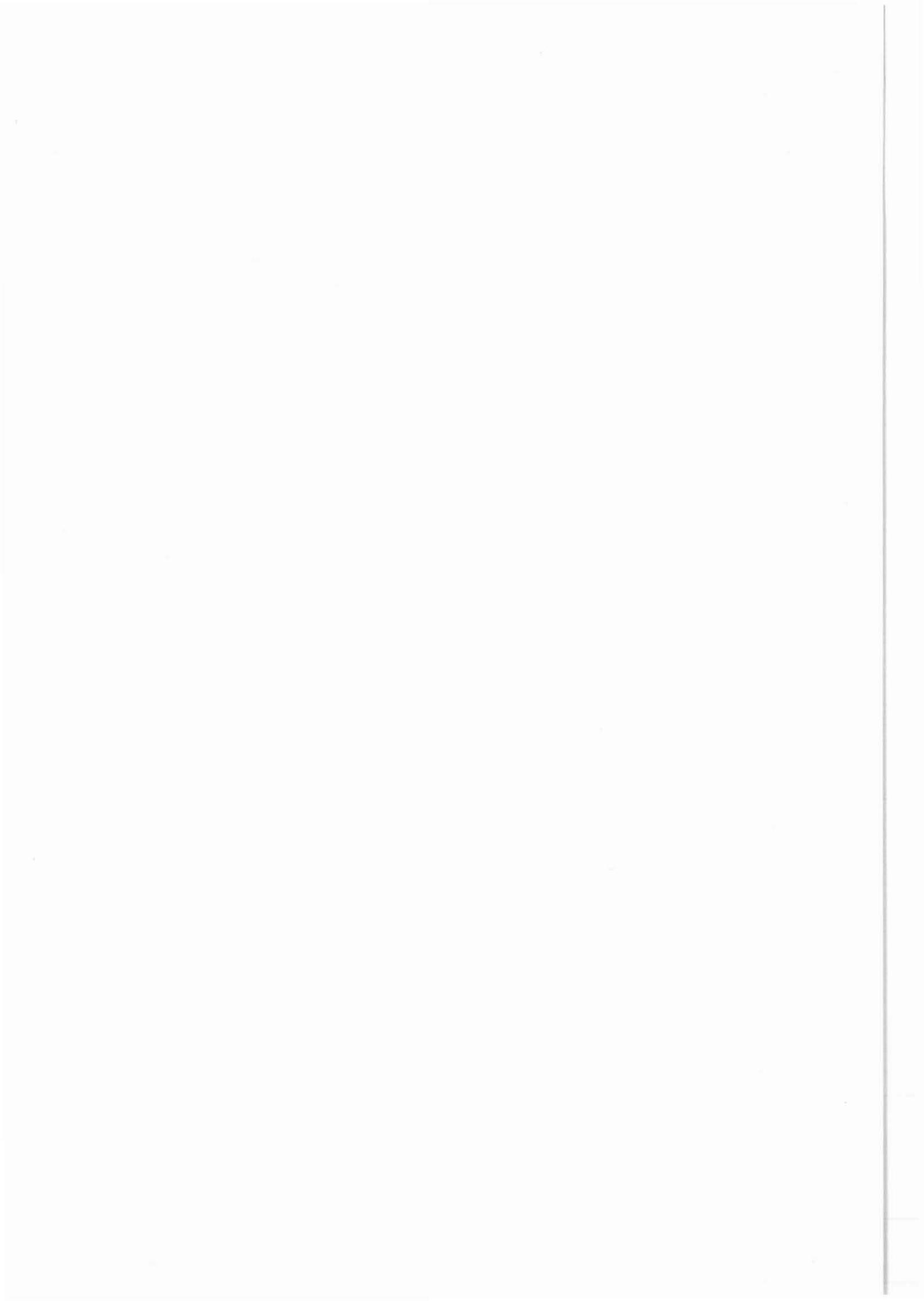


A. Allgemeine Untersuchungen
zu Bohrbarkeit und
Bohrverfahren



Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung
Technische Universität Clausthal

Agricolastraße 10
3392 Clausthal-Zellerfeld

Untersuchung der Mechanismen
beim Bohren in Hartgesteinen
zur Optimierung des
Bohrprozesses

Prof. Dr.-Ing. C. Marx
Dipl.-Ing. U. Deutsch
Dipl.-Ing. J. Weltermann

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zielsetzung.....	6
2. Arbeitsprogramm.....	6
3. Ergebnisse.....	9

1 Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes werden Ursache und Abläufe der Gesteinszerstörung bei verschiedenen Bohrtechniken im Hartgestein untersucht, um im Hinblick auf die Kontinentale Tiefbohrung Aussagen über die Optimierung des Bohrprozesses zu gewinnen.

Die Betrachtungsweise erfolgt hierbei durch Auswertung von bisher veröffentlichten Literaturstellen, in denen insbesondere die Mechanismen der Gesteinszerstörung im Hartgestein beschrieben werden, sowie durch experimentelle Untersuchungen der einzelnen Bohrprozesse in einem umfangreichen Versuchsprogramm.

Das Projekt gliedert sich in folgende Unterziele:

1. Erstellen eines Statusberichtes über die Gesteinszerstörung beim Bohren im Hartgestein
2. Aufbau bzw. Weiterentwicklung von Prüfständen für die Prozesse Drücken und Schlagen
3. Experimentelle Bestimmung der Wirksamkeit der Gesteinszerstörung beim Bohren im Hartgestein unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen
4. Entwicklung von Bewertungskriterien zur Beurteilung der Wirksamkeit der Gesteinszerstörungsmechanismen für verschiedene Hartgesteine
5. Ableitung von Empfehlungen für die Gestaltung der Bohrwerkzeuge für das Bohren im Hartgestein für die verschiedenen Mechanismen der Gesteinszerstörung

2 Arbeitsprogramm

Durch systematische Untersuchungen an ausgewählten Hartgesteinen soll die Wirksamkeit der verschiedenen Methoden der Gesteinszerstörung mit den Mechanismen

- Ritzen
- Drücken
- Schlagen

sowohl unter atmosphärischen Bedingungen, als auch für exemplarische Versuche im Bohrautoklaven untersucht werden.

Eine Übersicht über die Mechanismen der Gesteinszerstörung, die im Rahmen der Bohrung im Hartgestein für KTB untersucht werden, ist in Abb. 1 dargestellt.

Die experimentellen Untersuchungen analysieren den Gesteinszerstörungsablauf in der Bohrtechnik als das Zusammenwirken des Gesteins - als Werkstück - , des Bohrmeißels - als Werkstück - der Bohrparameter als prozeßspezifische Kenngrößen.

Die in der Tiefbohrtechnik angewendeten Arten der mechanischen Gesteinszerstörung lassen sich, bezogen auf die Wirkstelle in drei Elementarverfahren einteilen:

- Drückende Gesteinszerstörung:
Sie entspricht dem Bohren mit Rollenmeißeln. Eine als Zahn oder Hartmetallinsert ausgebildete Einzelschneide wird durch das auflastende Gewicht der Schwerstangen und die Abrollbewegung der Kegelrollen auf der Bohrlochsohle mit einer schwellenden Andruckkraft in das Gestein gedrückt und bewirkt einen kraterförmigen Einbruch.
- Ritzen Gesteinszerstörung:
Sie entspricht dem Bohren mit Diamantmeißeln. Der Diamant als Einzelschneide wird konstant belastet und zerspant durch die Drehbewegung des Gesteins.
- Schlagende Gesteinszerstörung:
Sie entspricht dem Bohren mit einem Bohrhammer. Das Insert wird mit einer konstanten Andruckkraft und einer schwellenden Schlagbeanspruchung beaufschlagt.

Die Versuchsanlagen zur Durchführung des experimentellen Arbeitsprogrammes sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Die Darstellung der in der Tabelle 1 aufgeführten Bohrprüfstände erfolgt in den Abbildungen 2-10. Der Status in der Tabelle bezieht sich auf den Stand zu Beginn des KTB-Projektes.

Des Weiteren ist die Zuordnung der Arbeitsprogramme zu den jeweiligen Bohrprüfständen der Tabelle zu entnehmen. Das Arbeitsprogramm gliedert sich in das eigentliche Bohrprogramm (Arbeitsprogrammpunkte 1-4.3), das an den Bohrprüfständen durchgeführt wird und die Funktionsüberprüfung des hydraulischen Bohrhammers (Arbeitsprogrammpunkt 5)

Arbeitsprogramm (1): ritzendes Bohren, atmosphärisch

Das Arbeitsprogramm (1) besteht aus der Untersuchung des ritzenden Bohrens unter atmosphärischen Bedingungen. Versuchsanlage ist der Bohrprüfstand 3 (Abb.2), bei dem eine Werkzeugschneide von einem hydraulischen Zylinder in eine drehende Gesteinsscheibe gedrückt wird. Es werden ausschließlich Diamantschneiden bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten (v_s) und Andruckkräften (F_A) getestet. Gemessen werden die spezifische Schnitttiefe, die spezifische Energie, der spezifische Verschleiß, die Schnittkraft und der Kopplungsfaktor als Quotient aus Schnitt- und Andruckkraft. Diese Meßgrößen werden als Funktion der eingestellten Werte (F_A , v_s) graphisch dargestellt.

Arbeitsprogramm (2): drückendes Bohren, atmosphärisch

Beim Arbeitsprogramm (2) werden die Mechanismen beim drückenden Bohren unter atmosphärischen Bedingungen untersucht. Die Versuche erfolgen am Bohrprüfstand 4 (Abb.3), einer Druckprüfanlage. Hierbei werden Hartmetallstifte verschiedener Kontur in Gesteinszylinder bei unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit eingedrückt. Es werden die Andruckkraft als Funktion der Eindringtiefe, die spezifische Energie und der Schwellenwert der Gesteinszerstörung festgehalten.

