

Schildvorgetriebener Tunnelbau in heterogenem Lockergestein, ausgekleidet mittels Stahlbetontübbing

Teil 2: Aspekte der Vortriebsmaschinen und Tragwerksplanung

In [1] wurde bereits in der Kurzfassung auf die Risikominimierung durch systematische Vorerkundung und robuste Konstruktion der Tunnelvortriebsmaschinen in komplexen heterogenen Böden hingewiesen, um solche Projekte terminlich wie auch wirtschaftlich erfolgreich abzuwickeln. Der folgende Beitrag befaßt sich mit den Anforderungen an eine robuste, wartungsfreundliche Tunnelvortriebsmaschine, des weiteren mit der optimalen wirtschaftlichen Gestaltung der aus Tübbing bestehende Tunnelchale sowie mit der Gewährleistung der Ausblärsicherheit.

Machine-driven tunneling techniques for reinforced concrete lined tunnels under heterogeneous soft soil conditions – aspects of tunneling machines and structural design. In [1] the risk minimization caused by advanced soil exploration in particular with regard to geophysical exploration has been described.

The following part of the paper is dealing with the requirements of a robust construction of tunneling machines in complex inhomogeneous soils with large diameters.

Further aspects of the design for the precast reinforced tunnel lining and the head-stability will be described.

These topics should help employer and contractor to complete complex projects on time and within the budget.

1 Vortriebsmaschinentechnik

1.1 Einführung

Viele Tunnelgroßprojekte werden in stark heterogen gelagerten Lockgesteinsböden (wechselnde Sand-, Ton-, Kiesböden etc.), im Grundwasser, mit felsartigen Einlagerungen, mit Findlingen, mit wassergefüllten Sandlinsen etc. realisiert. Für diesen Zweck werden heute meist hochentwickelte Vollschnitt-Vortriebsmaschinen (Bild 1) [3] verwendet. Die Anforderungen an diese Maschinen und Verfahren ergeben sich nicht nur aus den bodenmechanischen Bedingungen des Abbaus, sondern auch aus den Forderungen für:

- a) Minimierung der Oberflächensetzungen, um Schäden an

Gebäuden zu verhindern, hervorgerufen durch Grundwasserabsenkungen, starke Spannungsumlagerungen, etc. Dies ist besonders wichtig im innerstädtischen Bereich.

- b) Schutz der Mannschaft vor einstürzenden Erdmassen (gleichzeitiger Schutz vor Setzungen)
- c) Umweltverträglichkeit der Methode hinsichtlich
 - Lärm- und Erschütterungsemission an der Erdoberfläche
 - Kontaminierung des Untergrundes und Grundwassers bzw. des gelösten Baugrundes durch chemische Fremdstoffe während des Abbaus
- d) Förderung und Nachbehandlung des Abbaugutes zur umweltverträglichen Lagerung

Zudem verstärkt sich die Tendenz, die Tunnelröhren für Verkehrsbauten mit einer relativ geringen Erdüberdeckung durchzuführen. In den letzten Jahren ist die Überdeckung vom 1- bis 2-fachen auf 1/2- bis 1-fachen Tunneldurchmesser zurückgegangen (Bild 2). Diese Reduzierung der Überdeckung kann die notwendigen geometrischen Entwicklungslängen der Tunnel (kürzere Tunnel- und Rampenlängen) verkürzen. Dies führt zu geringeren Baukosten.

1.2 Technische Ausstattung der Maschine

1.2.1 Das Schneidrad

Das Schneidrad ist der Abbauproduktträger der Tunnelvortriebsmaschine [4]. Im Felsbau verwendet man meist geschlossene Felsbohrköpfe, bestückt mit Disken und Räumschlitzen. Für Lockergesteinsböden werden Vollschnittmaschinen meist mit Spei-

chenschneidrädern ausgerüstet. Die Speichen werden mit den Abbauwerkzeugen zum Schälen und Abbauen des Bodens vor der Ortsbrust bestückt. Der großzügige Raum zwischen den Speichen dient zum Abräumen des abgeschälten Bodens.

Man verwendet das offene Speichen- wie auch das Felgenspeichenrad. Das offene Speichenrad wird in Böden eingesetzt, die keine Findlinge oder andere Hindernisse aufweisen. Das Felgenspeichenrad wird eingesetzt, wenn Findlinge erwartet werden oder in inhomogenen Schichten mit unterschiedlichen Festigkeiten. Das Felgenrad verhindert einseitige Überbeanspruchung der Speichen und verteilt die örtlich angreifenden Lasten z.B. durch Findlinge auf mehrere Speichen. Die Felge überragt meist den Schildmantel um ca. 2 cm und erzeugt somit einen Überschnitt. Dies vermeidet wirkungsvoll das Verkleben und Beschädigen des Schildmantels. Durch die Felge entsteht eine größere Reibungsfläche. Dies erfordert größere Drehmomentenkräfte als beim offenen Speichenrad. Werden eingelagerte Findlinge erwartet, dann sind zur aktiven Steuerung des Schildes – um ein Abdrücken aus der Sollage sowie das „Einklemmen“ des Schildmantels zu verhindern – eine Gelenklagerung zum Kippen sowie die Längsverschieblichkeit (40 bis 80 cm) des Schneidrads sehr nützlich. Die Felge wird auf der zylindrischen Außenfläche mit spiralförmig angeordneten Schneiddrillen bzw. mit Kaliberwerkzeug besetzt. Durch diese Maßnahme kann ein einseitiger Überschnitt durch Kippen des

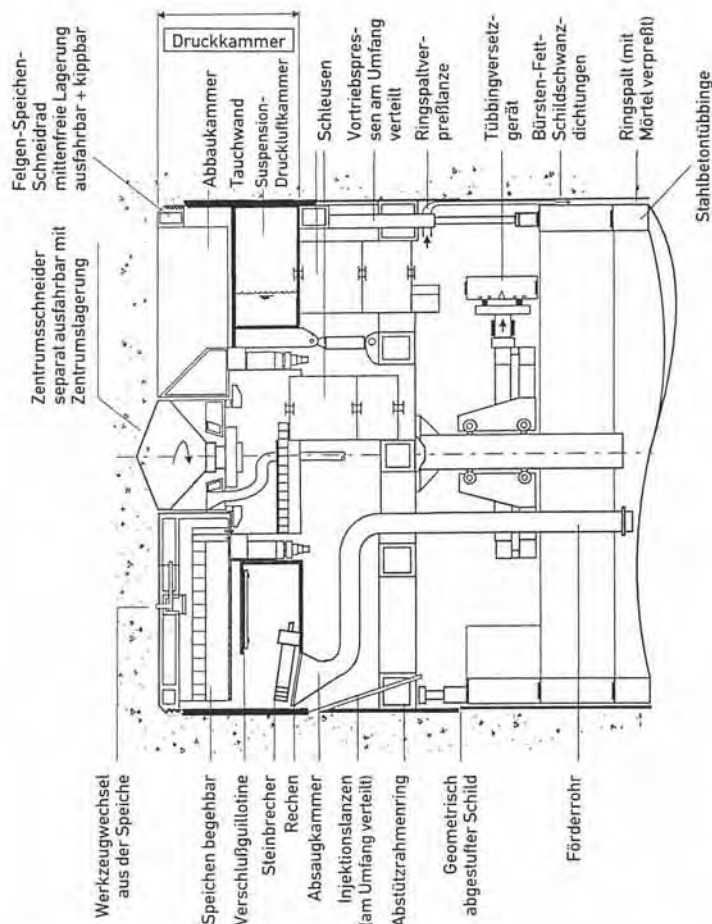


Bild 1. Prinzip einer großen Hydroschild-Tunnelvortriebsmaschine [2]
Fig. 1. Principles of huge diameter slurry supported tunneling machines [2]

Schneidrades und Längsverschiebung erzeugt werden.

Der Überschnitt verringert die Vorschubkräfte des Schildes und erleichtert das Steuern durch die hydraulischen Pressen am Schildende. Damit wird das Einklemmen der Schildmaschine durch Findlinge, die nur teilweise am Umfangsbereich der Maschine angeschnitten werden, verhindert. Voraussetzung ist jedoch, daß die

Lage der Findlinge durch Voraus erkundung festgestellt wird. Bei den neuen großen Vortriebsmaschinen (Bild 1) sind die Speichen begehbar. Der Einstieg erfolgt durch die Doppelschleusen über das Zentrum. Die Rollenmeißel und Disken können unter quasi atmosphärischem Druck, ohne daß die Stützdruckflüssigkeit der Ortsbrust abgesenkt und durch Druckluft ersetzt werden muß, ausgetauscht werden.

Die Räume zwischen den Speichen dienen zum Abräumen des gelösten Bodens und zur Zwangsförderung. Die abgeschälte Erde fällt zwischen die Arme der Speichen und drückt sich durch die rotierende Bewegung und durch den neu geschälten Boden in den Raum zwischen Hinterseite der Speiche und Vorderseite Tauchwand und fällt von dort hinunter zum Sohlbereich des Speichenradraumes vor den Steinbrecher bzw. Rechen. Von dort wird das Material mittels Fördereinrichtung hinter dem Rechen gefördert.

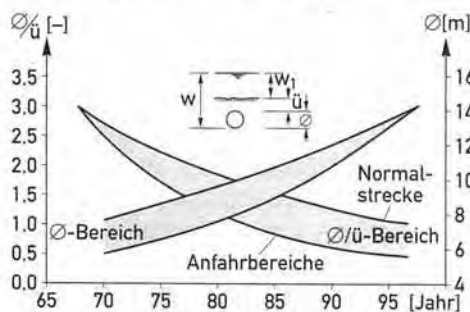


Bild 2. Entwicklung der Überdeckung bei Tunnelbauwerken im Lockergestein
Fig. 2. Development of overlayer diameter ratio for tunneling in sedimented soils

Die Zwischenbereiche zwischen den Speichen können durch Verbauplatten mechanisch-hydraulisch verschlossen werden, um im Schutz dieser Platten Reparaturarbeiten meist unter Druckluft im Bereich des sonst offenen Schneidraumes durchführen zu können, oder sie werden zum Abstützen der Ortsbrust verwendet, um Hindernisse manuell zu beseitigen oder zu zerstören. Man kann unter anderem folgende Systeme verwenden:

a) Hydraulisch verschiebbare Stützplatten zum Verschließen der Stützsektoren. Diese Stützplatten befinden sich im normalen Betriebszustand vor der Tauchwand im Speichenraum. Das Speichenrad wird in eine festgelegte Position gedreht, um die in Rotationsrichtung festen Stützplatten auszufahren. Diese Art der Stützplatten ist mechanisch ziemlich robust.

b) Hydraulisch klappbare Stützplatten, die an den Speichen gelenkig befestigt sind. Diese Art der Segmentstützplatten kann unabhängig von der Stellung des Speichenrades in Rotationsrichtung geschlossen werden. Zudem können gezielt kleinere Sektoren geöffnet werden, z. B. zum manuellen Zerkleinern von Findlingen, die nicht geschnitten werden können sowie zum Entfernen von metallischen und holzartigen Gegenständen. Der Nachteil dieser hydraulisch klappbaren Stützplatten liegt in der Gefahr der mechanischen Verletzbarkeit und der möglichen Funktionsunfähigkeit, da sie an den Speichen in der Schneidebene gelenkig befestigt sind. Diese Gefahr ist besonders hoch bei heterogenen Böden mit Einlagerungen von Steinen und Findlingen, die sich zwischen den Speichen oder zwischen Schneidrad und Tauchwand einklemmen oder verkanten können.

