

1 Grundlagen

1.1 Grundlagen und technische Ausführung von Bentonitschmiersystemen¹⁾

Grundsätzlich werden zwei Arten von Bentonitschmiersystemen unterschieden:

- Intervallgesteuerte Bentonitschmiersysteme, bei denen die Ansteuerung der Ventile in einer definierten Reihenfolge erfolgt.
- Volumenkontrollierte Bentonitschmiersysteme (seit 2014), bei denen die Ansteuerung der Ventile nach festgelegtem Bedarf entlang der Trasse erfolgt; alternativ ist auch hier eine Ansteuerung der Ventile in einer definierten Reihenfolge möglich.

Beide Systeme existieren als in den Steuercontainer integrierte oder als „Stand-Alone“-Version.

Allgemein setzt sich ein Schmiersystem aus den in Bild 1-1 gezeigten Teilen zusammen. Die erste Station im Schmierkreislauf ist der Mischbehälter, in dem die Bentonitsuspension dispergiert wird, bevor sie in den Vorratsbehälter gepumpt wird. Die Bentonitpumpe versorgt die einzelnen Schmierstationen in der Vortriebsmaschine und im Rohrstrang.

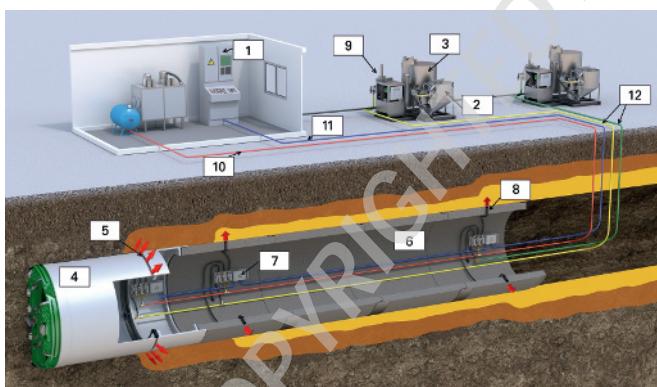


Bild 1-1 Prinzipieller Aufbau der Bentonitschmierung im Standardsystem Herrenknecht
 1: Steuerungseinheit;
 2: Mischbehälter;
 3: Vorratsbehälter;
 4: Vortriebsmaschine;
 5: Schmierring;
 6: Vortriebsrohr;
 7: Schmierstation;
 8: Injektionsstutzen;
 9: Bentonitpumpe;
 10: Druckluftzuführung;
 11: Steuerkabel;
 12: Bentonitzufuhr

Bei einem intervallgesteuerten Bentonitschmiersystem werden die Schmierzyklen je nach Strategie des Maschinenfahrers eingesetzt. Eine Schmierstation (siehe Bild 1-2) besteht aus mehreren Injektionsstutzen. Der Schmierzyklus fährt diese nacheinander an (z.B. Ventil 1 – Ventil 2 – Ventil 3); somit ist zu jedem Zeitpunkt immer nur ein Ventil bzw. ein Injektionsstutzen geöffnet. Anschließend wird die nächste Schmierstation angesteuert.

Generell unterscheidet man zwischen dem Normalzyklus und dem Extrazyklus. Der Normalzyklus dient der Schmierung des gesamten Vortriebs. Der Extrazyklus erlaubt

¹⁾ Alle nachfolgenden Aussagen, Beschreibungen und Bilder beziehen sich auf die technischen Systeme der Herrenknecht AG zur automatischen Bentonitschmierung.

demgegenüber eine zusätzliche Steuerung von separat ausgewählten Schmierstationen mithilfe der zugehörigen Ventile bzw. Injektionsstutzen. Über den Extrazyklus kann ein größeres Schmiermittelvolumen an der Maschine ausgebracht werden. Zusätzlich gibt jede Schmierstation eine Rückmeldung an die Steuereinheit, wodurch überprüft werden kann, ob die einzelne Schmierstation auch tatsächlich angeschlossen ist.

Bei einem volumenkontrollierten System wird die Vortriebstrasse in Abschnitte von je 1 m Länge unterteilt. Jedem dieser Abschnitte wird eine dem Baugrund gemäß gewählte Soll-Verpressmenge an Bentonit zugeordnet. Das Schmiersystem sorgt automatisch dafür, dass die angeschlossenen Schmierstationen diese Sollwerte an den entsprechenden Vortriebsabschnitten auffüllen. Die einzelnen Komponenten des Schmiersystems sind bei beiden Systemen grundsätzlich gleich; sie sollen im Folgenden eingehender beschrieben werden.

