

Abschnitt 9 zum Beitrag:

Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken

- The state of stress in the North German Basin -

Thomas Röckel* und Christof Lempp

Martin Luther-Universität/Halle Wittenberg,

*jetzt Piewak & Partner GmbH, Bayreuth

publiziert in: Erdöl Erdgas Kohle, Heft 119, Jg. 2003, Heft 2

Zusammenfassung

Im Bereich des norddeutschen Beckens gab es bisher nur wenige publizierte Daten zum Spannungszustand. In den letzten Jahren hat sich die Kenntnis der Spannungsrichtungen im Subsalinar verbessert (GROTE 1998, ROTH & FLECKENSTEIN 2001). Informationen zu Spannungsbeträgen sind allerdings bislang kaum bekannt. Diese sind zum Verständnis von tektonischen Vorgängen jedoch von entscheidender Bedeutung. Die vorliegende Auswertung von zahlreichen tiefen Bohrungen des Norddeutschen Beckens bringen dazu einen Kenntniszuwachs, sowohl bei den Spannungsrichtungen wie nunmehr auch bei den Spannungsbeträgen.

Bei den Spannungsrichtungen im Subsalinar ergibt sich ein eindeutiges Bild. Aus der Auswertung zahlreicher ABF-Messungen im Bereich der Altmark ergibt sich ein sehr einheitlicher N-S Trend bei der Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung. Nach W bis zur niederländischen Grenze schwenkt diese Richtung tendenziell nach NNW bis NW ein und nach E bis zur polnischen Grenze stärker nach NNE.

Im Suprasalinar herrscht ein vergleichsweise sehr indifferenter Spannungszustand.

Die Spannungsrichtungen sind hier nicht stabil.

Im Salinar zeigen die hohen Spülungsdrücke, die beim Bohren gefahren werden müssen, dass keine hohen Differenzspannungen vorhanden sein können. Eine Spannungsübertragung vom Deckgebirge ins Subsalinar ist bei einer flächenhaften Verbreitung des Salzes nicht vorhanden. Bei Porendruckgradienten von bis zu 23 MPa/km können sich im Staßfurtkarbonat kaum Scherspannungen oder Differenzspannungen ausbilden.

Entsprechendes gilt auch für die Bereiche, wo die Salinarabfolgen auf Grund ihrer plastischen Eigenschaften einem lithostatischen Spannungszustand anstreben. Über die mächtigen Abfolgen des Zechsteins kann es auf einem flächenmäßig großen Gebiet nicht zu einer Kopplung der rezenten tektonischen Spannungen im Subsalinar mit dem suprasalinen Deckgebirge kommen. Mechanisch ist das Deckgebirge vom Subsalinar entkoppelt. Der Spannungszustand im Deckgebirge wird vorrangig von der lithologischen Ausbildung der Gesteine, von Steifigkeitskontrasten und von den regionalen Strukturen, d.h. von Sätteln und Mulden sowie von bedeutenden Störungszonen, kontrolliert.

Bei den Spannungsbeträgen im Subsalinar zeigt sich, dass die minimale horizontale Hauptspannung kleiner ist als die Vertikalspannung und in der Regel deutlich unter dem Betrag der Vertikalspannung liegt.

Bei Vertikalspannungsgradienten von etwa 25 MPa/km und bei Porendruckgradienten von etwa 12,0 MPa/km ergibt sich im tieferen Subsalinar ein effektiver Vertikalspannungsgradient von etwa 13,0 MPa/km. Für einen Reibungswinkel von $\varphi=30^\circ$, wie er für die gestörte Kruste angenommen wird, ergibt sich für die minimale horizontale Hauptspannung ein Gradient von etwa 16,3 MPa/km. Für eine weniger gestörte Kruste mit einem Reibungswinkel von etwa $\varphi=45^\circ$ verringert sich der Gradient auf etwa 14,6 MPa/km. Beim gegebenen Porendruck- und Vertikalspannungsgradienten existiert bei den genannten Reibungswinkeln ein Gleichgewicht bei einer rezenten Abschiebungstektonik. Aus den ausgewerteten Daten ergeben sich deutliche Hinweise darauf, dass im tieferen Untergrund des Norddeutschen Beckens die minimale Horizontalspannung deutlich unter der Vertikalspannung liegt. Es gibt kaum Hinweise, dass die maximale horizontale Hauptspannung über der Vertikalspannung liegt. Dementsprechend wird die Situation im Norddeutschen Becken durch eine rezente Abschiebungstektonik charakterisiert. Übergänge zu einer Blattverschiebungscharakteristik sind jedoch nicht ausgeschlossen. Für eine Dominanz der Abschiebungstektonik sprechen die Beobachtungen von rezenten bzw. jungen Abschiebungen in der Niederrheinischen Bucht, den Niederlanden und Belgien (Roer-Graben) im Westen sowie einer Abschiebung, wie sie im Osten bei Cottbus beschrieben wurde. Die Entkopplung des Subsalinar vom Suprasalinar führt dazu, dass die angreifenden plattentektonische Kräfte, die in der Oberkruste wirken, mechanisch nicht auf das Deckgebirge übertragen werden können. Dies ist nur an großen Störungssystemen oder dort zu erwarten, wo die salinaren Schichten geringmächtig sind oder fehlen.

9 Tabellen (Tab. 1 – 6) und Methoden, weiterführende Literatur

Ort	Richtung S_H	Literaturquelle
Kaltenohmfeld	N040°	BANKWITZ et al. 1993
Kehmstedt	N130°	BANKWITZ et al. 1993
Wallhausen	N085°	BANKWITZ et al. 1993
Niederröblingen	N055°	BANKWITZ et al. 1993
Oberheldringen	N035°	BANKWITZ et al. 1993
Reinsdorf	N105°	BANKWITZ et al. 1993
Escherberg	N166° <u>+43</u> °	RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982)*
Eichenberg	N108° <u>+5</u> °	RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982)*
Eldagsen	N135° <u>+12</u> °	BAUMANN (1982)*
Adlersberg	N101° <u>+18</u> °	RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982)*
PES	N109°	ROTH et. al. 1998
ML	N090°	ROTH et. al. 1998
MAH	N090°	ROTH et. al. 1998
FU 1/88	N48°	ROTH & FLECKENSTEIN (2001)
Assesattel	N120° <u>+15</u> °	LEMPP & RÖCKEL 1998
Morsleben	N-S	BFS-interner Bericht

Tab. 1.: Richtung der maximalen Horizontalspannung im Suprasalar

*Daten in BECKER et al. 1990.

