

1 Einführung

Der bergmännische Bau von unterirdischen Anlagen hat sich in den letzten Jahren weiter etabliert. Er ermöglicht es, Bauwerke unter Tage mit äußerst geringer Beeinträchtigung oberirdischer Bebauung oder Verkehrsströme zu erstellen. Speziell in Innenstadtbereichen mit sensibler Infrastruktur und hohen Auslastungsgraden besteht ein enormer Bedarf an bergmännisch erstellten Bauwerken.

Die auf diese Weise geschaffenen Hohlräume werden bislang vorwiegend für die Aufnahme unterirdischer Verkehrsanlagen genutzt. Genauso sind aber auch andere Nutzungen gegeben, wie z. B. Anlagen zur Energiegewinnung, Lager- und Sicherheitsräume, Leitungsgänge und nicht zuletzt unterirdische Urbanisationen. Besonders in Japan liegen wegen des dort stark eingeschränkten Raumangebotes weitreichende Konzepte und Erfahrungen vor (Bild 1-1).

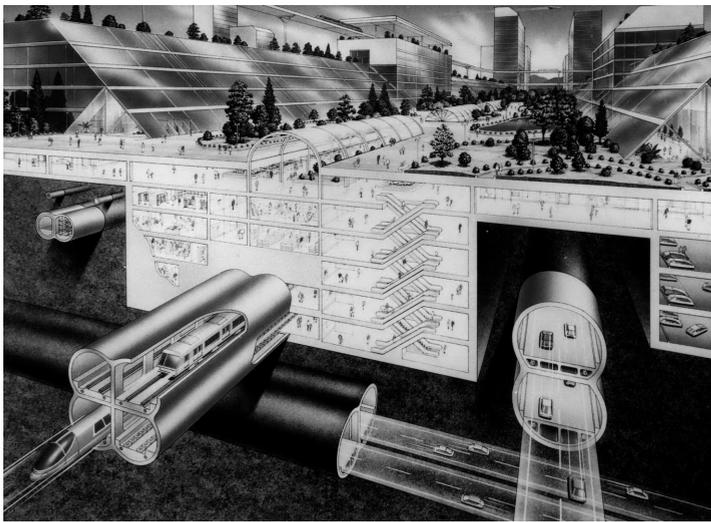


Bild 1-1 Japanische Konzeption für die Nutzung des unterirdischen Raums in einem Stadtgebiet [155]

Speziell auf dem Gebiet des Schildvortriebs war in den letzten Jahren die Vorreiterrolle von Japan unverkennbar. Aber auch in Deutschland und Europa ist der Entwicklungsstand dieser Bauverfahren auf einem hohen und international beachteten Niveau. Die Schildbauverfahren ermöglichen die bergmännische Erstellung von langgestreckten unterirdischen Bauwerken auch bei kleinen Überdeckungshöhen, in wenig tragfähigen Bodenarten und im Grundwasser, ohne Störungen an der Oberfläche oder Setzungen von größerem Ausmaß zu verursachen. Anwendungen in stark gebrüchem oder stark druckhaftem Gebirge, wie rolligem Lockergestein, sind ebenso möglich wie in weich-plastischen oder schwimmenden Böden. Aber auch in vorübergehend standfesten Gebirgen, in denen der

Schild nur als Kopfschutz dient, erfolgten effiziente Einsätze. Schilde haben also ein breites Anwendungsspektrum.

Die Schildbauverfahren können und sollen andere Vortriebsmethoden nicht grundsätzlich ersetzen. Jedoch können sie bei ungünstigen Gebirgsverhältnissen, langen Baulosen, hoher benötigter Auffahrleistung oder strengen Anforderungen an die Oberflächensetzungen eine technisch sinnvolle und auch wirtschaftliche Alternative zu anderen Tunnelbaumethoden darstellen. Im Folgenden werden die wichtigsten Vor- und Nachteile zusammengefasst.

Vorteile:

- Möglichkeit von Mechanisierung und hoher Vortriebsgeschwindigkeit,
- Profilgenauigkeit,
- kleinstmögliche Beeinflussung vorhandener Bebauung,
- große Sicherheit für die Belegschaft,
- umweltfreundliche Bauweise, Erhöhung des Grundwasserspiegels, wenig Lärm,
- Möglichkeit einer qualitativ hochwertigen und wirtschaftlichen Auskleidung.

Nachteile:

- lange Vorlaufzeiten für die Planung, Produktion und Montage des Schildes,
- lange Einarbeitungszeiten,
- aufwendige und kostenintensive Baustelleneinrichtung, gegebenenfalls Separieranlagen, nur bei längeren Tunneln wirtschaftliche Abschreibung,
- Leistungsrisiko bei wechselndem Boden,
- in der Regel festgelegter Kreisquerschnitt mit nur geringen Variationsmöglichkeiten,
- hoher Aufwand bei Änderungen der Querschnittsgeometrie, wie z. B. Aufweitungen,
- in der Regel Erfordernis zusätzlicher Bemessung der Auskleidung für die Vortriebskräfte.

Ein sinnvoller Einsatz ist nur dann gegeben, wenn die Vorteile konsequent genutzt und die Nachteile so weit wie möglich in die Planung einbezogen werden. Es hat sich gezeigt, dass ein Schild in kleineren Durchmesserbereichen in der Regel ab Auffahrlängen von etwa 2.000 Metern mit anderen Vortriebsmethoden konkurrieren kann. Darüber sind durchaus wirtschaftliche Lösungen mit dem Schildbauverfahren möglich, die in vielen Fällen sogar kostengünstiger sein können als in offener oder konventioneller Bauweise erstellte Tunnelstrecken.

Für den erfolgreichen Einsatz eines Schildes bedarf es immer einer sorgfältigen Planung des Gerätes, der Auskleidung und der Logistik. Erfahrung und Know-how sind für eine technisch sinnvolle und zugleich wirtschaftliche Konzeption unbedingt erforderlich. Nach [235] begegnet man viel zu häufig von den Schildbauverfahren enttäuschten Bauherren, die einem für ihre Gebirgsverhältnisse falschen Geräte- bzw. Konstruktionskonzept den Vorzug gaben und nachfolgend mit nicht akzeptierbaren Oberflächensetzungen, unerwartet niedriger Auffahrleistung, Abplatzungen und Brüchen in der Auskleidung, mit Wasserzutritt oder anderen Mängeln konfrontiert wurden. Für den Auftraggeber kann nur der in der versprochenen Zeit, in guter Qualität und Wirtschaftlichkeit, unter möglichst geringer Beeinflussung der Umwelt erstellte Tunnel von Interesse sein. Auf diese selbstverständlichen Anliegen müssen die Konstrukteure von Schildausrüstungen Rücksicht nehmen. Es gilt, die maschinenbautechnischen Belange mit denen des Tunnelbauwerks selbst ef-

fektiv zu verknüpfen. Ein ständiger Erfahrungsaustausch zwischen Maschinenbau- und Bauingenieuren ist unabdingbar, wobei die jeweiligen Baustellenerfahrungen konsequent auszuwerten sind.

1.1 Grundprinzip und Begriffe

Das Grundprinzip eines Schildes besteht darin, dass eine im Allgemeinen zylindrische Stahlkonstruktion in der Tunnelachse vorgeschoben wird und gleichzeitig der Ausbruch des Gebirges erfolgt. Die Stahlkonstruktion sichert so lange den Ausbruchhohlraum, bis an ihrem Ende die vorläufige oder die endgültige Tunnelsicherung eingebaut ist. Der Schild muss dabei dem Druck des umgebenden Gebirges widerstehen und, soweit vorhanden, anstehendes Grundwasser zurückhalten.

Während der Hohlraum entlang der Tunnellaibung durch den Schildmantel selbst gesichert ist, sind an der Ortsbrust in Abhängigkeit von den anzutreffenden Boden- und Grundwasserverhältnissen zusätzliche Sicherungsmaßnahmen erforderlich. In Bild 1-2 sind fünf unterschiedliche Methoden zur Stabilisierung der Ortsbrust dargestellt, die in Kapitel 2 eingehend erläutert werden. Zu nennen sind:

- natürliche Stützung,
- mechanische Stützung,
- Druckluftstützung,
- Flüssigkeitsstützung,
- Erdstützung.

Diese Möglichkeiten zur Stabilisierung der Ortsbrust stellen einen großen Vorzug der Schildbauverfahren dar. Damit wird es im Gegensatz zu allen anderen Tunnelbauweisen möglich, das Gebirge schon während des Auffahrens an jeder Stelle unmittelbar zu stützen.