1.1.1 Steuerungseinheit

Die Steuereinheit wird im Container oder als „Stand-Alone“-Einheit neben dem Startschacht aufgestellt. Von hier aus steuert der Maschinenführer den Vortrieb und den Schmierzyklus. Prinzipiell kann der Maschinenführer jedes Ventil im gesamten Vortrieb einzeln anwählen. Der (maximale) Pumpendruck wird direkt an der Pumpe eingestellt.

Im intervallgesteuerten Betrieb erlaubt die Steuereinheit zwei unterschiedliche Vorwahlmöglichkeiten für die Ventileinstellung. Die erste Möglichkeit wird als „Vorwahl Menge“ bezeichnet. Hierbei wird eine definierte Bentonitmengen vorgegeben, die durch jedes Ventil geleitet werden soll. Sobald die angegebene Menge erreicht ist, schließt das Ventil und das nächste Ventil wird angesteuert. Die Öffnungszeit des Ventils ergibt sich in diesem Fall aus der Durchflussgeschwindigkeit der Bentonitsuspension, daher wird für diese Steuerungsvariante eine Durchfluss- und Druckmesseinheit benötigt, die direkt an der Steuereinheit angeschlossen wird. Sie hat die Aufgabe, die Durchflussmenge zu erfassen und an die Steuerungseinheit weiterzugeben. Zu diesem Zweck wird häufig ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) eingesetzt. Er beruht darauf, dass das Messgut durch ein Magnetfeld hindurch strömt und dabei eine Spannung induziert, die mittels zweier Elektroden erfasst wird.

Die zweite Möglichkeit der Ventilansteuerung wird als „Vorwahl Zeit“ bezeichnet. Sie erlaubt es, die Ventile für einen definierten Zeitraum zu öffnen. Dabei ist es unerheblich, welches Bentonitvolumen in dieser Zeit durch das Ventil fließt; dies kann je nach Ventil unterschiedlich sein.

Eine weitere wichtige Einstellung, die der Maschinenführer von der Steuerungseinheit aus vornimmt, ist die Auswahl von Normal- oder Extrazyklus.

1.1.2 Mischbehälter

Der Mischbehälter kann sowohl separat als auch direkt neben der Steuereinheit aufgestellt werden. Er dient zum Anmischen der Bentonitsuspension (Schmiermittel). Seine Größe hängt von der im Vortriebsverlauf benötigten Menge an Bentonitsuspension ab. Der Mischer ist dem Mischbehälter angeschlossen oder direkt in ihn integriert. Der

Mischer besteht meist aus einem Scherflügelrad, rotierenden Scherarmen oder einem Venturisystem.

Der Mischbehälter kann zur besseren Steuerung und Überwachung durch elektronische Durchflussmessgeräte und/oder Module zur elektronischen Datenaufzeichnung ergänzt werden.

1.1.3 Vorratsbehälter

Der Vorratsbehälter ähnelt dem Mischbehälter, verfügt häufig über ein Rührwerk oder Umwälztechnik und dient zur Zwischenlagerung des Bentonits. Der Vorratsbehälter sorgt dafür, dass durch Einhalten einer vorgegebenen Quellzeit ein konstanter Bentonitfluss und eine konstante Bentonitqualität gewährleistet werden können.

1.1.4 Hauptpressstation

Die Hauptpressstation ist eine hydraulische Vorschubeinrichtung zur Erzeugung der erforderlichen Vortriebskraft; sie wird im Startschacht installiert. Die Hauptpressstation besteht aus dem Pressenrahmen, dem Vortriebszylinder, einem Druckring und dem Pressenwiderlager.

1.1.5 Vortriebsmaschine

Die Vortriebsmaschine besteht aus Bohr- und Steuerkopf sowie aus Nachläufern bzw. Maschinenrohren.

1.1.6 Schmierring

Der Schmierring liegt am Ende der Maschine oder im Bereich zwischen zwei Maschinenrohren. Hier wird der Bentonit unabhängig von der Anzahl der Zuführungsleitungen über den gesamten Umfang der Maschine verteilt.

1.1.7 Zwischenpressstation (Dehnerstation)

Üblicherweise wird in einen Rohrvortrieb etwa alle 80–90 m eine Zwischenpressstation (Dehner) eingebaut. Dabei wird zwischen dem Vorlauf- und dem Nachlaufrohr des Dehnern noch ein in ein Stahlmantelrohr integrierter Vorschubzylinder platziert. Durch den Einsatz von Dehnern wird der Vortrieb in mehrere Abschnitte unterteilt. Die gesamte Vortriebskraft der Hauptpressstation wird somit auf die einzelnen Vortriebsabschnitte verteilt und in ihrer Summe reduziert.

