



Vertikale Teufen im Festgestein mit der Schmelzbohrtechnik

Dipl.-Ing. Rolf Bielecki, Ph. D.
Wissenschaftsstiftung Deutsch-Tschechisches Institut
Telefon: 040 42883-2439

Zusammenfassung

Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken. Hier bitte die Zusammenfassung einfügen und auf maximal 10 Zeilen beschränken.

1 Einführung

Die Erschließung des unterirdischen Bauraumes durch Teufen im Festgestein stellt eine besondere ingenieurtechnische Aufgabe dar, die in Anbetracht der ihr innewohnenden Komplexität je nach Tiefe nur mit unterschiedlichsten technischen Überlegungen u. a. aus folgenden Fachrichtungen zu lösen ist:

Physik, Chemie, Bau, Geologie, Mechanik, Vermessung, Elektrotechnik, Technische Informatik, Thermodynamik, Hydromechanik und Mikrometeorologie.

bohrlochbohrungen nur der Bohrlochrand, wobei der innere Kern mechanisch zu lösen ist.

Dazu ist der Nachweis zu erbringen, dass die bereits vorhandenen Risse und Klüfte und die durch das Schmelzen entstehenden Risse im Festgestein durch die erzeugte Gesteinsschmelze auf genügend großer Tiefe gegen hohe Drücke vollständig verschlossen werden. Außerdem ist die verglaste Bohrlochwand auf ihr Langzeitverhalten (Alteration) zu überprüfen.

2 Unterirdische Hohlraumherstellung mit der Schmelzbohrtechnik

Für das Schmelzbohren sind in den letzten Jahren in Deutschland folgende Patente angemeldet:

- am 3. Juli 2008 von der Firma Dypen aus Košice/Slowakei unter der Nr. 10 2008 031 490 eine Vorrichtung zum Einbringen eines Tiefbohrloches in Gestein mit der Flammenschmelztechnik (Patent erteilt am 26.08.2010),
- am 2. Oktober 2008 von Werner Foppe, D-52511 Geilenkirchen und Prof. Dr. Dr. Franz Josef Rademacher, D-89075 Ulm unter der Nr. 10 2008 049 943 ein Verfahren und die Vorrichtung zum Schmelzbohren mit einer Metallschmelze.

Weitere Patente für das Schmelzbohren unter Einsatz der Flammenschmelztechnik wurden in den letzten Jahren in der Slowakei und in den USA angemeldet.

Zur wasserdichten Ausführung unterirdischer Hohlräume bis in Tiefen > 1.000 m sollte das Festgestein je nach dem Durchmesser des Hohlraumes individuell geschmolzen werden, und zwar nach einer durchgeführten Teilanalyse aus wirtschaftlichen Gründen bei Groß-