Die Schneidradlagerung wird fast ausschließlich nach maschinenbautechnischen Gesichtspunkten bestimmt. Es werden meist folgende Lagerungs- und Antriebsarten [4] verwendet (Tabelle 1):

- Zentralwellenlagerung
- Umfangslagerung
- mittelfreie Kompaktlagerung

Tabelle 1. Bauarten der Schneidradlagerung
Table 1. Construction of cutting wheel bearings

Nr.	Bauart	Spezifische Charakteristik/ Schneidradform	Vorteile	Nachteile
1	Zentralwellenlager	Speichenrad	– kleiner Rollenlager- durchmesser – kleiner Dichtungs- durchmesser – einfache Längsverschie- bung	– größere Einbautiefe – kleinere Drehmomente
2	Umfangslager	Felgen- oder Trommel- schneidrad	– großes Drehmoment – Einstieg in die Speichen durch die Mitte	– kaum kippbar – großer Dichtungsdurch- messer
3	Mittenfreie Kompaktlagerung	Speichenrad, Felgen- Speichenrad	– Längsverschiebung – kippbares Gleitlager mittels Pressen – Einstieg in die Speichen durch die Mitte	– größerer Dichtungs- durchmesser

Böden, die zur Verklebung neigen, wie mittel bis ausgeprägt plastische Tone, mittel bis ausgeprägt zusammendrückbare Schluffe sowie leicht plastische Tone und Schluffe, die, bedingt durch die Abbaumethode, z. B. Hydroschild, auf der Oberfläche des Schildes viskos-plastisch werden, können sich bei Verwendung von Vollschnittmaschinen durch den Anpreßdruck verspannen und eine flüssig viskose Gleitfläche zwischen Schild und Gebirge aufbauen. Bei weichen bis steifen Tonen entsteht eine „Schmierdisk“ vor dem Schneidrad. Die Werkzeuge setzen sich zu, und somit hat der Schild keine wirksamen Schälwerkzeuge. Dieses „Schmier-schneidrad“ gleitet somit unwirksam auf der Ortsbrust. Dadurch wird die Abbauleistung – das

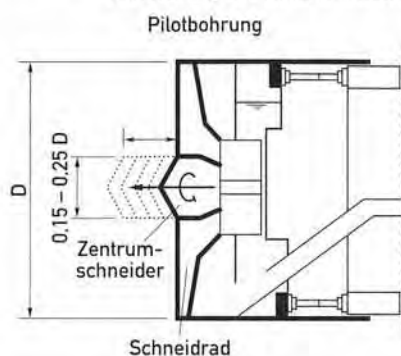
Schälen des Bodens – stark gemindert. Zudem drückt sich das plastisch viskose Abbaumaterial in die Förderkammer und bei Hydroschilden in den Bereich hinter der Tauchwand. Dann sinkt nicht nur die Abbauleistung, sondern auch der Druck an der Ortsbrust. Gleichgewichte (Erd- und Wasserdrukke) können nicht mehr durch das Luftpolster oberhalb des Bentonit-Erd-Wassergemischs (hinter der Tauchwand) gesteuert werden. Es entsteht ein Verstopfer, der unter großem Aufwand, oft nur manuell, beseitigt werden kann. Um dies zu verhindern, muß man den dreidimensionalen Spannungszustand lokal im Bereich der Ortsbrust stören. Dies kann durch eine Kombination von Jeting und mechanischem Abbau erfolgen [5] oder durch einen im Schild ange-

ordneten vorausseilenden Zentrumsschneider.

Der Abbau mittels vorausseilendem Zentrumsschneider in solch klebrigen Böden erfolgt dann in zwei Phasen (Bild 3):

- 1) Der vorausseilende, mit Schälwerkzeugen bestückte, meist konische Kopf des Zentrumsschneiders (Teilschnitt) bohrt eine Pilotbohrung in die Ortsbrust in einer Größe von 0,15 bis 0,25 des Gesamtdurchmessers. Der Boden wird im Bereich des Zentrumsschneiders abgesaugt bzw. gefördert. Zudem sollten schwenkbare Spüldüsen angeordnet werden, um ein Verstopfen zu vermeiden. Der Zentrumsschneider sollte 40 bis 80 cm vorausseilen können.
- 2) Dann wird der Zentrumsschneider zurückfahren, so daß der

Phase 1: Teilschnitt zur Entspannung der Ortsbrust – Pilotbohrung mittels Zentrumsschneider



Phase 2: Vollschnitt der Ortsbrust

Vollschnitt mit Gesamtschneidrad

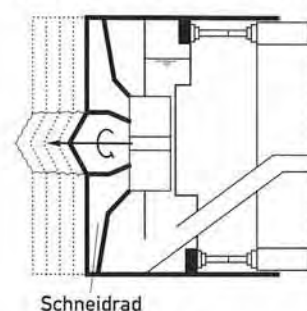


Bild 3. Abbaumöglichkeiten von plastisch-viskosen sowie zähen konsolidierten Tonen
Fig. 3. Cutting method of plastic, viscose and consolidated clay

Schild eine monolithische Schildoberfläche bildet. Die Ortsbrust kann sich nun durch die Pilotbohrung in einer Tiefe von ca. 40 bis 80 cm entspannen. Das Gesamtschildrad schält nun die Ortsbrust im Vollschnitt 40 bis 80 cm ab. Der zähe, meist konsolidierte Ton entspannt sich durch die Pilotbohrung, und der Abraum stürzt unter anderem in das Zentrum.

1.2.2 Abbauwerkzeuge

Zum Lösen des Gebirges bzw. des Bodens aus dem Lagerverband benötigt man für die verschiedenen Bodenarten (klassifiziert nach Festigkeit, Kohäsion, etc.) unterschiedliche Spezialwerkzeuge [6]. Der Werkzeugbesatz bei heterogenen Lockergesteinen und Sedimentböden besteht aus einer Kombination von verschiedenen Werkzeugtypen (Tabelle 2), um eine optimale Wirksamkeit für die Bandbreite der anstehenden Böden zu erreichen. Die Wahl der Werkzeuge wie auch die konstruktive Gestaltung des Schildes haben einen großen Einfluß auf den Erfolg des Schildvortriebs. Dies ist um so wichtiger, da der Abbauraum für Änderungen des Werk-

zeugbesatzes unter Tage nur extrem schwer zugänglich ist. Dies birgt Gefahren für die Mannschaft wie auch eine zeitliche Verzögerung des Vortriebs. Bei heterogenen Böden – abwechselnd gelagerte Sande, Kiese, Tone mit eingelagerten Findlingen oder zementierten Sandschichten – verwendet man

- Schälmesser
- vorausseilende Zentrumsschneider
- Disken und Rollenmeißel
- Steinbrecher

1.2.3 Förderung des Abbaumaterials

Flüssigkeitsförderung

Bei der Verwendung von Hydroschilden [7], [8], [9] wird die Flüssigkeitsförderung z. B. mittels Kreisel-pumpen und Rohrtransport angewandt. Das vom Schneidrad gelöste Material sinkt in der nach vorne offenen Kammer in der Bentonitstützsuspension nach unten. Zwischen der Abbaukammer und der Luft-Suspensionskammer, in der der Druck in der Abbaukammer durch ein Luftpolster oberhalb der Stützflüssigkeit reguliert wird, ist eine Tauchwand angeordnet, die unten einen Guillotineverschluß im Bereich der Kommuni-

kationsöffnung hat, die durch den Rechen geschützt ist. Diese Öffnung dient meist gleichzeitig zum Absaugen des gelösten Bodens als Bentonit-Erd-Wassergemisch. In der Absaugkammer sind hintereinander meist folgende Einrichtungen angeordnet:

- Greiferbrecher vor dem Rechen zur Zerkleinerung von großen Steinen wie auch Findlingen und Felsbrocken (heute: bis zu einer Größe von 1,00 bis 1,20 m)
- Rechen zum Schutz der Kreisel-pumpe und Rohrleitung vor zu großen Steinen, die zuerst durch den Steinbrecher zerkleinert werden müssen, um Verstopfungen zu verhindern
- schwenkbare Spüldüsen zum Freispülen der Absaugkammer, um ein Verkleben mit dem Abbaumaterial zu verhindern
- Absaugrohr, starr oder schwenkbar

Die Absaugkammer sollte nach hydromechanischen Gesichtspunkten gestaltet werden – ohne tote Ecken –, so daß eine Sogwirkung durch Geschwindigkeitszunahme zum Absaugrohr hin entsteht, um auch bei unterschiedlichen Erdstoffgemischen ein Zusetzen der Kammer zu ver-

Tabelle 2. Abbauwerkzeugeinsatz
Table 2. Cutting tools

Nr.	Bodenklassen	Abbauwerkzeuge/konstruktive Gestaltung
1	Leicht lösbare Bodenarten – nicht bis schwach bindige Sande, Kiese etc.	– Schälmesser – durchgehende Schneidkante
2	Mittelschwer lösbare Bodenarten – bindige Bodenarten, leichte bis mittlere Plastizität – Sand, Kiese – Schluff, Ton	– Schälmesser, Stichel – Schälmesser, Stichel, vorausseilender Zentrumsschneider
3 3a 3b	Schwer lösbare Bodenarten – wie 1 und 2, jedoch Korngrößen > 63 mm, Steine 0,01 bis 0,1 m ³ – wie 1 und 2, jedoch Findlinge 0,1 ≥ 1 m ³	– wie 2 sowie Rollendiskens und kleine Steinbrecher – wie 2 sowie Rollendiskens und kleine Steinbrecher etc. zur Zertrümmerung von Findlingen
4	Leicht lösbarer Fels oder vergleichbare Bodenarten – Fels, bröckelig, schiefrig, weich, verwittert – vergleichbare verfestigte nichtbindige sowie bindige Böden	– Disken – Rollenmeißel – Meißel – Abräumzähne
5	Schwer lösbarer Fels – hohe Gefügesteigkeit	– Disken – Rollenmeißel – Meißel

hindern, da das Bentonit-Erd-Wassergemisch zur Sedimentation neigt. Die obere Grenze der spezifischen Dichte des Bentonit-Erd-Wassergemischs zur Förderung mittels Fliehkraftpumpen liegt bei ca. $1,45 \text{ t/m}^3$ [5]. Die Fließgeschwindigkeit im Rohr sollte so ausgelegt sein, daß ein Absetzen des Materials verhindert wird, um Rohrverstopfer möglichst zu vermeiden. Das Absaugrohr sollte mit einem schwenkbaren Krümmer versehen werden, um ein Zusetzen der Abbaukammer mit Boden zu verhindern.

Der Abbau mittels Hydroschild und Flüssigkeitsförderung ist relativ teuer, da der gelöste Boden von der Flüssigkeit in einer Separieranlage getrennt werden muß, um eine Dickstoff- oder Feststofflagerung zu ermöglichen. Besonders aufwendig ist die Trennung der feinen Tonpartikel. Dies ist aber im Fall von Tonabbau erforderlich, da es andernfalls zu einer Anreicherung der im Kreislauf genutzten Bentonitsuspension bezüglich ihres Feststoffgehalts kommt, und um Ablagerungen möglichst gering zu halten.

Die Längsflexibilität der Rohrleitung während der Vortriebsrelativbewegung zwischen den fest installierten Rohren am fertigen Ausbau und dem sich vorwärtsbewegenden Nachläufer wird durch ein Teleskoprohr erreicht. Die hydraulische Förderung bietet hohe Förderkapazität, ist platzsparend (besonders wichtig bei kleinen Tunneldurchmessern – keine wechselseitigen Schutterzüge).

