

Eastman Christensen GmbH

Christensenstraße 1
3100 Celle

Vergleichende Untersuchung bohrtechnischer
und wirtschaftlicher Aspekte unterschiedlicher
Kernbohrverfahren

Dr.-Ing. J. Oppelt

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort.....	57
0. Einführung.....	59
1. Bohrleistungen im Kristallinen aufgrund vorliegender Erfahrungen.....	60
1.1 Ölfeld-Rotary-Kernen.....	60
1.2 Seilkernen (Bergbautechnik).....	64
2. Wirtschaftlichkeit von Rotary- und Seil- kernbohrtechniken bei ausgewählten Bohr- leistungen.....	66
2.1 Rotary-Bohrtechnik bis 3 000 m ET (ITAG V1) - Var 1.....	67
2.1.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag.....	67
2.1.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	68
2.2 Rotary-Bohrtechnik bis 5 000 m ET - Var 2.....	69
2.2.1 Bohrleistungen mit ITAG-Parametern.....	69
2.2.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	70
2.3 Kombination Rotary-Seilkern-Bohrtechnik - Var 3	70
2.3.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag.....	70
2.3.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	70
2.4 Seilkerntechnik - Var 4.....	71
2.4.1 Bohrleistungen nach GW-Vorschlag.....	71
2.4.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen.....	73
3. Technische Bewertung von Bohrverfahren und Bohrgerät.....	73
4. Derzeitige und zukünftig erreichbare Bohr- leistungen imprägnierter Kronen im Kristallin-Gestein.....	78
5. Vergleichsberechnungen auf der Basis eines realistischen Konzeptes für die KTB-Vor- bohrung.....	79
6. Zusammenfassung.....	82

VORWORT

Die Studie wurde durch den Entwicklungsbereich der Eastman Christensen GmbH mit Unterstützung der Verkaufsabteilung für Bergbau-Werkzeuge erstellt. Während der Bearbeitungszeit erfolgte ein kontinuierlicher Erfahrungsaustausch mit der Projektleitung für die Kontinentale Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland (KTB) am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB).

Bereits während der Vorbereitung der Studie, vor dem eigentlichen Bearbeitungszeitraum, erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit den Firmen Microdrill AB, Grabo (Schweden), Gewerkschaft Walter AG, Essen, und Internationale Tiefbohr GmbH & Co KG (ITAG), Celle. Viele der dabei entstandenen detaillierten Informationen sind in die anschließend durchgeführte Studie eingegangen. Sie bilden insofern eine wichtige Grundlage für den Vergleich technischer und wirtschaftlicher Aspekte unterschiedlicher Kernbohrverfahren.

Viele Anregungen, Erfahrungen und Hinweise zahlreicher Mitarbeiter der Eastman Christensen GmbH haben den sachlichen Gehalt der Studie deutlich vermehrt. Informationen zu möglichen Bohrlochmessungen, insbesondere in engen Bohrlöchern, wurden mit Unterstützung entsprechender Service-Firmen zusammengestellt.

Der Gesamtbericht über die Studie gliedert sich in zwei Teile. Im Hauptteil wird das Thema zusammenfassend dargestellt. In einem separaten, umfassenden Anhang finden sich die im Vorfeld der eigentlichen Studie erstellten Beiträge der genannten Bohrfirmen, ausführliche Literaturrecherchen zu zentralen Problemstellungen der Arbeit und weitergehende Informationsunterlagen.

Die vorliegende Zusammenfassung enthält schwerpunktmäßig eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der bis dahin bekannten kernbohrtechnischen Systeme unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten. Gegen Ende der Bearbeitungsdauer der Studie konnten bereits Ansätze für ein optimiertes System zum kontinuierlichen Kernbohren in der Vorbohrung des KTB-Projekts herausgearbeitet werden.

Celle, im März 1988

0. EINFÜHRUNG

Ziel der Studie ist eine vergleichende Betrachtung technischer und wirtschaftlicher Aspekte unterschiedlicher Bohrverfahren zum Abteufen der geplanten KTB-Vorbohrung im Kristallin. Bis zum Erreichen der vorgesehenen Endteufe von 3000 m soll vollständig gekernt werden. In der Studie werden dazu der konventionellen Ölfeld-Rotary-Technik die im Bergbau häufiger eingesetzten Seilkern- und Slimhole-Verfahren gegenübergestellt. Die Studie wurde von Eastman Christensen GmbH (EC) im Auftrag der Projektleitung für die Kontinentale Tiefbohrung (KTB) erstellt. Während der Vorbereitungsphase für die Studie bestand ein enger Informationsaustausch zwischen EC und drei Bohrfirmen, die jeweils für eine Hauptvariante als sachkundig und erfahren gelten. Dies sind:

- (a) ITAG, Celle, für Rotary- und kombinierte Rotary/Seilkern-Verfahren
- (b) Gewerkschaft Walter, Essen, für Bergbau-Seilkernverfahren
- (c) Microdrill, Gräbo (Schweden) für Slimhole/Seilkern-Verfahren.

Aufgrund der inzwischen als unzulänglich angesehenen Maximalwerte von 2350 m ET und 76 mm Bohrlochdurchmesser werden die Vorschläge von Microdrill für Slimhole-Bohrtechnik in diesem Zusammenhang nicht weiter berücksichtigt.

Der vorliegende Bericht umfaßt folgende Punkte:

- (1) Bohrleistungen im Kristallin-Gestein aufgrund vorliegender Erfahrungen
- (2) Wirtschaftlichkeit von Rotary- und Seilkern-Bohrtechniken bei ausgewählten Bohrleistungen
- (3) Einschätzung der derzeit möglichen Bohrleistungen imprägnierter Bohrkronen und realistische Entwicklungsfähigkeit bis zum voraussichtlichen Beginn der Bohrarbeiten.
- (4) Wirtschaftlichkeits-Vergleichsrechnungen auf der Basis eines realistischen Konzepts für die KTB-Vorbohrung

Selbstverständlich bilden die tatsächlich erreichte Bohrgeschwindigkeit und die Standlänge der Bohrkronen wesentliche Kostenfaktoren für die KTB-Vorbohrung.

1. BOHRLEISTUNGEN IM KRISTALLIN AUFGRUND VORLIEGENDER ERFABRUNGEN

In der Studie werden Bohrleistungen imprägnierter Diamantkronen aufgeführt, die im wesentlichen in Bohrungen der NAGRA (Schweiz), bei der Lokationsvorerkundung für die KTB im Schwarzwald und in der Oberpfalz sowie in der Bohrung Urach eingesetzt worden waren. Bohrfortschritt und Standlänge werden für Ölfeld-Rotary-Kernen und Seilkern-Techniken dargestellt.

Bei der Bewertung dieser Leistungsdaten muß grundsätzlich beachtet werden, daß Bohrparameter wie Beschaffenheit des Kristallin-Gesteins, optimale Einstellung der Bohranlage, optimale Anpassung der Bohrwerkzeuge, u.ä. hier nicht berücksichtigt oder nicht zugeordnet wurden.

1.1 Ölfeld-Rotary-Kernen

Kronen 6 7/32" x 3 1/2"

In den Bohrungen Böttstein und Weiach wurden imprägnierte Diamantkronen der Abmessung 6 7/32" x 3 1/2" mit Doppelkernrohren eingesetzt. Die Zusammensetzung der Meißelmatrix bzw. der Diamantsplitter wurden während der Bohrarbeiten verändert. Unterschiedliche Ergebnisse mit verschiedenen Typen sind im vollständigen Bericht der Studie separat dargestellt. Ohne Unterscheidung der Kronentypen erhält man folgende Verteilung des Bohrfortschritts und der Standlänge (insgesamt 73 Bohrkronen):

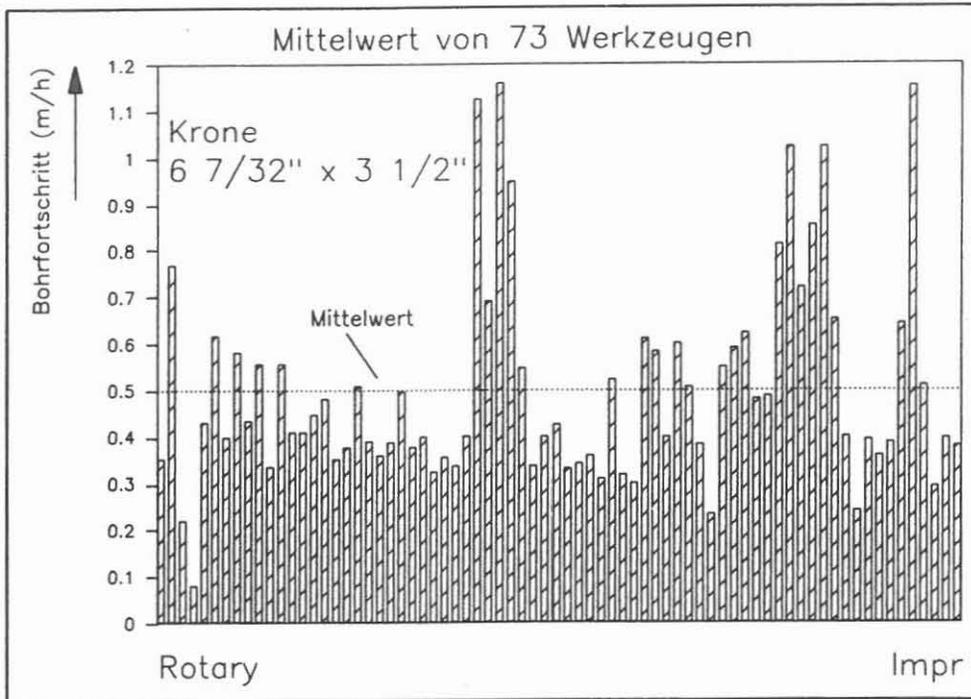


Abb. 1: Bohrfortschritt von 73 imprägnierten Kronen der Größe 6 7/32" x 3 1/2"