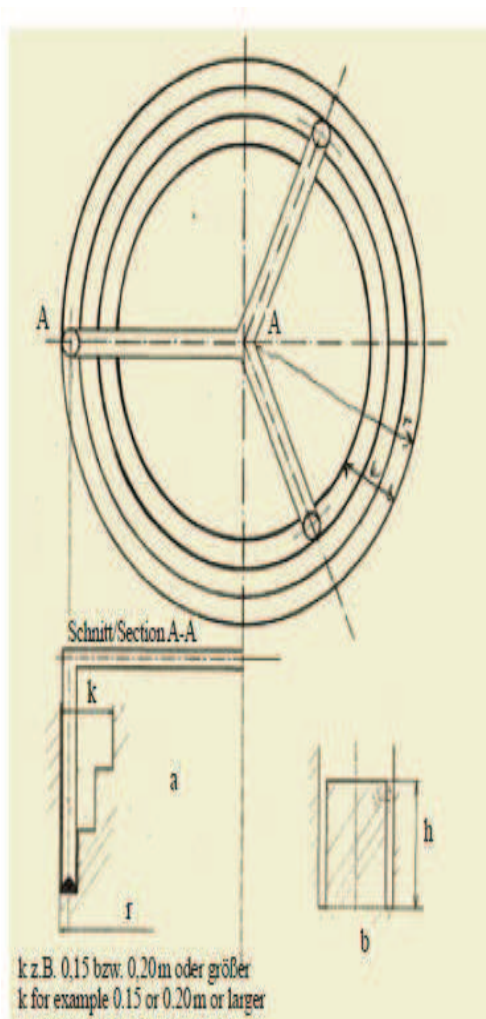


Bild 1: Abmessung Bohrlochrand-Schmelze

Kritische Detailfragen zum Schmelzen des Festgesteins z. B. Granit mit der Flammenschmelztechnik sind dabei u. a.:

Welche Reaktionen stellen sich ein, wenn große Mengen Wasser beim Schmelzprozess Zutreten?

Das Schmelzgestein hat eine Temperatur von 1.400 bis 1.800 °C.

Die Sauerstoff/Wasserstoff-Schmelzflamme hat eine Temperatur von ca. 2.530 °C.

Das Schmelzen kann angewendet werden bei Wasserzuflüssen aus Rissen, die im Festgestein bereits vorhanden sein können und durch solche, die durch die Schmelztemperatur zusätzlich erzeugt werden.

Das Wasser entzieht beim Verdampfen der Schmelze Energie, wirkt aber additiv durch den entstandenen Wasserdampfdruck auf die Schmelze ein.

Das Wasser verdampft schrittweise.

Der Wasserdampf drückt die Schmelze in die vorhandenen Risse und Klüfte, während die Flamme (Temperatur ca. 2.530 °C) weiter brennt (kann auch unter dem Wasserspiegel brennen).

Bei größeren Wasserzuflüssen aus Klüften sind zusätzlich besondere Abdichtungsmaßnahmen zu treffen.

Insofern sind Standorte möglichst ohne Klüfte auszuwählen.

Ist der verglaste Gesteinssaum am geschlossenen Bohrlochrand hydraulisch dicht?

Die Antwort hängt von dem gewählten Standort z. B. der Teufe ab:

Der Gesteinssaum ist durch die Auswahl des Gesteins, abgesehen von den Rissen, ohne Schmelze hydraulisch dicht, was durch Probebohrungen zu untersuchen ist. Die Schmelze verschließt die Risse im Gestein und schließt die Poren des Gesteinssaumes.

Die Menge der Schmelze kann durch die Schmelzflamme reguliert werden.

Zum Nachweis der Tiefe der Risschließung sind Thermoschock-Untersuchungen erforderlich. Erste Untersuchungen wurden bereits an der TU Košice und der Slowakischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt.

Wie ist das Langzeitverhalten (Alteration) der erstarrten Schmelze?

Das Gestein hat eine kristalline Struktur, die Schmelze demgegenüber eine amorphe, die aber das gleiche Langzeitverhalten aufweist wie das Ursprungsgestein, da beide über die gleichen Elemente verfügen (siehe: Pavol Rybar, Tobias Lazar, Henrich Hamrack, et al.: Studium problematik tavenia nerastných surovin v extrémnych podmienkach, 2004, TU Košice, ISBN: 80-8073-085-7).

Welche Einflüsse hat das chemische Milieu, d. h. die chemische Zusammensetzung des Gesteins und des Kluftwassers auf die erstarrte Schmelze?

Die Einflüsse auf die erstarrte Schmelze sind die gleichen wie die Einflüsse auf das ursprüngliche Gestein. Aggressive Stoffe beeinflussen das chemische Milieu im Granitgestein nicht, da sie lediglich in geringen Mengen vorhanden sind.

Bakteriologische Einflüsse sind in der angestrebten Tiefe nicht nachweisbar.

Wie ist das Abkühlungsverhalten der erstarrten Gesteinsschmelze (Kontraktionsrisse)?

