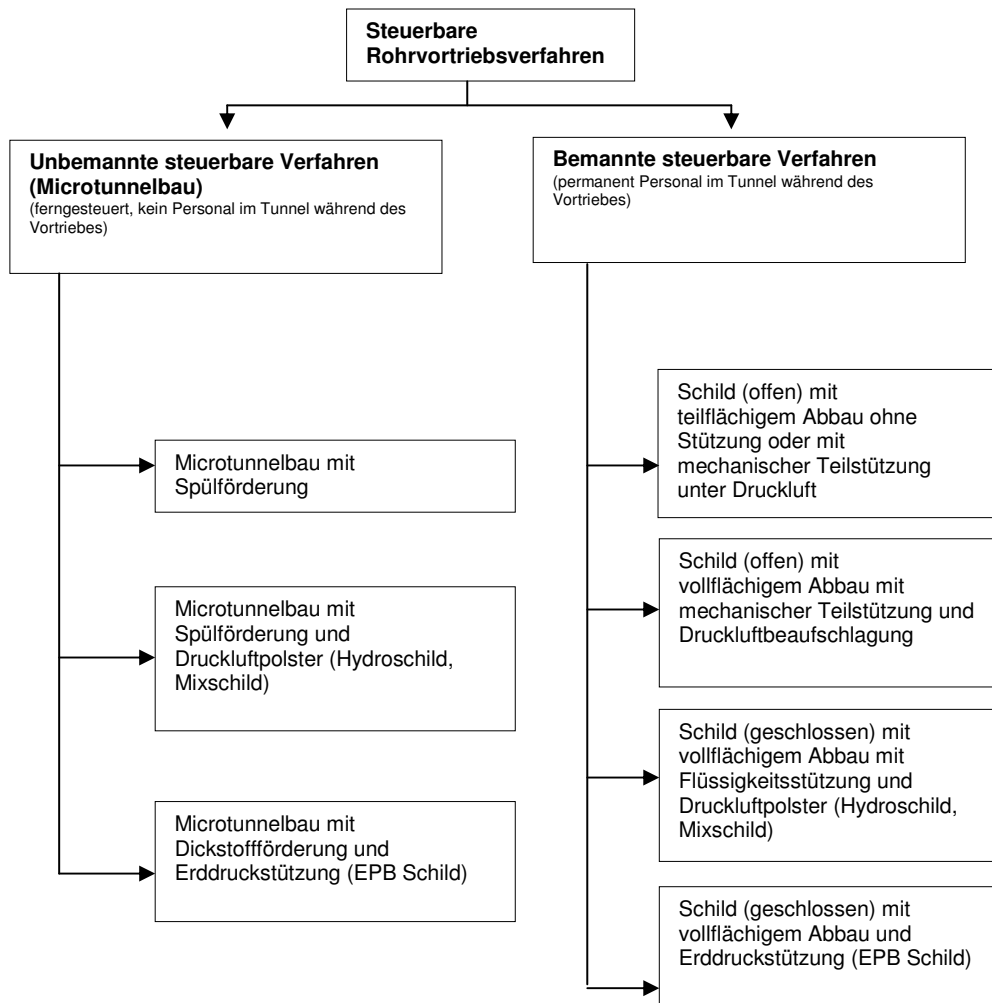


Erfahrungen bei der Durchführung steuerbarer Rohrvortriebe

von

Dipl.-Ing. Rolf Bielecki, Hamburg
Vorsitzender der GSTT

Der grabenlose Neubau z.B. von Leitungen kann ohne Grundwasserabsenkung durch Rohrvortriebsverfahren, Schildvortriebsverfahren mit Tübbingausbau sowie Spülbohrverfahren erfolgen. Grundsätzlich sind folgende **Rohrvortriebsverfahren** unterhalb des Grundwasserspiegels ohne Grundwasserabsenkung geeignet:



Dabei sind nachstehende Kriterien zu beachten:

