



DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Vortriebsverfahren – Erddruckschild

Tunnelling method – earth pressure balance shield

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans-Georg Jodl

und als verantwortlich mitwirkender Assistent

Univ.Ass Dipl.-Ing. Arthur Schönwälder

am

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagment

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan Hehenberger

0927459

Mitteraustraße 7

A-3500 Krems

Wien, im März 2015

eigenhändige Unterschrift

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei meinem Studium und der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich bei Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans-Georg Jodl bedanken. Durch seine praxisnahe Vorlesung Tunnel- und Hohlraumbau wurde mein Interesse in diesem Gebiet geweckt und durch die Bereitstellung und Betreuung meiner Diplomarbeit konnte ich dieses vertiefen. Weiters möchte ich mich bei Univ.Ass Dipl.-Ing. Arthur Schönwälder bedanken, der mir während der Erstellung meiner Diplomarbeit stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Dank gebührt auch meinen Freunden und Studienkollegen. Stellvertretend für all jene, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben, möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Christoph Kienast und Dipl.-Ing. Markus Waglechner für deren Unterstützung und Motivation seit HTL-Tagen bedanken.

Ein großer Dank gebührt auch meiner Freundin Markrit, die mich, seit wir uns kennen, immer bestmöglich unterstützt und nie die Geduld mit mir verloren hat.

Nicht zuletzt möchte ich meinen größten Dank meinen Eltern Helga und Walter Hehenberger sowie meiner Schwester Andrea Dirnberger richten. Ohne deren Unterstützung, sowohl finanziell als auch moralisch, wäre dieses Studium nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Durch vermehrte Investitionen in Infrastruktur werden u.a. auch Tunnelprojekte forciert. Wo die geologischen Bedingungen es zulassen bieten maschinelle Vortriebe eine leistungsfähige Alternative zur konventionellen Tunnelbauweise. Ein Großteil dieser Projekte wird mit sogenannten Erddruckschilden durchgeführt. Die Kernpunkte eines maschinellen Vortriebs müssen verfahrenstechnisch und wirtschaftlich erfolgreich absolviert werden um den Erfolg eines Projektes zu garantieren.

Einleitend werden die Charakteristika der Tunnelvortriebsmaschinen erläutert, wobei anschließend genauer auf die Verfahrenstechnik und Steuerung der Erddruckschilde eingegangen wird.

In den Hauptkapiteln werden mit Hilfe der erlangten Kenntnisse vorerst die theoretischen Hintergründe der Bodenkonditionierung, Ringspaltverfüllung sowie der Schildschwanzdichtung aufgezeigt. Ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung von Vergleichsstudien im Zuge des Projektes Green Line Underground Doha. Dabei werden Verbrauchsanalysen unterschiedlicher Produkte im Zusammenhang mit Bodenkonditionierung und Schildschwanzfett erstellt. Um die gewonnenen Daten akkurat vergleichbar zu machen sind neben Annahmen vor allem Interpretationsgrundlagen zu schaffen. Abgerundet wird die Vergleichsstudie mit Testversuchen vor Ort, die eine relative Differenzierung der Qualität verschiedener Produkte wiedergeben.

Eine sachgemäße Einstellung der drei Kernpunkte eines maschinellen Vortriebs mit Erddruckschilden ist vor allem während der Startphase notwendig. Gewonnene Erfahrungen aus dem Projekt Green Line Underground Doha geben diesbezüglich einen Aufschluss über die Art und den Umfang dieser Arbeiten. Durch diese Maßnahmen ist es möglich den Verbrauch effektiv zu senken und somit die Wirtschaftlichkeit des Projektes zu gewährleisten.

Abstract

With increasing investment in infrastructure also tunnelling projects are getting more. If the geological conditions are suitable, mechanical tunnelling is a powerful alternative to conventional tunnelling. The majority of these projects is carried out with so-called EPB - shields. The key points must be completed procedurally and economically successful to guarantee the success of the whole project.

This thesis begins with a brief overview of the basics and characteristics of mechanical tunnelling. The following sections will then explain the process engineering and controlling of EPB - shields in detail.

The main chapters begin by laying out the theoretical backgrounds of soil conditioning, annular gap filling and tailskin seal. An essential part of this thesis is the creation of comparison studies in course of the project “Green Line Underground Doha”. This includes a consumption analysis of different products related to soil conditioning and tailskin grease. To compare the analysis in a fair way, some assumptions and interpretation basics have to be made in advance. In addition to the comparison studies some field tests, which give a relative differentiation of the quality of the products, are included.

Proper adjustment of the three key elements of mechanical tunnelling with EPB - shields is especially necessary during the start-up phase. The experiences gained from the project “Green Line Underground Doha” give some information about the nature and scope of this work. Due to these measures, it is possible to reduce the consumption effectively and ensure the economic viability of the project.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	PROBLEMSTELLUNG.....	1
1.2	ZIELSETZUNG.....	1
1.3	VORGEHENSWEISE.....	1
2	ÜBERSICHT TUNNELVORTRIEBSMASCHINEN.....	3
2.1.1	<i>Tunnelbohrmaschinen.....</i>	<i>3</i>
2.1.2	<i>TBM ohne Schild.....</i>	<i>5</i>
2.1.3	<i>TBM mit Schild.....</i>	<i>6</i>
2.1.4	<i>TBM mit Doppelschild.....</i>	<i>7</i>
2.2	SCHILDMASCHINEN.....	8
2.2.1	<i>SM mit offenem Schild.....</i>	<i>8</i>
2.2.2	<i>SM mit mechanischer Stützung.....</i>	<i>8</i>
2.2.3	<i>SM mit Druckluftstützung.....</i>	<i>8</i>
2.2.4	<i>SM mit Flüssigkeitsstützung (Hydroschild).....</i>	<i>9</i>
2.2.5	<i>SM mit Erddruckstützung (EBP - Schild).....</i>	<i>10</i>
3	ERDDRUCKSCHILD IM DETAIL.....	12
3.1	ANWENDUNGSGEBIET.....	12
3.2	FUNKTIONSPRINZIP – BETRIEBSMODI.....	13
3.2.1	<i>Stützdruckmessung und -kontrolle.....</i>	<i>13</i>
3.2.2	<i>Massen - Volumen - Kontrolle.....</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Betriebsmodi.....</i>	<i>15</i>
3.3	WESENTLICHE BAUTEILE EINES ERDDRUCKSCHILDES.....	18
3.3.1	<i>Schneidrad.....</i>	<i>18</i>
3.3.2	<i>Abbaukammer.....</i>	<i>20</i>
3.3.3	<i>Schneckenförderer.....</i>	<i>20</i>
3.3.4	<i>Schaumkonditionierung.....</i>	<i>22</i>
3.4	VOR- UND NACHTEILE.....	26
4	BODENKONDITIONIERUNG.....	27
4.1	ANFORDERUNGEN AN DAS STÜTZMATERIAL.....	27
4.2	ZIELE DER BODENKONDITIONIERUNG.....	30
4.3	MECHANISCHE KONDITIONIERUNG.....	31
4.4	KONDITIONIERUNGSMITTEL.....	31
4.4.1	<i>Wasser.....</i>	<i>32</i>
4.4.2	<i>Feinstoffsuspension.....</i>	<i>33</i>
4.4.3	<i>Polymersuspensionen.....</i>	<i>36</i>
4.4.4	<i>Schaum.....</i>	<i>39</i>
4.4.5	<i>Gemischte Konditionierungsmittel.....</i>	<i>42</i>
4.5	BODENKONDITIONIERUNG AM BEISPIEL GREEN LINE UNDERGROUND DOHA.....	43
4.5.1	<i>Testversuche vor Ort.....</i>	<i>45</i>
4.5.2	<i>Problematik zusätzliches Wasser.....</i>	<i>53</i>
4.5.3	<i>Testversuche Schaumgeneratoren.....</i>	<i>57</i>
4.5.4	<i>Verbrauchsanalyse unterschiedlicher Produkte.....</i>	<i>58</i>
5	RINGSPALTVERFÜLLUNG.....	64
5.1	FUNKTION DER RINGSPALTVERFÜLLUNG.....	66
5.2	RINGSPALTMATERIAL.....	67
5.2.1	<i>klassischer Ringspaltmörtel.....</i>	<i>67</i>
5.2.2	<i>Bi-Komponenten Material.....</i>	<i>69</i>
5.2.3	<i>Feinkies (Perlkies).....</i>	<i>72</i>
5.3	EINBRINGVERFAHREN.....	73
5.3.1	<i>Kontinuierliches Einbringen – Mörtel.....</i>	<i>73</i>

5.3.2	<i>Kontinuierliches Einbringen – Bi - Komponente</i>	74
5.3.3	<i>Nachträgliches Einbringen – Mörtel und Kies</i>	77
6	SCHILDSCHWANZDICHTUNG	82
6.1	ARTEN DER SCHILDSCHWANZDICHTUNG.....	82
6.1.1	<i>Kunststoffprofildichtung</i>	82
6.1.2	<i>Stahlbürstendichtung</i>	83
6.1.3	<i>Äußere Schildschwanzdichtung</i>	85
6.1.4	<i>Elastisch gestützte Stirnschalung beim Extrudierverfahren</i>	85
6.2	DICHTMASSE FÜR SCHILDSCHWANZDICHTUNG.....	86
6.2.1	<i>Schildschwanzfett</i>	86
6.2.2	<i>Equipment – TVM</i>	88
6.3	SCHILDSCHWANZDICHTUNG AM BEISPIEL GREEN LINE UNDERGROUND DOHA.....	94
6.3.1	<i>Testversuche vor Ort</i>	97
6.3.2	<i>Verbrauchsanalyse unterschiedlicher Produkte</i>	103
6.3.3	<i>menschlicher Einfluss</i>	106
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	109
8	VERZEICHNISSE	110
8.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	110
8.2	TABELLENVERZEICHNIS	111
8.3	LITERATURVERZEICHNIS.....	112
9	ANHANG	115
9.1	DATEN TVM 846 (PRODUKT B-1)	116
9.2	DATEN TVM 847 (PRODUKT A-1)	117

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

„Eine gute Infrastruktur ist Lebensqualität“¹

Qatar hat für 2030 das Entwicklungsziel „Qatar National Vision 2030“ vorgegeben. Dazu zählen neben der Verbesserung der wirtschaftlichen Zusammenarbeit mit europäischen Staaten und eine Wirtschaft, die unabhängiger von Erdöl- und Erdgasvorräten ist auch die Modernisierung der Infrastruktur in Doha und Umgebung. Hierbei ist ein wichtiges Ziel die Errichtung eines Metrosystems und eines Fernbahnnetzes. Dazu sollen in einer ersten Phase vier U-Bahnlinien mit einer Gesamtlänge von 131 km in einer Bauzeit von 6 Jahren errichtet werden. All diese U-Bahnprojekte werden mit sogenannten Erddruckschilden errichtet, wobei die Bodenconditionierung eine wesentliche Rolle spielt. Die weiteren Kernpunkte eines maschinellen Vortriebes mit einer Schildmaschine sind die Schildschwanzdichtung und die Ringspaltverfüllung. Diese wesentlichen verfahrenstechnische Punkte können dabei über den Erfolg eines Vortriebes mit einem Erddruckschild entscheiden, dennoch werden diesen Punkten im Zuge der Projektentwicklung und Ausführung teilweise zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

1.2 Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Diplomarbeit ist es zuerst einen Überblick über mögliche Conditionierungsmittel, deren Zusammensetzungen und mögliche Versuche zu geben. Danach sollen die Notwendigkeit der Schildschwanzdichtung und Ringspaltverfüllung erläutert werden. Hierbei werden vor allem unterschiedliche Systeme, Materialien und Einbringverfahren erklärt und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt. Im Bereich der Bodenconditionierung und der Schildschwanzdichtung war es ein Ziel eine Vergleichsstudie unterschiedlicher Produkte zu erstellen. Anhand von Versuchen und Verbrauchsanalysen im Zuge der Green Line Underground Doha wurde diese Studie untermauert.

1.3 Vorgehensweise

Die Diplomarbeit gibt im Kapitel 2 eine Übersicht über die klassischen Arten der Tunnelvortriebsmaschinen wieder, anschließend wird im Kapitel 3 auf die Arbeitsweise und die wesentlichen Bauteile der Erddruckschilder genauer eingegangen. Mit diesen Kenntnissen wird die im Kapitel 4 beschriebene Bodenconditionierung dargelegt. Dazu werden im ersten Schritt die Anforderungen an das Stützmaterial und die Ziele der Conditionierung wiedergegeben. Nach einem Überblick über die wesentlichen Conditionierungsmittel werden an Hand des Projektes Green Line Underground Doha gewonnene Erfahrungen dargelegt und eine Vergleichsstudie erstellt. Desweiteren

¹ Anette Karl, 1960

wird der Weg zu geeigneten Konditionierungsparameter anhand von Laborversuchen dargelegt. Im nachfolgenden Kapitel 5 wird das bei allen Tunnelvortriebsmaschinen wichtige Thema Ringspaltverfüllung bearbeitet, wobei nach den unterschiedlichen Einbringmaterialien vor allem die Einbringverfahren und der Zeitpunkt der Einbringung erläutert werden. Mit der Ringspaltverfüllung einher geht das in Kapitel 6 beschriebene Thema der Schildschwanzdichtung. Nach Darlegung der verschiedenen Arten von Schildschwanzdichtung wird am Ende des Kapitels abermals am Projekt Green Line Underground Doha eine Vergleichsstudie mehrerer Produkte vorgenommen. Inkludiert in dieser Studie sind neben einer Verbrauchsanalyse einfache Testversuche vor Ort zur Unterscheidung der Produkte. Das abschließende Kapitel soll eine Zusammenfassung der wichtigsten Verfahrenspunkte von Erddruckschilden und einen möglichen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen geben.

2 Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen

Für die Herstellung von Tunnelbauwerken in Lockergesteinen werden üblicherweise Schildmaschinen (SM) verwendet. Im Gegensatz dazu werden im Hartgestein Tunnelbohrmaschinen (TBM) verwendet. Gemeinsam werden sie unter dem Überbegriff Tunnelvortriebsmaschine (TVM) zusammengefasst.

Ein wesentlicher Bestandteil bei einem Vortrieb mit einer Schildmaschine ist die Ortsbruststützung, durch die Setzungen an der Oberfläche verringert, wenn nicht sogar verhindert werden können. Wesentlich dabei ist mit einem geeigneten Stützmedium den sogenannten Stützdruck möglichst konstant aufrecht erhalten zu können.

Die Schildmaschinen (SM) werden weiters in Vollschnittmaschinen (SM - V) und Teilschnittmaschinen (SM - T) unterteilt. Je nach verwendetem Stützmedium wird weiters zwischen offener Stützung (SM - V1 und SM - T1), mechanischer Stützung (SM - V2 und SM - T2), Druckluftstützung (SM - V3 und SM - T3), Flüssigkeitsstützung (SM - V4 und SM - T4) und Erddruckstützung (SM - V4) unterschieden. Ein Überblick über die Tunnelvortriebsmaschinen kann folgender Abbildung entnommen werden:

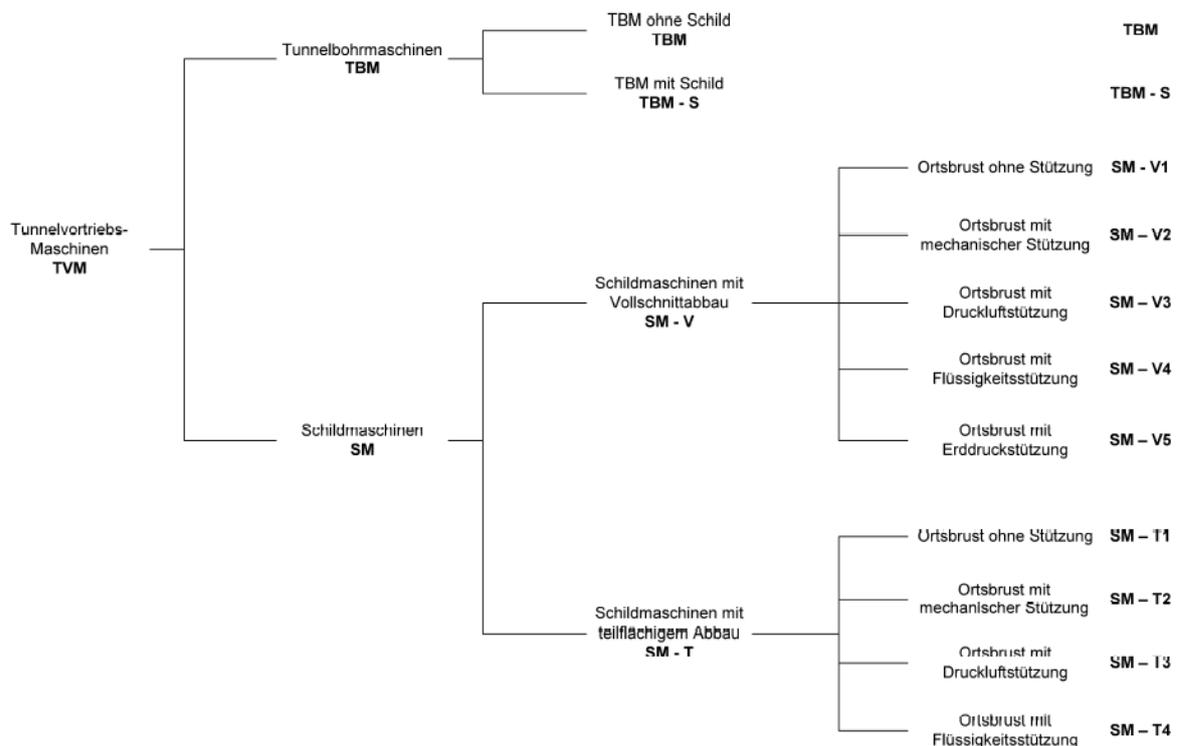


Abb. 2-1: Einteilung TVM²

2.1.1 Tunnelbohrmaschinen

Tunnelbohrmaschinen werden wie bereits erwähnt im Hartgestein eingesetzt, wobei der Abbau des anstehenden Gesteins mit einem geschlossenen Bohrkopf erfolgt. Der Bohrkopf ist meist mit

² Daub, 5/97, S.11.

2 Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen

Rollenmeißel und Hartgesteindisken bestückt. Durch den Vorschub des Bohrkopfes werden die Disken auf das Gestein gepresst und die Schneidkanten überwinden die Druckfestigkeit des anstehenden Gesteins und zermahlen dabei den Fels. Die rollende Diske dringt soweit in den anstehenden Fels ein, bis ein Gleichgewicht zwischen Anpressdruck und Widerstand des anstehenden Gebirges entsteht. Ab diesem Zeitpunkt erzeugen die Schneidkanten der Disken enorme Spaltzugkräfte, bei denen der Fels versagt und es zur Abspaltung von länglichen, plattenförmigen Stücken, sogenannten Chips kommt.³ Dieser Vorgang ist in Abb. 2-2 zu sehen.

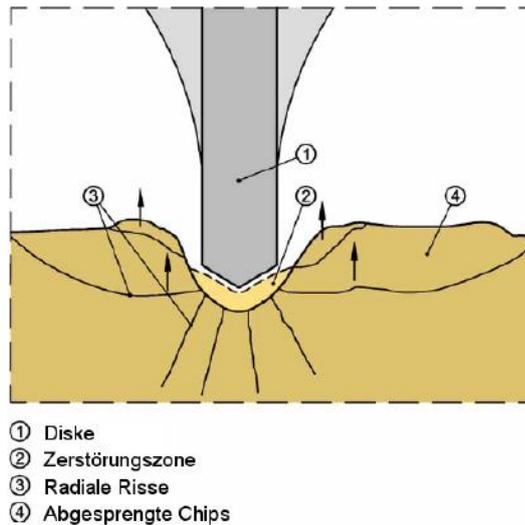


Abb. 2-2: Löseprinzip einer Hartgesteindiske⁴

Die wesentliche Unterscheidung bei Tunnelbohrmaschinen ist das Abstützsystem, auf dem der Bohrkopf angebracht ist und über welches er die Vortriebskraft übertragen kann. Eine weitere wesentliche Aufgabe des Abstützsystems ist es, dass durch die Rotierbewegung des Bohrkopfes erzeugende Moment sicher abzutragen. Die Vortriebskraft wird jedenfalls über Vortriebszylinder (Hubzylinder) übertragen, wobei die Länge des Kolbens die maximale Hublänge bestimmt.

Wie bei jedem Tunnelvortrieb, kommt auch bei einem Vortrieb mit einer TBM dem Schuttern eine wesentliche Rolle bei. Die Chips werden am Bohrkopf über sogenannte Räumler, meist Aussparungen am Bohrkopfrand, aufgenommen und über Übergabevorrichtungen und Steigförder abtransportiert. Nach der Maschine kann der Schutterbetrieb sowohl kontinuierlich, mit einem Förderband, oder diskontinuierlich, mit gleis- oder radgebundenen Schutterbetrieb erfolgen. Für die Dimensionierung des Schutterkonzeptes sind sowohl wirtschaftliche, als auch materielle Eigenschaften des Ausbruchmaterials einzubeziehen.

³ Vgl. Maidl B., 2011, S.72

⁴ Wittke W., 2007, S.202.

2.1.2 TBM ohne Schild

Eine TBM ohne Schild wird üblicherweise auch Gripper - TBM oder offene TBM genannt. Das Hauptanwendungsgebiet liegt im standfesten, nicht nachbrüchigen Fels ohne starken Wasserandrang. Zusätzliche Sicherungsmaßnahmen kommen nur im Sonderfall beim Durchörteren von Störzonen zur Anwendung.

Die Gripper - TBM wird von einem Schreitwerk, dem sogenannten Gripper bewegt. Dazu verspannen sich die Gripperplatten gegen das anstehende Gebirge und es erfolgt der Vortrieb bis die maximale Hublänge der Vorschubzylinder erreicht ist. Anschließend wird am Ende der Kellystange eine Hilfsabstützung ausgefahren, die Gripperplatten werden eingezogen und bewegen sich in Vortriebsrichtung. Nachdem die neue Position der Gripperplatten erreicht ist, werden diese wieder gegen das Gebirge gespreizt, die Hilfsabstützung wird eingefahren und ein neuerlicher Hub kann beginnen.⁵ In Abb. 2-3 sind die einzelnen Verfahrensschritte einer Gripper - TBM mit den wesentlichen Bauteilen dargestellt.

Die Sicherung des Tunnels erfolgt in der Regel erst im Bereich der Nachläufer, im Sonderfall können Sicherungsmaßnahmen, wie Spritzbeton und Ankerungen bereits im Maschinenbereich eingebaut werden, um vor allem sicher und flexibel auf wechselnde Gebirgseigenschaften reagieren zu können.

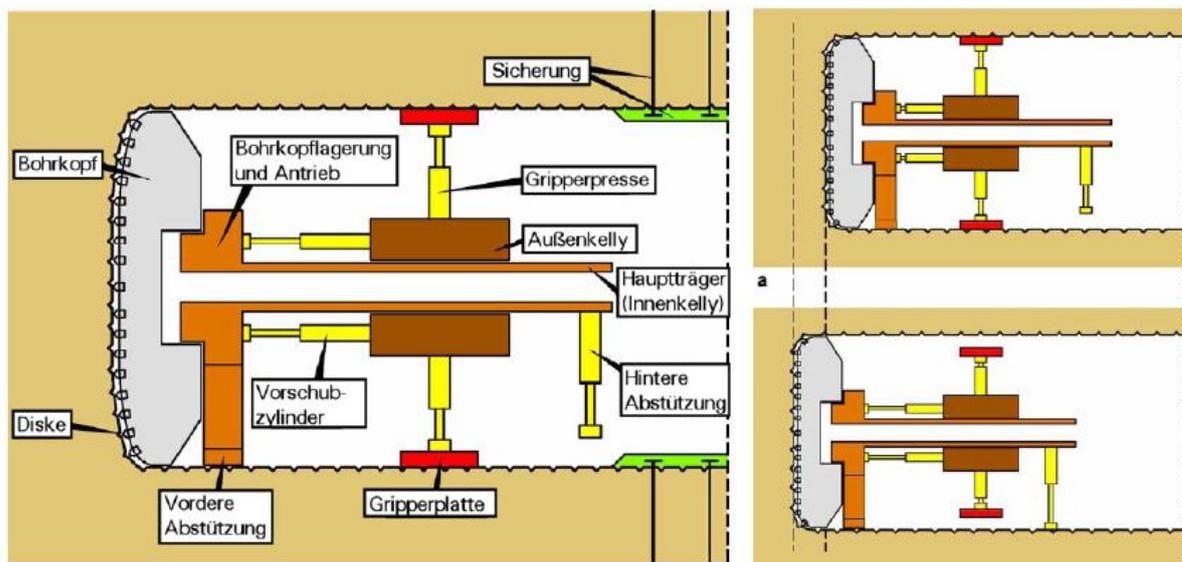


Abb. 2-3: Komponenten und Vortriebsverfahren einer Gripper - TBM⁶

Nach der Sicherung mit Spritzbeton und gegebenenfalls Ankeren erfolgt der Ausbau der Innenschale in der Regel mit Pumpbeton und einem Gewölbeschalwagen. Zur Sicherheit des Maschinenpersonals und der Maschinenteile können zusätzlich statische Schutzschilde über dem Bohrkopf, sogenannte Haubenschilde oder hydraulisch versetzbare Teilschilde eingesetzt werden.⁷

⁵ Vgl. Vorlesungsunterlagen Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau, 2013, S.147-148.