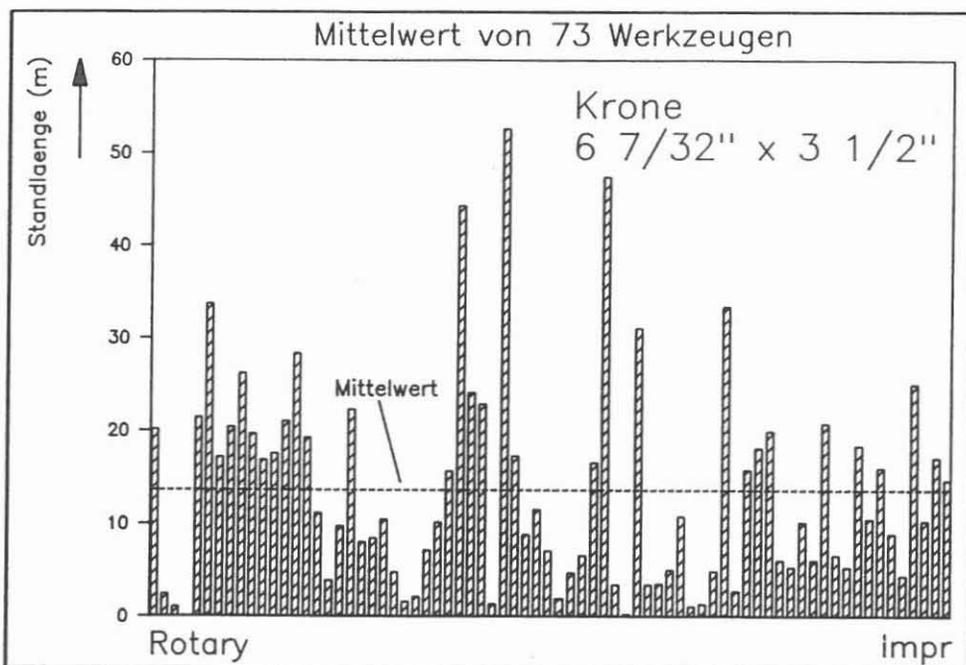


Abb. 2: Standlängen von 73 imprägnierten Kronen der Größe 6 7/32" x 3 1/2"

Der Mittelwert von 0,5 m/h charakterisiert nach Abb. 1 den Bohrfortschritt recht typisch, eine besondere Häufung ist bei 0,4 m/h festzustellen. Die Standlängen streuen nach Abb. 2 sehr stark, so daß der Mittelwert von 13,6 m statistisch zu interpretieren ist.

Kronen 8 1/2" x 4"

Imprägnierte Bohrkronen der Größe 8 1/2" x 4" bohrten in den Bohrungen Schafisheim und Urach mit Mittelwerten von 0,58 m/h (Abb. 3) und 10,9 m (Abb. 4), wobei wieder die Standlänge besonders stark streut. Bei Einsatz eines Untertagedirektantriebs NAVI-DRILL wurden in 3 Einsätzen in Urach Mittelwerte von 1,65 m/h und 21,8 m erreicht. Der Drehzahl des Drehtisches von 45 1/min wurde die Drehzahl des Untertageantriebs von ca. 250 1/min. überlagert, so daß die Bohrkronen mit 295 1/min gedreht wurde.

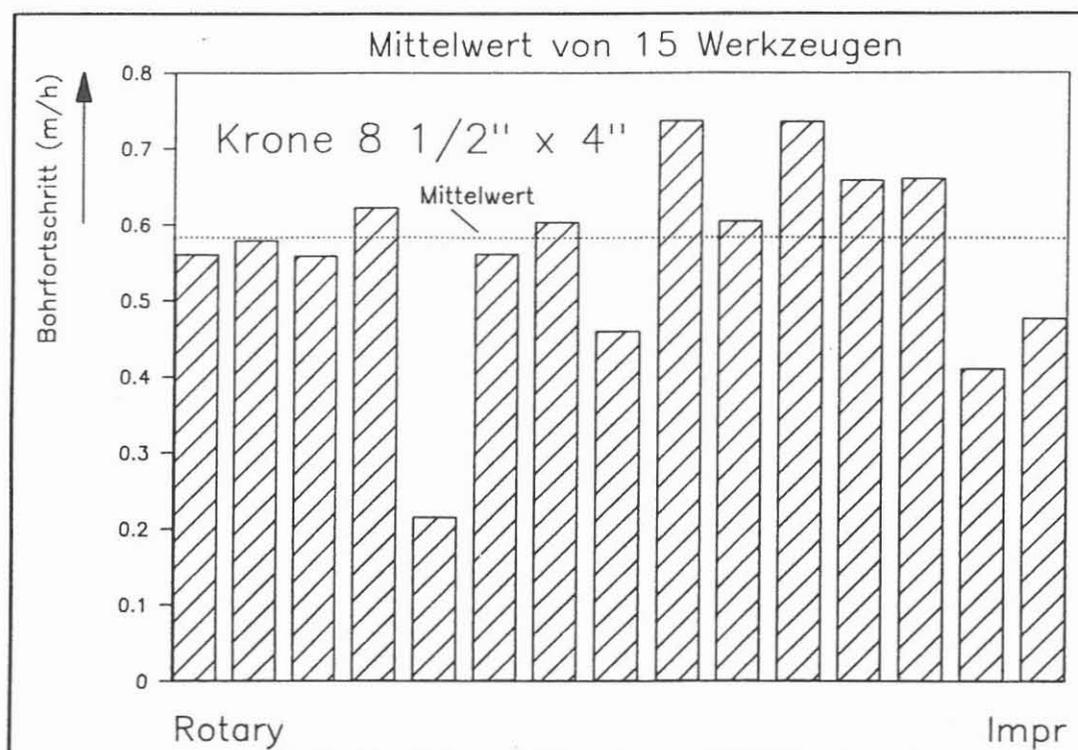


Abb. 3: Bohrfortschritte von 15 imprägnierten Kronen der Größe 8 1/2" x 4"

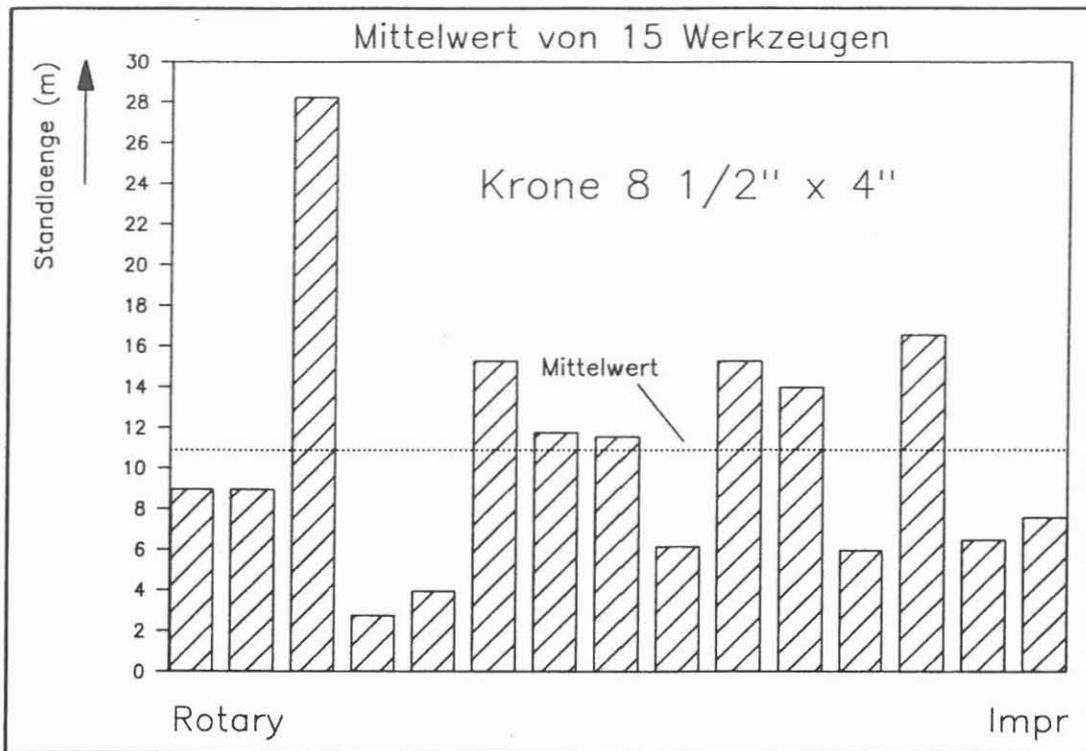


Abb. 4: Standlängen von 15 imprägnierten Kronen der Größe 8 1/2" x 4"

