



## Vorwort

Der Rohrvortrieb ist ein unverzichtbares Bauverfahren für den Bau unterirdischer Leitungen. Die konsequente Verbesserung der Maschinentechnik in den letzten Jahrzehnten hat dazu geführt, dass Vortriebsprojekte in nahezu jeder Geologie und Hydrogeologie mit anspruchsvoller Trassierung realisiert werden. Der Erfolg eines Rohrvortriebs wird vom reibungslosen Zusammenspiel der Vortriebstechnik und der verfahrenstechnischen Abläufe getragen. Potenzielle Risiken zu minimieren und erreichbare Vortriebslängen zu erhöhen, sind Teil der Herausforderungen, die sich bei Rohrvortriebsprojekten täglich stellen.

Die Entwicklung der Vortriebskraft über die Vortriebslänge – und insbesondere die Mantelreibung entlang des Rohrstrangs – ist ein zentraler Punkt bei der Durchführung von Rohrvortrieben. Mithilfe hoher Ausführungsstandards können erhöhte Pressenkräften und daraus resultierende Vortriebsverzögerungen oder Vortriebsstillstände vermieden werden. Ein wesentliches Element zur Begrenzung der Mantelreibung ist eine funktionierende Ringspaltschmierung, bei der das Schmiermittel und die Schmiertechnik auf die Randbedingungen des Vortriebs und insbesondere auf den Baugrund abgestimmt sind. Beide Komponenten – Schmiermittel und Schmiertechnik – hängen von wichtigen Details ab und erfordern ein gutes Grundlagenverständnis der Ausführungsbeteiligten.

Das Schmiermittel besteht meist aus einer Bentonitsuspension, deren rheologische Parameter Fließgrenze und Viskosität an die bestehenden geologischen Randbedingungen der Vortriebsmaßnahme angepasst werden müssen. Es ist fachgerecht herzustellen und die rheologischen Parameter sind normgerecht zu messen. Mithilfe der Schmiertechnik wird das Schmiermittel in ausreichender Menge kontinuierlich in den Ringspalt eingebracht. Vorab sind die Verbrauchsmengen des Schmiermittels über den Vortriebsverlauf zu bestimmen, zeitgerecht herzustellen und in ausreichenden Volumina vorzuhalten. Diese Zahlen hängen direkt von der Größe der Vortriebsmaschine und der Vortriebsrohre sowie von den bodenmechanischen Parametern Kornverteilung, Lagerungsdichte und Durchlässigkeit ab. Beim Einsatz eines automatischen Bentonitschmiersystems sind die Anzahl der Injektionsstutzen im Rohrquerschnitt einer Schmierstation ebenso festzulegen wie der Abstand der Schmierstationen und deren Schmierintervalle in Vortriebsmaschine und Rohrstrang.

Die präzise Abstimmung der einzelnen Aspekte aufeinander ermöglicht es, den Ringspalt um den Rohrstrang aufrecht zu erhalten, den Reibungsbeiwert zwischen Vortriebsrohr und Boden deutlich herab zu setzen und zusammenfassend die Mantelreibung im Vortriebsverlauf beherrschbar zu halten.

Das vorliegende Bentonithandbuch behandelt umfassend die relevanten Komponenten der Ringspaltschmierung. Es kann als Planungshilfe und als Leitfaden für den Bau stelleinsatz gute Dienste leisten. Darin können jedoch nicht alle Problemstellungen der Praxis des Rohrvortriebs erschöpfend behandelt werden. Eigenverantwortliches Handeln gut ausgebildeter Ingenieure muss auch bei Anwendung dieses Buchs die Grundlage einer guten und erfolgreichen Ausführungspraxis bleiben.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. *Markus Thewes*

## Inhaltsverzeichnis

<b>Liste der verwendeten Symbole .....</b>	XV
I. Griechische Symbole .....	XV
II. Lateinische Symbole .....	XV
<b>1      Grundlagen .....</b>	1
1.1    Grundlagen und technische Ausführung von Bentonitschmiersystemen .....	1
1.1.1   Steuerungseinheit .....	2
1.1.2   Mischbehälter .....	2
1.1.3   Vorratsbehälter .....	3
1.1.4   Hauptpressstation .....	3
1.1.5   Vortriebsmaschine .....	3
1.1.6   Schmierring .....	3
1.1.7   Zwischenpressstation (Dehnerstation) .....	3
1.1.8   Vortriebsrohr .....	3
1.1.9   Schmierstation .....	4
1.1.10   Injektionsstutzen .....	4
1.1.11   Bentonitpumpe .....	5
1.1.12   Druckluftzuführung .....	5
1.1.13   Steuerkabel .....	5
1.1.14   Bentonit- oder Zuführungsleitung .....	5
1.2    Ringspaltschmierung beim Rohrvortrieb .....	5
1.3    Vorbemerkungen zum Baugrund .....	6
<b>2      Bentonit und Bentonitsuspensionen .....</b>	9
2.1    Zusammensetzung und Struktur .....	9
2.2    Quellverhalten .....	10
2.3    Kartenhausstruktur und Thixotropie .....	11
2.4    Fließgrenze, Viskosität und Gelstärke .....	12
2.5    Stabilität .....	17
2.6    Gebräuchliche Bentonitarten .....	19
2.6.1   Natürlicher Bentonit (Ca oder Na) .....	19
2.6.2   Aktivierter oder Aktivbentonit .....	19
2.6.3   Bentonit mit Polymerzugabe .....	20
<b>3      Additive .....</b>	21
3.1    Polymere .....	21
3.1.1   Funktionsweisen von Polymeradditiven .....	21
3.2    Arten von Polymeradditiven .....	25
3.2.1   Stärke .....	25
3.2.2   Xanthan .....	25
3.2.3   Guarán .....	26
3.2.4   Modifizierte Cellulosen (PAC, MEC, HEC, CMC) .....	27
3.2.5   Polyacrylamid-/acrylat .....	27
3.3    Übersicht über Polymeradditive und ihre Funktionen .....	28

<b>4</b>	<b>Fachgerechte Herstellung von Bentonitsuspensionen</b>	29
4.1	Anmischen .....	29
4.1.1	Vorgehensweise beim Herstellen der Suspension .....	30
4.2	Mischtechnik .....	33
4.3	Mischanweisungen .....	34
4.3.1	Mischanweisung für Mischer mit Mischpumpe .....	34
4.3.2	Mischanweisung für Mischer mit Wasserstrahlpumpe .....	35
4.4	Quelltanks .....	35
<b>5</b>	<b>Eigenschaften der Suspension und verwendete Messverfahren</b>	37
5.1	Viskosität: Marsh-Trichter .....	37
5.2	Fließgrenze: Kugelharfe .....	40
5.3	Viskosität und Gelstärke: Rotationsviskosimeter .....	42
5.4	Filtratwasserabgabe und Filterkuchenbildung: Filterpresse .....	43
5.5	Dichte .....	45
5.5.1	Messung mithilfe einer Spülungswaage .....	45
5.5.2	Messung mithilfe eines Pyknometers .....	45
5.6	Wasserhärte: Messstreifen .....	46
5.7	pH-Wert .....	46
5.7.1	Bestimmung mittels pH-Messstreifen .....	46
5.7.2	Messung mittels eines pH-Meters .....	46
5.8	Leitfähigkeit .....	46
5.9	Temperatur .....	47
<b>6</b>	<b>Baugrund und Grundwasser</b>	49
6.1	Geologie von Festgesteinen .....	49
6.1.1	Klassifikation von Festgesteinen .....	50
6.1.2	Mineralbestand und Mineralgefüge .....	50
6.1.3	Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit .....	51
6.1.4	Zugfestigkeit .....	53
6.1.5	Gebirgsfestigkeit .....	54
6.1.6	Gesteinsabrasivität .....	54
6.1.7	Trennflächengefüge .....	55
6.1.8	Verwitterungsgrad .....	59
6.1.9	Gebirgsklassifikation .....	60
6.2	Geologie von Lockergesteinen .....	65
6.2.1	Art der Minerale .....	65
6.2.2	Korngröße und Kornverteilung .....	65
6.2.3	Kornrundung .....	77
6.2.4	Poren .....	78
6.2.5	Lagerungsdichte .....	80
6.2.6	Scherfestigkeit .....	82
6.2.7	Konsistenzgrenzen .....	83
6.2.8	Quellfähigkeit .....	85
6.3	Standfestigkeit und Standzeit .....	85
6.3.1	Beurteilung der Standfestigkeit nach dem Ortsbrustverhalten .....	85
6.3.2	Beurteilung der Standzeit mithilfe des RMR- und Q-Systems .....	87