⁶ Wittke W., 2007, S.4.

⁷ Vgl. Wittke W., 2007, S.5 ff.

2.1.3 TBM mit Schild

Schild - TBM werden in brüchigen, wenig standfestem Gebirge eingesetzt, bei denen die Standzeit des Gebirges für eine konventionelle Sicherung mit Spritzbeton und Ankern nicht ausreichend ist. Der druckdichte Ausbau mit Stahlbetonfertigteilen, sogenannten Tübbing, erfolgt im Schutze des Mantels. Der gesamte Tunnel und die Schild - TBM sind somit stets vom umgebenden Gebirge abgeschottet und bieten somit eine größtmögliche Sicherheit im Bezug auf Steinschläge.⁸

Die Funktionsart einer Schild - TBM entspricht jener einer Schildmaschine, nur der Bohrkopf ist wie bei der Gripper - TBM mit Hartgesteindisken ausgestattet. Die Schild - TBM stützt sich nicht über Gripperplatten auf das anstehende Gebirge ab, sondern über den mit Tübbing ausgebauten Tunnel. Dazu werden Vorschubpressen verwendet, die sich mit ihren Pressenfüßen auf dem letzten Tübbingring abstützen. Sind die Vorschubpressen voll ausgefahren und der Hub somit beendet, wird der nächste Tübbingring eingebaut. Dazu werden die Vorschubpressen in jenem Bereich eingefahren, in denen der jeweilige Tübbingstein eingebaut wird. Der Tübbingstein wird mit Hilfe der Segmentfeeder unter dem ersten Nachläufer zum Schild transportiert, dort von einem Erektor, in den meisten Fällen ein Vakuumerektor, aufgenommen und an die jeweilige Position gebracht. Abschließend werden die Vorschubpressen wieder an den neuen Tübbingstein gepresst. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis ein gesamter Tübbingring, meist aus sechs Tübbingsteinen bestehend, fertiggestellt ist und wieder mit dem Vortrieb begonnen werden kann. In Abb. 2-4 sind die einzelnen Verfahrensschritte einer Schild-TBM mit den wesentlichen Bauteilen dargestellt.

Weitere wesentliche Verfahrensschritte bei einer Schild-TBM sind zum einen die Schildschwanzdichtung, die zwischen Schildmantel und Tübbingausbau liegt und den ausgebrochenen Tunnel vom anstehenden Gebirge trennt. Dieser Punkt wird genauer im Kapitel 6 Schildschwanzdichtung erläutert. Zum anderen ergibt sich aufgrund des Überschnittes des Bohrkopfes ein Ringspalt, der im Zuge des Tunnelvortriebs verpresst werden muss, dieser Punkt wird genauer im Kapitel 5 dargelegt.

⁸ Vgl. Wittke W., 2007, S.10 ff.

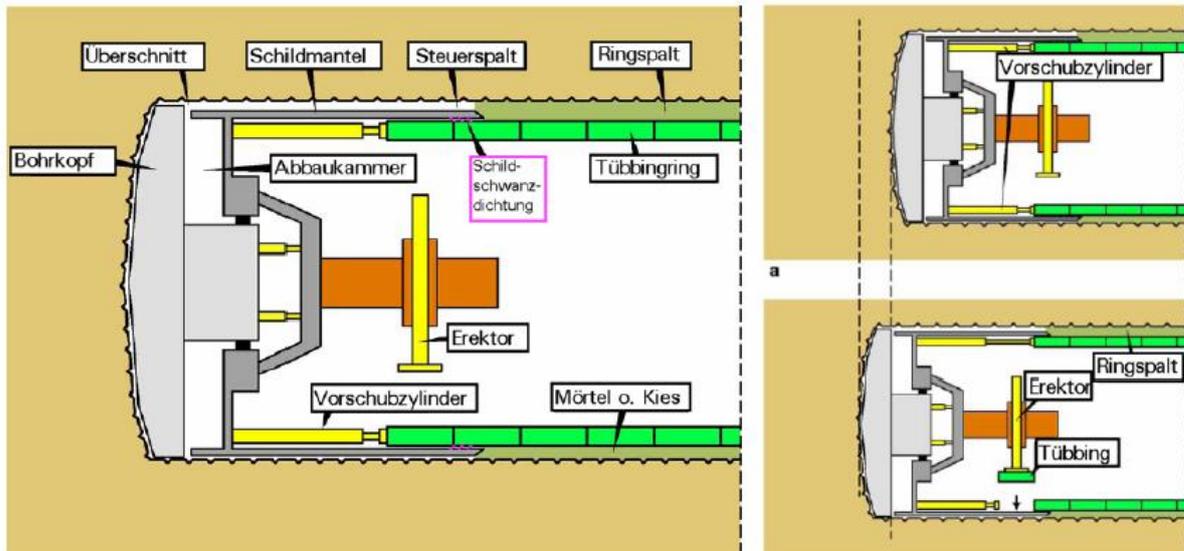


Abb. 2-4: Komponenten und Vortriebsverfahren einer Schild - TBM⁹

2.1.4 TBM mit Doppelschild

Eine Doppelschild - TBM kann im Gegensatz zu einer Gripper - TBM und einer Schild - TBM auch kontinuierlich arbeiten, bei den beiden letztgenannten wechseln sich der Vortrieb und das Vorschreiten bzw. der Tübbingausbau ab.

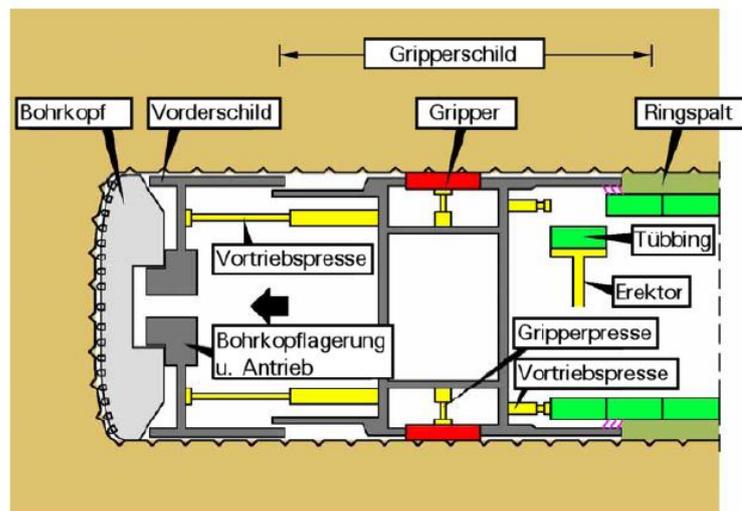


Abb. 2-5: Komponenten einer Doppelschild - TBM¹⁰

Eine Doppelschild - TBM besteht aus einem Vorder- und einem Hauptschild bzw. Front- und Gripperschild, welche mit hydraulischen Vortriebspresen miteinander verbunden sind. Bei hoher Gesteinsfestigkeit kann sich das Vorderschild mit Hilfe der Gripperplatten gegen den angrenzenden Fels verspannen und der Bohrkopf kann mit Hilfe der ersten Reihe Vortriebspresen gegen die Ortsbrust gedrückt werden, ohne auf den Tübbingausbau Rücksicht zu nehmen. Zum versetzen des

⁹ Wittke W., 2007, S.10 und S.11.

¹⁰ Wittke W., 2007, S.10 und S.14.

Gripperschild wird der gesamte Bohrkopf über die zweite Reihe der Vortriebspresen gegen die Ortsbrust gedrückt.

Im Falle brüchiger, nur kurzzeitig standfester Felseigenschaften erfolgt der Vortrieb analog einer Schild - TBM durch Abstützen auf den Tübbingausbau. In Abb. 2-5 sind die einzelnen Verfahrensschritte einer Doppelschild - TBM mit den wesentlichen Bauteilen dargestellt.

2.2 Schildmaschinen

Schildmaschinen sind für den Einsatz im weichen Fels, Kies-, Sand- und Tonboden geeignet. Das Schild läuft vom Bohrkopf bis über den Tübbingausbau und trennt somit den gesamten Tunnel vom anstehenden Gebirge. Um die Gefahr des Verklemmens der Maschine zu verringern ist das Schild konisch ausgeprägt. Schildmaschinen können die Ortsbrust vollflächig über ein Schneidrad oder teilflächig mit Bagger oder Fräsen lösen. Bei einem vollflächigen Abbau besteht das Abbauwerkzeug aus Disken für Fels, Schälmesser und Zähne für weichen Boden. Die benötigte Vorschubkraft, um den Bohrkopf gegen die Ortsbrust zu drücken, wird analog zur Schild - TBM über Vortriebspresen auf die bereits eingebauten Tübbingringe übertragen. Die weiteren wesentlichen Verfahrensschritte wie Schildschwanzdichtung und Ringspaltverpressung werden in den Kapitel 5 und 6 genauer erläutert. Die Unterscheidung der Schildmaschinen erfolgt nach ihrem Stützverfahren

2.2.1 SM mit offenem Schild

Offene Schilde sind, wie der Name bereits erklärt, Schilde die ohne Stützung auskommen. Dies ist nur in Böden möglich, bei denen der Grundwasserzufluss auf jeden Fall gering ist. Der Abbau kann vollflächig, mit einem Schneidrad, oder teilflächig mit z.B. Teilschnittfräsen erfolgen. Einsatzgebiete sind vor allem kleinere Querschnitte oder der Rohrvortrieb beim Rohrpressverfahren.

2.2.2 SM mit mechanischer Stützung

Eine mechanische Stützung kann durch ein nahezu geschlossenes Schneidrad erreicht werden. Die Speichen zwischen dem Abbauwerkzeugen werden dazu mit elastischen Platten verschlossen, die auch gegen die Ortsbrust gedrückt werden. Zwischen den Platten und dem Schneidrad sind Öffnungen enthalten, durch die der gelöste Boden transportiert wird. Der Abtransport kann sowohl über Förderbänder, Schutterwagens als auch hydraulisch erfolgen. Bei zum Fließen neigenden Böden ist eine mechanische Stützung auf jeden Fall auszuschließen.¹¹

2.2.3 SM mit Druckluftstützung

Bei einer Druckluftstützung wird der Arbeitsraum durch Einpressen von Druckluft von einströmendem Wasser freigehalten.¹² Der Stützdruck entspricht dabei dem anstehenden Erd- und Wasserdruck an der Sohle, im Firstbereich ist daher immer ein Überdruck vorhanden. Der Vorteil der

¹¹ Vgl. Daub, 5/97, S.13.

¹² Vgl. Maidl B., 2011, S.217.

2 Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen

Druckluftstützung liegt darin, dass sie unmittelbar nach Aufbringung wirkt. Die Druckluftstützung kann nur im Bereich der Abbaukammer durch Einbau einer Druckwand erfolgen oder aber über eine längere Tunnelstrecke. Auf jeden Fall sind sowohl Schleusen für Personen- als auch Materialtransport vorzusehen. Der Abbau der Ortsbrust kann sowohl vollflächig mit einem Schneidrad als auch teilflächig erfolgen. Beim Personen- und Maschineneinsatz ist vor allem auf arbeitsrechtliche- und sicherheitstechnische Regelungen zu achten.

Druckluftstützung kann auch mit anderen Stützverfahren kombiniert werden, z.B. als temporäre Maßnahme zum Austausch von Werkzeug bei Flüssigkeits- oder Erddruckstützung.

2.2.4 SM mit Flüssigkeitsstützung (Hydroschild)¹³

Beim Flüssigkeitsschild wird die Ortsbrust durch eine unter Druck stehenden Flüssigkeit, meist eine Bentonitsuspension, gestützt. Die Dichte und Konsistenz des Stützmediums hängt vor allem von der Durchlässigkeit des Bodens ab. Beim Vollschnittabbau hat sich vor allem das Hydroschild durchgesetzt, im Gegensatz zum Slurry - Schild wird die Drucksteuerung über eine Luftblase und nicht über die Flüssigkeit geregelt. Dadurch ist eine genauere Drucksteuerung möglich.

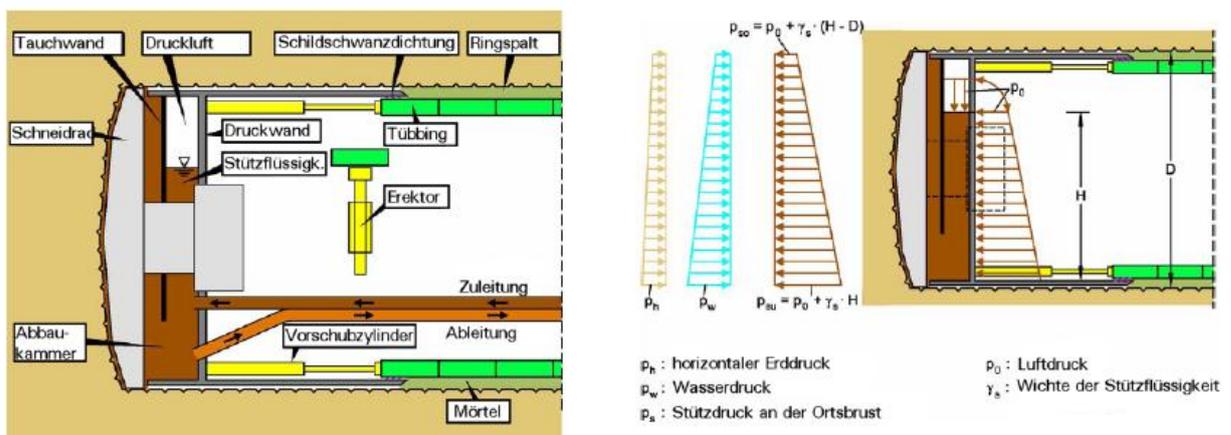


Abb. 2-6: Komponenten und Vortriebsverfahren eines Hydroschildes¹⁴

Beim Hydroschild wird die Abbaukammer vom Tunnel durch eine Druckwand getrennt. In der Abbaukammer befindet sich eine Tauchwand wobei die Abbaukammer, bis auf einen Luftpolster zwischen Tauch- und Druckwand, mit einer Stützflüssigkeit gefüllt ist. Die Stützflüssigkeit wird durch eine Zu- und Ableitung ständig ausgetauscht und befindet sich somit in einer turbulenten Strömung, dadurch wird das gelöste Material von der Ortsbrust abtransportiert und zu einer Separieranlage gefördert. Die aufbereitete, vom Ausbruchmaterial befreite Stützflüssigkeit, wird anschließend dem Kreislauf wieder zugeführt. Durch den Luftpolster in der Abbaukammer kann der Druck der Stützflüssigkeit auf 0,5 bar genau geregelt werden, wodurch Setzungen an der Bodenoberfläche minimiert werden können.

¹³ Vgl. Wittke W., 2007, S.16 ff.

¹⁴ Wittke W., 2007, S.17.

2 Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen

Der klassische Einsatzbereich eines Hydroschildes liegt im sandig, kiesigen Böden, wo eine Separierung des Ausbruchmaterial leichter zu bewerkstelligen ist. Im Feinkornbereich kann es neben dem erhöhtem Separieraufwand auch zu Verklebungen des Schneidrades im Schneidradzentrum kommen, da hier geringere Schergeschwindigkeiten wirken. Dem kann durch Flüssigkeitszugabe im Schneidradzentrum entgegengewirkt werden. Weiters soll vor der Ableitung ein Steinbrecher installiert werden, um Findlinge und größere Steine zu zerkleinern und hydraulisch förderbar zu machen.

Bei einem allfälligen Werkzeugwechsel wird die im Kapitel 2.2.3 erläuterte Druckluftstützung angewendet. Dazu wird die Stützflüssigkeit in der Abbaukammer zur Gänze oder zum Teil abgelassen und der restliche Bereich mit Druckluft beaufschlagt. Durch die Bildung eines Filterkuchens bleibt die Ortsbrust stabil. Bei längeren Standzeiten muss gegebenenfalls die Abbaukammer öfters gefüllt und geleert werden, um die Standzeit des Filterkuchens zu gewährleisten.

2.2.5 SM mit Erddruckstützung (EBP - Schild)

Bei einem Erddruckschild ist ebenfalls die Abbaukammer vom Tunnel durch eine Druckwand getrennt. Die Stützung der Ortsbrust erfolgt beim Erddruckschild (engl. earth pressure balanced shield) mit Hilfe des ausgebrochenen Bodens. Der klassische Einsatzbereich liegt in feinkörnigen Böden mit hohem Bindemittelanteil, wobei im Kapitel 3.1 noch genauer auf das Anwendungsgebiet und die möglichen Erweiterungen eingegangen wird.

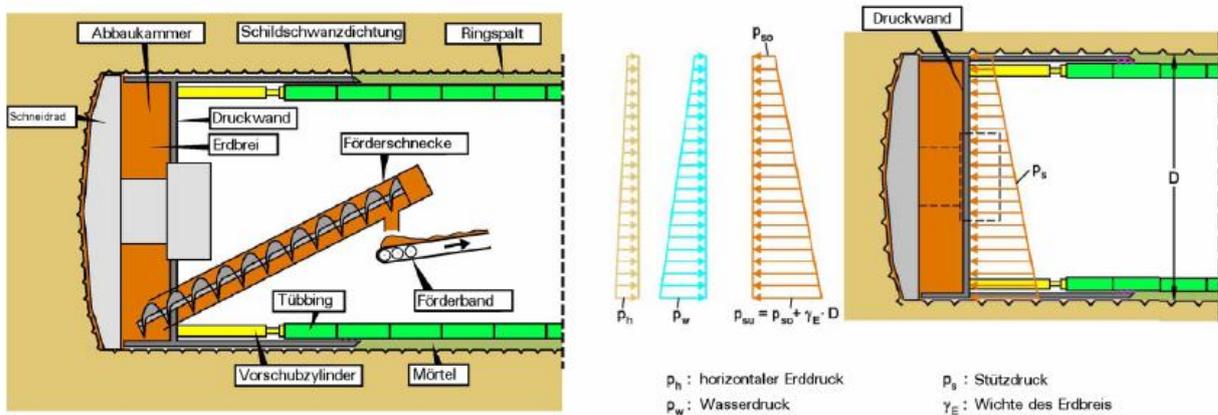


Abb. 2-7: Komponenten und Vortriebsverfahren eines Erddruckschildes¹⁵

Das Vortriebsverfahren ist in Abb. 2-7 dargestellt, wobei der Boden mit Hilfe eines mehr oder weniger vollflächigen Schneidrades, welches mit Schälmesser und Zähne bestückt ist, abgebaut wird. Der abgebaute Boden wird über eine druckhaltende Förderschnecke und eine anschließende Übergabestation auf ein Förderband und abschließend kontinuierlich oder diskontinuierlich zu Tage gefördert. Der Stützdruck kann sowohl durch Veränderung der Vortriebsgeschwindigkeit als auch

¹⁵ Wittke W., 2007, S.20.

2 Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen

durch Veränderung der Umdrehungszahl der Förderschnecke verändert werden.¹⁶ Um eine Kontrolle über den herrschenden Stützdruck in der Abbaukammer zu haben, sind an der Druckwand Erddruckmessdosen sowohl im Boden- als auch im Firstbereich angebracht. Eine genauere Beschreibung der Stützdruckmessung und -kontrolle erfolgt im Kapitel 3.2.1.

Um mit dem gelösten Erdbrei einen Stützdruck erzeugen zu können, muss dieser gewisse Eigenschaften aufweisen, auf diese im Kapitel 4.1 genauer eingegangen wird.

Bei einem allfälligen Werkzeugwechsel wird ebenfalls die im Kapitel 2.2.3 erläuterte Druckluftstützung angewendet. Dazu wird der Erdbrei in der Abbaukammer zur Gänze oder zum Teil ausgetragen und der restliche Bereich mit Druckluft beaufschlagt. Da es bei einer Erddruckstützung zu keiner Filterkuchenbildung kommt, muss die Ausblärsicherheit des Bodens nachgewiesen werden. Im Bedarfsfall kann auch vor einem allfälligen Werkzeugwechsel Bentonit in die Abbaukammer gepumpt werden. Durch Drehen des Schneidrades wird dieses auf der Ortsbrust verteilt und die Ortsbrust kann verschlossen werden.

¹⁶ Vgl. Vorlesungsunterlagen Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau, 2013, S.167-169.

3 Erddruckschild im Detail

Die Entwicklung der Erddruckschilde begann in den 1970er Jahren in Japan. Ausgegangen ist der Entwicklungsprozess von dem in bindigen Böden mit guten Plastizitätseigenschaften eingesetztem Blindschild. Wie der Name Blindschild besagt ist weder Sichtkontakt mit dem umgebenden Boden noch mit der Ortsbrust vorhanden. Vorerst wurde nicht mechanisch abgebaut, sondern es wurde die Viskosität der Böden ausgenutzt. Dadurch fließt der Boden bei ausreichendem Anpressdruck von alleine durch die Öffnungen in der stirnseitigen Druckwand.¹⁷

Durch den Einsatz in Europa, wo die Bodeneigenschaften nicht den idealen Bedingungen von Japan entsprechen, wurden neben mechanischer Lösemittel auch die Bodenconditionierung (siehe Kapitel 4) entwickelt.

3.1 Anwendungsgebiet

Der prädestinierte Einsatzbereich für Erddruckschilde sind Böden mit Feinanteilen ($< 0,06 \text{ mm}$) von über 30%. Optimale Voraussetzungen für den Einsatz bieten daher tonig-schluffige und schluffig-sandige Böden mit breiiger bis weicher Konsistenz. Außerhalb dieser Bodeneigenschaften sind diverse Conditionierungsmaßnahmen möglich um den Einsatzbereich der Erddruckschilde zu erweitern. Die möglichen Einsatzbereiche wurden durch Versuche diverser Experten und anhand von Projekterfahrungen aufgezeigt. Folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Einsatzbereiche und den zugehörigen Conditionierungsaufwand:

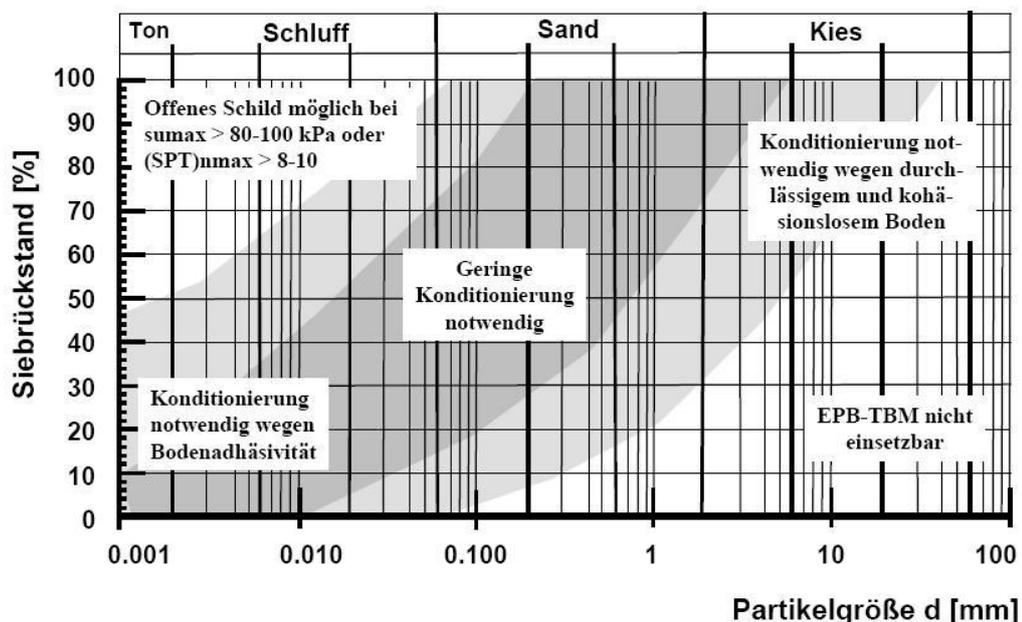


Abb. 3-1: Übersicht Einsatzbereich Erddruckschild¹⁸

¹⁷ Vgl. Maidl B., 2011, S.273.

¹⁸ Langmaack L., 2011, S.2.

3.2 Funktionsprinzip – Betriebsmodi

Das prinzipielle Funktionsprinzip wurde bereits in Kapitel 2.2.5 erwähnt. Im Folgenden wird daher explizit auf die Stützdruckmessung und -kontrolle bzw. auf die Massen-Volumen-Kontrolle und die diversen Betriebsmodi eingegangen.