1.1.8 Vortriebsrohr

Das Vortriebsrohr ist ein vorgefertigtes Rohr mit einer druckkraftschlüssigen, zugkraftschlüssigen oder druck- und zugkraftschlüssigen (längskraftschlüssigen) beweglichen oder starren Rohrverbindung innerhalb der Wanddicke und einer glatten, ebenen Außenkontur. Es wird in den Baugrund eingepresst, eingeschoben oder eingezogen.

1.1.9 Schmierstation

Die erste Schmierstation sollte möglichst dicht hinter dem Nachläufer der Vortriebsmaschine eingebaut werden. In der Regel wird jedes dritte oder vierte Rohr als Bentonitrohr verwendet. Bei einer durchschnittlichen Rohrlänge von 3 m ist somit alle 9–12 m eine Bentonitstation installiert.

Gesteuert werden die Schmierstationen von der Steuereinheit. Die Schmierstationen bestehen aus einem Ventilblock mit drei vorgesteuerten Kugelventilen. Angeschlossen ist die Schmierstation über eine 28L-, 2"- oder 3"-Bentonit-Versorgungsleitung. Die Injektionsstutzen sind über einen 22L-Schlauch mit der Schmierstelle verbunden. Über Druckluft wird der Hauptkolben der Ventile geöffnet, sodass die Bentonitsuspension zu der vorgewählten Schmierstelle strömen kann ist (Bild 1-2).

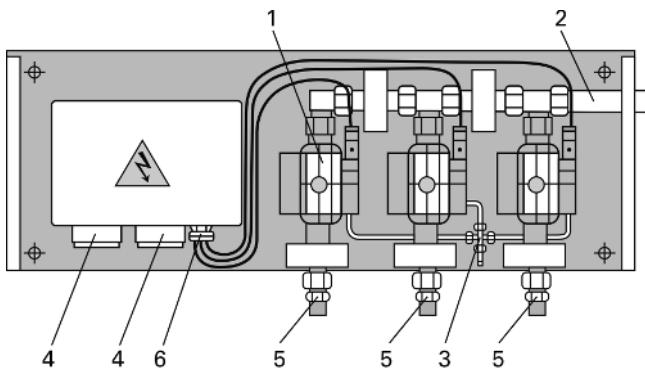


Bild 1-2 Schmierstation
System Herrenknecht
(Quelle: Herrenknecht AG).
1: druckluftgesteuertes
Ventil;
2: Anschluss Tunnelleitung;
3: Anschluss Druckluftleitung;
4: Elektroanschluss;
5: Abgang zu Bentoniddüsen;
6: Steuerkabel Bentonitventil

1.1.10 Injektionsstutzen

An jeder Schmierstation befinden sich drei Injektionsstutzen, die einzeln über Ventile angesteuert werden. Die Injektionsstutzen sollten möglichst gleichmäßig über den Rohrrumfang verteilt werden. Sie befinden sich i.d.R. in den Positionen 12, 4 und 8 Uhr (Bild 1-3).

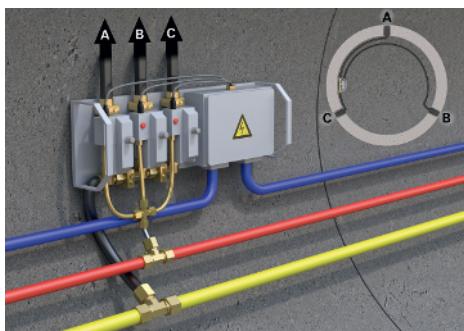


Bild 1-3 Schmierstation im Rohrstrang und
Verteilung der Injektionsstutzen über den
Querschnitt (Quelle: Herrenknecht AG)

1.1.11 Bentonitpumpe

Die Bentonitpumpe dient zur Regulierung und Aufrechterhaltung des Drucks und des Durchflusses. Damit in der Rohrleitung ein möglichst konstanter Druck herrscht, müssen Druckverluste minimiert werden. Sie hängen von der Art und Länge der Leitung sowie der Viskosität des Bentonits ab. Es kommen unterschiedliche Pumpen zum Einsatz, z.B. Kolbenpumpen oder Schneckenpumpen.

