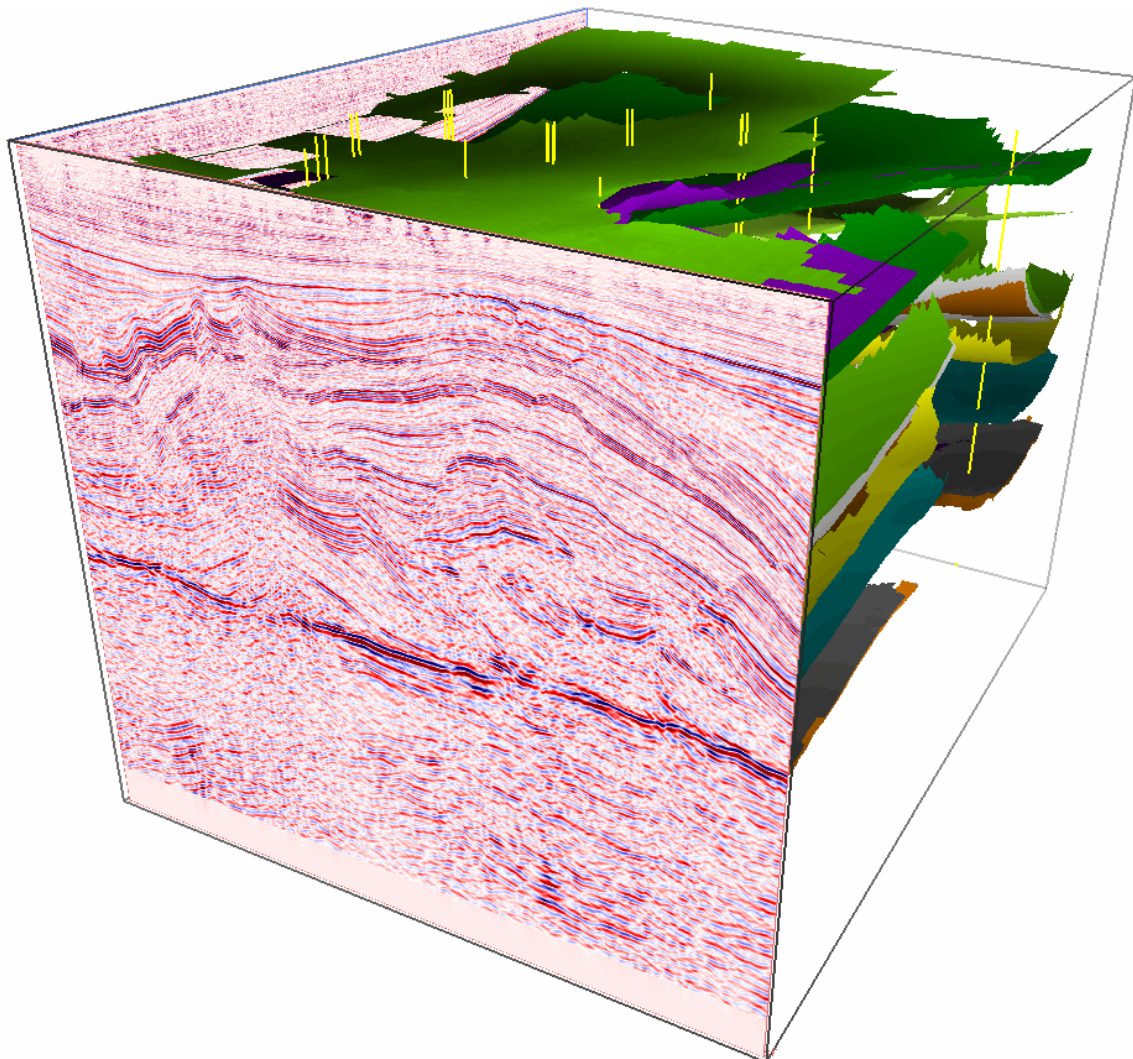


*'Seismic and sub-seismic deformation
on different scales in the
NW German Basin'*

