Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen

Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines

DAUB

Deutscher Ausschuß für unterirdisches Bauen (DAUB)
Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) und
Arbeitsgruppe Tunnelbau der Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen
FGU Fachgruppe für Untertagbau Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein

1 Zweck der Empfehlung

Die Entwicklung des Tunnelbaus in geschlossener Bauweise ist durch eine verstärkte Tendenz zum vollmechanisierten Tunnelbau mit geeigneten Tunnelvortriebsmaschinen TVM im Festgestein und Lockergestein gekennzeichnet. Die Schaffung spezieller Verfahrenstechniken wie Ortsbruststützung mit Flüssigkeit oder Erdbrei sowie die erfolgreiche Anwendung von Diskenmeißeln zum Abbau von felsartigen Einlagerungen und Findlingen haben zu einer wesentlichen Erweiterung des Einsatzbereiches und zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit dieser Vortriebssysteme geführt.
Die zunehmende Anwendung von Tunnelvortriebsmaschinen und die damit verbundene laufende Verbesserung der unterschiedlichen Verfahrenstechniken führt zu Maschinentypen, die auch sehr heterogenen Baugrund bzw. eine Mischung aus Locker- und Festgestein zu durchörtern vermögen. Die durch die Entstehungsgeschichte und die spezifische Maschinen- und Abbautechnik bedingte klare Unterscheidung von Tunnelbohrmaschinen für das Festgestein und Schildmaschinen für das Lockergestein verliert ihre ursprüngliche Bedeutung. Die zurückliegende Entwicklung und die erfolgreiche baupraktische Erprobung hat Tunnelvortriebsmaschinen hervorgebracht, bei denen typische Merkmale der beiden Verfahrenstechniken zu einer Einheit integriert wurden. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, für das gesamte geotechnische Spektrum geeignete Tunnelvortriebsmaschinen zum Einsatz zu bringen.
Die zu erwartenden geotechnischen Verhältnisse in Verbindung mit dem Trassen- und Gradientenverlauf sind die entscheidenden Voraussetzungen für die Wahl des Tunnelbauverfahrens. Durch Gegenüberstellung des für die Nutzung erforderlichen Querschnittes, der Länge des Tunnels und der geotechnischen Verhältnisse mit den verfügbaren Verfahrens- und Maschinentechniken kann die jeweils geeignete Tunnelvortriebsmaschine konzipiert werden. Diese Empfehlung zeigt Zusammenhänge auf, die zwischen den geotechnischen Gegebenheiten und der Verfahrens- und Maschinentechnik bestehen.
Bei der Auswahl der Tunnelvortriebsmaschinen ist außerdem auf die Umweltverträglichkeit der Maschinen- und Verfahrenstechnik zu achten.
Diese Empfehlung ist als zusätzliches Hilfsmittel zu verstehen, die dem Ingenieur bei der Entscheidungsfindung dienen soll. Eine projektbezogene Analyse ist jedoch unerläßlich und stellt die Hauptgrundlage dar. Die Empfehlung gilt nicht oder nur bedingt für Microtunnelmaschinen.

2 Geotechnik

Die Kenntnis der geotechnischen Verhältnisse ist die wichtigste Grundlage für

1 Purpose of the recommendations

The developments in mined tunnelling are characterised by a increased trend towards fully mechanised tunnelling with appropriate tunnelling machines (TBM) in solid rock and soft ground. The creation of special methods such as face supporting with fluid or slurry as well as the successful utilisation of cutter discs for removing rock-like intrusions and boulders have led to a considerable expansion of the field of application and to an increase in the economy of these tunnelling systems.
The increasing application of tunnelling machines and the related continuous improvement of the various extraction techniques had led to types of machines, which have the capacity to penetrate extremely heterogeneous subsoil, that is respectively a mixture of soft ground and solid rock. The clear distinction between tunnel boring machines (TBM) for solid rock and shield machines (SM) for soft ground, which resulted from their conceptional background and the special engineering and extraction technology, has lost its original significance. Past developments and the progress made in practice have produced tunnelling machines, in which the typical features of both techniques have been integrated in a single unit. In this way, the possibility has been created to make available tunnelling machines suitable for the entire geotechnical spectrum.
The anticipated geotechnical conditions in conjunction with the course of the route and gradient represent the decisive prerequisites for selecting the tunnelling method. By comparison of the cross-section needed for the purpose of the tunnel, its length and the geotechnical conditions with the available technology, the most suitable tunnelling machine can be devised. These recommendations apply to inter-relationships which exist between the geotechnical circumstances and process and engineering techniques.
When selecting tunnelling machines, the environmental compatibility of the tunnelling methods must also be taken into consideration.
These recommendations should also be seen as an additional aid, designed to serve the engineer in arriving at a decision. A project-related analysis is, however, essential and represents the main basis for the approach. These recommendations do not apply, or only to a certain extent for micro-tunnelling.

2 Geotechnics

The knowledge of the geotechnical con-

die Planung und Ausführung eines Tunnelbauvorhabens. Die Auswertung von Übersichts- und Spezialkarten führt zu ersten Erkenntnissen über die geologischen und hydrologischen Verhältnisse und gibt Hinweise für weitere notwendige Erkundungsmaßnahmen. Durch geeignete Vorerkundungen können die Beschaffenheit und Eigenschaften des beim Bau eines Tunnels zu durchörternden Baugrundes beschrieben werden. Die Genauigkeit dieser Beschreibung hängt von Art und Umfang der Voruntersuchungen ab und von deren Aussagekraft. Sehr wechselhafte geologische Verhältnisse erfordern einen erhöhten Umfang an Voruntersuchungen.

Bedingungen, die die Vorerkundungen einschränken, führen zu einer begrenzten Aussagekraft eines geotechnischen Berichtes. Dies ist bei der Beurteilung der prognostizierten geotechnischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Ziel der geotechnischen Untersuchung muß es sein, die für das Tunnelbauvorhaben ausschlaggebenden geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse möglichst umfassend und eindeutig darzustellen.

Der anstehende Baugrund wird im wesentlichen erkundet durch:

❏ Erkundungsbohrungen und Gewinnung von Bodenproben und Bohrkernen
❏ Schürfen und Probeentnahmen an der Oberfläche
❏ Rammsondierungen, Drucksondierungen
❏ Mechanische Bohrlochuntersuchungen, z. B. Bohrlochaufweitungsversuche, Pressiometer
❏ Geophysikalische Untersuchungsverfahren
❏ Pump- und Wassereinpreßversuche
❏ Erkundungsstollen.

Mit diesen Erkundungen und vor allem mit den dabei gewonnenen Proben werden durch weitere geeignete Untersuchungen und entsprechende Auswertungen Kennwerte des Baugrundes für die Tunnelbautechnik ermittelt oder abgeleitet.

Je umfangreicher und aussagekräftiger die Voruntersuchungen durchgeführt werden, um so besser sind die Grundlagen für die Wahl der Verfahrenstechnik und der Tunnelvortriebsmaschinen.

Die wesentlichen geotechnischen Kenngrößen sind im folgenden zusammengestellt:

Festgestein
– Druckfestigkeit (Gesteinsfestigkeit)
– Zugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit
– Scherfestigkeit

ditions is the most important principle for the planning and execution of a tunnelling project. The evaluation of general and special maps leads to initial recognitions about the geological and hydrogeological conditions and provide pointers for further investigatory measures. By means of suitable preliminary explorations, the nature and features of the subsoil that must be penetrated during the construction of a tunnel can be described. The accuracy of this description depends on the type and extent of these pre-investigations as well as their validity. Extremely variable geological conditions call for more intensive of preliminary surveys.

Conditions which restrict the pre-investigations lead to a limited validity of a geotechnical report. This must be taken into account when assessing the projected geotechnical conditions. The aim of the geotechnical survey must be to present the geological and hydrogeological conditions required for the tunnelling project as comprehensively and lucidly as possible.

The subsoil that has to be penetrated is, by and large, examined by means of:

❏ investigatory boreholes and the obtaining of bore samples and cores
❏ exploration and sample-taking on the surface
❏ dynamic penetration tests, pressure probes
❏ mechanical borehole examinations, e.g. borehole expansion tests, pressiometer
❏ geophysical investigation methods
❏ pump and water injection tests
❏ exploratory tunnels

Through these investigations and, above all, through the samples that were taken, characteristic values are obtained or derived through further suitable investigations and corresponding evaluations.

The more comprehensively the preliminary investigations are carried out and the more valid they are, the better the basis for selecting the tunnelling method and the tunnelling machines.

The essential geotechnical parameters are listed in the following:

solid rock
– compressive strength (rock strength)
– tensile strength, cleavage strength
– shearing strength
– break and bedding planes
– degree of decomposition, degree of weathering
– fault zones
– mineralogy/petrography
– proportions of abrasive minerals
– wearing hardness/hardness
– water-bearing and water pressure (underground water)
– chemical analysis of the water

soft ground
– grain distribution curves
– angle of friction
– cohesion
– deposit thickness
– compressive strength
– shearing strength
– pore volume
– plasticity
– swelling behaviour
– permeability
– natural and artificial intrusions and faults
– water-bearing and water pressure (ground water)
– chemical analysis of the water

special features
– primary stress state
– rock burst
– fault zones
– weakening due to leaching processes
– heaving/swelling rock
– subsidences and subsidence chimneys
– karst manifestations
– gases
– rock temperature
– seismic action

More detailed information relating to investigating the subsoil is contained in DIN 4020 – Geotechnical Investigations for Constructional Purposes. Further pointers are contained in the "Recommendations for Tunnelling – Chapter 3: Geotechnical Investigations", published by the DGGT.