3.2.1 Stützdruckmessung und -kontrolle

Ein wesentlicher Punkt bei einer aktiven Ortsbruststützung ist die Messung und Kontrolle des Stützdruckes. Durch die breiige, oft steife Konsistenz des Materials werden höhere Anforderungen an die Messung, Kontrolle und Regelung des Stützdruckes bei Erddruckschilden als bei Hydroschilden gestellt. Mit zunehmender Dichte und Reibungswinkel des Erdbreis werden auch die Schwankungen der gemessenen Stützdrücke größer.

Die Messung des Stützdruckes erfolgt mit Hilfe von Erddruckmessdosen, die meist auf der Druckwand installiert sind. Dabei wird der Messdruck über ein Druckkissen auf eine Flüssigkeit übertragen, die sich in einem geschlossenen System befindet. Der entstehende Hydraulikdruck wird über eine Membran eines elektrischen Aufnehmers übertragen, der die Spannung proportional zur Belastung umwandelt (siehe Abb. 3-2).¹⁹

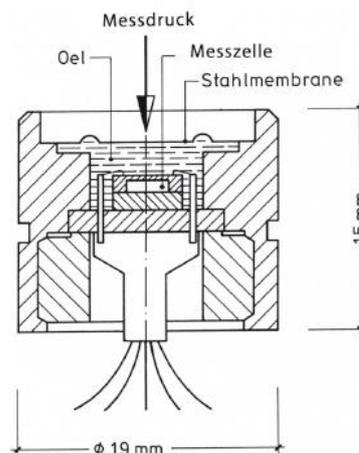


Abb. 3-2: Erddruckmessdose

Die Kontrolle des Stützdruckes erfolgt mit Hilfe von Softwareeinsatz. Neben der ständigen Anzeige der Messwerte im Steuerstand der TVM können die Daten auch über diverse Softwareprogramme ausgelesen und gespeichert werden. Mit Hilfe der Stützdruckkontrolle kann der Maschinenfahrer die Stützdrucksteuerung/-regelung vornehmen, indem er die Parameter Vortriebsgeschwindigkeit, Schneckendrehzahl oder die Druck-Volumen-gesteuerte Injektion der Konditionierungsmittel anpasst.

Der vorhandene Stützdruck soll dem erforderlichen Stützdruck entsprechen, welcher im Vorhinein in der Planung in Abhängigkeit von Geologie, Hydrologie und Bebauung je Vortriebsmeter festgelegt wird. Durch Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit und niedrigerer Schneckendrehzahl wird der

¹⁹ Vgl. Maidl B., 2011, S.274 ff.

3 Erddruckschild im Detail

vorhandene Stützdruck erhöht und umgekehrt. Sollte die erste Stellgröße (Schneckendrehzahl) außerhalb eines zuvor definierten Arbeitsbereiches liegen wird die zweite Stellgröße (Vortriebsgeschwindigkeit) je nach Erfordernis variiert. Ist auch diese Stellgröße außerhalb des definierten Arbeitsbereiches wird der Vortrieb gestoppt und der Schneckenschieber geschlossen.²⁰

Wie der Stützdruckanzeige in Abb. 3-3 entnommen werden kann wurde zur Zeit der Aufnahme im offenen Modus operiert. Der angezeigte Stützdruck im oberen Bereich der Abbaukammer von rund 0,21 bis 0,23 bar entsteht aufgrund von komprimierter Luft, die unter anderem durch die Schaumkonditionierung in die Abbaukammer gebracht wird. Der maximale Stützdruck wurde für diesen Vortrieb mit 2 bar angegeben.

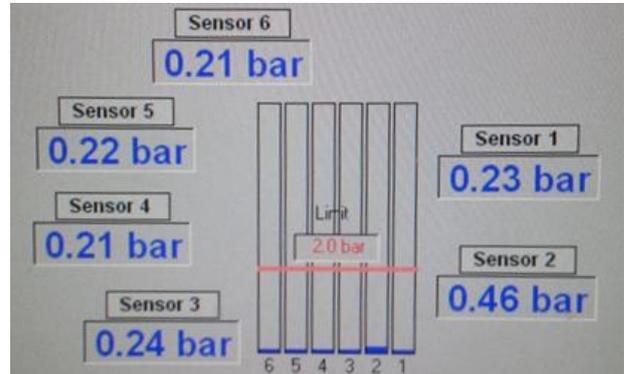


Abb. 3-3: Stützdruckanzeige Steuerstand - Green Line Underground Doha

Mit Hilfe von Softwareeinsatz sieht die Auswertung des vorhandenen Stützdruckes im Vergleich zum erforderlichen Stützdruck wie folgt aus.

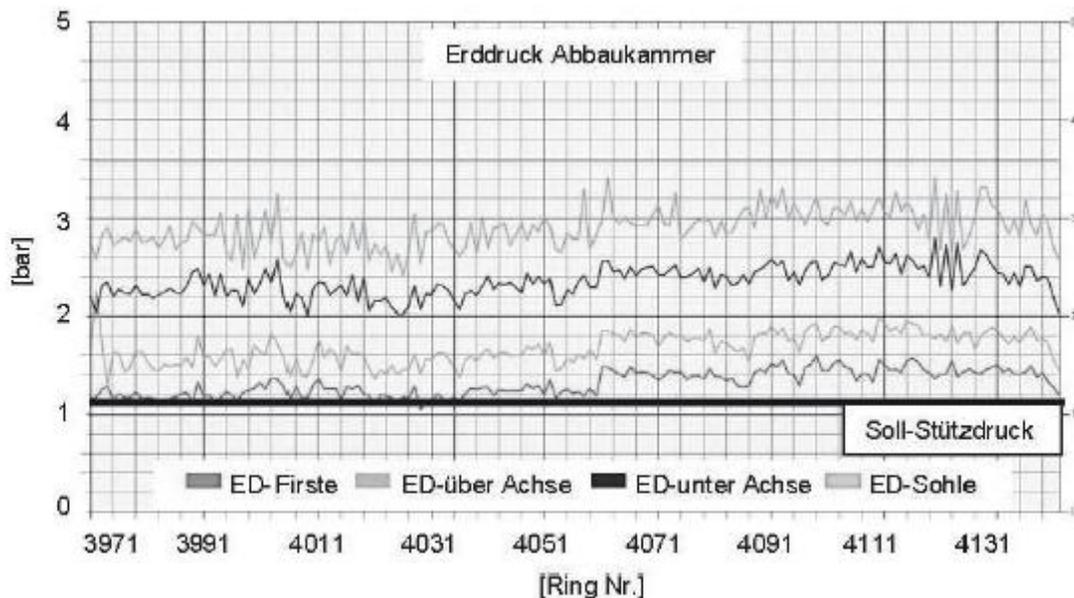


Abb. 3-4: Stützdruckverteilung mit Hilfe von Softwareeinsatz²¹

Der Druck in der Sohle ist sinngemäß aufgrund der Erddruckverteilung höher als in der Firste, wo der vorhandene Stützdruck dem erforderlichen entsprechen soll. Die Abbildung oben zeigt einen einigermaßen konstanten Verlauf des Stützdruckes, was unter anderem auf eine gute Einstellung der Bodenconditionierung zurückzuführen ist.

²⁰ Vgl. Maidl B., 2011, S.276.

²¹ Maidl B., 2011, S.276.

3.2.2 Massen - Volumen - Kontrolle

Bei früheren Entwicklungen von Erddruckschilden wurde eine reine Massenkontrolle zur Stabilitätskontrolle der Ortsbrust verwendet. Bei diesem Verfahren wird das tatsächliche Aushubvolumen bzw. die tatsächliche Aushubmasse mit den theoretischen Werten verglichen. Als Steuerelemente dienen wie zuvor die Vortriebsgeschwindigkeit und die Schneckendrehzahl. Dabei treten jedoch folgende Nachteile auf:²²

- keine Angabe über den Erdbrei in der Abbaukammer, nur quantitative Aussage ohne Sicherheitsfaktor möglich
- Massenbestimmung des Aushubmaterials ist aufwendig und ungenau
- qualitative Aussage über Ortsbrust erst nach großer Zeitverzögerung möglich
- bei gleichzeitiger Zugabe von Konditionierungsmitteln ist die Rückverfolgung der Massenherkunft ungenau (neue PLC Systeme berücksichtigen die Masse der zugeführten Konditionierungsmittel und ziehen diese von der gemessenen Aushubmasse ab)
- Auflockerungsfaktor und Quelleffekt des geförderteten Bodens sind weitere Unbekannte

Trotz der oben genannten Nachteile wird eine Massen - Volumen - Kontrolle dennoch ausgeführt, zwar nicht zur reinen Steuerung des Stützdruckes, jedoch zur Identifikation und Analyse von Mehrausbruch bzw. ungewolltem Überschnitt.

Neben der klassischen Bandwaage kommen heutzutage vor allem Ultraschall und Laser zur Messung des Aushubvolumen bzw. der Aushubmasse zum Einsatz. Beide Methoden haben jedoch den Nachteil, dass sie aufgrund ihrer Messung mit Strahlen relativ glatte Oberflächen benötigen. Dies kann in der praktischen Anwendung jedoch problematisch werden. Bei all den Messungenauigkeiten sind jedoch die Unsicherheiten der Sollwertbestimmung die größten Fehlerquellen. Baugrundparameter wie Trockendichte, Wassergehalt, Porenvolumen sowie verfahrenstechnische Annahmen unterliegen weit größeren Schwankungen als die Messgenauigkeit der Systeme.²³

3.2.3 Betriebsmodi

Ein wesentlicher Vorteil der Erddruckschilde im Vergleich zu anderen Tunnelvortriebsmaschinen ist der flexible Einsatz durch unterschiedliche Betriebsmodi und unterschiedlicher Förderung des Ausbruchmaterials. Prinzipiell können folgende Arten unterschieden werden:²⁴

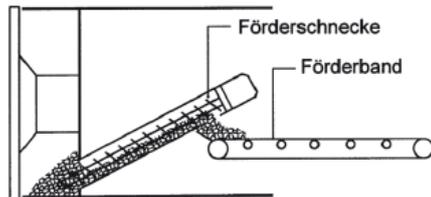
²² Vgl. Maidl B., 2011, S.278.

²³ Vgl. Maidl B., 2011, S.279.

²⁴ Vgl. Maidl B., 2011, S.283 ff.

1) **Betriebsmodus:** offener Modus

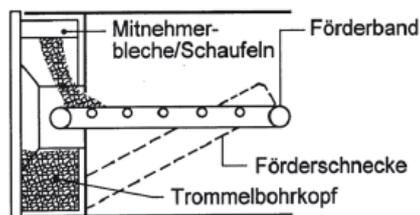
Förderart: Förderschnecke - Förderband



Im Fels oder standfesten Lockergestein operiert der Erddruckschild häufig im offenen Modus. Dies bedeutet es kommt zu keiner Stützung gegen Gebirgs- oder Wasserdruck. Das Ausbruchmaterial wird über die Schnecke aus der Abbaukammer gefördert und über ein Förderband auf der TVM abtransportiert. In wasserführenden Bereichen ist es während Stehzeiten möglich den Schneckenschieber zu schließen und die Abbaukammer mit Druckluft zu beaufschlagen. Vorteil des offenen Modus ist eine höhere Vortriebsgeschwindigkeit als im geschlossenen Modus bzw. im EPB - Modus.

2) **Betriebsmodus:** offener Modus

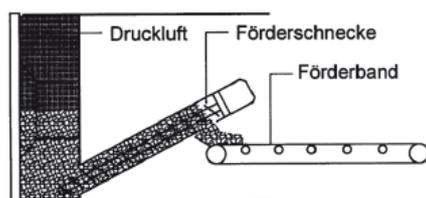
Förderart: Förderband



Bei dieser Art von Förderung wird im standfesten Gebirge mit beherrschbarem Wasserzufluss mit Hilfe eines im Zentrum angeordneten Förderbandes das Ausbruchmaterial gefördert. Es erfolgt abermals keine Stützung gegen Gebirgs- oder Wasserdruck. Sollten sich die Gebirgs- oder Wasserverhältnisse ändern kann das Förderband zurückgezogen und das Zentrum druckdicht verschlossen werden. In diesem Fall wird mit der druckhaltenden Förderschnecke das Abbruchmaterial gefördert.

3) **Betriebsmodus:** geschlossener Modus

Förderart: Förderschnecke - Förderband



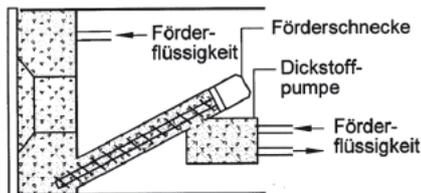
Im vorübergehend standfesten Gebirge kann bei Bergwasserzufluss vom offenen Modus mit Hilfe von Druckluftbeaufschlagung ein geschlossener Modus erzeugt werden. Mit Hilfe der Druckluft kann Poren- und Kluftwasser verdrängt und somit der Wasserzufluss reduziert werden.

3 Erddruckschild im Detail

Verfahrenstechnische Schwierigkeiten können durch unkontrollierbare Ausbläser durch die Förderschnecke entstehen. Von einer ausreichende Abdichtung kann nur in Ton und stark verwittertem Fels ausgegangen werden. Desweiteren besteht ohne ausreichende Bodenconditionierung mit Schaum eine erhöhte Verklebungsgefahr.

4) **Betriebsmodus:** geschlossener Modus

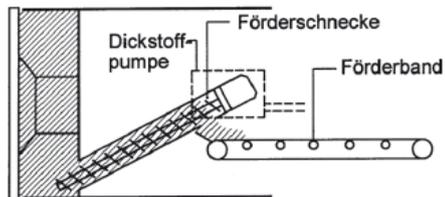
Förderart: Förderschnecke - Dickstoffpumpe - hydraulische Förderung



Durch den Einsatz eines geschlossenen Fördermoduls kann die Gefahr von Ausbläsern an der Förderschnecke verhindert werden. Hierbei haben sich vor allem hydraulische Fördermoduls bewährt, die sowohl mit Dickstoffpumpen als auch mit Kreiselpumpen ausführbar sind. Das flüssige Fördermedium kann dabei sowohl direkt in die druckbeaufschlagte Abbaukammer als auch in einem speziell hinter der Förderschnecke angeordneten Spülkasten eingebracht werden. Ein Walzenbrecher sollte, um das Ausbruchmaterial für den Pumpvorgang zu verkleinern, dem Förderkreislauf vorgeschaltet werden

5) **Betriebsmodus:** EBP Modus

Förderart: Förderschnecke - Förderband oder Förderschnecke - Dickstoffpumpe



Beim EBP Modus kommt es wie beim geschlossenen Modus zu einer Stützung gegen Gebirgs- und Wasserdruck, jedoch wird lediglich der gegebenenfalls konditionierte Erdbrei als Stützmedium verwendet. Die Konditionierung des Erdbreies ist ein wesentlicher Faktor im EBP - Modus und wird im Kapitel 4 genauer erläutert.

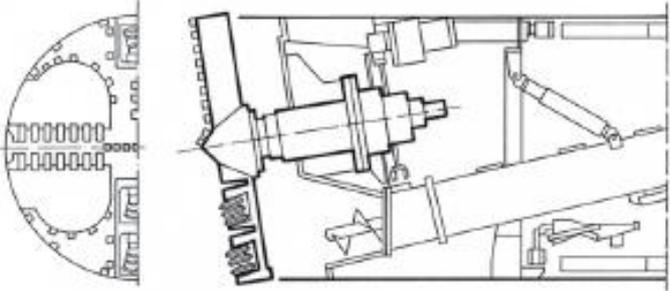
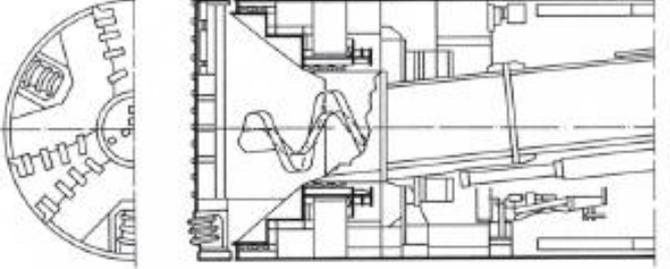
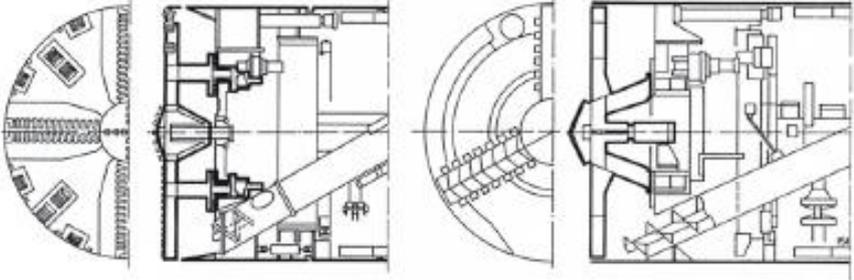
Vorsicht ist bei der Definition von in Fels eingesetzten Schilden mit Schneckenförderung (z.B. Kanaltunnel) geboten. Zwar werden diese auch als Erddruckschilde bezeichnet, haben jedoch streng genommen aufgrund von äußerst aufwändigen Konditionierungsmaßnahmen nicht im EBP - Modus agiert.

3.3 Wesentliche Bauteile eines Erddruckschildes

3.3.1 Schneidrad

Grundsätzlich kann zwischen einem offenen und einem geschlossenen Schneidrad (engl. cutter head) unterschieden werden. Geschlossene Schneidräder werden vor allem in nicht standfesten, kohäsionslosen Böden eingesetzt. Durch das vollflächige Schneidrad wird die Ortsbrust gestützt und es wird verhindert, dass größere Bruchkörper aus dem Bodengefüge in die Abbaukammer gleiten. Dem gegenüber steht der Nachteil der ungleichmäßigen Verteilung des Stützdruckes auf die Ortsbrust. Desweiteren stimmt der an der Druckwand gemessene Erddruck nicht unbedingt mit jenen vor dem Schneidrad überein. Das Öffnungsverhältnis liegt üblicherweise zwischen 25 und 35%. Die Öffnungen müssen jedenfalls groß genug sein um ein Verkleben dieser zu verhindern.²⁵

Bei den Antriebs- und Lagerungsarten können folgende Typen unterschieden werden:

Zentralwellenantrieb		
Schneidradtrommel		
Mittelfreier Antrieb		

Tab. 3-1: Antriebs- und Lagerungsarten²⁶

²⁵ Vgl. Maidl B., 2011, S.86.

²⁶ Vgl. Maidl B., 2011, S.288.

3 Erddruckschild im Detail

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Antriebs- und Lagerungsarten:

	Vorteile	Nachteile
Zentralwellenantrieb	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Konstruktionsart • geringe Behinderung der Strömungs- und Konditionierungsprozesse • Dichtungen sind zugänglich 	<ul style="list-style-type: none"> • flache Neigung des Schneckenförderer führt zu einem längeren Schild • Durchführungen durch drehendes Schneidrad aufwändig • bei größeren Durchmesser steigt der Antriebswellendurchmesser • Materialöffnungen im Zentrum nicht möglich (Material muss vom Schneidrad nach außen geführt werden)
Schneidradtrommel	<ul style="list-style-type: none"> • stabile Führung des Schneidrades bei unterschiedlichen Anpressdrücken • Einsatz schwerer Bohrköpfe (Festgestein) möglich • hohe Drehmomente erzeugbar 	<ul style="list-style-type: none"> • bei vollständig mitrotierender Abbaukammer Gefahr des Verklebens der Kammer • bei großen Durchmesser hohe Umfangslängen der Dichtungen, die durch Fettschmiersysteme abzudichten sind • äußere Dichtungssysteme sind nicht zugänglich
mittenfreier Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> • stabile Führung des Schneidrades bei unterschiedlichen Anpressdrücken • geringe Verklebungsgefahr • hohe erzeugbare Drehmomente • Unterstützung des Konditionierungsprozesses durch Knetwirkung der Stützträger 	

Tab. 3-2: Vor- und Nachteile der Antriebs- und Lagerungsarten²⁷

²⁷ Vgl. Maidl U., 1995, S.12 ff.

3.3.2 Abbaukammer

Als Abbaukammer (engl. chamber) wird der Bereich zwischen Schneidrad und Druckwand bezeichnet. In der Abbaukammer wird das Ausbruchmaterial zu einem plastischen Erdbrei konditioniert, sofern dies noch nicht vor dem Schneidrad geschehen ist. Die Abbaukammer kann sowohl fest in dem Schild integriert sein als auch mitrotierend (engl. drum - type) ausgeführt werden. Letztgenannte Ausführung erhöht jedoch das Risiko eines Verklebens der Kammer.

Die Abbaukammer muss auf jeden Fall, um Materialnester zu vermeiden, strömungsgünstig konstruiert werden. Wesentlich für die Konstruktion ist neben der Position des Schneckenförderers auch die Position der Schleusen. Die Länge der Kammer hat neben der Vortriebsgeschwindigkeit direkten Einfluss auf die Verweildauer des Erdbreis in dieser. Um eine bessere Konditionierung des Ausbruchmaterials zu erreichen können folgende Installationen vorgenommen werden:²⁸

- Agitatoren an der Schneidradrückseite
- Statoren an der Druckwand
- Rührwerk im Zentrum der Druckwand

Vorsicht ist bei größeren Schilddurchmessern vor allem im Zentrum geboten, da die Umlaufgeschwindigkeit der Agitatoren und Statoren zur Schneidradmitte abnimmt besteht die Gefahr des Verklebens.

3.3.3 Schneckenförderer

Der Schneckenförder (engl. screw conveyor) ist ein wesentlicher Bauteil bei Erddruckschilden und hat folgende Aufgaben:²⁹

- Materialförderung aus druckbeaufschlagter Abbaukammer und Transport in atmosphärischen Tunnel
- Abdichtung gegen druckhaftes Grundwasser bei wasserdurchlässigen Böden
- Steuerung des Stützdruckes

Zur Materialförderung sind am besten tiefliegende Schneckenförder geeignet, da der Erdbrei aufgrund der Schwerkraft zur Öffnung gedrängt wird. Bei zentralen Schnecken muss zuerst die Schwerkraft überwunden werden um das Material fördern zu können. Häufig kann, um eine bessere Materialförderung zu erreichen, die Förderschnecke über Vorschubzylinder tiefer in die Abbaukammer geschoben werden.

Die Abdichtung gegen drückendes Grundwasser kann mit Hilfe von verschiedenen Verschluss- und Dichtungssystemen erreicht werden. Folgende Abbildung gibt einen Überblick über die möglichen Systeme, von technisch einfachen Schieberkonstruktionen bis hin zu aufwändigen Dichtungssystemen,

²⁸ Vgl. Maidl B., 2011, S.290.

²⁹ Vgl. Maidl B., 2011, S.290.

3 Erddruckschild im Detail

bei denen mit Hilfe der Bildung eines Dichtungspropfens eine wasserundurchlässige Barriere erzeugt wird.

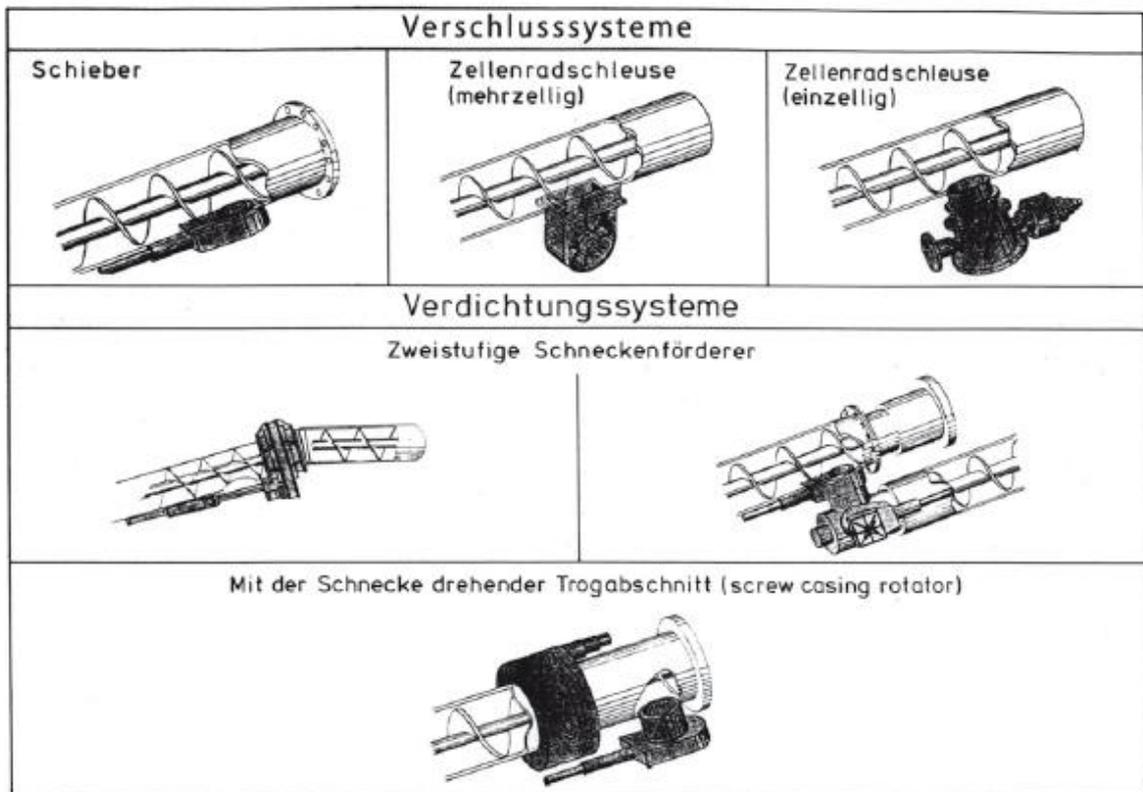


Abb. 3-5: Verschluss- und Dichtungssysteme Schneckenförderer³⁰

Die Schnecke kann mit oder ohne Seele ausgeführt werden. Letztgenannte Ausführung wurde vereinzelt verwendet, um den Grenzdurchmesser zu erhöhen. Negativ ist jedoch die schwächere Konstruktion, wodurch Schneckenförderer mit Seele heute Standard sind. Die Ganghöhe beträgt in etwa 50% des Schneckendurchmessers, wodurch eine bessere Dichtwirkung des Bodens in der Schnecke erzeugt werden kann. Das mögliche Größtkorn ergibt sich somit zu 40% des lichten Durchmessers.³¹ Eine Zugabe von Schmiermitteln wie Bentonit, Wasser oder Schaum ist über Injektionsdüsen möglich.