---

6.4	Hydrogeologie .....	88
6.4.1	Hydrogeologische Grundbegriffe .....	88
6.4.2	Durchlässigkeit .....	89
6.4.3	Bestimmung der Durchlässigkeit im Lockergestein .....	93
6.4.4	Bestimmung der Durchlässigkeit im Festgestein .....	96
6.5	Auswirkung verschiedener Gesteinseigenschaften auf die Anwendung von Bentonit .....	100
6.6	Kontaminationen in Baugrund, Grund- und/oder Anmachwasser .....	101
6.6.1	pH-Wert .....	101
6.6.2	Salzwasser .....	102
6.6.3	Wasserhärte aufgrund von Calcium- oder Magnesiumionen .....	102
6.6.4	Chlor .....	103
6.6.5	Eisen .....	103
6.6.6	Huminsäuren .....	103
6.6.7	Zement/Beton .....	104
6.6.8	Übersicht der Grenzwerte für Kontaminationen im Anmachwasser .....	104
6.6.9	Auswirkungen von Kontaminationen auf die Eigenschaften der Suspension .....	104
<b>7</b>	<b>Bentonitsuspensionen zur Ringspalschmierung .....</b>	<b>107</b>
7.1	Größe des Ringspalts .....	107
7.1.1	Mantelreibung .....	108
7.2	Vertikale Position des Rohrstrangs im aufgefahrenen Hohlraum .....	109
7.2.1	Auftrieb .....	110
7.2.2	Ballastierung .....	111
7.2.3	Vertikale Position des Rohrstrangs in standfestem Baugrund .....	111
7.2.4	Vertikale Position des Rohrstrangs in nichtstandfestem Baugrund .....	112
7.3	Funktionen des Schmiermittels im Ringspalt .....	113
7.3.1	Stützfunktion .....	114
7.3.2	Schmierfunktion .....	117
7.3.3	Tragfunktion .....	118
7.3.4	Folgen einer schlechten Anpassung des Schmiermittels .....	120
7.4	Anpassung der Bentonitsuspension an den Baugrund .....	121
7.4.1	Grundlegende geologische Parameter .....	122
7.4.2	Flussdiagramme für Festgesteine .....	122
7.4.3	Flussdiagramme für Lockergesteine .....	123
7.4.4	Zusammenhänge zwischen Boden- und Schmiermittelparametern .....	125
7.4.5	Hydrogeologische Parameter .....	127
7.5	Rheologische Parameter der Bentonitsuspension .....	127
7.5.1	Partikelgröße .....	128
7.5.2	Fließgrenze .....	129
7.5.3	Viskosität .....	132
7.5.4	Gelstärke .....	133
7.6	Verpressmengen .....	135
7.6.1	Definition der Begriffe .....	135
7.6.2	Grundlagen für die Ermittlung der erforderlichen Verpressmenge .....	143

---

7.6.3	Berechnung der Verpressmengen $V_{\text{Maschine}}$ und $V_{\text{Rohrstrang}}$ .....	148
7.7	Das zeitabhängige Verlustvolumen .....	150
7.8	Schmierstrategien.....	151
7.8.1	Interval gesteuerte Systeme.....	151
7.8.2	Volumenkontrollierte Systeme.....	153
7.8.3	Schmierstrategien für Erst- und Nachverpressung.....	155
7.8.4	Besondere Schmierstrategien bei Direct Pipe® und verwandten Verfahren.....	156
<b>8</b>	<b>Schmiertechnik</b> .....	157
8.1	Anordnung und Abstand der Schmierstationen im Rohrstrang.....	157
8.2	Anzahl und Anordnung der Injektionsstutzen pro Schmierstation im Rohrquerschnitt .....	158
8.3	Rückschlagventile .....	159
8.4	Schmierkreislauf .....	160
8.5	Zusammenspiel zwischen dem Stützdruck an der Ortsbrust und dem Ringspaltdruck.....	161
8.6	Bentonitversorgung im Anfahrbereich.....	162
8.7	Schmiermitteldruck, Schmiermittelmenge und Druckverluste .....	163
<b>9</b>	<b>Berichtswesen</b> .....	165
9.1	Welche Parameter sollten bei der Bentonitschmierung dokumentiert werden? .....	165
9.2	Vordrucke .....	165
<b>10</b>	<b>Listen der erforderlichen Verpressmengen</b> .....	169
10.1	Erläuterungen der Listen .....	169
<b>Literatur</b> .....		199

## 2 Bentonit und Bentonitsuspensionen

Bentonitsuspensionen bestehen üblicherweise aus Wasser und Bentonit, zusätzlich können Polymere zugemischt sein. Eine Suspension ist eine feine Verteilung von nicht gelösten Stoffen, in diesem Fall den Bentonitpartikeln, in einer Trägerflüssigkeit. Der Massenanteil des Bentonits beträgt je nach verwendetem Produkt zwischen 3 und 10% der Suspensionsmasse.

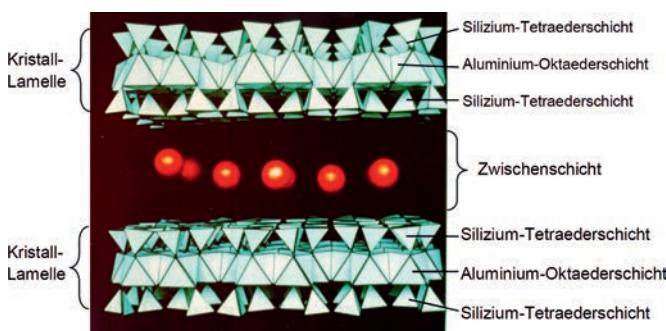
Nach *Grim et al.* [51] ist Bentonit „... ein überwiegend aus Tonmineralien zusammengesetzter und durch deren physikalischen Eigenschaften geprägter Ton“. Bei Tonen handelt es sich um unverfestigte Sedimentgesteine, die aus Mineralpartikeln mit einem Durchmesser von  $< 20 \mu\text{m}$  ( $=0,02 \text{ mm}$ ) bestehen. Der Hauptbestandteil von hochquellfähigem Bentonit ist das Tonmineral Montmorillonit (60–80 Massen-%). Zusätzlich können Begleitmineralien wie z.B. Quarz, Glimmer, Feldspäte, Illit oder Karbonate enthalten sein. Die Masseanteile der den Bentonit aufbauenden Minerale können dabei erheblich variieren.

Der Anteil an Montmorillonit ist ein erster Hinweis auf die Güte des Bentonits, da die technischen Eigenschaften des Bentonits durch die chemisch-mineralogische Beschaffenheit und die Eigenschaften dieses Tonminerals geprägt sind. Als Bentonite sollten ausschließlich Tone mit einem Anteil von  $> 50\%$  Montmorillonit bezeichnet werden. Bei Anteilen von  $< 50\%$  Montmorillonit spricht man eher von tonmineralreichen Tonen.

Bei Bentonitsuspensionen, die als Schmiermittel im Rohrvortrieb eingesetzt werden, sind vor allem ihre Stabilität (Beständigkeit gegen Entmischen im Laufe der Zeit), ihre Fließgrenze  $\tau_F$ , ihre Viskosität  $\eta$  und ihre Gelstärke von Interesse.

### 2.1 Zusammensetzung und Struktur

Bei den Tonmineralen handelt es sich um blättchenförmige, silikatische Mineralpartikel mit einer Größe von  $\leq 20 \mu\text{m}$  ( $\leq 0,02 \text{ mm}$ ; zum Vergleich: ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von  $70 \mu\text{m} = 0,07 \text{ mm}$ ). Der Montmorillonit gehört zur Gruppe der Dreischichtminerale. Seine Kristallstruktur besteht aus Schichten von  $\text{AlO}_6$ -Oktaedern, die jeweils von zwei Schichten von  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern symmetrisch umschlossen werden, sodass Kristall-Lamellen entstehen (Bild 2-1) [54].