Dickstoff-Förderung

Bei Verwendung von Erddruckschilden [10] verwendet man meist Förderschnecken.

Das Problem bei Förderschnecken sind größere Steine, die sich verklemmen können. Die Förderschnecken können so ausgelegt werden, daß ein kontinuierlicher Druckabbau innerhalb des Förderweges bedingt durch die innere Reibung des Abbaumaterials erfolgt.

Im Regelfall hat das Abbaumaterial eine solche Konsistenz, daß es über Förderbänder oder direkt in Schutterzügen transportiert werden kann. Jedoch muß meist der abgebaute Boden in der Abbaukammer konditioniert werden [11].

Diese Abbaumethode ist kostengünstiger, da der Abraum oft ohne weitere Nachbehandlung (Separierung etc.) gelagert werden kann.

1.2.4 Schild

Die Ausführung des Schildmantels als starrer Zylinder oder als zweiteiliger Zylinder mit einem Gelenk zwischen Schildschwanz und Schneidradkammer ist eine Frage, die nur unter Zuhilfenahme des geometrischen Verhältnisses zwischen Schilddurchmesser und Schildlänge sowie der möglichen planmäßigen und außerplanmäßigen Kurvenradien und der Fähigkeit der Schildschwanzdichtung, Verkantungen und damit unterschiedliche Spaltweiten sicher zu dichten, beurteilt werden kann. Wenn der Schild relativ lang ist im Verhältnis zum Durchmesser, liegt er sehr starr im Boden und läßt sich schwer steuern, ist jedoch auch etwas unempfindlicher gegen kleinere weiche Linsen oder einseitig hartes Gestein. Der kurze einteilige Schild ($0,7 \leq \varnothing/l \leq 1,2$) läßt sich sehr gut steuern. Der kurze Schild drückt sich mögli-

cherweise auch schneller aus der Sollage bei einseitig hartem Gestein und/oder weichen Linsen. Dies kann jedoch ausgeglichen werden durch die Überschnidtechnik (überstehende Felge, kippbares Schneidrad, etc.).

Die langen Schilde können durch Gelenke flexibler gemacht werden. Dies führt zu zusätzlichen Abdichtungsproblemen wie auch statisch konstruktiven Problemen bei großen Schildmaschinen (freigelagerter hinterer Zylinder/einseitig eingespannter Zylinder).

Der Schildschwanz bei ausgefahrenen Zylindern, zum Einbau des nächsten Ringes, sollte den vorherigen Tübbingring, auf dem sich noch die Vorschubzylinder abstützen, um ca. $1/4$ bis $1/3$ Tübbing-Ringbreite zur Gewährleistung der Abdichtung überlappen.

1.2.5 Schildschwanzabdichtung

Die Dichtung [4] zwischen der Schildmaschine und der Tübbingauskleidung dichtet den Tunnel gegen Grundwasser, Boden und Verpreßmörtel ab. Diese Dichtung muß hohe Flexibilität besitzen, um

- a) den sich vorwärts bewegenden Schild gegen die relativ steife Tübbingauskleidung abzudichten
- b) die möglichen Unebenheiten, bedingt durch Fugenversatz beim Einbau der Tübbinge, auszugleichen
- c) nicht durch den Verpreßmörtel in ihrer Funktion beeinträchtigt zu werden.

Diese Dichtungen müssen erhebliche Erd- und Wasserdrücke sowie den Mörtelverpreßdruck zur Schließung des Ringspalts widerstehen. Zur Abdichtung verwendet

Tabelle 3. Schildschwanzdichtungen
Table 3. Cutting machine rear sealing

	Kunststoffprofildichtung	Drahtbürstendichtung
Vorteile	– keine Umweltbeeinflussung – Robustheit	– Toleranzunterschiede durch Absätze zweier benachbarter Tübbinge in der Längsfuge können einfach ausgeglichen werden
Nachteile	– relativ steif, daher Probleme der Dichtigkeit zwischen benachbarten Tübbingen	– permanent wird Fett an der Außenseite der Tübbinge abgegeben (Umweltbeeinflussung) – große Mengen der teuren, umweltverträglichen Fette sind erforderlich

man zur Zeit Kunststoffprofile oder eine Stahldrahtbürstendichtung (Tabelle 3).

Die Kunststoffprofildichtungen sollten mit mindestens einer aufblasbaren Notdichtung ausgerüstet sein, um bei starken Absätzen in der Längsfuge zwischen zwei benachbarten Tübbing, bedingt durch den Einbau, die Dichtigkeit zu gewährleisten.

Bei den Stahlbürstendichtungen mit drei bis vier hintereinander angeordneten Bürstenringen werden die Kammern zwischen den Bürsten mit Fett gefüllt. Dieses Fett wird permanent unter Druck gehalten, der höher sein muß als der Verpreßmörteldruck zum Verpressen des Ringspalts, damit kein Wasser, Boden oder Verpreßmörtel eindringen können. Dadurch wird permanent Fett an die Außenfläche der Tübbing abgegeben, welches möglicherweise den Verbund zwischen Tübbing und Verpreßmörtel an der Außenseite reduziert.

1.2.6 Ringspaltverpressung

Der Schild ist meist leicht konisch ausgeführt, um die Oberflächenreibungskräfte klein zu halten und ein Einkeilen des Schildes zu verhindern.

Das Felgenreifenrad bzw. das Schneidrad verfügt somit über einen größeren Durchmesser als der Schildschwanz bzw. der Außendurchmesser der Betontübbing. Dieser Ringspalt zwischen Tübbingaußenlaibung und gewachsenem Boden, der beim Verfahren des Schildes entsteht, sollte synchron, kontinuierlich beim Vortrieb direkt durch den Schildschwanz verpreßt werden. Dazu werden um den Umfang des Schildschwanzes in äquidistanten Abständen von ca. 1,5 bis 2,00 m Injektionslanzen angeordnet. Damit werden folgende Ziele erreicht:

- a) Weiteres Nachsacken des Bodens wird verhindert.
- b) Die elastische Bettung der Tübbinggelenkkette wird hergestellt.
- c) Die geringe Auflockerungszone, die durch den Überschnitt entsteht, wird zwischen Tübbingauskleidung und dem natürlich gewachsenen Boden verspannt.

- d) Die Tübbing erhalten noch einen Schutzmantel gegen aggressive Grundwässer und Böden.

Damit kann erreicht werden, daß die Spannungumlagerungen im Boden sowie die Bodenbewegungen mit den daraus resultierenden Setzungen an der Erdoberfläche klein bleiben.

Die Verpressung durch Öffnungen in den Tübbing im Nachlauf ist aus technischen und wirtschaftlichen Gründen der Verpressung aus dem Schildschwanz unterlegen.

Die Injektion aus dem Schildschwanz stellt jedoch hohe Ansprüche an den Injektionsmörtel hinsichtlich Abbindeverzögerung sowie Fließfähigkeit, damit während des Stillstands der Maschine (Ringbau, Wartung, etc.) die Injektionsrohre nicht durch erhärtenden Mörtel verstopft werden. Möglicherweise müssen die Leitungen während längerer Standzeiten freigespült und mit einem nicht erhärtenden Medium gefüllt werden, das vor der Fortsetzung des Vortriebs aus der Leitung zurückgeführt wird, um dann wieder mit Mörtel beaufschlagt zu werden.

1.2.7 Sicherheitsanforderungen

Die besonderen Anforderungen hinsichtlich TÜV, Arbeitssicherheit, Druckluftverordnung, Brandschutz, etc. sollen hier nicht behandelt werden.

Es ist jedoch erforderlich, auf einige Besonderheiten zur Reduzierung der Großbrandgefahr einzugehen (z. B. Brand Großer-Belt-Tunnel).

Der Brandfall tritt mit einer extrem geringen Wahrscheinlichkeit auf. Im Fall eines Brandes könnte jedoch ein hohes Gefahrenpotential geweckt werden, was große Mengen an hochoberflächtem Hydrauliköl sowie, was den Antrieb der Motoren anbelangt, gewaltige elektrische Spannungen, freisetzen würde.

Daher sind konstruktive Maßnahmen erforderlich, die das Gefahrenpotential verringern:

- a) mehrere kleine, räumlich separate Öltanks
- b) keine Öltanks im Bereich der Elektromotoren

- c) automatische Volumenverlustdetektoren für die Hydrauliktanks
- d) Feuerlöscheinrichtung – nach Möglichkeit Sprinklersysteme
- e) Brand- und Rauchschutz für das Bedienungspersonal (Masken, Anzüge, Atemgeräte, erreichbar im Nachläufer)

1.2.8 Roboterisierung und Automatisierung

Der Vortrieb ist weitgehend automatisiert [12] hinsichtlich der Steuerung des Schneidkopfes, der Druckregulierung der Bentonitstützsuspension zur Stabilisierung der Ortsbrust, Steuerung der Vortriebspresen und der Förderung des Abraums. Die Überwachung dieser Vorgänge erfolgt zentral in einer Steuerkabine. Hier werden die Soll-Ist-Abweichungen hinsichtlich des Schildes zur Tunnelachse überprüft. In einem gewissen Umfang können die Abweichungen durch ein Softwareprogramm über eine Ausgleichsgradienten korrigiert und die Pressen am Umfang entsprechend gesteuert werden.

Das Verlegen der Betontübbing wird meist noch manuell gesteuert. Hier gibt es noch gute Ansätze zur Automatisierung mittels Sensoren und Prozeßsteuerung. Aus Kostengründen in bezug auf die Einzelprojekte wurde diese Möglichkeit nicht zur vollen Anwendungsreife für den rauen Untertagebetrieb entwickelt. Zu diesem Automatisierungskreis gehört auch der Transport und die Verschraubung der Tübbing [13].

2 Berechnung von tübbingausgekleideten Tunnelröhren

2.1 Einführung

Die Berechnung und Ausführungsplanung von Tunnelbauwerken ist nicht vergleichbar mit normalen Hoch-, Brücken-, Tief- oder sonstigen Ingenieurbauwerken, da der Untergrund infolge des Verbundes mit dem Bauwerk einen wesentlichen Teil des Tragwerks bildet. Die Bestimmung der mechanischen, elastischen, plastischen Kennwerte des Bodens ist, bedingt durch seine Heterogenität, weiten Schwankungen unterworfen – im Gegensatz zu den statistisch engen Grenzen der qualitätsüberwachten