Arbeitsprogramm (3): schlagendes Bohren, atmosphärisch

Im Arbeitsprogramm (3) wird das schlagende Bohren unter atmosphärischen Bedingungen betrachtet. An zwei Versuchsständen wird das elektro-pneumatische (Bohrprüfstand 5.1, Abb.4) und das hydraulische Schlagen (Prüfstand 5.2, Abb.5) erprobt. Bei unterschiedlichen Andruckkräften und Schlagzahlen werden die spezifische Energie und die Bohrgeschwindigkeit gemessen. Hierzu werden für das elektro-pneumatischen Schlagen handelsübliche Schlag-, Spiral- und Schaftbohrwerkzeuge eingesetzt. Für das hydraulische Schlagen werden mit Hartmetall bestückte Stiftschlagbohrer für Versenkhammer mit unterschiedlicher Bestückung verwendet.

Arbeitsprogramm (4): Hochdruckbohrautoklavversuche

Das Arbeitsprogramm (4) untersucht die in den Teilen (1) - (3) betrachteten Mechanismen Ritzen, Drücken und Schlagen unter Lagerstättenbedingungen. Die Versuche werden am Hochdruckbohrautoklaven, Prüfstand 2, Abb 6, durchgeführt.

Das Unterteil des Autoklaven wird für ritzendes, drückendes und schlagendes Bohren mit verschiedenen Aufbauten bestückt (Abb. 7 - 9). Die Versuchsreihe "schlagendes Bohren" wird mit dem elektro-pneumatischen Bohrhammer durchgeführt. Die Einstell- und Meßgrößen richten sich nach den in den Arbeitsprogrammen (1) - (3) erzielten Ergebnissen.

Arbeitsprogramm (5): Hydraulikhammer, Hochdruckprüfung

Im Arbeitsprogramm (5) wird das Verhalten des im Arbeitsprogramm (3.2) unter atmosphärischen Bedingungen getesteten Hydrohammers unter hohem hydraulischem Systemdrücken untersucht. Diese Funktionsüberprüfung bei Drücken bis 1500 bar erfolgt in der Rohrprüfanlage 2 (Abb. 10).

3 Ergebnisse

Die systematische Untersuchung erfolgt an ausgewählten Hartgesteinen mit verschiedenen Bohrwerkzeugen und Bohrparametern, sowohl unter atmosphärischen, als auch unter simulierten Bohrlochbedingungen an insgesamt acht verschiedenen Bohrprüfständen des Institutes, wobei die jeweiligen Leistungskenngrößen ermittelt werden. Die gemeinsame prozessspezifische Kenngröße aller drei Mechanismen, die als Vergleich für die Bohrbarkeit herangezogen wird, ist die spezifische Energie als die aufzuwendende Arbeit, bezogen auf das zerstörte Gesteinsvolumen J/cm^3 .

Bei der energetischen Betrachtung zeigt sich deutlich die Überlegenheit des Drückens und Schlagens gegenüber dem Ritzen, da beim Diamantbohrwerkzeug die Energiewerte im Hartgestein wesentlich höher liegen. Obwohl das drückende Bohren bei den Energiewerten am günstigsten abschneidet, können diese nicht als alleinige Kenngröße herangezogen werden, da der Kratereinbruch nur im Zusammenhang mit der Überschreitung eines Andruckschwellenwertes auftritt, der als weitere Kenngröße betrachtet werden muß. (Abb. 11)

Bei der Aufgliederung des Arbeitsprozesses beim drückenden Bohren tritt bei Belastung der Schneide diese bei Überschreiten der Druckfestigkeit in das Gestein ein, wobei sich unter ihr ein Keil von feinstgebrochenem Gesteinsmaterial ausbildet. Erst bei wesentlicher Erhöhung der Andruckkraft kommt es bei weiterer Zusammenpressung des Keils zur Überschreitung der Scherfestigkeit infolge der Schubbeanspruchung. Um eine Rißbildung in Gang zu setzen muß die übertragene Druckspannung diesen Schwellenwert der Kraterbildung überschreiten, so daß sich das Krater-volumen löst. Gelingt es durch Lastaufgabe auf den Meißel nicht, diesen Schwellenwert zu überschreiten, bleibt es bei der Bildung des feinstgebrochenen Gesteinskeils und dem Bohrprozess ineffektiv.

Die Druckfestigkeit und der Schwellenwert liegen bei Hart-gestein wesentlich über denen der Sedimente. Beim Bohren mit Rollenmeißeln ist eine Erhöhung der Last aber nicht unbegrenzt möglich, da die Lager der Kegelrollen eine Grenze setzen, die bei etwa 3 t/Zoll Bohrlochdurchmesser liegt.

In dem Versuchsprogramm wurden verschiedene Einzelschnei-den in magmatische Gesteine gedrückt (Abb. 12). Es zeigte sich, daß bei zunehmender Gesteinsfestigkeit der Schwel-lenwert der Andruckkraft stieg. Pro Schneide sind durch-schnittlich 6 - 8 t Andruck mit Spitzenwerten von 10 - 12 t notwendig. Übertragen auf einen Rollenmeißel heißt dieses Ergebnis, daß bei normalerweise sechs Schneidelementen, die sich gleichzeitig im Eingriff befinden, eine Meißel-last von 40 - 50 t und mehr erforderlich ist. Diese Last ist doppelt so hoch, wie die zulässige Belastung eines 8½" Warzenmeißels. Um den durch die Auflast erzeugten Druck unter den Schneiden zu erklären, ist es möglich, eine andere Schneidengeometrie zu wählen, die ein aggressiveres Eindringen erlaubt. Diese spitzen Schneiden sind aber stärkerem Verschleiß unterworfen als die abgerunde-ten. Eine andere Möglichkeit besteht in der Verkleinerung der Schneiden, was aber eine Verringerung des Kratervol-umens bedeutet. Die Reduzierung der Schneidenanzahl zur Minimierung der Kontaktfläche führt zu einer Ver-ringerung des Kratervolumens pro Umdrehung. Eine Kompen-sation dieses unerwünschten Effektes durch Erhöhung der Meißeldrehzahl ist nur sehr begrenzt möglich, da Rollen-meißel nur in bestimmten Drehzahlbereichen optimal laufen. So zeigt es sich, obwohl das drückende Bohren im Hartgestein energetisch günstig ist, daß die Tragfä-higkeit der Lager durch die erforderliche Meißellast überschritten wird, und somit der Effektivität des drük-kenden Bohrprozesses im Hartgestein materialbedingte Grenzen gesetzt sind.

Für das ritzende Bohren sind die geometrischen Verhältnisse beim Einzeldiamanten dargelegt: (Abb. 13) Die Einzeldiamanten sind zu $\frac{2}{3}$ ihres Durchmessers in der Matrix eingebettet. Die Schnitttiefe beträgt $\frac{1}{30}$ des Durchmessers, die Spurbreite das Zehnfache der Schnitttiefe. Der zerspante Gesteinsvolumenstrom ist somit von der Größe der einzelnen Diamanten abhängig. Die Andruckkraft bestimmt die Schnitttiefe, die nicht mehr als 10% des Exposures betragen sollte, um die Bohrlochsohlenreinigung nicht zu behindern.

Die größten Schnitttiefen treten also bei größeren Diamanten, d.h. bei oberflächengesetzten Diamantwerkzeugen auf.

Das kristalline Hartgestein verursacht insbesondere bei hohem Quarzgehalt im Granit starken Verschleiß der Diamantschneiden. Hierdurch sinkt in starkem Maße die Schnitttiefe, und das Bohrwerkzeug verliert seine Wirksamkeit und muß ersetzt werden. Der Vergleich von Bohrfortschritt und imprägniertem Diamantmaterial zeigt zu Beginn der größeren Schnitttiefe bei SS-Diamanten (Abb. 14); dieser Wert sinkt jedoch verschleißbedingt rasch ab, während bei imprägnierten Kronen zwar geringere Schnitttiefen infolge des kleineren Diamantenmaterials erreicht, jedoch durch die Freilegung immer neuer Diamantsplitter die Bohrgeschwindigkeit konstant gehalten werden kann und längere Standzeiten erzielt werden. Neben den SS- und imprägnierten Bohrwerkzeugen wurden auch Schneidelemente aus künstlichem polykristallinen Diamantmaterial in Form von PCD-Schneidplatten und TSD-Prismen auf ihre Eignung im Hartgestein untersucht (Abb. 15). Das Schnittverhalten beider Bauformen entspricht dem der SS-Diamanten, wobei die PCD-Schneiden als ungeeignet angesehen werden müssen.