Kriterium	Slurry (Flüssigkeitsförderung)	EPB (Erddruckschild)	Teilschnitt mit Druckluftbeaufschlagung	Vollschnitt mit Druckluftbeaufschlagung
Varianten der Tunnelvortriebsmaschine (TVM)	a) Slurryschild b) Hydroschild, Mixschild	a) Dickstoffpumpe b) Wagen		
Materialabbau an der Ortsbrust	Vollschnitt mit Bohrkopf	Vollschnitt mit Bohrkopf	Teilschnitt mit Bagger- / Schrämmausleger	Vollschnitt mit Bohrkopf
Schildtyp	Geschlossen	Geschlossen	Offen	Offen
Materialabförderung aus der Abbaukammer	Spülförderkreislauf	Schneckenförderer	Kratz- / Förderband	Förderband
Materialabförderung aus der TVM zur Startgrube	Spülförderkreislauf	a) Dickstoffförderung b) Materialumschlag Wagenförderung c) Band	Materialumschlag Wagenförderung (ggf. Spülförderung), Band	Materialumschlag Wagenförderung
Materialabförderung aus der Startgrube zur Oberfläche	Spülförderkreislauf	a) Dickstoffförderung b) Materialumschlag Kranförderung	Materialumschlag Kranförderung (ggf. Spülförderung)	Materialumschlag Kranförderung
Deponierbarkeit des gefördert Materials	Separationsanlage erforderlich, separiertes Material ggf. wiederverwendbar	In der Regel direkt deponierbar	In der Regel direkt deponierbar	In der Regel direkt deponierbar
Stützung der Ortsbrust (Kompensation des Erddrucks)	Mechanische Teilstützung (Bohrkopf) und a) Spülförderkreislauf b) Spülförderkreislauf m. Druckluftpolster	Mechanische Teilstützung (Bohrkopf) und Erdbreistützung	Nicht möglich bzw. nur mech. Teilstützung möglich	Mechanische Teilstützung durch den Bohrkopf
Stützung der Ortsbrust (Kompensation des Wasserdrucks)	a) Spülförderkreislauf b) Spülförderkreislauf m. Druckluftpolster	Erdbreistützung bzw. Dichtpfropfen im Schneckenförderer a) zusätzliche Sicherheit durch Kolbenpumpe	Druckluftbeaufschlagung der Arbeitskammer oder des gesamten Rohrstranges inkl. TVM	Druckluftbeaufschlagung der Arbeitskammer oder des gesamten Rohrstranges inkl. TVM
Herstellung des Überschchnittes	Bohrkopf	Bohrkopf	Schildschneide und / oder Abbauwerkzeug	Bohrkopf
Installation eines Steinbrechers	Möglich (Konusbrecher)	Nicht möglich bzw. erst hinter der Förderschnecke	Nicht erforderlich bei direktem Zugang zur Ortsbrust	Nicht möglich bzw. hinter dem Bohrkopf nicht sinnvoll
Hindernisbeseitigung	Zugang zur Ortsbrust über Zugangsöffnung, Hindernisbeseitigung durch Abbauwerkzeug und / oder Personal		Direkter Zugang zur Ortsbrust	Direkter Zugang zur Ortsbrust, begrenzt durch Größe der Bohrkopfföffnungen
Haupteinsatzbereich nach Geologie	Nicht bindige und wechselgelagerte Geologien, bindige Geologien mittels Hochdruckdüsen bzw. Niederdruckdüsen b) schwierige Geologien; TVM mit $Da \geq 2m$	Bindige Geologien, Erweiterung des klassischen Einsatzbereiches mittels Bodenconditionierung	Homogene und standfeste Geologien unterhalb des GW – Spiegels	Fels, standfeste Geologien a) oberhalb und b) unterhalb des GW – Spiegels
Einsatzbereich nach Nenndurchmesser (geforderte Mindestlichtmaße beachten!)	a) Unbemannt: $\geq DN250$ bemannt: $\geq DN1000$ b) Unbemannt, bemannt: $\geq DN1000$	a) Unbemannt: $> DN1200$ b) Bemannt: $> DN1200$	$\geq DN1500$ Anforderungen an Personenschleusen und Sicherheitsbestimmungen beachten	$\geq DN1500$, Anforderungen an Personenschleusen und Sicherheitsbestimmungen beachten
Maschinensteuerung	Unbemannt (ferngesteuert) oder bemannt	Unbemannt (ferngesteuert) oder bemannt	Bemannt	Bemannt
Personalbedarf	Gering	Gering	Erhöht	Gering
Gefährdungspotential	Gering	Gering	Erhöht durch direktes Arbeiten an der Ortsbrust, hoch bei geringer Sicherheit gegen Ausbläser, Gasen, kontaminierte Böden, Altlasten	Nur begrenzter Schutz durch den Bohrkopf, hoch bei geringer Sicherheit gegen Ausbläser, Gasen, kontaminierte Böden, Altlasten