8 1/2" x 4" BallaSet-Werkzeuge

In bestimmten Sektionen der Bohrung Schafisheim wurden Kronen erfolgreich eingesetzt, die mit synthetischen "Geoset" Schneidelementen besetzt waren. Für 6 Werkzeuge konnten durchschnittliche Bohrleistungen von 1,7 m/h und 23,5 m erzielt werden. Diese Leistungen liegen um einen Faktor 2 bis 3 höher als bei imprägnierten Kronen. Der effektive Einsatz der oberflächengesetzten Werkzeuge war hier möglich, weil der Granit/Gneis eine verwitterte, weniger kompakte, Konsistenz aufwies.

Krone 135 x 101 mm

Aus den 5 abgeteufte Flachbohrungen zur Vorerkundung der Lokation Oberpfalz erhält man als Mittelwert der Einsätze mit Diamantwerkzeugen Werte von 1,0 m/h und 25,7 m. Typische Standlängen liegen nach Abb. 5 bei 30 m.

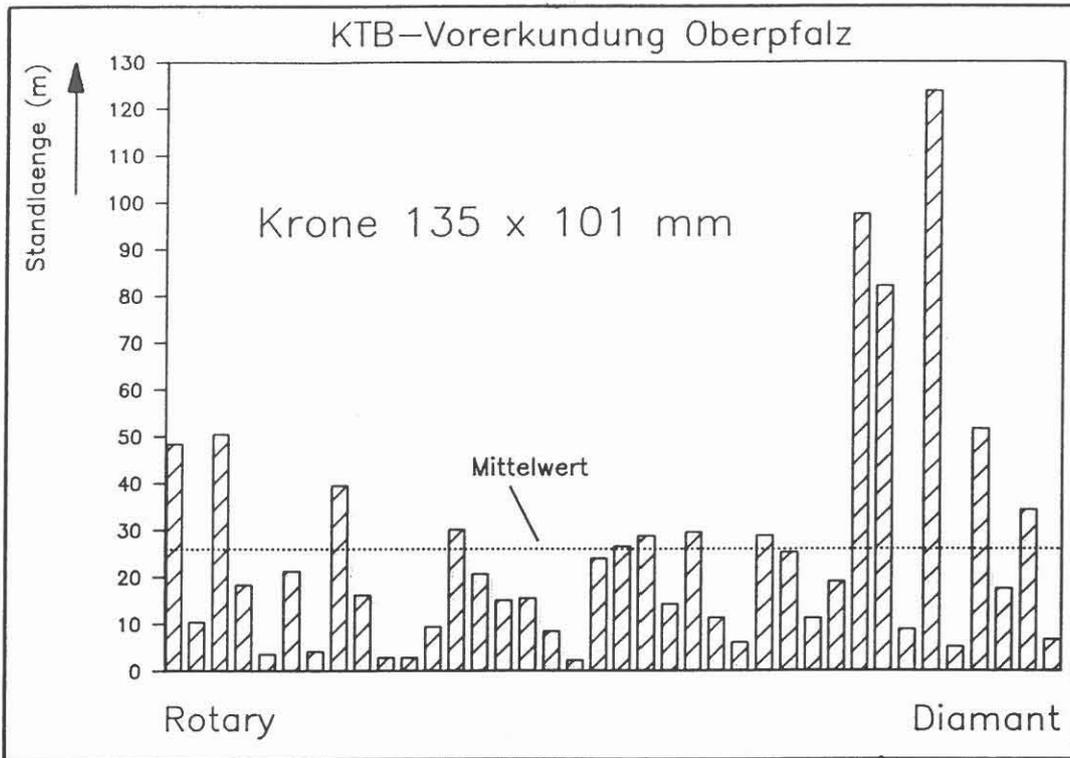


Abb. 5: Standlängen mit Kronen der Größe 135 x 101 mm

1.2 Seilkernen (Bergbautechnik)

System 134 x 85

In den Bohrungen der NAGRA wurde das 134er System mit unterschiedlichen Kronen-Außendurchmessern bis 140 mm erprobt, um die Geometrie von Lippenbreite und Ringraum zu optimieren. Generell muß einer Bewertung der Ergebnisse vorangestellt werden, daß die verwendete Erdöl-Bohranlage nicht die Einstellung optimaler Betriebsparameter zuließ, obwohl bereits bestimmte Modifikationen vorgenommen worden waren. Zusätzliche Probleme ergaben sich aus der Notwendigkeit, orientiert zu kernen. Aus der zusammenfassenden Auswertung der Einsätze von 49 imprägnierten Bohrkronen auf der Bohrung Leuggern erhält man einen mittleren Bohrfortschritt von 1,3 m/h, der nach Abb. 6 allerdings in vielen Fällen auch übertroffen wird. Als Mittelwert der erzielten Standlänge errechnet man 12,7 m, wobei entsprechend Abb. 7 wieder eine besonders starke Streuung der Einzelwerte auftritt.

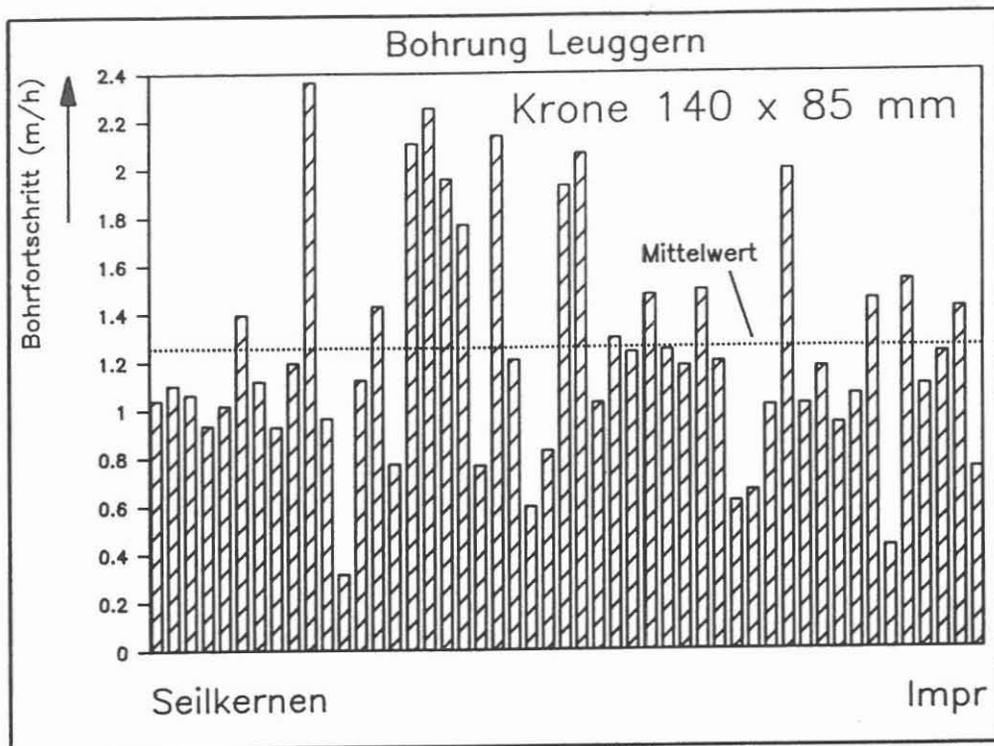


Abb. 6: Bohrfortschritte von 49 imprägnierten Kronen der Nenngröße 134 x 85 mm (OD 134 - 140 mm)