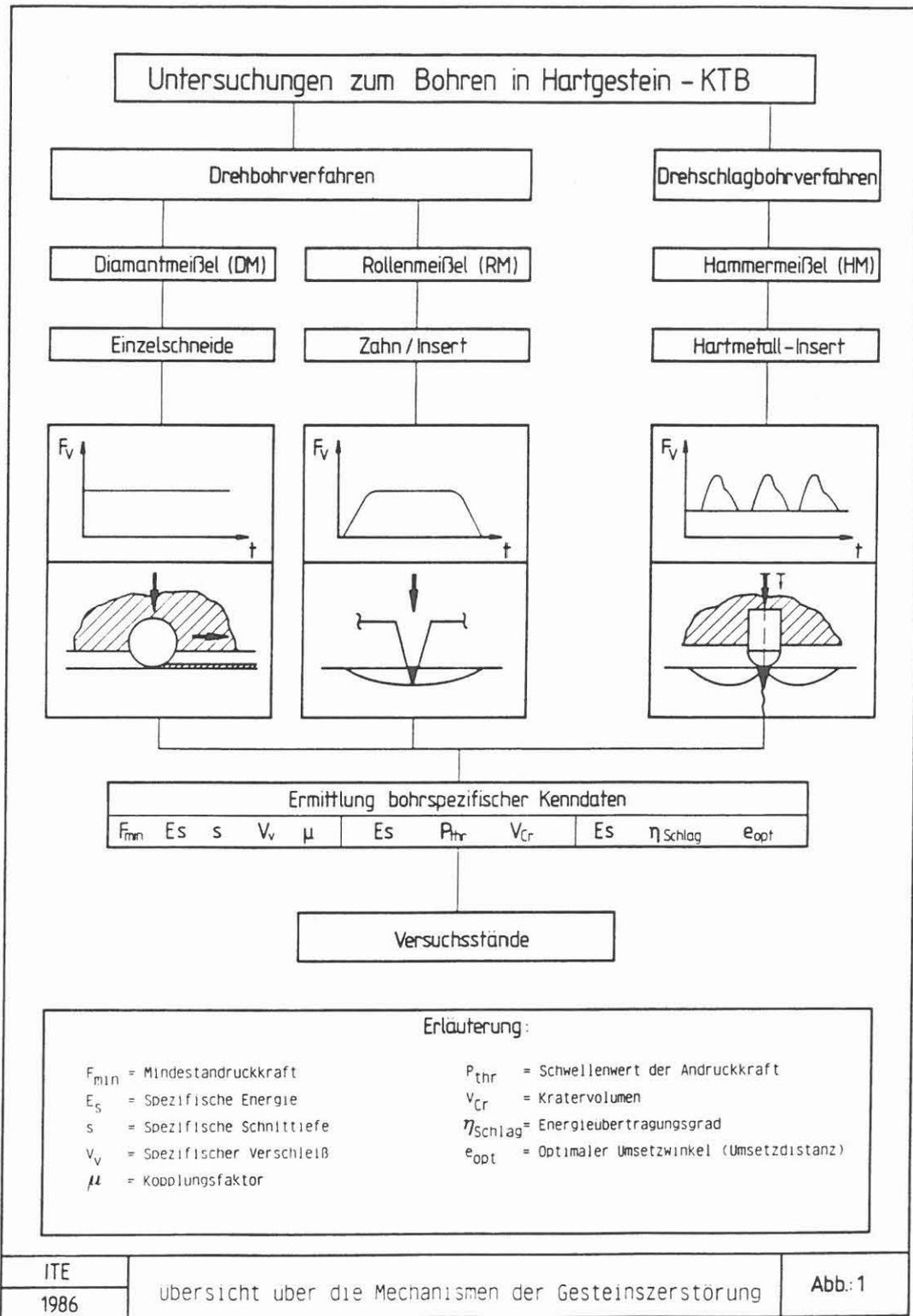
Beim schlagenden Bohren bewirkt die in das Gestein übertragene Druckspannungswelle eine Verformung der obersten Gebirgsschichten unter den Schneidelementen (Abb. 16). Diese Zone wird komprimiert, wobei sie sich in einer keilförmigen Ausbildung vertieft. Ab einer gewissen Phase kann dieser Gesteinskeil keine Verformungen mehr aufnehmen, und es baut sich im umliegenden Gesteinsbereich ein erhöhter Spannungszustand auf. Dabei kommt es dann zum Ausbrechen einzelner Gesteinspartikel.

Der schlagenden Bewegung ist eine Drehbewegung überlagert. Sie sorgt beim Bohrprozeß dafür, daß das Schneidelement seine Druckimpulse an eine noch unzerstörte Gesteinsoberfläche übertragen kann. Neben der Einleitung der Drehbewegung und der Erzeugung eines Schlagimpulses ist es beim drehschlagenden Bohren notwendig, den Bohrmeißel zusätzlich mit einer statischen Andruckkraft zu beaufschlagen.

Für diese Kraft gilt es, den optimalen Wert zu bestimmen, so daß der Meißel immer in Kontakt mit der Bohrlochsohle bleibt. Ist diese Kraft zu gering, geht ein Teil des Schlagimpulses durch Reflexion am Bohrmeißel verloren. Eine zu hohe Andruckkraft bringt keine Steigerung der Bohrgeschwindigkeit, erhöht aber den Verschleiß erheblich. Neben der Andruckkraft sind die anderen Parameter in Zusammenhang mit der Meißelgestaltung zu optimieren:

- Schneidenform
- Einzelschlagenergie
- Besetzungsmuster
- Drehzahl (Umsetzwinkel)

Die schlagende Gesteinszerstörung erweist sich in Bezug auf Standlänge und Bohrfortschritt als optimal im Hartgestein. Die heute üblichen Verfahren zum Bohren im kristallinen Gestein arbeiten daher auch größtenteils mit dem Prinzip der schlagenden Gesteinszerstörung. Das spröde Bruchverhalten des kristallinen Gesteins begünstigt den schlagenden Bohrprozeß. Es kann daher aus der Sicht der Gesteinszerstörung als das effektivste Verfahren angesehen werden.



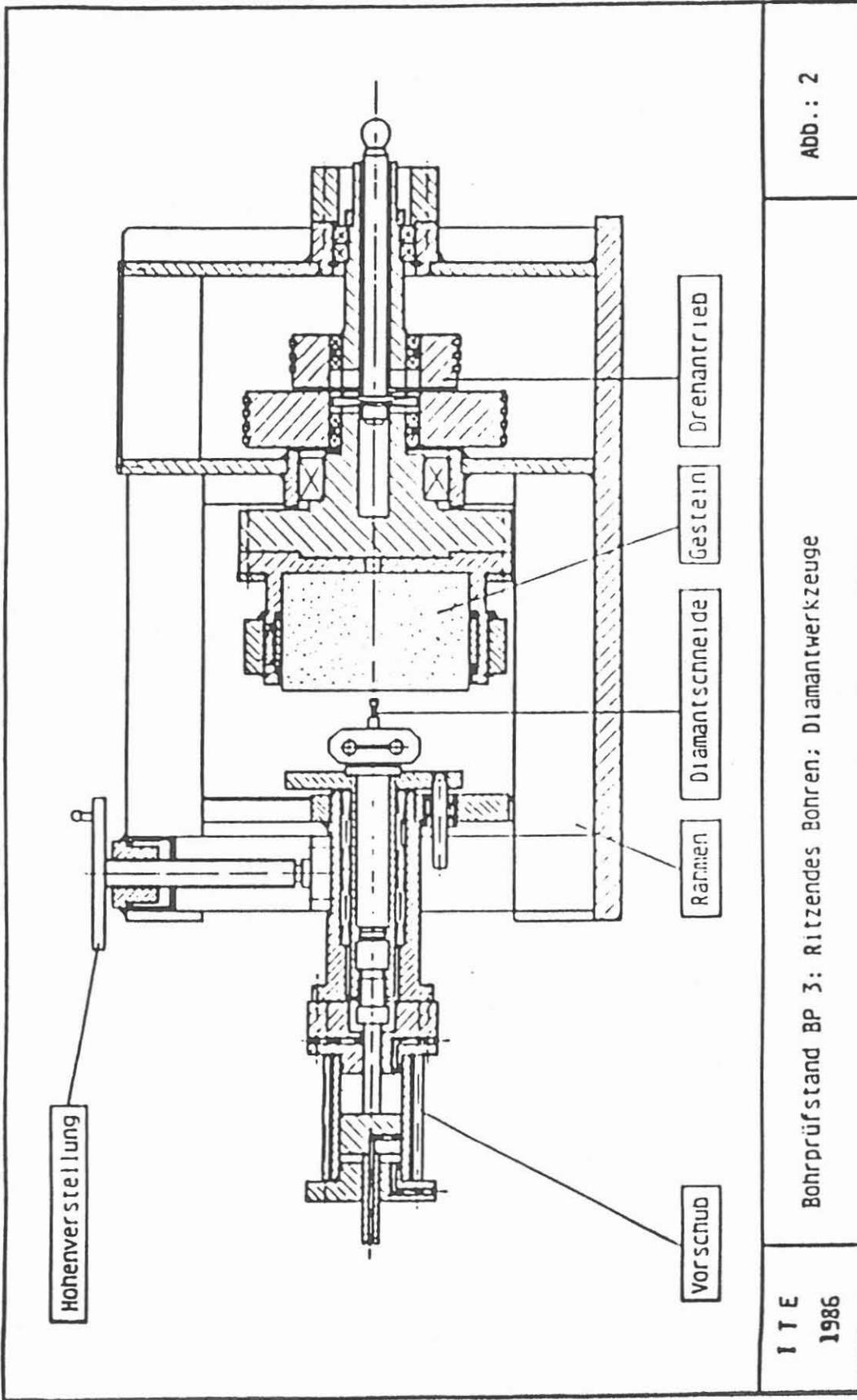
Lfd. Nr.	Bohrprüfung Bezeichnung	Bohrprüfung Mechanismus	Abbildung	Status*	Arbeitsprogramm
1	BP 3	Ritzen, Diamantwerkzeug	2	1	(1)
2	BP 4	Drücken, Rollenbohrwerkzeug	3	2	(2)
3	BP 5	Schlagen, Bohrhammer	-	-	-
3.1	BP 5.1	- pneumatisch	4	3	(3.1)
3.2	BP 5.2	- hydraulisch	5	2	(3.2)
4	BP 2	Bohrautoklav	6	1	-
4.1	BP 2.1	Ritzen, Diamantwerkzeug	7	1	(4.1)
4.2	BP 2.2	Drücken, Rollenbohrwerkzeug	8	1	(4.2)
4.3	BP 2.3	Schlagen, Bohrhammer	9	3	(4.3)
5	-	Funktionsprüfung hydraulischer Bohrhammer	10	2, 3	(5)

* 1 = vorhanden
2 = Komponenten vorhanden
3 = zu entwickeln

ITE
1986

Versuchsstände für die geplanten Untersuchungen zum Bohren in Hartgestein,
KTB-Projekt