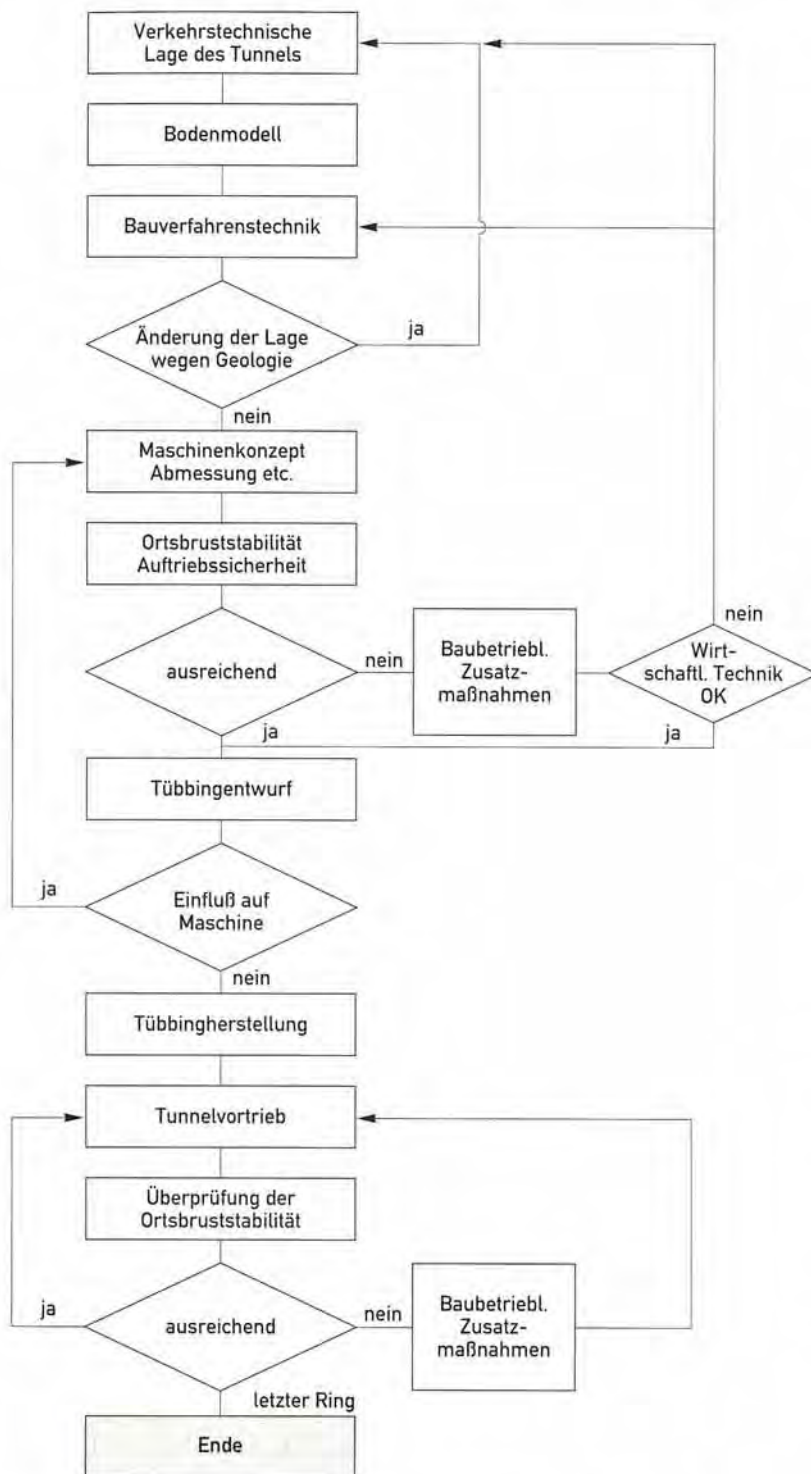


Bild 4. Entwurfsablauf eines schildvorgetriebenen Tunnels mit Tübbingauskleidung

Fig. 4. Design flow for tunneling machines with segment lining

Werkstoffe wie Stahl oder Beton [14].

Im Hinblick auf die Unsicherheiten der Eingangswerte hinsichtlich Belastung sowie des Bodenkörpers als Teil der Tragstruktur des Tunnels ist eine „verfeinerte“ Rechnung im allgemeinen nicht angebracht. Wichtiger ist vielmehr, Parameteruntersuchun-

gen durchzuführen, die die möglichen Risiken und Gefährdungssituationen während des Baus und des späteren Betriebs berücksichtigen.

Die notwendigen Berechnungen ergeben sich u. a. aus der Variation der Kenngrößen des Bodens. Zudem sollte eine systematische Risikoanalyse (Bild 4)

erfolgen mittels eines Teams von Geologen, Bodenmechanikern, Statikern, Bauverfahrenstechnikern etc., und zwar in folgenden Schritten:

- 1) systematische Analyse der In-situ-Untersuchungen sowie des daraus abgeleiteten Bodenmodells unter Berücksichtigung der einschlägigen lokalen Erfahrungen in bezug auf die Bodenverhältnisse sowie ausgeführte Tunnelbauten
- 2) mögliches Gefährdungspotential simulieren und untersuchen
- 3) mögliche Bauverfahren festlegen für die Untersuchung der Interaktion Boden – Bauverfahren – Bauwerk
- 4) physikalische Berechnungsmodelle aufstellen
- 5) Berechnung sicherheitsrelevanter Kriterien von Parameterstudien unter Beachtung obiger Punkte 1, 2, 3
- 6) Auswahl der möglichen Bauverfahren.

Besonders wichtig sind dabei die geologischen-bodenmechanischen und geophysikalischen Voruntersuchungen sowie deren Auswertung und Interpretation durch Fachleute. Bei der Interpretation der Ergebnisse muß man sich darüber im Klaren sein, daß die Bodenuntersuchungen oft nur punktuelle lokale Erkenntnisse darstellen, mit einem relativ großen Rasterabstand im Bereich des Bauwerks.

Mehrere einfache Berechnungsabläufe mit Variation der Parameter, im wahrscheinlichsten Streubereich, sind informativer und aussagekräftiger als einzelne komplizierte FEM-Berechnungen. Während der Bauausführung sind ständige Kontrollmessungen erforderlich, um Abweichungen von den Annahmen zu erkennen. Zudem werden zusätzliche Informationen für zukünftige ähnliche Projekte gewonnen.

Heute erfolgen bergmännische Tunnelvortriebe meist in Spritzbetonbauweise (NÖT) oder im Schildvortrieb. Bei der Spritzbetonbauweise werden ingenieur-geologische Konzepte mit handwerklichen Arbeitsmethoden kombiniert. Die Planung eines solchen Tunnels kann nicht wie im Hoch-

Tabelle 4. Verfahren zur statischen Untersuchung von Tunneln mit Tübbingauskleidung
Table 4. Design methods for tunnels with segment lining

Numerische zwei- und dreidimensionale Verfahren – FEM, BEM, DEM	Stabzugmodellierung
Vorteile: – Räumliches Verhalten des Bodens (dreidimensional) modellierbar, z. B. Verhalten des Bodens im Bauzustand im Bereich der Ortsbrust – Berücksichtigung heterogener Bodenverhältnisse möglich – Spannungs- und Verformungsverhalten des Bodens wie der Tübbingauskleidung einschließlich Interaktion wird berücksichtigt Probleme: – Korrekte Modellierung des Baugrunds sowie der Interaktion des Baugrunds mit dem Bauwerk ist schwierig – Großer Rechenaufwand	Vorteile: – geringer Rechenaufwand – Überschaubarkeit der Ergebnisse und der Einflußgrößen Nachteile: – dreidimensionales Tragverhalten des Bodens wird nicht erfaßt – Die Berechnung beschränkt sich auf die Tübbingauskleidung Anmerkung: – Bei schildvorgetriebenen Tunneln mit Tübbingauskleidung sind die Spannungumlagerungen und Verformungen sehr gering, da der Ringspalt sofort synchron zum Vortrieb kraftschlüssig verpreßt wird und somit eine sofortige Bettung aufgebaut wird.

bau erfolgen. Die Voruntersuchungen dienen zur Festlegung der prinzipiellen Ausbaumaßnahme. Das Verfahren mittels Spritzbeton und Ausbaubögen, Anker etc. ist sehr adaptiv, hier ist Spielraum für Varianten.

Für einen maschinellen Schildvortrieb mit vorgefertigter Fertigteil-Tübbingauskleidung ist eine Adaption an veränderte Gegebenheiten während des Bauablaufs nicht mehr möglich. Hier muß die Ausführungsplanung für das Maschinen- und Tübbingauskleidungskonzept verbindlich und äußerst gründlich durchgeführt werden. Daher ist es besonders wichtig, die Einwirkungen auf die Tübbingauskleidung im Bau wie auch für den Endzustand zu untersuchen. Die Stabilität der Ortsbrust während des Vortriebs muß für alle möglichen ungünstigen Fälle untersucht werden, um die notwendigen technischen Vorkehrungen und Lösungen zu erarbeiten.

2.2 Berechnung der Tübbingauskleidung

Die statische Berechnung kann im wesentlichen mit folgenden Verfahren durchgeführt werden:

- a) Berechnung mit gebetteten Stabwerken
- b) Berechnung mit Finiten Elementen (FEM) sowie Boundary Elementen etc.

Einige Anwendungsgebiete der Methoden und deren Gründe sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Die Gebettete-Stabwerk-Methode hat sich bei flachliegenden Tunneln im Lockergestein für die Bemessung der Auskleidung schildvorgetriebener Tunnel bewährt.

Zur Berechnung von Tunnelröhren mit Tübbingauskleidung nach der Theorie der gebetteten Stabwerke sind zahlreiche Veröffentlichungen gemacht worden [15] bis [23].

Die Tabelle 5 enthält eine chronologische Auflistung einiger wichtiger Veröffentlichungen zur Entwicklung dieser Berechnungsmethode. Die Veröffentlichungen enthalten ausreichende Angaben zur Berechnung und Dimensionierung der Auskleidung. Jedoch sind folgende Ansätze für die sehr großen Tunneldurchmesser unzureichend berücksichtigt:

- 1) Aufbau der Kopplung während des Eintretens der Verformung zu benachbarten Ringen durch Versatz der Längsfugen und Nut- und Federauskleidung der Ringfuge
- 2) Längskräfte, die durch den Vortrieb eingetragen werden, können nicht permanent als statisch eingetragene Kräfte angesetzt werden.
- 3) Beschränkung der Drehwinkel in den Längsfugen zur Sicherstellung der langfristigen Dichtigkeit

Die Einzelringe der Auskleidung bestehen je nach Größe des Tunneldurchmessers meist aus

mehreren gleichen Teilen, zwei Anschlußtübbing zum Schlußstein sowie einem Schlußstein.

Die Kopplung der Einzelringe wird durch die Ausbildung der Ringfuge z. B. als Nut- und Federfuge oder als glatte ebene Fuge beeinflusst und gestaltet.

Bei der glatten ebenen Ringfuge erfolgt quasi keine Kopplung mit dem Nachbarring. Alle Lastfälle werden von dem durch Längsfugenmomente gelenkig gekoppelten, elastisch gebetteten Stabzug abgetragen. Die Längsfugendrehmoment-Gelenkwiderstände ergeben sich aus der Drehfedersteifigkeit der Betongelenktheorie [24].

Diese Drehfedersteifigkeit ergibt sich aus den nichtlinearen Momenten-Drehwinkel-Beziehungen. Diese Ringbiegesteifigkeit kann im Tunnelbau erhöht werden (bis fast hin zur quasi kontinuierlichen Biegesteifigkeit des Rings) durch Ausbildung der Ringfuge als Nut- und Federfuge mit Versatz der Längsfuge durch eine rotatorische Drehung um einen halben Stein bzw. dessen Vielfaches zum benachbarten Ring.