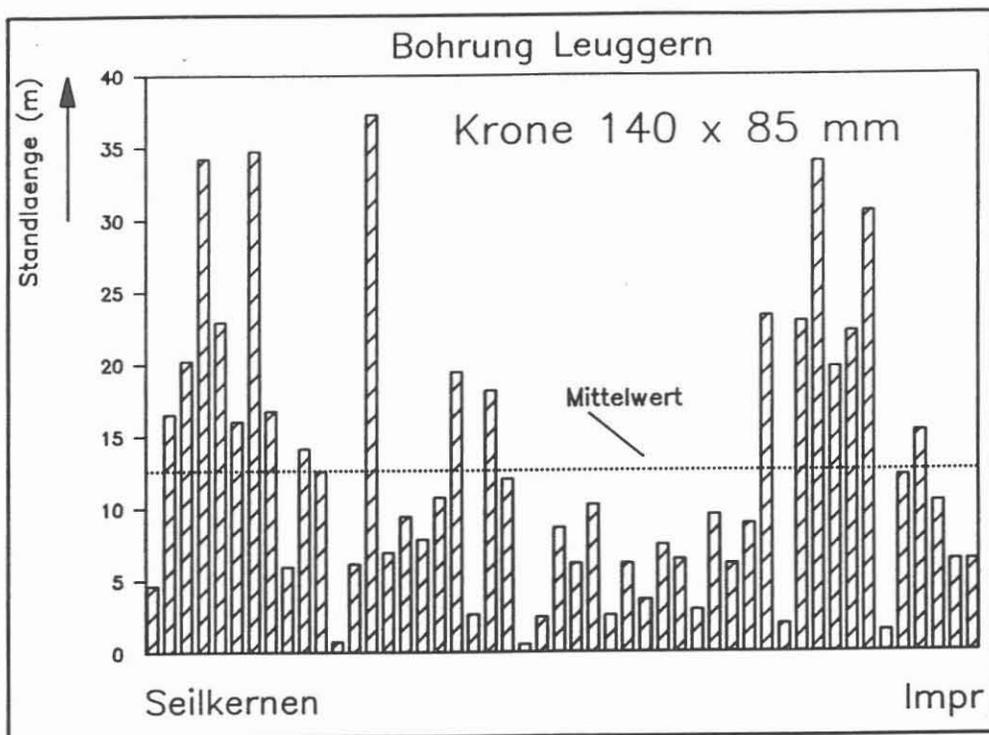


Abb. 7: Standlängen von 49 imprägnierten Kronen der Nenngröße 134 x 85 mm (OD 134 - 140 mm)

Mittelt man die Ergebnisse der drei Bohrungen Leuggern, Schafisheim und Kaisten, so erhält man Werte von ca. 1,2 m/h bzw. 14,2 m.

Kernrohr 122 x 79 mm

Durchschnittliche Bohrleistungen bei Flachbohrungen im Granit/ Gneis zur KTB-Vorerkundung der Lokation Oberpfalz betragen 1,0 m/h und 31 m. Es wurden imprägnierte und gesetzte Diamantwerkzeuge eingesetzt.

2. WIRTSCHAFTLICHKEIT VON ROTARY- UND SEILKERN-BOHRTECHNIKEN BEI AUSGEWÄHLTEN BOHRLEISTUNGEN

Die Berechnung der Kosten wurde für die jeweilige technische Variante zunächst bei der entsprechenden Bohrfirma durchgeführt, mit der im Rahmen der vorbereitenden Arbeiten zur Studie eine Zusammenarbeit bestand. Der Verfasser der Studie hat das verwendete Rechenschema so umgesetzt, daß eine Nachrechnung mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms auf einem Personal Computer möglich ist. Auf diese Weise können die Kalkulationen relativ einfach mit veränderten Ausgangsparametern, z.B. Bohrfortschritt, Anlagenkosten, u.a. nachvollzogen werden.

In der vorliegenden Zusammenfassung wurden vier Varianten miteinander verglichen. Dabei bleibt der eventuell erforderlich werdende Einbau einer Zwischenrohrtour unberücksichtigt. Bis 250 m Teufe wird eine Ankerrohrtour eingebaut, als ET ist 3000 m (zusätzlich 5000 m für Rotary-Technik) vorgesehen.

Var 1 (ITAG V1):	8 1/2" x 4" bis 250 m, 6 3/4" x 3 1/2" bis 3000 m (Ölfeld Rotary-Technik)
Var 2 (ITAG V1):	wie Var 1, jedoch 5000 m ET
Var 3 (ITAG V3):	6 3/4" x 3 1/2" bis 250 m, 134 x 85 mm bis 3000 m (Kombination Rotary/ Seilkern-Technik)
Var 4 (Gewerkschaft Walter V2):	159 x 101 mm bis 250 m, Erweitern auf 8 1/2" bis 250 m, 159 x 101 mm bis 3000 m (Seilkern-Technik)

2.1 Rotary-Bohrtechnik bis 3000 m ET (ITAG V1)

2.1.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag

Für die Variante Var1 erhält man unter Verwendung der von ITAG gewählten Ausgangsbedingungen die Ergebnisse nach Tabelle 1 unter "Variante 1".

Es werden Werte $V_b = 0,8$ m/h für 8 1/2" und $V_b = 1$ m/h für 6 3/4" zugrunde gelegt.

KTB-Vorbohrung:Vorschlaege ITAG		(Ohne Zusatzrohrtour bis 1000 m!)	
Endteufe (3000 m):	3000	vb 8 1/2" (m/h):	0.8
ROP-Faktor (100%):	100	vb 6 3/4" (m/h):	1
Standl (Rota 18m):	18	vb 4 3/4" (m/h):	1.4
(WL 24m):	24	vb 134 (m/h):	1.2
(RO 30m):	30	vb 101 (m/h):	1.5
Anlagenkost/d(TDM 14.4):	14400	Krone 8 1/2" (DM):	29000
AnlKst Seilk/d(TDM 12):	12000	Krone 6 3/4" (DM):	19000
Bau Platz (DM 60/m2):	60	Krone 4 3/4" (DM):	10000
Rekultivieren (DM20/m2):	20	Krone 134 mm (DM):	8000
Kraftstoff (DM 1/l):	1	Krone 101 mm (DM):	5000
Kostenabschaetzung (TDM)			Zeitplanung
	Variante 1	Variante 3	Var 1 Var 3
Bohrloch	8 1/2"-4 3/4"	6 3/4"-4"	Bohrzeit Rotary 129 11
Gesamtkosten	7423	4955	Bohrzeit Seilkernen 95
			Roundtrip-Zeit 73 68
Bohrplatz	200	200	Nebenarbeiten (*) 8 8
Transport	65	65	
Aufbau	65	65	Gesamtdauer 210 182
Abbau	43	43	
Anlagenkosten	3023	2226	(*): Ohne 1000 m-Zusatzrohrtour
Kraftstoff	302	196	
Kronen, Kernrohre	3348	1939	
Spuelung	9	7	
Abfuhr, Deponie	16	12	Bohrplatzkosten
Verrohrung	32	22	
Rohreinbau	3	3	Platzgroesse (m2): 2500
Zementation	6	5	Baukosten (DM/m2): 60
Verflanschung	10	5	Rekultiv (DM/m2): 20
Mieten	100	17	
Messungen, Teste			Gesamtkosten 200
Unvorhergesehenes	200	150	
Gesamtkosten	7423	4955	

Tabelle 1

2.1.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Es werden Modellrechnungen für $V_b = 0,5$ und 1 m/h sowie Standlängen s_k von 15 und 20 m vorgelegt. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse für $V_b = 0,5$ m/h und $s_k = 15$ m.

KTB-Vorbohrung:Vorschlaege ITAG		(Ohne Zusatzrohrtour bis 1000 m!)	
Endteufe (3000 m):	3000	vb 8 1/2" (m/h):	0.5
KOP-Faktor (100%):	100	vb 6 3/4" (m/h):	0.5
Standl (Rota 18m):	15	vb 4 3/4" (m/h):	0.5
(VL 24m):	24	vb 134 (m/h):	0.5
(BO 30m):	30	vb 101 (m/h):	0.5
Anlagenkost/d(TDM 14.4):	14400	Krone 8 1/2" (DM):	29000
AnlKst Seilk/d(TDM 12):	12000	Krone 6 3/4" (DM):	19000
Bau Platz (DM 60/m2):	60	Krone 4 3/4" (DM):	10000
Rekultivieren (DM20/m2):	20	Krone 134 mm (DM):	8000
Kraftstoff (DM 1/l):	1	Krone 101 mm (DM):	5000
Kostenabschaetzung (TDM)		Zeitplanung	
	Variante 1	Variante 3	
Bohrloch	8 1/2"-4 3/4"	6 3/4"-4"	Bohrzeit Rotary
Gesamtkosten	10401	6933	253
			Bohrzeit Seilkernen
			88
			Roundtrip-Zeit
			8
Bohrplatz	200	200	Mebearbeiten (*)
Transport	65	65	8
Aufbau	65	65	Gesamtdauer
Abbau	43	43	348
Anlagenkosten	5013	3985	326
Kraftstoff	501	352	
Kronen, Kernrohre	4049	1995	(*): Ohne 1000 m-Zusatzrohrtour
Spelung	9	7	
Abfuhr, Deponie	16	12	Bohrplatzkosten
Verrohrung	32	22	
Rohreinbau	3	3	Platzgroesse (m2):
Zementation	6	5	2500
Verflanschung	10	5	Baukosten (DM/m2):
Mieten	187	24	60
Messungen,Teste			Rekultiv (DM/m2):
Unvorhergesehenes	200	150	20
			Gesamtkosten
Gesamtkosten	10401	6933	200

Tabelle 2

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Kosten für unterschiedliche Parameter.

vb (m/h) \ sk (m)	10	15	18	20
0,5	13078	10401	9508	9062
0,8/1,0 (ITAG-Vorschlag)	-	-	7423	-
1,0	10947	8269	7377	6930

Tabelle 3: Kosten (TDM) für Var 1

2.2 Rotary-Bohrtechnik bis 5000 m ET

2.2.1 Bohrleistungen mit ITAG-Parametern

Unter Verwendung der von ITAG vorgeschlagenen Leistungsparameter erhält man als Var 2 für ET = 5000 m die in Tabelle 4 dargestellte Kostenabschätzung unter der Spalte "Variante 1". Die Bohrgeschwindigkeit beträgt 0,8 m/h für 8 1/2" und 1 m/h für 6 3/4", als Standlänge werden 18 m angenommen.