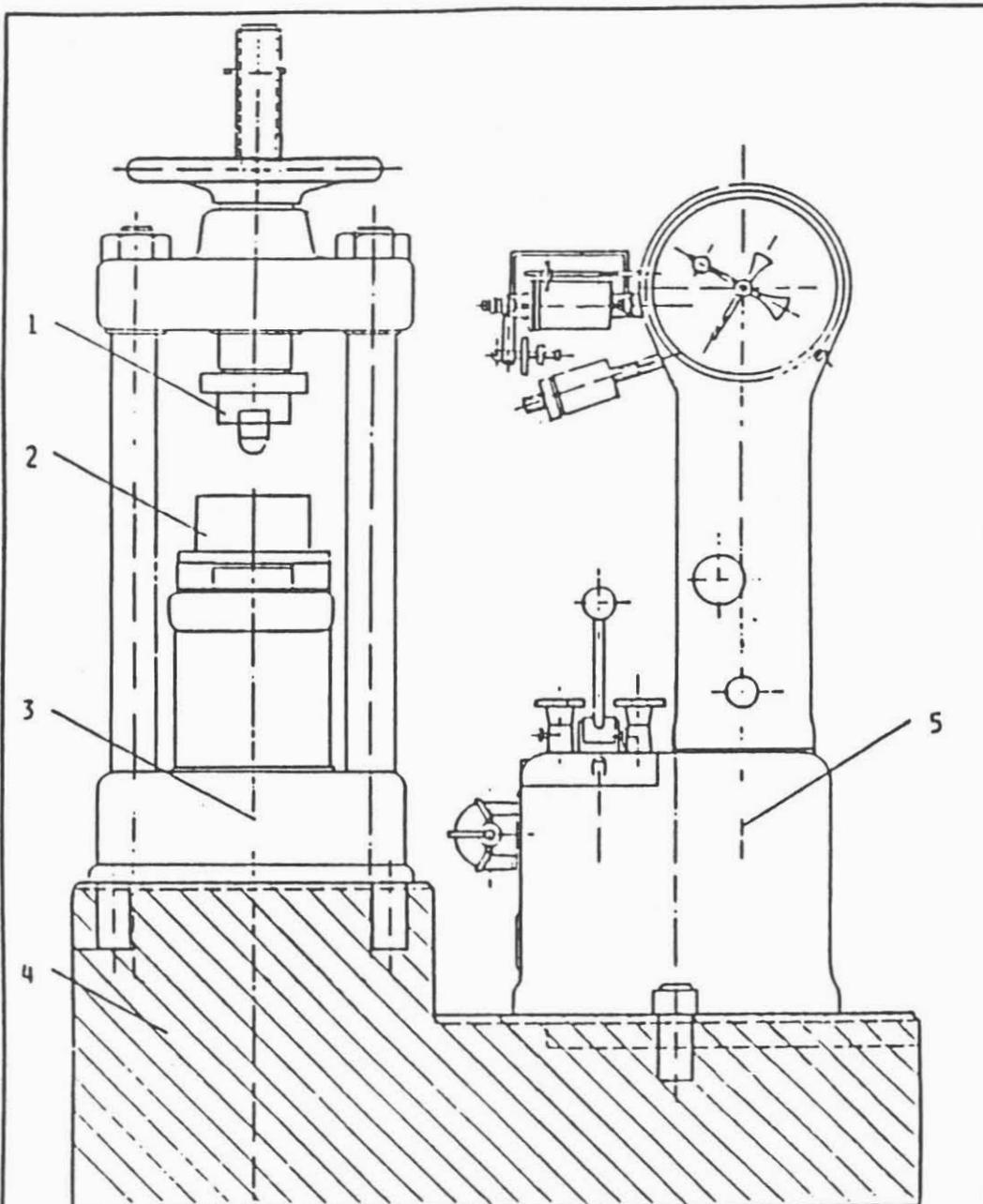
Tab. 1



ITE
1986

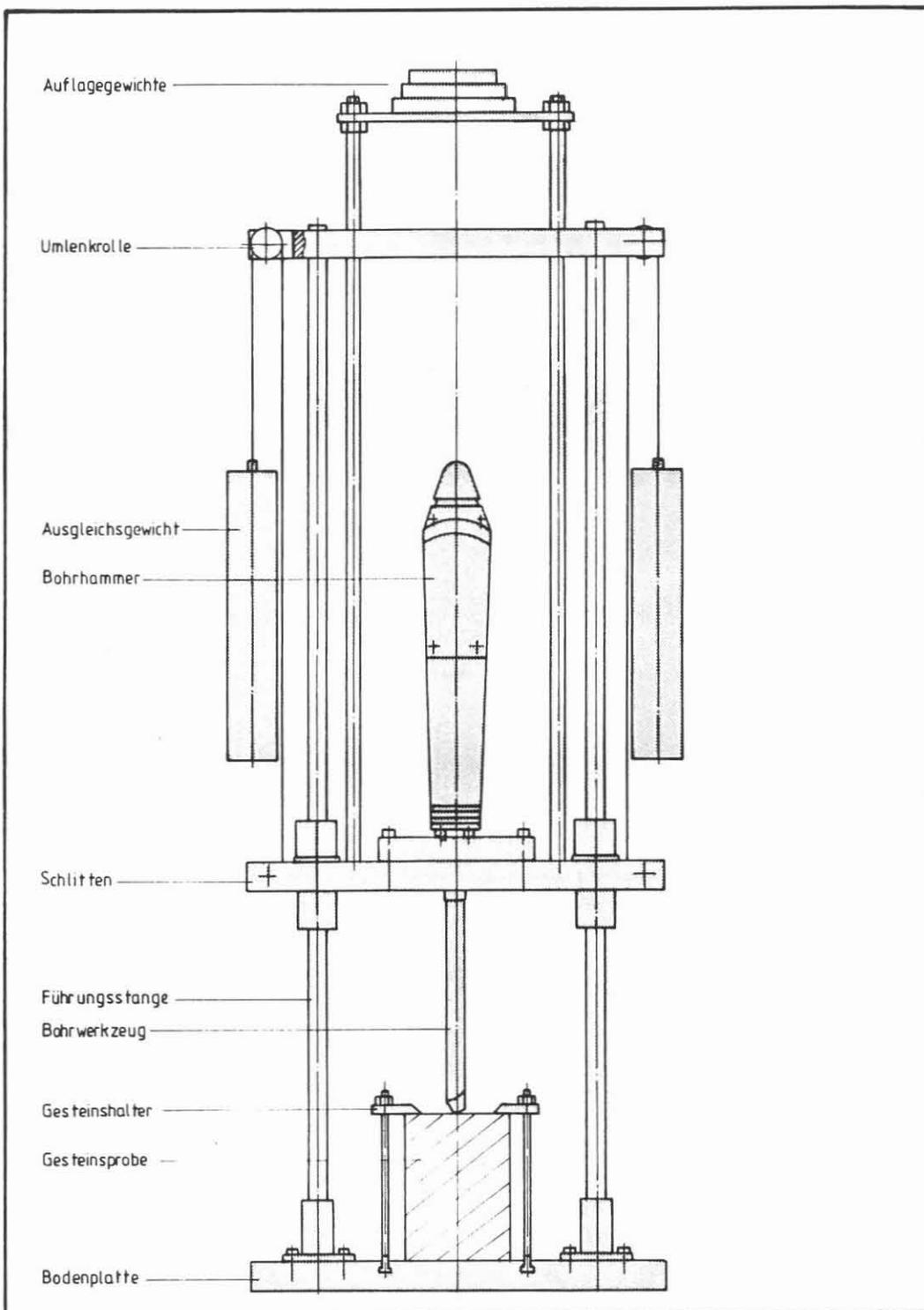
Bohrprüfstand BP 3: Ritzendes Bohren; Diamantwerkzeuge

Abb.: 2



- Erläuterung:
- 1. Werkzeughalter mit Eindrückschneide
 - 2. Gestein
 - 3. Prüfmaschine
 - 4. Fundament
 - 5. Hydraulikpumpe und Pendel

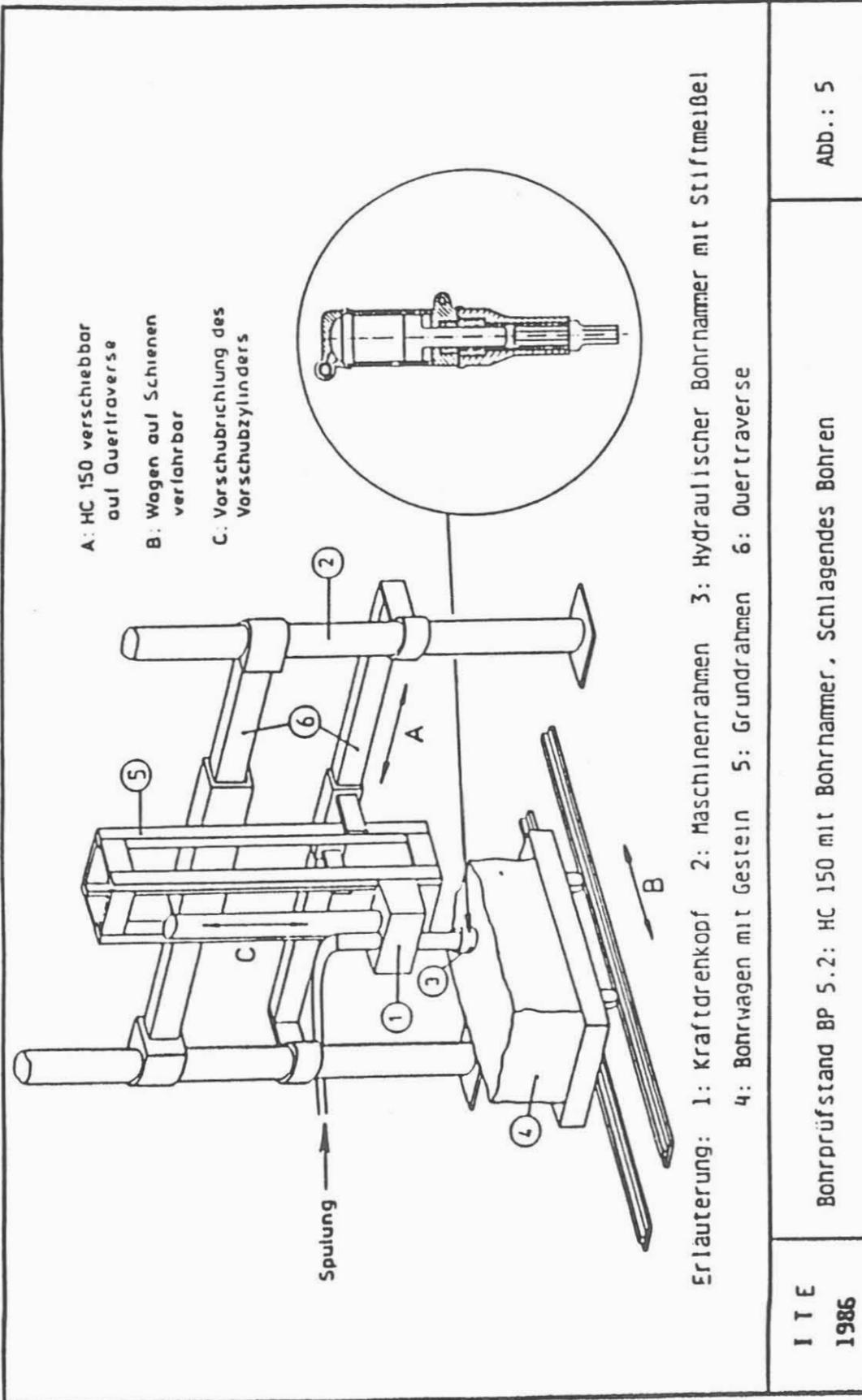
I T E 1986	Bohrprüfstand BP 4: Druckprüfmaschine (Losenhausen), Eindruckversuche	Abb.: 3
---------------	--	---------