Neben der Art der Ortsbruststützung ist die Methode des Gebirgeabbaus ein wichtiges Charakteristikum für Schilde. Der manuelle Abbau in Handschilden stellt dabei das einfachste Verfahren dar und wird heute nur noch in Ausnahmefällen, wie z. B. bei kurzen Strecken und bestimmten geologischen Verhältnissen, praktiziert. Gängiger ist jedoch der Einsatz von Maschinen. Dabei wird zwischen mechanisch teil- und vollflächigem Abbau unterschieden. Beim teilflächigen Abbau wird die Ortsbrust abschnittsweise bearbeitet. Dabei kommen Geräte wie Bagger oder spezielle Meißel- und Schneidkopfeinrichtungen zum Einsatz, die vom Bedienungspersonal oder aber automatisch geführt und gesteuert werden. Ein vollflächiger Abbau ist in Abhängigkeit vom anstehenden Boden mit Speichenrädern, Felgenrädern (gegebenenfalls mit Verschlussklappen) oder geschlossenen Bohrköpfen möglich. Weitere Möglichkeiten sind der hydraulische Abbau mittels druckbeaufschlagter Flüssigkeitsstrahlen und der Extrusionsabbau, bei dem unter der Wirkung der Vortriebspresen ein ausgeprägt plastischer Boden durch verschleißbare Öffnungen in der stirnseitigen Abschlusswand des Schildes hineingedrückt werden kann. Auf die Abbauverfahren wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

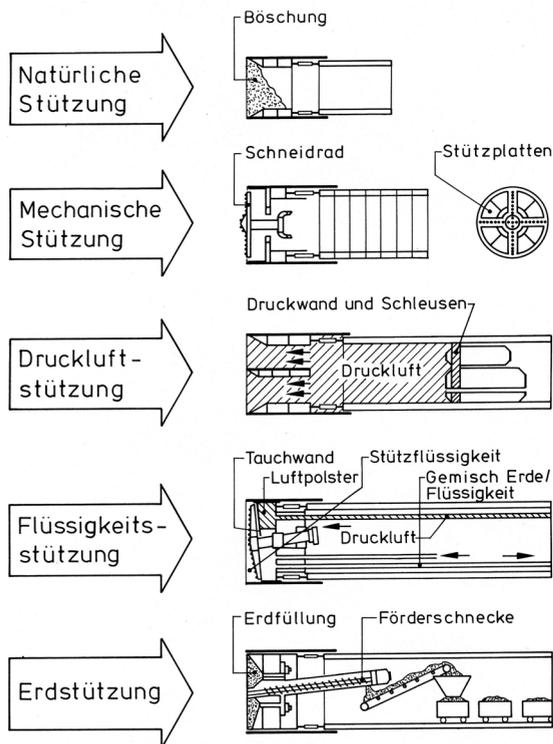


Bild 1-2 Möglichkeiten zur Gebirgsstützung und Wasserhaltung an der Ortsbrust [266]

Zur Schutterung des abgebauten Materials sind spezielle Fördersysteme notwendig, mit denen der Abraum von der Ortsbrust durch den Schild hindurch nach Übertage geschafft wird. Geeignete Systeme sind im direkten Zusammenhang mit der Art des anstehenden Gebirges und der daraus resultierenden Art von Ortsbruststützung und Abbaumethode zu sehen, da diese die Parameter Konsistenz und Transportmöglichkeit des zu schutternden Materials beeinflussen. Bild 1-3 gibt einen ersten Überblick über mögliche Fördersysteme im Schildbereich, die in Kapitel 5 ausführlich erläutert werden. Heutzutage steht eine Vielzahl von Fördermöglichkeiten zur Wahl, die sich prinzipiell in die Gruppen

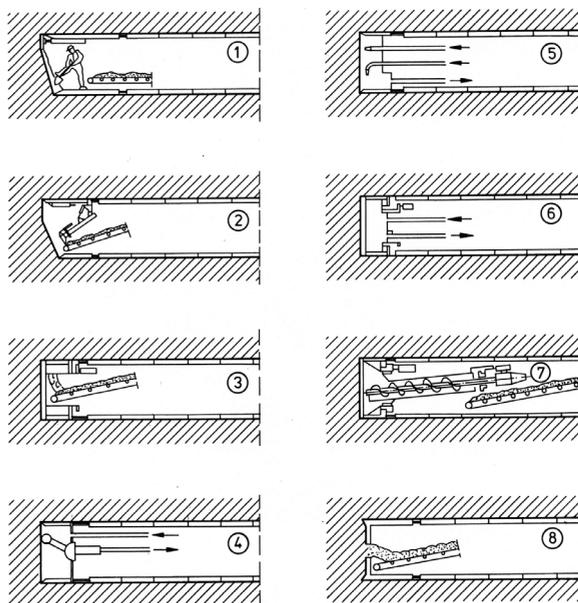
- Trockenförderung,
- Flüssigförderung und
- Dickstoffförderung

gliedern.

Der Streckentransport erfolgt über Förderleitungen, Förderbänder, Erdtransporter oder gleisgebundene Systeme (Schutterzüge). Der Übergabebereich zu den Streckentransportsystemen wird im Nachläuferbereich integriert.

Der Schild wird mit fortschreitendem Abbau in Richtung der Tunnelachse vorgeschoben, um den geschaffenen Hohlraum zu sichern. Die dafür notwendigen Vorschubkräfte werden mit Hydraulikpressen erzeugt. Die bereits erstellte Auskleidung dient in der Regel als Widerlager. Daher müssen Tunnelauskleidung und Vortriebstechnik fein aufeinander abgestimmt werden. Sowohl die einwandfreie Funktion des Schildes als auch die Qualität

der Tunnelröhre hängen von deren Verträglichkeit ab. In Kapitel 6 werden diese Zusammenhänge behandelt.



1. Handabbau und Trockenförderung mittels eines Förderbandes,
2. mechanisch teilflächiger Abbau (hier Zughacke) und Trockenförderung mittels eines Förderbandes,
3. mechanisch vollflächiger Abbau und Trockenförderung mittels eines Förderbandes (die Übergabe auf das Förderband ist auch im mittleren oder unteren Bereich des Schneidrades über Schuttertaschen möglich),
4. mechanisch teilflächiger Abbau und Flüssigförderung,
5. hydraulischer Abbau und Flüssigförderung,
6. mechanisch vollflächiger Abbau und Flüssigförderung,
7. mechanisch vollflächiger Abbau, Förderung mit einer Schnecke und Abgabe auf ein Förderband,
8. Extrusionsabbau und Abgabe des Materials auf ein Förderband.

Bild 1-3 Mögliche Fördersysteme im Schildbereich

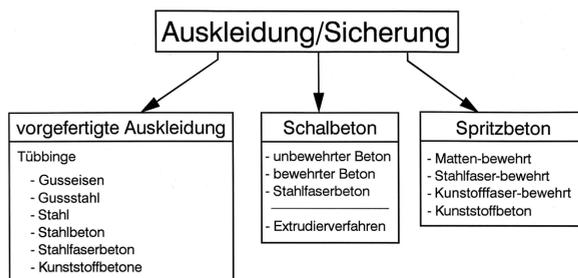


Bild 1-4 Mögliche Auskleidungsarten beim Schildvortrieb

Der geschaffene Hohlraum wird meistens mit Fertigteilen, sogenannten Tübbingern, gesichert. Hier gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Formen, Materialien, Anordnungsmöglichkeiten, Dichtungssystemen und Einbauverfahren, die einer ausführlichen Betrachtung bedürfen (Kapitel 6). Zusätzlich sind andere Auskleidungssysteme möglich und werden auch heute bereits praktiziert (Bild 1-4). So ist das Pumpen von Beton unter Druck in eine Schalung (das sogenannte Extrudierverfahren) eine interessante Möglichkeit, wurde jedoch nicht weiterentwickelt. Selbst Spritzbeton kann in Verbindung mit Schildvortrieben eingesetzt werden.

Da die Sicherung meist im Schutz des Schildmantels eingebaut wird, bleibt bei Weiterfahrt des Schildes ein Spalt, der zu verfüllen ist, um Auflockerungen und Setzungen zu minimieren. Daher ist eine geeignete Hinterfüllung bzw. Hinterpressung vorzusehen und der Schild mit einer entsprechenden Vorrichtung auszurüsten.

1.2 Typisierung der Tunnelvortriebsmaschinen nach DAUB

In Kapitel 19 werden die DAUB-Empfehlungen vollständig wiedergegeben [54].

1.2.1 Einteilung von Tunnelvortriebsmaschinen (TVM)

Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) bauen entweder den gesamten Tunnelquerschnitt mit einem Bohrkopf oder Schneidrad im Vollschnitt oder teilflächig durch geeignete Lösevorrichtungen ab.

Man unterscheidet zunächst zwischen Tunnelbohrmaschinen (TBM), Doppelschildmaschinen (DSM), Schildmaschinen (SM) und Kombinationsmaschinen (KSM).

Beim Abbauvorgang wird die Maschine entweder kontinuierlich oder intermittierend vorgeschoben.

Eine systematische Zusammenstellung der Tunnelvortriebsmaschinen zeigt Bild 1-5 (siehe auch Anlage 1 „Übersicht der Tunnelvortriebsmaschinen“, Kapitel 19).

1.2.2 Tunnelbohrmaschinen (TBM)

Tunnelbohrmaschinen werden für Vortriebe in standfesten Festgesteinen eingesetzt. Eine aktive Stützung der Ortsbrust ist nicht erforderlich und technisch auch nicht möglich. Mit diesen Maschinen kann im Allgemeinen nur ein Kreisquerschnitt aufgefahren werden.

Man unterscheidet Tunnelbohrmaschinen ohne Schildmantel (Gripper-TBM), Erweiterungstunnelbohrmaschinen (ETBM) und Tunnelbohrmaschinen mit Schildmantel (TBM-S).

Ausführlich werden diese Maschinen in [203] beschrieben.

1.2.2.1 Tunnelbohrmaschinen ohne Schild (Gripper-TBM)

Tunnelbohrmaschinen ohne Schild werden im Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit eingesetzt. Sie besitzen keinen vollständigen Schildmantel. Ein wirtschaftlicher Einsatz kann durch aufwendige Verschleißkosten der Abbauwerkzeuge stark beeinflusst und begrenzt sein.

Um den Anpressdruck auf den Bohrkopf aufbringen zu können, wird die Maschine radial durch hydraulisch angetriebene Platten (Gripper) gegen die Ausbruchlaibung verspannt.