Der Abkühlungsvorgang der Schmelze ist wegen der niedrigen thermischen Leitfähigkeit langsam ($\epsilon = 0,25$ bis $0,73 \text{ W (m } ^\circ\text{C)}$). Die Thermoschockuntersuchungen werden hierzu detaillierte Erkenntnisse aufzeigen.

Eine Anbindung des Verfüllmaterials an den Gesteinssaum findet nicht statt.

Evtl. auftretende Kontraktionen durch Thermospannungen sind durch Nachinjektionen zu schließen.



Wie weit dringt die Gesteinsschmelze in offene Trennflächen in das Gebirge ein und wovon hängt die Eindringtiefe ab?

Die Eindringtiefe der Schmelze hängt von ihrer Viskosität und der Menge ab, was über den Schmelzvorgang reguliert werden kann.

Die Tiefe der Rissverfüllung kann durch Messverfahren, die nicht materialzerstörend sind, ermittelt werden, beispielsweise durch Schallmessungen, zusätzlich unterstützt durch Bohrungen.

Die Herstellung von dauerhaft wasserdichten Hohlräumen im tiefen Festgestein stellt bisher ein besonderes Problem dar. Hier wird mit der Gesteinsschmelze ein großer Innovationsschritt getan.

3. Internationale Versuche mit der Schmelzbohrtechnik

Schon in den 1970er Jahren wurden in Deutschland und den USA Testversuche mit der Schmelzbohrtechnik durchgeführt. In Los Alamos in Amerika wurde zunächst für die Gesteinsschmelze Metall mit hohem Energieaufwand durch elektrischen Atomstrom zum Glühen gebracht, während in Deutschland die Flammenschmelztechnik vom Triebwerkhersteller MBB bevorzugt wurde.

Für die Auswahl des Standortes einer mit der Schmelzbohrtechnik herzustellenden Schachanlage z. B. für die Abfallbeseitigung ist zusätzlich zu weitreichenden Erkundungsbohrungen ein spezielles Laboratorium zur späteren Steuerung der komplizierten thermodynamischen Prozesse beim Schmelzen der Gesteine einzurichten.

3.1 Deutsche Versuche

Ende der 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts wurden erste deutsche Bohrversuche unter Federführung des Triebwerkherstellers MBB durchgeführt. Sie zeigten überraschende Ergebnisse: Der Abgasstrahl eines Raketentriebwerkes erzeugt Temperaturen um 2.000°C bis 2.500°C. Diese plötzliche extreme Hitzeeinwirkung führt selbst an härtesten Gesteinen zu so hohen Spannungen, dass sie splintern bzw. schmelzen.

In der Realität können damit Bohrgeschwindigkeiten von 30 bis zu 90 Meter pro Stunde erreicht werden. Damit wäre ein „Heißgasbohrer“ aber immer noch mindestens 10mal schneller als mechanische Bohrmaschinen. Schon nach damaligen Überlegungen könnte die Flammenschmelztechnik nach erfolgreicher Forschung auch beim unterirdischen umweltschonenden Bau von Verkehrstunneln sowie von Ver- und Entsorgungsleitungen und zur Verlegung von Pipelines in Hartgestein bzw. gefrorenem Boden sowie durch Großbohrungen zur Ablagerung radioaktiver und toxischer Abfälle in

großen Tiefen (>1.000m) eingesetzt werden. Bisher blieben derartige Überlegungen jedoch aus Gründen der hohen Entwicklungskosten nur eine Vision. Noch befinden sich deutsche Schmelzbohrverfahren im Labor- bzw. Feldversuchsstadium. Verwiesen sei in diesem Zusammenhang auch auf die Forschungsarbeiten des Ingenieurs Werner Foppe, AT-Consult, Geilenkirchen, Deutschland.