**Bild 2-1** Kristallstruktur des Montmorillonits [8].

Im natürlichen Zustand sind auf den Zwischenschichtpositionen Kationen wie Magnesium/Calcium ( $Mg/Ca^{2+}$ ) oder Natrium ( $Na^+$ ) gebunden, die die negative Oberflächenladung der Kristall-Lamellen neutralisieren. Je nach Art der Kationenanlagerung unterscheidet man zwischen Natrium- und Calciumbentoniten. Zusätzlich können auch Wassermoleküle im Zwischenschichtraum eingelagert sein. Der Schichtabstand und damit auch die Kräfte, die die Silikatschichten zusammenhalten, hängen stark von der Einlagerung von Wassermolekülen ab. Der Abstand kann sich durch das Einbinden von Schichtwasser vergrößern. Ein einzelner Montmorillonitkristall besteht aus 15 bis 20 Elementarschichten [54].

## 2.2 Quellverhalten

Eine wesentliche Eigenschaft des Bentonits ist sein Quellverhalten bei Kontakt mit Wasser. Bei der Hydratation werden zwei Hauptarten der Wasseranlagerung unterschieden [8,75]:

- Bei der *innerkristallinen* (oder *intrakristallinen*) Quellung kommt es durch Adsorption von überschüssigem Wasser an den Zwischenschichtkationen und Tonmineraloberflächen zu einer Aufweitung der Elementarschichten. Dieser Vorgang ist reversibel.
- Bei der *osmotischen Quellung* bilden sich durch Konzentrationsunterschiede der Kationen an der Tonmineraloberfläche und in der Porenlösung diffuse Ionenschichten, die wiederum eine elektrostatische Abstoßung der Partikel bewirken.

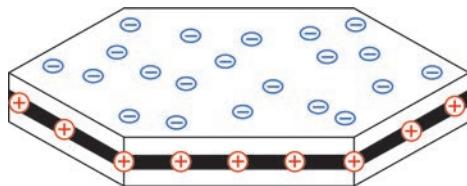
In Montmorillonitkristallen wird der Quellvorgang in der Regel durch Einlagerung von Wassermolekülen zwischen die Elementarschichten bewirkt (innerkristalline Quellung). Dabei vergrößert sich der Abstand der Schichten; unter geeigneten Bedingungen kann es sogar zu einer vollständigen Auflösung des Kristallverbunds kommen.

Natrium- und Calciumbentonit unterscheiden sich hinsichtlich ihres Quellverhaltens aufgrund der unterschiedlichen Natur der Zwischenschichtkationen stark [8]. Natriumionen ( $Na^+$ ) neigen im adsorbierten Zustand stärker als Calciumionen ( $Ca^{2+}$ ) zur Hydratation und ermöglichen so eine größere Wasseraufnahme und Quellung. Natriumbentonit hat aus diesem Grund ein Wasseraufnahmevermögen im Bereich von 600–700%, Calciumbentonit lediglich von 200–300 % [50].

Natriumionen sind zudem größer als Calcium- bzw. Magnesiumionen ( $Mg^{2+}$ ) und haben daher eine geringere Bindekraft. Durch Wasseraufnahme oder -abgabe verändert sich der Schichtabstand der Kristalle bei Ca- oder Mg-gesättigten Montmorilloniten im Bereich zwischen 10–20 Å; die einzelnen Silikatschichten bleiben dabei auch nach ausreichender Wasserzugabe in Schichtstapeln geordnet. Bei Na-Zwischenschichtkationen hingegen vergrößert sich der Schichtabstand durch Aufquellen auf bis zu 160 Å. Bei weiterer Wasseraufnahme bzw. Aufweitung geht der Zusammenhalt der Schichtpakete verloren und es kommt zu einer vollständigen Auflösung des Kristallverbunds. Der Montmorillonitkristall zerfällt dann in seine einzelnen Elementarschichten [78,55].

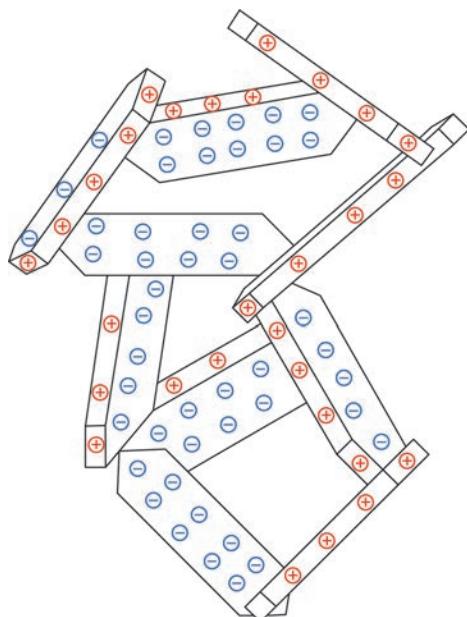
## 2.3 Kartenhausstruktur und Thixotropie

Jede Elementarschicht eines Montmorillonitkristalls besteht aus einer negativ geladenen Oberfläche und positiv geladenen Kanten (Bild 2-2).



**Bild 2-2** Ladungsverteilung der Montmorillonit-Elementarschichten. Die Kanten sind positiv (rot), die Flächen negativ (blau). (Quelle: Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum)

Durch diese unterschiedlichen Ladungen bilden sich nach Auflösung des Kristallverbunds in Einzel-Lamellen im Wasser besondere Strukturen, in denen immer die Kante eines Kristalls auf der Fläche eines anderen lagert. Dieses im Wasser entstehende großvolumige Gerüst wird als *Kartenhausstruktur* bezeichnet (Bild 2-3) [69].



**Bild 2-3** Kartenhausstruktur. Positive Kantenladung rot; negative Flächenladung blau. (Quelle: Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum)

Diese Kartenhausstruktur stellt sich in der Bentonitsuspension im Ruhezustand ein, d.h. die Suspension erstarrt zu einem Hydrogel (Gel). Durch die Einwirkung mechanischer Störungen (z.B. Rühren oder Pumpen) entstehen in der Suspension intensive Bewegungen. Dabei werden die elektrostatischen Verbindungen zwischen den einzelnen Kristallen gelöst, die Kartenhausstruktur zerfällt und die Suspension geht in einen fließfähigen Zustand über (Sol). Diese Sol/Gel-Umwandlung ist in Bentonitsuspensionen vollkommen reversibel und kann beliebig oft wiederholt werden [53,69].

Das beschriebene Verhalten der zeitweiligen Reduzierung der Scherfestigkeit durch Verformungsarbeit und ihres Wiederaufbaus wird als *Thixotropie* bezeichnet [50].

*Jessberger* [55] definiert die Thixotropie als die isotherme und reversible Änderung der Struktur eines Stoffs. Diese äußert sich in einer Verringerung des Verformungswiderstands bei mechanischer Beanspruchung und in einer zeitabhängigen Rückkehr in einen Zustand größeren Verformungswiderstands, sobald die mechanische Beanspruchung beendet ist.

## 2.4 Fließgrenze, Viskosität und Gelstärke

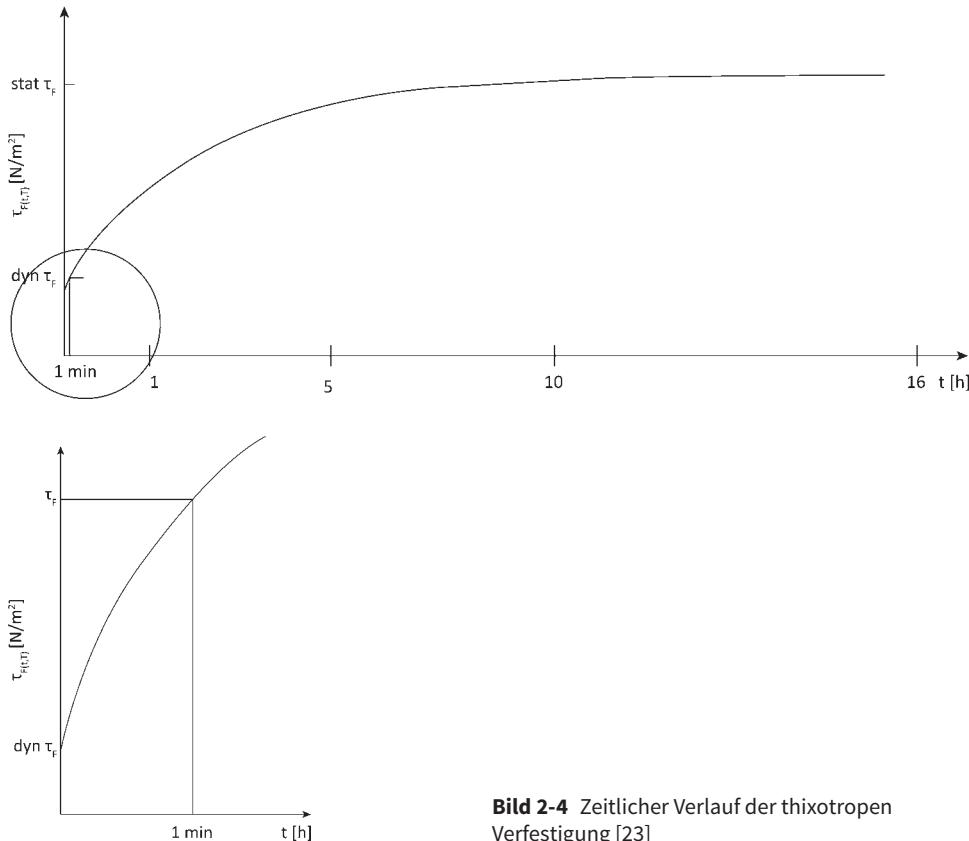
Aufgrund der Kartenhausstruktur besitzen Bentonitsuspensionen eine *Fließgrenze*. Die Fließgrenze  $\tau_F$  eines Stoffs bezeichnet die kleinste Schubspannung, oberhalb derer er sich rheologisch wie eine Flüssigkeit verhält [18].