Tina Lohr



1. Gutachter: Prof. Dr. Onno Oncken
GeoForschungsZentrum Potsdam, Freie Universität Berlin

2. Gutachter: Prof. Dr. Charlotte M. Krawczyk
GGA-Institut Hannover, Technische Universität Berlin

Datum der Disputation: 31. Oktober 2007

*‘Seismic and sub-seismic deformation on different scales in the
NW German Basin’*

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)
in der Wissenschaftsdisziplin Geologie

eingereicht im Fachbereich Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin

von

Tina Lohr

Potsdam, Oktober 2007

*'Zu wissen, was man weiß,
und zu wissen, was man nicht weiß,
das ist Wissen'*

Konfuzius

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter, und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Literatur angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Potsdam, Oktober 2007

Contents

Summary

Zusammenfassung

1. Introduction	1
1.1. Overview	1
1.2. Objectives and motivation	1
1.3. Working procedure	4
1.3.1. 3D reflection seismic interpretation	4
1.3.2. Tectonic modelling	8
1.3.3. Analogue modelling	9
2. Strain partitioning due to salt – insights from interpretation of a 3D seismic data set in the NW German Basin	11
2.1. Introduction	11
2.2. Tectonic setting	12
2.3. Data base	14
2.4. 3D structures	14
2.4.1. General stratigraphy	14
2.4.2. Carboniferous/Permian deformation	18
2.4.3. Zechstein salt	20
2.4.4. Late Triassic and Jurassic deformation	20
2.4.5. Late Jurassic/Early Cretaceous deformation	23
2.4.6. Late Cretaceous deformation	24
2.4.7. Cenozoic deformation	25
2.5. Discussion	25
2.5.1. Kinematics derived from structures	25
Carboniferous/Permian	26
Late Triassic and Jurassic	26
Late Jurassic/Early Cretaceous	27
Late Cretaceous	28
Cenozoic	29
2.5.2. Deformation around the Aller-lineament	30
2.5.3. Interaction between faulting and salt movements	31
2.5.4. Comparison with other basins of the Southern Permian Basin	32
2.6. Summary	33
3. Prediction of sub-seismic faults and fractures - integration of 3D seismic data, 3D retro-deformation, and well data on an example of deformation around an inverted fault	35
3.1. Introduction	35
3.2. Data base and reservoir characterisation	37
3.3. Workflow	37
3.3.1. Tectonic deformation history	37

3.3.2. Coherency analysis and geostatistical fault prediction	38
3.3.3. 3D kinematic modelling (retro-deformation)	39
3.3.4. Fracture interpretation from well data	42
3.4. Discussion	43
3.4.1. Interpretation of modelling results	43
3.4.2. Comparison between coherency, modelling, and well data	44
3.4.3. Applications	46
3.5. Conclusions	47
4. Evolution of a fault-surface from 3D attribute analysis and displacement measurements	49
4.1. Introduction	49
4.2. Data base and Methods	50
4.3. Fault analysis	52
4.3.1. Large-scale fault analysis	52
4.3.2. Small-scale fault analysis	54
4.4. Discussion	57
4.4.1. Fault corrugations and displacement calculations	57
4.4.2. Implications for fracture prediction, scaling, and seismic hazard assessment	58
4.5. Conclusions	59
5. Analogue modelling of fault-growth processes	61
5.1. Introduction	61
5.2. Scaling of the sandbox model	61
5.3. Model setup	63
5.4. Results	64
5.5. Discussion	70
5.6. Conclusion	71
6. Paleostress analysis from 3D seismic data – an outlook	73
6.1. Introduction	73
6.2. Data base and methods	73
6.3. Results	73
6.4. Discussion	75
7. Final conclusions	77
References	81
Acknowledgements	87
Appendix	DVD
Curriculum vitae	89

Chapters 2, 3, and 4 are already published or submitted in the following international scientific journals:

Chapter 2:

**‘Strain partitioning due to salt
- insights from interpretation of a 3D seismic data set in the NW German Basin’**

T. Lohr, C.M. Krawczyk, D.C. Tanner, R. Samiec, H. Endres, H. Trappe,
O. Oncken, P.A. Kukla

Basin Research, 2007, v. 19 (4), p. 579-597

Chapter 3:

**‘Prediction of sub-seismic faults and fractures
- integration of 3D seismic data, 3D retro-deformation, and well data
on an example of deformation around an inverted fault’**

T. Lohr, C.M. Krawczyk, D.C. Tanner, R. Samiec, H. Endres, O. Oncken, H. Trappe,
R. Bachmann, P.A. Kukla

AAPG Bulletin, accepted. Publishing expected in 2008.