3.2 Amerikanische Versuche

Der Einsatz der Schmelztechnik für das Abteufen von vertikalen Bauten oder für das horizontale Auffahren von Linienbauten kann auf weitere weltweite Testversuche aufbauen. So wurden bereits in den Laboratorien von Los Alamos/New Mexiko in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts unterirdische Vortriebsmaschinen für die Schmelztechnik entwickelt. Diese führten in der Nevada-Wüste Untertagebauten von nicht bekannt gegebener Länge aus. Die gewonnenen Ergebnisse zeigten, dass diese Anlagen eine dreimal höhere Leistung erreichten und die Kosten 40 % niedriger waren als bei bisherigen klassischen Technologietypen. Trotz der angeführten Erfolge in Los Alamos stellten jedoch selbst die Autoren fest, dass diese technologischen Anlagen in bewohnten Gebieten nicht eingesetzt werden können, weil die Wärmeenergiequelle zum Gesteinsschmelzen ein Atomreaktor war, der bei einer eventuellen Havarie das Grundwasser in den Gebieten verseuchen würde, in denen diese Technologie eingesetzt wird. Laut gewonnenen Angaben aus dem Internet schlugen die Autoren selbst die Nutzung eines chemischen exothermischen Prozesses vor, der diese Energiequelle ersetzen sollte.

Die in Los Alamos entwickelten Prototypanlagen arbeiteten beim Bohren auf dem Prinzip der Energiequelle mit Elektrowiderstand, wobei der Schmelzkopf aus Molybdän bestand. Der eigentliche Schmelzkopf wurde dabei mit dem elektrischen Strom auf die Temperatur um 1.800 °C zum Glühen gebracht. Der Schmelzkopf war konusförmig und auf die Kopfmittle wirkte eine Anpresskraft, die den Druck in der zerschmolzenen Gesteinszone bildete. Dieser Druck erzeugte im Gestein Radialrisse und gleichzeitig gelang unter seiner Einwirkung das zerschmolzene Gestein in die gebildeten Risse. Eine schematische Darstellung dieser Anlage ist in der Bild 2 angeführt.

Für den horizontalen Vortrieb arbeitete das Institut für Los Alamos für Untertagebauten bis zum Durchmesser von 12 m. Diese Prototypen arbeiteten auf dem Prinzip des Gesteinsschmelzens mit dem speziellen ringförmigen Schmelzindenter, der bis zu 1.800 °C geglüht wurde und bei dem sich ein Kern wie bei den klassischen geologischen Kernbohrungen bildete. Dieser Kern wurde weiter durch thermodynamische Spannungen zerstört, die durch speziell geglühte nadelförmige Indentoren hervorgerufen wurden. Die schematische Darstellung dieses Prinzips ist in der Bild 3 dargestellt.



Die Wärmeenergiequelle wurde dabei über den Sekundärkreis des Atomreaktors in die oben erwähnten Indentoren übertragen. Das Medium des Übertragungssystems der Wärmeenergie war flüssiges Metall. Die schematische Darstellung dieser Übertragung ist in der Bild 4 angeführt.