ITE

Bohrprüfstand BP 5.1:
elektropneumatischer Bohrhammer
Schlagendes Bohren

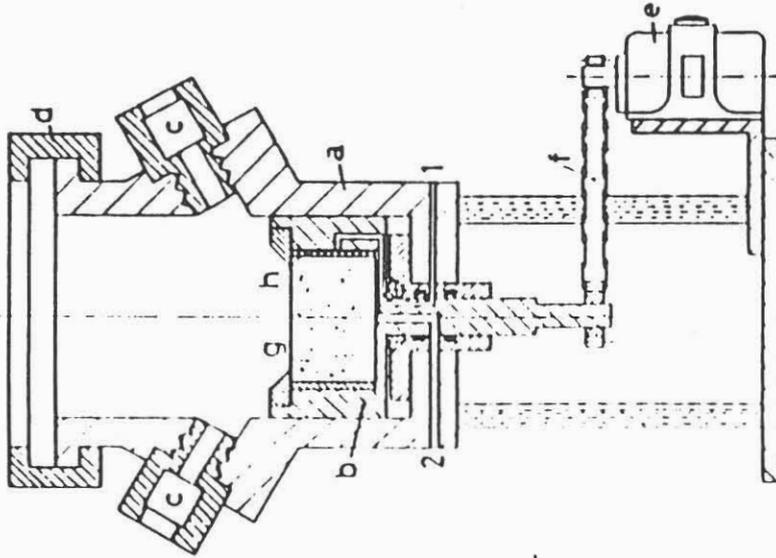
1987
Abb.: 4



I T E
1986

Bohrprüfstand BP 5.2: HC 150 mit Bohrer, Schlagendes Bohren

Abb.: 5



Erläuterungen:

- a Autoklavgefäß
- b Gesteinshalter
- c Schlaugläser
- d Klauenmechanik
- e Getriebemotor
- f Antriebskette
- g Probekörper
- h Gummimanschette
- i Befestigungsring für Probekörper
- 1 Anschluß für Manschettendruck
- 2 Anschluß für den Formationsinhaltsdruck
- 3 Anschluß für den Spülungsdruck