1.1.12 Druckluftzuführung

Die Druckluftzuführung hat einen Innendurchmesser von 13 mm und einen Außen-durchmesser von 19 mm. Die Schläuche und Kupplungen können einem Druck von bis zu 10 bar standhalten. Die Druckluftzuführung versorgt die schaltbaren Ventile mit der notwendigen Energie. Zu jeder Bentonitschmierstation führt eine Abzweigung, die über ein T-Stück (Bild 1-4) angeschlossen ist.



Bild 1-4 Abzweigung von der Luftzuführungsleitung in die einzelnen Schmierstationen (Quelle: Herrenknecht AG)

1.1.13 Steuerkabel

Die Steuerkabel verbinden die Steuereinheit mit den einzelnen Schmierstationen. Pro Steuerkabelstrang können bis zu 80 Stationen angesteuert werden

1.1.14 Bentonit- oder Zuführungsleitung

Die Bentonit- bzw. Zuführungsleitung verbindet die Bentonitpumpe mit sämtlichen Bentonitstationen und führt bis zur Maschine. An den einzelnen Schmierstationen gibt es T-Abzweigungen, die über die Schmierstation zu den einzelnen Ventilen und Injektionsstutzen führen. Die Bentonitleitung besteht meist aus 28L-Schlauchleitungen oder 2"-, 3"- oder 5"-Stahlleitungen.

Die Schmierstationen werden über eine 28L-Leitung mit den Abzweigungen (T-Stücken) von der Bentonitleitung verbunden. Zu den einzelnen Injektionsstutzen ist ein 22 L-Schlauch verlegt.

1.2 Ringspaltschmierung beim Rohrvortrieb

Das Schmiermittel wird beim Rohrvortrieb in den Ringspalt injiziert, um die Reibung zwischen dem Vortriebsrohr bzw. Rohrstrang und dem umgebenden Baugrund zu reduzieren. Diese Reibung wird als Mantelreibung bezeichnet; sie kann durch verschiedene Maßnahmen vermindert werden [81]:

- Die radiale Belastung der äußeren Rohrmantelfläche kann durch Aufrechterhaltung des Ringspalts reduziert werden. Dabei wird der anstehende Boden gestützt, sodass der umgebende Baugrund auf einer möglichst geringen Fläche am Vortriebsrohr anliegt.
- Der Reibungsbeiwert μ zwischen Vortriebsrohr und Baugrund kann durch Aufbau einer Gleitmittelschicht reduziert werden.

Die Wahl des Schmiermittels wird durch die Eigenschaften des Baugrunds, d.h. seine Geologie, Hydrogeologie und evtl. vorhandene Kontaminationen, bestimmt. Nachfolgend werden die grundlegenden Eigenschaften von Locker- und Festgesteinen zusammengefasst. Für die Schmierung sind die Parameter Standfestigkeit, Durchlässigkeit und Größe des Porenraums im Lockergestein bzw. Größe der Kluftöffnungsweite im Festgestein von Bedeutung. Die rheologischen Eigenschaften der als Schmiermittel eingesetzten Bentonitsuspension – Fließgrenze, Viskosität und Gelstärke – müssen an diese Randbedingungen angepasst werden. Die Größe der Bentonitpartikel in der Suspension ist eine physikalische Eigenschaft, die die Entstehung des Stützmechanismus im Boden entscheidend bestimmt.

Grundsätzlich hat die Bentonitsuspension im Ringspalt drei Funktionen zu erfüllen:

- Stützen des aufgefahrenen Hohlraums
- Schmieren des Rohrstrangs
- Tragen von Gesteinspartikeln innerhalb der Suspension

Je nach Baugrund treten diese Grundfunktionen kombiniert auf, worauf im Folgenden ausführlich eingegangen wird. Vorab ist es sinnvoll, die Besonderheiten und Randbedingungen der Bentonitschmierung beim Rohrvortrieb festzuhalten:

- Das Schmiermittel wird einmalig in den Ringspalt verpresst und verbleibt dort dauerhaft. Es ist sehr aufwändig bis teilweise unmöglich, die Suspension nachträglich zu verändern oder anzupassen.
- Im Ringspalt treten räumlich stark begrenzte Fließvorgänge auf.
- Da der Vortriebsprozess in der Regel einige Wochen andauert und der Rohrstrang über diesen Zeitraum immer wieder in Bewegung ist, spielen Zeiteffekte hinsichtlich der Veränderlichkeit der Suspensionskonsistenz und möglicherweise der Fließvorgänge in den anstehenden Baugrund eine Rolle.
- Die geologischen Randbedingungen entlang der Vortriebsstrecke sind in aller Regel nicht homogen

1.3 Vorbemerkungen zum Baugrund

In den derzeit gültigen Normen und Regelwerken werden Bodenklassifikationen mit dem Ziel vorgenommen, eine Gruppeneinteilung für Böden aufgrund festgelegter Merkmale und Kriterien für bautechnische Zwecke zu finden. Eine Bodengruppe umfasst somit Bodenarten mit annähernd gleichem stofflichen Aufbau und ähnlichen bautechnischen Eigenschaften, d.h. die Bodenklassifikation bietet rein stoffliche Informationen.

