

**Fluid induced microseismicity:
Data modeling and inversion
for hydraulic properties of rocks**

**Fluidinduzierte Mikroseismizität:
Modellierung und Inversion zur Abschätzung
hydraulischer Eigenschaften von Gesteinen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN

bei dem Fachbereich Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Geophys. Elmar Rothert
aus Berlin
geboren in Lingen/Ems

Tag der mündlichen Prüfung:
Referent:
Korreferent:

20. Februar 2004
Prof. Dr. Serge A. Shapiro
Prof. Dr. Rainer Kind

Abstract

In this thesis a method for the characterization of reservoirs in terms of their hydraulic properties is further developed, applied and numerically verified. The proposed method was partly derived already in the last few years. Basis of the method, which is called 'Seismicity Based Reservoir Characterization (SBRC)', is the analysis of fluid-induced microseismic events. Such events very often occur during fluid injection or extraction experiments in boreholes. The events can be localized up to several kilometers away from the borehole and the injection source. The mechanisms for the triggering of such microearthquakes are still not fully understood. In several studies and analyses the hypothesis is proposed, that fluids can play a fundamental role in the triggering of such microseismic events.

In the SBRC method used in this thesis, data of fluid-induced microseismicity are analysed in terms of their spatio-temporal evolution. The main hypothesis is, that a fluid-injection-induced pressure diffusion can be a significant and thus is possibly a main triggering factor for microseismic events. Based on the theory of poroelasticity (Biot [1956a]), equations are derived, which allow the estimation of hydraulic parameters like hydraulic diffusivity or permeability of rocks in 1D, 2D and 3D. The advantage of the proposed method is the estimation of hydraulic parameters of rocks not only locally (orders of centimeters or meters) but of a large spatial scale (cubic kilometer regime). Parameters like hydraulic diffusivity or permeability are of special interest in the industrial utilization of reservoirs, production or storage of oil and gas resources, storage of nuclear waste and in the optimal recovery of renewable energy sources.

The main topic of this thesis is the numerical simulation of the hypotheses proposed in the SBRC-method for the triggering of fluid-induced microseismic events. Such a numerical verification is of importance for the application, the validity and accuracy analysis of the method. So far, the SBRC method was solely applied to real data and never numerically verified. For this study, the two- or three dimensional time-dependent equation of diffusion is solved for different hydraulic models. The simulation of the process of pore pressure diffusion is then used to create synthetic microseismicity clouds. Therefore, following the main hypothesis of SBRC that microseismic events occur at points of the medium which are characterized by a critical state of stress, a criticality field is compared with the pore pressure distribution. At locations where pore pressure exceeds criticality, an event is defined. The signatures of the spatio-temporal evolution behaviour of such event clouds are then compared with those calculated by the SBRC-method and observed for real data from fluid injection experiments in geothermal or hydrocarbon reservoirs.

The computer-based simulations allow the systematic study of the hypothesis proposed in the SBRC for the triggering mechanism for the first time. The results show that the process of pore pressure diffusion can explain the spatio-temporal signatures of microseismic event clouds in many cases. Moreover, the study presented in this thesis confirms that fluid-injection-induced microseismicity can be used for the characterization of reservoirs in terms of hydraulic parameters and their large scale distribution.

Another main point in this thesis is the application of the SBRC-method to two data sets: of the German Continental Deep Drilling Site (KTB), and of a reservoir in tight-gas environment (Cotton Valley, USA). At the KTB microseismicity was induced at different depth levels during two fluid injection experiments. Such a data set allows the analysis of hydraulic diffusivity or permeability changes with depth at one single and unique location for the first time. The estimation of hydraulic parameters are compared with results of seismic reflectivity experiments. It turns out that pore pressure diffusion can explain the signatures observed and structural properties like faults or fractures affect the distribution of microseismic hypocenters to a large amount. The analysis of data obtained during experiments at a gas reservoir are of interest and of importance for application of the SBRC method. With the analyses and results presented in this thesis a step is done towards the cause study of microseismicity genesis and helps to understand the underlying physical processes.