In den Endbereichen eines Tübbingsteins sind in der Ringfuge Kaubitstreifen [25] und/oder Sperrholzstreifen in die Nut und Feder an den Flanken eingelegt. Dabei ergeben sich je Stein zwei Koppelstellen. Die Ovalisierung des Tunnelquerschnitts (Bild 5) weckt nach einer gewissen An-

Tabelle 5. Chronologische Entwicklung zur Berechnung von Tunneln mit Tübbingauskleidung
 Table 5. Design development of tunnels with segment lining

Nr.	Autor	Thema/Problematik	Jahr
1	Bull, A. [15]	elastisch gelagerter Kreisring, Erddruckansätze	1944
2	Duddeck, H., Schulze, H. [16]	elastisch gelagerter Kreisring, neue Erddruckansätze	1964
3	Windels, R. [17], Hain, H. [18]	Theorie II. Ordnung des elastisch gelagerten Kreisrings	1966/1968
4	Hain, H., Falter, B. [19]	Theorie II. Ordnung des elastisch gebetteten Kreisrings unter Berücksichtigung von Momentengelenken	1975
5	Melder, V. [20]	Ansätze zur Kopplung der versetzt angeordneten Ringe – Längsfugendrehfestigkeit – elastische Ringfugenkopplung unter Ansatz der Kaubits (durch das Kriechen des viskoelastischen Materials ist der Ansatz des kurzzeitigen elastischen Verhaltens unzureichend)	1975
6	Duddeck, H. [21], [23] Ahrens, H., Lux, K. H., Lindner, E. [22]	Empfehlungen zur Dimensionierung von Tunneln bzw. schildvorgetriebenen Tunneln in Lockergestein – Einwirkungen – Ersatzbettungsansätze k_r, k_t – Bettungsverlauf für $h < 2d$, $2d \leq h \leq 3d$ – Lasten, Erddruckansätze, Vorverformungen – Nachweise	1982–86
7	Baumann, T. [27]	– konstruktive Gestaltung der Längsfuge (siehe auch Leonhard/Reimann)	1992
8	Versuche: Wayss + Freitag/Materialprüfanstalt für Bauwesen, München Dywidag/U-Bahn – Nürnberg Dywidag Materialprüfanstalt München Wesertunnel/IBMB – TU Braunschweig Arge 4. Röhre Elbtunnel/STUVA Köln [26]	Klärung des Tragverhaltens – Längsfugen – Längsfugen – Längsfugen und Ringfugen – Längsfuge und Ringfuge, Kombinationsverhalten, Abscheren	1972 1989 1992 1996/97

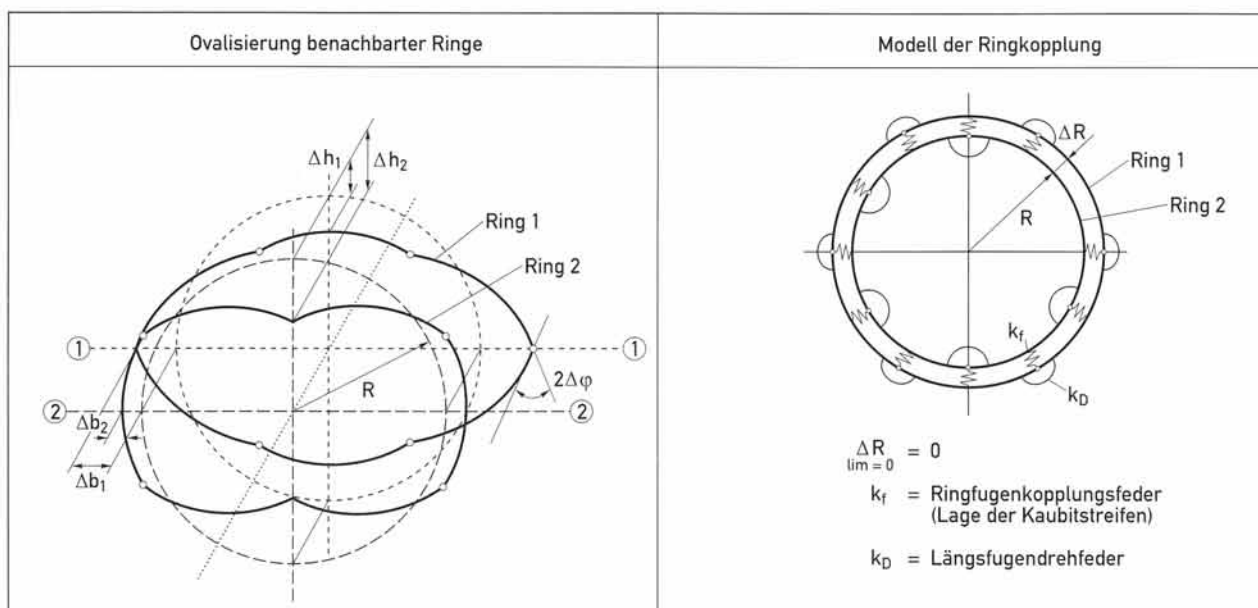


Bild 5. Statische Kopplung benachbarter Ringe
 Fig. 5. Static coupling of adjacent segment lining rings

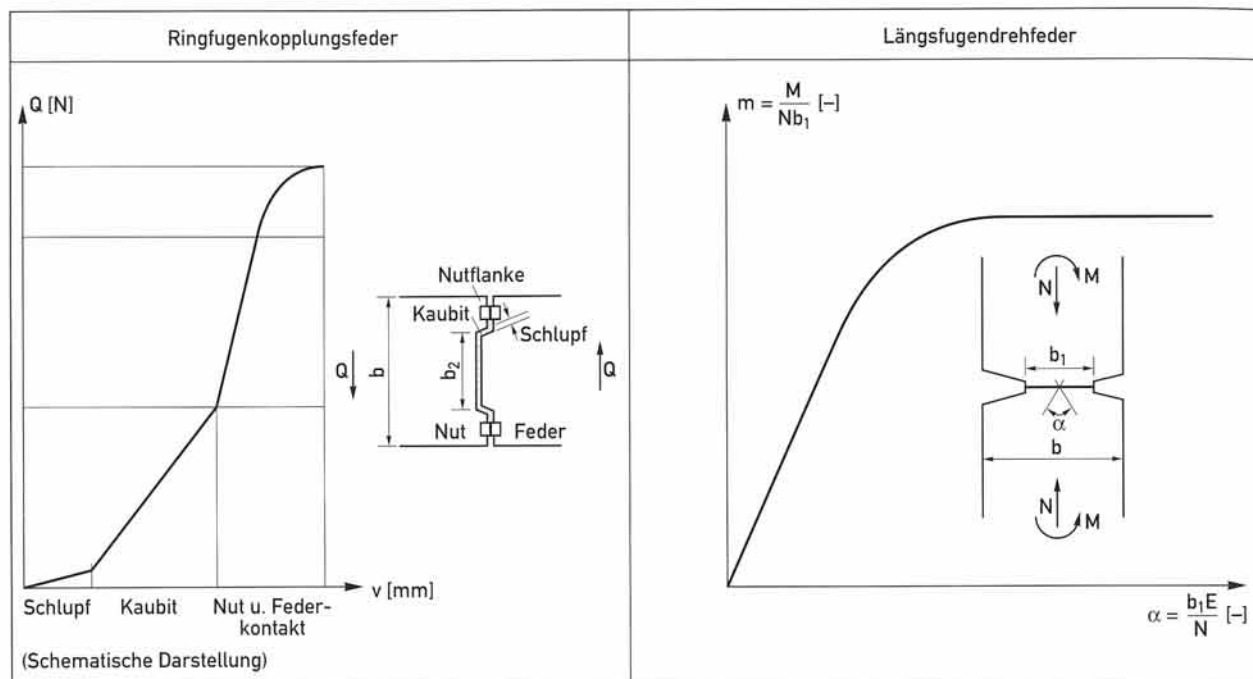


Bild 6. Federcharakteristiken von Längs- und Ringfuge
Fig. 6. Spring characteristics for longitudinal and ring segment joints

fangsverformung (Schlupf) eine Kopplung der benachbarten Ringe und erhöht somit die Ringbiegefestigkeit des Tübbingrings in drei Stufen wie folgt (Bild 6):

- 1) Die Toleranz zwischen Nut und Feder, ca. 6 bis 7 mm, zum Einbau der Ringe ermöglicht einen Schlupf von 3 bis 4 mm, bis der Kaubitstreifen in die Flanken gedrückt wird. Bis zu dieser Verformung (Anspringen der Kopplung) trägt das System als Einzelring.
- 2) Nach dem Anspringen der Koppelfedern an den diskreten Endbereich der Tübbinge können über das Modell der Kaubitfeder im Nut- und Federbereich Querkraftkräfte übertragen werden.
- 3) Nach dem die Kaubitfeder ihren maximalen Dehnweg ($\Delta d = \varepsilon d$) erreicht hat, ca. 1,5 bis 2 mm bei 3 mm Materialdicke, bildet sich im Kaubitstreifen, bedingt durch die Reibung auf der Außenseite des Materials, ein dreidimensionaler Spannungszustand aus, der zu einem quasi hydrostatischen Zustand im Material führt. Dann kommt es zur „harten Kopplung“ zwischen dem Beton der Nut und dem Beton der Feder.

Bei weiterer Verformung des „hart“ gekoppelten Systems neh-

men die Verformungen nur wenig zu, weil das System nun sehr biegesteif ist. Dadurch können bei zunehmender Verformung die Kopplungsquerkraftkräfte sehr stark ansteigen. Dies führt dann sehr schnell zum Versagen der unbewehrten Nut und Feder.

Die Größe der Koppelkräfte steht im direkten Zusammenhang mit der Gesamtverformung der Tunnelröhre. Legt man die Biegelinien zweier nebeneinander liegender Tunnelringe übereinander, so treten die größten Differenzen im Bereich der versetzt liegenden Längsfugen auf (Längsfuge Ring 1 = Tübbingmitte Ring 2) je größer die Gesamtverformung, desto größer die Differenzen.

Zur experimentellen Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit von Nut und Feder werden zur Zeit bei der STUVA in Köln [26] für die bei der 4. Elbröhre Hamburg verwendeten Tübbinge Versuche durchgeführt (Tabelle 5).

Weitere systematische Teilver-suche zur Bestimmung von allgemeinen Bemessungsgrundsätzen bei Variation von Nutflanken und Federverhältnissen, der Bewehrung im Bereich der Nutflanke, der Betonfestigkeit, der Faserarmierung etc. sind notwendig für eine allgemeine Aussage.

Der generelle Ansatz, die Kopplung der versetzt angeordneten Ringe durch Reibungskräfte zu erfassen, die sich nach dem *Coulombschen* Gesetz in der Ringfuge durch die eingeleiteten Längskräfte der Vortriebspresen ergeben, ist aus folgenden Gründen unzulässig:

- a) Die Temperaturdifferenz zwischen Einbau unter Tage (ca. 30°) und fertiger Röhre im Winterbetrieb (– 6°) erzeugt Dehnungen, die die eingepprägten Längskräfte (wirken wie eine Vorspannung) aus dem Bauzustand des Vortriebs aufheben.
- b) Entspannung der Röhre gegenüber dem Verpreßmörtel und dem Erdreich an der Außenseite durch folgende Faktoren:
 - Kriechen der Röhre entlang der Reibungskräfte des Erdreichs
 - Der Verbund zwischen Röhre und Verpreßmörtel ist bei Verwendung von Bürsten-Schildschwanzdichtungen durch permanente Abgabe von umweltverträglichen Fetten auf der Außenhaut der Tübbinge möglicherweise sehr gering.
 - Die aufnehmbaren Verbund- bzw. Zugspannungen im Verpreßmörtel werden meist dort überschritten, wo sich

der volle Verbund herstellen läßt, z. B. bei Verwendung von Neoprenschilddschwanzdichtungen.

Mit dieser Reibungskopplung lassen sich sehr große Querkkräfte aufnehmen. Dieser Ansatz ist jedoch zu unsicher. Die Sicherheit wird schon während der Bauphase meist abgebaut.

Die Formgebung der Längsfuge – ebene oder ballige Kontaktfläche – ergibt sich aus der statischen Untersuchung. Sind die Druckkräfte sowie Drehwinkel in den Längsfugen groß, verhalten sich ballige Fugenausbildungen in bezug auf Betonabplatzungen günstiger. Bei kleineren Druckkräften, wie sie bei Tunnelbauwerken mit geringer Überdeckung auftreten, empfiehlt sich die ebene Fugenausbildung, da Versuchsergebnisse auch bei größeren Verdrehwinkeln ein günstigeres Verhalten bestätigen [27].