From the cited geotechnical characteristic values and an overall appraisal of the geological and hydrogeological conditions of the subsoil, generally speaking, the following extremely important technical data can be obtained:
– ease of break-out of the subsoil
– stability of the subsoil
– stability of the face
– measures for supporting the face
– nature and extent of the supporting measures
– time lag between breaking-out and securing the subsoil
– deformation behaviour of the subsoil
– influence of underground and/or groundwater
– abrasiveness of the subsoil
– stickiness of the excavated soil
– separability of the excavated soil (when using a supporting fluid)
– suitability for reutilisation of the excavated soil

– Kluft- und Schichtfugen
– Zerlegungsgrad, Verwitterungsgrad
– Verwerfungen und Störzonen
– Mineralogie/Petrographie
– Bestandteile an abrasiven Mineralen
– Schleißhärte/Festigkeit
– Wasserführung und Wasserdruck (Bergwasser)
– Chemische Analyse des Wassers

Lockergestein
– Kornverteilungskurven
– Reibungswinkel
– Kohäsion
– Lagerungsdichte
– Druckfestigkeit
– Scherfestigkeit
– Porenvolumen
– Plastizität
– Quellverhalten
– Durchlässigkeit
– Natürliche und künstliche Einlagerungen und Störungen
– Wasserführung und Wasserdruck (Grundwasser)
– Chemische Analyse des Wassers

Besonderheiten
– Primärspannungszustand
– Bergschlag
– Störungszonen
– Entfestigung durch Auslaugungsvorgänge
– Quellendes bzw. schwellendes Gebirge
– Erdfälle und Erdfallschlote
– Karsterscheinungen
– Gase
– Gebirgstemperatur
– Erdbebeneinwirkung

Nähere Angaben zur Untersuchung des Baugrundes sind in der DIN 4020 – Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – aufgeführt. In den von der DGGT herausgegebenen Empfehlungen für den Tunnelbau – Kapitel 3: Geotechnische Untersuchungen – sind weitere Hinweise enthalten.
Aus den genannten geotechnischen Kennwerten und einer Gesamtbeurteilung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse des Baugrundes lassen sich im allgemeinen sehr wichtige bautechnische Informationen ableiten:
– Lösbarkeit des Baugrundes
– Standfestigkeit des Baugrundes
– Standzeit der Ortsbrust
– Maßnahmen zur Stützung der Ortsbrust
– Art und Umfang der Sicherungsmaßnahmen
– Zeitliche Abhängigkeit zwischen Lösen und Sichern des Baugrundes
– Verformungsverhalten des Baugrundes
– Einfluß des Berg- bzw. Grundwassers
– Abrasivität des Baugrundes
– Klebrigkeit des abgebauten Bodens
– Separierbarkeit des abgebauten Bodens (bei Verwendung einer Stützflüssigkeit)
– Wiederverwendbarkeit des abgebauten Bodens.
Zu beachten sind auch umweltbeeinflussende Faktoren, wie z. B.:
– Oberflächensetzungen
– Eingriffe in die und Veränderungen der Grundwasserverhältnisse
– Deponierfähigkeit des Ausbruchmaterials
– Kontamination des Baugrundes und Grundwassers
– Gesundheitsgefährdende Einflüsse
Anhand der aufgezeigten geotechnischen Kennwerte und bautechnischen Informationen einschließlich der umweltrelevanten Faktoren ist es möglich, das Bauverfahren auszuwählen und den Tunnel in seiner linienförmigen Erstreckung in Vortriebsklassen zu unterteilen, die die Verfahrenstechnik näher definieren, die aufzuwendenden Leistungen je Vortriebsklasse kennzeichnen und deren Schwierigkeitsgrad beschreiben. Während die Wahl des Bauverfahrens Voraussetzung für eine Einstufung in Vortriebsklassen ist (Vorgabe des Auftraggebers), soll die Wahl des Gerätes so weit wie möglich offen und dem Ausführenden der Baumaßnahme überlassen bleiben (Wahl des Auftragnehmers).
Die zu erwartenden Verhältnisse über die aufzufahrende Tunnelstrecke werden zweckmäßigerweise in einem geotechnischen Längsschnitt dargestellt und diesem die entsprechenden Vortriebsklassen zugeordnet

3 Verfahrenstechnik für Tunnel in geschlossener Bauweise

3.1 Übersicht

Für die Ausführung von Tunneln in geschlossener Bauweise stehen unterschiedliche Bauverfahren zur Verfügung. Sie lassen sich in die Gruppen universelle Vortriebe, maschinelle Vortriebe (Tunnelvortriebsmaschinen) und Microtunnelvortriebe zusammenfassen. Dabei sind dem Festgestein die Verfahren zuzuordnen, bei denen der Ausbruch- bzw. Lösevorgang entscheidend ist. Beim Lockergestein ist dagegen die Stützung bzw. Sicherung des Baugrundes vorrangig (Bild 1).
In Verbindung mit den besonderen Anforderungen an einen Tunnel und unter Berücksichtigung von Umweltfaktoren kann eine allgemeine Bewertung der

Factors which influence the environment must also be observed, such as e.g.:
– surface settlements
– interference with and changes to the groundwater conditions
– suitability of the excavated material for landfill
– contamination of the subsoil and groundwater
– health-jeopardising influences
On the basis of the listed geotechnical characteristic values and constructional data including the environmentally relevant factors, it is possible the select the construction method and to divide the tunnel over its route into tunnelling classes, which closely define the tunnelling method, identify the performances to be applied per tunnelling class and describe the degree of difficulty. Whereas the selection of the construction method is the prerequisite for allocation into tunnelling classes (laid down by the client), the choice of the machine should be left open as far as possible and left up to the responsible contractor (choice of the construction company).

3 Construction methods for mined tunnels

3.1 Survey

Different construction methods are available for executing a tunnel by mining. They can be split up into the groups – universal headings, mechanical headings (tunnelling machines) and micro-tunnel headings. In this connection, those methods for which the extraction resp. the cutting phase is decisive are allocated to solid rock. In the case of soft ground, on the other hand, the supporting and/or securing of the subsoil is accorded priority (Fig. 1).
In conjunction with the special demands placed on a tunnel and taking environmental factors into consideration, a general assessment of the tunnelling methods with respect to their suitability in individual cases can be carried out.
The remainder of these recommendations deal exclusively with the process technical features to be considered when using tunnelling machines, and essential selection and evaluation criteria for the corresponding geotechnical fields of application.

3.2 Explanation of the Construction Methods

The “shotcreting construction method” is an independent method, whose possibili-

Bautechnische Merkmale eines Tunnels / Technical features of a tunnel / Umwelt / Environment — Tunnel-Bauverfahren / Tunneling method	Merkmale des Tunnels / Features of tunnel: Querschnittsgröße / Size of cross-section		Querschnittsform / Form of cross-section		Tunnellänge / Length of tunnel		Sicherung Ausbau / Lining		geford. Profilgenauigkeit / Required profile accuracy	Grund (G)-Schicht (S)-Wasser / Groundwater (G) Underground water (U)		Umwelt/Environment: Lärmerschütterungen / Noise vibrations	Gas-Staubentwickl. / Gas dust development	Schutz d. Personals / Protection of labour force
	gleichbleibend / uniform	veränderlich / changing	gleichbleibend / uniform	veränderlich / changing	kurz / short	lang / long	zweischalig / 2-shells	einschalig / 1-shell	groß / high	ohne Zusatzmaßn. / without extra measures	mit Zusatzmaßn. / with extra measures			
Universeller Vortrieb ***Universal excavation*** Festgestein/*Solid rock*														
Sprengvortrieb *Drill + blast*	X	X	X	X	X	X	X	X	0	SX	GX	□	□	△
Teilschnittmasch. Vortrieb *Roadheader*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	SX	GX	△	□	△
Spritzbetonbauw./NÖT *Shotcreting method/NATM*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	SX	GX	△	△	△
Messervortrieb *Forepoling*	X	0	X	0	–	X	X	X	X	0	GX	△	△	□
Vortrieb mit systematisch voreilender Sicherung *Heading with systematic advance support*	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	GX	△	△	□
Lockergestein/*soft ground*														
Maschineller Vortrieb ***Mechanical heading*** Festgestein/*Solid rock*														
Tunnelbohrmasch.-Vortr. *TBM driving*	X	0	Kreis *circle*	0	–	X	X	X	X	SX	GX	△	△	△
Schildmasch.-Vortrieb *Shield machine driving*	X	0	Kreis *circle*	0	–	X	X	X	X	X	X	△	△	□
Rohrvortrieb *Pipe jacking*	X	0	Kreis *circle*	0	X	X	–	X	X	X	X	△	△	□
Vorpreßverfahren *Jacking method*	X	0	X	0	X	X	0	X	X	X	X	△	△	□
Lockergestein/*soft ground*														
Microtunnelvortrieb *Micro-tunnelling*	X	0	Kreis *circle*	0	X	0	0	X	X	X	–	△	△	□

Eignung der Bauverfahren / *Suitability of the construction method:* X gut geeignet / *well suited* 0 nicht geeignet / *not suited* – nicht üblich / *not usual*

Auswirkungen / *Effects:* □ groß / *high* △ geringer / *slight*

1 Bauverfahren für Tunnel in geschlossener Bauweise
Construction methods for mined tunnels

Tunnelbauverfahren auf ihre Eignung im Einzelfall durchgeführt werden.

Die weiteren Ausführungen in dieser Empfehlung befassen sich ausschließlich mit den bei Anwendung von Tunnelvortriebsmaschinen zu beachtenden verfahrenstechnischen Besonderheiten und maßgebenden Auswahl- und Bewertungskriterien für die entsprechenden geotechnischen Einsatzbereiche.

3.2 Erläuterung zu den Bauverfahren

Die „Spritzbetonbauweise“ ist ein eigenständiges Verfahren, dessen Möglichkeiten bzw. Prinzipien der Sicherung des Hohlraumes sich mit verschiedenen Vortriebsverfahren kombinieren lassen.

Unter dem Begriff „Vortrieb mit systematisch voreilender Sicherung“ sind die Tunnelbauverfahren zu verstehen, die die

ties or rather principles of supporting the cavity combine with various tunnelling methods.

Under the term “tunnelling with systematically advancing support”, we understand tunnelling methods which embrace the systematic and thus not simply the partial application of suitable supporting means, which are applied for the advance stabilisation of the face area. These include: the forepoling method, methods with pipe screens, screens comprising injection lances, screens with freezing lances, screens comprising horizontal HPG columns.

Large-area freezing or grouting are methods designed to improve the subsoil, which then facilitate the application of a construction method such as shotcreting. The tunnelling classification then relates to the improved subsoil conditions.

Whereas the form and size of the cross-section in the case of the “universal headings” can be as desired and in fact, can alter within a length of tunnel, this flexibility does not exist when tunnelling machines are applied.

Generally speaking, tunnelling machines in accordance with their function are circular and thus possess a given shape. This restricts their application should the utilisation of a circular cross-section not be purposeful or necessary and therefore, increases the costs. Tunnelling machines have also been developed which do not drive circular cross-sections.