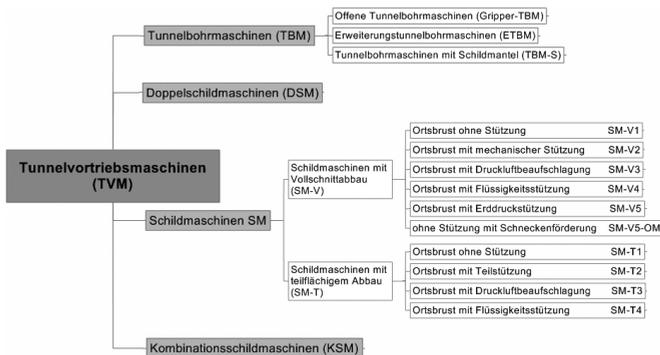


Bild 1-5 Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen

Der Abbau erfolgt gebirgsschonend und profilgenau durch Rollenmeißel, die auf dem rotierenden Bohrkopf angebracht sind. Die Maschine füllt einen großen Teil des Querschnittes aus. Die systematische Sicherung der Tunnelinnenfläche erfolgt gewöhnlich erst hinter der Maschine (10 bis 15 m und mehr hinter der Ortsbrust). In wenig standfestem und besonders nachbrüchigem Gebirge muss der Einbau von Ausbaubögen, Verbaublechen und Anker in möglichst kurzem Abstand hinter dem Bohrkopf möglich sein.

Falls eine Spritzbetonauskleidung des Tunnels erforderlich ist, sollte diese erst im rückwärtigen Nachläuferbereich eingebaut werden, um die Verschmutzung der Antriebs- und Steuereinheiten im vorderen Maschinenbereich möglichst gering zu halten. In Ausnahmefällen muss jedoch auch der Spritzbetoneinbau in möglichst kurzem Abstand hinter dem Bohrkopf möglich sein.

Bei prognostiziertem schlechtem Fels oder heterogenen Gebirgsbedingungen (hoher Klüftungsgrad, Störzonen) wird empfohlen, die Vortriebsmaschine mit Einrichtungen zur Vorauserkundung und gegebenenfalls auch zur vorauseilenden Gebirgsverfestigung auszustatten.

Beim Abbau an der Ortsbrust entsteht kleinstückiges Material unter entsprechender Staubeentwicklung. Daher sind für diese Maschinen Vorrichtungen zur Reduzierung der Staubeentwicklung und zur Entstaubung erforderlich. Hier wird unterschieden zwischen:

- Bedüsung mit Wasser am Bohrkopf,
- Staubschild hinter dem Bohrkopf,
- Staubabsaugung mit Entstaubung auf dem Nachläufer.

Der Materialumschlag und die Versorgung der Maschine erfordern das Mitführen von mitunter sehr langen Nachlaufeinrichtungen.

1.2.2.2 Erweiterungstunnelbohrmaschinen (ETBM)

Erweiterungstunnelbohrmaschinen (Aufweitungsmaschinen) werden im Festgestein eingesetzt, um einen zuvor hergestellten durchgehenden Pilotstollen auf den geplanten endgültigen Durchmesser zu vergrößern. Die Aufweitung auf den vollen Querschnitt erfolgt in ein oder zwei Arbeitsgängen durch einen entsprechend gestalteten Bohrkopf.

Die Hauptbauelemente dieser Maschine sind der Bohrkopf, die Verspannung und die Vortriebsmechanik. Die Verspannung dieser speziellen Maschine ist vor dem Bohrkopf angeordnet und stützt sich mit Grippern im Pilotstollen ab. Der Bohrkopf der Maschine wird während des Bohrvorganges zur Verspannung hin gezogen. In gestörten Felsformationen können von dem zuvor gebohrten Pilotstollen aus Maßnahmen zur Ertüchtigung der Störzonen durchgeführt und damit die Vortriebsrisiken bei der Bohrung des Haupttunnels minimiert werden.

1.2.2.3 Tunnelbohrmaschinen mit Schild (TBM-S)

Im Festgestein mit geringer Standzeit oder nachbrüchigem Fels werden die Tunnelbohrmaschinen mit einem Schildmantel versehen. In diesem Fall ist ein Ausbau im Schutze des Schildmantels zweckmäßig (Tübbing, Rohre u. Ä.). Beim Vortrieb kann sich die Maschine gegen den Ausbau abstützen, sodass die Verspanneinrichtung üblicherweise entfällt. Ansonsten gelten die für Tunnelbohrmaschinen getroffenen Aussagen entsprechend.

1.2.3 Doppelschildmaschinen (DSM)

Doppelschildmaschinen (DSM) bestehen aus zwei hintereinander angeordneten Maschinenteilen. Der vordere Teil ist mit dem Bohrkopf und den Hauptvortriebspresen ausgerüstet, im hinteren Maschinenteil befinden sich die Nebenvortriebspresen und die Grippereinrichtung. Der vordere Maschinenteil kann durch eine Teleskopeinrichtung um eine komplette Ringlänge gegenüber dem hinteren Teil ausgefahren werden.

Im standfesten Festgestein nehmen die Verspannplatten das Vortriebsdrehmoment und die Vorschubkräfte auf. Durch die sichere Fixierung des hinteren Maschinenteils mittels der Verspannplatten kann im Schildschwanzbereich die Montage des Tübbingringes während des Bohrhubs erfolgen. In standfestem Gebirge kann gegebenenfalls auf den Tübbingeinbau verzichtet werden.

Im nicht standfesten Baugrund, in dem die Verspannplatten kein ausreichendes Widerlager finden, kann der Vortrieb durch Abstützung auf dem zuletzt gebauten Tübbingring erfolgen. Der vordere und hintere Maschinenteil wird hierfür zusammengefahren, die Vortriebskräfte werden durch die Nebenvortriebspresen auf den Tübbingring abgegeben.

In der Regel besteht keine Möglichkeit zur aktiven Ortsbrust- und Ausbruchlaibungsstützung.

Durch den schnellen Vorschub des hinteren Maschinenteils nach Ende des Bohrhubs beim Umsetzen des Grippers muss das Gebirge so lange selbstständig stehen, bis der Ringspalt vollständig vermörtelt oder mit Perlkies verblasen ist.

1.2.4 Schildmaschinen (SM)

Man unterscheidet Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (mittels Schneirad; SM-V) und Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau (mittels Fräse, Bagger; SM-T). Schildmaschinen werden in Lockerböden oberhalb und unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt. Dabei müssen in der Regel der den Hohlraum umgebende Baugrund und die Ortsbrust gestützt werden. Schildmaschinen lassen sich nach der Art der Ortsbruststützung weiter unterteilen (Bild 1-5).

1.2.4.1 Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V)

1) Ortsbrust ohne Stützung (SM-V1)

Ist die Ortsbrust standfest, z. B. in Tonböden mit fester Konsistenz und ausreichender Kohäsion oder im Festgestein, kann mit sogenannten offenen Schilden gearbeitet werden. Das werkzeugbestückte Schneirad baut den Boden ab und der gelöste Boden wird über Förderbänder abtransportiert.

Im nachbrüchigen Festgestein werden meist Vortriebsschilde eingesetzt, die einen weitgehend geschlossenen, mit Diskenmeißeln versehenen Bohrkopf besitzen und vollständig durch einen Schildmantel vor nachbrechendem Baugrund geschützt sind. Die Vortriebskräfte und das Bohrkopfdrehmoment werden über die Vortriebspresen auf den zuletzt gebauten Tübbingring übertragen.

2) Ortsbrust mit mechanischer Stützung (SM-V2)

Bei Vortriebsmaschinen mit mechanischer Stützung soll die Ortsbrust mit elastisch gelagerten Stützplatten, die in den Öffnungen des Schneidrades (zwischen den Speichen) angeordnet sind, während des Abbauvorgangs gestützt werden. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass während des Abbauvorgangs keine nennenswerte mechanische Stützung der Ortsbrust durch das rotierende Schneidrad erzielt werden kann. Deshalb haben sich diese Schneidräder in nicht standfestem Gebirge nicht bewährt und werden heute nicht mehr eingesetzt. Die mechanische Ortsbruststützung durch das Schneidrad oder durch die Sicherungsplatten ist lediglich als zusätzliche Sicherheit zu betrachten. Ein rechnerischer Ansatz der Stützwirkung beim Nachweis der Standsicherheit der Ortsbrust darf nicht erfolgen.

3) Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-V3)

Schildmaschinen der Bauart SM-V3 können unterhalb des Grundwasserspiegels zum Einsatz kommen, auch wenn dieser nicht abgesenkt werden kann oder nicht abgesenkt werden darf. In diesem Fall muss das Wasser an der Ortsbrust durch Druckluft zurückgehalten werden. Voraussetzung für die Verdrängung des Grundwassers ist die Ausbildung einer Luftströmung zur Geländeoberfläche. Wasserundurchlässige Schichten oberhalb der Tunnelvortriebsmaschine können die eingebrachte Luft stauen und die wirksame Verdrängung des Grundwassers (und damit die Ausbildung einer Strömung) verhindern. Die Grenzdurchlässigkeit des Baugrundes ist ebenfalls zu beachten.

Da an der Ortsbrust keine Druckdifferenz aufgebaut werden kann, ist durch die Druckluftbeaufschlagung eine Stützung gegen Erddruck im Allgemeinen nicht möglich. Dies gilt insbesondere in durchlässigen Böden. Ein Verlust der scheinbaren Kohäsion in nicht wassergesättigten Böden ist ebenfalls möglich.

Während der Tunnelherstellung wird entweder der gesamte Tunnel unter Druckluft gesetzt, oder die Maschine erhält eine Druckwand, sodass nur die Abbaukammer unter Druck steht. In beiden Fällen sind Schleusen erforderlich. Der Druckluftumläufigkeit über die Schildschwanzdichtung und den Ausbau ist besondere Beachtung zu schenken. Die Hinweise und Forderungen für Arbeiten unter Druckluft sind zu beachten.

Eine möglicherweise vorhandene zusätzliche mechanische Stützung der Ortsbrust durch das Schneidrad oder durch Sicherungsplatten ist lediglich als zusätzliche Sicherheit zu betrachten. Ein rechnerischer Ansatz der Stützwirkung ist nicht zulässig.

4) Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4)

Bei Vortriebsmaschinen mit Flüssigkeitsstützung wird die Ortsbrust durch eine unter Druck stehende Flüssigkeit gestützt, die in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des anstehenden Baugrunds festgelegt wird. Die Dichte bzw. Viskosität der Flüssigkeit muss variiert werden können. Besonders bewährt haben sich hierbei Bentonitsuspensionen. Zur Ortsbruststützung wird die Arbeitskammer durch eine Druckwand gegen den Tunnel abgeschlossen.