EYS-Vorbohrungsvorschläge ITAG (Ohne Einsatzrohrtour bis 1000 m)				
Endtiefe (3000 m):	5000	vb 8 1/2" (m/h):	0,8	
ROP-Faktor (100%):	100	vb 6 3/4" (m/h):	1	
Standl (Rota 18m):	18	vb 4 3/4" (m/h):	1,4	
(WL 26m):	24	vb 134 (m/h):	1,2	
(BO 30m):	30	vb 101 (m/h):	1,5	
Anlagenkost/d(TDM 14.4):	14400	Krone 8 1/2" (DK):	29000	
AnlKst Seilk/4(TDM 12):	12000	Krone 6 3/4" (DK):	19000	
Bau Platz (DK 60/m ²):	60	Krone 4 3/4" (DK):	10000	
Rekultivieren (DK20/m ²):	20	Krone 134 m (DK):	8000	
Kraftstoff (DK 1/1):	1	Krone 101 m (DK):	5000	
Kostenabschätzung (TDM)				
	Variante 1	Variante 3	Zeitplanung	
	8 1/2"-4 3/4"	6 3/4"-4"	Var 1	Var 3
Bohrloch			Bohrzeit Rotary	213
Gesamtkosten	12801	8241	Bohrzeit Seilkernen	165
Bohrplatz	200	200	Roudtrip-Zeit	141
Transport	65	65	Rebenarbeiten (*)	8
Aufbau	65	65	Gesamtdeuer	410
Abbau	43	43		359
Anlagenkosten	5910	4347	(*) Ohne 1000 m-Einsatzrohrtour	
Kraftstoff	591	387		
Kronen, Kernrohre	5486	2906		
Spülung	12	10		
Abfuhr, Deponie	21	17		
Verrohrung	32	22		
Rohrelebau	3	3		
Sementation	6	5	Platzgroesse (m ²):	2500
Verflanschung	10	5	Baukosten (DK/m ²):	60
Mieten	156	17	Rekultiv (DK/m ²):	20
Messungen, Tests			Gesamtkosten	200
Unvorhergesehenes	200	150		
Gesamtkosten	12801	8241		

Tabelle 4

2.2.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Bei Einführung alternativer Leistungsparameter, wie in Abschnitt 2.1.2, erhält man für die 5000 m-Variante Kosten nach Tabelle 5.

vb (m/h) \ sk (m)	10	15	18	20
0,5	23036	17986	16303	15461
0,8/1,0 (ITAG-Vorschlag)	-	-	12801	-
1,0	19489	14439	12755	11914

Tabelle 5 Kosten (TDM) für Var 2

2.3 Kombination Rotary-Seilkern-Bohrtechnik - Var 3

Bis zur Ankerrohrteufe von 250 m wird mit Ölfeld-Doppelkernrohr 6 3/4" x 3 1/2" gebohrt, anschließend soll bis 3000 m mit Seilkern-System 134 weitergearbeitet werden.

2.3.1 Bohrleistungen nach ITAG-Vorschlag

Ausgangsbedingungen und Kostenabschätzung sind unter "Variante 3" in Tabelle 1 abzulesen. Als Bohrfortschritte werden 1 m/h für die 6 3/4"-Krone mit Rotary-Doppelkernrohr und 1,2 m/h für das Seilkernsystem angesetzt.

2.3.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Bei Einführung alternativer Werte für V_b und sk erhält man entsprechend abweichende Kostenschätzungen (Tabelle 6).

vb (m/h) Rk \ Sk		sk (m) Rk	10			15			18			20		
			Sk	20	24	30	20	24	30	20	24	30	20	24
0,5	1,0		5893	5603	5313	5724	5434	5144	5668	5378	5088	5640	5350	5060
	1,2		5643	5353	5063	5474	5185	4895	5418	5128	4838	5390	5100	4810
	1,5		5393	5103	4813	5225	4935	4645	5168	4878	4589	5140	4850	4560
1,0	1,0		5720	5430	5140	5551	5261	4971	5495	5205	4915	5467	5177	4887
	1,2		5470	5180	4890	5301	5011	4721	5245	4955	4665	5217	4927	4637
	1,5		5220	4930	4640	5051	4761	4471	4995	4705	4415	4967	4677	4387

Tabelle 6: Kosten (TDM) für Var 3

2.4 Seilkerntechnik - Var 4

2.4.1 Bohrleistungen nach GW-Vorschlag

Gewerkschaft Walter rechnet für das 6 1/4"-Bohrloch mit einem Bohrfortschritt von $V_b = 0,8$ m/h und bei imprägnierten Kronen mit einer Standlänge $s_k = 30$ m. Tabelle 7 zeigt die Kosten der einzelnen Bohrphasen; es fallen für die Abschätzung ohne Einbau einer eventuell erforderlichen Zwischenrohrtour TDM 4270 an.

2.4.2 Kosten mit alternativen Bohrleistungen

Es werden die Ergebnisse von Modellrechnungen mit $V_p = 1$ bzw. $1,5$ m/h sowie $s_k = 20$ bzw. 30 m als Alternativen zur Kostenabschätzung vorgelegt (Tabelle 8).

sk (m) \ vb (m/h)	0,8	1	1,2
20	4832	4459	4211
24	4551	4178	3930
30	4270	3897	3649

Tabelle 8: Kosten (TDM) für Var 4

3. TECHNISCHE BEWERTUNG VON BOHRVERFAHREN UND BOHRGERÄT

Wirtschaftliche und bohrtechnische Fragestellungen stehen bei der Suche nach einem für die Zwecke der KTB-Vorbohrung optimalen System in engem Zusammenhang. So ist beispielweise prinzipiell davon auszugehen, daß eine minimierte Kronenlippenfläche nur die Zerstörung eines relativ kleinen Gesteinsvolumens erfordert und aufgrund der günstigen Kühlmöglichkeiten für die Diamant-Schneideelemente einen höheren Bohrfortschritt ermöglicht. Beide Einflüsse verbessern die Wirtschaftlichkeit der Diamantkronen. Ein zusätzlicher Kostensenkungseffekt sollte sich dadurch ergeben, daß auf einer schmalen Lippe nur wenig Diamantenmaterial benötigt wird.

Die Lippenbreite der Bohrkronen wird nach außen durch den Bohrlochdurchmesser festgelegt. Der Innendurchmesser der Krone bestimmt den Durchmesser des erbohrten Gesteinskerns. Eine gute Möglichkeit zur Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit des Kernbohrprozesses ergibt sich insbesondere im schwer zu erbohrenden Gebirge durch Einsatz des Seilkernverfahrens. Hier muß aber der Innendurchmesser der Krone derart gestaltet sein, daß der damit erbohrte Gesteinskern zusammen mit dem unverzichtbaren Innenkernrohr durch die Gestängeverbinder hindurch gezogen werden kann.

Letztlich bilden die konstruktive Gestaltung und Werkstoffparameter der Verbinder wichtige Bestimmungsgrößen für die Belastbarkeit, d. h. Teufenkapazität sowohl eines Seilkern- als auch eines Drehbohrgestänges. Die im Rahmen der verschiedenen Vorschläge der Bohrfirmen vorgesehenen Gestängetypen wurden auf die zu erwartende Festigkeit bei der Ziel-Bohrlochteufe von 300 m überprüft. Außerdem wurde auch untersucht, bis zu welcher maximalen Endteufe ein Einsatz möglich wäre.

Die vergleichenden Untersuchungen der Bohrstrangfestigkeit wurden zunächst für den einfachen Belastungsfall eines verkanterten Gewindes sowie zusätzlicher Beaufschlagung mit einer Axiallast durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten für den Fall einer freien Aufhängung in Luft anstelle der Wasser-Bohrspülung, was zu einem konservativen Ergebnis im Sinne einer höheren Sicherheit führt.