Tunnelling machines are, by and large, geared to their diameter. This applies, first and foremost, to shield machines. In the case of tunnelling machines for solid rock, a certain variation of the diameter is possible if a shield body is not required.

systematische und damit nicht nur bereichsweise Anwendung geeigneter Sicherungsmittel beinhalten, die zur Stabilisierung des Ortsbrustbereiches voreilend eingesetzt werden. Dazu gehören: Das Vorpfändverfahren, Verfahren mit Rohrschirmen, mit Schirmen aus Injektionslanzen, mit Schirmen aus Gefrierlanzen, mit Schirmen aus horizontalen HDI-Säulen.
Großräumiges Gefrieren oder Injizieren sind Maßnahmen zur Baugrundverbesserung, die dann die Anwendung eines Bauverfahrens wie die Spritzbetonbauweise ermöglichen. Die Vortriebsklassifizierung bezieht sich dann auf die verbesserten Baugrundverhältnisse.
Während bei den „universellen Vortrieben“ die Form und Größe des Querschnitts beliebig sein und sogar innerhalb einer Vortriebsstrecke wechseln kann, ist diese Flexibilität bei Anwendung der Tunnelvortriebsmaschinen nicht gegeben.
Funktionsbedingt sind die Tunnelvortriebsmaschinen im allgemeinen kreisförmig und damit formgebunden. Dies engt die Anwendung ein, wenn für die Nutzung ein Kreisquerschnitt nicht zweckmäßig oder erforderlich und damit kostensteigernd ist. Es wurden auch Tunnelvortriebsmaschinen entwickelt, die nicht kreisförmige Querschnitte aufzufahren vermögen.
Die Tunnelvortriebsmaschinen sind im allgemeinen an ihren Durchmesser gebunden. Dies gilt vor allem für die Schildmaschinen. Bei den Tunnelbohrmaschinen für das Festgestein ist bei Fehlen eines Schildmantels eine gewisse Variationsbreite des Durchmessers möglich. Neuere Entwicklungen machen auch Schildmaschinen mit vertretbarem Aufwand umbaubar für verschiedene Durchmesserbereiche. Außerdem wurden Schildmaschinen entwickelt, die mit zwei oder drei sich überlappenden, hintereinander versetzt liegenden Schneidrädern bestückt sind. Damit lassen sich von der Kreisform abweichende Querschnitte auffahren. Es handelt sich dabei um Sonderformen der Schildmaschinen für spezielle Zwecke.
Neben der Bindung der Maschinen an Kreisform und Durchmesser ist die Länge der Vortriebsstrecken ein weiteres wichtiges Merkmal insbesondere für den wirtschaftlichen Einsatz einer Tunnelvortriebsmaschine.
Die Profilgenauigkeit des Hohlraumquerschnittes ist bei Anwendung von Tunnelvortriebsmaschinen besonders groß. Beim Vortrieb ist darauf zu achten, daß die vorgegebenen Auffahrtoleranzen eingehalten werden. Außerplanmäßige Abweichungen von der Achse können im Gegensatz zu den universellen Vortrieben im allgemeinen nur mit erheblichem Aufwand korrigiert werden.

4 Tunnelvortriebsmaschinen TVM

Tunnelvortriebsmaschinen TVM bauen entweder den gesamten Tunnelquerschnitt mit einem Bohrkopf oder Schneidrad im Vollschnitt ab oder teilflächig durch geeignete Lösevorrichtungen. Beim Abbauvorgang wird die Maschine entweder kontinuierlich oder hubweise vorgeschoben.
Man unterscheidet Tunnelbohrmaschinen TBM und Schildmaschinen SM.
Tunnelbohrmaschinen lösen den anstehenden Baugrund, wobei die Sicherung in der Regel in zeitlichem und räumlichem Abstand nachlaufend eingebaut wird. Die Maschinen werden beim Abbauvorgang durch Verspannplatten in Querrichtung am Ausbruchrand verspannt.
Schildmaschinen stützen in der Regel den zu durchörternden Baugrund und die Ortsbrust beim Lösen unmittelbar. Die Abstützung beim Abbauvorgang erfolgt in Längsrichtung durch Pressen auf den Ausbau.
Eine systematische Zusammenstellung der Tunnelvortriebsmaschinen zeigt Bild 2, das der Gliederung dieses Abschnittes zugrunde gelegt wurde.

4.1 Tunnelbohrmaschinen TBM

Man unterscheidet Tunnelbohrmaschinen ohne Schildmantel TBM von solchen mit Schildmantel TBM-S (Bild 3).

4.1.1 Tunnelbohrmaschinen ohne Schild TBM

Tunnelbohrmaschinen werden eingesetzt in Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit. Sie besitzen keinen vollständigen Schildmantel. Ein wirtschaftlicher Einsatz kann durch zu hohe Verschleißkosten der Abbauwerkzeuge stark beeinflußt und begrenzt sein.
Mit diesen Maschinen kann im allgemeinen nur ein Kreisquerschnitt aufgefahren werden. Ein rotierender Bohrkopf, der mit Rollenmeißeln (Disken), eventuell auch mit Warzenmeißeln, bestückt ist, wird gegen die Ortsbrust gepreßt und löst durch die Kerbwirkung das Gestein. Um den Anpreßdruck auf den Bohrkopf aufbringen zu können, wird die Maschine radial durch hydraulisch bewegliche Verspannplatten (gripper) verspannt. Der

Recent developments allow shield machines to be modified for different diameter ranges in a fairly straightforward fashion. In addition, shield machines have been devised which are fitted with two or three overlapping cutting wheels staggered one behind the other. In this way, cross-sections which are not circular can be driven. The installations in question are special forms of shield machines for special purposes.
Apart from these machines being geared to a circular form and diameter, the length of the sections to be driven represents a further important feature especially for the economic application of a tunnelling machine.
The profile accuracy of the cavity cross-section is particularly high when tunnel machines are used. During heading, care should be taken to ensure that the predetermined driving tolerances are adhered to. Unscheduled deviations from the axis can, in contrast to universal headings, by and large only be corrected with considerable difficulty.

4 Tunnelling machines TM

Tunnelling machines (TM) either head the entire tunnel cross-section with a cutter head or cutting wheel full-face or in part segments by means of suitable extraction equipment.
During the excavation phase, the machine is moved forward either continuously or stroke-by-stroke.
A difference is drawn between tunnel boring machines TBM and shield machines SM.
Tunnel boring machines remove the rock at the face, with the support generally being installed afterwards, following up at a distance. The machines are held in place during the excavation phase by means of grippers pressed laterally against the tunnel walls.
Shield machines generally support the subsoil that is being penetrated and the face by direct means during the excavation phase. The shield ia advanced during excavation by jacking against the completed lining.
A systematic compilation of tunnelling machines is provided in Fig. 2, which was based on the classification contained in this section.

4.1 Tunnel Boring Machines (TBM)

A distinction is drawn between tunnel boring machines without shield body and those with one (Fig. 3).

Abbau ist gebirgsschonend und profilgenau.
Die Maschine füllt einen großen Teil des Querschnittes aus. Die systematische Sicherung wird gewöhnlich erst hinter der Maschine (10 bis 15 m und mehr hinter der Ortsbrust) eingebaut. In wenig standfestem und besonders nachbrüchigem Gebirge muß sichergestellt sein, daß der Einbau von Ausbaubögen, Verbaublechen und Ankern, in Ausnahmefällen auch Spritzbeton, unmittelbar hinter dem Bohrkopf möglich ist. Vorerkundungen und Gebirgsverfestigungen von der Maschine aus sollten möglich sein.
Bei Bohrdurchmessern > 10 m können auch sogenannte Aufweitungsmaschinen zum Einsatz kommen. Ausgehend von einem durchgehenden Pilotstollen wird das Profil in einem oder zwei Arbeitsgängen durch entsprechend gestaltete Bohrköpfe aufgeweitet.
Beim Abbau an der Ortsbrust entsteht kleinstückiges Material unter entsprechender Staubentwicklung. Daher sind für diese Maschinen Vorrichtungen zur Einschränkung der Staubentwicklung und Entstaubung erforderlich:
❏ 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.

4.1.2 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 (Tübbinge, Rohre u.a.), auf den sich die Maschine abstützt. Die Verspanneinrichtung kann dann entfallen. Sonst gelten die für Tunnelbohrmaschinen gemachten Aussagen entsprechend.

4.2 Schildmaschinen SM

Man unterscheidet Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (Schneidrad) SM-V und Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau (Fräse, Bagger) SM-T.
Schildmaschinen werden in Lockerböden mit oder ohne Grundwasser eingesetzt, bei denen in der Regel der den Hohlraum umgebende Baugrund und die Ortsbrust gestützt werden müssen. Das kennzeichnende Merkmal dieser Maschinen ist die Art der Ortsbruststützung (Bild 3).

4.1.1 Tunnel boring machines without shields

Tunnel boring machines are employed in solid rock with medium to high face stability. They do not possess a completely closed shield body. Economic application can be strongly influenced and restricted through high wear costs of the cutting tools.
Generally speaking, only a circular cross-section can be broken out by these machines. A rotating cutter head, which is equipped with roller bits (discs), possibly with tungsten carbide bits, is pressed against the face and removes the rock through its notch effect. In order to provide the contact pressure at the cutter head, the machine is held radially by means of hydraulically moveable grippers. Extraction is gentle on the rock and results in an accurate profile.
The machine occupies a large part of the cross-section. Systematic supporting is normally carried out behind the machine (10 to 15 m and more behind the face). In less stable and particularly in friable rock, it must be ensured that the placing of support arches, lagging plates and anchors, in certain cases, even shotcrete, is possible directly behind the cutter head. It should be possible to carry out preliminary investigations and rock strengthening from the machine.
In the case of bore diameters of > 10 m, so-called expansion machines can also be applied. Starting from a continuous pilot tunnel, the profile is expanded in one or two working phases using correspondingly designed cutter heads.
During excavation at the face, small pieces of rock, accompanied by an amount of dust, are produced. As a consequence, devices for restricting the dust development and dedusting are necessary for these machines:
❏ wetting with water at the cutter head
❏ dust shield behind the cutter head
❏ dust removal with dedusting on the back-up
The material transfer and supplies for the machine call for what, in some cases, can be very long back-up facilities.

4.1.2 Tunnel boring machines with shields TBM-S

In solid rock with low stability or friable rock, tunnel boring machines are equipped with a closed shield body. In this case, it is advisable to carry out supporting within the protection of the shield tail skin (segments, pipes, etc.), against which the machine supports itself. The gripper system is then no longer needed. Otherwise, the explanations already provided for tunnel boring machines also apply here.

4.2 Shield Machines SM

A distinction is drawn between Shield Machines with full-face extraction (cutter head) SM-V and shield machines with part extraction (milling boom, excavator) SM-T.
Shield machines are employed in loose soils with or without groundwater, in the case of which generally the subsoil surrounding the cavity and the face have to be supported. The characteristic feature of these machines is the type of face support (Fig. 3).

4.2.1 Shield Machines with full-face excavation SM-V

4.2.1.1 SM-V1 Face without support

If the face is stable, e.g. in clayey soils, so-called open shields can be employed. The cutter head equipped with tools removes the soil, the loosened soil is carried away by means of conveyor belts or scraper chains.

4.2.1.2 SM-V2 Face with mechanical support

Supporting of the face is carried out via an almost closed cutter head. The plates arranged between the spokes are elastically supported; they are pressed up against the face. Extraction is executed full-face via the cutter head equipped with tools; the loosened soil passes through slits, whose opening width is variable, between the spokes and the supporting plates, into the working chamber. The material is removed via conveyor belts, scraper chains or by hydraulic means.
Scraper disc shields possess a high degree of mechanisation. Through the constant full-face contact of the cutting wheel with the face, high torques are required.
In the case of types of soil which tend to flow, supporting in the vicinity of the slits is incomplete, which can lead to settlements. It is extremely difficult to remove obstacles.

4.2.1.3 SM-V3 Face with compressed air application

If groundwater is present, it has to be held back in the case of machines belonging to types SM-V1 and SM-V2 unless it can be lowered. Either the whole tunnel is subjected to compressed air or the machine is provided with a bulkhead so that only the working chamber is under pressure. Airlocks are essential in both cases.