Daten:					
GROTE (1998)		RÖCKEL & LEMPP (1999)		ROTH et al. (1998), ROTH & FLECKENSTEIN (2001)	
Bohrung	Richtung S _H	Bohrung	Richtung S _H	Bohrung	Richtung S _H
Ahausen Z1	163	Aaz 1/43	207	Pes153	188
Blenkeloh Z1	125	Am 2/86	156	Nln1/89	110
Bispingen Z1	180	Bad 2/85	179	Smol/88	183
Bleckwedel Z1	168	Bä 1/81	171	Bindel/86	204
Bokel Z1	191	Eils 8/78	185	Kaa /1/87	224
Bommelsen Z1	175	Gm 31/	174	Feg 1/87	193
Böttersen Z6	164	Her 1/	166	Wriz 3/88	225
Böttersen Z9	146	Hor 1/	182	Gzo 2/87	221
Dahlum Z7	149	Huy-Neinstedt 1/85	170	Pud1/1H86	179
Dorfmark Z1	136	Jän 1/	172	ML 6/71	195-215
Dustmoor Z1	154	Jel 2/82	085	ML 20/79	195
Emsdeckerfeld Z	155	Kru 2/	183	PES 166//79	180
Falshorn Z1	165	Lak 3/80	196	Pes 233/82	180
Findorf Z1	165	Lak 4/80	188		
Grauen Z1	126	Lak 6/80	187		
Gross Lessen 1	144	Luckenwalde 1/80	126		
Halmern Z1	200	MI 6/	187		
Hamwiede Z3	162	MI 22/	198		
Hamwiede Z4	163	MI 23/	189		
Hemmelte W Z1	130	MI 27/	207		
Hemmendorf Z1	185	MI 157/	197		
Hemsbünde Z4	164	MI194	186		
Hemsbünde Z5	180	Mit 1/	210		
Hohenassel Z1	134	Miw 6/	164		
Hoya Z1	124	Odt 1/82	141		
Imbrock Z1	174	Pap 2/81	161		
Kneheim Z1	146	Pes 166/	194		
Langenhörn Z1	164	Pes 168/	173		
Lesum Z1	160	Pes 193/	183		
Lintzel Z1	200	Pes 219/	181		
Lünten Z1	144	Pes 226/	182		
Mulmshorn Z2	204	Pes 228/	186		
Mulmshorn Z5	179	Pes 231/	139		
Munster SW Z1	126	Pes 232/	195		
Munster Z4	186	Pos 1/	166		
Ossenbeck Z1	129	Püg 107/	184		
Otter Z1	173	Ratz 1/88	188		
Prezier Z1	176	Ric 17/	182		
Quelkhorn Z1	165	Rub 1/84	199		
Rahden Z1	148	Stdf 1/85	169		
Reiherholz Z1	156	Stdf 3/88	173		
Rodenberg Z1	215	Wmz 2/80	169		
Sagermeer N Z1	163	Wmz 3/80	163		
Sagermeer S Z3	154	Wmz 6/	172		
Scheesel Z1	143				
Schneverding 3	156				
Söhlingen Z1	142				
Söhlingen Z2	131				
Söhlingen Z3	134				
Söhlingen Z5	154				
Söhlingen Z6	184				
Söhlingen Z9	150				
Soltau Z1	196				
Soltau Z2	180				
Stapel Z 1	186				
Taaken Z1	159				
Uchte Z2	155				
Varenesch Z1	156				
Völkersen Z1	162				
Wietingsmoor Z5	125				
Wietzendorf Z3	175				
Wittorf Z1	145				

Tab. 2.: Richtung der maximalen Horizontalspannung im Subsalinar

Ort	Teufe (m)	S_h (MPa)	S_v (MPa)
Kaltenohmfeld	425	5,1	10,7
Kehmstedt	396	11,4	9,5
Wallhausen	594	17,6	14,6
Niederröblingen	610	19,8	15,2
Oberheldrungen	168	4,2	4,2
Oberheldrungen	808	19,8	19,8
Reinsdorf	577	11,6	14,5
Escherberg	118	3,0	3,0
Eichenberg	50	1,5	1,23
Eldagsen	226	6,5	5,3

Tab. 3: Literaturdaten von Spannungsbeträgen (S_h und S_v) im Suprasalar des Norddeutschen Beckens (vgl. Tab. 1).

Bohrung	Teufe [m]	S _h [MPa]	S _h -Gradient [MPa/km]	S _v [MPa]	Einheit	Methode
Angermünde 1/68	1018	> 18,9	> 18,6	22,4	Gipskeuper	Druckstabilitätsprobe
Angermünde 1/68	2049,2	31,6	15,4	48,0	Bernburg	Druckstabilitätsprobe
Binz 1/73	655	14,2	21,5	14,2	Lias	Verpressung
Dreileben 3/70	61-778,9	> 18,5			Quartär-Basis Zechstein	Zementation
Feldberg 1/87	2989-4271	> 62,0	> 20,7	70,8	Nordhausen-Werra	Spülungsdichte
Fehrbellin 1/72	1039,9	16,2	15,6	22,0	Wealden K1	Frac beim Nachsetzen
Fehrbellin 1/72	990-1070	16,0	16,2		Wealden K1	Schlammverpressung
Fehrbellin 1/72	2836,8	43,2	15,2	64,2	Lettenkeuper	Spülungsverlust
Friedland 1/71	2940	51,7	17,6	69,4	Nordhausen	Spülungsverlust
Friedland 2/70	2029,4	28,7 ??	14,2 ??	46,8	Salinarröt	Karst ??
Gingst 1/73	1346,5	23,7	17,6	31,7	Zechstein, kein Salz	Spülungsverlust
Gorgast 1/70	2165 (-3108)	>44,3 – >61,4	>20,5 – >19,8	51,1	Bernburg (Werra)	Druckstabilitätsprobe
Gransee 2/67	54-2175		> 15,2		Quartär-Gipskeuper	Zementation
Huy-Neinstedt 1/85	553-849,4	11,8-15,7	22,0-18,5	13,7	Volpriehausen-Nordhausen	Druckstabilitätsprobe
Kaarßen 1/87	3324-3459	66,9	20,1	82,6	Nordhausen	Spülungsverlust
Kotzen 4/74	1718	22,3	16,8	37,7	Aalenium	Schlammverpressung
Lalendorf 1/75	3460	61,2	17,7	80,9	Nordhausen	Spülungsverlust
Loissin 1/70	1951,4	30,9	15,8	47,2	Nordhausen	Spülungsverlust/ Isotopenverpressung
Mirow 1/74	2611,2	42,0	16,1	57,9	Schilfsandstein	Spülungsverlust
Mirow 1/74	3728	63,0	16,9	86,1	Solling	Druckstabilitätsprobe
Mirow 1/74	3860	65,6	17,0	89,4	Hardeggen	Druckstabilitätsprobe
Mirow 1/74	3904	71,1	18,2	90,5	Detfurth	Druckstabilitätsprobe
Mirow 1/74	4097	66,5	16,2	95,3	Volpriehausen	Spülungsverlust
Mirow 1/74	4519	74,9	16,6	105,8	Nordhausen	Spülungsverlust
Oranienburg 1/68	1250	> 19,8	> 15,8	30,3	Hardeggen	Druckstabilitätsprobe
Otd 1/82	540	9,4	15,4	13,4	Volpriehausen	Verpressung
Pes 233/	2560	37,9-43,6	14,8-17,0	61,9	Nordhausen	Hydro-Frac
Penzlin 1/75	680	15,2	22,3	13,8	Eozän	Druckstabilitätsprobe
Penzlin 1/75	3641	66,5	18,3	84,0	Bernburg	Spülungsverlust
Pröttlin 1/81	1995	33,8	16,9	42,7	Lias	Druckstabilitätsprobe
Pröttlin 1/81	3100	43,2	15,9	69,7	Detfurth	Druckstabilitätsprobe
Rhinow 5/71	2151	31,3	14,5	37,9	Rät	Spülungsverlust
Roxförde 2/62	131,6	2,0	2,67	2,7	Tertiär	Spülungsverlust
Stavenhagen 1/76	3353,6	57,6	17,2	78,2	Hardeggen	Druckstabilitätsprobe
Vellahn 1/78	3500		15,2	78,5	Solling	Druckstabilitätsprobe
Wesenberg 1/72	1814	39,4	21,7	42,4	Detfurth	Absorptionsdruckprobe
Zehdenick 2/75	3813	> 78,6	> 20,6	89,9	Nordhausen	Druckstabilitätsprobe

Tab. 4: Spannungsbeträge von S_h im suprasalinaren Deckgebirge der ausgewerteten Bohrungen im Ostteil des Norddeutschen Beckens