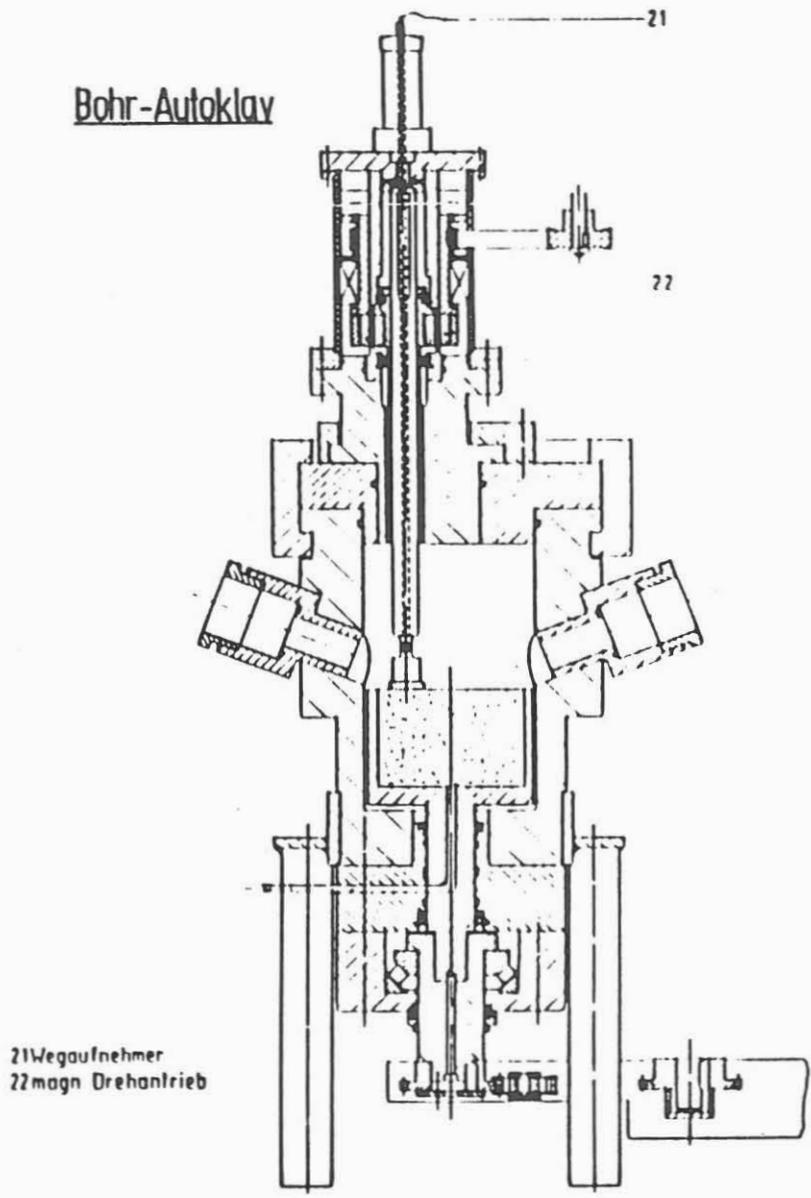
ITĚ

Druckkammer des Bohrautoklaven

1987

Abb. 6

Bohr-Autoklav

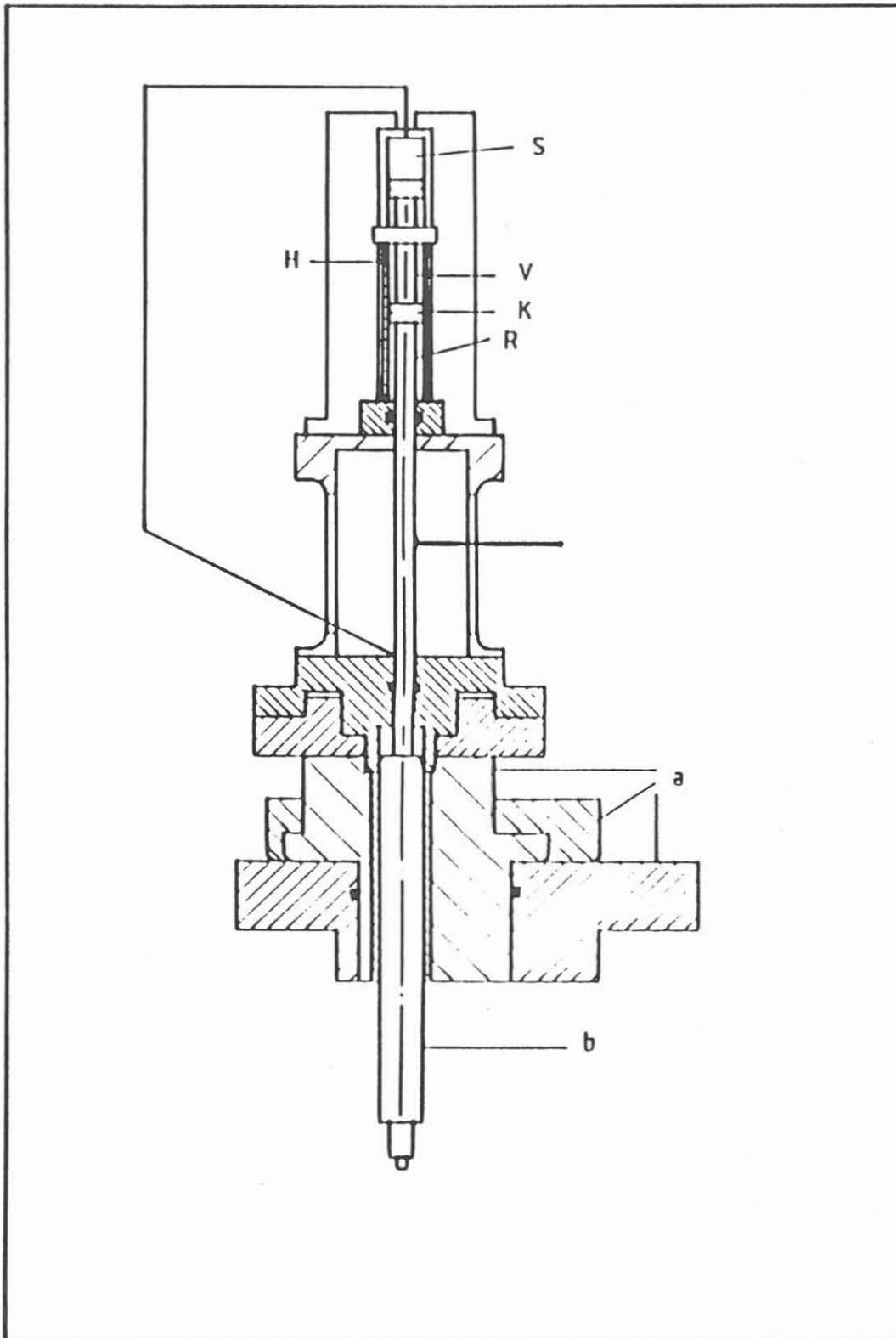


21 Wegaufnehmer
22 magn Drehantrieb

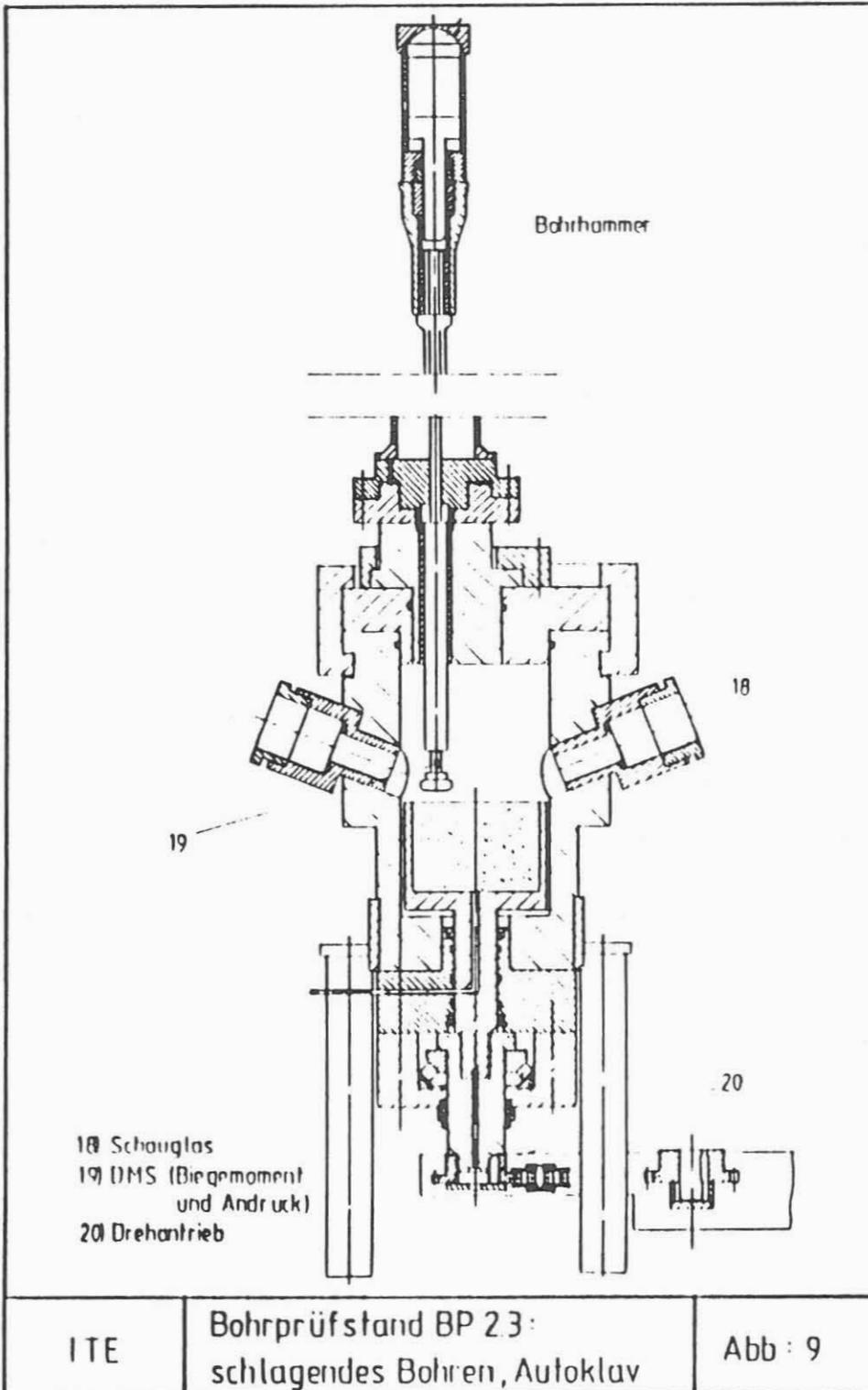
I T E
1985

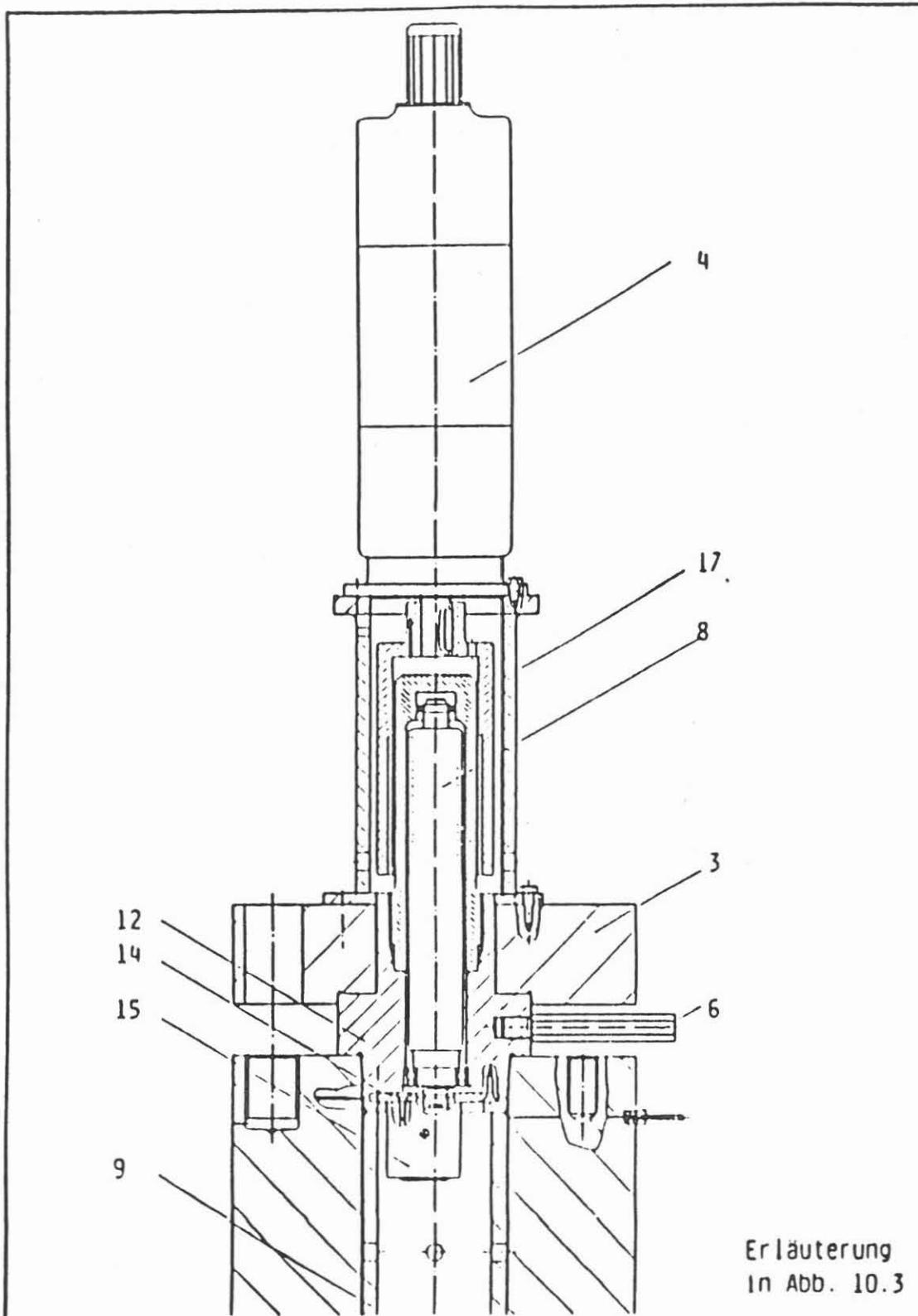
Bohrprüfstand BP 2.1: Ritzendes Bohren,
Diamantwerkzeug, Autoklav