Als **Stützflüssigkeit** wird bei den Vortrieben ein Gemisch aus Wasser und Bentonit und/oder Polymeren mit einem γ der Suspension von z.B. 1,05 bis 1,1 t/m³ verwendet, aber auch Bentonit zur Schmierung und damit Reduzierung der Reibungskräfte der Rohrwandflächen. Je mehr Boden eine im Grundwasser liegende Rohrleitung überdeckt, desto größer sind bei sandigen, insbesondere bei feinsandigen Böden die **Wandreibungskräfte** bei Rohrvortrieben. Hier gilt es bereits bei der Ausschreibung zur Abwehr eines "Festfahrens" auf die besonderen Randbedingungen hinzuweisen und bei der Vergabe der Baumaßnahme auf folgende Kriterien besonders zu achten:

- genaue Kenntnis des Baugrundes hinsichtlich Korngrößenverteilung und quellfähiger Tonminerale im bindigen Baugrund,
- die richtige Wahl und Ausführung der Tunnelvortriebsmaschine (TVM),
- eine gezielte Auswahl der zuerst aufzufahrenden Vortriebsstrecke,
- eine ausreichende Dimensionierung und Qualität der mit glatten Außen- und Innenwandungen herzustellenden Vortriebsrohre,
- eine vollautomatische, ständig unter Druck zu haltende Schmierung der Vortriebsrohre an richtiger Stelle des Rohrstranges (z.B. jedes zweite Rohr) und -umfanges,
- eine auf die speziellen örtlichen Boden- und Grundwasserverhältnisse abgestimmte Zusammensetzung der Ringspaltverpressung,
- eine genügende Auslegung der Pressenkräfte und der Zwischenpressstationen,
- eine hoch motivierte, mit Zustimmung des AG eingesetzte Vortriebsmannschaft,
- eine auszuschreibende Qualitätssicherung mit Qualitätsmanagement.

Maßnahmen zur Verhinderung des Kontaktes Rohr / Boden hinsichtlich Minimierung des Reibungswiderstandes sind:

- Vollständige Verfüllung des Ringraumes mit Bentonitsuspension ab Verlassen der Rohre aus dem Startschacht über die gesamte Vortriebsstrecke,
- kontinuierlicher Ersatz verlustig gegangener Bentonitsuspension,
- Aufrechterhaltung des Suspensionsdruckes.

Die Summe der **Vortriebskräfte** setzt sich zusammen aus:

- dem Eindringwiderstand des Bohrkopfes bzw. des Schneidenschuhes an der Ortsbrust (Erfahrungswert je nach Geologie 200 bis 400 KN - 20 bis 40 t – pro lfdm. Schneidenumfang),
- dem Stützdruck an der Ortsbrust,
- der Mantelreibung der TVM und des Rohrstranges (normale Kurven erhöhen die erforderlichen Vorpreßkräfte um ca. 20% - ohne Schmierung betragen die Reibungskräfte 20 bis 40 KN -2 bis 4 t - pro m² Rohrwandfläche, mit Schmierung 2,2 bis 10 KN -0,22 bis 1 t - pro m² Rohrwandfläche,
- dem Widerstand beim Schließen von Zwischenpreßstationen (die erste Zwischenpreßstation sollte wegen des Schneidenwiderstandes einen kurzen Abstand (z.B. 30 m) hinter der TVM haben).

Außerdem sind aus unterschiedlichen Fugenspaltweiten und analogen Verwinklungen der Rohrachsen Zwängungskräfte den aufzubringenden Vortriebskräften hinzuzuzählen.

Die **Rohrlängen** von z.B. Stahlbetonvortriebsrohren variieren von rd. 2,00 m bis 4,00 m, max. 5,00 m. Kurze Rohre lassen sich besser steuern und sind daher für engere Kurven geeignet. Als Faustformel für die **Wanddicke** von Stahlbetonrohren gilt 12 bis 14% von DN oder 10% von DN + 5 cm. Die zentrischen Druckspannungen auf die **Holzringzwischenlagen** sollten mit Rücksicht auf die elastischen Eigenschaften des Holzes mit etwa 7 N/mm² (70 kg/cm²) begrenzt werden. Ein Tübbingausbau wird notwendig, wenn für den Schwertransport auf der Straße die Vorpressrohre folgende Grenzwerte überschreiten: Außendurchmesser 4,70 m, Baulänge 3,00 m, Einzelstückgewicht 56 t.