In der Längsfuge (Bild 6) wird der von der Rotation abhängige nichtlineare Drehwiderstand angesetzt. Die Einschnürung in der Längsfuge bestimmt den Verdrehwiderstand. Je größer der Verdrehwiderstand ist, desto geringer sollte die Einschnürung im Verhältnis zur Kontaktfläche sein. Bei starker Verdrehung im Bereich der bewehrten Kontaktfläche entsteht ein dreidimensionaler Spannungszustand im Bereich des kurzen eingeschnürten Halses, der sehr hohe Druckspannungen aufnehmen kann. Die Einschnürung dient fer-

ner aus konstruktiven Gründen zur Unterbringung der Dichtungsprofile.

Der Verfasser hält die Kopplung benachbarter Tübbingringe zum Nachweis der statischen Gebrauchsfähigkeit wie auch der Tragfähigkeit durch Ansatz der reinen elastischen Kaubitcharakteristik in Form von Ersatzstäben und Federn ohne Verformungsbegrenzung in den Fugen für eine nicht ausreichende statische Modellierung. In einem solchen Fall bildet das Kaubit ein fiktives Tragwerkelement, das jedoch aufgrund seiner rheologischen Beschaffenheit, der viskosen, elastischen Eigenschaften (in einem Kurzzeitversuch verhält es sich elastisch, fließt jedoch längerfristig) dann übergeht zur harten Kopplung mit möglicher Schädigung der Nutflanken und der damit einhergehenden Wasserdichtigkeit.

Für die statische Berechnung und Dimensionierung wird meist der durch momentengelenkegekoppelte, elastisch gebettete Kreisring zugrunde gelegt. Dabei verwendet man jeweils zwei halbe Kreisinge, die je um einen halben Tübbingstein versetzt sind und durch Federelemente oder kurze Stabelemente verbunden sind. Die nichtlineare Federsteifigkeit oder die fiktive Biegefestigkeit des Stabs, die die Kopplung der um einen halben Stein versetzten benachbarten Ringe simulieren sollen, können aus Bild 6 gewonnen werden.

Die nichtlinearen Federn für die Verdrehsteifigkeit der Längsfuge sowie die nichtlineare Kopplung der benachbarten Ringe verlangen eine Berechnung, die eine Überlagerung von Lastfällen ausschließt. Daher müssen Lastkombinationen berechnet werden.

Bei Tunneln mit geringer Überdeckung unter 1 Ø überwiegt die horizontale Belastung; zudem ist im Firstbereich nur eine geringe bzw. keine Bettung anzusetzen. Die Röhre ovalisiert sich in vertikaler Richtung. Bei einer Überdeckung zwischen 1 Ø und 2 Ø überwiegt die Auflast, und die Röhre ovalisiert in horizontaler Richtung bei umlaufender Bettung.

Im Lastfall Bauzustand sollte das interaktive System Tunnelvortriebsmaschine und Tübbingauskleidung in den einzelnen Betriebsphasen analysiert werden:

- a) Vortrieb und Verpreßmörtelinjektion
- b) Kurvenvortrieb (Einsatz einseitiger Vortriebspresen)
- c) Tübbingverlegung und Stillstand.

2.3 Nachweis der Ortsbruststabilität

2.3.1 Einführung

Die Ortsbruststützung kann auf verschiedene Arten erfolgen und hängt von der Schildart ab (Tabelle 6). Zur Ortsbruststützung mittels Erddruckschild wird auf [10] verwiesen. Die mechanische Stützungsmethode ist am schwierigsten einzustellen. Zudem hängt der An-

Tabelle 6. Arten künstlicher Ortsbruststützung

Table 6. Tunnel face support measurements

Nr.	Maschinenart	Stützungsmethode	Bemerkung
1	mechanische Schilde	– mechanische Verbauplatten	Pressenkraft kann nicht exakt nach Erd- und Wasserdruck gesteuert werden. a) Anpreßdruck für Schneidwerkzeuge b) Steuerung
2	alle zum Abbauraum verschließbaren Schilde	– Druckluft	– konstanter innerer Stützdruck – Gefahr von Ausbläsern im Firstbereich sowie bei stärkerer Permeabilität
3	Hydroschilde	– Suspensionsstützung mit Druckluftpolster	– quasi identischer Verlauf des Stützdrucks zum Außendruck – variable Anpassung an Wasserdruck und Erddruck – Ortsbrust wird abgedichtet mit Suspensionsmembranen

preßdruck auch von den Schneidwerkzeugen, der Vortriebsleistung etc. sowie von der notwendigen Steuerung des Schildes und damit der Verteilung der Kräfte in Ringrichtung ab. Sobald Wasser vorhanden ist, muß der Arbeitsraum im Notfall begehbar sein, zur Hindernisbeseitigung oder für Reparaturmaßnahmen. Daher ist zur Zeit die Druckluftmethode [28] unumgänglich, entweder als

- reine Druckluftstützung oder
- Suspensionsstützung mittels Luftkissen und/oder kombinierter Druckluftmethode für Notfälle.

In jedem Fall ist eine Drucklufteinrichtung notwendig. Der Druckluftbereich sollte sich möglichst nur auf den Bereich des Schildes beschränken, um ein Arbeiten in normaler Atmosphäre hinter der Maschine zu ermöglichen und um die Verlustoberfläche zu minimieren. Die Schleuseneinrichtungen werden in die Vortriebsmaschine verlegt, somit wird nur der Schildbereich unter Über-

druck gesetzt. Der vorhandene Druck entspricht dabei dem zur Fernhaltung des Grundwassers an der Ortsbrust notwendigen Überdruck. Die Vorteile der Druckluft wie auch Flüssigkeitsstützung sind:

- Druck kann auf wechselnde Wasserstände schnell eingestellt werden.
- Grundwasserströme werden nicht beeinflußt.
- keine Primärsetzungen durch Grundwasserabsenkungen
- setzungsmindernde Stützwirkung der Ortsbrust

Die reine Druckluftstützung läßt sich nur in Böden mit geringer Durchlässigkeit sicher und wirtschaftlich einsetzen [28]. Die Einsatzgrenze liegt bei einer Wasserdurchlässigkeit von $< 10^{-4}$ m/s.

Das Risiko der Aufbruch- und Ausbläsergefahr ist sehr hoch, besonders bei nicht im voraus erkannten Störungen mit erhöhter Durchlässigkeit. Daher wendet man die mit einem Druckluftkissen gesteuerte Flüssigkeitsstützung an. Mit der Flüssigkeitsstützung kön-

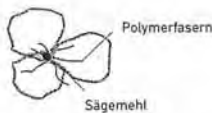
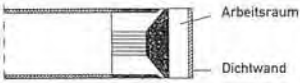
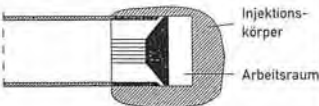
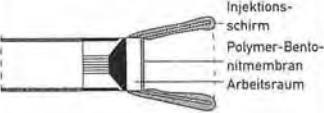
nen auch Böden mit höherer Wasserdurchlässigkeit aufgefahren werden. Somit läßt sich das Einsatzspektrum erweitern.

Wichtig ist es, daß sich bei einer Suspensionsstützung der Filterkuchen [29] schnell als Membrane entwickelt. Bei stark granularen Böden mit relativ großen Poren kann die Bentonitsuspension tief in die Poren fließen, somit bildet sich der Filterkuchen überhaupt nicht oder sehr spät aus. Aus diesen Gründen kann man der Suspension Polymer beimischen. Diese Polymere wirken wie Textilfasern, die die Poren mit einem Gitter von Fasern zusetzen und somit die Durchlässigkeit herabsetzen. Durch zusätzliches Beimischen von Sägemehl und Feinsand (Feinsandanteil kann durch Verringerung der Feststoffseparation hoch gehalten werden), werden dann diese Poren künstlich weiter verringert.

In jedem Fall müssen für den Notfall auch in solchen Böden Maßnahmen getroffen werden, um

Tabelle 7. Maßnahmen zur Stabilisierung der Ortsbrust sowie zur Verringerung der Durchlässigkeit bei Drucklufteinsatz in Notfällen

Table 7. Methods to stabilize the tunnel face and to reduce the permeability

Nr.	Maßnahme	Skizze	Einsatzbereich	Bedingungen
1	Ausbildung eines polymer-verstärkten Bentonit-suspensionskuchens		Sand, kiesiger Sand	polymersierter mit Sägemehl und Sand stabilisierter Bentonit-suspensionskuchen kann Luft für gewisse Zeit sperren
2	Dichtwanderstellung vor dem Schneiderad aus Bentonit-Zement-Sandgemisch oder anderen Bau- und Dichtstoffen		Kiese, die nicht nach 1. zu dichten sind	hydraulisch ausfahrbares Schneiderad
3	Erstellung von Injektionskörpern innerhalb der Tunnelspur zum sicheren Warten des Schneidraums durch Einfräsen und Dichten der Maschine in diesem Block nach außen		zur geplanten systematischen Kontrolle sowie Austausch von Werkzeugen	hydraulisch ausfahrbares Schneiderad
4	Injektionsschirm vor dem Schild zur Erhöhung der Umläufigkeit bzw. bei Wasser-Sandlinsen, etc., bei Versiegelungsmembranen aus polymerverstärkter Bentonitsuspension.		kiesige Sande, Wasser-Sandlinsen, etc., bei der die Maßnahme 1. nicht ausreichend ist oder 2. noch nicht notwendig ist	Injektionsbohrung je nach Bedingung 30 bis 50 m

eine Begehung des Arbeitsraums unter Druckluft zu ermöglichen (Tabelle 7). Für Reparaturarbeiten im Arbeitsraum ist die Methode der zeitweisen „Dichtung“ der Ortsbrust mittels polymerverstärkter Bentonitsuspensionsmembrane sehr kostengünstig und effektiv. Die polymerverstärkte Suspension wird in einer Arbeitspause, z. B. Wochenende, eingepumpt und steht dann 24 bis 28 Stunden unter Druck. Damit bildet sich eine relativ dichte Membrane, hinter der mehrere Stunden gearbeitet werden kann. Wenn die Luftverluste zu hoch werden und ein Austrocknen des Kuchens zu befürchten ist – dies kann an der gemessenen Luftmenge überprüft werden, die nachgepumpt werden muß – wird die Kammer nochmals 1 bis 4 Stunden geflutet, um die Membrane zu reaktivieren. Dann erfolgen die weiteren Arbeiten.

2.3.2 Nachweise zur Berechnung des notwendigen Stützdrucks sowie der Aufbruch- und Ausbläsesicherheit der Ortsbrust

Zur Berechnung kann man die FEM oder sehr vereinfachte bodenmechanische Bruchmodelle [30], [31], [32] heranziehen. Die FEM-Berechnungen verlangen Angaben von jeder Bodenschicht hinsichtlich Luft- bzw. Wasserdurchlässigkeit sowie aller relevanten bodenmechanischen Kennwerte, um räumlich sinnvolle Ergebnisse zu liefern. Für die Ermittlung der Wasser- und Luftdurchlässigkeit des Baugrunds sollten möglichst Feldversuche durchgeführt werden [28]. Meist ist jedoch aufgrund der Variationsbreite der Bodenkennwerte ein vereinfachtes bodenmechanisches Bruchmodell [29], [32] ausreichend. Zur Überprüfung der FEM-Berechnung ist es unentbehrlich, Näherungslösungen anzuwenden.