Die Kartenhausstruktur widersteht den einwirkenden Scherkräften solange, bis der kritische Wert der Fließgrenze  $\tau_F$  überschritten wird. Erst dann wird die Gerüststruktur aufgerissen und das System beginnt zu fließen [54, 92]. Dementsprechend definiert die DIN 4127 [23] die Fließgrenze  $\tau_F$  als die Scherspannung  $\tau$ , ab der Fließen eintritt (Bruchscherspannung). Sie ist bei thixotropen Flüssigkeiten wie Bentonitsuspensionen abhängig von der Temperatur und der Zeit der thixotropen Verfestigung.

Als *thixotrope Verfestigung* wird das Ansteigen der Fließgrenze  $\tau_F$  mit zunehmender Ruhezeit bezeichnet. Die Fließgrenze  $\tau_F$  besitzt direkt nach Abschluss einer Fließbewegung ( $t = 0$ ) ihren Minimalwert  $\text{dyn } \tau_F$  (dynamische Fließgrenze) und nähert sich mit andauernder Ruhephase asymptotisch ihrem Maximalwert  $\text{stat } \tau_F$  (statische Fließgrenze). Die zeitliche Entwicklung der thixotropen Verfestigung ist exemplarisch in Bild 2-4 dargestellt. Der Verlauf und die Grenzwerte der Verfestigungskurven sind temperaturabhängig [23, 92].

Die Fließgrenze beschreibt die Fähigkeit einer Suspension, sich im anstehenden Boden zu setzen. Die Suspension dringt in den Boden ein, wobei ihre Fließgeschwindigkeit abnimmt, bis die Scherspannungen nicht mehr ausreichen, um das Fließen der Suspension weiter aufrechtzuerhalten; der Eindringvorgang stagniert. Die Fließgrenze hängt dabei von den Anfangsbedingungen ab und nimmt mit der Dauer der Ruhezeit zu (thixotrope Verfestigung).

Die Fließgrenze steht im direkten Zusammenhang mit physikalisch-chemischen Reaktionen der aktiven Inhaltsstoffe (Bentonitpartikel) der Suspension. Eine steigende Dichte und Viskosität durch die Zugabe von inerten Feststoffen führt nicht unbedingt zu einer höheren Fließgrenze; diese kann im Gegenteil sogar herabgesetzt werden. Die Vortriebspraxis zeigt, dass eine Kombination von aktiven und inerten Partikeln in der Suspension zu einer erhöhten Viskosität mit zunehmender Dichte führen kann, aber nicht muss.



**Bild 2-4** Zeitlicher Verlauf der thixotropen Verfestigung [23]

Die statische Fließgrenze  $\text{stat } \tau_F$  – als Fließgrenze im Zustand der Ruhe – bestimmt die Eigenschaften einer Bentonitsuspension im Hinblick auf ihre Funktion als Stützmittel; für große offene Strukturen im Baugrund sind möglichst hohe Werte der Fließgrenze erwünscht. Die dynamische Fließgrenze  $\text{dyn } \tau_F$  – als Fließgrenze im Zustand der Bewegung – bestimmt die Eigenschaften einer Bentonitsuspension im Hinblick auf ihre Funktion als Schmiermittel im Ringspalt. Hierfür werden möglichst niedrige Werte der Fließgrenze angestrebt (vgl. die Abschnitte 7.5.1 bis 7.5.3).

Die Fließgrenze  $\tau_F$  einer Bentonitsuspension hängt von mehreren Faktoren ab. Hierzu zählen die Bentonitsorte und -konzentration, die Art der Aufbereitung, die Dispergier- und Quellzeit, sowie die Temperatur.

Die *Viskosität*  $\eta$  ist ein Maß für die Zähigkeit von Flüssigkeiten. Diese Zähigkeit wird durch die innere Reibung verursacht, die benachbarte Flüssigkeitsschichten aufeinander ausüben, weil ihre Moleküle sich gegenseitig anziehen. Je größer die Viskosität einer Flüssigkeit ist, desto stärker ist die Bindung zwischen ihren Molekülen und umso unbeweglicher sind sie – ihre Fließfähigkeit ist herabgesetzt.

Nach DIN 1342-1 [17] wird die Viskosität  $\eta$  als das Verhältnis zwischen Scherspannung  $\tau$  und Geschwindigkeitsgefälle  $D$  definiert:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (2.1)$$

mit

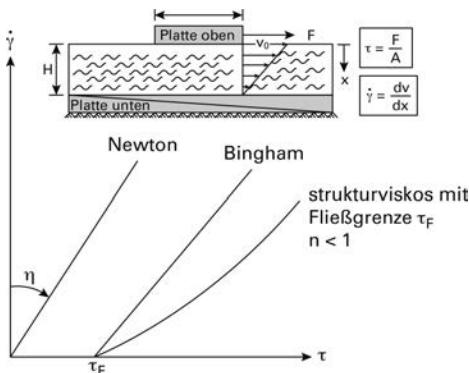
$\eta$  = Viskosität [N s/m<sup>2</sup>]

$\tau$  = Schubspannung [N/m<sup>2</sup>]

$D$  = Geschwindigkeitsgefälle [s<sup>-1</sup>]

Die Thixotropie kann gemäß DIN 1342-1 [17] auch über den Begriff der Viskosität definiert werden. Hierbei nimmt die Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung von ihrem Wert im Ruhezustand auf einen Endwert hin ab und nach Beendigung der Beanspruchung wieder zu.

Das Fließverhalten von Flüssigkeiten lässt sich anhand von verschiedenen Fließkurventypen mit unterschiedlichen mathematischen Ansätzen beschreiben. Charakteristische Fließkurven für Newton'sches, Bingham'sches sowie strukturviskoses Fließen sind in Bild 2-5 gezeigt.



**Bild 2-5** Fließkurventypen für Newton'sches Fließen, Bingham'sches Fließen mit Fließgrenze und strukturviskoses Fließen [100]

Newton'sches Fließen tritt bei Tonmineraldispersionen nur für sehr geringe Konzentrationen auf. Zwischen der Scherspannung  $\tau$  und der Schergeschwindigkeit  $D$  besteht ein proportionaler Zusammenhang. Die Fließkurve ist daher eine Gerade durch den Koordinatenursprung mit einer konstanten Viskosität  $\eta$  als Steigung (vgl. Bild 2-5) [54].