Auf Basis der bekannten mathematischen Beschreibungsmodelle zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen aufgebrachtem Kontermoment und zulässiger Axialkraft wurde ein Rechenprogramm aufgestellt. Nach Eingabe der jeweiligen Geometrie- und Werkstoffparameter erhält man Darstellungen nach Abb. 8. Hieraus läßt sich ein empfohlener sicherer Arbeitsbereich ablesen, in dem weder eine Trennung der Schultern noch eine Belastung des Materials über das zugelassene Vielfache der Streckgrenze, z. B. 0,55, erfolgen.

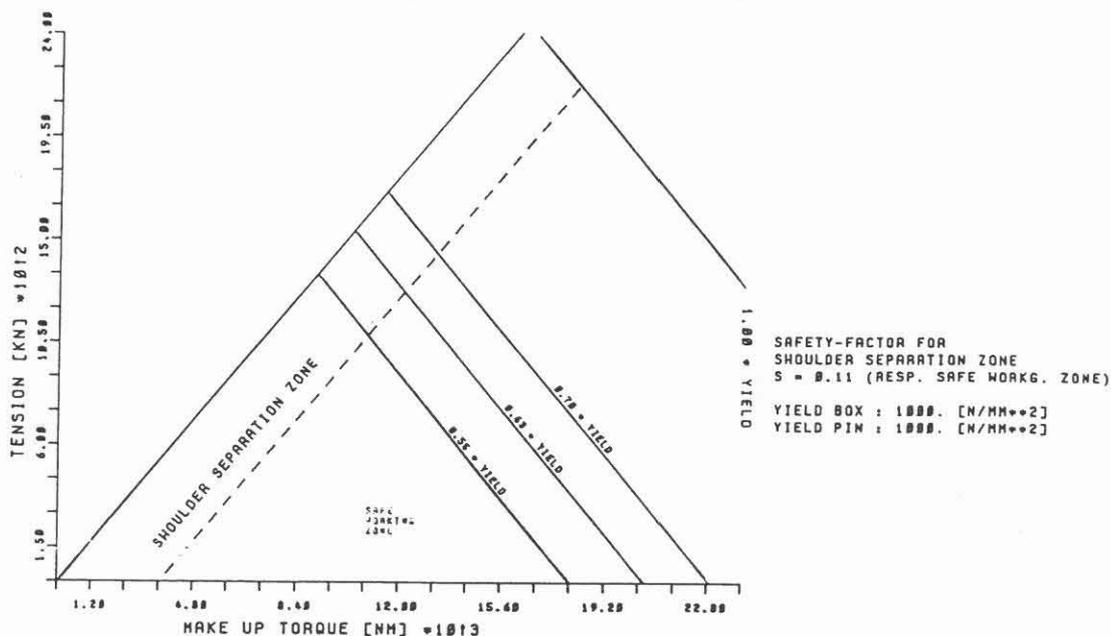


Abb. 8: Zugbelastbarkeit über dem Kontermoment für ein Seilkerngestänge

Dieses analytische Auslegungsprogramm berücksichtigt jedoch nur die globale Beanspruchung der gefährdeten Querschnitte der Bauteile Muffe und Zapfen, insbesondere die Entlastungsfreidrehung des Zapfens, nicht aber die Einflüsse der Belastungseinleitungen und besonders der Bauteilformgebung im Bereich der Verzahnung, Entlastungsnut usw.

Hier bietet die Anwendung von Finite Elemente Methoden (FEM) wirksame Unterstützung zur Auffindung von Schwachstellen und Ansätzen zur Verbesserung der Geometrie.

Die FEM-Berechnung wird bei Eastman Christensen mit dem Programmpaket ANSYS durchgeführt. Zur Modellierung verwendet man ebene, axialsymmetrische Elemente. Die Verbindung zwischen Muffe und Zapfen wird durch Gap-Elemente auf den Gewindeflanken erreicht. Diese Gap-Elemente werden auch für die Verbindung der Schultern von Muffe und Zapfen eingesetzt, wobei durch die Vorgabe einer Interferenz die Wirkung eines Verschraubmoments simuliert wird. An dieser Stelle fließen die Aussagen des analytischen Gewindeauslegungsprogramms in die FEM-Rechnung ein, da die berechnete Schulterspannung durch die Gap-Elemente der Gewindegewinde aufgebracht werden muß.

Die Vernetzung der Bauteile zeigt Abb. 9. Die Gewindegänge sind dabei mit beidseitig anliegenden Flanken modelliert, was dem Zustand einer verschraubten Verbindung entspricht.

Zur Darstellung der Spannungsverteilung wurden am Bildschirm oder auf dem Hardcopy-Gerät die Elemente in unterschiedlicher Färbung dargestellt. Mit Hilfe von FEM kann so deutlich aufgezeigt werden, welche Bereiche der Verzahnung im Detail geändert werden müssen um dem Ziel einer möglichst gleichmäßigen Spannungsverteilung näherzukommen.