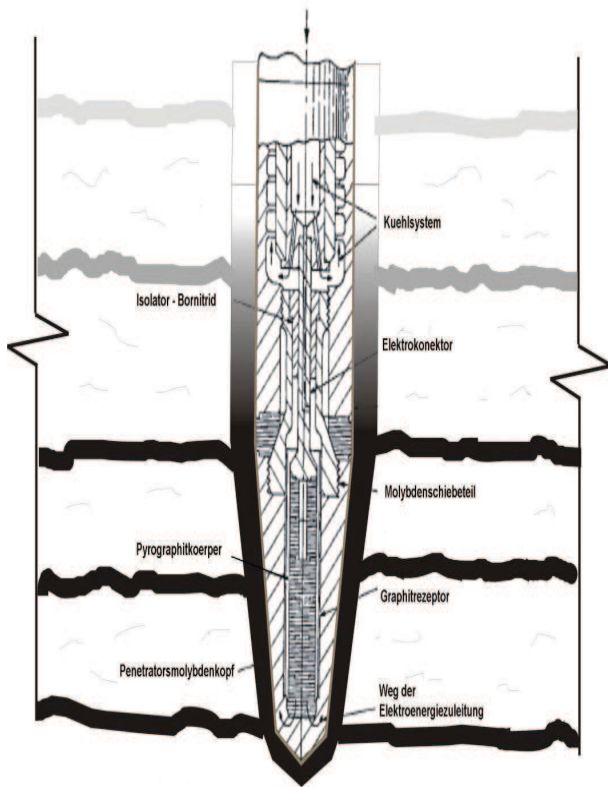


Bild 2: Schmelzkopf

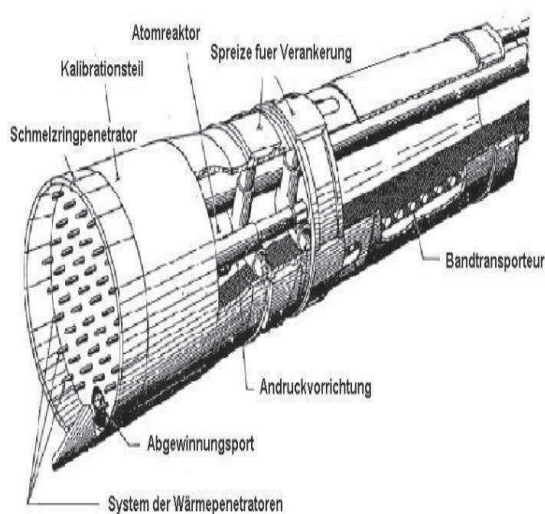


Bild 3: Prinzip des amerikanischen Bohrkopfes

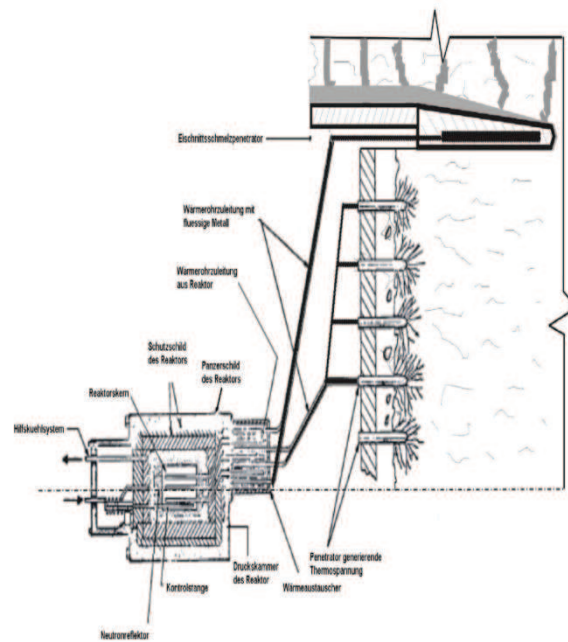


Bild 4: Zuleitung flüssiges Metall am Bohrkopf

3.3 Slowakische Versuche

Erste Flammeninjektoren für die Verbrennung eines Gemisches aus Wasserstoff-Sauerstoff-Gasen zur Gesteinsschmelze entstanden mit den Erfahrungen aus Deutschland und den USA unter Mitwirkung deutscher Forscher in den 1990er Jahren in slowakischen Laboren. Sie wurden die Grundlage aller bisherigen Patententwicklungen und Konstruktionsplanungen.

Hierzu wurde zunächst ein Flammeninjektor aus Kobalt hergestellt, auf dessen Oberfläche durch Plasmatechnologie eine 200 Mikrometer dicke keramische Schicht aus Hafniumnitrid aufgetragen wurde. Am Kopfboden hatte der Injektor eine Abflussdüse, über die im stochiometrischen Verhältnis ein Sauerstoff-Wasserstoffgas strömte, wodurch das Gestein bei dessen Verbrennung schmolz. Unter Laborbedingungen gem. Bild 5 entstanden dabei Löcher von ca. 70 mm Durchmesser in verschiedenen Gesteinsblöcken mit den Abmessungen 0,5 x 0,5 x 0,5 Meter.