4.2.1 Schildmaschinen mit Vollschnittabbau SM-V

4.2.1.1 SM-V1 Ortsbrust ohne Stützung

Ist die Ortsbrust standfest, z. B. in Tonböden, kann mit sogenannten offenen Schilden gefahren werden. Das werkzeugbestückte Schneidrad baut den Boden ab, der gelöste Boden wird über Förderbänder oder Kratzketten abtransportiert.

4.2.1.2 SM-V2 Ortsbrust mit mechanischer Stützung

Die Stützung der Ortsbrust erfolgt über ein nahezu geschlossenes Schneidrad. Die zwischen den Speichen angeordneten Stützplatten sind elastisch gelagert; sie werden an die Ortsbrust angedrückt. Der Abbau erfolgt vollflächig durch das werkzeugbestückte Schneidrad; der gelöste Boden tritt durch Schlitze zwischen Speichen und Stützplatten, deren Öffnungsweite variabel ist, in die Arbeitskammer ein. Der Abtransport erfolgt über Förderbänder, Kratzketten oder hydraulisch.

Schürfscheibenschilde weisen einen hohen Mechanisierungsgrad auf. Durch den ständigen, vollflächigen Kontakt des Schneidrades mit der Ortsbrust sind hohe Drehmomente erforderlich.

Bei zum Fließen neigenden Bodenarten ist die Stützung im Bereich der Schlitze unvollkommen, was zu Setzungen führen kann. Die Beseitigung von Hindernissen ist äußerst schwierig.

4.2.1.3 SM-V3 Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung

Ist Grundwasser vorhanden, muß dieses bei den Maschinen der Bauart SM-V1 und SM-V2 durch Druckluft zurückgehalten werden, sofern es nicht abgesenkt werden kann. Entweder wird der gesamte Tunnel unter Druckluft gesetzt oder die Maschine erhält eine Druckwand, so daß nur die Arbeitskammer unter Druck steht. In beiden Fällen sind Schleusen erforderlich.

Der Druckluftumläufigkeit über die Schildschwanzdichtung und den Ausbau ist besondere Beachtung zu schenken.

Die durch die Druckluftbeaufschlagung hervorgerufene Stützung wirkt mittelbar. Durch geeignete Maßnahmen ist gegebenenfalls ein Druckluftstau zu vermeiden, z.B. bei Sandlinsen mit gespanntem Wasser.

4.2.1.4 SM-V4 Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung

Bei diesen Maschinen wird die Ortsbrust durch eine unter Druck stehende Flüssigkeit gestützt. In Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des anstehenden Baugrunds sind zur Stützung wirksame Flüssigkeiten zu verwenden, deren Dichte bzw. Viskosität variiert werden kann. Bentonitsuspension hat sich als besonders wirksam erwiesen.

Die Arbeitskammer ist durch eine Druckwand gegen den Tunnel abgeschlossen. Der zur Ortsbruststützung erforderliche Druck kann sehr genau geregelt werden, sei es über ein Luftpolster oder über die abgestimmten Drehzahlen der Förder- und Speisepumpe. Stützdruckberechnungen sind erforderlich.

Der Boden wird vollflächig durch ein werkzeugbestücktes Schneidrad abgebaut. Hydraulische Förderung mit anschließender Separation ist zwingend.

Sind Einstiege in die Arbeitskammer notwendig (Werkzeugwechsel, Reparaturarbeiten, Hindernisbergung), muß die Flüssigkeit durch Druckluft ersetzt werden. Die Stützflüssigkeit (Bentonit, Polymere) bildet dann eine nur wenig luftdurchlässige Membrane an der Ortsbrust, deren Lebensdauer zeitlich begrenzt ist. Diese Membrane erlaubt die Stützung der Ortsbrust mittels Druckluft und ist gegebenenfalls zu erneuern.

Bei Stillstand der Maschine ist eine mechanische Stützung 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 förderfähige Größe zerkleinert werden.

4.2.1.5 SM-V5 Ortsbrust mit Erddruckstützung

Die Ortsbrust wird durch einen Erdbrei gestützt, der durch das hereingewonnene Material gebildet wird. Die Arbeitskammer des Schildes ist zum Tunnel hin durch eine Druckwand abgeschlossen. Werkzeugbestückte, mehr oder weniger geschlossene Schneidräder bauen den Boden ab. Eine druckhaltende Schnecke fördert den Boden aus dem Arbeitsraum. Der Druck wird über Druckmeßdosen kontrolliert, die über die Vorderseite der Druckwand verteilt sind. Mischflügel an der Rückseite des Schneidrades und an der Druckwand sollen dem Boden zu einer geeigneten Konsistenz verhelfen.

Der Stützdruck wird durch den Vorschub der Vortriebspressen und die Dreh-(Förder-)geschwindigkeit der Förderschnecke gesteuert. Das Bodenmaterial in der Schnecke oder zusätzliche mechanische Einrichtungen müssen die Dich-

Particular attention must be paid to the compressed air leakase via the shield tail seal and the lining.

The support which is realised by the application of compressed air acts directly. Through suitable measures, it is also possible to avoid an accumulation of compressed air, e.g. when sand lenses with water under pressure occur.

4.2.1.4 SM-V4 with fluid support

In the case of these machines, the face is supported by a fluid that is under pressure. Depending on the permeability of the subsoil that is present, effective fluids must be used for supporting, whose density and/or viscosity can be varied. Bentonite suspension has proved to be particularly effective.

The working chamber is closed to the tunnel by a bulkhead. The pressure needed for supporting the face can be regulated with great precision either by means of an air cushion or by controlling the speed of the delivery and feed pumps. Supporting pressure calculations are required.

The soil is removed full-face by means of a cutter head equipped with tools. Hydraulic conveyance with subsequent separation is essential.

If it is necessary to enter the working chamber (tool change, repair work, removing obstacles), the fluid must be replaced by compressed air. The supporting fluid (bentonite, polymer) then forms a slightly air-permeable membrane at the face, whose life span is restricted. This membrane facilitates the supporting of the face through compressed air and should be renewed if need be.

When the machine is at a standstill, mechanical supporting of the face is possible by means of segments, which can be shut, in the cutting wheel or through plates that can be extended from the rear. These solutions are advisable on account of the limited duration of the membrane.

Stones or banks of rock can be reduced to a size convenient for conveyance through discs on the cutting wheel and/or stone crushers in the working chamber.

4.2.1.5 SM-V5 Earth pressure balance face

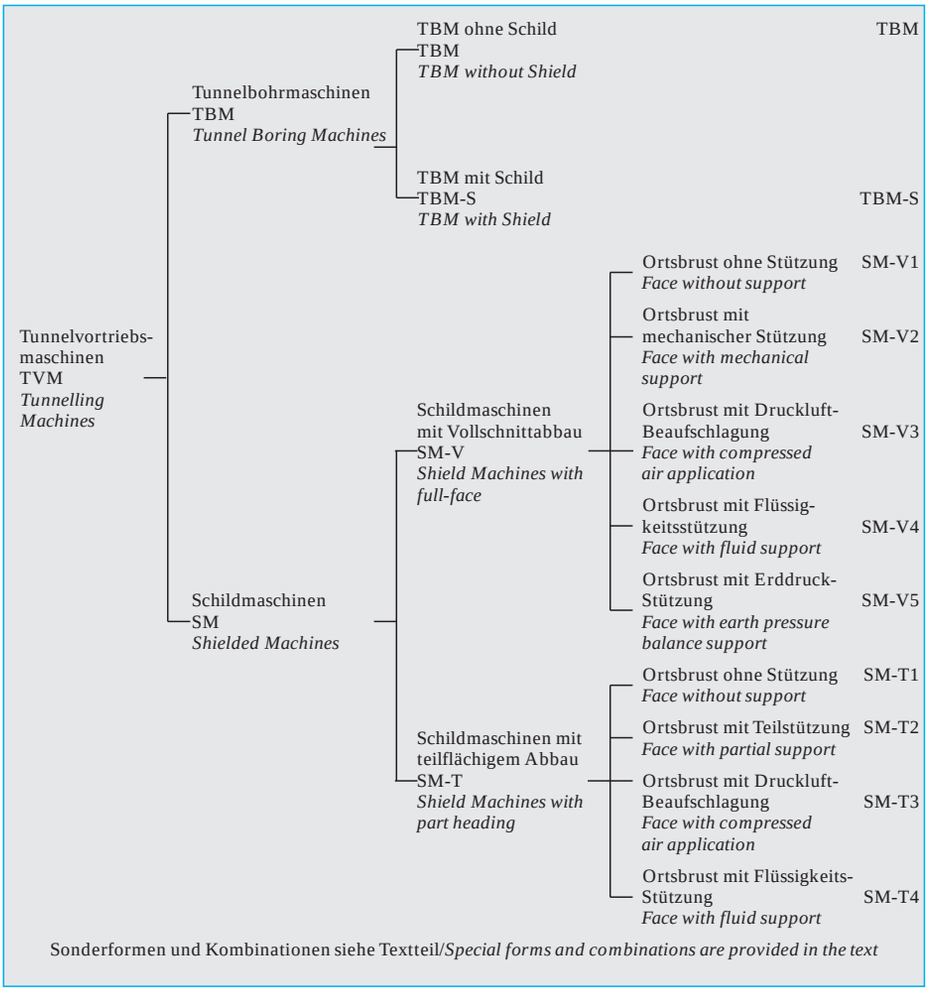
The face is supported by an earth slurry, which is formed from the material that has been removed. The shield's working chamber is closed to the tunnel by means of a bulkhead. More or less closed cutting wheels equipped with tools extract the soil. An extraction screw under tressure carries the soil out of the working area. The pressure is checked by loadcells, which are distributed over the front side

tigkeiten in dieser Austragsvorrichtung sicherstellen, da sonst durch unkontrolliertes Austreten von Wasser oder Boden der Stützdruck in der Arbeitskammer nicht gehalten werden kann.
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.
Zur Erweiterung des Einsatzbereiches von Schildmaschinen mit Erddruckstützung können geeignete Mittel zur Konditionierung des Bodenmaterials eingesetzt werden: Bentonit, Polymere, Schaum aus Polymeren. Auf die umweltverträgliche Deponierfähigkeit des Materials ist dabei zu achten.

4.2.2 Schildmaschinen mit Teilflächenabbau SM-T

4.2.2.1 SM-T1 Ortsbrust ohne Stützung
Ist die Ortsbrust senkrecht oder mit steiler Böschung standfest, kann dieser Schildtyp eingesetzt werden. Die Maschine besteht nur aus dem Schildmantel und dem Abbauwerkzeug (Bagger, Fräse oder Reisszahn). Der Boden wird über Förderbänder oder Kratzbänder ausgetragen.

