

**Fracture sealing processes in sedimentary basins –  
a multi-scale approach**

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik  
der Rheinisch - Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Naturwissenschaften**

genehmigte Dissertation

vorgelegt von Licentiaat in de Geologie

**Sofie Nollet**

aus Oostende

**Berichter:** Univ.-Prof. Dr. Janos Urai  
Prof. Dr. Anne-Marie Bouiller  
Prof. Dr. Martin Burkhard

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 2005



Berichte aus der Geowissenschaft

**Sofie Nollet**

**Fracture sealing processes  
in sedimentary basins –  
a multi-scale approach**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag  
Aachen 2006

**Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5167-7

ISBN-13: 978-3-8322-5167-3

ISSN 0945-0777

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Acknowledgements

I would like to use the first page of my thesis to thank a lot of people who made this work possible.

First of all, I would like to thank Janos Urai for supervising this project as head of the department Geologie-Endogene Dynamik in Aachen. Your support, permanent encouragement, creativity and enormous enthusiasm were really indispensable.

I also would like to thank Chris Hilgers, who wrote the DFG proposal of this project and co-supervised my PhD project. You taught me to work independently and make my own decisions.

I would like to acknowledge Anne-Marie Bouiller and Martin Burkhard for being referees of this thesis and giving me the opportunity to “defense” my ideas and work.

I would like to thank all my colleagues in Aachen: Oliver, Zsolt, Johannes, Marc and Kati for the friendly atmosphere in room 111. I’m especially very grateful to Oliver for his help during the first months, when my German communication skills were very primitive.

The Hiwis Manuel, Ansgar, Christine and Keyvan are thanked for helping with the preparation of thin sections, doing image analysis, scanning rock samples and copying papers. Werner is thanked for the many solutions to my little problems in the lab or during preparation of samples. I really appreciate the help of Bettina with German paperwork during my first weeks in Aachen, last-minute conference and travel reservations, looking over my always-wrong-completed “Reisekostenabrechnung” etc...

Without help of many other people at the RWTH Aachen, this thesis would not have been the same. So thank you Thomas Koerner, Herr Kramm, Frau Jakobi, Uwe Wollenberg, Herr Scherberich, Bernd Krooss, Yves Gensterblum, Dirk Radies, Markus Mohr, Sabine Rodon.

Philippe Muchez, Manuel Sintubin, Jan Hertogen, Rudy Swennen, Ilse Kenis, Stijn Dewaele from Leuven are thanked for their continuous interest in my work in Aachen and helpful answers on many questions. Especially Philippe Muchez is appreciated for the opportunity to work on a thrustworthy cathodoluminescence and Linkam fluid inclusions stage in Leuven.

Thank you very very much, Griet, for listening to all my Aachen-stories, the numerous supporting emails and especially our saturday afternoons in Leuven and Hasselt.

Also many thanks to Ellen and Simi for the many nice evenings during the past 3 years!

Thanks to Mieke, Charlotte Renier, Elke, Daphné and Charlotte Piers for being friends and showing me that there are other interesting things in the world than just geology.

Finally, thanks to mama & papa for your unconditional support and to David, Joanna, Nathalie, Bart, Seb and Sophie. Also thanks to Lucia and Koen for your support and numerous helpful tips in life.

Last, but absolutely not least, an enormous thank you to Berten, for always joining me in my adventures and having the patience for letting me do what I think I have to do!



## Summary

This thesis presents an analysis of fracture sealing processes, studied on microstructural and sedimentary basin scale. The aim is to get more detailed insights in these processes and to understand the influence of fluids and precipitation of minerals on the evolution of sedimentary basins.

Numerical simulations of the evolution of vein microstructures are used to investigate the parameters which control the final microstructures. In the simulation code, the main input parameters are crystal growth anisotropy, amount of seed crystals, fracture morphology and opening trajectory and velocity. By simulating anisotropic crystal growth, we focus on the effects of growth competition when crystals are growing in an open space. When crack-seal growth is simulated, the width of the individual crack-seal increments in relation to the fracture morphology influences the final microstructure. The evolution of an elongate-blocky to a fibrous microstructure is illustrated in a series of simulations with different opening increments. Finally, the limitations of the current simulation algorithm are discussed and suggestions are made to improve the program with respect to the simulation of crystal facets and crack-seal growth.

In the next part of this work, polycrystal growth experiments are presented in an accurately controlled flow system. The main focus of these experiments is a detailed analysis of the growth rate evolution of crystals over time. The average growth rate of the crystals is influenced by growth competition and depletion of the fluid along fracture length. In addition, the growth rate of individual crystals depends on the facet index, facet length and facet orientation. Variations in the growth rate over time are observed in some facets and can be explained by a dislocation flux between different crystal sectors. At high supersaturation ( $>0.176$ ), regularly spaced fluid inclusion bands are generated in the crystals. In natural veins, the presence of such inclusions could probably be an indicator for high paleo-supersaturation. Asymmetric elements, which could be related to the paleo-flow direction, are not observed in the final microstructures of the experiments.