Bohrung	Teufe [m]	S_h [MPa]	S_h -Gradient [MPa/km]	Stratigr. Einheit	Methode
Angermünde1/68	2401-3577	> 50.4 > 75.1	> 21,0	Ohre-Staßfurt	Spüldungsdichte
Barth 8/8	2697,6	54.5	20,2	Staßfurtkarbonat	Absorptionsdruckprobe
Barth 9/78	2644.7	60.8	23,0	Staßfurtkarbonat	Absorptionsdruckprobe
Eldena 1/74	3705	79.1	21.1	Ohre	Absorptionsdruckprobe
Feldberg 1/87	2989-4271	> 62.0 - 89.4	> 20.7	Nordhausen-Werra	Spüldungsdichte
Gingst 1/73	1346.5	23.7	17.6	Kont. Zeschstein	Spüldungsverlust
Gorgast 1//70	3108.3	>70.0	> 22.5	Staßfurtkarbonat	Totpumpen
Greifswald 1/62	2150	43.3	> 20.1	Zechstein	Spüldungsdichte
Grevesmühlen 1/78	3827-49356	>80.4->103.7	> 21,0	Ohre –Werra	Spüldungsdichte
Lalendorf 1/75	3777-4168	> 79.7	> 21.1	Aller-Staßfurt	Druckbeaufschlagung
Parchim 1/68	2319-4705	> 48.0	> 20,7	Aller-Werra	Spüldungsdichte
Pes 233/82	3262	79.9	24.5	Werra-Anhydrit	Hydrofrac
Ramow 11a/69	3399	65.2	19.2	Staßfurtkarbonat	Absorptionsdruckprobe
Pröttlin 1/81	3697	> 83,9	> 22,7	Ohre	Spüldungsdichte
Schwaan 1/76	3426	>77.4	>22,6	Staßfurtkarbonat	Gleichgewicht
Schwerin 1/87	3381-5037		>24,0	Friesland-Werra	Spüldungsdichte
Wesenberg 1/72	4206-2148		>20.4	Bernburg- Werra	Spüldungsdichte
Wittenberge 7/75	1001-3776	23,1 – 72, 2	23,1 – 19,1	Salzstock	Absorptionsdruckprobe
Zehdenick 2/75	3813-3997	>79.8 - > 83.6	> 20,9	Nordhausen- Werra	Spüldungsdichte

Tab. 5: Spannungsbeträge von S_h im Salinar der ausgewerteten Bohrungen im Ostteil des Norddeutschen Beckens.

Bohrung	Teufe [m]	S_h [MPa]	S_{heff} [MPa]	S_v [MPa]	S_{veff} [MPa]	S_h -Gradient [MPa/km]	P_0 [MPa]
Barth 1/63	4469,0	69,4	19,7	110,7	61,0	15,5	49,7
Barth 1/63	5375,0	87,2	27,3	134,7	74,9	16,2	59,8
Binz 1/73	3163,0	45,6	10,8	79,2	44,4	14,4	34,8
Boizenburg 1/74	5640,7	85,1	9,3	131,5	55,7	15,1	76,2
Buchholz 6/62	2755,2	47,7	17,6	66,6	36,5	17,3	30,1
Eils 8/78	990,5	14,5	2,1	24,7	12,3	14,7	12,4
Feldberg 1/87	4288,5	79,6				18,6	
Feldberg 1/87	4888,0	72,1	11,4	117,1	56,4	14,8	60,7
Friedland 1/71	5079,5	69,9	8,9	123,0	62,0	13,8	61,0
Friedland 1/71	5969,8	79,2	7,6	146,2	74,6	13,3	71,6
Friedland 2/70	3767,0	53,0	7,4	89,8	44,2	14,1	45,6
Friedland 2/70	5010,3	65,5	4,9	112,1	51,5	13,1	60,6
Gingst 1/73	2047,9	27,6	5,9	49,8	28,1	13,5	21,7
Gingst 1/73	4963,2	68,3	13,7	127,0	71,4	13,8	55,6
Gingst 1/73	6024,0	81,1	14,9	155,1	88,9	13,5	66,3
Gransee 2/67	5094,0	78,1	16,0	120,7	58,6	15,3	62,1
Greifswald 1/62	2731,0	41,6	11,6	65,9	65,9	15,2	30,0
Greifswald 1/62	3836,0	63,3	21,1	95,0	52,8	16,5	42,2
Greifswald 1/62	4223,0	70,1	23,7	105,3	58,8	16,6	46,5
Greifswald 1/62	4275,0	67,6	20,6	106,7	59,6	15,8	47
Grimmen 6/64	2492,1	38,3	10,9	60,0	32,6	15,4	27,4
Grimmen 6/64	3067,5	47,6	13,9	74,8	41,1	15,5	33,7
Grimmen 6/64	3616,0	53,3	13,5	89,1	49,3	14,7	39,8
Grimmen 6/64	3923,0	60,5	17,4	97,1	54,0	15,4	43,1
Groß Schönebeck	4883,0	59,0	15,9	-	-	14,5	43,1
Groß Schönebeck	4133,5	52,5	7,2	-	-	12,7	45,3
Holz	3970,0	58,4	16	92,5	44,1	16,2	48,4
Jerchel 2/82	815,0	10,6	1,75	19,1	10,0	13,0	9,1
Lalendorf 1/75	5276,4	73,7	11,7	125,9	63,9	14,0	62,0
Loissin 1/70	4359,0	61,2-62,5	12,4-13,7	108,1	59,3	13,4-14,3	48,8
Loissin 1/70	4713,0	66,0	13,2	117,5	64,7	14,0	52,8
Loissin 1/70	6371,0	94,3	23,1	162,2	91	14,8	71,2
Oranienburg	4924,0	72,1	13,0	121,0	61,9	14,6	59,1
Penkun 1/72	4525,0	63,2	13,4	106,3	56,6	14,0	49,8
Penkun 1/72	4693,6	61,8	10,2	110,7	59,1	13,0	51,6
Prerow 1/65	4460,0	70,6	17,5	108,3	54,8	15,8	53,5
Prerow 1/65	5128,0	85,3	23,8	126,0	64,5	16,6	61,5
Pudagla 1/86	3092,4	46,5	11,9	73,0	41,0	15,0	34,6
Pudagla 1/86	4041,6	59,6	14,3	100,3	55,0	14,7	45,3
Richtenberg 2/64	2886,3	40,0	8,0	69,7	37,7	13,9	32,0
Richtenberg 3/65	3210,0	44,8	9,2	78,3	42,7	14,0	35,6
Richtenberg 3/65	4320,0	60,7	12,9	107,6	59,8	14,1	47,8
Rostock 1/68	4712,0	71,3	19,9	111,2	60,0	15,1	53,2
Roxförde 2/62	1840,0	26,4	3,3	46,0	22,9	14,3	23,1
Rügen 2/67	2975,8	43,9	10,5	75,5	42,1	14,8	33,4
Rügen 2/67	4293,3	61,2	13,0	99,8	51,6	14,3	48,2
Rügen 4/64	3188,0	49,5	13,7	80,2	44,4	15,5	35,8
Sagard 1/70	1518,5	26,3				17,4	
Sagard 1/70	2257,0	30,0	4,6	56,0	30,7	13,3	25,3
Salzwedel 2/64	3339,0	55,1				16,5	
Salzwedel 2/64	3341,0	58,2				17,4	
Salzwedel 2/64	3425,0	60,5				17,7	
Schadewalde 2/75	1354,0	19,8	3,7	31,5	15,4	14,6	16,1
Schwerin 1/87	7086,0	111,4	15,3	172,2	76,1	15,7	96,1
Stavenhagen 1/76	4972,0	80,6	27,6	119,1	66,11	16,2	53,0
Vellahn 1/78	5347,8	86,7	20,9	124,9	59,1	16,2	65,8
Vellahn 1/78	5637,8	85,9	16,6	132,4	63,1	15,2	69,3
Wesenberg 1/72	4991,4	72,6	12,8	118,7	58,9	14,6	59,8
Zehdenik 2/75	5043,0	74,4	11,9	121,6	59,2	14,7	62,4
Zollchow 1/71	3670,0	50,5	6,8	87,3	46,7	13,8	43,7
Zootzen 1/75	4993,0	69,7	7,6	119,6	57,5	14,0	62,1

Tab. 6: Spannungsbeträge von S_h und S_v im Subsalinar sowie S_h -Gradienten und Porendrücke P_0 der ausgewerteten Bohrungen im Ostteil des ND-Beckens.

Methoden

9.1 Auswertung der minimalen horizontalen Hauptspannung

Der Betrag der minimalen Horizontalspannung kann mit verschiedenen Methoden gemessen, bzw. abgeschätzt werden. Häufig wird die Methode des Hydraulic-Fracturing eingesetzt, bei der das Gebirge unter definierten Randbedingungen bis zum Bruch belastet wird. Bei Tiefbohrungen wurde das Gebirge bei Druckstabilitätsprüfungen (Leak-off Tests) ebenfalls bis zum Bruch belastet, wobei die Versuchsdurchführung meist einfacher und das getestete Intervall oft länger ist. Aus bohrtechnischen Gründen wird bei Tiefbohrungen häufig die Spülung beschwert, hierbei wird das Gebirge ebenfalls häufig bis zum Bruch belastet. Bei Kenntnis der hydraulischen Randbedingungen kann hieraus ebenfalls der Betrag der minimalen horizontalen Hauptspannung abgeschätzt werden.