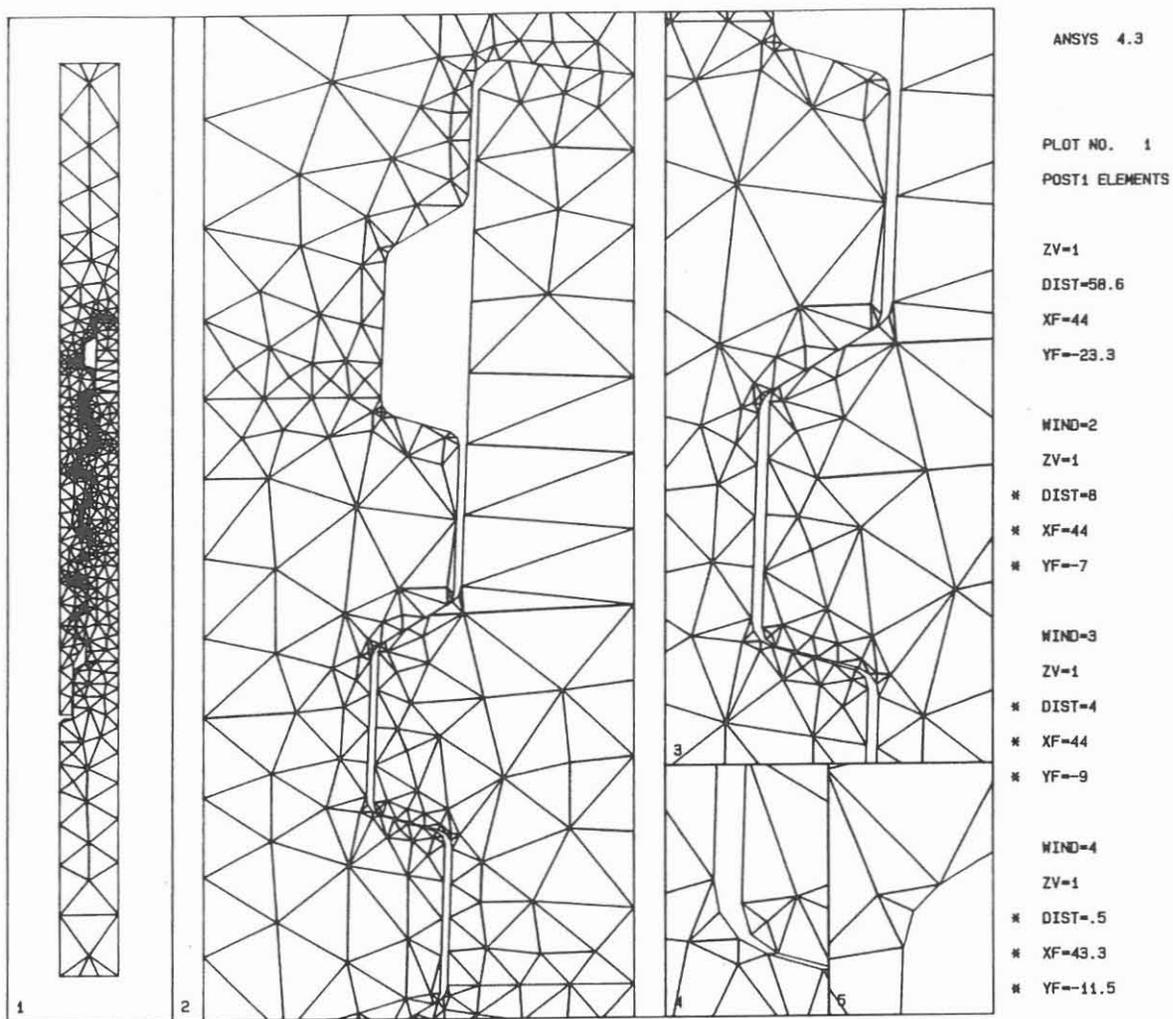


Abb. 9: Elementverteilung für FEM-Gewindeuntersuchung

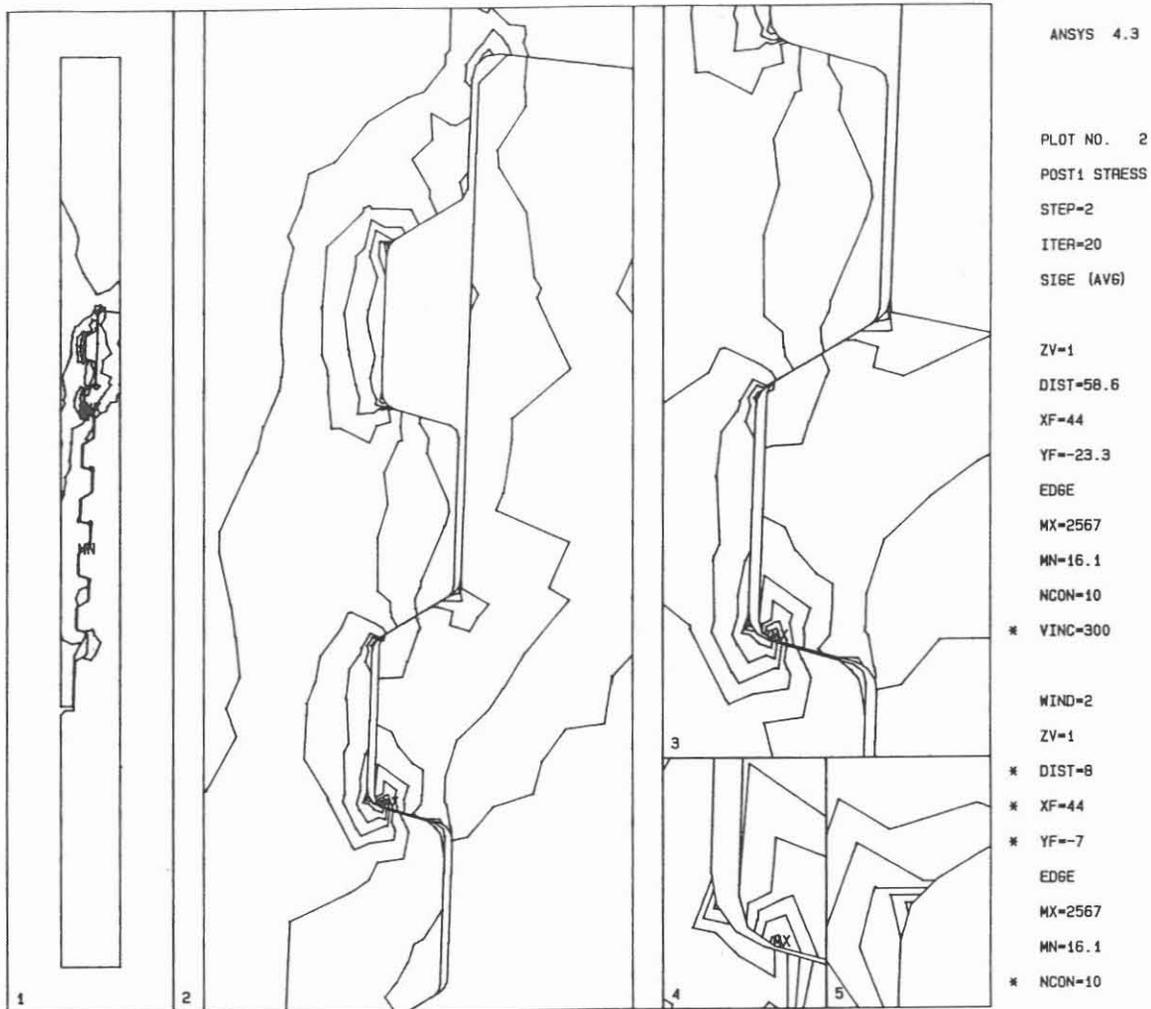


Abb. 10: Beispiel eines FEM-Plots von Spannungskonzentrationen im Gewinde

Die besondere Bedeutung der Finite Elemente Methode wird bei ihrer Anwendung im Rahmen der Neuauslegung von Gewindeverbindern deutlich, wenn aufgrund der äußeren Leistungsanforderungen eine optimale Ausnutzung von Baupraum und Werkstoffeigenschaften notwendig ist.

Bei einigen der von den Bohrfirmen zum Abteufen der KTB-Vorbohrung vorgeschlagenen Gestängen, insbesondere der von diesen zum Teil selbst entwickelten Seilkernbohrgestänge, wurde bereits ein Trend zur Optimierung der Teufenkapazität deutlich. Durch Reduzierung des Stranggewichts und Wahl eines Werkstoffes erhöhter Festigkeit konnten Fortschritte gegenüber früheren Ausführungen

erzielt werden. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten sind erkennbar im Bereich einer weiter gesteigerten Materialfestigkeit und einer optimierten Gewindeauslegung an den Verbinderteilen.

Gegenüber dem Bohrgestänge und den Bohrkronen ist die Bewertung der vorgeschlagenen Bohranlagen mit geringerer Priorität behandelt worden. In diesem Bereich können noch zu einem späteren Zeitpunkt Modifikationen vorgenommen werden, ohne daß damit die Entscheidung für ein Bohrsystem getroffen ist. Eine Ausnahme bilden allerdings die Vorschläge der schwedischen Firma Microdrill. Sie basieren grundsätzlich auf der Verwendung sehr spezieller kleiner Bohranlagen, die aufgrund ihrer beschränkten Teufenkapazität für den Einsatz in der KTB-Vorbohrung nicht in Betracht kommen.

4. DERZEITIGE UND ZUKÜNFTIGE ERREICHBARE BOHRLEISTUNGEN IMPRÄGNIERTER KRONEN IM KRISTALLINGESTEIN

Nach bisher vorliegenden Erfahrungen können beim gegenwärtigen Entwicklungsstand folgende Bohrleistungen im Kristallin erreicht werden:

	Vb (m/h)	sk (m)
Rotary (RK)	0,5	12
Seilkernen (SK)	1,1	20

Diese Angaben sind möglicherweise eher konservativ, weil sie im wesentlichen auf der Auswertung der Einsätze bei der NAGRA beruhen, bei denen nicht die optimalen Betriebsbedingungen vorlagen (Orientiertes Kernen, Drehzahl, Spülung).

Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich des Bohrfortschritts bestehen hauptsächlich in der Wahl optimaler Betriebsparameter, insbesondere durch Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bzw. Drehzahl. Versuchs-Einsätze mit Bohrmaschinen und Rotary-Doppelkernrohren erbrachten Verbesserungen des Bohrfortschritts um mehr als 100 %. Dabei wurden gleichzeitig auch Erhöhungen der Standlänge beob-

achtet, die auf die reduzierte Andruckkraft und ein verändertes Verhalten der Matrix zurückgeführt werden. Auch beim Seilkernen sollten höhere Drehzahlen zu höheren Bohrleistungen führen.

Verbesserungen der Standlänge imprägnierter Kronen sind auch durch konstruktive und werkstoff-technische Änderungen an der Diamantkrone zu erwarten. In einem überschaubaren Entwicklungszeitraum werden folgende Werte für möglich gehalten:

	sk (gegenwärtig)	sk (zukünftig)
Rotary (RK)	12 m	30 m
Seilkernen (SK)	20 m	40 - 50 m

5. VERGLEICHSCHEUNUNGEN AUF DER BASIS EINES REALISTISCHEN KONZEPTS FÜR DIE KTB-VORBOHRUNG

Die Erstellung der vorliegenden Studie erfolgte verabredungsgemäß im ständigen Kontakt zwischen der KTB-Projektleitung als Auftraggeber und der Eastman Christensen GmbH als Auftragnehmer. So konnten die Vorstellungen der Projektleitung bezüglich des für die Vorbohrung vorzusehenden Bohrablaufs während der Bearbeitungszeit der Studie zunehmend konkreter werden und in die Studie einfließen.

Aus diesem Grunde ist es auch möglich, auf der Basis der von den genannten Bohrunternehmen aufgezeigten Wege zur Abschätzung der Bohrkosten und mit Hilfe der daraus erstellten Rechenprogramme zusätzliche Vergleichsrechnungen durchzuführen, die den fortgeschrittenen Planungsstand der Projektleitung KTB berücksichtigen. So wird für diese neuen Kalkulationen grundsätzlich davon ausgegangen, daß keine zusätzliche Rohrtour aufgrund von Bohrlochproblemen eingebaut werden muß. Außerdem geraten sowohl die Slimhole-Bohrtechnik als auch die reine Rotary-Bohrtechnik gegenüber einer Kombination aus Rotary- und Seilkern-Bohrtechnik in den Hintergrund. Abschließende Optimierungsrechnungen legen daher bereits die letztgenannte Kombinationsmethode zugrunde. Schließlich wird, entsprechend einer fortgeschrittenen Meinungsbildung bei der verantwortlichen Projektleitung,

eine Ankerrohrteufe von 400 m anstelle der bisher angenommenen 250 m als realistisch angesehen.