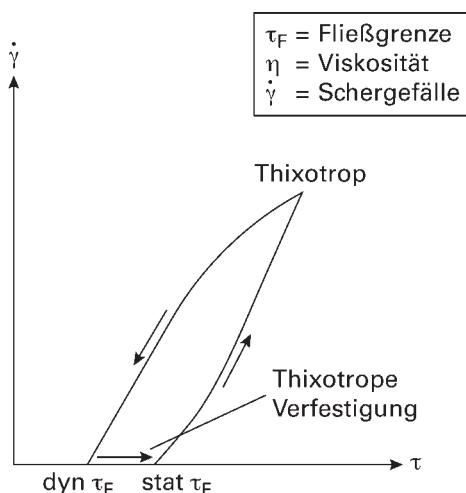
Bingham'sches Fließen ist durch das Auftreten einer Fließgrenze  $\tau_F$  gekennzeichnet. Ein solches System verhält sich bei kleinen Scherspannungen wie ein Feststoff. Fließen tritt erst nach Überschreiten der Fließgrenze  $\tau_F$  ein. Auch in diesem Fall ist das Fließverhalten linear und die Viskosität konstant (vgl. Bild 2-5) [18,100]. Eine solche Fließkurve kann vereinfacht durch das Bingham'sche Fließgesetz beschrieben werden:

$$\tau = \tau_F + \eta \cdot D \quad (2.2)$$

Bei nicht rein viskosen Flüssigkeiten hängt die Viskosität vom Schergefälle und/oder der Dauer der Scherbeanspruchung ab und ist demzufolge keine Konstante. Ein Beispiel hierfür sind *strukturviskose Flüssigkeiten*, die bei einem steigenden Schergefälle

eine Viskositätsabnahme zeigen (auch als *shear thinning* oder *pseudoplastisches Verhalten* bezeichnet). Hierbei ist das Verhältnis zwischen Scherspannung  $\tau$  und Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  nicht konstant, sodass die Viskosität  $\eta$  nur als Funktion des Geschwindigkeitsgefälles  $D$  angegeben werden kann. Sie wird dann z.B. punktuell über die Steigung der Fließkurve bestimmt. Diese Viskosität wird als *differenzielle Viskosität*  $\eta'$  bezeichnet. Wenn die Viskosität  $\eta$  mit steigendem Schergefälle  $D$  abnimmt, d.h. mit steigender Scherbeanspruchung ein Abbau struktureller Verknüpfungen erfolgt, spricht man auch von *strukturviskosem Verhalten* (vgl. Bild 2-5) [54].

Bentonitsuspensionen sind weder Newton'sche noch Bingham'sche Flüssigkeiten, sondern zeigen thixotropes Verhalten [55,82,94] und besitzen eine dynamische und eine statische Fließgrenze. Durch eine mechanische Scherverformung wie z.B. Rühren und Pumpen der sich in Ruhe befindenden Suspension wird diese bei einer gleichzeitigen Abnahme der Fließgrenze von ihrem Maximalwert (statische Fließgrenze stat  $\tau_F$ ) auf ihren Minimalwert (dynamische Fließgrenze dyn  $\tau_F$ ) verflüssigt. Wird die Suspension anschließend wieder in Ruhe gelassen, verfestigt sie sich wieder und baut ihre ursprüngliche Fließgrenze innerhalb einer gewissen Zeit wieder auf (Bild 2-6).



**Bild 2-6** Fließkurve einer thixotropen Flüssigkeit (Bentonitsuspension) [100]

In Bild 2-6 sind die wesentlichen Elemente des Fließverhaltens von Bentonitsuspensionen anhand einer typischen Fließkurve dargestellt. Im Vergleich zu Bild 2-5 ist zu erkennen, dass Bentonitsuspensionen keinem Fließkurventyp eindeutig zugeordnet werden können. Nach Erreichen der Fließgrenze nimmt die Viskosität zunächst mit steigender Schergeschwindigkeit ab und kann in diesem Bereich nur punktuell über die Steigung angegeben werden. Sobald die Gerüststruktur bei höheren Geschwindigkeiten vollkommen zerstört ist, verläuft die Kurve linear und die Viskosität ist über diesen Bereich nahezu konstant. Deswegen wird für die Messung der dynamischen Fließgrenze von Bentonitsuspensionen mit dem Rheometer von hohen zur niedrigen Scherraten gemessen (Bild 2-7).

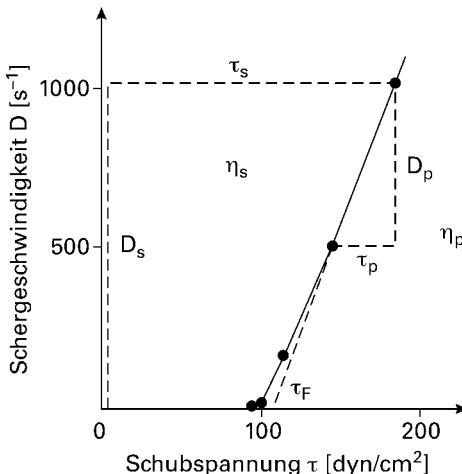


Bild 2-7 Fließkurve einer Bentonitsuspension [69]

Für die Beschreibung des Fließverhaltens von Bentonitsuspensionen wurden die folgenden Vereinbarungen getroffen [69].

Die *scheinbare Viskosität*  $\eta_s$  wird aus der Schubspannung  $\tau$  bei einer Schergeschwindigkeit von  $D = 1000 \text{ s}^{-1}$  berechnet. Hierbei wird vernachlässigt, dass die Suspension eine Fließgrenze  $\tau_F$  besitzt.

$$\eta_s = \frac{\tau_s}{D_s} \quad (2.3)$$

Die *scheinbare Viskosität* ist die „reale“ Viskosität einer Suspension. Die beobachtete Viskosität hängt von der Fließgeschwindigkeit während des Filtrationsprozesses im Boden ab. Für geringe Geschwindigkeiten ist die Viskosität hoch, für hohe Geschwindigkeiten ist die Viskosität niedrig. Für das Fördersystem sollte die *scheinbare Viskosität* möglichst gering sein. Bei einem Bingham'schen Fluid nimmt die Viskosität oberhalb der Fließgrenze mit zunehmender Agitation ab. Eine intensive Agitation führt zu einer turbulenten Strömung innerhalb der Förderleitungen.

Zur Bestimmung der *plastischen Viskosität*  $\eta_p$  wird nur der als linear betrachtete Teil der Fließkurve zwischen  $D = 500 \text{ s}^{-1}$  und  $D = 1000 \text{ s}^{-1}$  ausgewertet (vgl. Bild 2-7).

$$\eta_p = \frac{\tau_p}{D_p} \quad (2.4)$$

Die *plastische Viskosität* entspricht dem linearen Anteil der Fließkurve einer thixotropen Suspension. Dabei scheint die *plastische Viskosität* konstant zu sein. Ihr Wert ist für die Bestimmung der Druckverluste in den Förderleitungen während des Fördervorgangs von Bedeutung. Sie wird im Wesentlichen durch den Feststoffanteil und die Natur des Feststoffs bestimmt.

Die Viskosität einer Suspension ist immer auch mit der Gelstärke verknüpft. Eine hohe Viskosität erfordert immer auch eine hohe Pumpleistung im Schmiersystem.

Die *Gelstärke* beschreibt die Fähigkeit einer Suspension, eine Gelstruktur aufzubauen. Sie ist ein Maß für die Thixotropie unter statischen Bedingungen. Die Gelstärke ist als die Scherspannung definiert, die erforderlich ist, um die Gelstruktur unter statischen Bedingungen (d.h. in Ruhe) zu zerstören. Dieser Wechsel vom Gel im Ruhezustand zum Sol im Bewegungszustand wird z.B. mit einem Rotationsviskosimeter bei niedrigen Scherraten nach 10 s und 10 min im Ruhezustand gemessen.

Diese so genannte „0–10 min Gelstärke“ ist für Anwendungen bei der Ortsbruststützung von großer Bedeutung. In der Praxis wird der Filterkuchen an der Ortsbrust durch die Abbauwerkzeuge des Schneidrads zerstört. Nach dem Durchlauf der Abbauwerkzeuge beginnt die Suspension an der Ortsbrust, den Filterkuchen wieder aufzubauen. Dabei benötigt sie Zeit für die thixotrope Verfestigung, um wieder in ihren ursprünglichen Zustand zu gelangen. Diese Zeit sollte natürlich so kurz wie möglich sein, damit der Zustand der Wasserundurchlässigkeit an der Ortsbrust möglichst schnell wieder hergestellt ist. Hierfür ist ein möglichst geringer Wert der 0–10 min Gelstärke hilfreich.

Generell werden unterschiedliche Verläufe der Gelstärke unterschieden. Wie Bild 2-8 zeigt, sollte die zeitliche Variation der spezifischen Gelstärke einer Flüssigkeit für Anwendungen in Schmiersystemen möglichst niedrig und flach verlaufen.