9.1.1 Hydraulic-Fracturing

Als Beispiel soll hier die Bohrung PES 233/82 dienen. In der Bohrung PES 233/82 wurden 3 Hydraulic-Fracturing-Versuche durchgeführt. Ein Test fand in der Nordhausenfolge des unteren Buntsandsteines statt. Somit ergibt sich die Möglichkeit die Ergebnisse der Spannungsinterpretation aus Spülungsverlusten mit den Ergebnissen der Hydraulic-Fracturing-Versuche zu vergleichen.

Die Versuchsteufe ist mit 2560,0 bis 2578,0 m angegeben. Es ist beschrieben, dass die Druckabfallkurven hinsichtlich ihrer Herkunft nicht exakt zu deuten sind. Aus diesem Grunde wurde bei diesen Daten kein Frac-Gradient mit angegeben. Dennoch kann aus den Daten eine Eingrenzung des Betrages der kleinsten Horizontalspannung vorgenommen werden. Der Spülungsdruck im Testintervall ist mit 28,6 MPa (291,2 at) angegeben. Insgesamt wurden 6 Druckstufen durchgeführt. Während der ersten Druckstufe, mit maximal 34,7 MPa, wurde kein Druckabfall registriert. Der Aufbrechdruck betrug 20 MPa und wurde erst während der 4. Druckstufe erreicht. In der 3. Druckstufe betrug der Druck vor dem Aufbrechen der Formation maximal 42,9 MPa (437,7 at). Bei einem Verpressdruck von 15 MPa wurden, bei einer Verpressrate von 0,5 m³/min, 2,5 m³ Spülung verpresst. Weil beim Hydraulic-Fracturing der Verpressdruck über dem Shut-in Druck liegt, ergibt sich hieraus, dass die kleinste Horizontalspannung unter 43,6 MPa liegt (Spülungsdruck = 28,6 MPa + Verpressdruck

= 15 MPa). Die hydraulische Zugfestigkeit kann für das Bohrlochintervall von 18 m möglicherweise nicht vernachlässigt werden. Da bei einem Druck von 20 MPa die Formation aufgebrochen wurde und bei einem Druck von 15 MPa die Spülung verpresst werden konnte, ergibt sich, dass die hydraulische Zugfestigkeit maximal 5,0 MPa betragen kann. Aus dieser Betrachtung kann die Untergrenze der kleinsten Horizontalspannung abgeleitet werden. Bei einem Druck von 42,9 MPa während der dritten Druckstufe ging noch keine Spülung verloren. Da die hydraulische Zugfestigkeit maximal 5,0 MPa betragen kann, ergibt sich, dass die kleinste horizontale Hauptspannung über 37,9 MPa liegen muß. Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, dass die kleinste horizontale Hauptspannung über 37,9 MPa und unter 43,6 MPa liegen muß. Der Gradient für die kleinste Horizontalspannung ergibt sich dementsprechend zwischen 14,8 bis 17,0 MPa/km.

Die Vertikalspannung ist nicht genau bekannt, weil das genaue Bohrprofil nicht vorliegt. Mit einigen Annahmen kann sie aber recht gut abgeschätzt werden. Es ist bekannt, dass die Hydraulic-Fracturing-Versuche in der 2560 m in der Nordhausenfolge durchgeführt wurden. In der Bohrung Salzwedel 2/64 reicht die Nordhausenfolge von 2525 bis 2724 m. Für die Berechnung der Vertikalspannung wurde das Schichtenprofil der naheliegenden Bohrung Salzwedel 2/64 zu Grunde gelegt. Für eine Teufe von 2560 m errechnet sich die Vertikalspannung zu 58,6 MPa (22,9 MPa/km). Der Porendruck soll ebenfalls von der Bohrung Salzwedel 2/64 übernommen werden. In einer Teufe von 2320 m wurde der Porendruck mit 25,3 MPa bestimmt. Die Dichte des Salzwassers im Testhorizont wurde mit $1,224 \text{ g/cm}^3$ bestimmt, so dass sich für eine Teufe von 2560 m ein Porendruck von 28,3 MPa errechnet. Die effektive Vertikalspannung ergibt sich für eine Teufe von 2560 m zu 30,3 MPa und die effektive kleinste Horizontalspannung zu 9,6 bis 15,3 MPa.

9.1.2 Druckstabilitätsprüfungen

Bei Druckstabilitätsprüfungen (Leak-off-Tests) wird wie beim Hydraulic-Fracturing-Versuch ein Bohrlochabschnitt mit Druck beaufschlagt. Hierbei kann der Druck gesteigert werden bis die Formation bricht. In diesem Fall kommt es zu einem Druckabfall mit Spülungsverlusten. Bei diesen Versuchen weit werden meist größere Spülmengen ins Gebirge verpresst, so dass sich ein entsprechender Riß ins Gebirge ausbreiten kann. In diesem Fall entspricht der Injektionsdruck etwa der kleinsten Hauptnormalspannung bzw. der Injektionsdruck ist etwas höher. Die Druckstabilitätsprüfungen wurden in der Regel nach dem Absetzen einer Verrohrung

in einem mehr oder weniger langen offenen Bohrlochabschnitt unter dem Rohrschuh ausgeführt werden (Leak-off-Test). In diesem Fall kann der Versuch ohne Packer ausgeführt werden. Gelegentlich wurden aber auch Versuche mit einem (Single-) Packer ausgeführt. In diesen Fällen wurde der Bohrlochabschnitt unter dem Packer getestet, um Hinweise auf die Druckstabilität der erbohrten Schichten zu erhalten. Dieses Vorgehen wurde insbesondere dann gewählt, wenn beispielsweise aus technischen Gründen ein Teil des Buntsandstein und des Zechsteins zusammen aufgeschlossen werden mußten. Ergaben sich aus den Druckstabilitätsprüfungen hohe Druckgradienten, dann bestand zumindest die Möglichkeit, den Zechstein ohne zusätzliche Verrohrung am Top des Zechsteins aufzuschließen.

Beispiel Mirow 1/74

Die Bohrung Mirow 1/74 erreichte eine Endteufe von 8008,6 m und war zeitweilig die tiefste Bohrung Europas (HOTH et al. 1993). Der Buntsandstein reicht in dieser Bohrung von 3303 m bis in eine Teufe von 4570 m. In der Bohrung Mirow 1/74 traten gelegentlich Spülungsverluste ein, die auf den Betrag von S_h ausgewertet werden können. Zusätzlich wurde in der Vorbereitung für die Zementation der 13^{3/8}"-Verrohrung eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um die Druckstabilität des offenen Bohrloch zu testen. Im technischen Bericht VD b5 BT-T 33/76 sind hierzu ausführliche Angaben gemacht:

Teufenbereich von 652 m – 3972 (444,5 mm-Profil): "Zur Realisierung dieser Maßnahme wurde die Bohrung nach Durchteufen des Rötsalzes bei Teufe 3720 m von 444,5 mm auf 311 mm Durchmesser abgesetzt, so dass der vorhandene Packer, der für einen Durchmesser des offenen Bohrloches von max. 320 mm geeignet war, eingesetzt werden konnte, und anschließend die Bohrung im 311 mm-Profil bis 3972,6 m weiterverteuft wurde". Das Abdrücken brachte folgende Ergebnisse :

Bohrlochteufe [m]	Packerteufe [m]	max. Kopfdruck [bar]	nachgewiesene Druckstabilität [MPa/km]
3760	3728	90-95	16,9
3860	3886	110	17,0
3931	3904	160	18,2

Im Bericht ist erwähnt, dass bei den angegebenen Kopfdrücken die Packerganitur umläufig wurde. Es ist anzunehmen, dass bei diesen Kopfdrücken die Formation

aufgebrochen wurde und so zur Umläufigkeit beitrug. Dies ergibt sich aus dem Vergleich mit Spülungsverlusten, die später auftraten.