Der erforderliche Stützdruck kann sehr genau über ein Luftpolster hinter einer eingebauten Tauchwand und über die abgestimmten Förderleistungen der Förder- und Speisepum-

pe geregelt werden. Vor Beginn des Vortriebs muss der erforderliche und maximale Stützdruck über die gesamte Vortriebslänge berechnet werden (Stützdruckberechnung).

Der Boden wird vollflächig durch ein werkzeugbestücktes Schneidrad (Speichen-/Felgenschneidrad) abgebaut und hydraulisch gefördert. Eine anschließende Separation ist zwingend notwendig.

Sind Einstiege in die Abbaukammer erforderlich, z. B. zum Werkzeugwechsel, bei Reparaturarbeiten oder zur Bergung von Hindernissen, muss die Stützflüssigkeit durch Druckluft ersetzt werden. Die Stützflüssigkeit bildet dann an der Ortsbrust eine nur wenig luftdurchlässige Membrane, deren Lebensdauer jedoch zeitlich begrenzt ist (Gefahr der Austrocknung). Diese Membrane erlaubt die Stützung der Ortsbrust mittels Druckluft und ist gegebenenfalls regelmäßig zu erneuern. Die Stützflüssigkeit kann vollständig (Vollabsenkung) oder nur teilweise (Teilabsenkung) durch Druckluft ersetzt werden. Die maximale Teilabsenkung wird insbesondere durch das Erfordernis eines ausreichend großen Arbeitsraumes begrenzt. Dieser ist so groß zu wählen, dass jederzeit ein sicheres Arbeiten möglich ist und ein hinreichend großer Rückzugsraum für das Personal vorhanden ist.

Bei offenen Schneidrädern ist bei Stillstand der Maschine zum Schutz des in der Abbaukammer arbeitenden Personals ein mechanischer Abschluss der Ortsbrust durch verschließbare Segmente im Schneidrad oder durch von hinten ausfahrbare Platten möglich und wegen der zeitlich eingeschränkten Wirkung der Membrane zweckmäßig.

Steine oder Felsbänke können durch Disken am Schneidrad und/oder Steinbrecher in der Arbeitskammer auf eine förderfähige Größe zerkleinert werden.

Der Flüssigkeitsschild kann in standfestem Gebirge auch ohne Druckbeaufschlagung im offenen Modus mit Wasser als Fördermedium betrieben werden.

Eine möglicherweise vorhandene zusätzliche mechanische Stützung der Ortsbrust durch das Schneidrad oder durch Sicherungsplatten ist lediglich als zusätzliche Sicherheit zu betrachten.

Ein rechnerischer Ansatz der Stützwirkung ist nicht zulässig.

5) Ortsbrust mit Erddruckstützung (SM-V5)

Bei Vortriebsmaschinen mit Erddruckstützung wird die Ortsbrust durch einen Brei aus abgebautem Boden gestützt. Die Abbaukammer des Schildes ist zum Tunnel hin durch eine Druckwand abgeschlossen. Werkzeugbestückte, mehr oder weniger geschlossene Schneidräder bauen den Boden ab. Mischflügel an der Rückseite des Schneidrades (Rotoren/Rückräumer) und an der Druckwand (Statoren) verhelfen dem Boden dabei zu einer geeigneten Konsistenz. Der Druck wird über Druckmessdosen kontrolliert, die über die Vorderseite der Druckwand verteilt sind. Eine druckhaltende Schnecke fördert den Boden aus dem Arbeitsraum.

Der Stützdruck wird durch die Förderschneckendrehzahl oder durch die druck-volumen-gesteuerte Injektion eines geeigneten Konditionierungstoffes geregelt. Der Druckabbau zwischen Abbaukammer und Tunnel wird über Reibung in der Schnecke durchgeführt. Das Bodenmaterial in der Schnecke oder zusätzliche mechanische Einrichtungen müssen die Dichtigkeiten in der jeweiligen Austragsvorrichtung sicherstellen. Eine vollständige Stützung der Ortsbrust, insbesondere im oberen Bereich, gelingt nur dann, wenn das

Stützmedium „Boden“ in den Zustand einer weichen bis steif-plastischen Masse gebracht werden kann. Hierbei hat der prozentuale Anteil des Feinkorns, kleiner 0,06 mm, wesentlichen Einfluss. Durch die Bodenconditionierung, z. B. mit Bentonit, Polymeren oder Schaum, kann der Einsatzbereich des Erddruckschildes erweitert werden. Dabei ist auf die umweltverträgliche Deponierfähigkeit des Materials zu achten.

Der Erddruckschild kann in standfestem Gebirge auch ohne Druckbeaufschlagung im offenen Modus mit teilgefüllter Abbaukammer (SM-V5-OM) betrieben werden. In standfestem Gebirge ist bei Gebirgswasserzufluss auch ein Betrieb mit teilgefüllter Abbaukammer und Druckluftbeaufschlagung möglich.

Bei hohem Grundwasserdruck und bei Baugrund, der zur Verflüssigung neigt, kann die kritische Materialübergabe von der Schnecke zum Förderband durch ein geschlossenes System (Pumpförderung) ersetzt werden.

Eine möglicherweise vorhandene zusätzliche mechanische Stützung der Ortsbrust durch das Schneidrad oder durch Sicherungsplatten ist lediglich als zusätzliche Sicherheit zu betrachten. Ein rechnerischer Ansatz der Stützwirkung ist nicht zulässig.

1.2.4.2 Schildmaschinen mit Teilflächenabbau (SM-T)

1) Ortsbrust ohne Stützung (SM-T1)

Dieser Schildtyp kann bei senkrechter oder steiler Böschung einer standfesten Ortsbrust eingesetzt werden. Die Maschine besteht nur aus dem Schildmantel und dem Abbauwerkzeug (Bagger, Fräse oder Reißzahn), der Fördereinrichtung und der Vortriebspresen-Konstruktion. Der Boden wird über Förderbänder oder Kratzbänder ausgetragen.

2) Ortsbrust mit mechanischer Teilstützung (SM-T2)

Bei der Teilstützung der Ortsbrust können Bühnen und/oder Brustplatten eingesetzt werden. Bei Bühnenschilden ist die Vortriebsmaschine im Bereich der Ortsbrust durch eine oder mehrere Bühnen unterteilt. Auf diesen bilden sich Böschungen aus, die die Ortsbrust stützen. Der Boden wird von Hand oder maschinell abgebaut. Bühnenschilde haben einen geringen Mechanisierungsgrad.

Nachteilig ist die Gefahr großer Setzungen infolge unkontrollierter Ortsbruststützung. Bei Schildmaschinen mit Brustplattenverbau wird die Ortsbrust durch auf hydraulischen Zylindern gelagerte Brustplatten gestützt. Zum Bodenabbau werden die Brustplatten partiell zurückgezogen. Eine Kombination von Brustplatten und Bühnen ist möglich. Sofern eine Stützung im Firstbereich genügt, können dort ausklappbare Brustplatten angeordnet werden.

3) Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-T3)

Ist Grundwasser vorhanden, muss dieses bei den Maschinen der Bauart SM-T1 und SM-T2 durch Druckluft zurückgehalten werden. Dazu wird entweder der gesamte Tunnel unter Druckluft gesetzt, oder die Maschine erhält eine Druckwand (vergleichbar zu SM-V3). Das Material wird hydraulisch gefördert oder trocken ausgeschleust.

4) Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-T4)

In der Vergangenheit wurden mehrfach Versuche unternommen, auch bei Teilschnittmaschinen eine aktive Ortsbruststützung durch Einsatz einer Stützflüssigkeit zu erreichen (z. B. Thixschild). Die Abbaukammer muss dabei vollständig mit Stützflüssigkeit gefüllt sein. Der Bodenabbau kann mechanisch oder mittels Hochdruckdüsen erfolgen.

Da der Bodenabbau nur ungenügend kontrolliert werden kann, hat sich dieses Vortriebsverfahren nicht bewährt und wird nicht mehr ausgeführt.

1.2.5 Anpassbare Schildmaschinen mit kombinierter Verfahrenstechnik (KSM)

Eine Vielzahl von Tunneln führt durch stark wechselhafte Baugrundverhältnisse, die von Fels bis zu locker gelagertem Boden reichen können. Daher sind Verfahrenstechniken auf die geotechnischen Voraussetzungen abzustimmen und entsprechend anpassbare Schildmaschinen einzusetzen. Es wird unterschieden zwischen:

- a) Schildmaschinen, bei denen ein Wechsel der Verfahrenstechnik ohne Umbau möglich ist:
Erddruckschild SM-V5 ↔ Druckluftschild SM-V3,
- b) Schildmaschinen, bei denen ein Wechsel der Verfahrenstechnik durch Umbau möglich ist. Mit folgenden Kombinationen liegen Erfahrungen vor:
Flüssigkeitsschild SM-V4 ↔ Schild ohne Stützung SM-V1,
Flüssigkeitsschild SM-V4 ↔ Erddruckschild SM-V5,
Erddruckschild SM-V5 ↔ Schild ohne Stützung SM-V1.

Die Umbauarbeiten nehmen in der Regel mehrere Schichten in Anspruch.

1.2.6 Sonderformen

1.2.6.1 Messerschilde

Bei Messerschilden ist der Schildmantel in Messer aufgelöst, die einzeln vorgeschoben werden können. Der Boden wird durch Teilschnittmaschinen, Schneidrad oder Bagger abgebaut. Ein Vorteil der Messerschilde ist, dass sie von der Kreisform abweichen und z. B. auch Hufeisenprofile auffahren können. Bei letzterem ist die Sohle in der Regel offen. Man spricht dann auch vom Messervortrieb. Aufgrund vielfältiger negativer Erfahrungen in der Vergangenheit werden Messerschilde heute allerdings kaum noch eingesetzt.

