsrichtung. Dies trifft auf *alle* Experimente zu, unabhängig von der ursprünglichen kristallographischen Orientierung und unabhängig vom Betrag der Verformung. Die Umorientierung der Kristalle fand nicht statt durch kontinuierliche Rotation aus der ursprüngliche Lage in die neuen Maxima. Die CPO in den Bereichen mit neuen Körnern hängt nicht mit den graduellen Gitterrotationen innerhalb der Bereiche mit undulöser Auslöschung zusammen. Die neuen Körner sind hypidiomorph und zeigen optisch keine Verformung. An ihren Korngrenzen treten zahlreiche Mikrohohlräume, Poren, Fluidkanäle und Fluideinschlüsse auf. Dies deutet darauf hin, dass diese neuen Körner das Produkt einer Ausfällung sind. Die CPO hat sich anschliessend durch bevorzugtes Wachstum derjenigen neuen Körner gebildet, welche am besten für kristall-plastische Deformation unter den experimentellen Bedingungen orientiert sind.

3. *Kristall-Umorientierung durch Rotation von Bruchfragmenten.*

Innerhalb von Bereichen *mit* dynamischer Rekristallisation, charakterisiert durch intrakristalline Scherzonen, zeigen die Körner eine starke CPO mit c-Achsen senkrecht zur Scherzone. EBSD- und TEM-Daten weisen auf eine Entstehung der Scherzonen entlang von Mikrobrüchen hin, die parallel zu den kristallographischen Rhomboederflächen sind. Es kann angenommen werden, dass anhaltende Mikrorissbildung zur Entstehung der kataklastischen

Scherzonen führt. Innerhalb dieser Scherzonen entstanden demzufolge neue Körner durch Rotation von Bruchfragmenten, wobei diese Rotation durch den hohen Wasserdruck und die relativ hohe Porosität begünstigt wurde. Darauf folgendes selektives Wachstum der neuen Körner, mit c-Achsen ungefähr senkrecht zur Scherzone, führte schliesslich zur Bildung der starken CPO.

In der Literatur wird allgemein angenommen, dass dynamische Rekristallisation als Folge von Versetzungskriechen stattfindet. Neue Körner sollen durch progressive Subkornrotation entstehen und sich durch Korngrenzenmigration weiterentwickeln. CPO's von dynamisch rekristallisierten Gesteinen werden üblicherweise als das Resultat von Gitterrotation mittels Gleitung interpretiert. Die Experimente zeigen jedoch, dass neue, rekristallisierte Körner auch durch Ausfällung und durch Rotation von Bruchfragmenten entlang von kristallographisch orientierten Mikrobrüchen entstehen können. Diese neuen, rekristallisierten Körner übernehmen nicht die Orientierungen der ursprünglichen Körner, sondern nehmen die für Gleitung am besten geeigneten Orientierungen während des weiteren Wachstums an.