9.1.3 Spülungsverluste

Bei Bohrungen in Lockergesteinen treten Spülungsverluste häufig auf. Bei Bohrungen in Festgesteinen sind Spülungsverluste in Karstbereichen (Kalk, Gips) ein häufig großes Problem. In stark geklüfteten, oberflächennahen Bohrungen können ebenfalls Spülungsverluste auftreten.

Weite, offene Klüfte in großen Tiefen sind aus seismisch aktiven Breichen bekannt (Soultz-sous-Forets). Normalerweise sollten in größeren Tiefen offene Klüfte durch die auf sie wirkende Normalspannung zusammengedrückt und geschlossen werden. Wird mit niedrigen Spülgewichten gebohrt, so stellen Spülungsverluste in größeren Tiefen in der Regel kein Problem dar. Aus bohrtechnischen Gründen ist es aber häufig nötig, höhere Spülgewichte zu verwenden. Mit zunehmenden Spülgewicht wächst hierbei die Gefahr von Spülungsverlusten. Hierbei können zwei verschiedene Mechanismen unterschieden werden.

(i) Ist der Druck der Spülungssäule höher als der Porendruck, so infiltriert ein Teil der Bohrspülung in die stärker permeablen Formationen. In diesem Fall kann sich in den permeablen Bereichen der Bohrlochwand ein Filterkuchen ausbilden und eine Schädigung der Formation ist möglich. Aus diesem Grunde wird angestrebt, das Spülgewicht beim Bohren niedrig zu halten.

(ii) Bei Druckstabilitätsprüfungen wird der Druck gesteigert bis die Formation bricht. In diesem Fall kommt es zu einem Druckabfall mit Spülungsverlusten. Wird aus technischen Gründen die Spüldichte erhöht, so wird auch der Druck auf die Bohrlochwand erhöht. Wird die Druckstabilität überschritten, so kommt es zum Bruch der Formation, sie wird unabsichtlich gefract. Dies ist der Fall, wenn die der Spüldruck im Bohrloch den Betrag der minimalen Horizontalspannung (bzw. die minimale Tangentialspannung an der Bohrlochwand) übersteigt. War ursprünglich noch eine Zugfestigkeit im erbohrten Gebirgsbereich vorhanden, dann kann es zu massiven Spülungsverlusten kommen.

Kommt es zum Frac der Formation, so können die Spülungsverluste schlagartig auftreten, während bei einer stark permeablen Formation die Spülungsverluste erst allmählich auftreten, bevor sie ihr Maximum erreichen. Durch den Aufbau eines Filterkuchens sollten die Verluste danach wieder sinken.

Beim Frac der Formation können, ohne Reduzierung des Spülgewichtes, die

Verluste sehr lange anhalten.

Die Unterscheidung ob ein Spülungsverlust durch einen Frac der Formation oder durch Invasion in permeable Bereiche erfolgt, ist gelegentlich schwierig. In vielen Fällen kann die Ursache allerdings festgestellt werden.

In Bohrungen, die einen hohen Gradienten der minimalen horizontalen Hauptspannung besitzen (z. B. tonige Abschnitte, Salinarabfolgen), kommt es auch bei relativ hohen Spüldichten nicht zu Spülungsverlusten. Die Spülungsverluste treten insbesondere dort auf, wo der Gradient der minimalen Horizontalspannung niedrig und die Spüldichte relativ hoch ist. Aus diesem Grunde sind die Werte, die aus den Spülungsverlusten abgeleitet werden, als die Untergrenze der minimalen Horizontalspannung anzunehmen. In den Bereichen, in denen keine Spülungsverluste auftreten, kann der Betrag der minimalen Horizontalspannung höher liegen, eventuell sogar deutlich höher.

Die Bereiche einer Bohrung, in denen die Spülungsverluste auftreten, können insbesondere in Gegenden mit einer Neigung zur Abschiebungstektonik, als die Abschnitte mit den größten Differenzspannungen eingeschätzt werden. In diesen Bohrungsabschnitten sind (rezente) tektonische Bewegungen bevorzugt möglich.

Beispiel Rostock R 1/68

In der Solling-Folge wurden Nutzporositäten von 17,5 % bis 26,9 % ermittelt. Bei 4 Kabeltests im Teufenbereich von 1463,5 m bis 1467,5 m wurden Permeabilitäten von 20 md bis über 1000 md gemessen. Der Schichtdruck betrug 161 atm (11,0 MPa/km). Trotz der hohen Porosität und Permeabilität traten in diesem Abschnitt keine Spülungsverluste auf. Im unteren Buntsandstein (in der Bernburg- und in der Nordhausen-Folge) traten hingegen Spülungsverluste auf.

Der Rohrschuh der 8^{5/8}''-Verrohrung befindet sich bei 4058 m. In den oberen 400 m des Rotliegend beträgt die Permeabilität 0,1 md – 1 md und im unteren Profilabschnitt im Rotliegend nur 0,01 md. Trotz dieser niedrigen Permeabilität traten bei einer Dichte der Gipsspülung von $\gamma = 1,39 \text{ g/cm}^3$ Spülungsverluste von 25 m³ in der Havelfolge auf. Für die Bohrung Rostock R1/68 sind keine Maßnahmen zur Spülungsverlustbekämpfung beschrieben. Zur Spülungsverlustbekämpfung wurden üblicherweise Druckzementationen durchgeführt, Sägemehl, Glimmer (u. a. Stoffe) wurden zugesetzt, oder das Spülgewicht wurde erniedrigt.

Die Erniedrigung des Spülgewichtes führt häufig zur Beendigung der Spülungsverluste. Wegen möglicher Laugen- oder Gaszuflüssen in höheren

Abschnitten der Bohrung kann das Spülgewicht aber nicht immer reduziert werden.

Beispiel Bohrung Schwerin 1/87

In der Bohrung Schwerin 1/87+1a/89 traten Spülgewichtsverluste von 7086 m bis 7228,2 m bei einer Spülgewichtsdichte von $1,45 \text{ g/cm}^3$ auf. Bei einer Spülgewichtsdichte von $1,54 \text{ g/cm}^3$ trat bei einer Teufe von 7117,6 m ein totaler Spülgewichtsverlust von 30 m^3 auf. Auch bei einer Reduzierung der Spülgewichtsdichte auf $1,50 \text{ g/cm}^3$ trat bei 7150,7 m noch totaler Spülgewichtsverlust auf. Bei 7178,8 m sind noch teilweise Spülgewichtsverluste verzeichnet, als die Spülgewichtsdichte auf $1,45$ bis $1,47 \text{ g/cm}^3$ abgesenkt wurde. Durch den Einsatz einer Zentrifuge wurde die Dichte der Umlaufspülung auf $1,40 \text{ g/cm}^3$ gesenkt, danach traten bei dieser Dichte keine Spülgewichtsverluste mehr auf. Beim Kernen in einer Teufe von 7234,2 m kam es bei einer Spülgewichtsdichte von $1,45$ bis $1,46 \text{ g/cm}^3$ erneut zu Spülgewichtsverlusten. Dies zeigt, dass bereits eine geringfügige Erhöhung der Spülgewichtsdichte zu erneuten Spülgewichtsverlusten (durch Frac der Formation) führen kann.

9.1.4 Abschätzung der Druckverluste beim Bohren

Der dynamische Spülgewichtsdruck, der im Meißelbereich auf die Bohrlochwand wirkt, kann auf Grund der Bohrstrangkongfiguration, der Ringraumgeometrie und der Spülgewichtsparameter berechnet werden. Für viele ältere Bohrungen fehlen aber in der Regel ein Teil der Angaben, so dass die Berechnungen nicht durchgeführt werden können. Die Druckverluste müssen aus diesem Grunde für viele Bohrungen aus empirischen Daten abgeleitet werden. Hierzu eignen sich eine Reihe von Bohrungen, in denen hydraulische Test und Manometeraufzeichnungen vorliegen.