In die Vergleichsbetrachtung wird der alternative Einsatz von Diamantbohrkronen mit oberflächengesetzten (SS) oder imprägnierten Diamanten und Rollenbohrkronen miteinander verglichen. Die Ausgangsbedingungen und die ermittelten Kosten sind für die Ankerrohrteufe bis 400 m in Tab. 9 und für den Bereich des unverrohrten Bohrlochs bis 3000 m bzw. 5000 m in Tab. 10 dargestellt. Für die Bohrgeschwindigkeit V_b , Standlänge der Krone s_k , gewinnbare Kernlänge l_k und Kosten eines einzelnen Bohrwerkzeugs KW sind jeweils ausgewählte Werte angegeben.

Fall	Bohrverfahren	Bohrwerkzeug	Bohrparameter				KW (TDM)	Kosten (TDM)
			Bohrloch	V_b (m/h)	s_k (m)	l_k (m)		
1	Rotary	Diam. impr.	8 1/2"	1,5	20	12	30	1.291
2	Rotary	Diam. SS	8 1/2"	1,5	20	12	20	1.091
3	Rotary	Diam. impr.	10 5/8"	1,5	20	12	52	1.731
4	Rotary	Diam. SS	10 5/8"	1,5	20	12	35	1.391
5	Seilkern	Diam. impr.	6"	1,5	20	4	7,4	1.249 (1.279)
6	Seilkern	Diam. SS	6"	1,5	20	4	5	1.203 (1.233)
5/6	Rotary	Hole Opener	8 1/2"/ 10 5/8"	1,5	25	-	9,5 (11,5)	s. o.
7	Rotary	Rollenbohrkronen	8 1/2"	1,5	10	10	17,4	1.396
8	Rotary	Rollenbohrkronen	10 5/8"	1,5	12,5	10 (12,5)	22,5	1.421 (1.409)

Tab. 9: Bohrparameter und Kosten bis zur Ankerrohrteufe 400 m

Die Kostenermittlung wird auf der Basis des Tabellenkalkulationsprogramms vorgenommen.

Bei den ermittelten Kosten nach Tab. 9 sind die Beträge für den Transport und den Aufbau der Bohranlage mit enthalten.

Fall	Endteufe (m)	Bohrwerk- zeug	Bohrparameter				KW (TDM)	Kosten (TDM)
			Bohr- loch	Vb (m/h)	sk (m)	lK (m)		
9	3000	Diam., impr.	6"	1,5	20	4	7,4	3.260
10	3000	Diam., SS	6"	1,5	20	4	5	2.948
11	5000	Diam., impr.	6"	1,5	20	4	7,4	6.957
12	5000	Diam., SS	6"	1,5	20	4	5	6.405

Tabelle 10: Bohrparameter und Kosten beim Seilkernen für Sektion 400 m bis 3000 m und 400 m bis 5000 m

In den Kosten nach Tabelle 10 sind die bereits in Tabelle 9 dargestellten Beträge für den Bereich des Bohrlochs bis zur Ankerrohrteufe nicht enthalten. Um die geschätzten Gesamtkosten der Bohrung zu ermitteln, wären daher jeweils ein Betrag aus Tabelle 9 und Tabelle 10 zu addieren. Verknüpft man beispielsweise die Fälle 1 und 9 miteinander, so kommt man zu einer Abschätzung der Gesamtkosten für die 3000 m-Bohrung von TDM 4.551. Falls bis auf 5000 m abgeteuft würde, beliefen sich die Kosten der Bohrung auf TDM 8.248 (Fälle 1 und 11). Auf der Basis der vorgegebenen Bohrparameter sollte der Bereich bis zur Ankerrohrteufe mit oberflächengesetzten Diamantbohrkronen der Abmessung 8 1/2" x 4" und der untere Bereich des Bohrlochs mit oberflächengesetzten Kronen im Außendurchmesser 6" abgeteuft werden.

Der Einsatz der imprägnierten Kronen kann rechnerisch nur sinnvoll sein, wenn hierfür größere Standlängen als bei oberflächengesetzten Werkzeugen angenommen werden.

Für den Abschnitt unterhalb der Ankerrohrteufe erfolgt daher eine alternative Berechnung mit veränderten Standlängen der Kronen sk entsprechend Tabelle 11.

Fall	Endteufe (m)	Bohrwerk- zeug	Bohrparameter				KW (TDM)	Kosten (TDM)
			Bohr- loch	Vb (m/h)	sk (m)	1K (m)		
9	3000	Diam., impr.	6"	1,5	30	4	7,4	2.767
10	3000	Diam., SS	6"	1,5	15	4	5	3.338
11	5000	Diam., impr.	6"	1,5	30	4	7,4	5.915
12	5000	Diam., SS	6"	1,5	15	4	5	7.263

Tabelle 11: Bohrparameter und Kosten beim Seilkernen für Sektion 400 m bis 3000 m und 400 m bis 5000 m

Für Fall 9 zeigt die Nachrechnung den kostensenkenden Einfluß der Standlängenerhöhung. Bezüglich des Falles 10 wird die noch in Tabelle 10 wegen der günstigen Meißelkosten auftretende Kostenreduzierung von der in Tabelle 11 gerechneten, realistischen, Reduzierung der Standlänge mehr als ausgeglichen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der umfassenden Studie wurden bohrtechnische Verfahren und Kosten zum Abteufen der KTB-Vorbohrung im Kristallin verglichen. Aufgabe dieser Studie war es auch, der KTB-Projektleitung als Planungshilfe zu dienen. Auf der Basis des ständigen Informationsaustausches zwischen Projektleitung KTB und Auftragnehmer wurden die Basisdaten für die Kostenvergleiche jeweils dem Stand der Planung angepaßt.

Während der anfänglich durchgeführten Berechnungen wurde eine Ankerrohrteufe von 250 m zugrundegelegt. Es wurden die Kernbohrverfahren Rotary-Kernen, Seilkernen und Slimhole-Kernen einschließlich von Kombinationen miteinander verglichen. Die technisch-wirtschaftliche Bewertung der von den Bohrfirmen ITAG, Gewerkschaft Walter und Microdrill ausgearbeiteten Bohrpläne führte zunächst zum Ausscheiden der Microdrill-Lösung. Die dort beschriebenen Varianten ermöglichten nicht das Erreichen der geforderten Endteufe von 3000 m.

Als wesentlicher Vorteil des Rotary-Kernverfahrens ist festzuhalten, daß relativ große Bohrlochdurchmesser sicher erreicht werden können. Aufgrund der Anforderung der wissenschaftlichen Bohrung, von der Ackersohle bis zur Endteufe

Kerngewinn erzielen zu müssen, sind allerdings hohe Kosten zu erwarten.

Das Seilkernverfahren wurde bisher fast ausschließlich für Bergbauanwendungen in relativ flachen Bohrungen mit engen Durchmessern eingesetzt. Die Kosten betragen in grober Abschätzung etwa 50 % der Kosten einer Rotary-Kernbohrung, wenn bis 3000 m oder, als Option, bis 5000 m abgeteuft wird. Neben den Vorteilen einer niedrigeren Gesteinszerstörungsarbeit und reduzierten Kronenkosten führt insbesondere die Möglichkeit des Innenrohrwechsels ohne Strangausbau zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit. Darüber hinaus besteht beim Seilkernen natürlich die Möglichkeit, beim Auftreten von Kernverklemmern mit relativ geringem Aufwand das Innenrohr wechseln zu können. Auftretende Zeitverluste lassen sich gegenüber dem Rotary-Kernen in Grenzen halten. Bei Anwendung der Seilkerntechnik ist eine Optimierung der Kronenstandlänge von besonderer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Bohrprozesses.

Wenn die Sektion bis zur Ankerrohrteufe mit relativ großem Durchmesser erbohrt werden soll, erweist sich die Rotary-Kernbohrtechnik als technisch-wirtschaftlich angebrachte Lösung. Seilkern-Bohrungen müßten hier in relativ aufwendiger Weise zunächst noch erweitert werden, um die Verrohrung einbauen zu können.

Bereits während der abschließenden Arbeiten an der Studie hat sich ein realistisches Konzept für das Abteufen der Vorbohrung entwickelt. Es sieht ein Erbohren der nun vorgesehenen Ankerrohrteufe von 400 m mit 8 1/2" x 4" Krone am Rotary-Doppelkernrohr vor. Die Endteufe von 3000 m soll im Seilkernverfahren bei einem Bohrlachdurchmesser von 6" erbohrt werden.