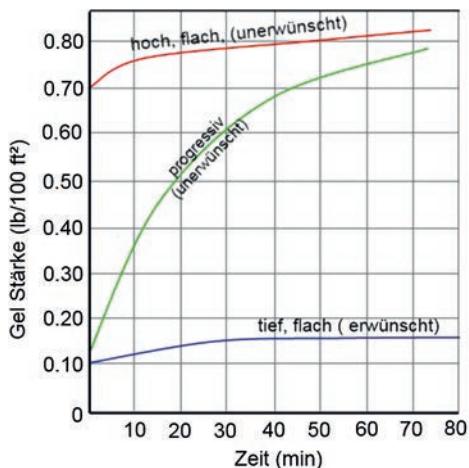


Bild 2-8 Unterschiedliche Typen von Gelstärken [80]

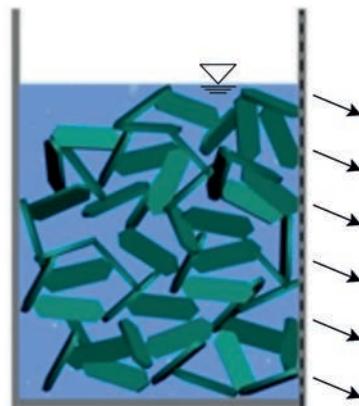
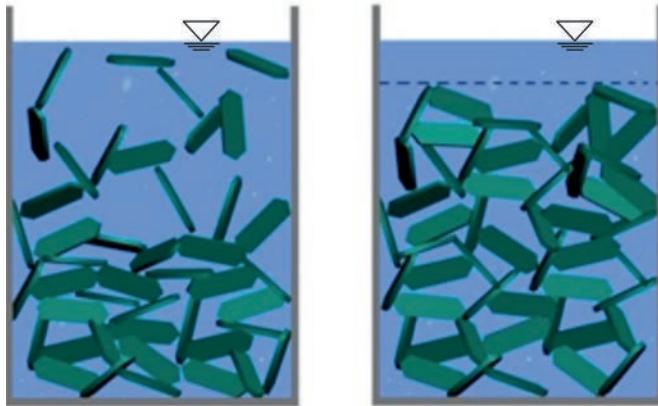
## 2.5 Stabilität

Die Stabilität einer Suspension beschreibt nach DIN 1342-3 [18] „die Eigenschaft, sich im Laufe der Zeit nicht oder möglichst wenig zu entmischen“. Wenn sich die Bestandteile der Suspension von selbst trennen, liegt eine instabile Suspension vor. Stabile Suspensionen entmischen sich dagegen nicht von selbst (Bild 2-9). Die Suspensionsbestandteile können aber mit mechanischen und/oder chemischen Mitteln voneinander getrennt werden.



**Bild 2-9** Stabile Bentonitsuspension mit gleichmäßig verteilten Feststoffpartikeln im Wasser [97]

Walz und Pulsfort [97] unterscheiden drei Arten des Entmischens (Bild 2-10):



**Bild 2-10** Entmischungsarten von Bentonitsuspensionen:  
Sedimentation (oben links),  
Konsolidation (oben rechts),  
Filtration (unten) [97]

1. *Sedimentation* bezeichnet die Ablagerung oder das Absinken von Feststoffen in einer Flüssigkeit unter der Wirkung der Schwerkraft. Als Folge der Sedimentation nimmt die Dichte der Flüssigkeit im oberen Bereich ab und im unteren Bereich zu.
2. *Konsolidation* bezeichnet das Zusammendrücken eines geschütteten oder aufgehäuften Materials (Kartenhaus) unter seinem Eigengewicht oder sonstigen inneren Kräften, wobei Wasser abgeschieden wird.
3. *Filtration* bezeichnet die Trennung von festen und flüssigen Bestandteilen einer Suspension. Bei Bentonitsuspensionen ist es die Wasserabgabe durch eine poröse Fläche oder durch einen porösen Körper (z.B. den als Filter wirkenden Boden) infolge eines auf die Suspension wirkenden Drucks. Die Filtration tritt dann ein, wenn der suspendierte Feststoff entweder nicht in die Poren des Filters eindringen kann oder die Suspension in den Poren des Filters stagniert (vgl. Abschnitt 7.3.1)

Die Filtration steht im direkten Zusammenhang mit der Filterkuchenbildung (vgl. Abschnitt 7.3.1). Vor allem in durchlässigen Böden wie z.B. Sand dient ein möglichst dünner und undurchlässiger Filterkuchen zur Stabilisierung. Ein Filterkuchen kann nur mit einem bestimmten, akzeptablen Maß an Filtration und somit Wasserverlust gebildet werden. Ebenso kann ein geringes Maß an Filtration nur mit einem qualitativ guten, d.h. dünnen und undurchlässigen Filterkuchen erreicht werden.

## 2.6 Gebräuchliche Bentonitarten

Bei den auf dem Markt befindlichen Bentonitprodukten werden allgemein drei verschiedene Grundtypen unterschieden:

- natürlicher Calcium- oder Natriumbentonit
- aktivierter Natriumbentonit
- polymermodifizierter Bentonit

### 2.6.1 Natürlicher Bentonit (Ca oder Na)

Das Wasseraufnahmevermögen und die Quellfähigkeit natürlicher Bentonite unterscheiden sich stark und hängen davon ab, welche Kationen zwischen den Elementarschichten eingelagert sind (vgl. Abschnitt 2.2). Bei Calciumbentoniten mit zweiwertigen  $\text{Ca}^{2+}$ - und/oder  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen liegt das Wasseraufnahmevermögen beim eineinhalb- bis zweifachen ihres Eigengewichts; bei Natriumbentoniten mit einwertigen  $\text{Na}^+$ -Ionen im Zwischenschichtraum beim fünf- bis zehnfachen. Die genauen Werte hängen von der Entstehungsgeschichte des Bentonits, seinem Montmorillonitanteil, dem Natriumgehalt und der Art des Ionenaustauschs ab [7].

### 2.6.2 Aktivierter oder Aktivbentonit

Da natürliche Natriumbentonite seltener vorkommen als Calciumbentonite, sind sie deutlich teurer. Durch Ionenaustausch können Calciumbentonite jedoch in Natriumbentonite überführt werden. Dies kann auf natürlichem Weg durch Zugabe von Soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) oder durch technische Verfahren erfolgen. Der Vorgang (Bild 2-11) wird als *Aktivierung* bezeichnet und die so entstandenen Bentonite werden Aktivbentonite genannt [7].

Entsprechend gilt für die Pumprate  $Q_{\text{Rohrstrang}}$  (in  $\text{m}^3/\text{min}$ ) je nach Vortriebsgeschwindigkeit  $v_{\text{Vortrieb}}$

$$Q_{\text{Rohrstrang}} = V_{\text{Rohrstrang}} \cdot v_{\text{Vortrieb}} \quad (7.28)$$

In diesen Gleichungen bedeuten

- $V_{\text{Maschine}}$  die in der Vortriebsmaschine injizierte Erstverpressmenge (in  $\text{m}^3/\text{m}$ )
- $V_{\text{Rohrstrang}}$  die im Rohrstrang injizierte Nachverpressmenge (in  $\text{m}^3/\text{m}$ )
- $V_{\text{Ringspalt}}$  das Ringspaltvolumen (in  $\text{m}^3/\text{m}$ )
- $V_{\text{Mehrverpressung}}$  das Mehrverpressvolumen in der Maschine (in  $\text{m}^3/\text{m}$ )
- $AD_{\text{Bohrloch}} = AD_{\text{Maschine}} + l_{\text{Ringspalt}}$  den Außendurchmesser des Bohrlochs (in m)
- $AD_{\text{Rohr}}$  den Außendurchmesser der Vortriebsrohre (in m)
- $s$  die Eindringtiefe (in m)
- $C_{\text{Porenraum}}$  den Faktor für das Porenraumvolumen im Lockergestein gemäß Tabelle 7-12
- $C_{\text{Kluftvolumen}}$  den Faktor für das Kluftvolumen im Festgestein gemäß Tabelle 7-13.
- $V_{\text{Vortrieb}}$  die Vortriebsgeschwindigkeit (in  $\text{m}/\text{min}$ )
- $d_w$  den wirksamen Korndurchmesser (i.A. mit  $d_{10}$ , d.h. der Korngröße für 10 Gew.-% Siebdurchgang, gleichgesetzt; in mm)
- $2a$  die Kluftöffnungsweite (in mm)
- $\Delta p$  die Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Eindringtiefe (in  $\text{N}/\text{m}^2$ ; typische Werte  $\approx 0,1\text{--}0,3$  bar =  $(1\text{--}3) \times 10^4 \text{ N}/\text{m}^2$ )
- $\tau_F$  die (statische) Fließgrenze (in  $\text{N}/\text{m}^2$ )
- $C_{\text{Mantel}}$  den Zuschlagfaktor Mantelfläche für die Verpressung in den Untergrund (in  $\text{m}^3$ )
- $F_{\text{Bohrloch}}$  die Mantelfläche des Ausbruchsquerschnittes (in  $\text{m}^2$ )
- $L_{\text{Vergleich}}$  die Länge der Vergleichsstrecke (hier 500 m) für den Zuschlag auf die Mantelfläche (in m)