4.2.2.2 SM-T2 Ortsbrust mit Teilstützung
Die Ortsbrust kann durch Bühnen und/oder Brustplatten gestützt werden.
Bei Bühnenschilden ist der vordere Teil unterteilt durch eine oder mehrere Bühnen, auf denen sich Böschungen bilden, 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 gestützt durch auf hydraulische Zylinder gelagerte Brustplatten. Zum Bodenabbau von Hand oder mechanisch werden die Brustplatten partiell zurückgezogen.
Eine Kombination von Brustplatten und Bühnen ist möglich. Genügt eine Stützung im Firstbereich, können dort ausklappbare Brustplatten angeordnet werden.
4.2.2.3 SM-T3 Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung
Ist Grundwasser vorhanden, muß dieses bei den Maschinen der Bauart SM-T1 und SM-T2 durch Druckluft zurückgehalten werden. Man setzt dann den Tun-



2 Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen (TVM). Sonderformen und Kombinationen sind im Text beschrieben
Survey of tunnelling machines (TM). Special forms and combinations are described in the article

of the bulkhead. Mixing vanes on the rear of the cutting wheel and the bulkhead are intended to ensure that the soil obtains a suitable consistency.
The supporting pressure is controlled through the thrust of the rams and the speed of the conveyor screw. The soil material in the screw or additional mechanical installations must ensure a seal in the extraction equipment as otherwise the supporting pressure in the working chamber cannot be retained due to the uncontrolled escape of water or soil.
Complete supporting of the face, especially in the upper zone, only then succeeds providing the supporting medium – soil – can be transformed into a soft to stiff-plastic mass. In this connection, the percentual share of the fine grain smaller than 0.6 mm has a considerable influence.
In order to extend the range of application of shield machines with earth pressure balance support, suitable agents for conditioning the soil material can be applied: bentonite, polymer, foam from polymers. In such cases, the environmental compatibility of the material for landfill purposes must be taken into consideration.

4.2.2 Shield machines with partial faxe excavation SM-T

4.2.2.1 SM-T1 Face without support
If the face is perpendicular or stable with a steep slope, it is possible to use this type of shield. The machine merely comprises the shield body and the extraction tool (excavator, milling boom or scarifier). The soil is removed via conveyor belts or scraper conveyors.

4.2.2.2 SM-T2 Face with partial support
The face can be supported by platforms and/or breasting plates.
In the case of platform shields, the front section is divided up by one or a number of platforms on which slopes form which support the face. The soil is removed manually or by mechanical means.
Platform shields possess a low degree of mechanisation. Disadvantageous is the danger of major settlements resulting from uncontrolled face support.

nel unter Druckluft oder die Maschinen erhalten eine Druckwand. Das Material wird hydraulisch oder trocken über eine Materialschleuse gefördert.

4.2.2.4 SM-T4 Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung
Bei diesem Schildtyp ist ebenfalls die Arbeitskammer durch eine Druckwand abgeschlossen. Sie ist gefüllt mit einer Flüssigkeit, deren Druck über die Drehzahl von Förder- und Speisepumpe geregelt wird. Der Boden wird durch einen Fräsarm (cutter) abgebaut, der, ähnlich wie bei Saugbaggern, das Flüssigkeits-Bodengemisch auch absaugt.

4.3 Anpaßbare Schildmaschinen mit kombinierter Verfahrenstechnik

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.

a) Schildmaschinen, bei denen ein Wechsel der Verfahrenstechnik ohne Umbau möglich ist:
❏ Erddruckschild SM-V5 ↔ Druckluftschild SM-V3
❏ Flüssigkeitsschild SM-V4 ↔ 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
❏ Flüssigkeitsschild SM-V4 ↔ TBM-S

4.4 Sonderformen

4.4.1 Messerschilde

Der Schildmantel ist 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.

4.4.2 Schilde mit Mehrfach-Kreisquerschnitten

Diese Schildtypen stellen den neuesten Entwicklungsstand vollmechanisierter Vortriebe dar. Bei diesen Maschinen sind die Schneidräder versetzt überlappend angeordnet.

4.4.3 Gelenkschilde

Praktisch alle vorkommenden Schilde können durch Unterteilung in Längsrichtung mit einem Gelenk versehen werden. Übersteigt das Verhältnis der Schildmantellänge zum Schilddurchmesser der Maschinen den Wert 1, wird allgemein zur besseren Steuerbarkeit ein Gelenk angeordnet. Die Anordnung kann auch bei sehr engen Kurvenradien erforderlich werden.

4.4.4 Haubenschild

Die Schildschneide wird durch Abschrägen dem natürlichen Böschungswinkel des Bodens angenähert. Beim Vortrieb unter Druckluft wird dadurch die Sicherheit gegen Ausbläser erhöht.

4.4.5 Verdrängerschild

Einsetzbar nur in weich-plastischen Böden. Die Maschine besitzt kein Abbauwerkzeug. Sie wird in den Boden gedrückt, wobei dieser teilweise verdrängt und teilweise durch eine Öffnung in der Druckwand hereingenommen wird.

4.4.6 Teleskopschilde

Um höhere Vortriebsgeschwindigkeiten zu erzielen, können Schilde teleskopierbar gemacht werden. Prinzipiell soll damit erreicht werden, zugleich mit dem Abbau des Bodens den Ausbau einzubringen.

4.5 Sicherung und Ausbau

Bei den in dieser Empfehlung angesprochenen Vortriebsverfahren bilden Vortriebsmaschine mit Sicherung bzw. Ausbau verfahrenstechnisch eine Einheit.

4.5.1 Tunnelbohrmaschinen TBM

Durch den gebirgsschonenden Abbauvorgang und die günstige Kreisform ist der Umfang der notwendigen Sicherungsmittel in der Regel geringer als z. B. beim Sprengvortrieb. In weniger standfestem Gebirge, müssen die freigelegten Flächen rechtzeitig gesichert werden, um die Auflockerung des Gebirges einzuschränken und dadurch die Gebirgsqualität weitgehend zu erhalten.
Treten Brucherscheinungen bereits im Bohrkopfbereich auf, kann der Umfang der erforderlichen Sicherungsmittel stark ansteigen.

In the case of shield machines with breasting plates, the face is supported through breasting plates, which are mounted on hydraulic cylinders. The breasting plates are partially retracted for removing the soil manually or by mechanical means.
A combination of breasting plates and platforms is possible. If supporting of the roof area is sufficient, extensible breasting plates can be used there.

4.2.2.3 SM-T3 Face with compressed air application
If groundwater is present, this must be held in check in the case of machines of the type SM-T1 And SM-T2. The tunnel is then set under compressed air or the machines are provided with a bulkhead. The material is removed hydraulically or dry via a material lock.

4.2.2.4 SM-T4 Face with fluid support
In the case of this shield type, the working chamber is also closed by a bulkhead. It is filled with a fluid, whose pressure is regulated via the speed of the delivery and feed pumps. The soil is removed via a cutter, which, in similar fashion to suction dredgers, also takes away the fluid-soil mixture.

4.3 Adaptable dual purpose shield machines

A large number of tunnels pass through strongly varying subsoil conditions, which can range from rock to loosely bedded soil. As a result, tunnelling methods have to be geared to the geotechnical prerequisites and shield machines, which are correspondingly adaptable, employed.
a) Shield machines, in the case of which the extraction method can be changed without modification:
❏ earth pressure balance shield SM-V5 ↔ compressed air shield SM-V3
❏ fluid shield SM-V4 ↔ compressed air shield SM-V3
b) Shield machines, in the case of which the extraction method can be changed through modification. Findings are available with the following combinations:
❏ fluid shield SM-V4 ↔ shield without support SM-V1
❏ fluid shield SM-V4 ↔ earth pressure balance shield SM-V5
❏ earth pressure balance shield SM-V5 ↔ shield without support SM-V1
❏ fluid shield SM-V4 ↔ TBM-S

4.4 Special forms

4.4.1 Finger shields

The shield body is split up into fingers, which can be extended individually. The

4.5.1.1 Anker
Anker werden in der Regel radial in der Querschnittsebene des Hohlraumes angeordnet, gefügeorientierte Anordnung verstärkt die Wirkung der Schubverdübelung. Örtlich eingebaut verhindern sie das Abplatzen oder Herauslösen von Gesteinsplatten, systematisch angeordnet eine Auflockerung der freigelegten Tunnellaibung. Anker eignen sich besonders zur nachträglichen Erhöhung des Ausbauwiderstandes, da sie auch später noch eingebaut werden können.
Die Anker werden i.a. im Bereich der Arbeitsbühne hinter der Maschine eingebaut bzw. in besonderen Fällen auch schon hinter dem Bohrkopf.

4.5.1.2 Spritzbeton
Der Spritzbeton dient dazu, die freigelegte Gebirgsoberfläche teilweise oder vollständig zu versiegeln (Dicke 3 bis 5 cm) oder mit einer tragfähigen Schicht (Dicke 10 bis 25 cm, in Ausnahmefällen auch darüber) zu versehen. Zur Steigerung der Tragfähigkeit der Spritzbetonschale erhält diese eine einlagige (bergseitig) oder zweilagige (berg- und luftseitig) Bewehrung aus Matten. Alternativ kann Stahlfaserspritzbeton angewandt werden.
Der Spritzbeton wird in der Regel im Bereich der Arbeitsbühne hinter der Maschine eingebracht.

4.5.1.3 Ausbaubögen
Ausbaubögen dienen unmittelbar nach dem Ausbruch zur sofort wirksamen Abstützung des Gebirges und zum Schutz des Arbeitsraumes. Sie kommen daher vor allem in nachbrüchigem und nicht standfestem, druckhaftem Gebirge zum Einsatz. Als Ausbaubögen werden Stahlwalzprofile oder Gitterträger verwendet. Ausbaubögen werden i. a. unmittelbar hinter dem Bohrkopf eingebaut in Teilstücken im Firstbereich oder als geschlossener Ring.

4.5.2 Tunnelbohrmaschinen mit Schild TBM-S und Schildmaschinen SM
Bei Tunnelbohrmaschinen mit Schildmantel bzw. Schildmaschinen wird die Sicherung im Schutze des Schildschwanzes eingebracht. Diese besteht in der Regel aus vorgefertigten Elementen.
Neben der Stützung des umgebenden Baugrunds dient diese Sicherung bei den meisten Maschinen dieser Bauart als Widerlager für den Vorschub.
Der kraftschlüssige Verbund zwischen Ausbau und Baugrund wird durch ein möglichst kontinuierliches Verpressen der Schildspur hergestellt. Ausgenommen soil is removed via roadheaders, cutting wheels or excavators. An advantage of finger shields is that they deviate from the circular form and e.g. can also excavate horse-shoe profiles. In the latter case, the base is usually open. The term forepoling is also used.

4.4.2 Shields with multi-circular cross-sections
These shield types represent the latest state of development for fully mechanised headings. In the case of these machines, the staggered cutting wheels are designed to overlap.

4.4.3 Articulated shields
Practically all existing shields can be provided with an articulating joint. If the ratio of the shield body length to the shield diameter exceeds the value 1, generally a joint is incorporated in order to improve the steerability. The arrangement can also be necessary if extremely tight curve radii are to be driven.

4.4.4 Cowl shield
The shield cutting edge is tapered to approximate the natural angle of slope of the soil. When tunnelling under compressed air, this means that safety against blow-out is enhanced.