Chapter 4:

**‘Evolution of a fault-surface from
3D attribute analysis and displacement measurements’**

T. Lohr, C.M. Krawczyk, O. Oncken, D.C. Tanner

Journal of Structural Geology, under review.

Summary

The evolution of sedimentary basins is often strongly affected by deformation. Large-scale, subsurface deformation is typically identified by the interpretation of seismic data and evaluated by palinspastic reconstructions. However, sub-seismic small-scale deformation and the thereby generated fractures play an important role: they may accommodate a significant proportion of the total strain during basin evolution, lateral variation may cause compartmentalised deposits and reservoirs, and fracture networks may act as conduits for diagenetic fluids. These aspects depend primarily on the magnitude of deformation, the strain accumulation in space and time, and the processes that control both during basin evolution under varying kinematic constraints.

However, methodology limitations result in information gaps between large crustal-scale 2D seismic lines, high-resolution upper-crustal-scale 3D seismic data, and very small-scale 1D borehole data. To bridge these gaps in size and dimension between the different methods, and to correlate the deformation over large scale ranges, it is necessary to get the most out of the data with respect to the method's resolution, and to simulate the processes which are responsible for the next lower-scale deformation by appropriate modelling approaches.

For this purpose we analysed the orientation, distribution, and evolution of tectonic structures by using the following methods: analysis of 3D seismic data, analysis of well data, 3D kinematic modelling (retro-deformation), and analogue modelling.

A high-resolution 3D seismic data set with corresponding well data, located within the NW German Basin, was interpreted in detail. Large-scale deformation was analysed in terms of sedimentation, salt diapirism, as well as orientation, distribution, displacement, kinematic and timing of faulting. Processes like strain partitioning, as well as coupling/decoupling due to salt have been recognised, and several deformation phases from Carboniferous to Tertiary have been documented for the study area, and compared with the superimposed Central European Basin System.

On a smaller scale, 3D fault-surfaces have been studied. Displacement measurements and fault-attributes (dip, azimuth, curvature) helped not only to analyse the kinematics of these faults and the principal stress direction during Permian extension, but also to investigate fault-growth and linkage over time and over several scales down to the limits of seismic resolution.

A scale below, 3D kinematic retro-deformation of the fault's hanging wall volume helped to reveal information about orientation and density of sub-seismic strain during a special deformation period. Comparison of these medium-scale modelling results with large-scale seismic data and very small-scale well data allowed the quantification of sub-seismic strain, and to bridge the information gap between these scales, in the here investigated working area.

A final analysis integrating the timing of deformation over a broad scale range has been carried out with scaled physical sandbox models. A cohesive mixture of sand and gypsum was used for the observation of fault-growth processes, such as initiation and propagation of fractures, fault-segment-linkage, and the alternation of activity between different faults through time.

All here presented investigations from several scale ranges show a similar result: deformation is expressed as large heterogeneity in orientation, density, and timing of faults and fractures, and can have a similar pattern over a large scale range. However, this heterogeneity underlies different spatiotemporal causes dependent on processes relevant on the actual scale, and therefore complicates and questions a correlation.

Zusammenfassung

Die Entwicklung von Sedimentbecken ist oft sehr stark durch Deformation beeinflusst. Großskalige Deformation im Untergrund wird typischerweise mit Hilfe von seismischen Daten und palinspastischen Rekonstruktionen analysiert. Allerdings spielt kleinskalige, subseismische Deformation und die durch sie erzeugten Strukturen ebenso eine wichtige Rolle: sie können einerseits einen entscheidenden Teil der Gesamtverformung während der Beckenentwicklung akkumulieren, und andererseits tragen laterale Veränderungen zur Bildung von kleinen, abgeschlossenen Lagerstätten und Reservoiren bei. Ebenso können kleinskalige Bruchnetzwerke als Aufstiegsbahnen für Fluide genutzt werden. Dies alles ist in erster Linie abhängig von der Magnitude der Deformation, der Akkumulation von Verformung in Raum und Zeit, sowie den Prozessen, die beides während der Beckenentwicklung unter veränderlichen kinematischen Randbedingungen kontrollieren.