³⁰ Maidl B., 2011, S.292.

³¹ Vgl. Maidl B., 2011, S.107.



Abb. 3-6: Schneckenwendel mit Seele - Green Line Underground Doha



Abb. 3-7: Schneckenwendel ohne Seele (seelenlos)³²

3.3.4 Schaumkonditionierung

Die Schaumkonditionierung (engl. soil conditioning with foam) ist eine häufige Art der Bodenkonditionierung bei Erddruckschilden. Zweck und Ausführung dieser werden im Kapitel 4 genauer erläutert, im Folgenden soll vor allem auf die Schaumgeneratoren und die Schaumanlage eingegangen werden.

Um Schaum erzeugen zu können sind prinzipiell folgende drei Medien notwendig:

- Wasser
- Tensid / Polymer (genauere Erläuterung siehe Kapitel 0 und 0)
- Luft

Die drei genannten Medien haben jeweils unterschiedliche Wege in den Tunnel und zur Schaumproduktion. Wasser wird über vorhandene Versorgungsleitungen direkt in den Tunnel transportiert und so der Schaumproduktion zugeführt. Tensid ist in vorhandenen Vorratstanks direkt auf der TVM gelagert und wird über gesonderte Pumpen (Abb. 3-8 – rot) angesaugt. Nach dem Mischen der Medien Wasser und Tensid in einer hersteller- und geologiebedingten Konzentration zu einem Wasser-Tensid-Gemisch, dem sogenannten Liquid, kann das Produkt dem Schaumgenerator (Abb. 3-8 – blau) zugeführt werden. An dieser Stelle wird dem Gemisch eine über einem Kompressor verdichtete Luft zugegeben. Die wesentlichen Bauteile und Leitungen können folgender Abbildung entnommen werden.

³² . Maidl B., 2011, S.107.

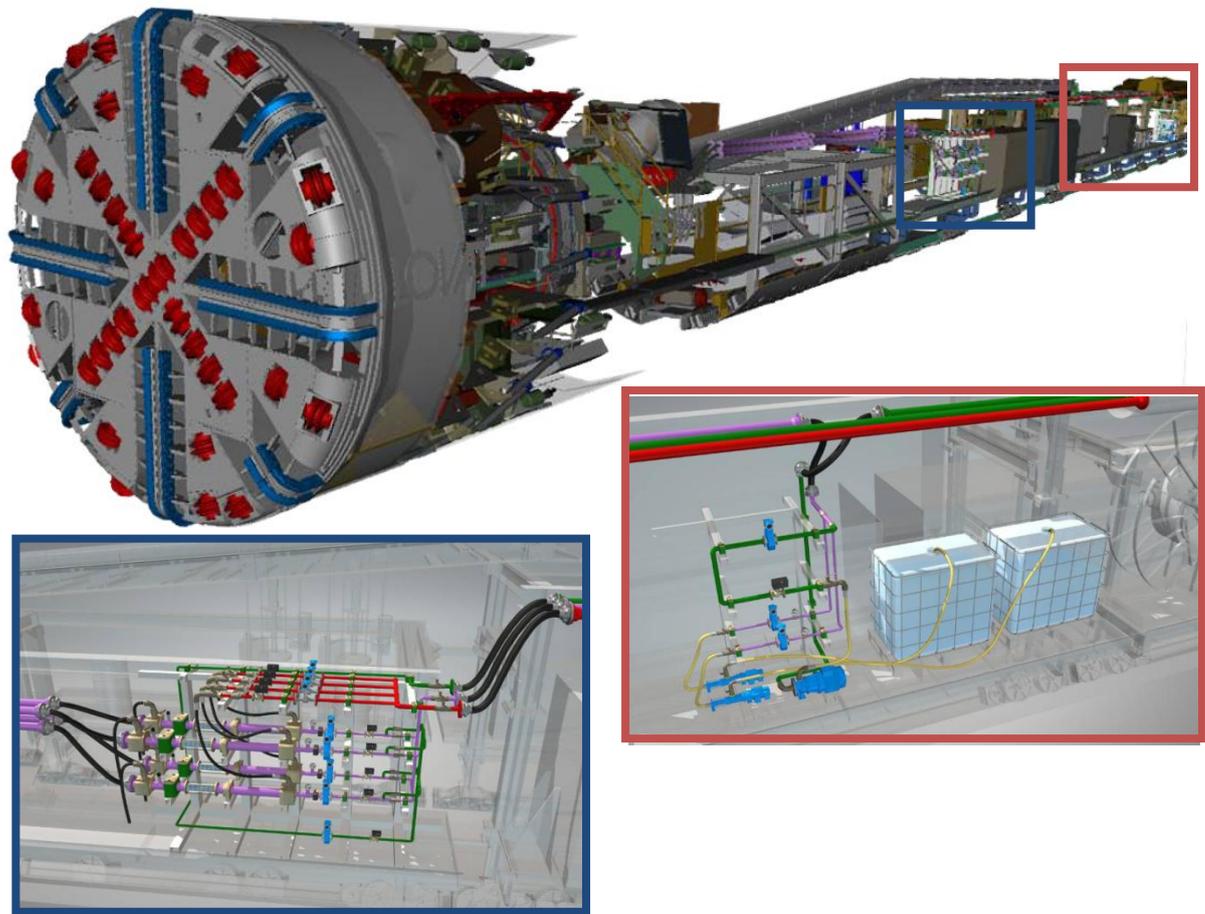


Abb. 3-8: Digitales Model einer praxisgebräuchlichen Installation einer Schaumlanze für Erddruckschilder auf dem Nachläufer. Details: Tensidbehälter und Förderpumpe (rot) und Schaumgeneratoren (blau)³³

An den Störkörper der Schaumlanze bildet sich ein flüssigkeitsreiches Lamellengefüge. Durch die einströmende Luft entstehen unendlich viele Blasen, die in Abhängigkeit vom vorhandenen Innendruck verschiedene Blasengrößen ergeben. Im Bereich der Störkörper und nach dem Austritt verbinden sich die Schaumblasen zu einem Schaumgefüge, wobei bei einem Überschreiten des Blaseninnendruckes dieses Gefüge wieder zerstört werden kann. Die erzielbare Blasengröße ist neben der chemischen Zusammensetzung der schaumbildenden Flüssigkeit, der Lineargeschwindigkeit des Liquid und der Luft, der Störkörpergröße und -form auch von den Druckverhältnissen vor und nach der Schaumlanze abhängig.³⁴

Im Folgenden werden zwei Typen von Schaumgeneratoren, die bereits bei Erddruckschilden im Einsatz waren, genauer erläutert. Die Schaumerzeugung beruht bei beiden Systemen auf der oben erläuterten Vorgangsweise. Im Kapitel 4.5.3 werden die unterschiedlichen Schaumergebnisse der erläuterten Schaumlanzen am Beispiel Green Line Underground Doha dargelegt.

³³ Galli, 2009, S.18.

³⁴ Vgl. Maidl U., 1995, S.90 ff.

3 Erddruckschild im Detail

Bei der Schaumlanze 1 wird das Liquid über eine 1/4" - Leitung transportiert. Durch den Kontakt mit der Prallplatte verteilt sich die Flüssigkeit radial, wo sie anschließend mit der Luft zum Sieb (Störkörper) transportiert wird. Durch die, mit Hilfe des Siebes, entstandenen Verwirbelungen entsteht Schaum. Dieser wird für eine mögliche Qualitätsverbesserung noch durch das querschnittsverändernde Stahlrohr (Dekompressions- und Kompressionsstrecke) transportiert. Abschließend gelangt der Schaum über 2" Leitungen zum Schneidrad bzw. in die Abbaukammer oder in die Förderschnecke.³⁵



Abb. 3-9: Schaumlanze "Bubble Tube" mit Sieb als Störkörper - Green Line Underground Doha

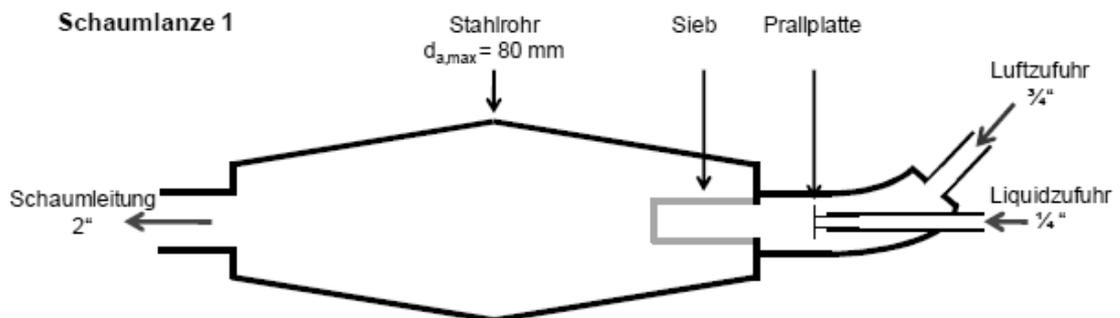


Abb. 3-10: schematische Darstellung Schaumlanze mit Sieb als Störkörper³⁶

³⁵ Vgl. Budach, 2012, S.75.

³⁶ Budach, 2012, S.75.

3 Erddruckschild im Detail

Bei der Schaumlanze 2 werden die drei Medien im vorderen Bereich des Schaumgenerators vermischt. Anschließend werden die vermischten Medien durch ein Sieb und Glaskugeln geleitet, wobei sie verwirbelt werden und Schaum entsteht. Am Ende der Schaumlanze fließt der Schaum erneut durch ein Sieb und durch eine 2" - Leitung in die zu konditionierenden Bauteile (Schneidrad, Abbaukammer oder Schneckenförderer).³⁷



Abb. 3-11: Schaumlanze mit Glaskugeln als Störkörper - Green Line Underground Doha

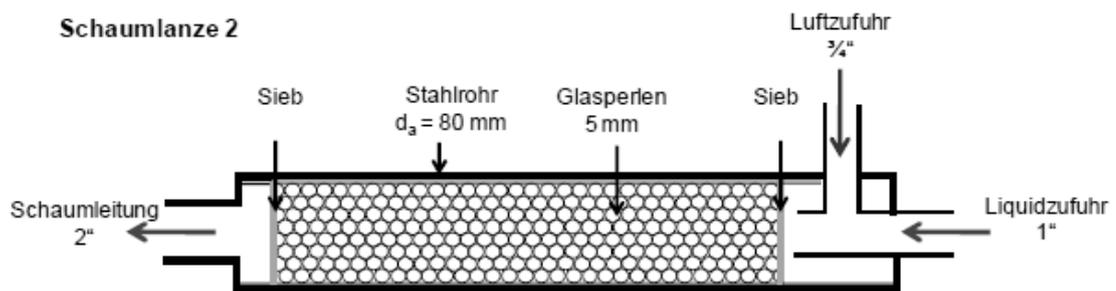


Abb. 3-12: schematische Darstellung Schaumlanze mit Glaskugeln als Störkörper³⁸

³⁷ Vgl. Budach, 2012, S.75.

³⁸ Budach, 2012, S.75.

3.4 Vor- und Nachteile

Ca. 90% der eingesetzten Schildmaschinen mit aktiver Ortsbruststützung werden als Erddruckschild ausgeführt. Dies geschieht nicht ohne Hintergrund, denn im Vergleich zu Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust (z.B. Hydroschild) haben Erddruckschilder folgende Vorteile:³⁹

- durch Verzicht auf die Bentonitsuspension Entfall von
 - Förderkreislauf für Stütz- und Transportsystem
 - Separationsanlage zur Aufbereitung des Ausbruchmaterials
- kleinere Baustelleneinrichtungsfläche notwendig (keine Separationsanlage)
- einfachere Verfahrenstechnik
- rasche Änderung der Betriebsmodi möglich – Änderung in Abhängigkeit der Geologie
- kostengünstiger

Dem gegenüber haben Erddruckschilder gegenüber Hydroschilder folgende Nachteile:⁴⁰

- höhere Schwankungen der gemessenen Stützdrücke an der Druckwand
- keine präzise Stützdruckverteilung der Ortsbrust möglich
- nicht so schneller Einstieg in die Abbaukammer möglich
- höherer Verschleiß der Abbauwerkzeuge

³⁹ Vgl. Budach, S.1.

⁴⁰ Vgl. Budach, S.1.

4 Bodenconditionierung

4.1 Anforderungen an das Stützmaterial

Der im Kapitel 3.2.1 erläuterte Stützdruck wird durch die Druckwand auf den Erdbrei und anschließend auf die Ortsbrust übertragen. Im Gegensatz zur einfachen Betrachtung des hydraulischen Stützdruckes bei Hydroschildern bzw. des pneumatischen Druckes bei Druckluftstützung ist bei Erddruckschildern eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Die Stützdruckübertragung eines wassergesättigten Bodens wird durch folgende bodenmechanische Gleichung wiedergegeben:⁴¹

$$\sigma = \sigma' + u = \sigma' + (u_0 + \Delta u) \quad (1)$$

mit:

σ	=	totale Spannungen (entspricht den übertragenen Spannungen der Druckwand)
σ'	=	effektiven Spannungen (über Korngerüst übertragene Spannungen)
u	=	Porenwasserdruck
u_0	=	Grundwasserdruck
Δu	=	Porenwasserüberdruck

Um den erforderlichen Stützdruck übertragen zu können sollten daher folgende Eigenschaften des Bodenmaterials gegeben sein:⁴²

1) geringe Wasserdurchlässigkeit

In sehr schwach wasserdurchlässigen Böden ($k < 10^{-8}$ m/s) erfolgt die Stützdruckübertragung in einem geschlossenen System. Dabei muss neben der geringen Wasserdurchlässigkeit der Ortsbrust auch ein wasserundurchlässiger Schneckenförderer gegeben sein. Durch die fehlende Entweichmöglichkeit des Wassers steigt bei Erhöhung der Spannung der Porenwasserüberdruck, wobei die effektiven Spannungen annähernd gleich bleiben. Ist der Abstand der Bodenteilchen hingegen so groß, dass sich diese nicht mehr berühren, erfolgt die Spannungsübertragung ausschließlich über den Porenwasserdruck. Die Voraussetzungen für das geschlossene System sind in der Regel nur in wasserundurchlässigen Tonen gegeben.

Gegenteiliges System der Stützdruckübertragung erfolgt in stark durchlässigen Böden ($k > 10^{-4}$ m/s). Bei Erhöhung der totalen Spannungen steigen automatisch auch die effektiven Spannungen, wobei der Porenwasserdruck verschwindend klein bleibt. Selbst bei einem wasserundurchlässigen Schneckenförderer steigt der Porenwasserdruck nicht, da das Wasser über die Ortsbrust entweichen kann. Durch die Erhöhung der effektiven Spannungen kommt es zu einer Volumenänderung in der Abbaukammer, dadurch zu einer Verdichtung des Materials und folglich zu einem erhöhten Energieaufwand. Desweiteren kann durch den fehlenden Porenwasserdruck kein Gleichgewicht mit

⁴¹ Vgl. Vorlesungsunterlagen Grundbau und Bodenmechanik, 2013, Kapitel 6, S.16 ff.

⁴² Vgl. Maidl U., 1995, S.27 ff.

dem anstehenden Grundwasserdruck hergestellt werden, wodurch das Wasser durch die Abbaukammer in den Schneckenförderer fließt. Selbst Verschluss- und Dichtungssysteme (siehe Kapitel 3.3.3) haben hierbei keine Auswirkungen auf den Spannungszustand des Bodens, sie verhindern lediglich ein Eindringen des Wassers in den Schneckenförderer.

In schwach durchlässigen Böden ($k = 10^{-8}$ bis 10^{-6} m/s) stellt sich ein weiteres System der Stützdruckübertragung ein. Bei Erhöhung der totalen Spannungen steigen im ersten Moment sowohl die effektiven Spannungen als auch der Porenwasserdruck. Mit der Zeit lagern sich die Spannungen vom Porenwasserdruck auf die effektiven Spannungen um. Diese Dauer wird als Konsolidierungszeit bezeichnet und sie ist neben der Wasserdurchlässigkeit auch von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig.

Durch die oben genannten Systeme der Stützdruckübertragung kann festgestellt werden, dass schon bei durchlässigen Böden ohne Zusatzmaßnahmen (z.B. Bodenconditionierung) Schwierigkeiten auftreten können.

2) gute Verformbarkeit und ausgeprägtes Federvermögen

Eine gute Verformbarkeit des Materials hat wesentliche Vorteile. Zum einen ermöglicht sie eine gleichmäßigere Stützdruckverteilung an der Ortsbrust und ein gleichmäßiges Rotieren des Schneidrades mit möglichstem niedrigem Energieverbrauch, zum anderen verhindert sie ein Verkleben des Schneidrades, da aufgrund des geringeren Druckgefälles im oberen Bereich der Abbaukammer das Material zum Schneckenförderer gequetscht werden muss (siehe folgende Abbildung).

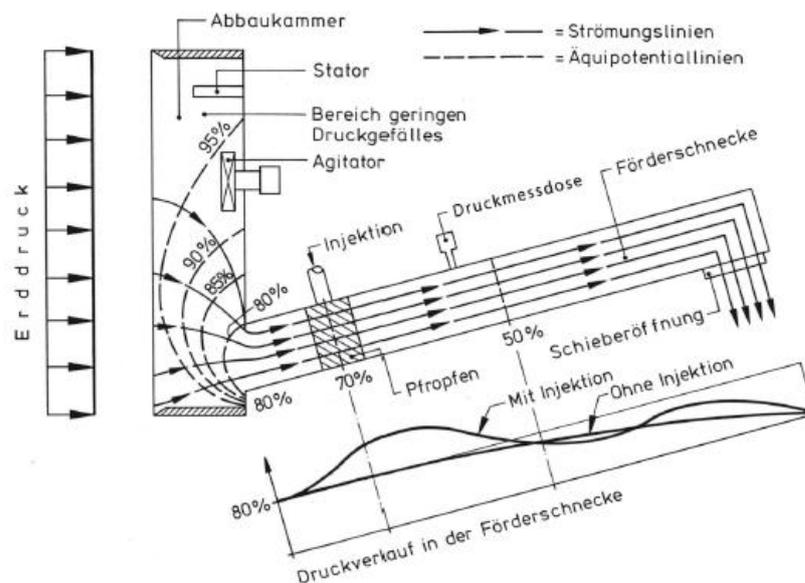


Abb. 4-1: Strömungsbild für die Fließbewegung des Bodens in der Abbaukammer⁴³

⁴³ Maidl U., 1995, S.40.

3) geringe Abrasivität und Klebrigkeit

Geringere Abrasivität ist nicht für die Stützdruckübertragung notwendig, vielmehr jedoch für die Verfahrenstechnik und die Wirtschaftlichkeit eines maschinellen Vortriebes. Auch hierbei kann durch geeignete Bodenconditionierung ein verbessertes Verhalten erzeugt werden.

Verklebungen beeinflussen ebenfalls stark den verfahrenstechnischen und baubetrieblichen Ablauf. Vor allem halbfeste bis steife Tone sind einem erhöhten Verklebungspotential ausgesetzt. Im Zuge einer Dissertation wurde festgestellt, dass unabhängig von mineralischen Untersuchungen vor allem die Konsistenzgrenzen nach Atterberg und der Wassergehalt erheblichen Aufschluss über die Klebrigkeit liefern.⁴⁴

$$I_p = w_l - w_p \quad (2)$$

$$I_c = \frac{w_l - w}{I_p} \quad (3)$$

mit:

- I_c = Konsistenzzahl
- I_p = Plastizitätszahl
- w = Wassergehalt
- w_l = Fließgrenze
- w_p = Ausrollgrenze

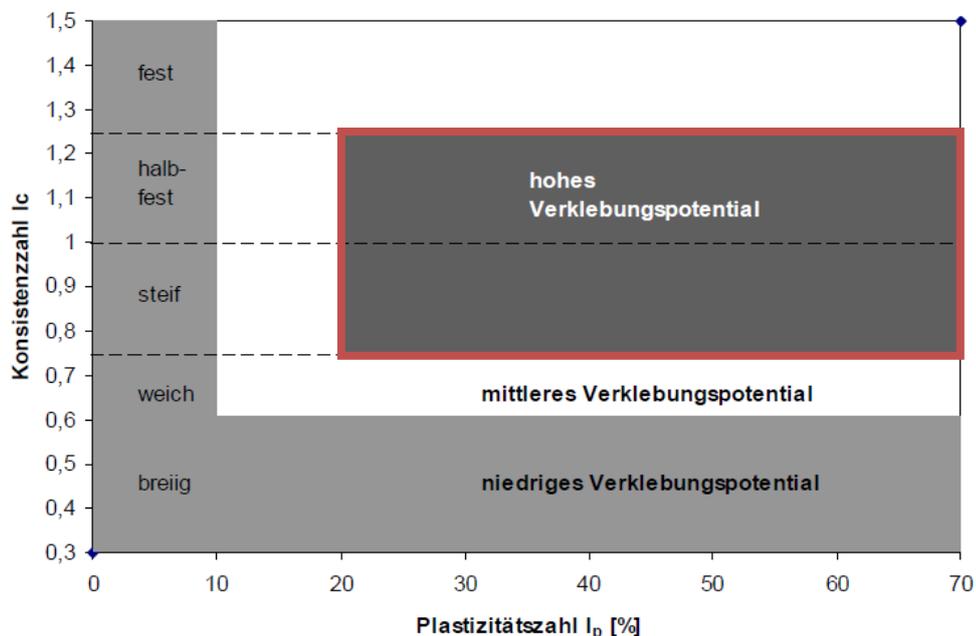


Abb. 4-2: Beurteilung der Klebrigkeit von Böden⁴⁵

⁴⁴ Vgl. Vorlesungsunterlagen Grundbau und Bodenmechanik, 2013, Kapitel 4, S.37 ff.

⁴⁵ Vorlesungsunterlagen Grundbau und Bodenmechanik, 2013, Kapitel 4, S.42.

4.2 Ziele der Bodenconditionierung

Wie bereits erwähnt soll der Boden gewisse Randbedingungen aufweisen, die die meisten gewachsenen Böden jedoch nicht erfüllen. Daher ist eine Bodenconditionierung, d.h. eine Aufbereitung des Erdbreis zu einem Stützmedium mit den gewünschten Randbedingungen, notwendig.