The analysis of boreholes in the Lower Saxony Basin (NW Germany) resulted in identification of at least two different vein generations in the Lower Triassic sandstones. The first generation is filled with calcite and has in most cases a fibrous

microstructure. Stable isotopes and strontium isotopes indicate that the fluids were mainly locally derived and precipitation took place at low temperatures ( $<120^{\circ}\text{C}$ ), when the rocks were only slightly consolidated. The second generation is filled with anhydrite and the microstructures are elongate-blocky to blocky. Sometimes, rosette structures with platy anhydrite crystals are observed, indicating growth in an open space. Fluid inclusions in anhydrite indicate that precipitation took place around  $150^{\circ}\text{C}$ , corresponding to burial depths of 3-5 km, and that the fluids had a NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O composition. Sulphur and strontium isotopes indicate that fluids were at least partly derived from the underlying Zechstein evaporites. The generation of these veins is explained by overpressures, which significantly reduced the effective stresses. A possible mechanism for overpressure generation in the basin at these depths is a sudden influx of fluids, escaping from the underlying Zechstein evaporites. The supersaturation of the fluid with respect to anhydrite can be caused by a pressure drop during fracturing.

Based on the results of the different parts of this work, some new aspects of crystal growth in fractures are discovered. These are significant because fluid flow and sealing of fluid flow pathways are important aspects of the evolution of sedimentary basins. The comparison of processes on microstructural scale with basin scale improves the understanding on the role of supersaturation of fluids in sedimentary basins.



## Zusammenfassung

Diese Arbeit handelt über Kluftversiegelungsprozesse, welche in unterschiedlichen Maßstäben von Mikrostrukturen bis zu sedimentären Becken untersucht werden. Ziel dieser Arbeit ist, detaillierte Einblicke in das Verhalten von Fluiden und assoziierter Mineralausfällung im System der geodynamischen Beckenentwicklung zu erhalten.

Numerische Simulationen der Entwicklung von Kluftwachstum geben Informationen über einzelne Parameter, die die resultierende Mikrostruktur kontrollieren. Durch das Wachstum anisotroper Kristalle in einer freien (von natürlichen Einflüssen ungestörten) Umgebung, wurde das Verhalten gegeneinander wachsende Kristalle untersucht (Effekt eines „Wachstumswettbewerbs“). Die Simulation von Riß-Siegelbildungen („crack-seal“) zeigte, dass die Öffnungsweite einzelner Riß-Siegelbildungen in Relation zur Morphologie der Kluftoberfläche die resultierende Mikrostruktur wesentlich beeinflusst. In einer Reihe von Ansätzen mit unterschiedlichen Kluft-Öffnungsweiten wurde die Entwicklung von Kristallen mit einer länglich-blockartigen bis zu einer faserigen Mikrostruktur simuliert. Letztlich wurden die Grenzen der gegenwärtigen Simulations-Algorithmen diskutiert und Vorschläge wurden gemacht, um das Programm in Bezug auf die Simulation von Kristallfacetten und Riß-Siegelbildungen zu verbessern.

Im folgenden Teil dieser Arbeit werden Wachstumsexperimente von Polykristallen in einem kontrollierten Durchflußsystem präsentiert. Das Hauptaugenmerk dieser Experimente wurde auf die Entwicklung der Kristallwachstumsrate über die Zeit gelegt. Die durchschnittliche Wachstumsrate der Kristalle wird durch den Wachstumswettbewerb und die Abnahme der Fluidkonzentration entlang der Kluft beeinflusst. Zusätzlich hängt die Wachstumsrate der Einzelkristalle von Typ, der Länge und Orientierung der Facetten ab. Schwankungen der Wachstumsrate über die Zeit werden in einigen Facetten beobachtet und können durch einen Fluß von Versetzungen zwischen unterschiedlichen Kristallsektoren erklärt werden. Bei hoher Übersättigung ( $>0.176$ ) werden Fluideinschlüsse gebändert in regelmäßigen Abständen in die Kristalle eingebaut. Das Auftreten dieser Fluideinschlüsse in natürlich vorkommenden Kluftfüllungen kann auf hohe Paleoübersättigung hinweisen. In den experimentell produzierten Mikrostrukturen konnten keine

Merkmale beobachtet werden, die als Anzeiger für eine Paläo-Fließrichtung angenommen werden können.