## 7.7 Das zeitabhängige Verlustvolumen

Der Verlust von Schmierbentonit in den Untergrund und der Abbau bis hin zur Zersetzung des Schmierfilmes erfolgt zeitabhängig. Eine genaue Berechnung dieser Effekte ist jedoch schwierig. Beispielsweise gibt es keine verlässlichen Informationen über die Zersetzung eines Schmierbentonits im Laufe der Zeit als Funktion z.B. der chemischen Zusammensetzung des Wassers, die man in einer solchen Berechnung verwenden könnte. Die oben angeführte Berechnung der Nachverpressmenge deckt den normalen zeitlichen Verlust mit ab. Dabei wird berücksichtigt, dass auch für den weiteren Vortrieb eine gewisse Zeit benötigt wird. Die Dimensionierung der Nachverpressmenge ist somit indirekt zeitabhängig; längere Stillstände sind dabei jedoch nicht berücksichtigt.

Bei längeren Stillständen (mehrere Tage) empfiehlt es sich, den Bentonitschmierfilm von Zeit zu Zeit durch regelmäßiges Nachpressen zu pflegen. Nach regulären Vortriebsunterbrechungen wie z.B. über Nacht oder über das Wochenende empfiehlt es sich, das Schmiersystem vor Vortriebstart einmal durchlaufen zu lassen, um den Schmierfilm wieder zu reaktivieren.

## 7.8 Schmierstrategien

Das Ziel der Schmierung ist das Herabsetzen der Mantelreibung bzw. die Kontrolle der erforderlichen Vortriebskraft durch Aufrechterhaltung einer optimalen Stütz- und Schmierfunktion im Ringspalt. Wenn die Vortriebskraft möglichst gering ist, kann der Vortrieb im günstigsten Fall nur unter Einsatz der Hauptpressstation im Startschacht, also ohne Einsatz von Zwischenpressstationen (Dehnern) erfolgen. Dadurch können hohe (Netto-) Vortriebsgeschwindigkeiten erzielt werden.

Unter dem Begriff Schmierstrategie werden alle Maßnahmen, Randbedingungen und Überlegungen zusammengefasst, die die Wahl des eingesetzten Schmierzyklus bestimmen, d.h. alle Einstellungen zur Injektion von Schmiermittel an den einzelnen Ventilen bzw. Injektionsstutzen der Schmierstationen im Rohrstrang und der Vortriebsmaschine.

### 7.8.1 Intervallgesteuerte Systeme

Der Schmierzyklus beschreibt die jeweiligen Öffnungszeiten der Injektionsventile bzw. -stutzen der Schmierstationen in der Maschine und im Rohrstrang unter Berücksichtigung der Reihenfolge der jeweils angesteuerten Schmierstation.

Grundsätzlich kann bei intervallgesteuerten Systemen ein Normal- oder ein Extrazyklus eingestellt werden. Der Normalzyklus sieht eine Ansteuerung der Schmierstationen gemäß der Reihenfolge ihres Einbaus in den Vortriebsverlauf vor, d.h. der Schmierzyklus beginnt bei Schmierstation 1, die üblicherweise in der Vortriebsmaschine angebracht ist, wobei die Ventile 1, 2, und 3 der Reihe nach geöffnet werden. Danach wird zur Schmierstation 2 gewechselt, in der wiederum alle drei Ventile nacheinander angesteuert werden. Je größer die aktuelle Vortriebslänge ist, desto länger dauert ein vollständiger Schmierzyklus. Das bedeutet aber auch, dass bei hohen Vortriebsleistungen bestimmte Baugrubenbereiche, insbesondere an der Vortriebsmaschine, unter Umständen mit wenig Schmiermittel versorgt werden. Bereiche nahe des Schachts werden meist überversorgt, da hier die größte Zahl von Bentonitstationen durchgefahren wurden (Bild 7-29).



**Bild 7-29** Ungleichmäßige Verteilung des verpressten Bentonits über die Vortriebstrasse bei ausschließlicher Verwendung des Normalzyklus (Quelle: Herrenknecht AG)

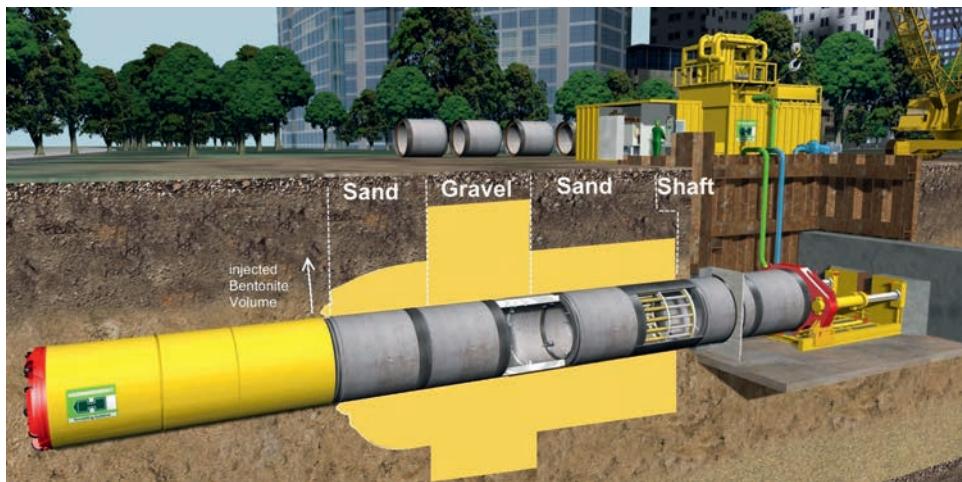
Diesem Effekt beugt der Einsatz des Extrazyklus vor. Hierbei wird nach jeder Ansteuerung einer Schmierstation im Rohrstrang einmal die Schmierstation in der Vortriebsmaschine angesteuert, d.h. nach Versorgung der Schmierstation 2 im Rohrstrang wird die Schmierstation 1 in der Maschine versorgt, danach die Schmierstation 3 im Rohrstrang usw. Dieses Schema kann dann beispielsweise in der Form 1-2-1-3-1-4-1-5-1-6 weitergeführt werden. Der Einsatz des Extrazyklus stellt sicher, dass besonders der wichtige Bereich um die Maschine ausreichend mit Bentonit versorgt wird. Dabei können auch mehrere Bentonitstationen im Extrazyklus verwendet werden, z.B. 1-2-2-1-2-3-1-2-4-1-2-5-1-2-6-1-2, um auch größere Bereich um die Vortriebsmaschine bevorzugt zu versorgen. Auf diese Weise wird der Bereich nahe des Schachts nicht zu stark überschmiert (Bild 7-30).