Die genannten Anforderungen an den Boden müssen dabei in folgenden Bauteilen eines Erddruckschildes gegeben sein:

- vor dem Schneidrad, d.h. an der Ortsbrust
- in der Abbaukammer
- im Schneckenförderer

Folgende Ziele sind dabei in Abhängigkeit des anzutreffenden Bodens zu erreichen:^{46,47}

- Stützung der gesamten Ortsbrust mit homogenem Material.
- Reduktion der Wasserdurchlässigkeit zu schwach bis gering durchlässigen Böden um eine Versiegelung der Ortsbrust zu erreichen und eine Stützdruckübertragung in einem mehr oder weniger geschlossenen System zu ermöglichen.
- Durch das zusätzliche Volumen des Conditionierungsmittels kommt es zu einer Reduktion der Materialdichte des Stützmaterials, was sich in einem größeren Abstand der Bodenteilchen widerspiegelt.
 - Bei bindigen Böden werden durch den größeren Abstand der Bodenteilchen die elektrostatischen Attraktionskräfte vermindert.
 - Bei nichtbindigen Böden sinkt der innere Reibungswinkel mit größer werdendem Abstand der Bodenteilchen. Dadurch reduziert sich das Antriebsdrehmoment und somit der Energieverbrauch des Schneidrades und des Schneckenförderers. Auch der Materialverschleiß wird durch diese Wirkung positiv beeinflusst.
- Durch die Zugabe von Conditionierungsmittel kann die Kompressibilität bzw. das Federvermögen des Stützmaterials erhöht werden. Dadurch ist es selbst bei verfahrensbedingten unterschiedlichen Volumenströmen in und aus der Abbaukammer möglich eine gleichmäßigere und konstantere Stützdruckverteilung zu erreichen.
- Durch die Zugabe von bindigen Material in einen nichtbindigen Boden können bildsame Eigenschaften und das Verformungsverhalten positiv beeinflusst werden.
- Durch die Zugabe von chemischen Substanzen in adhäsive Böden kann das Verklebungspotential verringert werden.

⁴⁶ Vgl. Maidl U., 1995, S.47 f.

⁴⁷ Vgl. Budach, 2011, S.14 f.

- Der Spalt zwischen Schild und anstehendem Boden soll durch das konditionierte Material gestützt und die entstehende Reibung reduziert werden.

All die oben genannten Ziele können teilweise mit mechanischer Konditionierung, großteils jedoch mit Konditionierungsmittel erreicht werden. Diese werden im Folgenden genauer erläutert.

4.3 Mechanische Konditionierung

Unter mechanischer Konditionierung versteht man das Einwirken der Agitatoren, Statoren und des Rührwerkes in der Abbaukammer auf den Erdbrei (siehe auch Kapitel 3.3.2). Bei bindigen Böden können durch den Knet- und Mischprozess mit Hilfe von Scherkräften bestehende Bindungen der Bodenteilchen aufgelöst werden. Jedoch können auch die wirkenden Normalspannungen – aufgrund des Stützdruckes – den Abstand zwischen den Bodenteilchen wieder verringern und somit zu einem gegenteiligen Effekt führen.

Bei nichtbindigen Böden ist die alleinige Knetwirkung nicht wirkungsvoll, da bei gleichzeitiger Wirkung von Scher- und Normalkräften eine Verdichtung des Materials erfolgt und somit der inneren Reibungswinkel steigt. Durch diesen Effekt würde es zu einem erhöhten Antriebsmoment und somit zu einem erhöhten Energieverbrauch des Schneidrades und des Schneckenförderers kommen.

Aus diesen Gründen sind üblicherweise Konditionierungsmittel zu verwenden, die mit Hilfe der Misch- und Rührwerkzeuge spätestens in der Abbaukammer mit dem Erdbrei vermischt werden. Idealerweise erfolgt die Konditionierung bereits vor der Abbaukammer an der Ortsbrust.

4.4 Konditionierungsmittel

Die Art und Aufgabe der Konditionierungsmittel variiert mit der anzutreffenden Geologie. Identisch bleiben jedoch immer die Ziele (siehe Kapitel 4.2). Heutzutage können ebenfalls Tonböden oder Böden mit einem Feinkiesanteil von mehr als 30% mit einem Erddruckschild vorgetrieben werden, jedoch sind zur Erweiterung des Einsatzgebietes Konditionierungsmittel erforderlich. In der folgenden Abbildung sind in Abhängigkeit der Sieblinien mögliche Konditionierungsbereiche ersichtlich. Zusätzlich sind in der folgenden Tabelle die erforderlichen Voraussetzungen und die möglichen Konditionierungsstoffen gegeben.

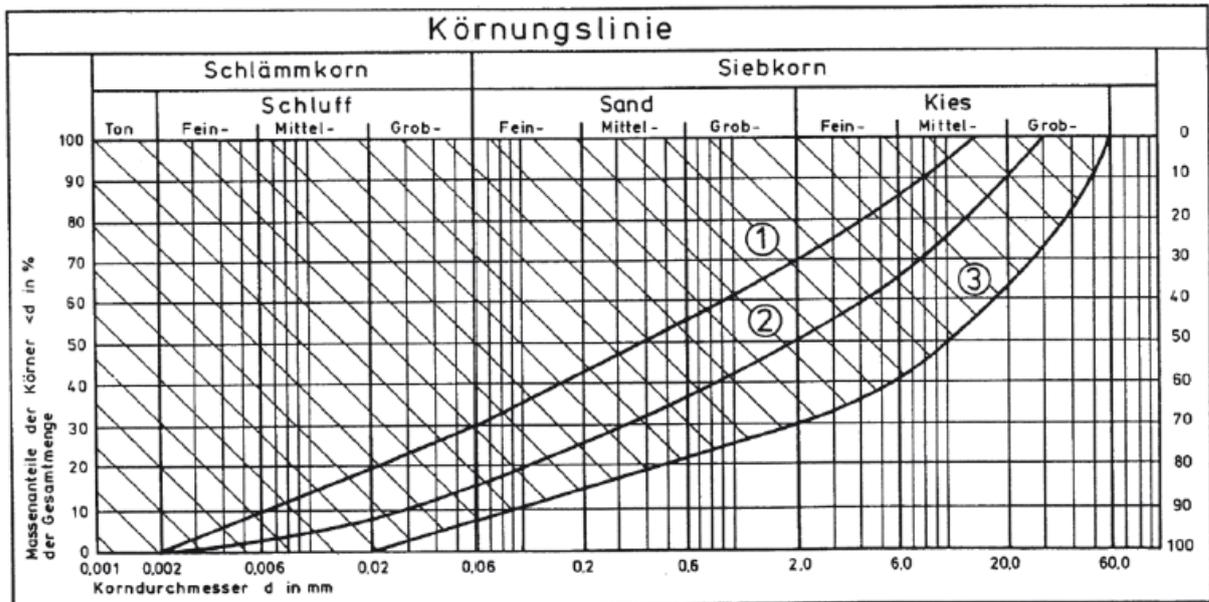


Abb. 4-3: Einsatzbereich Erddruckschild⁴⁸

Bereich	Voraussetzungen	Konditionierungsstoff
1	Ic Stützmedium = 0,4-0,75	Wasser Ton- und Polymersuspensionen Tensidschäume
2	$k < 10^{-5}$ m/s Wasserdruck < 2 bar	Ton- und Polymersuspensionen Polymerschäume
3	$k < 10^{-4}$ m/s kein Grundwasserdruck	High-Density Slurrys Hochmolekulare Polymersuspensionen Polymerschäume

Tab. 4-1: Voraussetzungen und Konditionierungsstoffe Erddruckschild⁴⁹

4.4.1 Wasser

In feinkörnigen Böden mit fester bis steifer Konsistenz kann eine Bodenconditionierung nur mit Hilfe von Wasser erfolgen. Effekt der Erhöhung des Wassergehaltes ist die Herabsetzung des inneren Reibungswinkels und eine Reduktion der Kohäsion. Die Menge des zugeführten Wassers ist dabei neben der Trockendicht auch von dem erforderlichen und vorhandenen Wassergehalt abhängig. Eine Berechnung der erforderlichen Wassermenge bzw. des Volumenstromes kann dabei mit folgenden Formeln erfolgen:⁵⁰

$$V_W = V_S * \frac{\rho_d}{\rho_w} * (w_{Soll} - w) \quad (4)$$

$$Q_W = A_S * v_{Vortrieb} * \frac{\rho_d}{\rho_w} * (w_{Soll} - w) \quad (5)$$

⁴⁸ Maidl B., 2011, S.281.

⁴⁹ Maidl B., 2011, S.281.

⁵⁰ Budach, 2011, S.15 f.

mit:

A_S	=	Abbaufäche des Schildes [m ²]
Q_W	=	Volumenstrom des Wassers [m ³ /s]
V_S	=	Volumen des Bodens [m ³]
v_{Vortrieb}	=	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]
V_W	=	Volumen des Wassers [m ³]
w	=	vorhandener Wassergehalt [%]
w_{Soll}	=	einzustellender Wassergehalt [%]
ρ_d	=	Trockendichte [kg/m ³]
ρ_W	=	Dichte des Wassers [kg/m ³]

Da bei Betrachtung der Formel (5) der erforderliche Volumenstrom des Wassers in Abhängigkeit des Bodenvolumens ermittelt wird ist eine Definition des Betrachtungsortes notwendig. Bei einem Vortrieb ist die tatsächliche Dichte des Bodenmaterials in der Abbaukammer aufgrund von Auflockerungsfaktoren und zugegebenen Conditionierungsstoffen Schwankungen unterzogen und verfahrenstechnisch nicht bestimmbar (siehe Kapitel 3.2.2). Eine Dichtebestimmung des Bodens vor der Ortsbrust ist im Zuge der Vorprojektierung hingegen möglich. Durch die Schildgeometrie und die vorhandene Vortriebsgeschwindigkeit kann ein theoretisches Bodenvolumen ermittelt werden, mit dessen Hilfe anschließend der erforderliche Volumenstrom des Wassers in der Abbaukammer ermittelt wird.⁵¹

Kurzum es wird zur Ermittlung des Volumenstroms des Wassers das Bodenvolumen mit der zugehörigen Dichte vor dem Schneidrad herangezogen, da eine Dichtebestimmung des Materials in der Abbaukammer nicht möglich ist. Der zusätzliche Wasserbedarf kann in Abhängigkeit der Geologie und des Umfeldes beträchtliche Ausmaße annehmen. Für eine hinreichende Injektion von Wasser sind dementsprechend große Leitungen und Pumpen vorzusehen. Die erforderliche Wassermenge kann durch Laborversuche ermittelt werden. Beim Projekt Green Line Underground Doha waren zum Beispiel in den Entwässerungszonen der Startschächte 20 bis 30% zusätzliches Wasser im Vergleich zum Bodenvolumen erforderlich. Bei einem Ring mussten somit bis zu 20.000 l Wasser zugeführt werden (nähere Details siehe Kapitel 4.5.2).

In festen, wenig quellfähigen Tonen und nichtbindigen Böden ist hingegen eine Conditionierung mit Wasser nicht hilfreich.

4.4.2 Feinstoffsuspension

In grobkörnigen Böden muss zur Herstellung einer bildsamen Masse und zur Reduktion der Wasserdurchlässigkeit der Feinanteil ergänzt werden. Dies kann mit sogenannten Feinstoffsuspensionen erfolgen, wobei Feinstoffe ($d < 0,06$ mm) in einer Wasserlösung dispergiert und anschließend in die Abbaukammer gepumpt werden. Eine Zugabe in den Schneckenförder ist mittels Injektionskanälen bei Bedarf ebenfalls möglich. Bei Erddruckschilden werden vor allem zähflüssige, pastenartige Tonsuspensionen mit hohen Dichten (engl. high - density - slurry, „HDS“)

⁵¹ Vgl. Budach, 2011, S.16.

verwendet. Die Zugabe von Bentonit kann den inneren Reibungswinkel und die Reibungswiderstände reduzieren, zusätzlich wird dadurch die Stabilität der Suspension erhöht. Muss jedoch ein hoher Anteil an Feinstoffsuspension der Abbaukammer zugeführt werden, erhöht dies den Wasserverbrauch. Durch die hohe Wasseraufnahme von Bentonit muss dementsprechend viel Wasser zugegeben werden, um die Suspension pumpbar zu halten. Da aufgrund der niedrigen Anforderungen an die Stabilität der Suspension im Vergleich zu Schlitzwänden nichts gegen die Verwendung anderer Feinstoffe spricht, kann je nach Verfügbarkeit neben Bentonit auch Kaolinit, Ca - Bentonit, Illit, Kalkstein- oder Quarmehl verwendet werden. Diese Feinstoffe sind weniger quellfähig und zudem kostengünstiger als Bentonit.⁵²

Neben den Ausgangstoffen der Feinstoffsuspension sind vor allem die Konzentration (engl. concentration - suspension, „c_{Susp}“) und die Injektionsrate (engl. suspension - injection - ratio, „SIR“) wesentliche Parameter. Folgende Formeln dienen zur Berechnung der Volumenströme der Bestandteile und der Suspension sowie der Konzentration:⁵³

$$c_{Susp} = \frac{V_{fein,Susp}}{V_{Susp}} * 100 = \frac{V_{fein,Susp}}{V_{fein,Susp} + V_W} * 100 = \frac{Q_{fein,Susp}}{Q_{Susp}} * 100$$

$$= \frac{Q_{fein,Susp}}{Q_{fein,Susp} + Q_W} * 100 \quad (6)$$

$$SIR = \frac{V_{Susp}}{V_S} * 100 = \frac{Q_{Susp}}{Q_S} * 100 \quad (7)$$

$$Q_{Susp} = \frac{SIR}{100} * A_S * v_{Vortrieb} \quad (8)$$

$$Q_{fein,Susp} = \frac{SIR}{100} * \frac{c_{Susp}}{100} * A_S * v_{Vortrieb} \quad (9)$$

$$Q_W = \frac{SIR}{100} * \left(1 - \frac{c_{Susp}}{100}\right) * A_S * v_{Vortrieb} \quad (10)$$

mit:

A_S	=	Abbaufäche des Schildes [m ²]
c_{Susp}	=	Konzentration der Suspension [%]
$Q_{fein,Susp}$	=	Volumenstrom des Feinstoffanteils in der Suspension [m ³ /s]
Q_S	=	Volumenstrom des Bodens [m ³ /s]
Q_{Susp}	=	Volumenstrom der Suspension [m ³ /s]
Q_W	=	Volumenstrom des Wassers [m ³ /s]
SIR	=	Injektionsrate der Feinstoffsuspension [%]
$V_{fein,Susp}$	=	Volumen des Feinstoffanteils in der Suspension [m ³]
V_S	=	Volumen des Bodens [m ³]
V_{Susp}	=	Volumen der Suspension [m ³]
$v_{Vortrieb}$	=	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

⁵² Vgl. Maidl U., 1995, S.50 ff.

⁵³ Budach, 2011, S.17.

4 Bodenconditionierung

$$V_w = \text{Volumen des Wassers [m}^3\text{]}$$

Die erforderliche Menge an Feinstoffsuspension kann in Abhängigkeit der Geologie durch Laborversuche ermittelt werden (ähnlich den Versuchen zur Bodenconditionierung mit Schaum, siehe Kapitel 0). Auf jeden Fall sollte bei Lockergestein eine möglichst hohe Konzentration an Feinanteilen in der Feinstoffsuspension vorhanden sein. Dies ist notwendig um die Relation der zu injizierenden Suspension im Vergleich zum eingebrachten Feinanteil niedrig zu halten und somit die Wasserdurchlässigkeit des Lockergesteins zu verringern. Die möglichen Konzentrationen können dabei in Abhängigkeit der verwendeten Bestandteile bis zu 55% betragen. Begrenzt wird die Höhe der Konzentration durch die erforderliche Pumpbarkeit – diese kann bei einem Ausbreitmaß (gleich dem Versuch im Betonbau) von 15 cm als ausreichend angegeben werden.⁵⁴

Folgende Abbildung gibt eine wissenschaftlich belegte Empfehlung über den möglichen Einsatzbereich von Erddruckschilden mit Feinstoffkonditionierung in Lockergestein. Bis dato wurden Empfehlung vor allem aufgrund von empirischen Annahmen getroffen.

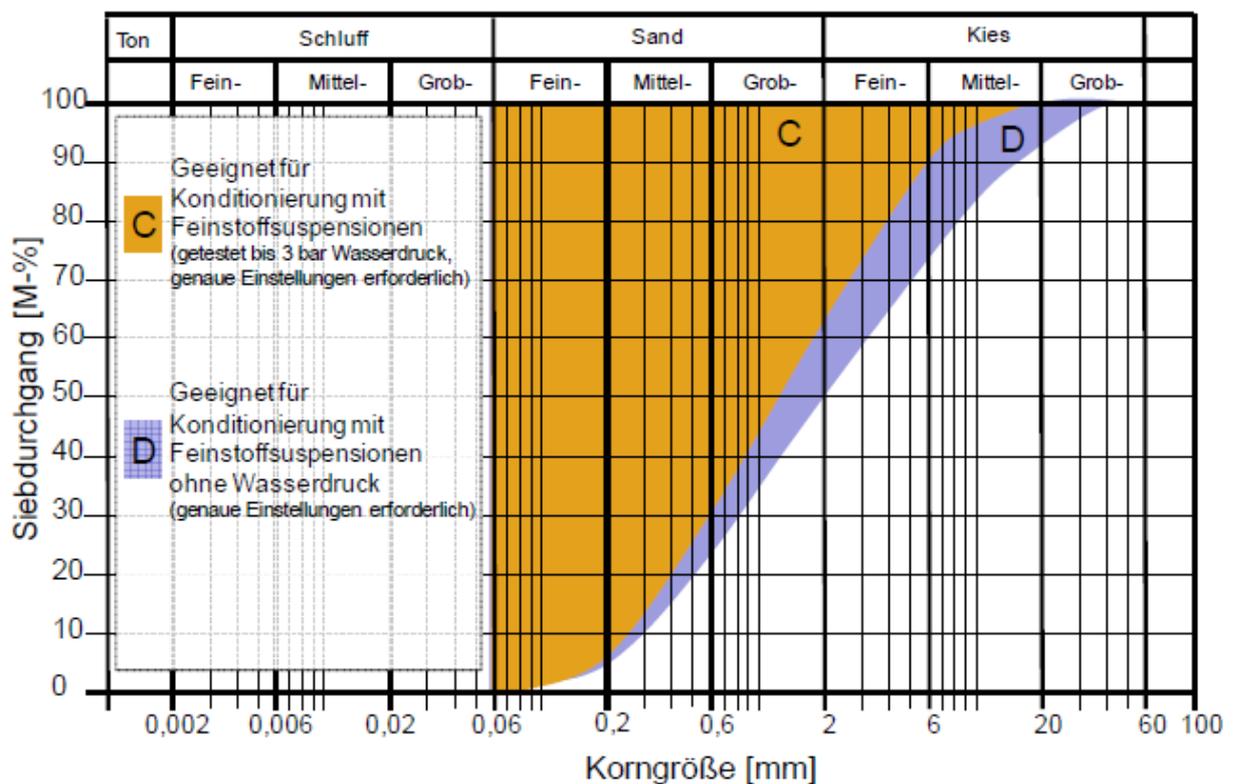


Abb. 4-4: Einsatzbereich von Erddruckschilden mit Feinstoffsuspension als Konditionierungsmittel⁵⁵

⁵⁴ Vgl. Budach, 2011, S.140.

⁵⁵ Budach, 2011, S.190.

4.4.3 Polymersuspensionen

Polymere sind chemische Verbindungen, die aus Ketten oder verzweigten Molekülen bestehen, die sich wiederum aus gleichen oder gleichartigen Einheiten, sogenannten Monomeren, zusammensetzen. Polymere kommen sowohl in der Natur in Form von Stärke, Zellulose, etc. vor bzw. können sie auch durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition synthetisch hergestellt werden. Aufgrund verschiedenster Einsatzbereiche existieren vor allem folgende Polymere am Markt:^{56,57}

- Copolymere

Enthalten mindestens zwei verschiedene Monomere. Aus Japan ist ein granulartförmiges Produkt aus Acrylamid und Vinylalkohol bekannt, das stark wasserabsorbierend ist und das 500-fache seines eigenen Gewichtes an Wasser speichern kann. Vorteil dieses Polymers ist, dass einmal gespeichertes Wasser nicht mehr löslich ist, laut Herstellerangaben selbst bei hohen Druckverhältnissen.

- Polyacrylate

Werden meist auch als Copolymere hergestellt und sind in hochmolekulare (lange) und niedermolekulare (kurze) Polymere zu unterscheiden. Je nach Kettenlänge können unterschiedliche Conditionierungsziele erreicht werden.

- Carboxymethylcellulose (CMC)

CMC wird aus natürlicher Zellulose, Natronlauge und Monochloressigsäure oder deren Natriumsalz erzeugt. Durch die zahlreichen Carboxylgruppen besitzt CMC eine starke negative Aufladung. Aufgrund des stark hydrophilen Charakters bilden CMC eine stabile kolloidale Lösung. Diese Eigenschaft kann zum einen als Schaumstabilisator, zum anderen zur filmartigen Umhüllung ebenfalls hydrophiler, feiner Partikel verwendet werden. Bei höherer Konzentration entsteht eine Gellösung, wobei die Fadenmoleküle sich durchdringen und verknäulen. Bei niedriger Konzentration ist hingegen keine Gelbildung möglich, die Fadenmoleküle sind frei in der Lösung vorhanden.

- Biopolymere

Zu den Biopolymeren zählen unter anderem wasserlösliche Biopolymere, wasserunlösliche Biopolymere und natürlich abbaubare Polymere. Durch Mischen der zwei erstgenannten Biopolymere entstehen Hydrokolloide, die bei Zugabe zum Schaum eine Stabilisierung dessen erzeugen. Vorteil dieses Produktes ist vor allem die umweltfreundliche Deponierung des Produktes ohne spezielle Zusatzmaßnahmen.

⁵⁶ Vgl. www.chemie.de/lexikon (12.02.2015, 22:30)

⁵⁷ Vgl. Langmaack, 2011, S.4.

- Polyacrylamide

Polyacrylamide sind Polymere von Acrylamid, welche vor allem als Stabilisator oder Flockungsmittel eingesetzt werden. Aufgrund unterschiedlicher Auffassungen im Bezug auf die biologische Bedenklichkeit des Produktes (kanzerogen oder nicht) sollte dieses Produkt eher vermeiden werden.

Wie die oben beschriebenen Polymere zeigen, ist eine Anwendung sowohl zur Stabilisierung von Schäumen, als auch eine Verwendung zur reinen Bodenconditionierung möglich. Bei letztgenannten resultieren daher die aufgelisteten Folgen:⁵⁸

- Durch lange Kettenmoleküle können sich Bodenpartikel verfilzen und in die Gelstruktur eingebunden werden. Die einzelnen Moleküle können sich wiederum ineinander verfilzen und somit kann selbst nichtbindiger Boden zu einer kohäsivem Matrix zusammengefügt werden. Die Gleitwirkung des Gels reduziert außerdem den inneren Reibungswinkel.
- Zur Abdichtung bzw. Versiegelung eignen sich granulatförmige Polymere (Copolymere). Diese wirken wie Schwämme und speichern das Porenwasser. Bei ausreichender Konzentration ist eine zusammenhängende Matrix aus Bodenteilchen und Polymere mit gespeichertem Porenwasser möglich.
- Bei Verwendung eines anionaktiven Polymers wird durch die Aufnahme auf den Partikeloberflächen die negative Oberflächenladung erhöht. Dadurch stoßen sich die Partikel voneinander ab und es wird ein Zusammenhalten der Teilchen verhindert.
- Einige Tone können bei Wasserzutritt zu Kleben tendieren. Dieser Effekt entsteht durch unterschiedlich geladene Bereiche der Ton-Schichtpakete. Die inneren Bereiche sind negativ geladen, wodurch sich Wasser leicht einlagern kann und es zu Schwellungen kommt. Die Breitseiten haben hingegen einen positiven Ladungsüberschuss. Durch Verwendung von z.B. CMC können die positiv geladenen Bereiche sorbiert werden, wodurch ein Eindringen der Wassermoleküle zu den negativ geladenen Bereichen und somit ein Quellen bzw. Verkleben des Tones verhindert wird.
- Bei kontaminierten Böden kann durch abgeschwächte Oberflächenladung bei dem Rührprozess keine pastenartige Matrix geformt werden. Auch hierbei bieten Polymere Abhilfe, indem sie diese Eigenschaften weitgehend neutralisieren und somit ein bildsamer Stützbrei entstehen kann.
- Durch die Gleitwirkung der Polymere in gelartigen Lösungen werden die Verschleißkosten der Abbaugeräte reduziert. Dabei muss eine hohe Konzentration erforderlich sein um die erwünschte Geleigenschaft zu erreichen.

⁵⁸ Vgl. Maidl U., 1995, S.56 f.