Damit keine Radialrisse infolge des hydraulischen Spaltdruckes entstehen, war es erforderlich, eine neue technische Philosophie des Mechanismus der Bildung von Radialrissen mittels des Spaltdruckes unter dem Kopf des Flammeninjektors zu entwickeln. Dabei war zu sichern, dass die Brennprodukte Wasserdampf vom Bereich unter dem Kopf über die abgeteufte Bohrung in die freie Atmosphäre entweichen können.

Hierfür wurde die Form des Flammeninjektors mit umgekehrtem Konus entworfen, der bei der Technologie in Los Alamos entwickelt wurde. Der neuentworfene und hergestellte Injektor ist in der Bild 6 dargestellt. Durch die angeführte Form des Injektors wurde auch deutlich, dass es nicht notwendig ist, mit einer großen Axialkraft

auf die Achse des Injektorkörpers zu wirken, wie es bei der Los Alamos entwickelten Abteuftechnologie erforderlich war.

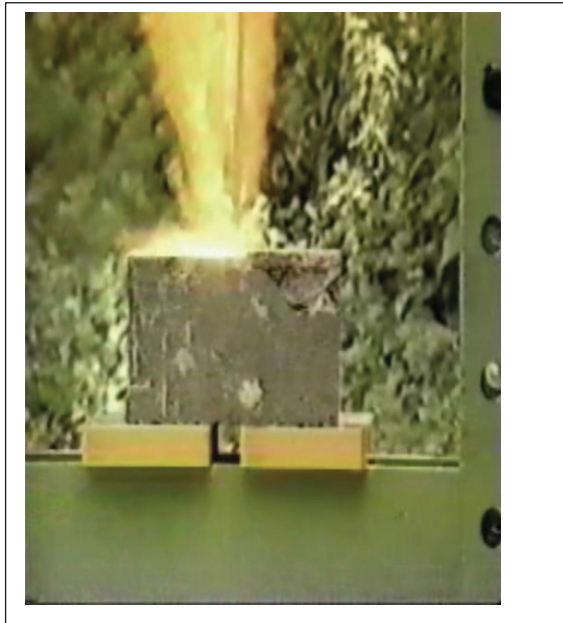


Bild 5: Bohrversuche im Labor

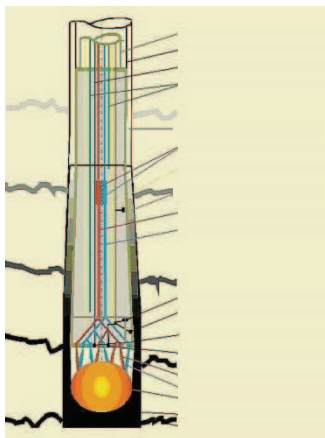


Bild 6: Flammeninjektor

Für größere Schacht-Querschnitte sind aus Gründen der Wasserdichtheit und insbesondere der Wirtschaftlichkeit - wie bereits erwähnt - Bohrlochrand-Schmelzungen zu empfehlen.

Für das Lösen des inneren Kernes derartiger Querschnitte können z. B. weitere Vertikalbohrungen gemäß Bild 7 unter Einsatz der Flammenschmelztechnik oder Sprengungen bzw. der Abbau mit einer von den Professoren T. Lazár und F. Sekula et al., TU Košice entwickelten Vortriebsmaschine gemäß Bild 8 unter Anwendung der Flammenschmelz-technik ausgeführt werden.