4.4.5 Displacement shield
Only suitable for soft-plastic soils. The machine has no extraction tool. It is pressed into the soil, which results in this being partially displaced and partially removed through an aperture in the bulkhead.

4.4.6 Telescopic Shields
In order to arrive at higher rates of advance, telescopic shields have been designed. Essentially, the objective is to install the lining during the removal of the soil.

4.5 Supporting and lining
As far as the process techniques referred to in these recommendations are concerned, the tunnelling machine together with the support and/or lining represent a single unit in terms of process technology.

4.5.1 Tunnel boring machines TBM
Due to the excavation procedure which is gentle on the rock and the advantageous circular form, the extent of the necessary supporting measures is usually less than for example for drill + blast. In less stable rock, the exposed areas have to be supported quickly in order to restrict any disaggregation of the rock and thus retain the rock quality as far as possible.
Should breaks occur in the vicinity of the cutter head, the extent of the necessary supporting measures can increase considerably.

4.5.1.1 Rock bolts
Rock bolts are generally arranged radially in the cross-sectional profile of the tunnel, a rock matrix-oriented set-up enhances the effect of the shear dowels. Installed locally, they prevent the flaking or detaching of rock plates, arranged systematically, they prevent loosening of the exposed tunnel side wall. Rock bolts are especially suitable for subsequently increasing the lining strength, as they can still be installed at a later stage.
The anchors are installed in the vicinity of the working platform behind the machine or in special cases, directly behind the cutter head.

4.5.1.2 Shotcrete
Shotcrete serves to seal the exposed rock surface either partially or completely (thickness 3 to 5 cm) or provide it with a supporting layer (thickness 10 to 25 cm, in exceptional cases, even more). In order to enhance the loadbearing capacity of the shotcrete lining, it is provided with a single-layer (on the rock side) or two-layers (rock and exposed side) of mesh reinforcement. Alternatively, steel fibre shotcrete can be applied. The shotcrete is generally installed in the vicinity of the working platform behind the machine.

4.5.1.3 Support arches
Support arches serve to effectively support the rock directly after the excavation and to protect the working area. As a consequence, they are, first and foremost, applied in friable and unstable, squeezing rock. Rolled steel sections or lattice girders are used as support arches. Support arches are normally installed directly behind the cutter head in sections in the roof zone or as a closed ring.

4.5.2 Tunnel boring machines with shield TBM-S and shield machines SM
In the case of tunnel boring machines with shield or shield machines, the support is installed within the protection of the shield tail. This usually consists of prefabricated segments.
Apart from supporting the surrounding subsoil, it serves in the case of most machines of this type as the abutment for the thrust rams.
The load transfer between the lining and the subsoil is created by grouting the an-

men hiervon sind gegen den Baugrund direkt verspannte Ausbausysteme.
Generell muß für die Nutzung geprüft werden, ob zusätzlich zur Sicherung eine Innenschale aus bewehrtem oder unbewehrtem Beton erforderlich ist. Tübbinge und Rohre werden i.a. als einschaliger Ausbau verwendet.

4.5.2.1 Beton- und Stahlbeton-Tübbings
Die gebräuchlichen Fertigelemente sind Beton- oder Stahlbeton-Tübbings. Allein die Beanspruchung aus dem Transport und dem Versetzen zwingt dazu, die Tübbings zu bewehren. Auch Tübbings mit Stahlfaserbewehrung wurden entworfen, um die bei der Stabbewehrung nicht zu sichernden Kanten und Ecken durch Stahlfasern zu verstärken.

4.5.2.2 Stahlguß- und Stahltübbings
Durch die Entwicklung der Gußtechnik können heute Tübbings aus Stahlguß, z. B. mit der Materialbezeichnung GGG 50 geliefert werden, mit geringer Bauhöhe, genügender Maßgenauigkeit und genügender Elastizität.
In Ausnahmefällen, wie z. B. bei sehr engen Kurven und im Bereich von Öffnungen im Ausbau, können geschweißte Stahltübbings eine technische Lösung zur Bewältigung von Lastkonzentrationen auf die Sicherung darstellen.

4.5.2.3 Liner Plates
Vorgeformte Stahlbleche in Form von sog. „liner plates“ können als provisorische Sicherung vollflächig in stark nachbrüchigem Gebirge eine wirtschaftliche Lösung darstellen.

4.5.2.4 Extrudierbeton
Extrudierbeton ist eine Tunnelauskleidung, die als unbewehrte oder mit Stahlfasern bewehrte Betonsicherung in einem kontinuierlichen Arbeitsprozeß hinter einer Vortriebsmaschine zwischen dem Schildschwanz und einer umsetzbaren Innenschalung eingebracht wird. Dabei stützt der Extrudierbeton bereits im frischen Zustand das umgebende Gebirge auch unterhalb des Grundwasserspiegels. Eine elastisch gestützte Stirnschalung, die mit Betonierdruck vorwärts geschoben wird, gewährleistet einen konstanten Stützdruck im flüssigen Beton.
4.5.2.5 Holzverbau
In nicht wasserführendem Boden kann die primäre Sicherung aus einem Holz- oder Stahlbetonlamellenverbau bestehen, der zwischen Stahlprofilen eingezogen wird (ribs and lagging), die im Schutz des Schildschwanzes montiert werden. Wenn der Schildschwanz die Stahlprofile

nular void at the shield tail as continuously as possible. This does not apply to lining systems, which are directly pressed against the subsoil.
In general, it must be ascertained whether a lining comprising an inner shell made of reinforced or un-reinforced concrete is needed. Segments and pipes are normally utilised as single skin linings.

4.5.2.1 Concrete and reinforced concrete segments
The customary precast elements are concrete or reinforced concrete segments. Alone the stresses caused by transport and installation makes it necessary for the segments to be reinforced. Segments with steel fibre reinforcement have also been designed in order to strengthen the edges and corners, which cannot be reinforced by rods, through steel fibres.

4.5.2.2 Cast steel and steel segments
Through the development of casting technology, segments today can be supplied made of cast steel, e.g. with the material designation GGG 50, with low overall thickness, sufficient dimensional accuracy and sufficient elasticity.
In exceptional cases, as e.g. extremely narrow curves and in the vicinity of apertures in the lining, welded steel segments can represent a technical solution for overcoming load concentrations on the lining.

4.5.2.3 Liner plates
Pre-formed steel plates in the form of liner plates can represent an economic solution as a full surface provisional support in extremely friable rock.

4.5.2.4 Extruded concrete
Extruded concrete is a tunnel lining, which is installed in a continuous working process as an unreinforced or steel-fibre reinforced concrete support behind the tunnelling machine between the shield tail and a mobile inner form. Thus, the extruded concrete in its fresh state already supports the surrounding rock, also in groundwater. An elastically supported stop-end formwork, which is pushed forwards concrete pressure, assures a constant support pressure in the liquid concrete.

4.5.2.5 Timber lagging
In non-water bearing soil, the primary support can comprise a wooden or reinforced concrete slatted construction, which is installed between steel profiles (ribs and lagging), which is assembled protected by the shield tail. When the shield tail releases the steel ribs, they and, in turn, the lagging, are pressed against the soil using hydraulic jacks. The tunnelling machine can be advanced by thrusting against this pre-stressed construction.

4.5.2.6 Pipes
Pipe-jacking represents a special method, in the case of which reinforced concrete or steel pipes are thrust forward from a jacking station to serve as a support and/or final lining.
For certain construction projects, rectangular cross-sections are also employed with the jacking method.

4.5.2.7 Reinforced Concrete
Reinforced concrete is only used n conjunction with blade shields. In the same way as shotcrete, reinforced shotcrete can be applied in conjunction with tunnelling machines for supporting purposes when they do not transfer the thrusting forces onto the lining. The reinforced concrete is produced in 2.50 to 4.50 m wide sections protected by so-called trailing blades, which are supported on the last concreted section by conventional means with mobile formwork.

5 Relationship between geotechnics and tunnelling machines

5.1 Ranges of application for tunnelling machines

The individual tunnelling machines are suitable for certain geotechnical and hydrogeographical ranges of application in conjunction with their process-related and technical features.
The specific types of machines are related to their main ranges of application in Fig. 4 with geo-technical terms and parameters as the basis. In addition, it is shown there just how far an extension of the range of application is possible should this present itself as a result of simplified methods, in order to increase the economy or with regard to the heterogeneity of the subsoil that is present.
As one of the most essential influencing factors for the application is the lack or presence of groundwater, the fields of application are divided into subsoil with or without groundwater.
Extremely varied extraction tools can be used for removing the subsoil that is present. They are listed in accordance with their suitability for the geotechnical ranges of application and the machine types.
The forms of supporting and lining suit-

freigibt, werden sie, und damit auch der Verbau, mit Hydraulikpressen gegen den Boden verspannt. Gegen diesen vorgespannten Verbau kann die Vortriebsmaschine vorgeschoben werden.

4.5.2.6 Rohre
Ein spezielles Verfahren stellt das Rohrvortriebsverfahren dar, bei dem Stahlbeton- oder Stahlrohre, die von einem Pressenschacht aus vorgepreßt werden und als Sicherung bzw. endgültiger Ausbau dienen.
Es werden für bestimmte Baumaßnahmen auch Rechteckquerschnitte im Vorpreßverfahren eingesetzt.

4.5.2.7 Stahlbeton
Stahlbeton wird nur in Verbindung mit Messerschilden eingesetzt. In gleicher Weise wie Spritzbeton kann auch Stahlbeton bei Vortriebsmaschinen zur Sicherung verwendet werden, die die Vorschubkräfte nicht auf die Sicherung übertragen. Der Stahlbeton wird in 2,50 bis 4,50 m breiten Abschnitten im Schutz von sogenannten Nachlaufmessern, die auf dem letzten Betonierabschnitt aufliegen, in konventioneller Weise mit einer verfahrbaren Umsetzschalung hergestellt.

5 Zuordnung Geotechnik – Tunnelvortriebsmaschinen

5.1 Einsatzbereiche der Tunnelvortriebsmaschinen

Die einzelnen Tunnelvortriebsmaschinen eignen sich ausgehend von ihren verfahrens- und maschinentechnischen Besonderheiten für bestimmte geotechnische und hydrogeologische Einsatzbereiche. Mit geotechnischen Begriffen und Kenngrößen als Grundlage sind die spezifischen Maschinentypen ihren Haupteinsatzbereichen in Schema 4 zugeordnet. Außerdem wird dort aufgezeigt, inwieweit eine Erweiterung des Einsatzbereiches möglich ist, wenn sich dies aus Gründen einer vereinfachten Verfahrenstechnik, zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit oder mit Rücksicht auf die Heterogenität des anstehenden Baugrundes anbietet.
Da eine wesentliche Einflußgröße für den Einsatz das Fehlen oder Vorhandensein von Grundwasser ist, sind die Einsatzbereiche getrennt in Baugrund ohne oder mit Grundwasser.
Zum Lösen des anstehenden Baugrundes kommen sehr unterschiedliche Abbauwerkzeuge in Betracht. Sie sind entsprechend ihrer Eignung den geotechnischen Einsatzbereichen und den Maschinentypen zugeordnet.
Die für die einzelnen Maschinen geeigneten Sicherungs- und Ausbauarten sind unter 4.5 dargestellt. Auf eine tabellarische Zuordnung wird daher verzichtet.