Zusammenfassung

Thema dieser Dissertation ist die Weiterentwicklung, Anwendung und numerische Modellierung einer Methode zur Charakterisierung von Lagerstätten (Reservoiren) in Hinsicht auf gesteinsphysikalische Parameter. In der hier vorgestellten Methode, welche bereits in Teilen seit dem Jahre 1997 vorgeschlagen und entwickelt wurde, werden Daten mikroseismischer Ereignisse ausgelöst während Fluidinjektionen in Bohrlöchern untersucht. Solche mikroseismische Ereignisse treten häufig während Fluidinjektions- oder -extraktionsexperimenten in Bohrlöchern auf. Die seismischen Ereignisse können sich bis zu mehreren hundert Metern vom Bohrloch entfernt ereignen. Der genaue Mechanismus für das Auftreten ist bisher nicht restlos geklärt. In mehreren Studien wurde die Hypothese aufgestellt, dass Fluide einen maßgeblichen Einfluss auf die Auslösung von Mikroerdbeben haben können.

In der hier benutzten und weiterentwickelten Methode, die „Seismizitätsbasierte Reservoircharakterisierung“ (Seismicity Based Reservoir Characterization, SBRC) genannt wird, werden solche Daten hinsichtlich ihres raum-zeitlichen Ausbreitungsverhaltens analysiert. Es wird die Haupthypothese aufgestellt, dass Porendruckdiffusion ein Hauptauslösemechanismus für mikroseismische Ereignisse darstellt. Basierend auf der Poroelastizitätstheorie von Biot [1956a] werden auf Grundlage eines Diffusionsprozesses Gleichungen hergeleitet, welche erlauben, für das seismisch aktive Gesteinsvolumen in 1D, 2D und 3D hydraulische Parameter wie die hydraulische Diffusivität und Permeabilität abzuschätzen. Der Vorteil der vorgeschlagenen SBRC Methode ist, dass die hydraulischen Parameter nicht nur lokal (im Zentimeter- und Metermaßstab), sondern ihre Verteilung auf großen Skalen (im Kubikkilometerbereich) abgeschätzt werden können. Die hydraulische Diffusivität und Permeabilität sind besonders in der industriellen Nutzung von Erdöl- und Ergasspeichern, beim Fördern oder der Untertagespeicherung von Öl und Gas, bei der Nutzung geothermischer Energie, dem Lagern nuklearer Abfälle, der Vorratsbewirtschaftung von Rohstoffen und Trinkwasser, in der Bau- und Umweltindustrie aber auch für die optimale Ausnutzung von regenerativen Energieträgern von entscheidender Bedeutung.

Kernpunkt dieser Arbeit bildet die numerische Simulation des in der SBRC-Methode vorgeschlagenen Auslösemechanismus für Mikroerdbeben. Diese numerische Verifikation ist von Bedeutung für die Anwendbarkeits- und Genauigkeitsuntersuchung der SBRC-Methode. Die Methode wurde bisher lediglich auf reale Daten angewendet und wird erstmals mit dieser Arbeit numerisch überprüft. Dazu wird computergestützt die zwei- bzw. dreidimensionale, zeitabhängige Diffusionsgleichung für hydraulisch beliebig geartete Medien gelöst. Die simulierte Porendruckdiffusion wird dann dazu benutzt, mikroseismische Ereignisse auszulösen.

In der hier vorgeschlagenen Methode zur Simulation der Auslösung mikro-seismischer Ereignisse wird analog zu der Hypothese, dass sich mikro-seismische Ereignisse an Bereichen ereignen, welche durch einen kritischen Spannungszustand charakterisiert sind, ein Kritikalitätskriterium mit den Lösungen für den Porendruck verglichen. Ein seismisches Ereignis wird dort angenommen, wo der kritische Spannungszustand durch den Porendruck überschritten wird. Mit dieser Methode können so synthetische Wolken von Ereignissen erzeugt werden. Die auftretenden raum-zeitlichen Signaturen werden mit den nach der SBRC-Methode berechneten und mit den an realen Daten aus geothermischen und industriellen Erdöl- und Erdgasspeicher-Injektionsexperimenten beobachteten verglichen. Die numerischen Simulationen erlauben erstmals die systematische Untersuchung der Hypothese des wichtigen Einflusses eines Porendruckdiffusionsprozesses auf die Auslösung seismischer Ereignisse. Sie belegen weiterhin den maßgeblichen Einfluss von Fluiden bei der Entstehung von Mikroerdbeben während Fluidinjektionen. Die in dieser Dissertation vorgestellte Untersuchung belegt, dass Daten fluidinduzierter mikro-seismischer Ereignisse benutzt werden können, um Lagerstätten und Reservoirs in Hinsicht auf hydraulische Parameter und ihrer Verteilung im großskaligen Bereich zu charakterisieren.