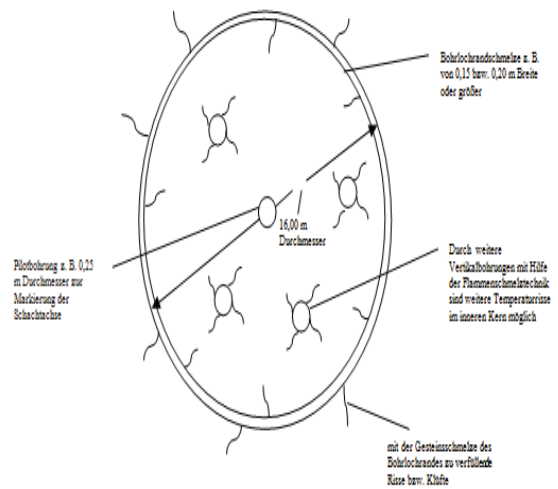


Bild 7: Gesteinsabbau bei größeren Schacht-Querschnitten

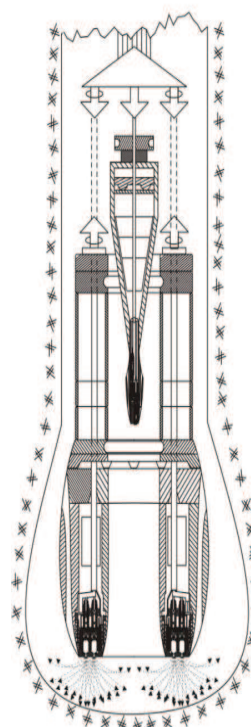
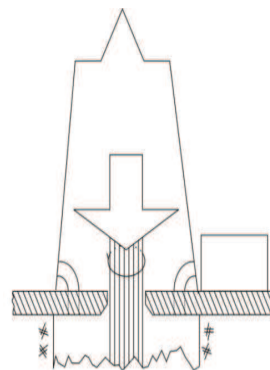


Bild 8: Prinzip einer Maschine für größere vertikale und horizontale Vortriebe unter Anwendung der Flammenschmelz-technik



4. Notwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Die gemäß Abschnitt 2 am 26.08.2010 patentierte Vorrichtung der Fa. Dypen ermöglicht mit der Flammenschmelztechnik im Festgestein die Herstellung eines Bohrloches von bis zu 60 cm Durchmesser. Mit dieser Vorrichtung können Bohrungen von mehreren 1.000 m Tiefe hergestellt werden, wobei das Gestein des Bohrloches insgesamt geschmolzen wird.

Im Übrigen werden für die noch durchzuführenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Großlochbohrungen zunächst für eine in den nächsten 3,5 Jahren herzustellende Machbarkeitsstudie ca. 4 Mio. Euro und für die praxisreife Entwicklung der Schmelzbohrtechnik von Großlochbohrungen in weiteren 15 Jahren ca. 200 Mio. Euro erforderlich.

5. Schlussbetrachtungen

Die Schmelzbohrtechnik kann nicht nur bei vertikalen Teufen im Festgestein eingesetzt werden, sondern auch bei der Herstellung von horizontalen Linienbauwerken im kristallinen Gestein.

Ein Vorteil der Schmelzbohrtechnik gegenüber dem Abbau z. B. mit Rollenmeißel bei Großbohrlochbohrungen ist darin zu sehen, dass beim Schmelzen z. B. schneller größere Bohrtiefen erzielt werden können und damit der Kern in größeren Abschnitten über mehrere Meter gelöst werden kann. Generelle Vorteile dieser Technik sind die damit verbundene kürzere Bauzeit, Wasserdichtheit und Wirtschaftlichkeit der Ausführung.

Für größere Tiefen wird es notwendig, flüssigen Wasserstoff und Sauerstoff zu verwenden, deren spezifisches Gewicht gegenüber dem gasförmigen Zustand günstiger ist. Damit der mit Hochdruckpumpen zu fördernde Wasserstoff und Sauerstoff im flüssigen Zustand bleibt, ist der Mantel ihrer Zuführungsleitungen zur Temperaturisolierung mit flüssigem Stickstoff von $-195,8^{\circ}\text{C}$ zu umgeben.

Allen, die sich künftig mit der Schmelzbohrtechnik näher befassen wollen, wünsche ich viel Erfolg und ein herzliches „Glückauf“.