5.2 Wichtige Auswahl und Bewertungskriterien

TBM

Der Haupteinsatzbereich ist der standfeste bis nachbrüchige Fels, wobei Schicht- und Kluftwasserzutritte bewältigt werden können. Die einachsige Druckfestigkeit G_D sollte etwa zwischen 300 und 50 [MN/m²] betragen. Höhere Festigkeiten, Zähigkeit des Gebirges und ein hoher Anteil verschleißfester Mineralen stellen wirtschaftliche Einsatzgrenzen dar (Abrasivität nach Cerchar, Schimanek o. a.). Eine Beschränkung der Verspannbarkeit der TBM kann ebenfalls deren Einsatz in Frage stellen.

SYSTEME DER TUNNELVORTRIEBSMASCHINEN

Tunnelbohrmaschinen
TBM

TBM ohne Schild

TBM-S mit Schild

Schildmaschinen mit
Vollschnittabbau SM-V

SM-V1 ohne Stützung

SM-V2 mechan. Stützung

SM-V3 Druckluft-Stützung

SM-V4 Flüssigkeits-Stützung

SM-V5 Erddruck-Stützung

Schildmaschinen mit
Teilflächenabbau

SM-T1 ohne Stützung

SM-T2 Teilstützung

SM-T3 Druckluft-Stützung

SM-T4 Flüssigkeits-Stützung

3 Systeme der Tunnelvortriebsmaschinen
Tunnelling machine systems

Zur Beurteilung des Gebirges werden auch die Spaltzugfestigkeit $\sigma_z \approx 25$ bis 5 [MN/m²] und der RQD-Wert herangezogen. Bei einem Zerlegungsgrad des Gebirges mit RQD von 100 bis 50 % und einem Kluftabstand von > 0,6 [m] erscheint der Einsatz einer TBM gesichert. Bei höherer Zerlegung ist die Standfestigkeit zu prüfen.

TBM-S

Haupteinsatzbereich im nachbrüchigen bis gebrächen Fels, auch mit Schicht- und Kluftwasserzutritten. Bei möglicherweise gleicher Gesteinsfestigkeit im standfesten Gebirge ist die Verbandsfestigkeit stark reduziert. Dies entspricht einem Kluftabstand von ≈ 0,6 bis 0,06 [m] und einem RQD-Wert zwischen ca. 50 und 10 [%]. Generell ist jedoch auch bei geringerer Gesteinsdruckfestigkeit σ_D zwischen ca. 50 und 5 [MN/m²] und dementsprechend geringerer Spaltzugfestigkeit von σ_z zwischen ca. 5 und 0,5 [MN/m²] ein Einsatz der TBM-S möglich.

SM-V1

Dieser Maschinentyp wird vorzugweise in überkonsolidierten und damit trockenen, standfesten Tonböden eingesetzt. Damit auch bei geringeren Überdeckungen keine schädlichen Verformungen an der Geländeoberfläche auftreten, sollten die Druckfestigkeiten σ_D des Materials nicht unter ca. 1,0 [MN/m²] liegen. Die Kohäsion c_u wird dementsprechend Werte über ca. 30 [kN/m²] aufweisen.
Lediglich bei Einsatz in wenig nachbrüchigem Fels sind Schicht- und Kluftwasserzutritte verkraftbar.

SM-V2

Wegen des vollflächig stützenden Schneidrads können leicht abbaubare überwiegend trockene Bodenarten bewältigt werden, in erster Linie nicht standfeste bindige Böden oder Wechsellagerungen aus bindigen und nicht bindigen Böden. Größere Einlagerungen, wie z. B. Findlinge, sind äußerst schwer zu bewältigen.
Die Kohäsion c_u dieser Böden wird sich etwa zwischen 30 und 5 [kN/m²] bewegen. Die Korngröße ist durch die Schlitzbreite im Schneidrad nach oben begrenzt. Um Oberflächensetzungen gering zu halten, müssen Schlitzweite und Anpreßdruck optimiert sein.

SM-V3

Diese Maschine mit Druckluftbeaufschlagung kommt hauptsächlich zum Einsatz, wenn die Typen SM-V1 und V2 in Grundwasser arbeiten müssen. In Böden, die für die einzelnen Maschinen geeignet sind, werden unter 4.5 dargestellt. Eine tabellarische Auflistung ist daher nicht erfolgt.

5.2 Important selection and evaluation criteria

TBM

The main range of application is in stable to friable rock, in the case of which underground and fissure water inbursts can be mastered. The uni-axial compressive strength should amount roughly to between 300 and 50 [MN/m²]. Higher strengths, toughness of the rock and a high proportion of abrasion resistant minerals represent economic limits for application (abrasiveness according to Cerchar, Schimanek, et al). A restriction of the gripper force of the TBM can also place its application in question.
To assess the rock, the cleavage strength $\sigma_z \approx 25$ to 5 [MN/m²] and the RQD value are required. Given a degree of decomposition of the rock with RQD of 100 to 50 [%] and a fissure spacing of > 0.6 m the application of a TBM appears assured. Should the decomposition be higher, the stability has to be checked.

TBM-S

The main field of application is in friable to unstable rock, also with inbursts of underground and fissure water. The bonding strength is greatly reduced given possibly the same rock strength in stable rock. This corresponds to a fissure gap of ≈ 0.6 to 0.06 [m] and a RQD value between approx. 50 and 10 [%]. Generally, however, an application of the TBM-S is possible given lower rock compressive strength σ_D between approx. 50 and 5 [MN/m²] and correspondingly less cleavage strength of σ_z between approx. 5 and 0.5 [MN/m²].

SM-V1

This type of machine is mainly used in over-consolidated and thus dry, stable clay soils. In order to make sure that no harmful surface settlements occur even given thin overburdens, the compressive strengths σ_D of the material should not be less than approx. 1.0 [MN/m²]. The cohesion cu accordingly registers values above approx. 30 [kN/m²].
Only in rock which is relatively immune to overbreak can underground and fissure water ingress be coped with.

SM-V2

On account of the full-face supporting cutter head, easily removed, largely dry types of soil can be mastered, first and foremost non-stable cohesive soils or interstratifications comprising cohesive and non-cohesive soils. Major intercalations such as boulders are extremely difficult to cope with.
The cohesion c_u of these soils amounts to between 30 and 5 [kN/m²]. The grain size is restricted upwards due to the slit width in the cutter head. In order to ensure that surface settlements are kept to a minimum, the slit width and contact pressure have to be optimised.

SM-V3

This machine under compressed air working is mainly used when types SM-V1 and SM-V2 have to operate in groundwater. Its main application must be regarded as in soils with interstratification. The air permeability of the rock and the air consumption and the related blow -out danger are the governing criteria for the application of this type of machine.

SM-V4

Its main range of application is tunnelling in non-cohesive types of soil with or without groundwater.
During the excavation process, a fluid under pressure e.g. bentonite suspension supports the face. Layers of gravel and sand are the typical subsoil. Coarse gravel can in certain cases prevent membrane formation. In the event of high permeability, the supporting fluid must be adapted to suit. Major stratifications which cannot be pumped, are reduced in advance crushers. The proportions of ultra-fine grain < 0.02 mm should amount to ≈ 10 %. Higher quantities of ultra-fine material can lead to difficulties during separation.

SM-V5

Types of machines with earth pressure balance supporting are especially suitable for soils with cohesive fractions. In this case, the proportion of ultra-fine grains < 0.06 mm should amount to at least 30 %. In order to produce the desired earth slurry, groundwater has to be present or water must be added. The necessary consistency of the spoil can be improved through the addition of suitable conditioning agents such as bentonite or polymer. In this way too, the danger of sticking is considerably reduced.

SM-T1

This type of machine can be used providing the face is thoroughly stable. Refer also to SM-T1.

Geotechnische Kennwerte / Geotechnical Parameters	Baugrund / Subsoil	Fels/Festgestein/*Hard rock/soil*		Boden/Lockergestein/*Soft rock/soil*			
		standfest bis nachbrüchig *competent to caving in*	nachbrüchig bis gebräch *caving in to unstable*	bindig standfest *cohesive stable*	bindig nicht standfest *cohesive not stable*	Wechsellagerung *mixed conditions*	nicht bindig *non-cohesive*
Gesteinsfestigkeit *Rock Compressive strength*	σ D [MN/m²]	300 bis 50	50 bis 5	1,0	0,1		
Zugfestigkeit *Tensile strength*	σz [MN|m²]	25 bis 5	5 bis 0,5				
RQD-Wert *RQD value*	RQD [%]	100 bis 50	50 bis 10				
Kluftabstand *Fissure spacing*	[m]	> 2,0 bis 0,6	0,6 bis 0,06				
Kohäsion *Cohesion*	Cu [kN|m²]			≥ 30	30 bis 5	30 bis 5	
Kornverteilung *Grain distribution*	< 0,02 [%] < 0,06 [5]			30 ≥ 30	30 ≥ 30		10
TBM *TBM*	o.W. m.W.						
TBM-S mit Schild *TBM-S with shield*	o.W. m.W.						
SM-V1 ohne Stützung *SM-V1 without support*	o.W. m.W.						
SM-V2 mechan. Stützung *SM-V2 mech. support*	o.W. m.W.						
SM-V3 mit Druckluft *SM-V3 with compressed air*	o.W. m.W.						
SM-V4 Flüssigkeitsstützung *SM-V4 fluid support*	o.W. m.W.						
SM-V5 Erddruck-Stützung *SM-V5 earth pressure balance support*	o.W. m.W.						
SM-T1 ohne Stützung *SM-T1 without support*	o.W. m.W.						
SM-T2 Teilstützung *SM-T2 partial support*	o.W. m.W.						
SM-T3 mit Druckluft *SM-T3 with compressed air*	o.W. m.W.						
SM-T4 Flüssigkeitsstützung *SM-T4 fluid support*	o.W. m.W.						
Abbauwerkzeug *Extraction tool*	V	rollend (Diskenmeißel) *rolling (cutter disc)*	rollend (Diskenmeißel) *rolling (disc bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (flat bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (chisel)*	lösend/schälend (Stichel/Flachmeißel) *loosening/stripping (cutter/flat bit)*	lösend (Stichel) *loosening (pick)*
	T	ritzend (Spitzmeißel) *notching (pick)*	ritzend (Spitzmeißel) *notching (point bit)*	ritzend (Spitzmeißel) *notching (point bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (flat bit)*	schälend (Flachmeißel) *stripping (flat bit)*	lösend (Stichel) *loosening (pick)*

o.W. = ohne Grund- bzw. Schichtwasser/*without groundwater or underground water*

m.W. = mit Grund- bzw. Schichtwasser /*with groundwater or underground water*

Haupteinsatzbereich/*Main field of application*

Einsatz möglich/*application possible*

4 Einsatzbereich der Tunnelvortriebsmaschinen
Ranges of application for tunnelling machines

den mit Wechsellagerung ist der Haupteinsatzbereich zu sehen. Die Luftdurchlässigkeit des Gebirges bzw. der Luftverbrauch und die damit verbundene Ausbläsergefahr sind maßgebliche Kriterien für die Anwendung dieses Maschinentyps.