Die Näherungsrechnung erfolgt in zwei Schritten (Bild 7):

a) Zuerst errechnet man den erforderlichen Stützdruck, um das Gleichgewicht an dem Bodenkeil herzustellen, unter Berücksichtigung des nach der Silotheorie berechneten Vertikaldrucks oberhalb des Erd-

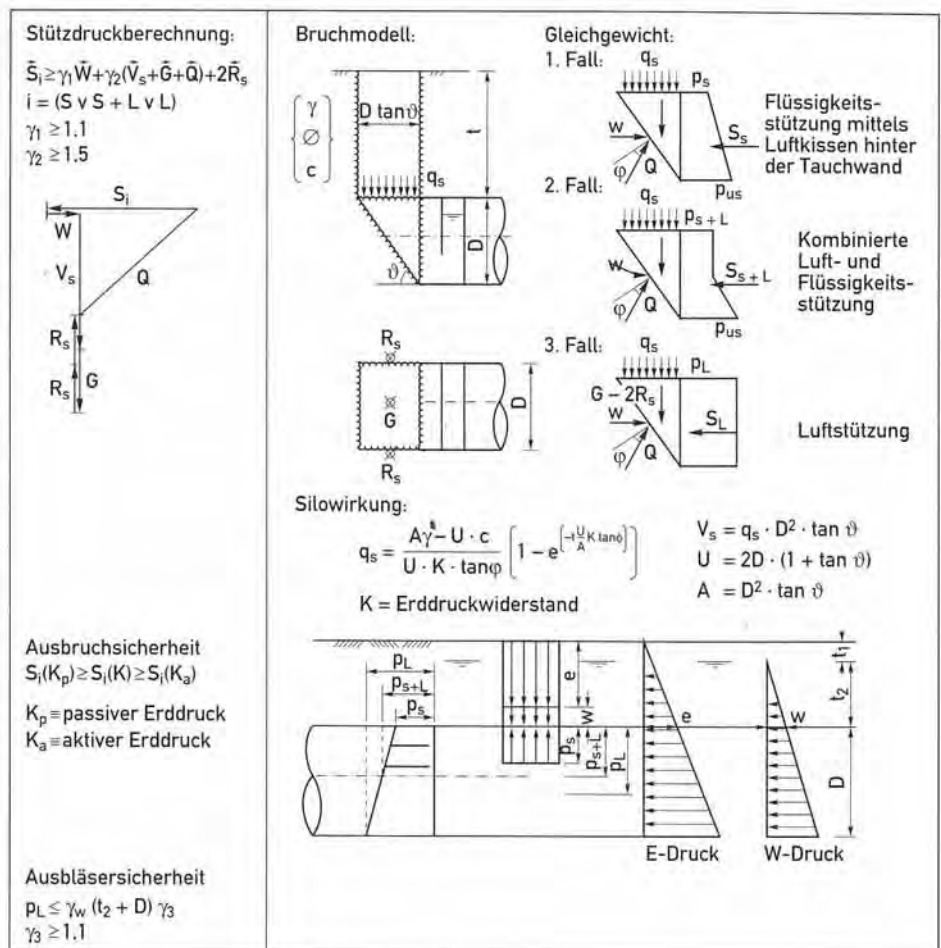


Bild 7. Nachweis zur Sicherung der Ortsbrust mit bodenmechanischem Bruchmodell

Fig. 7. Design of tunnel face stability using a soil mechanical failure model

keils. Mit diesem Ansatz soll das Gleichgewicht unter Beachtung ausreichender Sicherheitsbeiwerte im Boden erhalten bleiben und die Spannungumlagerungen sowie Setzungen klein gehalten werden.

b) Im zweiten Schritt muß die Aufbruch- und Ausbläsesicherheit am First der Maschine geprüft werden. Zu diesem Zweck wird theoretisch von einer undurchlässigen Membrane ausgegangen. Der Nachweis wird durch Vergleich der äußeren Wasser- und Erddruckspannung, die mit Sicherheitsbeiwerten faktorisieren, und dem von innen wirkenden Luft- bzw. Flüssigkeitsdruck geführt. Dieser Spannungsnachweis soll die Ausbläsesicherheit gewährleisten.

Wenn unter Luftdruck gearbeitet wird, ist zu bedenken, daß infolge des Strömens der Luft

durch das Erdrreich die Feinteile aus den Poren gespült werden; zudem erfolgt ein Austrocknen von jenem Teil des Erdrreichs, das sich nicht im Grundwasser befindet. Somit nimmt der Luftverlust und die Gefahr von Ausbläsern stetig zu, in Abhängigkeit von der Zeit an der jeweiligen beaufschlagten Stelle.

3 Konstruktive Ausbildung der Tübbinge

Die Betontübbinge gehören heute zu den Standard-Auskleidungselementen [34] im schildvorgetriebenen Tunnelbau. Die Tübbinge sind so gestaltet, daß im Schutz des Schildes eine wasserdichte Schale montiert werden kann. Die senkrecht zur Ringfuge angeordneten Längsfugen entkoppeln die Versetzungsgenauigkeiten in Längs- und Ringfuge. Nur der Schlußstein wird aus konstruktiven Gründen

konisch ausgeführt, ebenso wie aus Paßgründen die Flanken der benachbarten Tübbinge. Die Tübbingabmessungen ergeben sich aus statischen wie auch aus konstruktiven Gründen. Zum maschinellen Versetzen der Tübbinge benötigt man mindestens vier Teile, da die Teile meist über den Nachläufer herangebracht, sowie gedreht und in die Lage geführt werden müssen. Üblicherweise findet man meist Ringteilungen ab fünf aufwärts. Bei großen Durchmessern, (z. B. 4. Röhre Elbtunnel: Innendurchmesser $\varnothing_i = 12,35$ m) werden bis zu neun Teile verwendet. Die Tübbingeinteilung muß mit der Presseneinteilung abgestimmt sein; aus baubetrieblichen Gründen sollte keine Presse auf einer Fuge stehen.

Die Ringbauzeit [35] steigt jedoch mit der Anzahl der Elemente. Aus statischer Sicht beeinflußt die Anzahl der Elemente und damit die Anzahl der Längsfugen die Steifigkeit des elastisch gebetteten Rings, bedingt durch den reduzierten Drehwiderstand des Momentengelenks. Falls der Ring nicht zu weich wird, kann dadurch eine Reduzierung der Bewehrung erreicht werden. Da die Tübbinge mechanisch bewegt werden (Erektor, Hebezeuge, etc.), verwendet man heute Tübbingelemente bis zu 20 t.

Die Tübbingringbreite beeinflußt die Schild- und Hublänge der Vortriebspresen. Die Tübbingbreite wird ferner beeinflußt durch das baupraktische Platzangebot hinter der Maschine zum Drehen der Elemente in die Versetzposition. Eine größere Tübbingringbreite verringert die Gesamtlänge der Fugen (weniger Ringfugen) und vergrößert die Vortriebslei-

stung durch die geringere Anzahl von Ringbauunterbrechungen. Die Tübbingringbreite hängt somit vom Innendurchmesser des Tunnels sowie von der maschinellen Ausstattung ab und liegt zwischen 1,50 m ($\varnothing_i = 7,00$ m) und 2,00 m ($\varnothing_i = 12,60$ m).

Die Formgebung der Tübbingringfugen ergibt sich aus statischen und baupraktischen Gesichtspunkten (Tabelle 8). Zur Vermeidung von Abplatzungen und zum Ausgleich von Toleranzen werden beim Verlegen Hartholzplättchen oder Kaubitstreifen in die Fuge eingelagert; sie dienen als Kontaktfläche für die Krafteinleitung.

Die Formgebung der Längsfuge wird meist aus statischen Gründen bestimmt (s. Abschn. 2.2). Die Verschraubung der Tübbinge in Längs- und Ringrichtung erfolgt als Montagehilfe zum Anpressen der Dichtprofile [36]. Nur in den Endbereichen des Tunnels ist die Verschraubung notwendig, um ein Aufatmen des Tunnels durch die Rückstellwirkung der Dichtprofile zu verhindern. Heute verwendet man meist kurze Schrägschrauben, die mittels Dübeln gesetzt werden und in einer Dübeltasche stecken. Die Verschraubung in Ringrichtung erfolgt meist in gegenseitiger Richtung, um die Abtriebskräfte in der Fuge durch die paarweise Schraubenkraft per Stein aufzuheben. Die Tübbinge werden in Längsrichtung ebenfalls meist mittels Schrägschrauben vor Kopf von der Maschine aus verschraubt. Diese Montagehilfen können am Ende des Nachläufers wieder ausgebaut und wiederverwendet werden.

Der Fugenspalt außerhalb der Kontaktfläche zwischen den Tübbingenden wird wie folgt bestimmt:

- 1) Sicherstellung der Rotationsfähigkeit der Längsfuge, damit die Ecken bei Verformungen nicht anschlagen
- 2) Die Feuersicherheit der Gummidichtung in den Längs- und Ringfugen fordert möglichst kleine Fugen.
- 3) Verringerung der Gefahr des Abschlagens der Außenecken in den Längs- und Ringfugen beim Montieren, so daß der Stein im Bereich der geschützten Feder oder am Dichtungsprofil anstößt

Der äußere Fugenspalt außerhalb der Kontaktfläche ist zur Erfüllung der genannten Kriterien meist 5 bis 6 mm weit. Am äußeren Rand wird meist ein Schaumstoffstreifen aufgeklebt, um das Eindringen von Feststoffen besonders beim Verpressen des Ringspaltes zu verhindern und die Dichtungsprofile [37] zu schützen, sowie die Rotationsfähigkeit der Fugen zu erhalten. Die Dichtungsprofile müssen so ausgelegt sein, daß sie langfristig genügend Rückstellreserven aufweisen, um Lastverformungen, Temperaturdifferenzen sowie Kriechen des Tunnels in Längsrichtung aufnehmen können.

Die Anforderungen an die Herstellgenauigkeit der Tübbinge sind groß. Die präzisen Einzelformen werden mit Toleranzen von $\pm 0,2$ mm hergestellt. Die genaue Maßkontrolle der fertigen Tübbinge mit Toleranzen im Bereich von $\pm 0,5$ mm gehört zu den Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Das Versetzen der Tübbinge beginnt im allgemeinen mit dem

Tabelle 8. Ringfugenformen
Table 8. Ring joint forms

Nr.	Form	Statische Gesichtspunkte	Baupraktische Gesichtspunkte
1	glatt, ohne Nut und Feder	– überwiegend symmetrische Lasten – große Überdeckung, damit große Normalkräfte und relativ kleine Biegemomente in biegeweicher Schale	– fast keine Abplatzung – lagegenauer Einbau wird erschwert, wenn keine zusätzlichen Zentriersteckbolzen (z. B. aus Kunststoff) verwendet werden
2	mit Nut und Feder	– bei unsymmetrischen Lasten – relativ große Biegemomente in fast biege-steifer Schale durch Kopplung mit benachbarten Ringen bei Versatz der Längsfuge um eine halbe Tübbinglänge	– Abplatzungen beim Einbau – lagegenauer Einbau wird erleichtert (Einbaugeschwindigkeit)

Sohlelement. Zum Versetzen wird ein Erektor verwendet. Dieses mechanisch-hydraulisch getriebene Versetzgerät befindet sich am hinteren Fortsatz der Vortriebsmaschine und ist dort meist starr an den Schildrahmen bzw. Mantel angeschlossen. Die Steuerung erfolgt oft noch manuell, jedoch werden halb- und vollautomatische Einheiten erprobt. Die exakte Steuerbarkeit des Versetzgerätes ist besonders wichtig für den genauen und beschädigungsarmen Ringbau. Dazu ist eine steife mechanische Konstruktion und eine dreidimensionale stufenlose Regulierung des Versetzkopfes in bezug auf Weg und Geschwindigkeit notwendig. Die Zentrierung und das Heben der Tübbinge erfolgt mittels Zentrierkonen und meist dreifachen Saugkissen. Damit ist eine ausreichende Redundanz vorhanden gegen Ausfall einer Saugkammer sowie zum Heben und Versetzen des meist kleineren Schlußsteins.