**Bild 7-30** Gleichmäßige Verteilung des verpressten Bentonits über die Vortriebstrasse durch Verwendung von Normal- und Extrazyklus (Quelle: Herrenknecht AG)

### 7.8.2 Volumenkontrollierte Systeme

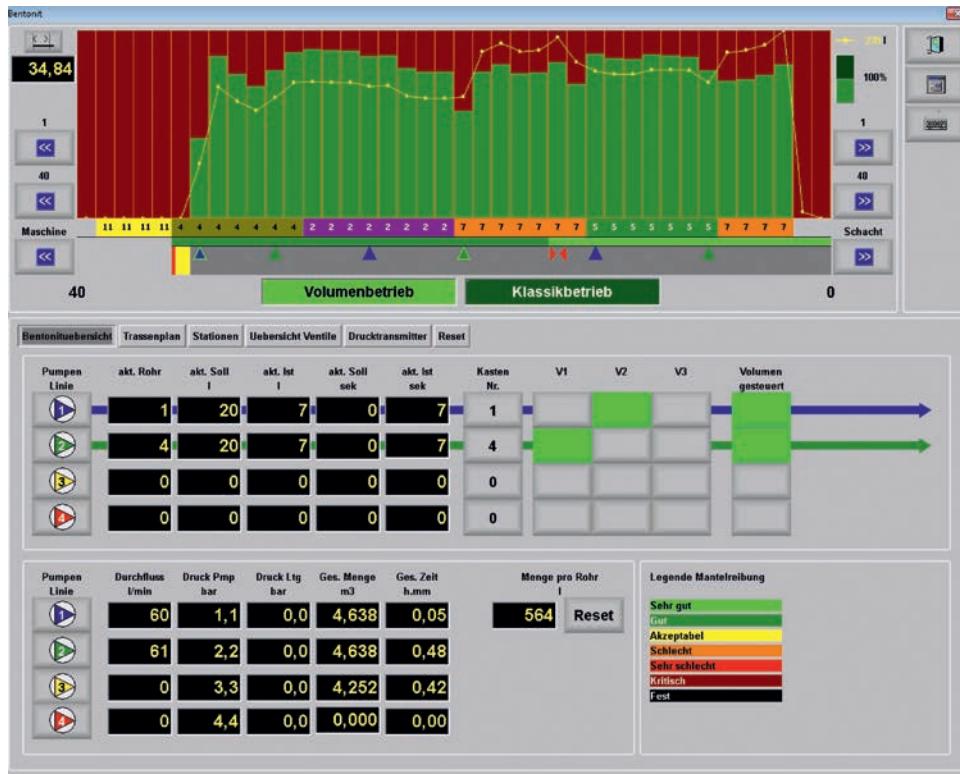
Eine Weiterentwicklung der Bentonitsysteme sind die so genannten volumenkontrollierten Systeme. Sie ermöglichen eine gezieltere und damit einfachere und effizientere Einbringung des Bentonits entlang der Tunneltrasse. Dabei kann auf trassenspezifische Unterschiede, wie z.B. erhöhten Bentonitbedarf einzelner Trassenabschnitte in Kiesbereichen reagiert werden (Bild 7-31). Jede Bentonitstation, die diesen Bereich durchfährt, verpresst dann entsprechend der gewählten Nachverpressmenge mehr Bentonitsuspension.



**Bild 7-31** Trassenbezogene Bentonitverteilung bei Verwendung eines volumenkontrollierten Bentonitschmiersystems (Quelle: Herrenknecht AG)

Ein volumenkontrolliertes Bentonitschmiersystem arbeitet nach folgenden Grundprinzipien:

- Die Steuerlogik arbeitet volumengesteuert.
- Die Trasse wird in Abschnitte von je 1 m Länge unterteilt. Jeder Trassenabschnitt wird entsprechend der geologischen Gegebenheiten klassifiziert; entsprechend werden den jeweiligen Abschnitten Erst- und Nachverpressmengen (Liter pro Abschnittsmeter und Meter Vortrieb) zugeteilt.
- Das System versorgt die jeweiligen Trassenabschnitte während des fortschreitenden Vortriebs automatisch mit den festgelegten Mengen.
- Die Erstverpressmengen werden an der ersten Bentonitstation verpresst.
- An den restlichen Trassenabschnitten summieren sich die Nachverpressmengen innerhalb eines Trassenabschnitts solange auf (für jeden aufgefahrenen Vortriebsmeter kommt die festgelegte Nachverpressmenge dazu), bis eine Bentonitstation diesen Trassenabschnitt erreicht und dann die aufgelaufene Bentonitmenge verpresst.



**Bild 7-32** Anzeige des Systemmonitors eines volumenkontrollierten Schmiersystems (Quelle: Herrenknecht AG)

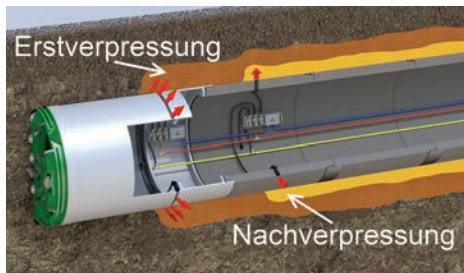
Für diese volumenkontrollierte Arbeitsweise hält der Computer folgende Daten vor (Bild 7-32):

- die aktuelle Vortriebslänge bzw. Position der Vortriebsmaschine
- die Position der Auslassventile (Bentonitstationen) relativ zur Rohrfolge und der Trasse
- die Hublängen der Dehner
- die gespeicherten Informationen zu geologischen Gegebenheiten, Soll-Verpressmengen und verpressten Mengen für alle Trassenabschnitte

Der Computer steuert bis zu 4 Bentonitpumpen und stellt die zugehörigen Druck- und Durchflussdaten grafisch dar.

### 7.8.3 Schmierstrategien für Erst- und Nachverpressung

Der für den Aufbau einer effektiven Bentonitschmierung wichtigste Bereich befindet sich dort, wo der Ringspalt entsteht, also direkt am Schild oder spätestens gleich dahinter am Übergang zum Vortriebsrohr. Die Bentonitverpressung in diesem Bereich wird als Erstverpressung bezeichnet (Bild 7-33). Aufgaben und Ziele der Erstverpressung sind:



**Bild 7-33** Prinzip der Erst- und Nachverpressung  
(Quelle: Herrenknecht AG)

- die Füllung des Ringspalts mit Bentonitsuspension, um Rückspülen von der Ortsbrustbohrspülung sowie Bohrklein zu vermeiden
- Bodenpartikel durch die Gelstärke der Bentonitsuspension in der Schwebeflüssigkeit zu halten
- die Stützung des Untergrunds durch Aufbauen eines Stützdrucks
- den Aufbau eines Stützdrucks durch Bildung eines Filterkuchens oder durch Eindringen der Bentonitsuspension in den Untergrund bis zur Stagnation
- die Verringerung der Mantelreibung zwischen Untergrund und Vortriebsrohr

Wenn diese Punkte erfüllt sind, ist der Grundstein für eine effektive Ringraumschmierung gelegt.

Da eine effektive Schmierung direkt am Schild bei manchen Projekten zu einer starken Verrollungsgefahr der Maschine führen kann, wird in diesen Fällen der Punkt der Erstverpressung hinter den Schild in den Bereich des ersten Betonrohrs verlegt (Bild 7-34).



**Bild 7-34** Verlegung des Bereichs der Erstverpressung: Links normale Erstverpressung, rechts Bereich der Erstverpressung bei starker Verrollungsgefahr am Schild (Quelle: Herrenknecht AG)

Andere Gegenmaßnahmen gegen eine mögliche Verrollung sind das zugfeste Verbinden (Verrollsicherung) des Schildes mit einer möglichst großen Anzahl von Betonrohren oder die Verwendung von ausfahrbaren Antirollflossen im Schild.

# BESTELLSCHEIN

Stück	Bestell-Nr.:	Titel	Preis* €
	978-3-433-03136-0	Bentonithandbuch - Ringspaltschmierung für den Rohrvortrieb; Praetorius, Steffen / Schößer, Britta	59,00
	908574	Gesamtverzeichnis Ernst & Sohn 2014/2015	kostenlos
	bitte ankreuzen	Monatlicher E-Mail-Newsletter	kostenlos

Liefer- und Rechnungsanschrift:  privat  geschäftlich

Firma			
Ansprechpartner		Telefon	
UST-ID Nr. / VAT-ID No.		Fax	
Straße//Nr.		E-Mail	
Land	-	PLZ	Ort

**Vertrauensgarantie:** Dieser Auftrag kann innerhalb von zwei Wochen beim Verlag Ernst & Sohn, Wiley-VCH, Boschstr. 12, D-69469 Weinheim, schriftlich widerrufen werden.

Wilhelm Ernst & Sohn  
Verlag für Architektur und  
technische Wissenschaften  
GmbH & Co. KG  
Rotherstraße 21, 10245 Berlin  
Deutschland  
[www.ernst-und-sohn.de](http://www.ernst-und-sohn.de)

---

## Datum / Unterschrift

\*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten.  
Stand: November 2015 (homepage\_Probekapitel)