SM-V4

Haupteinsatzbereich ist der Vortrieb in wenig bis nicht bindigen Bodenarten mit oder ohne Grundwasser. Beim Abbauvorgang stützt eine unter Druck stehende Flüssigkeit, z. B. Bentonitsuspension die Ortsbrust. Lagen aus Kies und Sand sind der typische Baugrund.

Grobe Kiese verhindern u. U. eine Membranbildung. Bei hoher Durchlässigkeit muß die Stützflüssigkeit angepaßt werden. Größere Einlagerungen, die nicht gepumpt werden können, werden in vorgeschalteten Brechern zerkleinert.

Die Anteile an Feinstkorn < 0,02 mm sollten bei ≈ 10 % liegen. Höhere Anteile an Feinstteilen können zu Schwierigkeiten bei der Separierung führen.

SM-V5

Maschinentypen mit Erddruckstützung eignen sich besonders in Böden mit bindigen Anteilen. Hier sollten die Feinstkornanteile < 0,06 mm bei mindestens

SM-T2

This type of machine can be used when the support due to the material lying on the platforms at a natural sloping angle suffices for a conditional control of deformations during tunnel advance. Breast plates can be used for supporting purposes in the roof and platform zone. Slightly to non-cohesive clay-sand soils with a corresponding angle of friction are the main range of application.

SM-T3

The application of this type of machine is given when types SM-T1 and SM-T2 are to be used in groundwater. Either the en-

30 % liegen. Um den gewünschten Erdbrei zu erzeugen, muß Grundwasser vorhanden sein oder es muß Wasser zugegeben werden. Die erforderliche Konsistenz des abgebauten Bodens kann durch Zugabe geeigneter Konditionierungsmittel, wie z. B. Bentonit oder Polymere, verbessert werden. Auch die Verklebungsgefahr wird hiermit wesentlich vermindert.

SM-T1

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

SM-T2

Dieser Maschinentyp 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. Der Haupteinsatzbereich sind wenig bis nicht bindige Kies-Sand-Böden mit entsprechendem Reibungswinkel.

SM-T3

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

SM-T4

Sind Kies-Sand-Gemische unter Wasser abzubauen, kommt dieser Maschinentyp zum Einsatz. Die Anforderungen an das Gebirge entsprechen denen des Typs SM-V4. Durch den Fräsarm können Hindernisse freigeschnitten werden. Im Firstbereich sind Stützplatten angeordnet.

5.3 Hinweise für besondere geotechnische und bautechnische Bedingungen

Durch besondere Randbedingungen kann die Anwendung einer bestimmten Verfahrenstechnik bzw. einer Tunnelvortriebsmaschine erheblich eingeschränkt sein. Durch geeignete Maßnahmen kann jedoch ein Einsatz möglich werden, vor allem dann, wenn diese besonderen Verhältnisse nur örtlich oder über einen begrenzten Bereich auftreten. Entscheidend ist dann die Wirtschaftlichkeit.

Durch Absenkung des Grundwassers kann eine vereinfachte Technik der Tunnelvortriebsmaschinen zur Anwendung kommen, die z. B. die Beseitigung von Hindernissen erleichtert, wenn diese sehr häufig zu erwarten sind.

Bei stark wechselnden geotechnischen Verhältnissen kann die Möglichkeit, die Verfahrenstechnik der Tunnelvortriebsmaschine umstellen zu können, Vorteile bringen. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn es sich um längere zusammenhängende Strecken handelt (siehe 4.3).

Bei der Auswahl der zum Einsatz kommenden Tunnelvortriebsmaschinen ist eine kritische Abschätzung eventueller Zusatzausrüstungen zweckmäßig, die bei Abweichungen von den prognostizierten geotechnischen Verhältnissen diese innerhalb einer gewissen Bandbreite bewältigen.

Durch Injektionen, Gefrieren, Rüttelverdichtung oder Bodenaustausch kann eine Baugrundverbesserung erfolgen. Dies eignet sich für den gesamten Tunnelquerschnitt, vor allem aber für den Überlagerungsbereich bei geringer Überdeckung.

Bei Anwendung von Druckluft ist bei geringer Überdeckung z. B. unter einem Wasserlauf eine Ballastierung oder eine abdichtende und ballastierende Schicht vorzusehen.

Bei Einsatz von Flüssigkeitsstützung sind bei hoher Durchlässigkeit des Bodens und geringer Überdeckung Zusatzmaßnahmen erforderlich, um unkontrollierbare Suspensionsverluste zu vermeiden.

Bei häufigem Auftreten von Grobkiesen und Findlingen im Sand steigert bei flüssigkeitsgestützten Schildmaschinen neben der Besetzung des Schneidrades mit Diskenmeißeln das Nachschalten eines Steinbrechers die Betriebssicherheit.

Mit einer Tunnelvortriebsmaschine kann nur ein im Durchmesser gleichbleibender Kreisquerschnitt aufgefahren werden. Es ist jedoch tunnelbautechnisch möglich, den aufgefahrenen Kreisquerschnitt über kurze Strecken nachträglich derart aufzuweiten, daß andere, vor allem größere Querschnittsformen entstehen z. B. für eine unterirdische Station, gegebenenfalls unter Anwendung von Baugrundverbesserungen.

Mit wachsendem Feinststoffanteil des Baugrundes steigt bei Schildmaschinen mit Flüssigkeitsstützung der Aufwand für die Separierung. Die Anforderungen an den Wassergehalt und/oder den Reinheitsgrad des separierten Bodenmaterials bestimmen dann die Grenzen der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Die Betriebssicherheit eines Verfahrens ist u.a. auch von der Überdeckung des Tunnels abhängig. Diese sollte im allgemeinen mindestens dem Durchmesser des aufzufahrenden Tunnels entsprechen, wenn man Zusatzmaßnahmen vertire working area, including the excavated tunnel or solely the working chamber are subjected to compressed air.

SM-T4

When clay-sand mixtures are to be removed under water, this type of machine is used. The requirements concerning the ground correspond to type SM-T4. Obstacles can be cleared using the cutting boom. Supporting plates are arranged in the roof zone.

5.3 Pointers for special geotechnical and constructional conditions

Due to special marginal conditions, the application of a certain method and/or a tunnelling machine can be considerably restricted. By use of suitable measures, however, an application can be made possible, above all, providing these special conditions only occur locally or over a limited zone. The decisive factor is then the economic feasibility.

Through lowering the groundwater, a simplified technique for the tunnelling machines can be applied, which e.g. facilitates the removal of obstacles, should these be expected at very frequent intervals.

In the case of strongly fluctuating geotechnical conditions, the possibility of being in a position to adapt the operating mode of the tunnelling machine brings advantages. This is, above all, purposeful when lengthy inter-connected sections are concerned (see 4.3).

When selecting the suitable tunnelling machines, a critical evaluation of eventual additional equipment is advisable, which may be required to cope with any deviations from the projected geotechnical conditions within a certain range.

By means of grouting, freezing, vibrator compaction or soil replacement, the subsoil can be improved. This is suitable for the entire tunnel cross-section but most importantly for the area above the tunnel when only thin overburden is present.

Using compressed air when a thin overburden is present, e.g. below a watercourse, ballast or a waterproofing and ballasting layer should be installed.

When fluid support is used, additional measures are required in order to avoid uncontrollable suspension losses given high permeability of the soil and thin overburden.

Should there be a high frequency of coarse gravels and boulders in the sand, the utilisation of a rock crusher enhances the operational safety in the case of fluid supported shield machines in addition to

meiden will. Bei großen Durchmessern ist dies besonders zu beachten.
Mit wachsendem Durchmesser ist die uneingeschränkte Anwendung bestimmter Maschinentypen nicht immer gewährleistet und nur in Verbindung mit geeigneten Maßnahmen möglich. Bei Tunnelbohrmaschinen großen Durchmessers haben sich Maschinen mit Schildmantel und dem systematischen Einbau von Tübbingen bewährt. Bei Schildmaschinen mit Erddruckstützung sind sehr hohe Drehmomente am Schneidrad notwendig die bei sehr großem Durchmessern unter Umständen nicht mehr aufgebracht werden können.
Bei Schildmaschinen mit Erddruckstützung können zum Zerkleinern von Grobkies und Findlingen Diskenmeißel eingesetzt werden. Die Abmessungen der Förderschnecke müssen so ausgelegt sein, daß die nach den Abbau anfallenden Grobstücke abgezogen werden können. Eine Schnecke ohne Achse begünstigt die Förderung grober Stücke.
Bestimmte Tone bzw. tonhaltige Gesteine können zum Verkleben des Schneidrades neigen und zur Brückenbildung über Öffnungen zum Materialabzug. Durch Formgebung, Spülvorrichtungen oder Zusatzmittel, die die Klebrigkeit mindern, kann dieser Erscheinung begegnet werden.
Besondere Gasaustritte erfordern einen Schlagwetterschutz der Tunnelvortriebsmaschinen oder eine Änderung der Verfahrenstechnik.

equipping the cutter head with cutter discs.
A tunnelling machine is only in the position to head a circular cross-section, which has a constant diameter. However, it is technically possible to expand the driven circular cross-section over short stretches subsequently in such a way that other, above all larger cross-sectional forms are created, e.g. for a subterranean station, employing soil improvements should these be called for.
The greater the proportion of ultra fine material in the subsoil, the more attention has to be paid to spoil separation in the case of fluid supported shield machines. The requirements on the water content and/or the degree of purity of the separated soil material then govern the limits of the economy of the method.
The operational safety of a method is, among other things, dependent on a tunnel's overburden. This should generally correspond at least to the diameter of the tunnel excavated, if additional measures are to be avoided. This must be accorded special attention in the case of large diameters.
The unrestricted application of certain types of machine is not always assured as the diameter increases and is only possible in conjunction with suitable measures. In the case of tunnel boring machines with large diameters, machines with shield body and the systematic placing of segments have proved themselves.
As far as earth pressure balance shield machines are concerned, extremely high torques at the cutter head are necessary, which possibly cannot be attained in the case of very large diameters.
As far as earth pressure balance shield machines are concerned, cutter discs can be employed for reducing coarse gravel and boulders. The dimensions of the screw conveyor must be designed in such a fashion that the coarse lumps which are present after extraction can be removed. A screw without a shaft is suitable for conveying coarse lumps.
Certain clays or rocks containing clay can cause the cutter head to stick and to form bridges over apertures for removing material. This phenomenon can be counteracted through the proper shape, flushing installations or additives, which reduce the stickiness.
Ingresses of gas require flame proof protection for the tunnelling machines or a change of operational mode.