Für die Ermittlung der Eigenschaften von Locker- und Festgestein für den Rohrvortrieb sind neben den klassifizierenden Labor- und Feldversuchen – z.B. Korngrößenverteilung, Plastizitätsgrenzen, Wassergehalt und Dichte – insbesondere Versuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit, der Durchlässigkeit und der Steifigkeit, sowie bei quellfähigen Baugründen auch des Quelldruckverhaltens von Bedeutung. Die Versuchsdurchführung ist in den bodenmechanischen Regelwerken DIN 18121–18137 geregelt. DIN 1054 [16] und EN ISO 14688 [25] (ersetzt seit 2002 DIN 4022) geben einen Einblick in die Beschreibung von Festgestein; eine detaillierte Einteilung der Festgesteine wird jedoch nicht vorgenommen, da in bautechnischer Hinsicht in der Regel die Gebirgseigenschaften gegenüber den Gesteinseigenschaften im Vordergrund stehen.

Gemäß DIN 18319 „Rohrvortriebsarbeiten“ [34] wird der Baugrund in Boden und Fels unterteilt und gemäß seinen Eigenschaften in verschiedene Klassen eingestuft (Tabellen 1-1 bis 1-3):

- nichtbindige Böden entsprechend ihrer Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte
- bindige Böden entsprechend ihrer Konsistenz
- Zusatzklassen zur Beschreibung der Plastizität
- Zusatzklasse für Anteile Steine und Blöcke
- Festgestein entsprechend seinem einaxialen Druckfestigkeit und seinem Trennflächenabstand

Tabelle 1-1 Zusammenfassung der Klassifizierung nichtbindiger Böden (Hauptbestandteile Sand, Kies oder Sand und Kies mit bindigen Anteilen, Korngröße bis 63 mm) nach DIN 18319 [34]

Lagerung	Klasse		
	Feinkorn ^{a)} ≤ 15 Massen-%		Feinkorn ^{a)} > 15 Massen-%
	eng gestuft	weit- oder inter- mittierend gestuft	
locker	LNE 1	LNW 1	LN 1
mitteldicht	LNE 2	LNW 2	LN 2
dicht	LNE 3	LNW 3	LN 3

^{a)} Korngröße bis 0,063 mm.

Tabelle 1-2.1 Zusammenfassung der Klassifizierung bindiger Böden (Hauptbestandteile Schluff und Ton, Korngröße bis 63 mm) nach DIN 18319 [34]

Konsistenz	Klasse	
	mineralisch	organogen
breiig bis weich	LBM 1	LBO 1
steif bis halbfest	LBM 2	LBO 2
fest	LBM 3	LBO 3

Tabelle 1-2.2 Zusammenfassung der Klassifizierung bindiger Böden nach DIN 18319 [34]: Zusatzklassen zur Beschreibung der Plastizität

Plastizität	Zusatzklasse
leicht bis mittel	P 1
ausgeprägt	P 2

Tabelle 1-2.3 Zusammenfassung der Klassifizierung bindiger Böden nach DIN 18319 [34]: Zusatzklassen zur Beschreibung des Anteils an Steinen und Blöcken

Korngröße	Zusatzklasse	
	bis 30 % Volumenanteil	über 30 % Volumenanteil
über 63 mm bis 200 mm	S 1	S 2
über 63 mm bis 630 mm	S 3	S 4

Tabelle 1-3 Zusammenfassung der Klassifizierung für Fels nach DIN 18319 [34]

Einaxiale Druckfestigkeit in Vortriebsrichtung [N/mm ²]	Klasse	
	Trennflächenabstand ≤10 cm	Trennflächenabstand >10 cm
bis 20	FZ 1	FD 1
über 20 bis 50	FZ 2	FD 2
über 50 bis 100	FZ 3	FD 3
über 100 bis 200	FZ 4	FD 4