Natürliche Riß-Siegelbildungen wurden in einer Fallstudie an triassischen Sandsteinen des NW-deutschen Becken untersucht. Anhand von Bohrkern-Untersuchungen konnten mindestens zwei unterschiedliche Kluffüllungsgenerationen identifiziert werden. Die erste Kluffgeneration besteht aus Calcit und zeigt in den meisten Fällen eine faserige Mikrostruktur. Untersuchungen mit Hilfe von stabilen und Strontium-Isotopen konnten zeigen, dass die Fluide im Wesentlichen lokalen Ursprungs sind und daß die Mineralausfällung bei niedrigen Temperaturen ( $<120^{\circ}\text{C}$ ) stattfand, zu einem Zeitpunkt als das Gestein noch nicht vollständig lithifiziert war. Die zweite Generation besteht aus Anhydritkristallen, deren Mikrostruktur von länglich-blockartig bis zu blockartig reicht. Das stellenweise Vorkommen von Anhydrit-Rosetten deutet auf ein Wachstum ohne Hindernisse. Die Analyse der Fluideinschlüsse konnte zeigen, dass die Mineralausfällung bei ca.  $150^{\circ}\text{C}$  stattfand, was einer Tiefe von 3-5 Kilometer entspricht. Die Fluide weisen zusätzlich auf eine NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Zusammensetzung. Zusätzlich zeigen Schwefel- und Strontium-Isotope an, daß diese Fluide zu einem gewissen Teil aus den unterlagernden Zechstein-Evaporiten abgeleitet werden können. Die Entstehung dieser Kluffüllungen wird durch Fluid-Überdrücke erklärt, die die Effektiv-Spannungen deutlich verringert haben. Der Aufbau von Überdrücken kann durch einen plötzlichen Zufluß aus den unterlagernden Zechstein-Evaporiten erklärt werden. Die an Anhydrit übersättigten Fluide können auf einen raschen Druckabfall während der Kluffentstehung zurückgehen.

Basierend auf den Ergebnissen aus den unterschiedlichen Teilen dieser Arbeit, konnten einige neue Aspekte des Kristallwachstums in Klüften entdeckt werden. Vergleichende Betrachtungsweisen von Prozessen, die im mikrostrukturellen Maßstab stattfinden, mit Prozessen, die sich auf den großräumigen Maßstab eines Becken beziehen, verbessern das Verständnis für die Bedeutung von Fluid-Übersättigung in sedimentären Becken zu erkennen.

# Table of contents

<b>Chapter 1: Introduction</b>	<b>1</b>
<i>1. Transport processes</i>	<b>1</b>
<i>2. Fluid properties</i>	<b>2</b>
<i>3. Nucleation sites</i>	<b>3</b>
<i>4. Available space</i>	<b>4</b>
<i>5. Aim of this work</i>	<b>5</b>
<i>6. Overview of this thesis</i>	<b>6</b>
<i>7. Parts of the thesis which have been published</i>	<b>7</b>
<i>References</i>	<b>8</b>
<b>Chapter 2: Numerical simulations of polycrystal growth in veins</b>	<b>11</b>
<i>Abstract</i>	<b>11</b>
<i>1. Introduction</i>	<b>11</b>
<i>2. Methods</i>	<b>14</b>
<i>3. Open cavity growth</i>	<b>16</b>
<i>4. Crack-seal growth</i>	<b>26</b>
<i>5. Discussion</i>	<b>31</b>
<i>6. Conclusion</i>	<b>33</b>
<i>7. Acknowledgements</i>	<b>33</b>
<i>References</i>	<b>34</b>
<b>Chapter 3: Experimental study of polycrystal growth from an advecting supersaturated fluid in a model fracture</b>	<b>37</b>
<i>Abstract</i>	<b>37</b>
<i>1. Introduction</i>	<b>38</b>
<i>2. Methods &amp; experimental set-up</i>	<b>40</b>
<i>3. Microstructural evolution of polycrystals</i>	<b>46</b>
<i>4. Facet growth rate measurements</i>	<b>49</b>
<i>5. Overall growth rate measurements</i>	<b>52</b>
<i>6. Fluid inclusions generation in crystals</i>	<b>55</b>
<i>7. Facet development of single crystals with a rough surface</i>	<b>56</b>

8. Discussion	57
9. Conclusions	63
Acknowledgements	64
References	65

**Chapter 4: Sealing of fluid pathways in overpressure cells – a case study from the Buntsandstein in the Lower Saxony Basin (NW Germany)** 69

<i>Abstract</i>	69
1. Introduction	69
2. Geological setting	72
3. Methods	75
4. Macroscopic observations	76
5. Microstructural observations	77
6. Stable isotopes	82
7. Fluid inclusions	85
8. Discussion	87
9. Conclusions	94
Acknowledgements	95
Appendix: Strain due to compaction of clays	96
References	97

**Chapter 5: Geochemical constraints on precipitation of anhydrite and calcite in the Buntsandstein (NW Germany)** 101

1. Introduction	101
2. Sample area and sample description	102
3. Methods	104
4. Results	105
5. Discussion	108
6. Conclusions	111
References	112

**Chapter 6: Outlook: Fields of future research** 113

1. Numerical simulations	113
2. Experiments	114

<i>3. Natural fracture sealing processes</i>	<b>115</b>
<i>4. General remarks</i>	<b>115</b>
<i>References</i>	<b>116</b>