Im Bericht zur Technologie zur Zementation der $6^{5/8}$ "-Verrohrung ERT Loissin 1/70 ist für die Zementation bei 4600 m angegeben, dass der maximale Arbeitsdruck dem Zirkulationsdruck beim Spülen der RT (Rohrtour) nach erfolgtem Rohreinbau entspricht. Die dynamischen Drücke betragen ca. $70 - 80 \text{ kp/cm}^2$ (diese Werte entsprechen den Drücken bei durchgeführten Pumpversuchen). Weiter ist vermerkt, dass eine genaue Berechnung der Druckverluste auf Grund der z.Z. bekannten Bohrlochverhältnisse nicht möglich ist. Die bekannten Berechnungsmethoden weisen enorme Abweichungen zur Praxis auf. Aus diesen Angaben ergeben sich für die Spülgewichtsdruckverlustgradienten von $15,2$ bis $17,4 \text{ bar/km}$ bzw. $1,52 - 1,74 \text{ MPa/km}$.

Beispiel Mirow 1/74

In den technischen Berichten der Bohrung Mirow 1/74 sind wichtige Aufzeichnungen über Tiefenmanometermessungen beim Bohren aufgelistet. Die Messungen wurden in einer Teufe von 4530 m durchgeführt. Die Spüldichte betrug hierbei $1,85 \text{ g/cm}^3$. Der statische Druck am Manometer ist mit 845 bar angegeben und die Druckschwankungen beim Einbauen des Gestänges betragen 40 bis 47 bar. Bei einer Zirkulationsrate von 14 l/s beträgt der Druck am Manometer 867 bar und bei einer Pumprate von 21 l/s beträgt der Druck am Manometer 897 bar. Verglichen mit den 845 bar des statischen Spüldrucks bedeutet dies, dass bei einer Pumprate von 14 l/s der zusätzliche Druck auf die Bohrlochwand beim Bohren an der Sohle 22 bar beträgt und bei einer Pumprate von 21 l/s sich der zusätzliche Druck auf 47 bar erhöht und somit mehr als verdoppelt. In der Zusammenstellung des geologisch-technischen Auftrags war für den Unteren Buntsandstein eine Pumprate von max. 40 l/s bei einem Kopfdruck von max. 198 bar vorgesehen. Für eine Teufe von 4530 m ergibt sich für die Tiefenmanometeranzeige bei einer Pumprate von 21 l/s, dass der Druckverlust 47 bar betrug. Dies entspricht einem Gradienten von $10,4 \text{ bar/km}$ oder $1,04 \text{ MPa/km}$.

Bei Teufe 4097 m (Volpriehausen-Folge) wurde ein Spülingsverlust von 7 m^3 bemerkt. Sofort nach dem eingetretenen Verlust wurde mit reduzierter Pumpenleistung gefahren. Die Spüldichte betrug zu diesem Zeitpunkt $1,43 \text{ g/cm}^3$. Ein danach durchgeführtes Abdrücken mit 90 bar (entspricht einem Gradienten von $1,65 \text{ kp/cm}^2$) führte zu einem Verlust. Aus diesen Angaben errechnet sich ein maximaler Druck von $66,5 \text{ MPa}$ auf die Bohrlochwand. Hieraus ergeben sich folgende wichtige Hinweise:

- (i) der Druckgradient beträgt in einer Teufe von 4097 m etwa $16,2 \text{ MPa/km}$,
- (ii) der dynamische Spüldruck beim Bohren, der im Bereich der Bohrlochsohle auf die Bohrlochwand gewirkt hat, dürfte bei 90 bar gelegen haben.
- (iii) der dynamische Druckverlust beim Bohren beträgt etwa $2,2 \text{ MPa/km}$.

In einer weiteren Bohrung wurden ebenfalls Manometermessungen durchgeführt. In einer Teufe von 3750 m wurde hier eine Differenz zwischen statischem Spüldruck und dynamischen Spüldruck von 33 bar registriert. Hieraus ergibt sich ein Spüldruckverlustgradient von $0,88 \text{ MPa/km}$.

Die jeweilige Situation ist stark von den Spülingparametern (v.a. der Viskosität, den Pumpraten, der Verrohrungssituation) und vielen anderen Parametern abhängig. Wenn keine genaueren Werte vorhanden sind, dann kann in erster Näherung mit einem Druckverlust im Ringraum von etwa $1,5 \text{ MPa/km}$ ausgegangen werden.

9.2 Details zu den Literaturangaben von S_h im Suprasalinar

Aus den Angaben zum Spannungszustand aus Hydraulic-Fracturing Daten bei RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982), KNOLL (1979) und ROTH et al. (1998) läßt sich folgern, dass zumindest bereichsweise vertikale Fracs erzeugt wurden, die auf die Richtung von S_H schließen lassen. Da sich die Fracs bevorzugt normal zur kleinsten Hauptnormalspannung öffnen, kann aus den entsprechenden Messungen gefolgert werden, dass die kleinste Hauptnormalspannung σ_3 eine horizontale Komponente aufweist. In einigen Bohrungen wurden aber auch nicht-vertikale Fracs beobachtet. Als Beispiel für die Bewertung der Ergebnisse von Spannungsmessungen wird hier die Bohrung Eschersberg ausgewählt. In der Bohrung Eschersberg z. B. waren 2 der 5 Fracs nicht vertikal. Getestet wurden hier triassische Sand- und Tonsteine in einer Tiefe von 22 m bis 118 m Tiefe. Der maximale Betrag von S_h wird mit 3,0 MPa angegeben. Wurde dieser ein der maximalen Tiefe von 118 m gemessen, dann ergibt sich ein Gradient von 25,4 MPa/km. Wurde der Wert in geringere Tiefe ermittelt würde sich der Gradient noch erhöhen. Der Gradient von S_h dürfte mit minimal 25,4 MPa/km im Bereich des Vertikalspannungsgradienten liegen (Die mittlere Gesteinsdichte ist mit $2,5 \text{ g/cm}^3$ angegeben). Falls beide Gradienten gleich groß sind, so ist zu erwarten, dass sich der Frac nach der Zugfestigkeit der Gesteine richtet. In der Schichtebene dürfte sich der Frac am leichtesten ausbreiten. Insgesamt deutet der Befund mit 2 der 5 Fracs in nicht-vertikaler Orientierung darauf hin, dass die kleinste Horizontalspannungskomponente und die Vertikalspannungskomponente betragsmäßig sehr ähnlich oder nahezu gleich sind.

9.3 Erläuterungen zum Spannungszustand im Salinar

In der Forschungsbohrung E Schwaan 1b/76 fanden massive Laugenzuflüsse beim Abteufen der Bohrung statt. Erste Laugenzuflüsse traten in die Bohrung nach Durchteufen des A3-Horizontes von 3444,5 m bis 3452,5 m Teufe auf.

Die Dichte der Lauge ist mit $1,43 - 1,47 \text{ g/cm}^3$ angegeben. Wegen Instabilitäten des Bohrloches im höheren Zechstein (T5, T4) mußte die Bohrung bei 3455 m eingestellt werden. Die 2. Ablenkung (Schwaan 1b) erschloß den Laugenträger nochmals (Angegeben: "wahre Spüldichte max. $2,32 \text{ g/cm}^3$ "). Hierbei trat trotz der höheren Spüldichte wieder ein Zufluß auf.

Am 8.12.1976 wurde in der Bohrung Schwaan 1b eine Zirkulation unter Gegendruck durchgeführt. Dabei wurde folgendes festgestellt:

$35 \text{ kp/cm}^2 = \text{Gleichgewicht}$

$30 \text{ kp/cm}^2 = \text{Pegelanstieg (Zufluß)}$

$40 \text{ kp/cm}^2 = \text{Pegelabnahme (Verpressen bzw. Verlust).}$

Das Spülgewicht am 8.12.1976 wurde nicht bestimmt. Am Tage zuvor wurde mit einer Spüldichte von $2,17$ bis $2,22 \text{ g/cm}^3$ gebohrt. Es ist anzunehmen, dass diese Spülung zu dem folgenden Druckaufbautest verwendet wurde.

Für die Bestimmung der Druckverhältnisse wird eine mittlere Spüldichte von $2,20 \text{ g/cm}^3$ zugrunde gelegt.

Der Zuflussbereich wird mit $3426 \text{ m} - 3446 \text{ m}$ angegeben. Für die Teufe von 3426 m ergeben sich für das Gleichgewicht ein Druck von $77,44 \text{ MPa}$ und ein Druckgradient von $22,60 \text{ MPa/km}$.