Zum Aussteifen großer, relativ weicher Ringe verwendet man oft einen Ringreformer, um die geometrische Form bis zum Ansteifen bzw. Erhärten des Verpreßmörtels zu sichern.

4 Ausblick

Die Zielsetzung der weiteren Entwicklung im Tunnelbau mittels Tunnelvortriebsmaschinen wird in der systematischen Risikominimierung und Automatisierung liegen, um die Bauaufgabe terminlich und auch wirtschaftlich optimal durchzuführen. Bei der Risikominimierung steht im Vordergrund:

- die Verbesserung der Baugrundvorerkundung mittels geophysikalischer Methoden
- die Verbesserung der Robustheit der Maschine hinsichtlich Abbau und Förderung von komplexen und heterogenen Böden in einem weitem Spektrum bodenmechanischer Eigenschaften
- die Wartung der Maschinen zu vereinfachen und zeitlich zu verringern durch intelligente Lösungen hinsichtlich Zugänglichkeit und Austauschmöglichkeit von Verschleißteilen, Ab-

bauwerkzeugen etc. unter atmosphärischen Bedingungen

Durch diese Maßnahmen werden folgende wirtschaftliche Vorteile erreicht:

- geringere Ausfallzeiten durch hohe Erkundungswahrscheinlichkeit (Findlinge, Hindernisse, Kieslinsen, etc.)
- geringere Wartungs- und Reparaturzeiten
- Verringerung der gesamten Mannschaftsstunden
- Verringerung der Gefahren für die Mannschaft
- Minimierung der Nachtragskosten durch terminlich pünktlichere Durchführung der Baumaßnahme

Die Anstrengungen zur Automatisierung und Roboterisierung werden sich in folgenden Bereichen verstärken:

- a) Expertensystemsteuerung mit vollautomatischer Korrektur (Pressen, Schneidrad, etc.) während des Vortriebs mittels Soll-Ist-Vergleich der Vermessungsdaten mit der Sollgradienten
- b) automatische Expertensystemsteuerung der Vortriebsgeschwindigkeit, Fördermenge, Bentonitmenge sowie Zugaben, Ortsbruststützung, etc.
- c) automatischer, roboterisierter Transport und Ausbau der Tunnelchale sowie Korrektur möglicher ungewollter Abweichungen mittels Expertensystemen

Alle Expertensysteme sollten dem verantwortlichen Personal interaktiv Lösungen anbieten sowie die computerunterstützte manuelle Steuerung ermöglichen. Expertensysteme können unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht das gesamte Erfahrungspotential einer erfahrenen Tunnelmannschaft integrieren, um allen möglichen Störfällen und Situationen gerecht zu werden.

Alle Entwicklungsmaßnahmen zur Effizienzsteigerung mittels Automatisierung und Roboterisierung müssen unter dem Kosten-Nutzen-Aspekt betrachtet werden.

Die Bauindustrie betreibt aus Kostengründen oft nur projektbezogene Entwicklungen und keine zukunftsorientierte, systematische Forschung. Aus den Erfahrungen

abgewickelter Projekte werden die Probleme eingegrenzt und Lösungen entwickelt. Um jedoch für die anstehenden Großprojekte übergeordnete Synergieeffekte nutzen zu können, müssen – national, möglicherweise international – Bauherrn, Bauindustrie, Maschinenhersteller und die Forschungsinstitute der Hochschulen zusammenwirken. Nur durch eine z. B. nationale, konzertierte Entwicklung, unter Bereitstellung von Forschungsmitteln, lassen sich diese Megaprojekte terminlich pünktlicher und volkswirtschaftlich kostengünstiger abwickeln.

Literatur

Allgemeines

- [1] *Girmscheid, G.*: Schildvorgetriebener Tunnelbau in heterogenem Lockergestein und Sedimentböden, ausgekleidet mittels Stahlbetontübbingen – Teil 1: Geophysikalische Baugrunderkundungsmethoden. Bautechnik 74 (1997), H. 1, S. 1–10.
- [2] *Anheuser, L.*: Specific Problems of very large Tunneling Shields. RETC Proceedings, chapter 30, page 467–477, San Francisco, 1995.

Tunnelvortriebsmaschine

- [3] *Ditz, W., Becker, C.*: Kriterien zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen – Eine Empfehlung des DAUB. Weltneuheiten im Tunnelbau. Heft 36, S. 102–109, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1995.
- [4] *Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L.*: Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1994.
- [5] *Girmscheid, G.*: Neue horizontale Injektionsmethoden. Bautechnik 73 (1996), H. 1, S. 15–22.
- [6] *Maidl, B.*: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus. Verlag Glückauf, Essen, 1984.
- [7] *Anheuser, L.*: Tunnelvortriebsanlagen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust. Bautechnik 64 (1987) H. 11, S. 361–370.
- [8] *Anheuser, L.*: Beispiele zur Bewältigung schwieriger Vortriebsphasen bei Schilden mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust. Tunnel: Chancen und Grenzen moderner Technik. H. 32, S. 43–47, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1988.

- [9] *Anheuser, L.*: Der neue Tunnel unter dem St. Clair River. Tunnel (4), 1995, S. 8–17.
- [10] *Probst, A., Rolle, J., Paul, F.*: Entwicklung eines Erddruckschildes – zugeschnitten auf die bodenmechanischen und hydrologischen Gegebenheiten im Ruhrgebiet. Tunnel: Chancen und Grenzen moderner Technik, H. 32, S. 38–42, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1988.
- [11] *Herrenknecht, M.*: Innovation und zukünftige Entwicklungen beim maschinellen Tunnelvortrieb. Weltneuheiten im Tunnelbau. Heft 36, S. 136–142, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1995.
- [12] *Schwenzfeier, A., Piquerau, G.*: Shield Monitoring Ten Years French Experience. Weltneuheiten im Tunnelbau. H. 36, S. 169–174, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1995.
- [13] *Kaneko, Y., Muraki, H.*: Innovation in Tunnelconstruction by 13,94 m Diameter Shield Machine – Kanda River Regulation Project, Weltneuheiten im Tunnelbau. H. 36, S. 160–168, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1995.
- Bemessung von Tunnelröhren**
- [14] *Duddeck, H.*: Risiko- und Sicherheitsanalyse beim Hohlraum- und Felsbau. Tunnel: Chancen und Grenzen in der Technik. H. 32, S. 106–110, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1987.
- [15] *Bull, A.*: Stresses in the Linings of Shield-driven Tunnels. ASCE Papers, Nov. 1944, S. 1363 ff.
- [16] *Schulze, H. und Duddeck, H.*: Spannungen in schildvorgetriebenen Tunneln. Beton- und Stahlbetonbau 59 (1964), H. 8, S. 169 ff.
- [17] *Windels, R.*: Spannungstheorie zweiter Ordnung für den teilweise gebetteten Kreisring. Die Bautechnik 43 (1966), H. 8, S. 265 ff.
- [18] *Hain, H.*: Zur Stabilität elastisch gebetteter Kreisringe und Kreiszy-linderschalen. Habilitationsschrift TU Hannover. Mitt. d. Inst. f. Statik der TU Hannover, Nr. 12, 1968.
- [19] *Hain, H., Falter, B.*: Stabilität von biegesteifen oder durch Momentengelenke geschwächten und auf der Außenseite elastisch gebetteten Kreisringen unter konstantem Außendruck. Straße – Brücke – Tunnel (1975), H. 4, S. 98–105.
- [20] *Meldner, V.*: Zur Statik der Tunnelauskleidung mit Stahlbetontübbings. Festschrift „100 Jahre Wayss & Freytag“, 1975, S. 231–237.
- [21] Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. Essen: Empfehlungen zur Berechnung von schildvorgetriebenen Tunneln. Neufassung 1973. Die Bautechnik 50 (1973), S. 253 u. f.
- [22] *Ahrens, H., Lindner, E., Lux, K.-H.*: Zur Dimensionierung von Tunnelausbauten nach den „Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980)“. Die Bautechnik 59 (1982), H. 8, S. 260–273 und H. 9, S. 303–311.
- [23] Empfehlungen für den Tunnelausbau in Ort beton bei geschlossener Bauweise im Lockergestein (1986). Bautechnik 62 (1986), H. 10, S. 331–338.
- [24] *Leonhardt, F. und Reimann, H.*: Betongelenke. Der Bauingenieur 41 (1966), H. 2, S. 49–56 und Heft 175 DAfStb.
- [25] Kaubit Chemie Dinklage: Prüfbericht Nr. 85/2/95 – Kompressionsversuche an Kaubitstreifen, Dinklage, 1995.
- [26] *Bielecki, R., Schreyer, J.*: Eignungsprüfungen für den Tübbingausbau der 4. Röhre des Elbtunnels, Hamburg. Tunnel (1996), H. 3, S. 32 ff.
- [27] *Baumann, T.*: Tunnelauskleidung mit Stahlbeton-Tübbingen. Vorträge Betontag 1991, S. 294–310, Hrsg.: Deutscher Beton-Verein, Wiesbaden, Verlag Brühlsche Universitätsdruckerei, Gießen, 1991.
- Ortsbruststützung**
- [28] *Arz, P., Schmidt, H. G., Seitz, J., Semperich, S.*: Grundbau. Sonderdruck aus dem Beton-Kalender 1994, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [29] *Janscscecz, S., Steiner, W.*: Face Support for Large Mix-Shield in Heterogeneous Ground Conditions. Tunneling 94, Institute of Mining and Metallurgy and the British Tunneling Society London, 1994.
- [30] *Gudehus, G.*: Erddruckermittlung (Silodruck). Grundbau Taschenbuch, Teil 1. Hrsg.: *Smolczyk, U.*, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 4. Aufl., 1992.
- [31] DIN 1055, Teil 6, Lastenannahmen für Bauten – Lasten in Silozellen. Beuth Verlag, Berlin, 1987.
- [32] *Rombach, G.*: Differences in Pressure Coefficient between Plane and Cylindrical Conditions. Paper FIP Working Group Silo Design. Karlsruhe, 1987.
- [33] *Eibl, J., Rombach, G.*: Numerical investigations on discharging silos. Editor: *Swoboda, G.*, Proceedings of the sixth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics/Innsbruck. Verlag A. A. Balkema, Rotterdam, 1988.
- Tübbinge**
- [34] *Baldauf, H., Timm, U.*: Betonkonstruktionen im Tiefbau. (Abschnitt: Betonbauweise beim Schildvortrieb, S. 353–394). Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1988.
- [35] *Distelmeier, H.*: Montage von Stahlbetontübbings bei Tunnelbauten mit Schildvortrieb. Beton- und Stahlbetonbau 70 (1975), H. 5, S. 120–125.
- [36] Phoenix AG: Dichtungsprofile im Tunnelbau – Firmenkatalog, Hamburg, 1995.
- [37] *Grabe, W., Glang, S.*: Dichtungsprofile im Tunnelbau – Anforderungen, Prüfungen und praktische Erfahrungen. Erzmetall 44 (1988), H. 12, S. 615–619.

Autor dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, CH-8093 Zürich