1.2.6.2 Schilde mit Mehrfach-Kreisquerschnitten

Diese Schildtypen sind durch die versetzt überlappend angeordneten Schneidräder gekennzeichnet. Der Schildtyp wird bisher ausschließlich von japanischen Herstellern angeboten und meist für die Auffahrung von Stationsquerschnitten eingesetzt. Die Maschinen sind nur schwer zu steuern. In Europa liegen bisher keine Einsatzerfahrungen vor.

1.2.6.3 Gelenkschilde

Praktisch alle vorkommenden Schilde können durch Unterteilung in Längsrichtung mit einem Gelenk versehen werden. Dieses wird insbesondere dann angeordnet, wenn die Schildmantellänge größer als der Schilddurchmesser ist, um die Tunnelvortriebsmaschine

besser steuern zu können. Die Anordnung kann auch bei sehr engen Kurvenradien erforderlich werden.

Die Bezeichnung der Vortriebsmaschinen richtet sich dann nach den zuvor bereits aufgeführten Kategorien. Eine separate Kategorie „Gelenkschilde“ ist heute nicht mehr üblich.

1.2.7 Hinweise zu den einzelnen TVM-Typen mit Prinzipbildern

1.2.7.1 Tunnelbohrmaschinen (TBM)

Der Haupteinsatzbereich der TBM (Bild 1-6) ist der standfeste bis nachbrüchige Fels, wobei Schicht- und Kluftwasserzutritte bewältigt werden können. Die einaxiale Druckfestigkeit σ_D sollte etwa zwischen 25 und 250 MN/m² betragen. Höhere Festigkeiten, Zähigkeit des Gebirges und ein hoher Anteil verschleißfester Mineralien stellen wirtschaftliche Einsatzgrenzen dar. Eine Beschränkung der Verspannbarkeit der TBM kann ebenfalls deren Einsatz infrage stellen. Zur Beurteilung des Gebirges werden auch die Spaltzugfestigkeit und der RQD-Wert herangezogen. Bei einem Zerlegungsgrad des Gebirges mit RQD von 50 bis 100 % und einem Kluftabstand > 0,6 m erscheint der Einsatz einer TBM gesichert. Bei höherer Zerlegung ist die Standfestigkeit zu prüfen. Im Lockergestein oder bodenähnlichen Festgestein wird der Einsatz einer TBM ausgeschlossen.

1.2.7.2 Doppelschildmaschinen (DSM)

Doppelschildmaschinen (Bild 1-7) werden hauptsächlich bei Tunnelprojekten eingesetzt, die neben größeren Bereichen in standfestem Gebirge auch kürzere Bereiche mit nachbrüchigem bis gebrächnen Fels aufweisen. Im standfesten Gebirge (siehe Vorgaben für den TBM-Einsatz) kann der Vortrieb im kontinuierlichen Modus mit Einsatz der Grippereinrichtung erfolgen. In Störzonen oder Bereichen mit geringer Gebirgsfestigkeit, in denen die Grippereinrichtung nicht eingesetzt werden kann, wird das Schildgelenk zusammengefahren, und die Vortriebsmaschine stützt sich über die Vortriebspresen auf dem zuletzt gebauten Tübbingring ab.

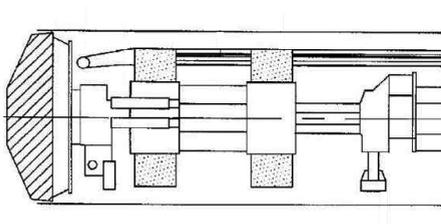


Bild 1-6 Gripper-TBM

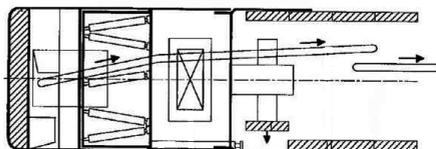


Bild 1-7 TBM mit Doppelschild

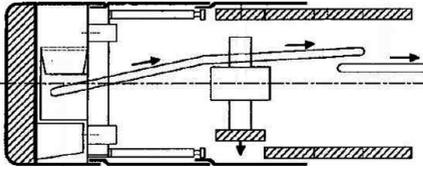


Bild 1-8 TBM mit Einfachschild, vollflächiger Abbau

1.2.7.3 Ortsbrust ohne Stützung (SM-V1)

Dieser Maschinentyp (Bild 1-8) kann nur im standfesten, weitgehend wasserundurchlässigen kohäsiven Lockergestein mit hohem Feinkornanteil eingesetzt werden. Die Standfestigkeit der Ortsbrust ist rechnerisch nachzuweisen. Ebenfalls nachzuweisen ist eine ausreichend hohe vorübergehende Standfestigkeit der Ausbruchlaibung bis zum endgültigen Einbau der Tunnelauskleidung. Bettungsreduzierende Gebirgsauflockerungen sind auszuschließen. Bei setzungsempfindlicher Bebauung an der Geländeoberfläche sind Baugrunddeformationen und Auflockerungen auf Basis der üblichen Schadensklassifikationen (z. B. Neigung der Setzungsmulde) nachzuweisen.

Im Hartgestein wird dieser Maschinentyp im nachbrüchigen bis gebrächen Fels, auch mit Schicht- und Kluftwasser, eingesetzt. Bei möglicherweise guter Gesteinsfestigkeit im standfesten Gebirge kann die Verbandsfestigkeit stark reduziert sein. Dies entspricht einem Kluftabstand von $\approx 0,6$ bis $0,06$ m und einem RQD-Wert zwischen ca. 10 und 50 %. Generell ist jedoch auch bei geringerer Gesteinsdruckfestigkeit unter 5 MN/m^2 , zum Beispiel in stark verwittertem Fels, der Einsatz möglich.

Die Standfestigkeit der Ortsbrust und Ausbruchlaibung ist rechnerisch nachzuweisen. Bei hohen Gebirgswasserzuflüssen sind entsprechende Maßnahmen einzuplanen.

1.2.7.4 Ortsbrust mit mechanischer Stützung (SM-V2)

Aufgrund zahlreicher gescheiterter Projekte wird der Maschinentyp nicht mehr empfohlen.

1.2.7.5 Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-V3)

Durch Druckluftbeaufschlagung kann der Maschinentyp SM-V1 in standfesten Böden auch im Grundwasser eingesetzt werden. Die Luftdurchlässigkeit des Gebirges bzw. der Luftverbrauch und die Nachweise zur Ausbildung eines Strömungsfeldes und zur Ausblärsicherheit sind maßgebliche Kriterien für die Anwendung dieses Maschinentyps. Der Grundwasserspiegel sollte sich mit ausreichendem Sicherheitsabstand oberhalb der Tunnelfirste befinden.

1.2.7.6 Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4)

Haupteinsatzbereich der Flüssigkeitsschilde (Bild 1-9) sind grob- und gemischtkörnige Bodenarten. Der Grundwasserspiegel sollte sich mit ausreichendem Abstand oberhalb der Tunnelfirste befinden. Beim Abbauvorgang stützt eine unter Druck stehende Flüssigkeit, z. B. eine Bentonitsuspension, die Ortsbrust. Stark durchlässige Böden erschweren die Membranbildung. Bei einer Durchlässigkeit von über $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ besteht die Gefahr, dass die Bentonitsuspension unkontrolliert in den Baugrund abströmt. Durch die Zugabe von Feinkorn und Füller oder Additiven zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften

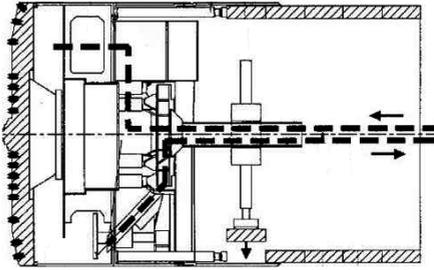


Bild 1-9 Hydroschild

kann der Einsatzbereich erweitert werden. Alternativ können Zusatzmaßnahmen zur Reduzierung der Bodendurchlässigkeit (beispielsweise Porenhohlraumverfüllungen) erforderlich werden. Steine und Blöcke, die nicht gepumpt werden können, werden in vorge-schalteten Brechern zerkleinert. Ein hoher Feinkornanteil kann zu Schwierigkeiten bei der Separierung führen. Zu berücksichtigen ist auch, dass sich die rheologischen Eigenschaften der Stützflüssigkeit durch Feinkorn verschlechtern, da eine Trennung der tonigen Fraktionen und Bentonit technisch nicht möglich ist.

1.2.7.7 Ortsbrüst mit Erddruckstützung (SM-V5)

Maschinentypen mit Erddruckstützung (Bild 1-10) eignen sich besonders in Böden mit Feinkornanteilen ($< 0,06 \text{ mm}$) von über 30 %. In grob- und gemischtkörnigen Böden und Fels steigen mit zunehmendem Stützdruck die Anpresskraft und das Schneidraddrehmoment überproportional an. Das Strömungsverhalten des abgebauten Bodens kann durch Zugabe geeigneter Konditionierungsmittel, wie z. B. Bentonit, Polymere oder Schaum, verbessert werden. Zur aktiven Stützdruckkontrolle und Gewährleistung eines setzungsarmen Vortriebs wird außerhalb der prädestinierten Einsatzbereiche die Bodenconditionierung mit Schaum empfohlen.

Erddruckschilde besitzen den Vorteil, dass ohne verfahrenstechnische Modifikationen der Vortrieb mit teilgefüllter und nicht druckbeaufschlagter Abbaukammer im offenen Modus (SM-V5-OM) ohne aktive Ortsbrüststützung möglich ist. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der Schneirad- und Schneckenkonstellation der gelöste Boden/Fels deutlich mehr zermahlen wird als bei einer Bandförderung durch das Zentrum (SM-V1). Neigt der Baugrund zur Verklebung, ist mit Behinderungen und erhöhtem Verschleiß zu rechnen. Zur Verbesserung des Materialflusses und zur Reduzierung der Verklebungsneigung sind Konditionierungsmaßnahmen einzuplanen. Als besonders ungünstig für Erddruckschilde gilt sowohl im Lockergestein als auch im Fels die Kombination hoher Stützdruck, starke Durchlässigkeit, hohe Abrasivität und schwere Brechbarkeit des Korngefüges.