Neben der Art der verwendeten Polymere sind die Polymerkonzentration (engl. concentration - polymer, „ c_P “) und die Injektionsrate der Polymersuspension (engl. polymer - injection - ratio, „PIR“) wichtige Parameter für eine geeignete Bodenconditionierung mit Polymeren. Folgende Gleichungen zeigen wiederum die notwendigen Berechnungen der Konzentration, der Injektionsrate und der Volumenströme der einzelnen Bestandteile:⁵⁹

$$c_P = \frac{V_{Pol}}{V_P} * 100 = \frac{V_{Pol}}{V_{Pol} + V_W} * 100 = \frac{Q_{Pol}}{Q_P} * 100 = \frac{Q_{Pol}}{Q_{Pol} + Q_W} * 100 \quad (11)$$

$$PIR = \frac{V_P}{V_S} * 100 = \frac{Q_P}{Q_S} * 100 \quad (12)$$

$$Q_P = \frac{PIR}{100} * A_S * v_{Vortrieb} \quad (13)$$

$$Q_{Pol} = \frac{PIR}{100} * \frac{c_P}{100} * A_S * v_{Vortrieb} \quad (14)$$

$$Q_W = \frac{PIR}{100} * \left(1 - \frac{c_P}{100}\right) * A_S * v_{Vortrieb} \quad (15)$$

mit:

A_S	=	Abbaufäche des Schildes [m ²]
c_P	=	Konzentration der Polymersuspension [%]
PIR	=	Injektionsrate der Polymersuspension [%]
Q_P	=	Volumenstrom der Polymersuspension [m ³ /s]
Q_{Pol}	=	Volumenstrom des Polymers in der Suspension [m ³ /s]
Q_S	=	Volumenstrom des Bodens [m ³ /s]
Q_W	=	Volumenstrom des Wassers [m ³ /s]
V_P	=	Volumen der Polymersuspension [m ³]
V_{Pol}	=	Volumen des Polymers in der Suspension [m ³]
V_S	=	Volumen des Bodens [m ³]
$v_{Vortrieb}$	=	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]
V_W	=	Volumen des Wassers [m ³]

In Abhängigkeit der Geologie und des verwendeten Polymers müssen wiederum die Parameter der Polymerkonzentration und der Injektionsrate in Laborversuchen ermittelt werden (ähnlich den Versuchen zur Bodenconditionierung mit Schaum im Kapitel 0). Bei hohen Zugabemengen stoßen auch Polymersuspensionen schnell an die Grenzen der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

⁵⁹ Budach, 2011, S.18.

4.4.4 Schaum

Schäume können sowohl chemisch als auch physikalisch hergestellt werden. Bei chemischen Schäumen wird durch die Zugabe von Treibmittel ein Zwei - Phasensystem erzeugt, das nach einer Misch- und Startzeit erhärtet und anschließend im festen Zustand bleibt. Die im Tunnelbau zur Bodenconditionierung eingesetzten physikalischen Schäume entstehen hingegen durch Dispersion von Gasen (Luft) in einer schaumfähigen Flüssigkeit. Im Gegensatz zu chemischen Schäumen tritt nach der Erzeugung des physikalischen Schaumes ein stetiger Verfall ein.⁶⁰

Eine schaumfähige Flüssigkeit (engl. liquid) wird durch Mischen von Wasser mit Tensid (engl. surface active agent – surfactant) erzeugt, wobei bereits geringe Konzentrationen von 1,5 bis 5,0% ausreichend sind. Wesentliche Charakteristika der Tenside sind zum einem die hydrophobische Kette (wassermeidend) und zum anderen der hydrophile Kopf (wasserliebend). Mit Hilfe der in Kapitel 3.3.4 beschriebenen Schaumgeneratoren wird in die schaumfähige Flüssigkeit eine große Menge an Luft dispergiert.

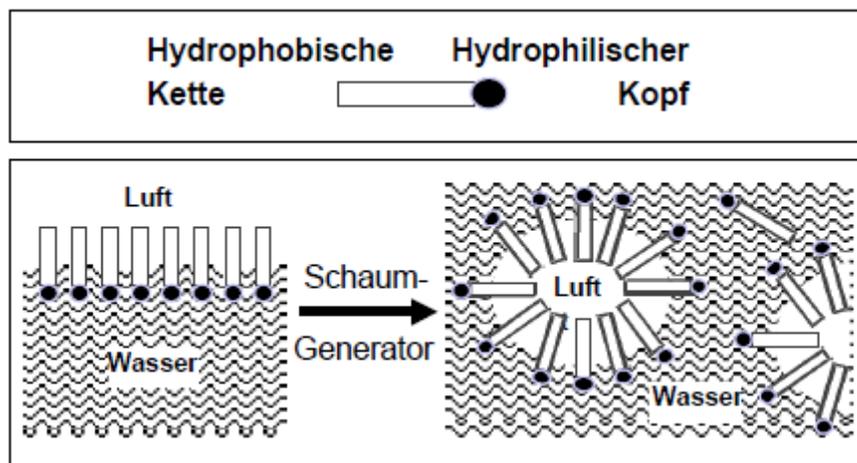


Abb. 4-5: Wirkungsweise Tenside⁶¹

Als Kriterium für die Lebensdauer eines Schaumes kann der Verlust an Flüssigkeit (Drainage) gewertet werden. Neben den physikalischen Eigenschaften sind vor allem der Herstellungsprozess und die Blasengröße für die Stabilität eines Schaumes maßgebend. Die Blasengröße wird durch den herrschenden Innen- und Außendruck geregelt. Je mehr der Innendruck ansteigt, desto größer werden die Bläschen und nähern sich einer Polyederform (Innenwinkel 120° - Gibbswinkel). Durch die schwerkraftbedingte Drainage fließt die Flüssigkeit der Lamellen in vertikalen Kanälen und Spalten ab und die Lamellen und Plateaubereiche zwischen den Polyedern werden dünner. Dadurch kommt es zu einer sukzessiven Zerstörung des Schaumes von oben nach unten.

Nachfolgende Abbildung zeigt den Übergang vom trockenen Polyederschaum (oben) zum feuchten Kugelschaum (unten).⁶²

⁶⁰ Vgl. Maidl U., 1995, S.58.

⁶¹ Langmaack, 2011, S.4.

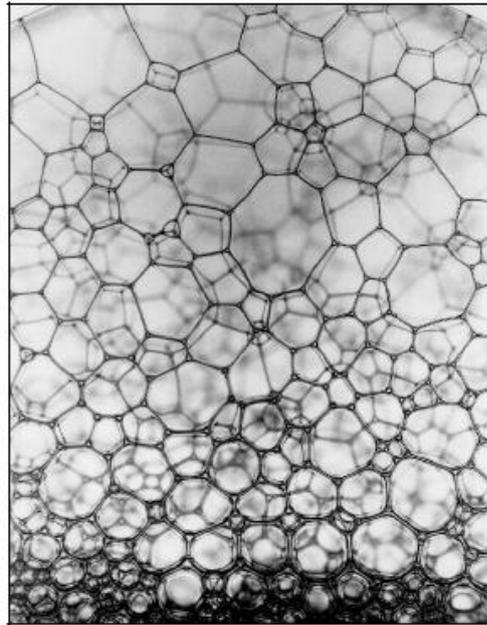


Abb. 4-6: Übergang trockener Polyederschaum zu feuchtem Kugelschaum⁶³

Die Lebensdauer eines Schaumes kann ebenfalls durch Zugabe von Stabilisatoren verlängert werden. Neben Stärke können auch die im Kapitel 0 beschriebenen CMC-Polymere oder Polyacrylamide zur Stabilisierung verwendet werden. Die Zugabe erfolgt dabei bereits vor der Aufschäumung in der Schaumlanze. Auf Achtung der Umweltverträglichkeit mancher Polymere sei hierbei nochmals hingewiesen.

Neben den Eigenschaften der Tenside, Stabilisatoren und der Herstellung haben vor allem die den geologischen Bedingungen angepassten Injektionsparameter wesentlichen Einfluss auf die Konditionierungsergebnisse. Diese werden im Zuge von Laborversuchen (vgl. Kapitel 0) mit Bodenproben des aufzufahrenden Tunnels ermittelt. Nur durch eine komplette Überwachung mit Hilfe von Durchfluss- und Druckmessern an den jeweiligen Zuleitungen (Wasser, Tensid, Luft) und in den Schaumlanzen kann die tatsächlich injizierte Schaummenge überwacht und kontrolliert werden. Dies ist erforderlich um folgende Situationen zu vermeiden:⁶⁴

- Durch zu viel injizierte Luft entstehen folgende Probleme:
 - Boden wird zu trocken, wodurch sowohl die Temperatur als auch das Drehmoment ansteigt. Leistungseinbußen sind die Folge.
 - Durch vermehrten Eintrag von Luft über die Schaumzugabe entsteht ein Luftpolster im oberen Bereich der Abbaukammer. Eine kontrollierte Stützdruckübertragung ist nicht mehr möglich. Die Gefahr von Ausbläsern ist erhöht (siehe oberer Bereich der Druckanzeige in Abb. 3-3)

⁶² Vgl. Maidl U., 1995, S.63 ff.

⁶³ Galli, 2009, S.14.

⁶⁴ Vgl. Langmaack, 2011, S.3.

- Übermäßiges Injizieren von Schaum führt zu folgender Problematik:
 - Der Erdbrei kann unkontrolliert über den Schneckenförderer ausgetragen werden.
 - Die Weiterverarbeitung des Ausbruchsmaterials ist schwieriger zu bewerkstelligen, da das ausgebrachte Volumen größer wird.
 - Eine unnötige Kostensteigerung der Bodenconditionierung je Laufmeter Tunnel ist eine weitere Folge.
- Durch zu geringe Conditionierung können folgende Schwierigkeiten entstehen:
 - Durch Verkleben des Schneidrades kommt es zu einem erhöhten Schneidraddrehmoment und somit zu einem erhöhten Stromverbrauch. Folge dieses Effektes ist eine Verringerung der Vortriebsleistung.
 - Der erforderliche Stützdruck kann nicht mehr ausreichend gehalten werden.
 - Das Risiko eines Wassereinbruches steigt.

Ausgehend von den in Laborversuchen ermittelten Schauminjektionsrate (engl. foam - injection - ratio, „FIR“) sowie der Schaumexpansionsrate (engl. foam - expansion - ratio, „FER“) und der Tensidkonzentration (engl. foam - concentration, „c_f“) können mit Hilfe folgender Formeln auch die jeweiligen Durchflussmengen berechnet werden:⁶⁵

$$c_f = \frac{m_f}{m_L} * 100 \approx \frac{V_f}{V_L} * 100 = \frac{Q_f}{Q_L} * 100 \quad (16)$$

$$FER = \frac{V_F}{V_L} = \frac{Q_F}{Q_L} \quad (17)$$

$$FIR = \frac{V_F}{V_S} * 100 = \frac{Q_F}{Q_S} * 100 = \frac{Q_F}{A_S * v_{Vortrieb}} * 100 \quad (18)$$

$$LIR = \frac{V_L + V_P}{V_S} * 100 = \frac{Q_L + Q_P}{Q_S} * 100 = \frac{FIR}{FER} + PIR \quad (19)$$

$$Q_f = \frac{FIR/100}{FER} * \frac{c_f}{100} * A_S * v_{Vortrieb} \quad (20)$$

$$Q_W = \frac{FIR/100}{FER} * \left(1 - \frac{c_f}{100}\right) * A_S * v_{Vortrieb} \quad (21)$$

$$Q_A = \frac{FIR}{FER} * \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * A_S * v_{Vortrieb} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Q_{A,atm} &= \frac{FIR}{FER} * \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * (p_{atm} + p_{supp}) * A_S * v_{Vortrieb} \\ &= \frac{FIR}{FER} * \left(1 - \frac{1}{FER}\right) * (1 + p_{supp}) * A_S * v_{Vortrieb} \end{aligned} \quad (23)$$

⁶⁵ Vgl. Budach, 2011, S.

mit:

A_S	=	Abbaufäche des Schildes [m ²]
c_f	=	Tensidkonzentration [%]
FER	=	Schaumexpansionsrate []
FIR	=	Schauminjektionsrate [%]
LIR	=	Injektionsrate des Liquid [%]
PIR	=	Injektionsrate des Polymers [%]
m_f	=	Masse des Tensids [kg]
m_L	=	Masse der Tensidlösung (Liquid) [kg]
p_{atm}	=	atmosphärischer Druck [bar] – Näherungsweise 1 bar
p_{supp}	=	Differenzdruck zwischen Stützdruck und atmosphärischen Druck [bar]
Q_A	=	Volumenstrom der Luft unter Stützdruckbedingungen [m ³ /s]
$Q_{A,atm}$	=	Volumenstrom der Luft unter atmosphärischen Bedingungen [m ³ /s]
Q_f	=	Volumenstrom des Tensids [m ³ /s]
Q_F	=	Volumenstrom des Schaums [m ³ /s]
Q_L	=	Volumenstrom der Tensidlösung (Liquid) [m ³ /s]
Q_P	=	Volumenstrom des Polymers [m ³ /s]
Q_S	=	Volumenstrom des Bodens [m ³ /s]
Q_W	=	Volumenstrom des Wassers
V_f	=	Volumen des Tensids [m ³]
V_F	=	Volumen des Schaums unter Stützdruckbedingungen [m ³]
V_L	=	Volumen der Tensidlösung (Liquid) [m ³]
V_P	=	Volumen des Polymers [m ³]
V_S	=	Volumen des Bodens [m ³]
$v_{Vortrieb}$	=	Vortriebsgeschwindigkeit [m/s]

Wie in den Berechnungen der Luftströme ersichtlich ist, wird eine Unterscheidung in atmosphärische Bedingungen und Stützdruckbedingungen getroffen. Dies ist erforderlich um in der unter Druck stehenden Abbaukammer dieselbe Schaumexpansionsrate zu erreichen wie in den Labortests unter atmosphärischem Druck. Der Luftstrom tunnelseitig (atmosphärische Bedingungen) ist somit höher als der erforderliche, theoretische Luftstrom in der Abbaukammer.

Generell ist nach der Berechnung der Volumenströme auf eine ausreichende Dimensionierung der Leitungen und Pumpen zu achten. Nachträgliche Anpassungen sind zwar möglich, bedürfen jedoch einem erhöhten Aufwand.

4.4.5 Gemischte Konditionierungsmittel

Die in den Kapitel 4.4.1 bis 0 erläuterten Konditionierungsmittel können auch in Kombination miteinander verwendet werden. Bis dato waren in folgenden grobkörnigen Böden unterhalb des Grundwasserspiegels keine geeigneten Konditionierungsmaßnahmen möglich:

- Mittelsand bis Mittelkies
- Feinsand bis Mittelkies
- Mittelsand bis Grobkies
- Feinsand bis Grobkies

Durch die gleichzeitige Zugabe von Feinstoff suspension – wirkt als Füller – in Kombination mit Polymersuspension und Schaumzugabe kann folgender erweiterter Einsatzbereich bei grobkörnigen Böden erreicht werden.⁶⁶

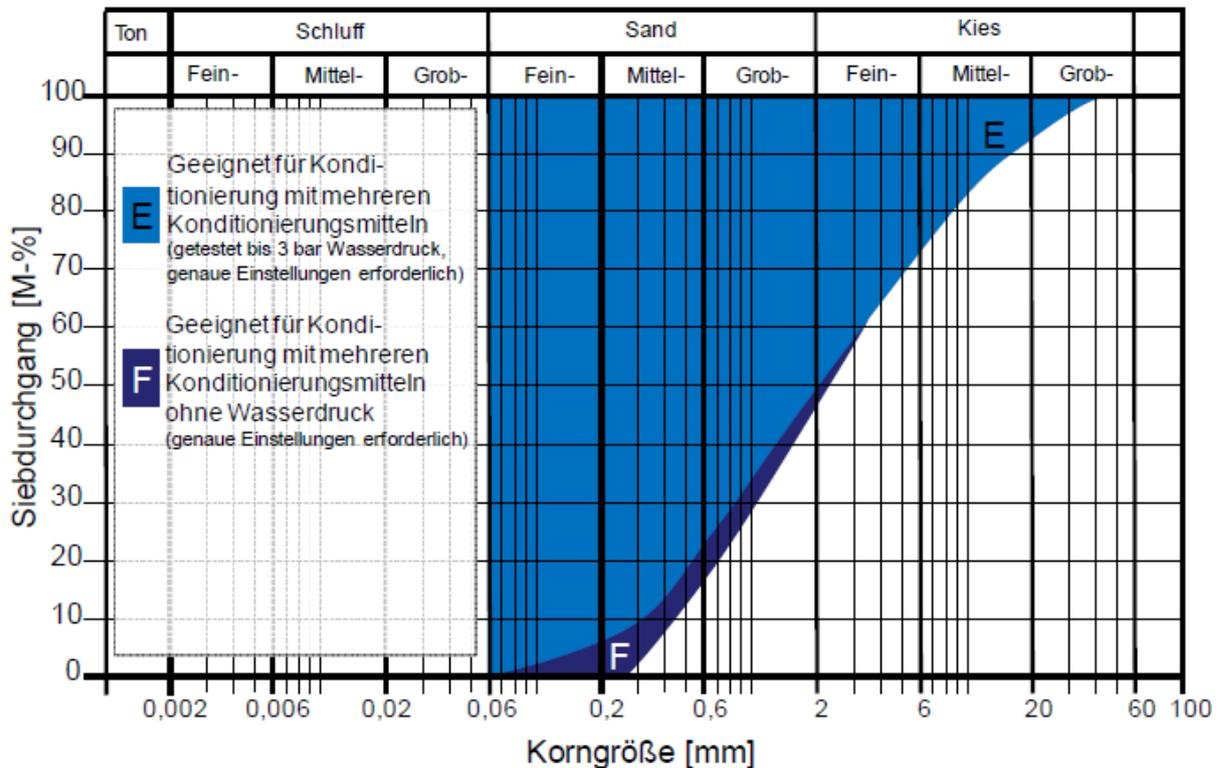


Abb. 4-7: Einsatzbereich von Erddruckschilden mit gemischten Konditionierungsmitteln⁶⁷

4.5 Bodenkonditionierung am Beispiel Green Line Underground Doha

Bei dem Bauvorhaben Green Line Underground Doha wurde im Zuge des Projektbeginns eine Vergleichsstudie zweier Subunternehmer im Bereich Konditionierungsmittel erstellt. Die gewählten Subunternehmer wurden bereits im Vorfeld von der ARGE aufgrund von Angeboten und vorab gefertigten Testberichten ausgewählt. Neben zusätzlichen Testversuchen vor Ort (Boden - Schaum Konditionierung) wurden auch Testversuche bezüglich der in Kapitel 3.3.4 beschriebenen Schaumgeneratoren gemacht. Schlussendlich wurde eine Verbrauchsanalyse der unterschiedlichen Produkte erstellt, in der neben dem Schaum- auch der Wasser- und Energiebedarf berücksichtigt wurden.

Bei der Vergleichsstudie wurden vier Produkte der zwei Subunternehmer berücksichtigt, wobei lediglich drei Produkte im Zuge des Vortriebes zur Anwendung kamen. Die Produkte werden im Weiteren mit Produkt A-1 bzw. A-2 vom Subunternehmer A und Produkt B-1 bzw. B-2 vom Subunternehmer B bezeichnet. Die Eigenschaften laut Datenblätter können der folgenden Tabelle entnommen werden:

⁶⁶ Vgl. Budach, 2011, S.190 ff.

⁶⁷ Budach, 2011, S.192.

		Produkt A-1	Produkt A-2	Produkt B-1	Produkt B-2
Dichte bei 20 ⁰ C	[kg/m ³]	1.030	1.020 – 1.030	1.020	1.020 – 1.040
pH bei 20 ⁰ C	[]	9 – 10	7 – 9	6,5 – 7,5	7,5 – 8,5
Löslichkeit in Wasser	[%]	100	100	100	100
Farbe	[]	farblos	farblos	farblos	gelb – braun
Konzentration c _f	[%]	0,5 – 4	1,5 – 4	2 – 3	n.A.
Preis	[QAR/l] ⁶⁸	4,41	4,41	4,08	n.A.
	[€/l] ⁶⁹	0,96	0,96	0,89	n.A.

Tab. 4-2: Eigenschaften der Schaumconditionierungsmittel

Wie der Tabelle entnommen werden kann, sind die Eigenschaften der Produkte unabhängig von Hersteller sehr ähnlich. Produkt A-2 ist ein spezielles Produkt und enthält neben Tensiden auch Polymere zu Stabilisierung des Schaumes. Dieses Produkt wurde im Zuge des Vortriebes nicht verwendet, es wurde jedoch in Testversuchen vor Ort zum Vergleich herangezogen. Das Pendant zu Produkt A-2 ist Produkt B-2, welches vor allem zur Reduktion von Verschleiß sowohl bei Erddruckschilden als auch bei Hartgesteinsmaschinen verwendet wird. Dieses Produkt wurde im Zuge des Vortriebes in den ersten Vortriebsmetern verwendet, da es von Subunternehmer B als nicht ratsam erachtet wurde wird es in der Verbrauchsanalyse (Kapitel 4.5.4) jedoch nicht berücksichtigt. Subunternehmen B hat in dem vorab gefertigten Testbericht für den in Doha typischen „Simsima Sandstein“ folgende Empfehlungen und Startparameter gegeben:

zusätzliches Wasser	[%]	15 – 20
verwendbares Produkt	[]	Produkt B-1 (Produkt B-2 nicht empfohlen)
Schaum - Konzentration c _f	[%]	2,0 – 3,0
Schaum - Expansionsrate FER	[1:x]	8 – 12
Schaum - Injektionsrate FIR	[%]	40 – 60

Tab. 4-3: empfohlene Startparameter Subunternehmen B

Subunternehmen A hat im Vorfeld ebenfalls Testberichte abgegeben, jedoch wurden hier keine Startparameter angegeben. Im Zuge des Vortriebes wurden jedoch Versuche in einem Laborcontainer vor Ort getätigt, in denen die Parameter der Schaumconditionierung ermittelt wurden.

⁶⁸ Quelle: Angebotspreise im Zuge der Vergleichsstudie – Green Line Underground Doha, 2014

⁶⁹ Umrechnungskurs: http://www.finanzen.net/devisen/euro-katar_riyal-kurs (29.12.2014, 15:50).

4.5.1 Testversuche vor Ort

Um Testversuche im Bezug auf Bodenconditionierung vor Ort durchführen zu können ist ein Mindestmaß an Equipment im Laborcontainer erforderlich. Folgende Abbildungen zeigen einen Überblick über die erforderliche Ausstattung:



Abb. 4-8: Kompressor – Laborcontainer

Der verwendete Kompressor besitzt zwei Druckanzeigen, eine zur Bestimmung des Drucks im Behälter und eine zur Anzeige des ausgehenden Luftdruckes. Der Kompressor ist mit dem Schaumgenerator in der rechten Abbildung verbunden und stellt die benötigte Luftzufuhr zur Schaumherstellung bereit.



Abb. 4-9: Schaumgenerator – Laborcontainer

Der Schaumgenerator besitzt drei Eingänge. Die mittlere Anzeige zeigt die Luftbereitstellung des Kompressors, die rechte Anzeige gibt die Menge an Liquid in Liter pro Stunde an und die linke Anzeige gibt die verwendete Luftmenge für die Schaumherstellung in Liter pro Minute wieder. Mit der linken und rechten Anzeige kann die Schaumexpansionsrate FER eingestellt werden.



Abb. 4-10: Mixer – Laborcontainer

Der Mixer wird verwendet um den hergestellten Schaum mit der Bodenprobe zu vermischen. Er besitzt einen Transformator um die Leistung von 220 auf 110 Watt zu reduzieren. Häufig ist es üblich einen Stromverbrauchsmesser in Serie zu schalten um den Widerstand der verschiedenen Konditionierungsmaßnahmen vergleichbar zu machen. Bei dem verwendeten Mixer war dies jedoch nicht der Fall.



Abb. 4-11: Setzmaß - Versuch – Laborcontainer

Die Versuchseinrichtung zur Bestimmung des Setzmaßes kommt ursprünglich aus dem Betonbau. Mit Hilfe der Einrichtung kann das plastische Verhalten der konditionierten Böden verglichen werden.

Die Bodenproben für die Konditionierungsversuche (Testreihe 1 und Testreihe 2) wurden bewusst aus dem Startschacht und nicht aus dem Ausbruchsmaterial der TVM genommen. Dadurch konnte verhindert werden, dass das verwendete Material bereits mit Chemikalien im Zuge der Bodenconditionierung in Berührung gekommen ist.

Bei den entnommenen Bodenproben handelt es sich um den typischen „Simsima Sandstein“, welcher die oberflächennahe Bodenschicht bildet, wobei diese im Startbereich des Erddruckschildes bis unter die Tunnelsohle reicht. „Simsima Sandstein“ besitzt eine feine Konsistenz mit einer beigen bis gelblich-braunen Farbe. Die Lagerung der Schichten ist locker – wodurch er sich in Schichtrichtung leicht spalten lässt – und beinhaltet häufig kristallinen Sandstein und Dolomit mit Aushöhlungen und unregelmäßigen Schichtungen. Diese Schichtungen sind häufig mit weichem Sandstein gefüllt. Desweiteren ist anzumerken, dass der Wassergehalt der Bodenprobe nicht dem Wassergehalt in situ entspricht, da die Probe über einen längeren Zeitraum Übertage gelagert wurde. Auch die Dichte der Bodenprobe ist aufgrund von Auflockerungsfaktoren geringer als in situ.