Für einen Kopfdruck von 30 bar (Zufluss) ergibt sich ein Druck von $76,94 \text{ MPa}$ und ein Druckgradient von $22,46 \text{ MPa/km}$ und unter Verlustbedingungen ergibt sich ein Druck von $77,94 \text{ MPa}$ und ein Druckgradient von $22,75 \text{ MPa/km}$.

“Da ein stabiles Gleichgewicht im Bohrloch unter den komplizierten Bedingungen nicht möglich ist, traten in kurzen Zeitabständen sowohl Zuflüsse als auch Verluste auf”.

Der Porendruckgradient von $22,60 \text{ MPa/km}$ entspricht nahezu dem Vertikalspannungsgradienten. Aus diesem Befund ergibt sich, dass die effektive Vertikalspannung nahezu zu vernachlässigen ist. Wenn aber S_V' fast gegen Null geht, dann gilt dies auch für S_H' und S_H' .

In der Bohrung Feldberg 1/87 wurde mit hohen Spüldichten gebohrt, so dass der Gradient der kleinsten Horizontalspannung über 20 MPa/km im Zechstein liegt. Bei einer ganzen Reihe von Bohrungen wurden am Top des Zechstein bereits sehr hohe Spülungsverluste verzeichnet, so dass direkt am Top des Zechsteins der Gradient der kleinsten Horizontalspannung etwa dem Gradienten der Vertikalspannung entspricht.

In der Bohrung Feldberg 1/87 kam es bei $4290,6 \text{ m}$ zu einem starken Spülungsverlust, wobei der Verlusthorizont an der Basis des Zechsteins nur $2,9 \text{ m}$ über dem Top des Rotliegend lag. Der Gradient der kleinsten Horizontalspannung kann hier auf knapp 19 MPa/km abgeschätzt werden. Auch bei einer Reihe von weiteren Bohrungen kam es direkt an der Zechsteinbasis zu starken Spülungsverlusten. Der Übergang vom

druckstarken Zechstein (hohe Horizontalspannungen) zum druckschwachen Rotliegend (niedrige Horizontalspannungen) erfolgt innerhalb von nur wenigen Metern.

Zur Charakterisierung der Spannungsverhältnisse ist ein in der Bohrung PES 233/82 durchgeführter Hydrofrac-Tests von Bedeutung. Dieser ermöglicht es, die Ergebnisse der Spannungsinterpretation aus Spülgewichten direkt mit den Ergebnissen von Hydraulic Fracturing Messungen zu vergleichen.

Der Werra-Anhydrit wurde in zwei Versuchen getestet, wobei nur der zweite Versuch auswertbar war. Im Teufenbereich von 3262,0 bis 3271,0 m wurden die Fracversuche bei einer Spüldichte von $1,52 \text{ g/cm}^3$ durchgeführt. Der Spülungsdruck beim Einbau ist mit 505 at angegeben. Der höchste Druck, der bei der 3. Druckstufe gefahren wurde, beträgt 81,6 MPa (831,3 at). Es ist beschrieben, dass bei dieser Druckstufe das Aufreißen der Formation anhand des Druckabfalls erkennbar war. Dies läßt auf die gelungene Durchführung des Versuches und brauchbare Druckwerte schließen. Bei 33 MPa Injektionsdruck (85,2 MPa Downhole) wurden 2 m^3 Spülung verpresst. Die Druckabfallmessung, die durchgeführt wurde, ergab einen Druckabfall von 81,5 MPa (830,8 at) auf 79,9 MPa nach einer halben Stunde. Der Verlauf der Druckkurve ist nicht bekannt, aber der Wert von 79,9 MPa dürfte nur geringfügig von der kleinsten Horizontalspannung abweichen.

Der Gradient in den Unterlagen wurde mit 2,487 (at/10 m) angegeben. Für eine Teufe von 3262 m und einen Wert von 79,9 MPa für S_h aus der Druckabfallmessung ergibt sich ein Gradient der kleinsten Hauptnormalspannung von 24,5 MPa/km.

Die Berechnung der Vertikalspannung ergibt für eine Teufe von 3260 m einen Wert von 75,4 MPa. Die kleinste horizontale Hauptnormalspannung liegt demnach um etwa 6 % über der errechneten Vertikalspannung. Dies deutet auf einen nahezu lithostatischen Druck im Zechstein bzw. an der Basis des Zechsteins hin. Dass im steifen Anhydrit der Betrag von S_h etwa höher als der Betrag von S_v liegt, ist auch von anderen Messungen im Anhydrit bekannt.

Die Gradienten von über 20 MPa/km bis 24,5 MPa/km im Zechstein zeigen, dass die Unterschiede zwischen dem Betrag der Vertikalspannung und dem Betrag der kleinsten Horizontalspannung nur relativ gering sind.

Aus der Bohrung Feldberg 1/87 ist bekannt, zum Top des Rotliegenden der Gradient der kleinsten Horizontalspannung rasch abnimmt. Die Druckverhältnisse in der Bohrung PES 233/82 im Bereich des Werra-Anhydrits deuten auf einen nahezu lithostatische Spannungszustand hin, dennoch ist eine Anisotropie der

Horizontalspannungen möglich.

In der Bohrung Well 3 wurden im Hauptdolomit (Ca 3) Intensivierungsarbeiten durchgeführt. Hierbei sind in den ABF-Logs sowohl Bohrlochrandausbrüche wie auch vertikale und subvertikale Risse in der Bohrlochwand zu erkennen, die durch die Intensivierung der Bohrung entstanden bzw. erweitert wurden. Die (Sub-) vertikalen Risse, die durch die Fracbehandlung entstanden, deuten darauf hin, dass der Betrag der kleinsten Horizontalspannung unter dem Betrag der Vertikalspannung liegt.

Bohrlochrandausbrüche, die zwischen 1911 m und 1912 m vorhanden sind, sind hier orthogonal zu den technisch induzierten Rissen angeordnet und bestätigen die Richtung der kleinsten horizontalen Hauptspannung. Im Teufenbereich von etwa 1880 m bis 1912 m ergeben sich relativ einheitliche Spannungsrichtungen. Dies bedeutet, dass zumindest in Teilbereichen der Zechsteinbasis (Hauptdolomit) eine Anisotropie der Horizontalspannungen vorhanden ist.

Zitierte und weiterführende Literatur

- BABCOCK, E.A. (1978): Measurement of subsurface fracture from dipmeter logs, Am. Assoc. Petrol. Geologist Bull., **62**: 1111-1126.
- BANKWITZ, P., GROSS, U. & BANKWITZ, E. (1993): Krustendeformation im Bereich der Finne-Kyffhäuser-Gera-Jachimov-Zone.- Z. geol. Wiss., **21** (1/2), Berlin.
- BAUMANN (1982): Spannung und Spannungsumwandlung im Rheinischen Schiefergebirge.- 232 S.- Koblenz (Numismat. Verlag).
- BECKER, A. & PALADINI, S. (1990): In situ-Spannungen in Nord- und Mitteleuropa, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, **10**, 1-63
- BELL, J.S. & GOUGH, D.I. (1979): Northeast-southwest compressive stress in Alberta: evidence from oilwells.-Earth Planet. Sci. Lett., **45**: 475 - 482.
- BLÜMLING, P. FUCHS, K. & SCHNEIDER, T. (1983): Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area.- Phys. of the Earth and Planet. Int., **33**, Elsevier, Amsterdam.
- BORM, G., LEMPP, Ch., NATAU O., and RÖCKEL Th. (1989): Instabilities of borehole and drillcores in crystalline rocks, with examples from the KTB pilot hole.- Scientific Drilling, **1**: 105-114, Springer.