Einen weiteren Schwerpunkt in dieser Dissertation bildet die Anwendung der SBRC-Methode auf zwei Datensätze: von fluidinduzierten mikro-seismischen Ereignissen an der Deutschen Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) und auf Daten aus einer Gaslagerstätte (Cotton Valley, USA). An der KTB in Deutschland wurden während zweier Flüssigkeitsinjektionsexperimenten Mikroerdbeben in verschiedenen Tiefenbereichen im Gestein ausgelöst. Die Daten erlauben erstmals eine Untersuchung der Änderung hydraulischer Eigenschaften mit der Tiefe an einer einzigen und geologisch sehr gut untersuchten Lokation. Die Diffusivitätsabschätzungen werden erstmals mit Ergebnissen hochauflösender reflektionsseismischer Experimente korreliert. Es zeigt sich, dass ein Porendruckdiffusionsprozess die Signaturen der Daten erklären können und strukturelle Eigenschaften wie Kluftsysteme maßgeblich diese Parameter sowie die Ausbreitung der seismischen Ereignisse kontrollieren. Die Untersuchung von Daten aus einem Gasreservoir sind von besonderem Interesse und entscheidender Bedeutung für die industrielle Anwendung der SBRC-Methode. Mit den hier vorgestellten Analysen und Ergebnissen wird ein Schritt in die Richtung der Erklärung und Ursachenforschung für die Entstehung von Mikroerdbeben erzielt und durch numerische Simulationen untermauert.

Contents

Abstract	iii
Zusammenfassung	v
1 General Introduction	1
1.1 Summary	1
1.2 Fluid induced microseismicity and reservoir characterization	2
1.3 Motivation	4
2 Theory - SBRC fundamentals	5
2.1 The concept of triggering fronts	5
2.1.1 Triggering fronts in homogeneous anisotropic media	9
2.1.2 Diffusivity tensor estimation in 3D	10
2.1.3 Group-velocity surface of anisotropic slow waves	12
2.1.4 Inversion for the global diffusivity and permeability tensors	14
2.2 Triggering fronts in heterogeneous media	15
2.2.1 Triggering fronts for the case of a quasi-harmonic pressure perturbation	17
2.2.2 Triggering fronts in the case of a step-function like pressure perturbation	18
2.2.3 Inversion for the permeability of heterogeneous media	19
2.3 Discussion	20

2.4	Conclusions	21
3	Numerical modeling of the SBRC approach	23
3.1	The approach	23
3.2	Accuracy study	26
3.2.1	Solution of the diffusion equation in 2D	26
3.2.2	Solution of the diffusion equation in 3D	28
3.3	Verification of eikonal approach	30
3.4	2D modeling and event triggering	32
3.4.1	Homogeneous isotropic case	32
3.4.2	Trigger criterion statistics	34
3.4.3	Heterogeneous case	39
3.5	3D modeling and event triggering	42
3.5.1	Homogeneous isotropic case	42
3.5.2	Envelope fitting criterion	46
3.5.3	Anisotropic case	48
3.5.4	Source functions	51
3.5.5	Source geometry	54
3.5.6	Kaiser effect	57
3.6	Conclusions of numerical modeling	60
4	Case study at the German Continental Deep Drilling Site (KTB): Mutual relationship between microseismicity and seismic reflectivity	63
4.1	Introduction	64
4.2	Results of hydraulic diffusivity estimates	67
4.3	3D seismic reflection intensities	68
4.4	Correlation of microseismicity and reflectivity	69
4.5	Correlation of seismic structures and microseismicity with stress tensor	71

4.6	Modeling of microseismicity at the KTB	72
4.6.1	Injection signal and event number	72
4.6.2	Hydraulic model from reflectivity	74
4.7	Conclusion	80
5	Case study - application of SBRC to gas reservoir data	81
5.1	Introduction	81
5.2	Cotton Valley	81
5.3	Hydraulic fracturing experiment	82
5.4	Estimation of hydraulic diffusivity	82
5.4.1	Effective scalar hydraulic diffusivity	82
5.4.2	Tensor analysis	85
5.4.3	3D reconstruction	87
6	Conclusions	89
6.1	Conclusions and perspectives	89
6.2	Further developments	91
6.2.1	Probability of fluid-injection-induced microearthquakes	91
6.2.2	Back front of seismicity induced after termination of borehole fluid injection	91
6.2.3	Reservoir characterization based on seismicity rate	92
6.3	Open questions and further work	93
	References	95
A	Numerical models and parameters	101
B	Contents of enclosed CD-ROM	111
	List of Figures	114

List of Tables	125
Acknowledgments / Danksagung	127
Curriculum vitae	129