Testreihe 1:

Während des Vortriebes war auffällig, dass zu Beginn bei beiden TVM das Konditionierungsergebnis nicht zufriedenstellend war. Beide Subunternehmen sahen dabei die Problematik in der zusätzlichen Wasserzugabe in die Abbaukammer und nicht in der Schaumkonditionierung. Im Zuge eines ersten Testversuches wollte Subunternehmen A daher die Auswirkungen des trockenen Bodens auf die Bodenkonditionierung mit Schaum zeigen. Durch die Grundwasserabsenkung in den Schachtbereichen des U-Bahnprojektes ist die Problematik des trockenen Bodens eine wiederkehrende und sollte somit von Beginn an ernst genommen werden.

In der ersten Versuchsreihe wurden mit dem Produkt A-1 drei Tests mit folgenden konstanten Konditionierungsparametern durchgeführt:

Schaum - Konzentration c_f	[%]	2,0
Schaum - Expansionsrate FER	[1:x]	10
Schaum - Injektionsrate FIR	[%]	60

Tab. 4-4: Konditionierungsparameter Versuchsreihe 1

- Die Schaum - Konzentration von 2% wurde erreicht, indem 50 ml Tensid mit 2,5 l Wasser vermischt wurden. Die genaue Dosierung erfolgte mit Hilfe von Messbehältern und einer kleinen Spritze.
- Die Schaum - Expansionsrate von 1:10 konnte sichergestellt werden, indem der Luftzufluss auf 10 Liter pro Minute und der Liquidzufluss auf 60 Liter pro Stunde eingestellt wurde.
- Die Schaum - Injektionsrate von 60% wurde mit Hilfe von Markierungen im Mischbehälter eingestellt. Bei 15 l Boden wurden 9 l Schaum beigemischt.

Die Menge an zusätzlichem Wasser wurde bei den drei Versuchen der ersten Testreihe wie folgt variiert:

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
zusätzliches Wasser [Vol. %]	0	40	20

Tab. 4-5: zusätzliche Wasserzugabe Versuchsreihe 1

Die Konditionierungsparameter sowie die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe können folgender Tabelle entnommen werden. Zur Übersichtlichkeit der geänderten Parameter im Vergleich zum vorhergehenden Versuch sind diese farblich gekennzeichnet:

4 Bodenconditionierung

1. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-1	2	10	60	15	0	9	0	keine bildsame Masse, trocken
									
2. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-1	2	10	60	15	6	0	> 30	zu nass, zu flüssig
									
3. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-1	2	10	60	15	3	9	20	sehr bildsam, gute Konditionierung
									

Tab. 4-6: Testreihe 1 – Bodenconditionierung

Eine Interpretation der ersten Versuchsreihe kann wie folgt dargelegt werden:

- Beim 1. Testversuch wurde kein zusätzliches Wasser zur Bodenprobe gegeben, wodurch der trockene Boden das Wasser aus dem Schaum entzogen hat und somit die Lebensdauer dramatisch verkürzt wurde. Das gewünschte Konditionierungsergebnis war dadurch nicht erzielbar.
- Beim 2. Testversuch wurde zu viel Wasser (40 Vol.%) der Bodenprobe beigegeben, wobei nach dem Mischen das Material bereits so flüssig war, dass auf eine weitere Konditionierung mit Schaum verzichtet wurde.
- Beim 3. Testversuch wurden lediglich 20 Vol. % zur Bodenprobe beigegeben. Bei der anschließenden Konditionierung mit Schaum entstand ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis des Stützmaterials.

Abschließend kann festgehalten werden, dass bei der Bodenkonditionierung beim Projekt Green Line Underground Doha in den durch Wasserabsenkungen trockenen Startbereichen eine ausreichende Wasserzufuhr in die Abbaukammer gewährleistet werden muss. Dies ist erforderlich, um Konditionierungsergebnisse wie im 3. Testversuch der ersten Versuchsreihe erzielen zu können. Die erforderliche Wassermenge liegt dabei beim „Simsima Sandstein“ etwas niedriger als 20 Vol. %, da das Bodenmaterial in situ mehr Wassergehalt aufweist als die trocken gelagerte Bodenprobe.

Ein Diagramm der erreichbaren Vortriebsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der erforderlichen Wassermenge wird im Kapitel 4.5.2 dargestellt.

Testreihe 2:

In der zweiten Versuchsreihe wurde neben den unterschiedlichen Einflüssen der Konditionierungsparameter auch der Einfluss des Produktes A-2 (enthält neben Tensiden auch Polymere) dargelegt und verglichen. Die Testversuche und Ergebnisse können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Die variierten Parameter sind abermals zur besseren Darstellung farblich markiert.

4 Bodenkonditionierung

4. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-1	2	10	60	15	3	9	20	gut bildsam
									
5. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-1	2	15	60	15	3	9	~ 0	zu trocken
									
6. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-2	2	10	60	15	3	9	20	gleich 4. Versuch, schmieriger
									

Tab. 4-7: Testreihe 2-1 – Bodenkonditionierung

4 Bodenconditionierung

7. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-2	2	10	80	15	3	12	22	keine großartige Änderung
									
8. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-2	2	10	80	15	6	12	40	zu flüssig
									
9. Testversuch	Produkt	c_F	FER	FIR	Boden	Wasser	Schaum	Setzmaß	Kommentar
	[]	[%]	[1:x]	[%]	[l]	[l]	[l]	[mm]	[]
	A-1 + 2% Polymere	2	10	80	15	6	12	30	trockener durch Polymere
									

Tab. 4-8: Testreihe 2-2 – Bodenconditionierung

Die Interpretation der zweiten Versuchsreihe ist wie folgt:

- Der 4. Testversuch entspricht dem 3. Testversuch der ersten Versuchsreihe. Ein zufriedenstellendes Konditionierungsergebnis konnte erreicht werden.
- Beim 5. Testversuch wurde die Schaumexpansionsrate FER erhöht, durch den höheren Anteil an Luft im Schaum entsteht ein sogenannter trockener Schaum. Das Konditionierungsergebnis ist daher zu trocken und nicht zufriedenstellend.
- Der 6. Testversuch entspricht wiederum dem 4. Testversuch, jedoch wurde das Produkt A-2 verwendet. Durch die Polymere im Schaum entstand ein leicht schmieriges Konditionierungsergebnis, jedoch ist im Vergleich zum 4. Testversuch wenig Unterschied feststellbar.
- Beim 7. Testversuch wurde im Vergleich zum 6. Testversuch die Schauminjektionsrate FIR auf 80% angehoben. Dieser Wert wird in der Literatur häufig als obere Grenze der Schaumzugabe angegeben. Das Ergebnis der Bodenkonditionierung wurde durch diese Maßnahme jedoch nicht wesentlich beeinflusst.
- Im 8. Testversuch wurde wieder die Zugabe des Wassers auf 40 Vol.% gesteigert. Durch den Anteil an Polymere im Produkt A-2 ist das Konditionierungsergebnis zwar besser als im 2. Testversuch der ersten Testreihe, jedoch immer noch zu flüssig.
- Im 9. Testversuch wurde wieder das Produkt A-1 verwendet, jedoch wurden 2% Polymere zugegeben (in Summe höherer Anteil als im Produkt A-2). Durch diesen hohen Anteil an Polymeren ist das Ergebnis der Bodenkonditionierung trockener als im 8. Testversuch. Gesamtgesehen ist die Konditionierung dennoch nicht zufriedenstellend.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Änderung des Wassergehaltes beim „Simsima Sandstein“ eine wesentliche Rolle bei der Bodenkonditionierung einnimmt und mehr Effekt auf das Konditionierungsergebnis hat als z.B. die Änderung der Schauminjektionsrate.

Abschließend ist an einem einfachen Versuchsaufbau die Bedeutung der Bodenkonditionierung auf die Wasserdurchlässigkeit des Stützmaterials verdeutlicht. Dazu werden zwei Behälter mit Papiertüchern gefüllt, auf diese dann anschließend eine konditionierte Bodenprobe (aus dem 4. Testversuch) und eine nicht konditionierte Bodenprobe gegeben wird. Abschließend werden die Behälter mit Wasser gefüllt. Im rechten Behälter – nicht konditionierte Bodenprobe – dringt das Wasser sehr schnell durch den trockenen Boden und erreicht in kürzester Zeit die Papiertücher am Boden. Im linken Behälter hingegen – konditionierte Bodenprobe – sind die Papiertücher noch nach langer Zeitdauer trocken. Die Visualisierung der Wasserdurchlässigkeit kann der folgenden Abbildung entnommen werden.



Abb. 4-12: Visualisierung der Wasserdurchlässigkeit mit (links) und ohne (rechts) Bodenconditionierung

4.5.2 Problematik zusätzliches Wasser

In den ersten Vortriebsmetern war erkennbar, dass zu wenig zusätzliches Wasser in der Abbaukammer vorhanden war. Nach dem Umbau der Bentonitpumpe konnte mehr Wasser zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der durchgeführten Testversuche war ersichtlich das rund 20 Vol.% an zusätzlichem Wasser – bei einer durchschnittlichen Dichte von 2 t/m^3 entspricht das 10 Massenprozent – erforderlich ist um eine geeignete Bodenconditionierung erreichen zu können. Mit Hilfe der nachstehenden Grafik soll erläutert werden wie die zugegebene Wassermenge die Vortriebsgeschwindigkeit unter der Berücksichtigung, dass das Conditionierungsergebnis aus den Laborversuchen erreicht werden soll, beeinflusst.

Neben der Wasserzugabe während dem Vortrieb ist auch die Überlegung getroffen worden, Wasser bereits während der Ringbauzeit in die Abbaukammer zu pumpen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass im Zuge eventueller Notfälle eine Begehung der Abbaukammer erst nach abpumpen des Wassers möglich ist. Außerdem muss bei Vortriebsbeginn der Austrag des Erdmaterials zu Beginn unterbunden werden, da ansonsten vor allem Wasser über den Schneckenförderer ausgetragen werden würde. Eine ausreichende Zeitdauer zur Durchmischung des Bodenmaterials mit Wasser muss abgewartet werden.

generelle Daten	
FIR	60%
FER	10 : 1
Cf	1,5%
Vortriebslänge - Ring	1600 mm

benötigtes zusätzliches Wasser	
zus. Wasser - Massenprozent	8,5%
Aushubvolumen pro Ring	64 m ³
Dichte ~	2 t/m ³
benötigtes zusätzliches Wasser	10,88 m ³

zusätzliches Wasser während Ringbau	
Durchfluss "Bentonitsystem"	166 l/min
Ringbauzeit	30 min
benötigtes Wasser	5,9 m ³

zusätzliche Wasserzugabe		
Vortriebsgeschw.	Durchfluss Wasser	Durchfluss Wasser
mm/min	l/min	l/min
0	0	0
5	34	18
10	68	37
15	102	55
20	136	74
25	170	92
30	204	111
35	238	129
40	272	148
45	306	166
50	340	184
55	374	203
60	408	221
65	442	240
70	476	258
75	510	277
80	544	295

Abb. 4-13: Eingangswerte zusätzliches Wasser – Vortriebsgeschwindigkeit Diagramm

Die generellen Daten sind zur Übersicht für den Maschinenfahrer gegeben, eine Berücksichtigung in der folgenden Grafik ist jedoch nicht notwendig. Der zusätzliche Wasserbedarf in Masseprozent wurde anhand der TVM 847 kalibriert. Eine Übersicht der verwendeten Tunnelvortriebsmaschinen beim Projekt Green Line Underground Doha kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

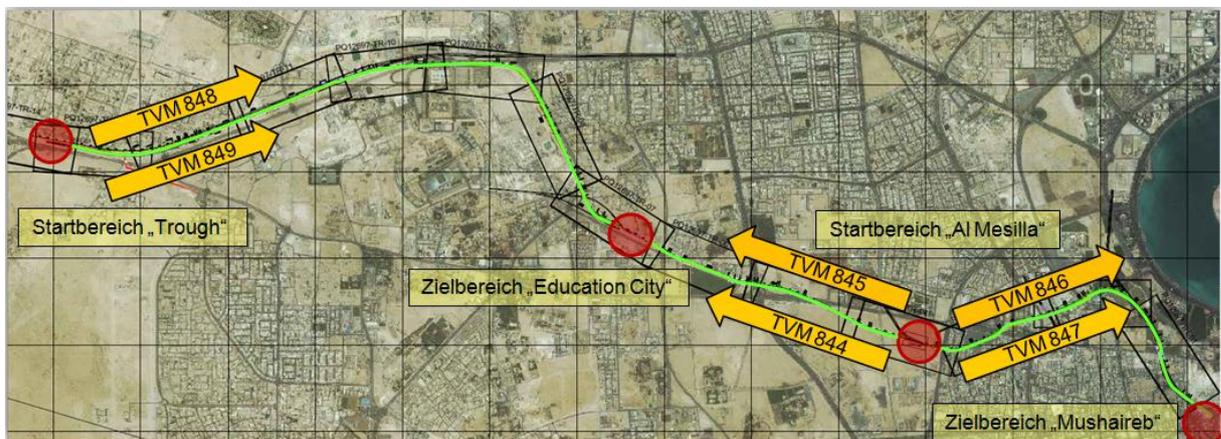


Abb. 4-14: Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen Green Line Underground Doha

Wie bereits erwähnt ist laut Laborversuchen eine zusätzliche Wasserzugabe von rund 10 Massenprozent erforderlich. Der Wassergehalt in situ ist jedoch höher als bei den Laborversuchen. Daher wurde mit Hilfe der TVM 847 die zusätzliche Wassermenge solange geändert, bis annähernd dasselbe Conditionierungsergebnis als in den Laborversuchen erreicht wurde. Dies war bei 8,5 Massenprozent der Fall. Der Durchfluss durch das Bentonitsystem ist mit 166 l/min begrenzt. In der Tabelle „zusätzliche Wasserzugabe“ wird zum einem der benötigte Durchfluss während des Vortriebes ohne zusätzlicher Wasserzugabe während der Ringbauzeit (mittlere – blaue Spalte) und mit

Wasserzugabe während der Ringbauzeit (rechte – orange Spalte) dargestellt. Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse der Eingangswerte in Form eines Geschwindigkeit – Durchfluss Diagramms. Alle roten Abgrenzungen sind aufgrund von mechanischen Grenzen gegeben. Zum einem handelte es sich dabei um die Durchflussbegrenzung des Bentonitsystems, zum anderen sind die maximal zulässigen Vortriebsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Vortriebsart zu berücksichtigen. Die maximal theoretische Vortriebsgeschwindigkeit ergibt sich somit zu 24,4 mm/min ohne Wasserzugabe während der Ringbauzeit bzw. 45,0 mm/min mit Wasserzugabe während der Ringbauzeit.

Es sei hierbei nochmals erwähnt, dass sehr wohl höhere Vortriebsgeschwindigkeiten möglich sind und auch vorhanden waren, jedoch konnte dabei nicht das gewünschte Conditionierungsergebnis aus den Laborversuchen erreicht werden. Zur weiteren Verwendung der Grafik bedarf es jedenfalls einer ständigen Kalibrierung der zusätzlichen Wassermenge in Massenprozent.

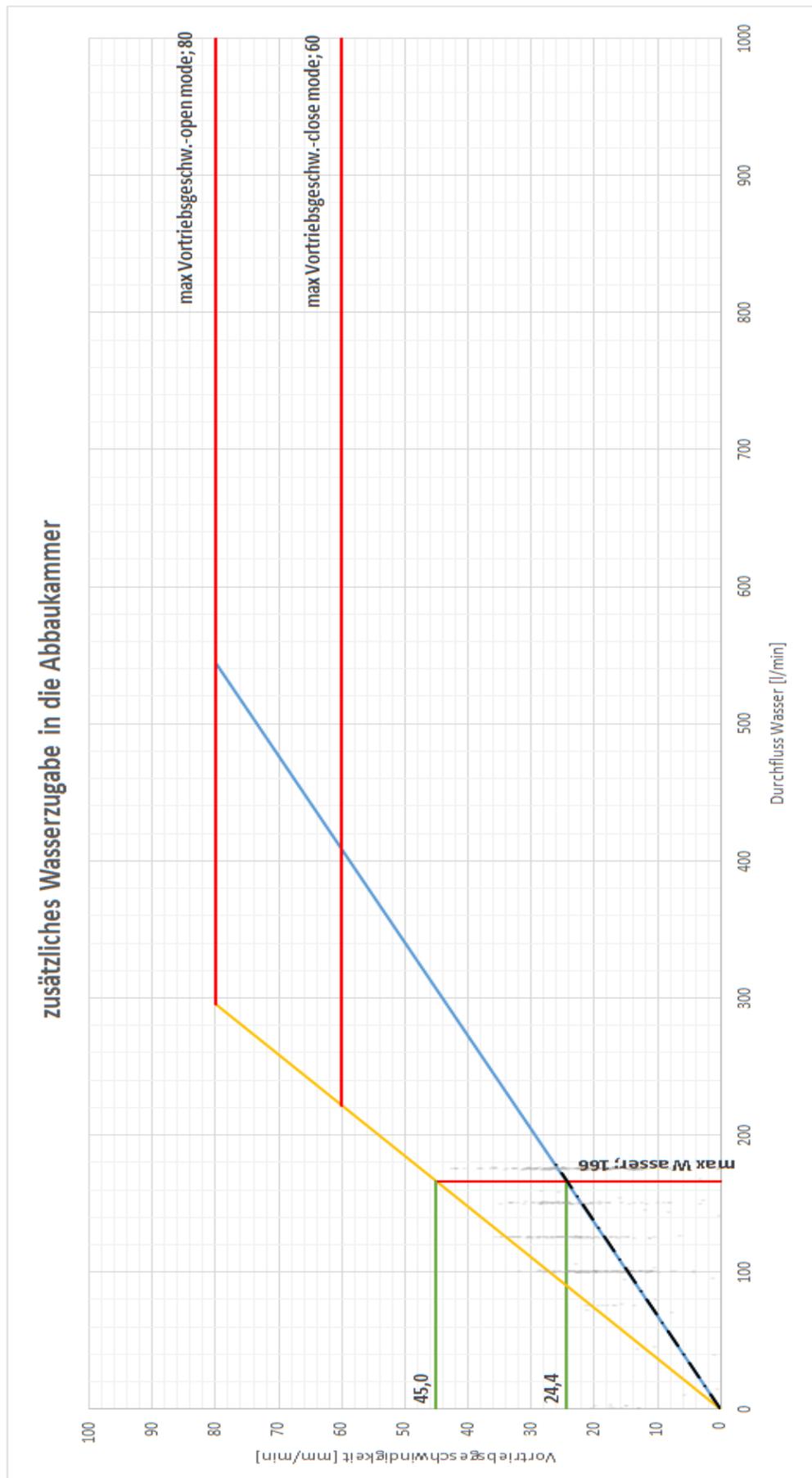


Abb. 4-15: zusätzliches Wasser – Vortriebsgeschwindigkeit Diagramm

4.5.3 Testversuche Schaumgeneratoren

Bei den Erddruckschilden des Projektes Green Line Underground Doha waren die im Kapitel 3.3.4 beschriebene Schaumlanze 1 standardmäßig eingebaut. Im Zuge der ersten Vortriebsmeter wurden aufgrund unzureichender Conditionierungsergebnisse auch Testversuche mit den Schaumgeneratoren durchgeführt. Dazu wurde zusätzlich die im Kapitel 3.3.4 beschriebene Schaumlanze 2 organisiert und in beiden Tunnelvortriebsmaschinen parallel zu den eingebauten Schaumlanze 1 installiert.

Bei beiden Testversuchen wurden folgende Conditionierungsparameter gewählt:

Produkt	[]	A-1 und B-1
Schaum - Konzentration c_f	[%]	2,0
Schaum - Expansionsrate FER	[1:x]	12
Schaum - Injektionsrate FIR	[%]	irrelevant für den Test

Tab. 4-9: Conditionierungsparameter - Schaumgeneratorentest

Die Testversuche wurden mit beiden Subunternehmen unabhängig voneinander durchgeführt und brachten dabei folgende Ergebnisse:

Schaumlanze 1		
	<p>Schaumlanze 1 erzeugt einen „Schaum“ mit wenig, jedoch großen Luftblasen. Der Schaum wirkt sehr nass und die Lebensdauer ist gering. Das Schaumergebnis ist nicht zufriedenstellend.</p>	

Tab. 4-10: Testergebnis – Schaumlanze 1

Schaumlanze 2	
<p>Schaumlanze 2 erzeugt hingegen einen Schaum mit vielen, kleinen Luftblasen. Der Schaum ist ähnlich einem Rasierschaum und wirkt bei Kontakt sehr stabil. Die Lebensdauer ist erheblich länger und beträgt ca. 20 Sekunden. Das Schaumergebnis ist sehr zufriedenstellend.</p>	

Tab. 4-11: Testergebnis – Schaumlanze 2

Aufgrund der oben gezeigten Testergebnisse sind anschließend in die Schaumlanzen des Typs 1 Stahlwolle in die Stahlzylinder gegeben worden. Dies hat den Effekt eines zusätzlichen Störkörpers, wodurch mehr Turbulenzen und somit mehr Luft im Schaum erzeugt werden kann. Das Schaumergebnis verbesserte sich durch diese einfache Maßnahme erheblich und ist somit für eine geeignete Schaumconditionierung ausreichend. Das gute Resultat der Schaumlanze 2 ist dennoch nicht erreicht worden.

4.5.4 Verbrauchsanalyse unterschiedlicher Produkte

Bei einer Verbrauchsanalyse in Punkto Bodenconditionierung ist der reine Vergleich des Schaumverbrauches nicht aussagekräftig genug. Die Conditionierung beeinflusst einerseits wesentlich den Stromverbrauch – durch ein geringer erforderliches Drehmoment – des Schneidrades und des Schneckenförderers. Andererseits sollte auch der Verbrauch an zusätzlichem Wasser in der Analyse berücksichtigt werden.

Desweiteren sind bei der Beurteilung der Verbrauchsanalyse folgende Annahmen und Bemerkungen zu berücksichtigen:

- 1) Die geologischen Randbedingungen sind bei beiden TVM dieselben (in Realität können unterschiedliche Bedingungen vorliegen, da der Abstand der Tunnelachsen mehr als 15 m beträgt).
- 2) Beiden TVM steht derselbe Wassergehalt im Boden zur Verfügung (in Realität steht der ersten TVM mehr Wasser zur Verfügung als der zweiten).

- 3) Beide TVM fahren im selben Betriebsmodus, mögliche Setzungen werden in der Verbrauchsanalyse nicht berücksichtigt (in Realität erzeugt die erste TVM rund 70% der Gesamtsetzungen, die zweite TVM lediglich 30%)
- 4) Die Conditionierungsergebnisse sind an beiden TVM gleich (sollte an einer TVM der Erdbrei trockener sein so brauchte man natürlich weniger Wasser bzw. Conditionierungsmittel – dies würde den Vergleich beeinflussen)
- 5) Beide TVM werden vom „selben“ Personal betrieben, auch die Lernkurven beider TVM-Teams sind gleich (in Realität ist ein erheblicher Unterschied im Personal gegeben, durch verschiedene Charaktere sind auch die Lernkurven verschieden).
- 6) Die Logistik ist bei beiden TVM gleich – sie bekommen Materialien, Segmente je nach Bedarf – dies ist erforderlich um einen durchgängigen Vortrieb zu gewährleisten. Die Qualität der Bodenconditionierung ist zeitabhängig, ein kontinuierlicher Vortrieb ist daher für die Verbrauchsanalyse empfehlenswert (in Realität waren teilweise Verzögerungen in der Logistik vorhanden, ein kontinuierlicher Vortrieb war daher in der Startphase selten möglich).
- 7) Abnützungen aufgrund unzureichender Bodenconditionierung sind in dem Vergleich nicht enthalten.
- 8) Der Kostenvergleich deckt sowohl die Kosten für das Schaumkonzentrat, Wasser und Strom ab. Eine Berücksichtigung der Kosten für Deponierung des Ausbruchsmaterials und Abnutzung des Bohrkopfes sind nicht gegeben.

	Schaum-Konzentrat	Wasser	Energie
[QAR/l] bzw. [QAR/kWh] ⁷⁰	siehe Produktübersicht	0,017	0,07
[€/l] bzw. [€/kWh] ⁷¹	siehe Produktübersicht	0,0037	0,015

Tab. 4-12: Preisübersicht Green Line Underground Doha

- 9) Die ersten 20 Ringe werden bei der Verbrauchsanalyse nicht berücksichtigt. Dies ist erforderlich da zu Beginn eines Vortriebes aufgrund von Einstellungsmaßnahmen mit erhöhten Verbrauchswerten zu rechnen ist. Desweiteren müssen bei Vortriebsbeginn sämtliche Verbrauchsmesser kontrolliert und gegebenenfalls eingestellt werden.
- 10) Der Vergleich gibt lediglich einen groben Überblick über das Projekt wieder. Zum Vergleichszeitpunkt sind erst 115,20 m von 16,6 km vorgetrieben. Dies entspricht einem Anteil von 6,9%.
- 11) TBM 847 (Produkt A-1) startet rund vier Wochen nach TBM 846 (Produkt B-1). Erfahrungen von dem ersten Erddruckschild können daher beim Start des zweiten Erddruckschildes verwendet werden. Dies stellt einen klaren Vorteil der TBM 847 dar.