Freigefällekanäle, welche z.B. in der Abwasserableitung zum Einsatz kommen, erfordern aus Gründen eines wirtschaftlichen Betriebes und einer möglichst langen Nutzungsdauer des Bauwerkes bei der Bauausführung die Gewährleistung der vorgegebenen **Trasse und Gradienten** innerhalb enger, vom Auftraggeber (AG), zu definierender Herstellungstoleranzen. Diese sind insbesondere abhängig von den örtlichen Verhältnissen und Vorbelastungen des Baugrundes, den zum Einsatz kommenden Bauverfahren, Maschinen und Bauteilen, den Grundlagen der Vermessung und den Messverfahren sowie der Schulung und Weiterbildung des Personals, dem Risikomanagement und den Qualitätskontrollen. Rohrvortriebe von DN < 1000 können mit Auffahrlängen von 300 m und Rohrvortriebe mit DN > 1000 mit Auffahrlängen von > 300 m (bei größeren bemannten Rohrvortrieben bis zu 2.000 m und mehr) von einem Schacht aus - auch in Kurvenfahrten mit $R = 300$ bis $400 \times D_a$ in Meter - hergestellt werden. Dabei können Auffahrgenauigkeiten von ± 5 cm Abweichung von der Soll-Lage gefordert werden (bei längeren Vortrieben ± 5 bis 8 cm). 70 m betrug am Ende einer Rohrvorpressung DN 2400 der kleinste Radius einer Kurve, die mit angekeilten Rohrfugen gefahren wurde. Aus dem Startschacht sollten zunächst die ersten 50 m in Geradeausfahrt vorgetrieben werden.

Der Personaleinsatz bei Rohrvortrieben unter **Druckluftbeaufschlagung** wird unter anderem durch eine minimale lichte Schleusenhöhe von 1,60 m und eine minimale lichte Höhe der Arbeitskammer von 1,80 m geregelt. Insofern müssen Vortriebsrohre unter Einsatz von Druckluft mindestens einen DN von 1.500 mm haben.

Zur **Vorauserkundung des Baugrundes** aus der Tunnelvortriebsmaschine wurde in letzter Zeit erstmalig im größeren Umfang ein vortriebsbegleitendes, schneidradintegriertes Reflexionsverfahren eingesetzt. Dieses basiert auf der akustischen (seismischen) Reflexionsmessung, die von der Echolotung her bekannt ist: Akustische Signale werden von Sendern in die Bodenformation abgestrahlt und breiten sich dort mit der Kompressionswellengeschwindigkeit des Lockergesteins aus. Akustische Empfänger, in einem gewissen Abstand zu den Sendern montiert, nehmen sowohl die direkt von den Sendern zu den Empfängern laufenden Signale auf, als auch die Echosignale (Diffraktionen bzw. Reflexionen) von den Diskontinuitäten im Vorfeld des Schneidrades. Dem Betrachter der grafisch ausgearbeiteten Daten präsentieren sich auf einem Bildschirm etwaige Störkörper und geologische Formationswechsel aufgrund ihrer charakteristischen Reflexionseigenschaften in farbiger Abgrenzung zur Umgebung und in korrekt räumlicher Anordnung, die in metrischen Angaben abgefragt werden konnten. Die gemessene akustische Geschwindigkeit des Lockergesteins vor dem Schneidrad kann auch als Maß für die Festigkeit des Bodens genommen werden.

Um eine klare Trennung zwischen Auftragnehmer- und Auftraggeberrisiko zu erreichen, sollte jeder Bieter mit seinem Angebot für den unterirdischen Vortrieb eine **Störfallanalyse** abgeben. Dabei hat er alle vorhersehbaren Störfälle, die bei der von ihm gewählten Bauausführung auftreten könnten, zu erläutern und eingehend darzulegen, wie er diesen Störfällen begegnen will und zu welchen Preisen. Angebotene, nicht beauftragte Störfälle bleiben dabei im Risiko des AG. Dagegen von Bieter nicht angebotene vorhersehbare Störfälle im Risiko des AN; unvorhersehbare Störfälle sind zu versichern.