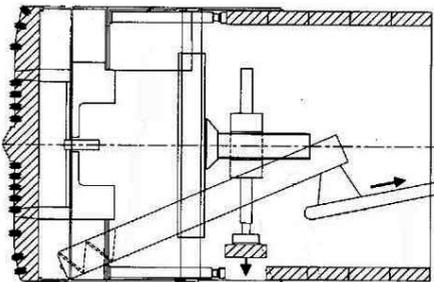


Bild 1-10 Erddruckschild

1.2.7.8 Ortsbrust ohne Stützung (SM-T1)

Dieser Maschinentyp kann oberhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt werden, wenn die Ortsbrust durchgehend standfest ist, siehe hierzu SM-V1.

Bei Teilschnittmaschinen besteht immer eine sehr gute Zugänglichkeit zur Ortsbrust, so dass insbesondere bei der Gefahr von anzutreffenden Hindernissen diese Verfahren große Vorteile bieten können.

1.2.7.9 Ortsbrust mit Teilstützung (SM-T2)

Dieser Maschinentyp (Bild 1-11) kann eingesetzt werden, wenn die Stützung des auf den Bühnen im natürlichen Böschungswinkel aufliegenden Materials für einen bedingt verformungskontrollierten Vortrieb ausreicht. Im First- und Bühnenbereich können Brustplatten unterstützend verwendet werden. Die Haupteinsatzbereiche sind die schwach bis nicht-bindigen Kies-Sand-Böden oberhalb des Grundwasserspiegels mit entsprechendem Reibungswinkel.

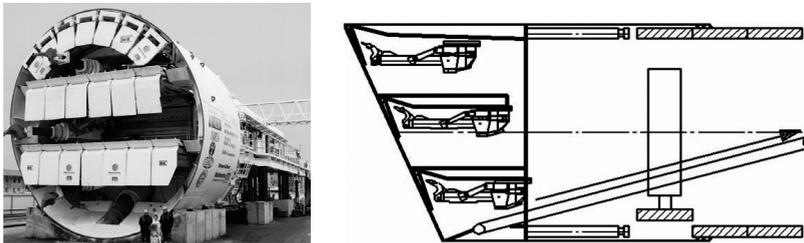


Bild 1-11 Teilflächiger Abbau mit mechanischer Ortsbruststützung

1.2.7.10 Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-T3)

Der Einsatz dieses Maschinentyps (Bild 1-12) ist dann angebracht, wenn die Typen SM-T1 und SM-T2 im Grundwasser eingesetzt werden sollen. Der gesamte Arbeitsbereich, einschließlich des hergestellten Tunnels, oder lediglich die Arbeitskammer wird unter Druckluft gesetzt.

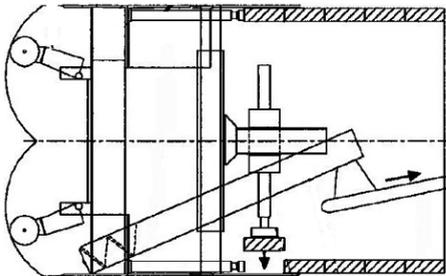


Bild 1-12 Teilflächiger Abbau mit druckluftgestützter Ortsbrust

1.2.7.11 Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-T4)

Teilschnittmaschinen mit flüssigkeitsgefüllter Abbaukammer werden nicht mehr eingesetzt.

1.2.7.12 Kombinationsmaschinen (KSM)

Kombinationsmaschinen (Bild 1-13) verbinden bei wechselnden Baugrundbedingungen die Einsatzmöglichkeiten der jeweiligen Maschinentypen. Ihr Einsatzspektrum wird somit auf beide Kriterien ausgeweitet.

Die Zahl der Umbauten von einem zum anderen Vortriebsverfahren sollte möglichst gering gehalten werden, da Umbauten meist sehr zeit- und kostenaufwendig sind.

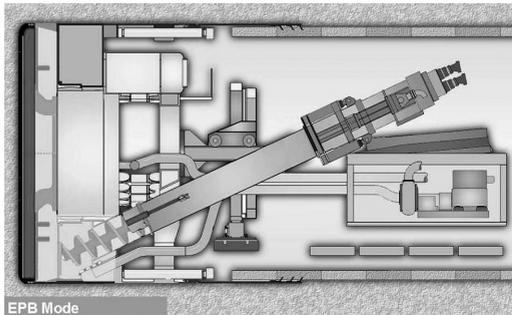


Bild 1-13 Veränderbare Schildmaschine

1.3 Ursprünge und historische Entwicklung

Seit etwa 5.000 Jahren hat der Bau von Tunneln für die verschiedensten Zwecke die Menschheit beschäftigt. Es wurden Tunnel zum Schutz von Gütern und Menschen, für geheime Zugänge zu verbotenen Stätten, zur Gewinnung von Bodenschätzen oder zur Beschleunigung von Transporten gegraben.

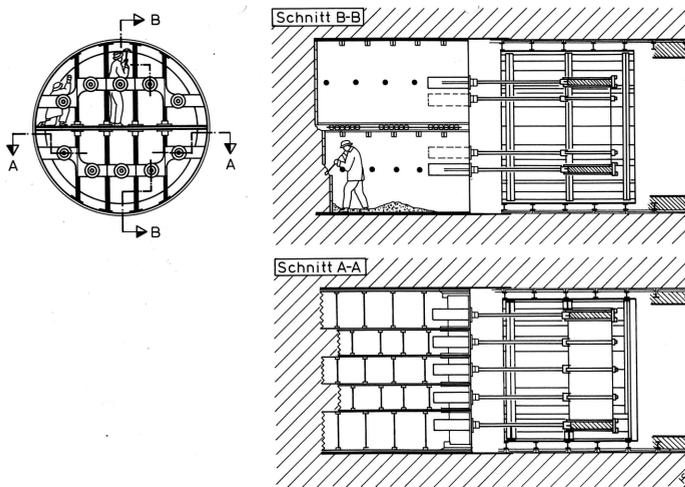


Bild 1-14 Kastenschild
von M. I. Brunel, 1806
[268]

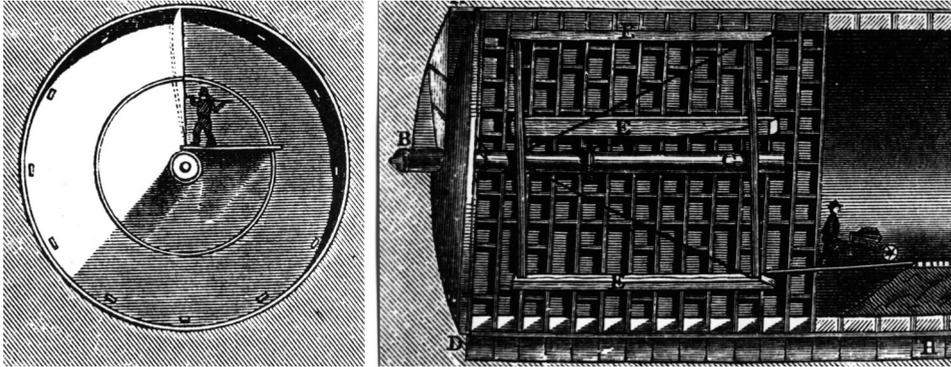


Bild 1-15 Schraubenschild von M. I. Brunel, 1818 [251]

Schon früh lernten die Tunnelbauer, nachbrüchiges Gebirge und auch Lockergestein mit einem Holzverbau abzustützen und dann mit Mauerwerk auszukleiden. Dies gelang auch im Gebirge mit Sicker- oder Kluftwasser, bis ins 19. Jahrhundert hinein aber nicht unterhalb des Grundwasserspiegels im Lockergestein oder gar unter offenen Gewässern. Die Situation änderte sich 1806, als der geniale Ingenieur Sir Marc Isambard Brunel in London das Prinzip des Schildvortriebes erfand und später patentieren ließ. Anlass war der wintersichere Ausbau einer Verkehrsverbindung über die Newa in St. Petersburg. Die Brückenpfeiler wurden dort jedes Jahr erneut durch das Packeis vom Ladogasee schwer beschädigt. Bei der Projektbearbeitung entwickelte Brunel eine Tunnellösung, obwohl dann letztlich eine Hängebrücke vorgeschlagen wurde.

Derartige Schildkonstruktionen von M. I. Brunel zeichnen sich durch eine Zelleneinteilung aus. In jeder dieser Zellen kann ein Arbeiter unabhängig und völlig gesichert arbeiten (Bild 1-14). Während bei der einen Methode die Zellen im Schildmantel fest installiert waren und nach dem Aushub eines Abschnittes der gesamte Schildmantel bereits mit hydraulischen Pressen nach vorn geschoben wurde, waren bei einer anderen Methode die einzelnen Zellen unabhängig voneinander verschiebbar. Alle heutigen geschlossenen Vollschilder beruhen auf der erstgenannten Methode; die zweite wurde nie zur Praxisreife entwickelt, es sei denn, man sieht den Messerschild als ihre Fortentwicklung an.

Ein grundsätzlich anderes Verfahren mit geschlossenem Schildmantel und einem vollflächigen, schraubenförmigen Abbau und sofortiger Auskleidung zeigt Bild 1-15. Dieser Schild kann als Vorläufer der Erddruckschilde gelten.