Abb.: 7



ITE	Versuchsaufsatz für	Abb. 8
1987	drückendes Bohren	

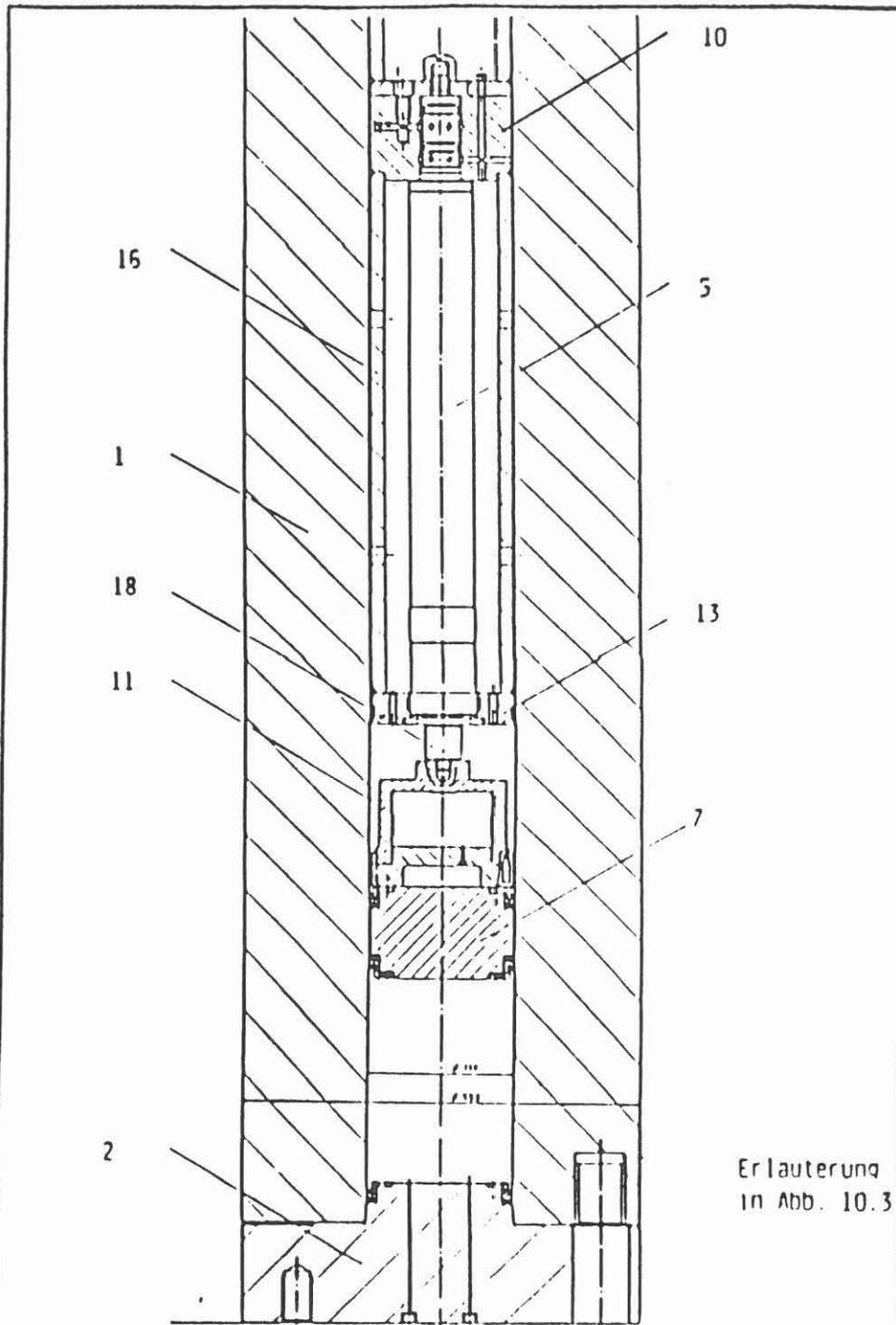




Erläuterung
in Abb. 10.3

Fortsetzung in Abbildung 10.2

I T E 1985	Funktionsprüfung hydraulischer Bohr- hammer in Rohrprüfanlage 2	Abb.: 10.1
---------------	--	------------



Erläuterung
in Abb. 10.3

I T E
1985

Funktionsprüfung hydraulischer Bohr-
hammer in Rohrprüfanlage 2

Abb.: 10.2

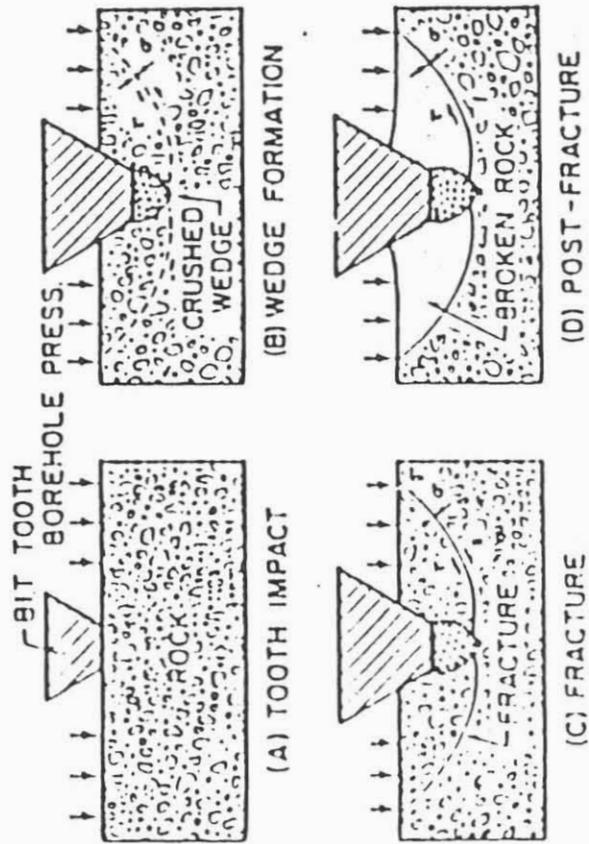
Erläuterung zu Abbildung 10.1 und Abbildung 10.2

1. Rohrprüfanlage 2
2. Unterer Autoklavdeckel
3. Oberer Autoklavdeckel
4. Drehstrommotor
5. Hydraulischer Bohrhämmer
6. Hebebolzen
7. Schwimmender Kolben
8. Magnetkupplung
9. Zwischenstück
10. Steuergehäuse Hammer
11. Kraftmeßdose
12. Abdichtstopfen
13. Hammerjustierung
14. Aufhängung für Hydraulikpumpe
15. Hydraulikpumpe
16. Zwischenstück
17. Motorflansch
18. Übergangsstück