- BRUDY, M. & KJØRHOLT H. (2001): Stress orientation on the Norwegian continental shelf derived from borehole failures observed in high-resolution borehole imaging logs.- *Tectonophysics* **337**, p 65-84, Amsterdam
- COX, J.W. (1970): The high resolution dipmeter reveals dip-related borehole and formation characteristics.- 11th Ann. Logging Symp., Soc. Prof. Well Log Analysis.
- DEZAYES, CH., GENTER A. & VILLEMIN, T. (1996): Fracturation heritee et induite caracterisee a partir d'images acustique et electriques de parois de forages.- *Bull. Centres Rech. Explor.- Prod. Elf Aquitaine*, **20**, 197-212, Pau
- DEYAZES, Ch., VILLEMIN, T., GENTER, A., TRAINEAU, H. & ANGELIER J. 1996): Analysis of fractures in boreholes of the Hot Dry Rock project at Soultz-sou-Forets (Rhine graben, France).- *Scientific Drilling*, **5**, 31-41, Springer.
- ENGESER, B. (1995): Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB, Bohrtechnische Dokumentation.- *KTB-Report* **95-3**, Hannover.
- GROTE, R. (1998): Die rezente horizontale Hauptspannung im Rotliegenden und Oberkarbon in Norddeutschland,- *Erdöl Erdgas Kohle*, **114**, (10) 478-482, Hamburg/Wien (Urban Verlag).
- GRÜNTAL & STROMEYER (1992): The recent stress field in central Europe: trajectories and finite element modeling. *J. Geophys. Res.*, Vol **97**, B 8
- HOTH, K. RÜSBÜLT, J. ZAGORA, K., BEER, H. & HARTMANN, O. (1993): Die Tiefen Bohrungen im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke – Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962-90, Schriftenreihe für Geowissenschaften, Ges. f. Geowissenschaften e.V. Berlin.
- KAPPLER, W., KARKOSSA, H. & JAPP, D. (1974): Erfahrungen und technisch-technologische Probleme beim Aufschluß wechselgelagerter hochdruck- und spülungsverlustgefährdeter Horizonte.- *Zeitschrift für Angewandte Geol.*, **20**, Heft 9.
- KNOLL, P. (1979): Analyse der Gebirgsspannungen in Bergbaurevieren der DDR, Freiburger Forschungshefte C, **349**, 61-73
- KULANDER, B.R., DEAN, S.L. & WARD, B.J. jr. (1990): Fractured core analysis, interpretation, logging, and use of natural and induced fracture in core.- *AAPG Methods in Exploration Series*, 8: Tulsa, Oklahoma
- LEMPP, Ch. & RÖCKEL, Th. (1998): Bericht an die GSF-GmbH, München, über die Ermittlung des Spannungszustandes im Deckgebirge des Assesattels.- Halle/S [unveröff.]

- LEMPP, Ch. & RÖCKEL, Th. (1999a): Untersuchungen von Bohrloch- und Bohrkerninstabilitäten zur Untersuchung des Spannungszustandes in der Erdkruste.- DFG-Bereicht, Halle/S. [unveröff.]
- LEMPP, Ch. & RÖCKEL, Th. (1999b): Bohrloch- und Bohrkern-Instabilitäten als Indikatoren des regionalen Spannungszustandes. Ber. 12. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, 12.-16.4. 1999, Halle/S., 94-104, Fachsektion Ing.- Geol. DGG/DGGT
- LORENTZ, J.C., FINLEY, S.J. & WARPINSKI, N.R. (1990): Significance of coring-induced fractures in Mesaverde core, northwestern Colorado.- AAPG Bulletin, **74**: No 7, 1017 - 1029.
- LOCKNER, D.A. (1995): "Rock Failure".- in: Rock Physics and Phase Relation: A Handbook of Physical Constants.- T. Ahrens (ed.), AGU, Washington D.C., 127-147.
- MUELLER, B., REINECKER, J., HEIDBACH, O. and FUCHS, K. (2000): The 2000 release of the World Stress Map (available online at www.world-stress-map.org)
- NATAU, O., BORM, G. & ROECKEL Th. (1990): Influence of Lithology and Geological Structure on the Stability of the KTB Pilot Hole.- In MAURY, V. & FORMAINTRAUX, D. (eds). Rock at Great Depth, Proc. Int. Symp. ISRM, **3**, 1487 - 1490, Pau, France.
- NETH, G. & DIETRICH H.G. (1983): Entlastungsklüfte in Kristallin-Bohrkernen der Erdwärme-Forschungsbohrung Urach 3, S. 184-199 in: Unveröffentl. Endbericht der Stadtwerke Bad Urach über " Untersuchung der geothermischen Anomalie Urach auf eine mögliche wirtschaftliche Nutzung einschließlich Frac Studien in der erweiterten Forschungsbohrung Urach". Forschungsarbeiten im Rahmen der BMFT-Projekte 03-E-4023 A/BC sowie der EG-Projekte 176-77 EGD und 176-77 EGD Nachtrag NR.1 vom 30.10.83.
- PLENEFISCH, T. & BONJER, K.P. (1997): The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanism and estimation of frictional parameters.- Tectonophysics, **275**, 71-97, Elsevier.
- PILARSKI, I. (1988): Neotektonik S-Teil DDR, Res. Rep.. ZO 06000-7530-1339, Zentralinst. für Phys. der Erde, Potsdam,
- PIETSCH, MATZDORF, HEINRICH & KOEPESELL (1974): Technologie zur Zementation der 6^{5/8} ERT Loissin 1 (I. und II. Sektion).- VEB Bohrlochmessung Gommern, interner Bericht.
- ROECKEL, Th., NATAU, O., DIETRICH H.G. (1992): Core reorientation by comparison of core instabilities and borehole instabilities.- In EMMERMANN, R., DIETRICH, H.G., LAUTERJUNG, J., und WÖHRL, Th., (eds), KTB Hauptbohrung, Results of the

Geoscientific Investigation in the KTB Field Laboratory, 0-6000m, KTB Report **92-2**: F1 - F17.

- RÖCKEL, Th. & LEMPP, CH. (1998): Bohrloch und Bohrkerninstabilitäten als Indikatoren des Spannungszustandes der Erdkruste von Mitteleuropa.- Expanded abstracts in the Proceedings of the ICDP/KTB-Meeting, June 04. And 05, 1998, Ruhr-University of Bochum and Deutsche Forschungsgemeinschaft.
- ROTH, F., BÄSLER, H., WEIGOLD, G., FUCHS, K., PALMER, J. & FLECKENSTEIN, P. (1998): Spannungsmessungen in Osteuropa- Orientierungsdaten aus Nordost-Deutschland, Weißrußland und der Ukraine.- ICDP/KTB-Kolloquium, Wissenschaftliches Programm und Abstracts, Bochum
- ROTH, F. & FLECKENSTEIN, P. (2001): Stress orientation found in north-east Germany differ from the West European trend.- *Terra Nova*, **13**, 289-296.
- RUMMEL, F. & BAUMGÄRTNER, J. (1982): Spannungsmessungen im östlichen Bereich der Süddeutschen Scholle.- Bericht an die BGR 145 S.
- TENZER, H. (1997): Erkundung planarer Diskontinuitäten, Bohrlochrandausbrüchen sowie von Spannungsdaten und hydraulischen Parametern im Gneisgebirge der Vertiefungsbohrung Urach 3.- unveröff. Endbericht, BEO/BMBF 0326938A, CEC JOU2 CT 9-0115, Bad Urach.
- TENZER, H., BUDEUS, P. & SCHNELLSCHMIDT, R. (1992): Fracture analyses in hot dry rock drillholes at Soultz and Urach by borehole televiwer measurements. - *Geothermal Resources Council TRANSACTIONS*, **16**: 317 –321
- TENZER, H., SCHANZ, U. & GENTER A. (1998): Entwicklung und Charakterisierung eines HDR-Wärmetauschers im HDR-Projekt Soultz sous Forets.- 6. Geothermische Fachtagung, Straubing 12.-15.05.1998, Abstracts.
- TISCHNER, T., LEGARTH, B. & HUENGES E. (2002): Stimulationsexperimente in den Rotliegend-Sandsteinen der Bohrung Groß Schönebeck: Ergebnisse zur Hydraulik und Gebirgsmechanik.- Tagungsband der 7. Geothermischen Fachtagung, 06.-08.11.2002 in Waren (Müritz), S. 166-175.
- ZOBACK, M.D. & TOWNEND, J. (2001): Implication of hydrostatic pore pressure and high crustal strength of the deformation of intraplate lithosphere. - *Tectonophysics*, **336**, 19-30, Elsevier.