Methodische Grenzen führen jedoch zu Informationslücken zwischen z.B. großen krustenskaligen 2D seismischen Profilen, hochauflösenden oberkrustenskaligen 3D seismischen Datensätzen, sowie kleinskaligen 1D Bohrlochdaten. Um diese Skalen- und Dimensionslücken zu überbrücken, und die Deformation über verschiedene Skalenbereiche zu korrelieren, ist es notwendig, bis zur Auflösungsgrenze das Bestmögliche aus den vorhandenen Daten herauszuarbeiten, und anschließend die Prozesse zu simulieren, die im für die jeweiligen Methoden unzugänglichen Skalenbereich liegen.

Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, analysierten wir die Orientierung, Verteilung und Entwicklung tektonischer Strukturen mit Hilfe folgender Methoden: Analyse eines 3D seismischen Datensatzes, Analyse von Bohrungsdaten, 3D kinematische Modellierung (Rückdeformation), sowie Analogmodellierung.

Wir interpretierten einen 3D seismischen Datensatz mit dazugehörigen Bohrungsdaten aus dem Nordwestdeutschen Becken. Großskalige Deformation wurde in Hinsicht auf Sedimentation, Salztektonik, sowie Orientierung, Verteilung, Versatz, Kinematik und Zeitlichkeit von Störungen untersucht. Dabei analysierten wir Prozesse wie Verformungspartitionierung und durch Salz bedingte Kopplung und Entkopplung von Krustenstockwerken. Wir konnten verschiedene Deformationsphasen vom Karbon bis ins Tertiär für das Arbeitsgebiet dokumentieren und mit dem übergeordneten Zentraleuropäischen Beckensystem vergleichen.

Eine Größenordnung darunter untersuchten wir Störungsflächen in 3D. Mittels Versatzanalyse und Störungsattributen (Einfallen, Streichen, Krümmung) konnten wir nicht nur die Kinematik dieser Störungen festlegen und die Spannungsrichtung während der Permischen Extension bestimmen, sondern auch Wachstum und Verlinkung von Störungen in Raum und Zeit bis hinunter zur Grenze der seismischen Auflösung analysieren.

Im darunterliegenden Skalenbereich untersuchten wir mit Hilfe 3D kinematischer Modellierung (Rückdeformation) den Hangendblock einer permischen Störung, um Informationen über Orientierung und Dichte subseismischer Verformung während eines Deformationsereignisses zu erhalten. Der Vergleich dieser mittelskaligen Modellierungsergebnisse mit den großskaligen seismischen Strukturen und den kleinskaligen Bohrungsdaten ermöglichte es uns, die subseismische Verformung zu quantifizieren und die Informationslücke zwischen den einzelnen Skalenbereichen im Untersuchungsgebiet zu schließen.

Um die Zeitlichkeit der Deformation über einen großen Skalenbereich umfassend zu betrachten, führten wir außerdem eine Untersuchung mit Hilfe von skalierten physikalischen

Sandboxmodellen durch. Wir verwendeten eine Mischung aus Sand und Gips, um Störungswachstumsprozesse wie z.B. Initiierung, Ausbreitung und Verlinkung von Störungen sowie die wechselseitige Aktivierung von Brüchen in der Zeit zu analysieren.

Zusammenfassend zeigen alle Untersuchungen aus den einzelnen Skalenbereichen ein gemeinsames Ergebnis: Deformation äußert sich in einer großen Heterogenität in Orientierung, Dichte und Zeitlichkeit von Störungen und Brüchen, und kann über einen großen Maßstab hinweg ähnliche Muster aufweisen. Allerdings unterliegen dieser Heterogenität unterschiedlichste zeitliche und räumliche Ursachen, abhängig vom jeweils betrachteten Skalenbereich, was demzufolge ihre tatsächliche Korrelation und damit Vorhersagbarkeit nicht nur erschwert, sondern auch in Frage stellt.