I T E
1986

Funktionsprüfung hydraulischer Bohrhämmer in Rohrprüfanlage 2

Abb.: 10.3

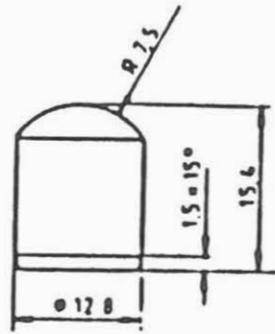


ITE

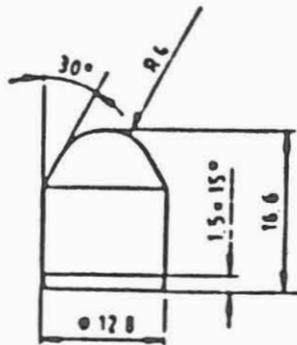
Phasen der Kraterbildung

KTB

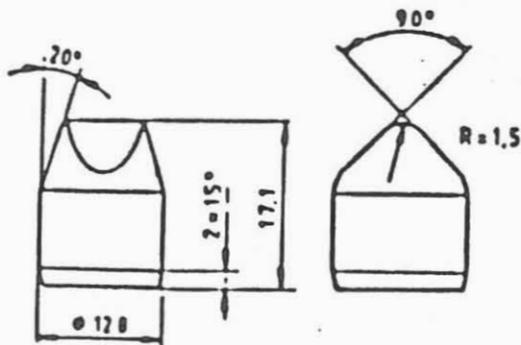
Abb. 11



round



conical

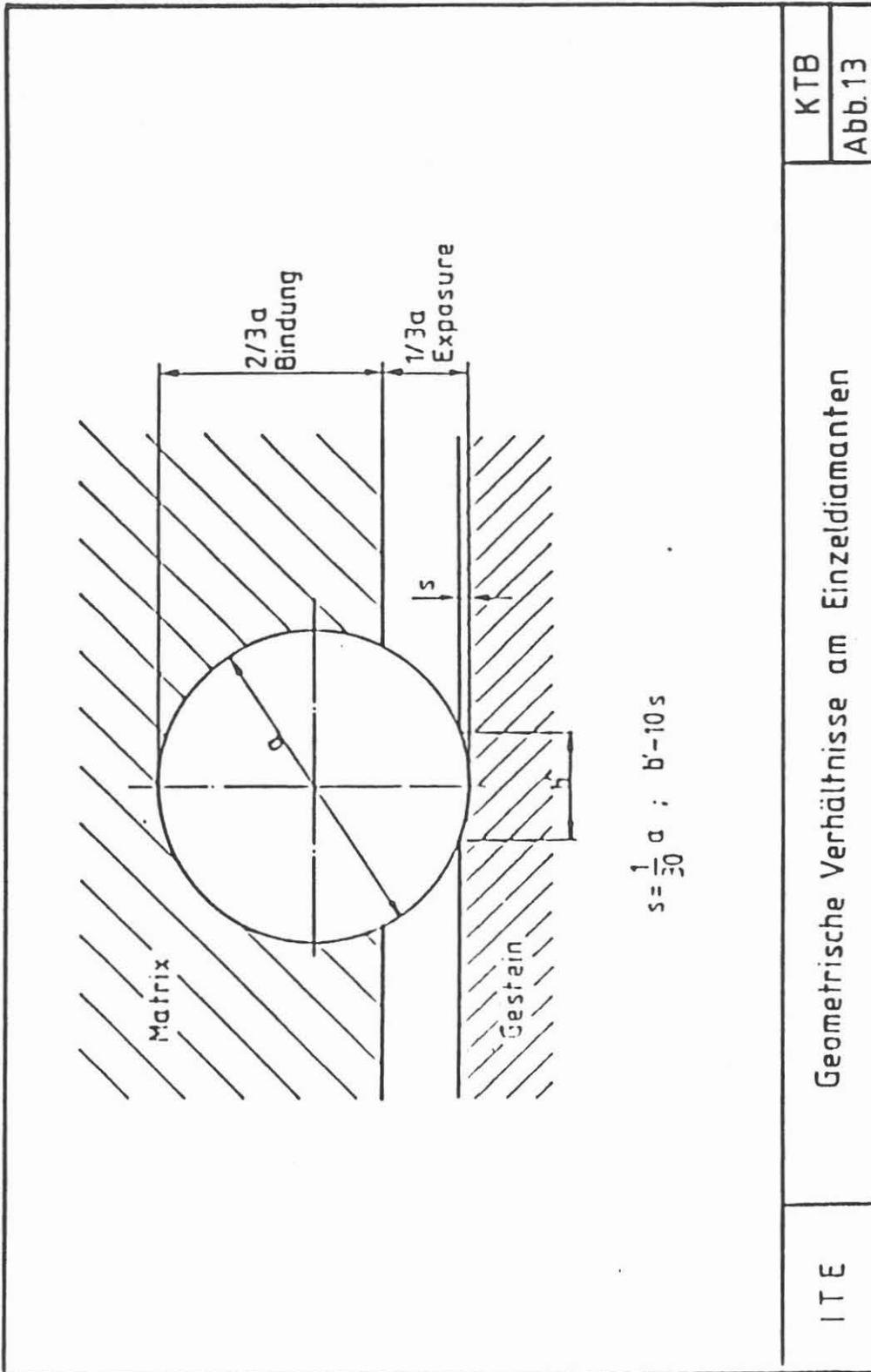


chisel

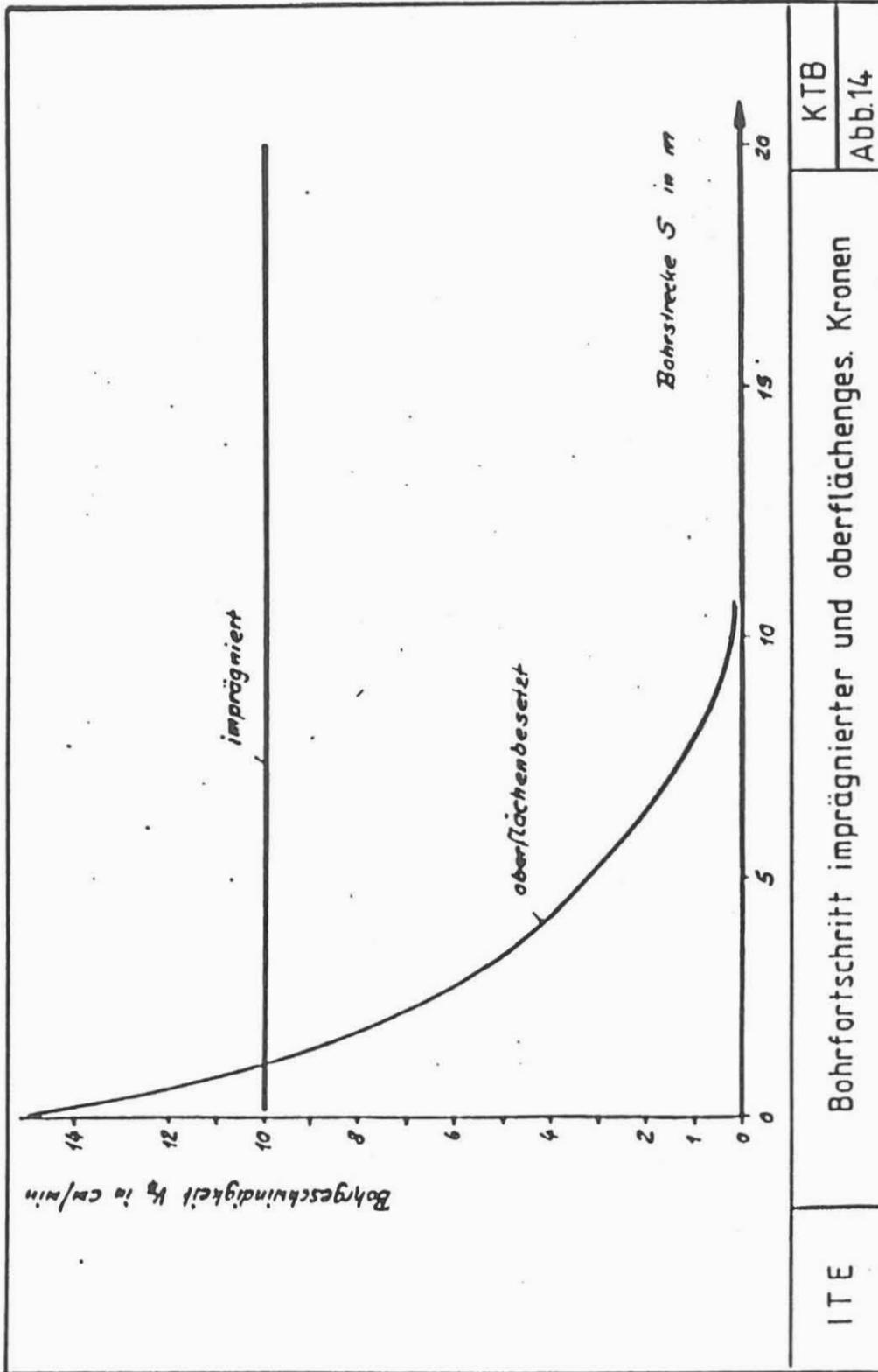
ITE

Hartmetall - Inserts

KTB
Abb. 12



ITE	Geometrische Verhältnisse am Einzeldiamanten	KTB
		Abb.13

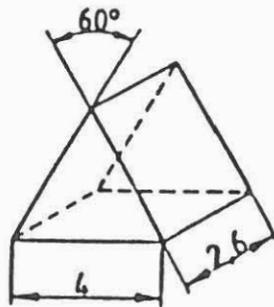
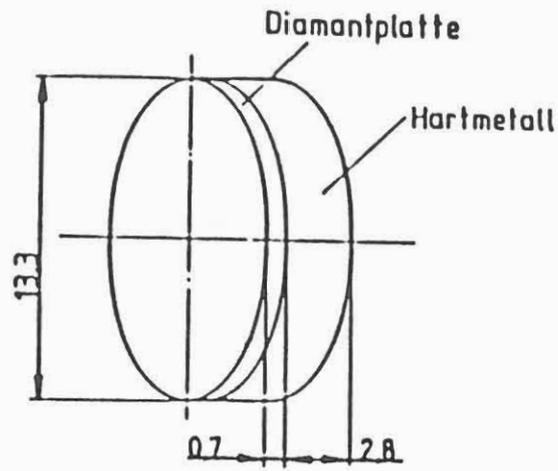


ITE

Bohrfortschritt imprägnierter und oberflächenges. Kronen

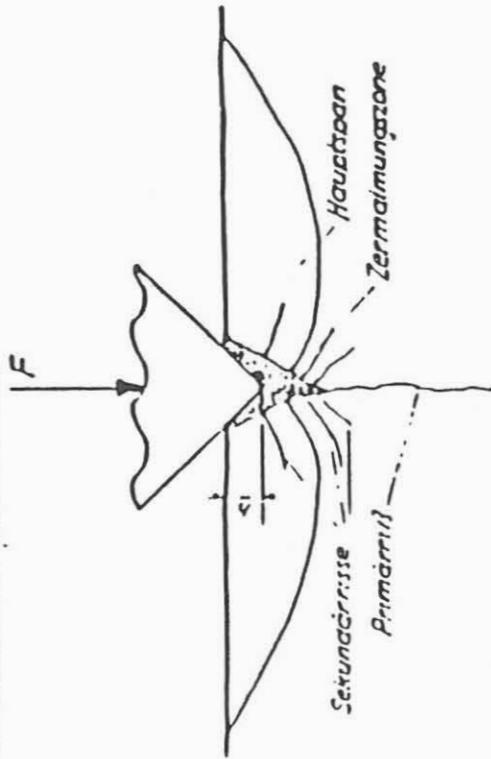
KTB

Abb.14



I T E	Diamantschneiden - Form	K T B
		Abb. 15

Gesteinsbruchmechanismus:



h = Eindringtiefe

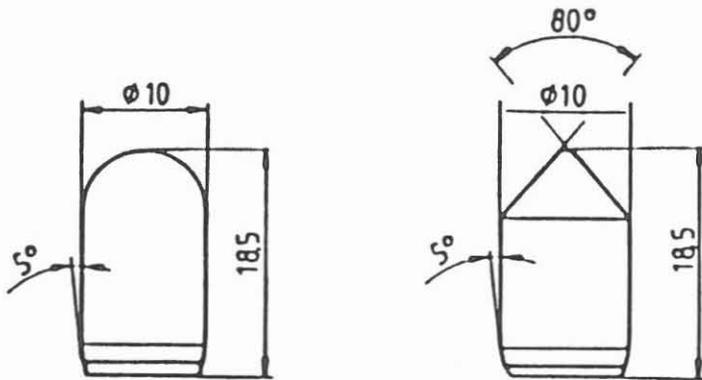
ITE

Schlagende Gesteinszerstörung

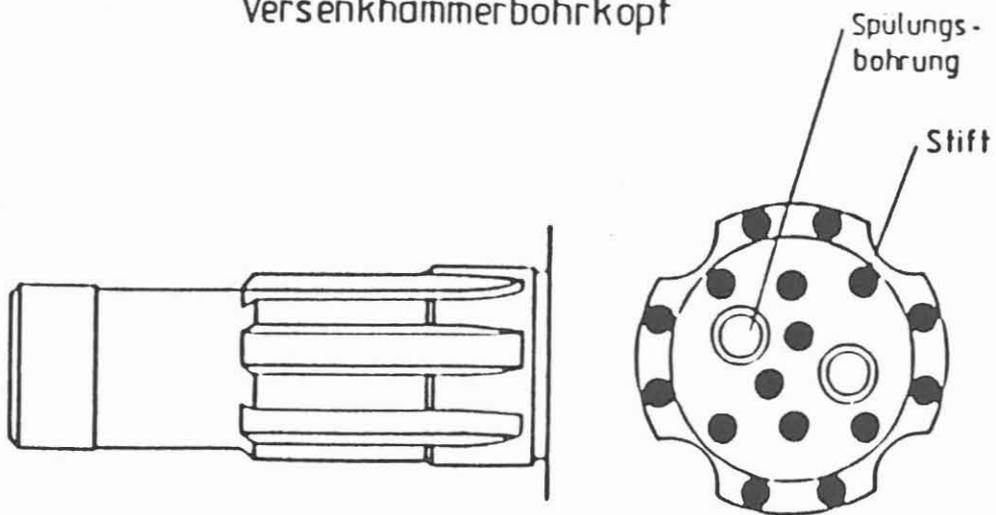
KTB

Abb. 16

Hartmetallstifte



Versenkhammerbohrkopf



ITE	Anordnung von Einzelstiften auf einem Versenkhammerbohrkopf	KTB
		Abb 17