Das Projekt des Themsetunnels in London brachte M. I. Brunel endlich die Möglichkeit, seine Ideen zu verwirklichen (Bild 1-16). Der Schild war rechteckig und bestand aus zwölf nebeneinander stehenden Rahmen, die jeweils in drei Kammern geteilt waren. In jeder dieser Kammern konnte ein Bergmann arbeiten, also insgesamt 36 Männer. Das System funktionierte folgendermaßen: Zuerst wurden die Firstpfähle mittels Spindeln in das Gebirge vorgeschoben. Der Holzverbau an der Ortsbrust wurde, oben beginnend, weggenommen und der Boden um 6 Zoll weggegraben, die Brust wurde wieder verbaut und durch Spindeln abgestützt. Die Mauerung, die jeweils mit nachgebaut wurde, diente dem gesamten Rahmen als Widerlager. Die Arbeiten für den Themsetunnel begannen 1825 mit großen Schwierigkeiten. Erst 1843 konnte der Tunnel nach mehr als fünf schweren Wassereinbrüchen beendet werden. Interessant ist, dass nach dem ersten schweren Wassereinbruch (Bild 1-17), der mit einem

Stillstand verbunden war, Callodan 1828 vorschlug, Druckluft einzusetzen, was Brunel jedoch ablehnte [268].

Im Jahre 1869 untertunnelte der Ingenieur James Henry Greathead erneut die Themse in London mit einem kreisrunden Schild, bei dessen Einsatz auch gleichzeitig zum ersten Mal gusseiserne Tübbinge eingebaut wurden [19]. Der Bau des 402 m langen Tunnels

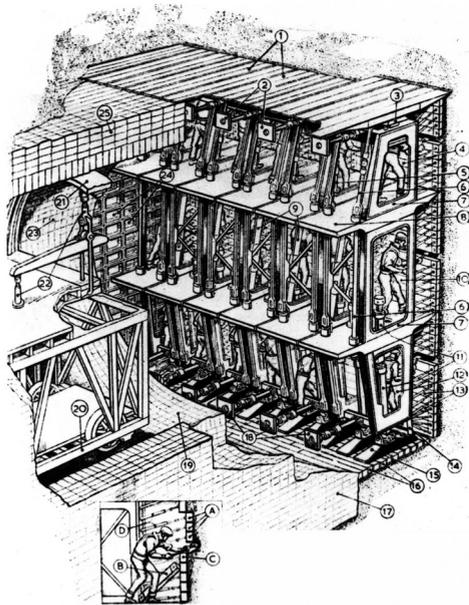


Bild 1-16 Schild von Sir M. I. Brunel zur Unterföhrung der Themse, 1825/43 [213]

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1 Firstpfähle | 18 Vortriebsspindeln |
| 2 Spindeln | 19 Sohle |
| 3 Auflager | 20 fahrbare Arbeitsbühne |
| 4 obere Kammer | 21 Wölbgerüst |
| 5 Winde | 22 Winde |
| 6 Verstärkung | 23 westliche Seitenwand |
| 7 seitliche Rahmentteile | 24 Schildmantel |
| 8 Bodenplatte (obere Kammer) | 25 Mauerwerk im Firstbereich |
| 9 Aussteifung | |
| 10 mittlere Kammer | |
| 11 Stütze | A vorgebauter Holzverzug |
| 12 untere Kammer | B Holzbohle |
| 13 Holzverbau | C Holzverzug in der Ausgangsposition |
| 14 Winde | D Spindel |
| 15 Windenschuh | |
| 16 Bodenbretter | |
| 17 Mauerwerk | |

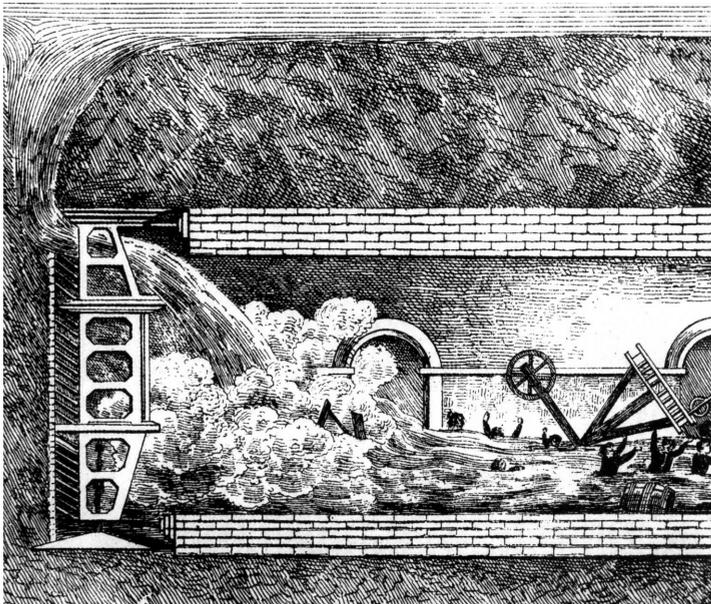


Bild 1-17 Wassereinbruch in den Tunnel am 12.01.1828 bei der Unterföhrung der Themse [213]

mit einem Außendurchmesser von 2,18 m erfolgte ohne große Schwierigkeiten, da der Vortrieb ausschließlich durch wasserdichten Ton führte und es deswegen keine Probleme mit der Wasserhaltung gab. Der kreisrunde Greathead-Schild wurde zum Vorbild für die meisten später gebauten offenen Schilde. Bild 1-18 zeigt einen der beiden beim Bau des Rotherhithe-Tunnels (1904 bis 1908) eingesetzten Greathead-Schilde mit 9,35 m Durchmesser. Der Tunnel unter der Themse verband Rotherhithe mit Ratcliff.

Das Problem der Wasserhaltung beim Vortrieb von Unterwassertunneln im Lockergestein wurde, basierend auf einem Vorschlag von Callodan an Brunel im Jahre 1828, von Admiral Sir Thomas Cochrane durch Anwendung von Druckluft gelöst. Er erfand 1830 die Druckluftschleuse, die den Zugang zu den unter erhöhtem Druck stehenden Arbeitsräumen ermöglichte [8], [268]. Die erste Anwendung eines Druckluftvortriebs erfolgte fast gleichzeitig 1879 in Antwerpen und 1880 in New York, jedoch im Tunnelvortrieb ohne Schild.

1886 gelang Greathead erstmals die gleichzeitige Anwendung des Schildvortriebs und des Druckluftverfahrens beim U-Bahnbau in London [128]. Die Anwendung der Druckluft brachte eine bedeutende Erleichterung für Tunnelvortriebe in wasserführenden Bodenschichten. Somit war der Druckluftschild geboren und eine empfindliche Lücke im Tunnelbau geschlossen. Die Zahl der Schildvortriebe nahm danach weltweit erheblich zu. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden die meisten Tunnel mit Schilden vom Typ Greathead aufgeföhren.

Natürlich entstand nach der Erfindung von Brunel recht schnell der Wunsch, den händischen Abbau des Gebirges durch einen maschinellen zu ersetzen. Das erste Patent für einen solchen mechanisierten Schild stammt aus dem Jahre 1876 [268] und wurde von den Engländern John Dickinson Brunton und George Brunton beantragt (Bild 1-19). Der Schild besaß einen halbkugelförmigen rotierenden Schneidkopf, der aus einzelnen Platten aufgebaut war. Das herausgeschnittene Material sollte in Förderkübeln fallen, die radial im Schneidkopf angebracht waren. Die Kübel warfen das Schuttermaterial auf ein Förderband, das dann den Transport nach hinten aus dem Schild besorgte. Das Schneidrad selbst wurde mit sechs Hydraulikzylindern gedreht, die gegen die Zähne eines am Schneidrad befestigten Knarrenringes drückten. Dieser Gedanke wurde später für den U-Bahnbau in Kiew aufgegriffen.

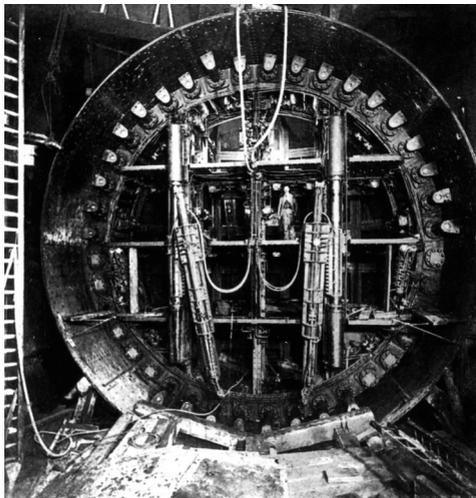


Bild 1-18 Greathead-Schild, 9,35 m Außendurchmesser, Rotherhithe-Tunnel, 1904 bis 1908 (Markham)

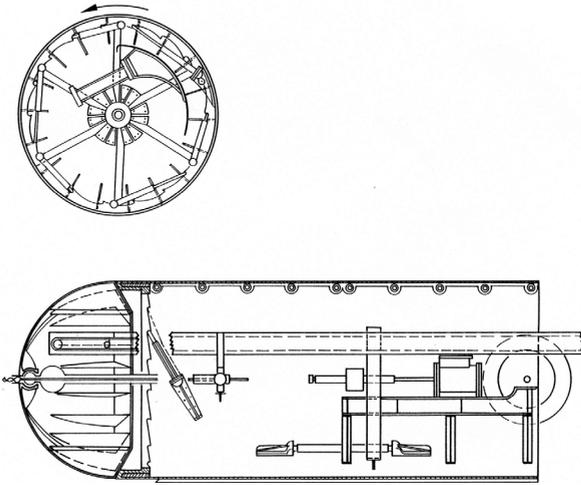


Bild 1-19 Mechanisierter Schild
nach J. D. Brunton und G. Brunton,
U.K. Patent, 1876 [268]