Die ungefähre Breite des für Hebungen bzw. Setzungen zu überwachenden Bereiches des Vortriebes ist nach den örtlichen Gegebenheiten und Bodenverhältnissen festzulegen; sie kann in erster Annäherung wie folgt berechnet werden:

$$B_{\text{Ges}} = D_a + 2/3 \times (GOK - RS)$$

Die Achse des **Einflussbereiches** liegt dabei auf der Vortriebsachse.

Es bedeuten:

B_{Ges} = Gesamtbreite des Einflussbereiches an der Geländeoberfläche in m

D_a = Rohraußendurchmesser in m

GOK = Höhe Geländeoberkante in m über NN

RS = Höhe Rohrsohle in m über NN.

Als **Verrollung** bezeichnet man das Drehen einer TVM und ggf. der beteiligten Vortriebsrohre um die Maschinenachse (Vortriebsachse). Verrollung resultiert primär aus der Übertragung des Antriebsdrehmomentes vom Bohrkopf (Vollschnittmaschine) über den Schildmantel und die beteiligten Vortriebsrohre in den Baugrund. Übersteigt die Ersatzkraft aus dem Bohrkopfdrehmoment die Reibungskraft zwischen Vortriebsmaschine / Vortriebsrohre und Baugrund, verrollt die Maschine. Dieser Vorgang ist insofern kritisch, da mit einsetzender Bewegung eine Änderung von Haftreibung auf „Rollreibung“ eintritt, was den Vorgang des Verrollens grundsätzlich begünstigt, da der Anteil der Reibungskraft reduziert wird. Die Dichtungen der TVM bzw. der Vortriebsrohre werden dabei zusätzlichen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Um der auftretenden Verrollung entgegenzuwirken, sind TVM's immer mit zwei Antriebsdrehrichtungen auszustatten. Die aktuelle Verrollung ist dem Maschinenfahrer auf 0,1 Grad anzuzeigen. Während des Betriebes sollte die Drehrichtung nicht regelmäßig, sondern erst beim Erreichen einer je nach Maschinen- und Verfahrenstechnik (z.B. Navigationssystem) festzulegenden Verrollung gewechselt werden, häufige Drehrichtungswechsel begünstigen die Verrollung. Sämtliche Maschinenrohre (inklusive Schildgelenk) und ggf. das erste bzw. die ersten Vortriebsrohr(e) sind zur Erhöhung des übertragbaren Drehmomentes miteinander mechanisch zu verriegeln. Dabei ist zu beachten, dass ein Bewegungsausgleich in Vortriebsrichtung (z.B. Kurvenfahrt) gewährleistet ist.

TVM's sind zusätzlich mit Einrichtungen zur Absicherung gegen übermäßiges Verrollen auszustatten. Die Einrichtung hat zur Aufgabe, beim Erreichen einer bestimmten Verrollung ein Signal zur Warnung am Steuerstand oder, wenn das hydraulische Antriebsaggregat in der TVM verbaut ist, zur Abschaltung des Bohrkopftriebs bereitzustellen. Bei der Projektierung bzw. Konstruktion der TVM ist darauf zu achten, dass der Schwerpunkt der gesamten Anlage möglichst nahe der Mittelachse liegt, um den Anteil an statischer Verrollung zu minimieren. Statisches Verrollen kann weiterhin auftreten, wenn der Hauptpressenrahmen in der Startbaugrube nicht exakt positioniert ist; gleiches gilt für nicht exakt positionierte Hydraulikzylinder in Zwischenpressstationen.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Verrollungsverhalten der TVM hat die Abstufung des Überschnittes ausgehend vom Bohrkopf über die Maschinenrohre bis zum ersten Vortriebsrohr (zusätzlich Rohrschmierung beachten). Problematisch wirkt sich weiterhin ein Mehrabbau von Boden gegenüber der theoretischen Abbaumenge aus. Der fehlende bzw. aufgelockerte Boden reduziert das übertragbare Drehmoment und begünstigt somit ein Verrollen. Aus diesem Grund ist ein kontinuierlicher Vergleich der abgebauten mit den theoretischen Bodenmengen durchzuführen (z.B. bei Spülförderanlagen an der Separationsanlage). Der Abbau von Findlingen oder Steinnestern erfordert diesbezüglich besondere Beachtung.

Zwischenpressstationen sind in Bezug auf eine Verrollungssicherung gesondert auszuführen, z.B. mit planparallelem Pressenangriff und einer hierfür ausreichend dimensionierten Trag- bzw. Stützkonstruktion für die Zylinder.