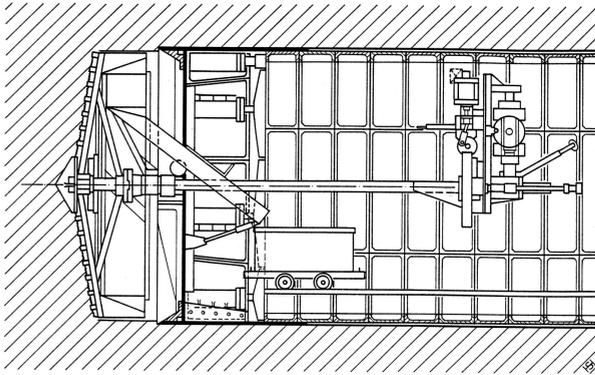


Bild 1-20 Mechanisierter Schild
nach J. Price, U. K. Patent, 1896
[268]

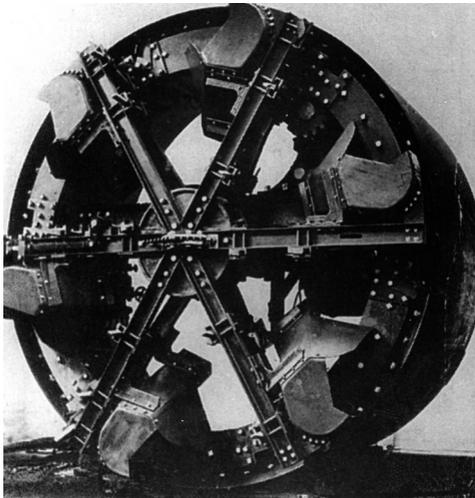


Bild 1-21 Mechanisierter Schild nach Price, 1902
(Markham)

Besser konstruiert war der nach seinem Erfinder benannte und 1896 patentierte Price-Schild (Bilder 1-20, 1-21). Diese Maschine wurde ab 1897 im Londoner Ton mit gutem Erfolg eingesetzt. Sie war die erste, die die auf einfachen Grundsätzen beruhende Leistungsfähigkeit eines rotierenden Schneidkopfes innerhalb eines Greathead-Schildes nutzte. Das Schneidrad bestand aus vier speichenförmig angeordneten Armen, die die Schneid- oder Kratzwerkzeuge trugen. Außerdem waren am Schneidrad wannenförmige Löffel angebracht, die das gelöste Gebirge sammelten, anhoben und in eine Rutsche förderten. Dadurch gelangte es in bereitgestellte Loren und konnte abtransportiert werden. Das Schneidrad wurde elektrisch über eine lange Achse angetrieben [268].

In Böden mit höherer Durchlässigkeit ist es schwierig, die Ortsbrust durch Druckluft zu stützen. Bereits 1874 hatte Greathead daher einen Schild mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust entwickelt, welcher die Nachteile der Druckluftstützung vermeidet. Der Boden sollte durch den Strom einer Flüssigkeit gelöst und als Slurry hydraulisch abgefördert werden (Bild 1-22).

Haag meldete 1896 in Berlin den ersten Schild mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust in Deutschland an, bei dem der hermetische Abschluss der unter Flüssigkeit stehenden Abbaukammer als Druckkammer realisiert wurde (Bild 1-23).

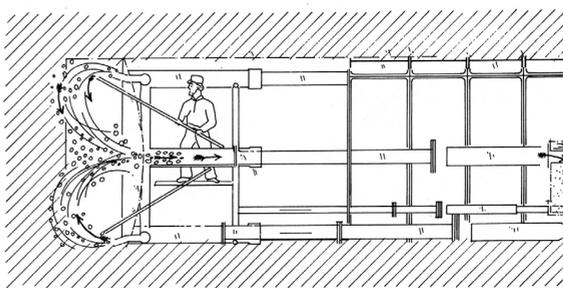


Bild 1-22 Slurryschild von Greathead, patentiert 1874 [268]

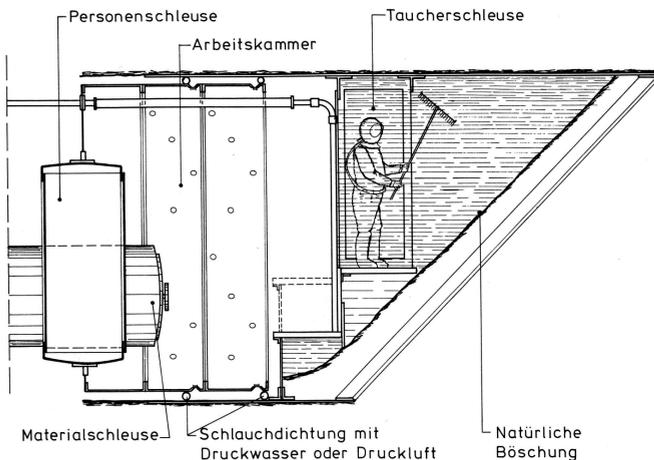


Bild 1-23 Flüssigkeitsschild von Haag, patentiert 1896

Aber erst 1959 wurde die Idee der flüssigkeitsgestützten Ortsbrust von Elmer C. Gardner für einen Abwassertunnel mit 3,35 m Durchmesser erfolgreich getestet. 1960 führte Schneiderei den Begriff der aktiven Ortsbruststützung durch eine Bentonitsuspension ein. Patentrechtlich sicherte sich H. Lorenz die stabilisierende Wirkung von Bentonit unter Druck für die Ortsbruststützung. 1967 wurde in Japan der erste Flüssigkeitsschild mit 3,1 m Durchmesser eingesetzt, bei dem der Abbau der Ortsbrust mit einem Schneidrad und der Abtransport des gelösten Bodens mittels hydraulischer Förderung erfolgte. In Deutschland wurde 1974 von der Wayss & Freytag AG der erste Schild mit bentonitgestützter Ortsbrust entwickelt und eingesetzt.

Die Entwicklung von Erddruckschilden setzte erst viel später ein. Als ein Vorläufer für den Grundgedanken könnte allerdings der Schraubenschild von Brunel (Bild 1-15) gelten. Das erste Konzept wurde 1963 von der japanischen Firma Sato Kogyo Company Ltd. entwickelt (Bild 1-24), die nach einer Methode zur Auffahrung weicher und fließender Böden unter dem Grundwasserspiegel suchte. Die Entwicklung der Erddruckschilde war überraschend, da in Japan zu dieser Zeit sowohl Druckluft- als auch Flüssigkeitsschilde erfolgreich eingesetzt wurden. Der Grund für die Entwicklung lag in den strengen Umweltschutzregelungen und Gesetzen, die für viele der größeren Städte Japans schon damals in Kraft waren. Diese betrafen Verschmutzungen von Grundwasser und Luft, Deponierung des Abraums, aber auch Vorsorgemaßnahmen zur Vermeidung von Krankheiten und Unfällen bei der Arbeit unter Druckluft.

Von den gezeigten „Urtypen“ der Schilde bis zu den modernen hochtechnisierten Maschinen der Gegenwart, wie sie z. B. die Multibrustschilde darstellen, war es ein weiter, oft beschwerlicher oder gar gefährlicher Weg. Die Entwicklung im Einzelnen noch detaillierter aufzuzeigen, würde den Rahmen dieses Buches bei Weitem sprengen. Interessierten Lesern sei das Handbuch von Barbara Stack [268] empfohlen, das ausführlich auf die Entwicklung der einzelnen Prinzipien im Schildtunnelbau und die damit verbundenen Patente eingeht.

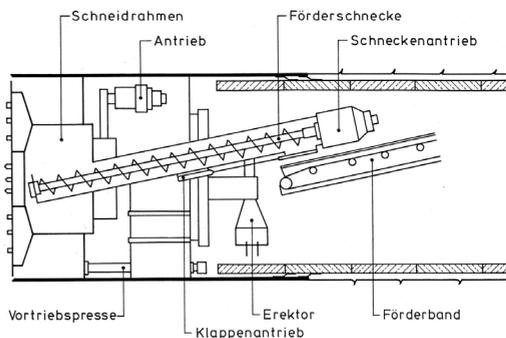


Bild 1-24 Erddruckschild, Sato Kogyo Company, 1963 [268]

In Tabelle 1-1 sind einige klassische Schildvortriebe aus den Jahren 1826 bis 1914 zusammengefasst.

Tabelle 1-1 Klassische Schildvortriebe 1826 bis 1914, Auszug aus [128]

Jahr	Projekt	Länge [m]	Durchmesser [m]	Tagesleistung [m/d]	Bemerkung	Auskleidung
1826–1842	Themse-Tunnel (London)	460	11,40 x 7,10	1,50	Brunel-Schild (rechteckig)	Ziegelmauerwerk
1869–1870	Broadway (New York)	90	2,85		Beach-Schild (aufgegeben)	Ziegelmauerwerk
1869–	Tower-Subway (London)	403	2,20	2,60	Greathead-Schild	Gusseisen-auskleidung
1886–1890	City-South Subway (London)	10.200 diverse	3,10 bis 3,45	4,00	erstmalig Druckluftvortrieb	Gusseisen-auskleidung
1890–1893	Glasgow-Harbour-Straßentunnel	580	5,20	1,00	Druckluft	Gusseisen-auskleidung
1892–1894	Abwasserstollen (Clichy)	465	2,50	2,00 bis 3,00	Druckluft bis 2,9 bar	Gusseisen-auskleidung
1896–1899	Spree-Straßentunnel (Berlin)	375	4,00	1,40	Druckluft	Profilwalzstahl mit Beton
1898	Orleans-Railway (Paris)	1.230	9,75		Segmentschild	Mauerwerk
1899–1904	Abwasserstollen (Hamburg)	2.150	3,05	1,30	Druckluft (0,6 bis 1,5 bar)	
1907–1911	Elbtunnel I (Hamburg)	920	5,95	1,70	Druckluft (2,0 bis 2,7 bar)	Formstahl mit Beton
1911–	Kanalstollen (Wanne-Eickel)		2,85			Ziegelmauerwerk
1911–	Kanalstollen (Gelsenkirchen)	670	3,90	5,20	Druckluft	Beton