⁷⁰ Kosten im Zuge der Vergleichsstudie – Green Line Underground Doha, 2014

⁷¹ Umrechnungskurs: http://www.finanzen.net/devisen/euro-katar_riyal-kurs (29.12.2014, 15:50).

Die für die Verbrauchsanalyse notwendigen Daten werden von TVM 846 (Produkt B-1) und TVM 847 (Produkt A-1) mit Hilfe von Computerprogrammen ausgelesen. Eine Übersicht der Daten kann dem Anhang entnommen werden.

Verbrauchsanalyse – generell

Bei einer ersten Verbrauchsanalyse werden die Ringe 21 bis 94 von beiden Erddruckschilden miteinander verglichen. Dazu werden die Verbrauchswerte von Wasser, Schaum und Energie aufsummiert und pro Tunnelmeter dargestellt. Um die jeweiligen Verbrauchswerte gewichten zu können wird anschließend ein Kostenvergleich dargestellt (Preise der Produkte kommen von den Subunternehmen, Preise von Wasser und Strom werden durch die ARGE bereitgestellt). Zuletzt wird auch noch die durchschnittliche Vortriebsgeschwindigkeit beider Erddruckschilder verglichen. Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse dieser Vergleiche:

		TBM 846 (B-1)	TBM 847 (A-1)	Verhältnis B-1/A-1
Schaum-Konzentrat	[l/m]	116	95	+22,1%
Wasser	[l/m]	12.797	10.292	+24,3%
Energie	[kWh/m]	1.683	1.406	+19,7%
Kosten	[QAR/m]	1.238	734	+17,2%
	[€/m]	269,13	159,56	+17,2%
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	20,32	24,52	-17,1%

Tab. 4-13: Ergebnisse Verbrauchsanalyse – generell

In der ersten Verbrauchsanalyse scheint die Tendenz zu Produkt A-1 zu gehen. Im Vergleich der Ringe 21 bis 94 ist dieses Produkt in allen verglichenen Punkten besser. Folgender Vergleich einzelner Ringe wird hingegen eine detaillierte Betrachtung liefern.

Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

Beim Vergleich einzelner Ringe kommt es vor allem auf die Ähnlichkeit dieser Ringe an. Durch eine geeignete Bodenconditionierung können folgende vergleichbare Parameter beeinflusst werden:

- Stopps während eines Vortriebes
- Geschwindigkeit Schneidrad
- Moment Schneidrad
- Vorschubkraft
- Vortriebsgeschwindigkeit

Einer der wichtigsten genannten Punkte ist die Anzahl der Stopps während eines Vortriebes. Für eine gute Bodenconditionierung ist ein kontinuierlicher Vortrieb entscheidend, daher wird anhand der Vortriebsgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Schneidrades die Anzahl der Stopps während des Vortriebes ermittelt. Als Kriterium werden längere Unterbrechungen als 3 Minuten als Stopp

4 Bodenconditionierung

berücksichtigt. Beim Vergleich der anderen Parameter kommt es vor allem auf die gleiche Quantität an. Zur Findung ähnlicher Ringe sind daher folgende Parameter gewählt worden:

Stopps	[]	0
Geschwindigkeit Schneidrad	[U/min]	2 – 3
Drehmoment Schneidrad	[MNm]	< 3
Vorschubkraft	[MN]	8,000 – 9,000
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	20 – 30

Tab. 4-14: Parameter für Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

Mit Hilfe der Auswertung konnten fünf ähnliche Ringe gefunden werden. Um auch eine ähnliche Geologie in der Verbrauchsanalyse zu berücksichtigen, werden jene Ringe miteinander verglichen, die sich am Nächsten beieinander befinden.

Dazu werden in einem ersten Schritt Ring 40 von TBM 846 und Ring 36 von TBM 847 verglichen. Die ausgewerteten Parameter können folgender Tabelle entnommen werden:

		TBM 846 (B-1)	TBM 847 (A-1)
Ringnummer	[]	40	36
Stopps	[]	0	0
Geschwindigkeit Schneidrad	[U/min]	2,281	2,140
Drehmoment Schneidrad	[MNm]	2,598	2,315
Vorschubkraft	[MN]	8,594	8,002
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	23,960	25,230

Tab. 4-15: Parameter Ring 40 und 36 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

Die Auswertung der Ringe 40 und 36 erfolgt wieder analog der generellen Verbrauchsanalyse und kann folgender Tabelle entnommen werden:

		TBM 846 (B-1)	TBM 847 (A-1)	Verhältnis B-1/A-1
Ringnummer	[]	40	36	
Schaum-Konzentrat	[l/m]	143	125	+14,4%
Wasser	[l/m]	16.679	12.871	+29,5%
Energie	[kWh/m]	890	1.010	-11,9%
Kosten	[QAR/m]	934	845	+10,5%
	[€/m]	203,04	183,68	+10,5%
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	23,96	25,23	-5,0%

Tab. 4-16: Auswertung Ring 40 und 36 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

Im Energieverbrauch ist bei diesem Vergleich Produkt B-1 besser, im gewichteten Vergleich der einzelnen Verbrauchswerte ist dennoch Produkt A-1 besser platziert. Es ist jedoch ersichtlich, dass sich das Verhältnis beider Produkte mehr aneinander nähert und die Differenzen kleiner werden.

4 Bodenconditionierung

Weitere ähnliche Ringe sind Ring 52 und 54 von TBM 846 (B-1) und Ring 53 von TBM 847 (A-1). Die jeweiligen Parameter und Auswertungen können in den folgenden Tabellen entnommen werden:

		TBM 846 (B-1)	TBM 847 (A-1)
Ringnummer	[]	52	53
Stopps	[]	0	0
Geschwindigkeit Schneidrad	[U/min]	2,410	2,972
Drehmoment Schneidrad	[MNm]	2,403	2,675
Vorschubkraft	[MN]	8,197	8,040
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	29,160	28,820

Tab. 4-17: Parameter Ring 52 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

		TBM 846 (B-1)	TBM 847 (A-1)	Verhältnis B-1/A-1
Ringnummer	[]	52	53	
Schaum-Konzentrat	[l/m]	94	107	-12,2%
Wasser	[l/m]	12.543	6.744	+58,9%
Energie	[kWh/m]	861	1.026	-16,1%
Kosten	[QAR/m]	664	659	-0,1%
	[€/m]	144,35	143,26	-0,1%
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	29,16	28,82	+1,2%

Tab. 4-18: Auswertung Ring 52 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

Wie in der Tabelle ersichtlich ist beim Wasserverbrauch ein erheblicher Unterschied gegeben. Dies ist vor allem auf die unterschiedliche Betriebsweise der Maschinenfahrer zurückzuführen. Bei TBM 847 ist im Vergleich zu TBM 846 häufig weniger zusätzliches Wasser in die Abbaukammer hinzugefügt worden. Der gewichtete Vergleich der Verbrauchswerte in Form des Kostenvergleiches ist hingegen sehr ähnlich. Der letzte Ringvergleich zeigt abermals die unterschiedliche Betriebsweise beider Tunnelvortriebsmaschinen auf. Dies ist durch den Unterschied im Wasserverbrauch von 184,6% deutlich ersichtlich.

		TBM 846 (B-1)	TBM 847 (A-1)
Ringnummer	[]	54	53
Stopps	[]	0	0
Geschwindigkeit Schneidrad	[U/min]	2,842	2,972
Drehmoment Schneidrad	[MNm]	2,778	2,675
Vorschubkraft	[MN]	8,282	8,040
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	29,21	28,82

Tab. 4-19: Parameter Ring 54 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

4 Bodenkonditionierung

Die Auswertung der letzten Verbrauchsanalyse kann folgender Tabelle entnommen werden:

		TBM 846 (B-1)	TBM 847 (A-1)	Verhältnis B-1/A-1
Ringnummer	[]	54	53	
Schaum-Konzentrat	[l/m]	144	107	+34,6%
Wasser	[l/m]	19.193	6.744	+184,6%
Energie	[kWh/m]	1.664	1.026	+62,2%
Kosten	[QAR/m]	1.034	659	+56,9%
	[€/m]	224,78	143,26	+56,9%
Vortriebsgeschwindigkeit	[mm/min]	29,21	28,82	+1,0%

Tab. 4-20: Auswertung Ring 54 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass ein fairer Vergleich zweier Produkte im Bezug auf Bodenkonditionierung schwierig ist. Bei den erwähnten Annahmen und Bemerkungen ist vor allem der menschliche Einfluss ein wesentlicher Punkt, der den Vergleich schwierig macht. Vorteil des generellen Vergleichs ist, dass eventuelle Spitzen im Verbrauch bei einzelnen Ringen ausgeglichen werden können. Die Beobachtungsdauer für einen fairen Vergleich ist jedoch zu gering. Bei der Verbrauchsanalyse ähnlicher Ringe konnten keine aussagekräftigen Vergleiche erstellt werden. Je nach beobachtetem Ring ist die Tendenz Richtung Produkt A-1 bzw. konnte oft kein genauer Unterschied herausgefunden werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass durch einen längeren Beobachtungszeitraum wahrscheinlich genauere Aussagen bezüglich eines Produktes getätigt werden kann. Neben den Verbrauchswerten ist dabei auf ein geeignetes Konditionierungsergebnis zu achten. Durch den Vergleich an mehreren Tunnelvortriebsmaschinen wird die Verbrauchsanalyse schwieriger zu interpretieren. Vor allem der menschliche Einfluss hat auf den Verbrauch an Schaumkonzentrat und Wasser einen erheblichen Einfluss.

5 Ringspaltverfüllung

Wie bereits in den ersten Kapiteln erklärt werden bei Schildmaschinen meist Tübbingsegmente zum Innenausbau des Tunnels verwendet. Der Außendurchmesser des Tübbingringes ist auf jeden Fall kleiner als der Durchmesser des Schildes, da dieser innerhalb des Schildmantels eingebaut wird.

Durch diesen Umstand und unter Berücksichtigung folgender Punkte kommt es zur Entstehung des Ringspaltes:⁷²

1) Konischer Verlauf des Schildmantels

Ein konischer Verlauf des Schildmantels von der Schildschneide zum Schildschwanz wird benötigt um die Reibung des Schildmantels zum anstehenden Boden zu verringern.

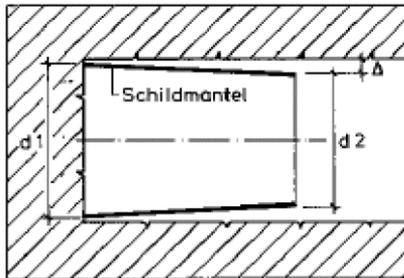


Abb. 5-1: konischer Verlauf Schildmantel

2) Exzentrischer Überschnitt

Ein exzentrischer Überschnitt mit sogenannten Kaliberdisken ist ebenfalls notwendig um die Reibung zwischen Bohrkopf bzw. Schildmantel und anstehendem Boden zu verringern.

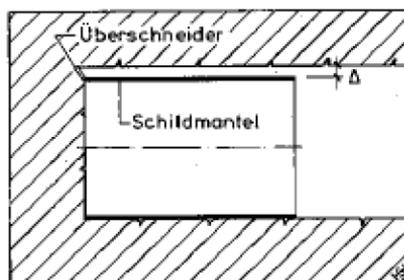


Abb. 5-2: exzentrischer Überschnitt

⁷² Vgl. Maidl B., 1995, S.37-40.

3) Schildschwanzaufbau

Im Schildschwanzaufbau sind sowohl Schildschwanzdichtung, Dicke des Schildmantels und in Abhängigkeit vom Einbringverfahren (siehe Kapitel 5.3) eventuell Lisenen zu berücksichtigen.

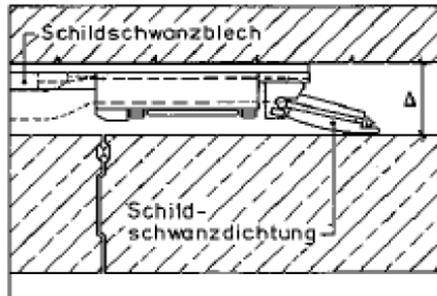


Abb. 5-3: Schildschwanzaufbau

4) Kurvenfahrt

Bei einer Kurvenfahrt mit einer TVM kommt es im Bogeninneren zu einer Bodenverdrängung, im Bogenäußeren zu einem Überschneit. Dadurch entsteht ebenfalls ein erhöhter Ringspalt.

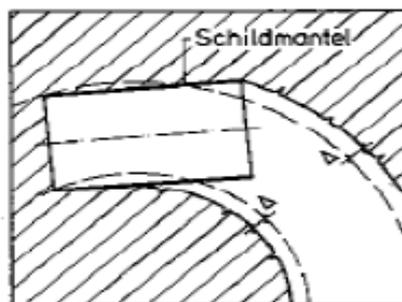


Abb. 5-4: Kurvenfahrt einer TVM

5) Exzentrizität oder Verformung der Sicherung

Aufgrund einer möglichen Exzentrizität oder Verformung der Sicherung kann es zu einer Verschiebung des Tübbingringes und somit zu einer Vergrößerung des Ringspaltes kommen.

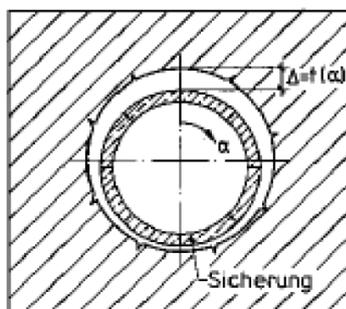


Abb. 5-5: Exzentrizität der Sicherung

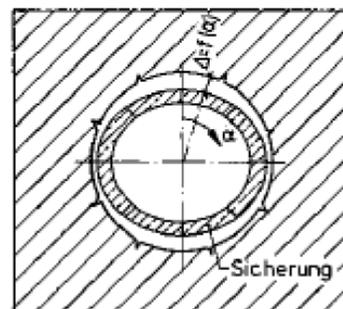


Abb. 5-6: Verschiebung der Sicherung

6) Schneiradverkipfung

Durch eine Schneiradverkipfung, die in jede Richtung möglich ist und je nach Bedarf durch den Maschinenfahrer eingestellt wird kommt es auch zu einer Vergrößerung des Ringspalts. Eine mögliche Ursache für die Verkipfung des Schneirades ist zum Beispiel das Verringern des Kurvenradius bei engen Kurvenfahrten. Dazu werden zwischen dem Vorderschild und dem Hauptschild Hubzylinder gesteuert und somit das Schneirad in eine Richtung gekippt.

5.1 Funktion der Ringspaltverfüllung^{73,74}

Das folgende Kapitel soll die wesentlichen Funktionen der Ringspaltverfüllung darlegen und somit auf deren Wichtigkeit hindeuten. Die Ringspaltverfüllung kann sowohl kontinuierlich als auch nachträglich eingebracht werden (siehe Kapitel 5.3), die Gründe für eine sachgemäße Ringspalthinterfüllung sind jedoch immer wie folgt:

1) Bettung des Tübbingringes

Für die Standsicherheit der Tunnelröhre ist eine Ringspaltverfüllung unerlässlich. Ein Tübbingring besteht aus einzelnen Tübbingsteinen, die im Tunnel zusammengesetzt und meist temporär verschraubt werden. Ein Tübbingring stellt somit einen Gelenkring mit mehr als 3 Gelenken dar, der auf die Mitwirkung des umgebenden Bodens zur Formerhaltung angewiesen ist. In der Modellbildung kann ein Tübbingring, der verfüllt wurde, als Stabzug mit radial angeordneten Federn und der Federsteifigkeit k abgebildet werden, dazu ist jedoch eine einwandfreie Ringspaltverfüllung notwendig.

2) Minimierung der Beanspruchung der Tunnelauskleidung

Im Primärzustand wird die Tunnelröhre mit hohen Momentenbelastungen beansprucht. Durch eine druckkonstante Verpressung des Ringspaltes kann der angrenzende Boden vorgespannt werden und in Abhängigkeit des Kriechverhaltens des Ringspaltmaterials eine dauerhafte Entlastung der Tunnelschale bewirken. Desweiteren kommt es zu einem Ausgleich von Horizontal- und Vertikalspannungen, wodurch eine dauerhafte Minimierung der Momentenbelastung möglich ist.

3) Minimierung der Setzungen

Beim Schildvortrieb ist das Ziel den Primärspannungszustand des Bodens solange zu erhalten bis eine vollflächige Ringspaltfüllung den Tübbingring umhüllt. Wäre dies nicht der Fall kann es durch Verformungen des angrenzenden Bodens in den offenen Ringspalt einerseits zu erhöhten Belastungen des Tübbings, andererseits zu Setzungen kommen. Durch ein mit Druck eingebrachtes Ringspaltmaterial – die Ringspaltverpressung – kann so weit gegangen werden, dass der angrenzende Boden unter Vorspannung gesetzt wird und mögliche Setzungen an der Geländeoberfläche dadurch

⁷³ Vgl. Babendeerde S., 2002, S.35-40.

⁷⁴ Vgl. Wittke W., 2007, S.30 ff.

ausgeglichen werden. Der Druck muss dabei so gewählt werden, dass er mit der Belastung aus dem Gebirge und dem Grundwasser im Gleichgewicht steht. Bei zu hohem Verpressdruck kann es im schlimmsten Fall zu Hebungen oder zu unverhältnismäßig hohem Verbrauch an Ringspaltmaterial durch Ausbläser kommen.

4) Aufnahme Vortriebskräfte

Beim Schildvortrieb werden die Vortriebskräfte auf die bereits eingebauten Tübbinge übertragen. Die Ringspaltverfüllung sorgt zum einen bei Kurvenfahrten zur sicheren Ableitung der Kräfte, zum anderen werden mögliche Verrollungen und Setzungen/Aufschwimmen des Tübbingringes durch die einwirkenden Momente verhindert.

5) Schutzschicht der Tübbinge gegen aggressive Böden

Durch die Ringspaltverfüllung erhält der Tübbingring eine Schutzschicht gegen mögliche aggressive Böden. Im Zuge des Projektes Green Line Underground Doha stellt die Chloridbelastung eine wesentliche Gefahr für die Dauerhaftigkeit der Tübbingringe und Ringspaltverfüllung dar.

5.2 Ringspaltmaterial

5.2.1 klassischer Ringspaltmörtel

Beim klassischen Ringspaltmörtel kann zwischen Nass- und Trockenmörtel unterschieden werden. Der Ringspaltmörtel besteht im Wesentlichen aus:⁷⁵

- Zement
- Flugasche
- Bentonit
- Gesteinskörnung
- Wasser

Anwendungsgebiet für den Nassmörtel ist bei Vortrieben mit druckbeaufschlagter Ortsbrustsicherung, die vor allem im nicht standfesten Gebirge erfolgen. Im standfesten Gebirge kommt der Nassmörtel im Drittelbereich der Sohle zur Anwendung um die Tübbinge lagesicher zu betten. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die verwendeten Bestandteile und deren Eigenschaften für den klassischen Ringspaltmörtel gegeben werden.

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das sowohl im Beton als auch im Mörtel verwendet wird. Bei Zugabe von Wasser verwandelt sich der Zement durch Hydratation in wasser- und raumbeständigen Zementstein. Eine Erhärtung kann sowohl an Luft, als auch unter Wasser erfolgen. Der sogenannten Wasser/Bindemittel (W/B) Wert liegt im Hochbau zwischen 0,4 und 0,7. Aufgrund

⁷⁵ Vgl. Heimburger, 2010, S.33.

5 Ringspaltverfüllung

der erforderlichen Pumpbarkeit liegt der W/B Wert beim Ringspaltmörtel zwischen 0,5 und 1,5.⁷⁶ Eine Berechnung des W/B Wertes kann mit Hilfe der Formel (24) erfolgen. Bei reiner Verwendung von Zement als Bindemittel wird aus dem W/B Wert der früher verwendete W/Z Wert. Bei Ringspaltmörtel würde aufgrund des erhöhten Wasseranteils dem Zement mehr Wasser zur Verfügung stehen, als es zur Hydratation benötigt. Durch diesen Effekt würden Kapillarporen entstehen, die die Beständigkeit des Zementsteins beeinflussen. Folgende Abbildung gibt einen Überblick über den Anteil an Poren in Abhängigkeit des W/Z Wertes. Der rot markierte Bereich kennzeichnet dabei den für Ringspaltmörtel relevanten Bereich.

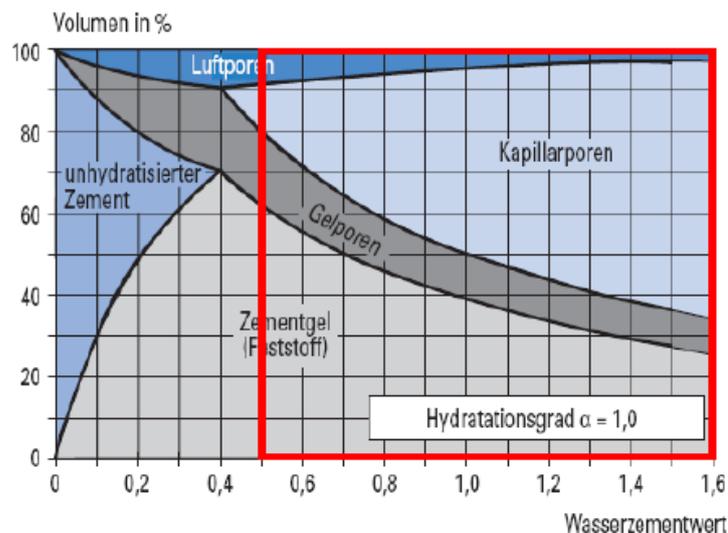


Abb. 5-7: Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom W/Z Wert

Steinkohleflugasche ist ein staubförmiges Produkt, das bei Verbrennung von Steinkohle in Kraftwerken entsteht. Durch die Zugabe von Flugasche entsteht ein Füller-Effekt. Die runden Flugaschenkörner setzen sich zwischen den kantigen Zementkörnern ab und erhöhen somit die Packungsdichte.

Ein weiterer Vorteil besteht in der weicheren Konsistenz des Mörtels bei gleichem Wassergehalt. Durch die puzzolanische Reaktion wird außerdem eine erhöhte Endfestigkeit erreicht.

Der Anteil an Flugasche kann mit Hilfe des k-Wert-Ansatzes im W/B Wert berücksichtigt werden. Dabei sind laut ÖN EN 450 folgende Grenzen für den k-Wert zu beachten:⁷⁷

- $k=0,4$ bei \geq CEM 42,5
- $k=0,2$ bei CEM 32,5

Die Ermittlung des anrechenbaren Bindemittelgehaltes erfolgt nach folgender Formel:

$$\text{anrechenbarer Bindemittelgehalt} = \text{Zement (Z)} + k * \text{Zusatzstoff (ZU)} \quad (24)$$

⁷⁶ Vgl. Heimburger, 2010, S.41.

⁷⁷ Vgl. Betontechnologie 1, 2013, S.39.

Durch den anrechenbaren Anteil an Flugasche am Bindemittelgehalt kann der Zementanteil reduziert werden. Es ist jedoch Bedacht auf die Frühfestigkeit des Mörtels zu nehmen.

Hauptbestandteil von **Bentonit** ist das Tonmineral Montmorillonit. Dieses Tonmineral bestimmt die wesentlichen Eigenschaften, wie Quellfähigkeit und Adsorption von Bentonit. Folgende Vorteile können bei der Zugabe zu Ringspaltmörtel festgehalten werden:⁷⁸

- verbessertes Wasserhaltevermögen
- verbesserte Pumpfähigkeit
- Bildung einer plastisch – viskosen Wirkung
- Steuerung des Absetzverhaltens und der Rheologie von Mischungen

Als **Gesteinskörnung** werden Sande oder Feinkiese verwendet. Bis zu einem Größtkorn von 4 mm spricht man von Mörtel, darüber ist es Beton. Je feiner die Gesteinskörnung ist, desto höher ist der Wasseranspruch des Mörtels. Um eine gleiche Konsistenz zu erhalten müssen bei feinem Sand 25-30% mehr Wasser zugegeben werden. Gleichzeitig verringert sich jedoch die Gefahr des Blutens.⁷⁹ Runder Gesteinskörnung ist der Vorzug zu geben, da bei gleichem Zementanteil die Fließfähigkeit höher ist. Im Gegensatz dazu muss bei gebrochener Gesteinskörnung der Zementanteil erhöht werden um dieselbe Fließfähigkeit zu garantieren.

Als letzter wesentlicher Bestandteil ist das zur Hydratation notwendige **Anmachwasser** zu nennen. Trinkwasser ist prinzipiell immer geeignet, bei Restwasser müssen regelmäßig Dichtekontrollen durchgeführt werden. Bis zu einer Dichte von 1,10 kg/l ist Restwasser zu 100% einsetzbar, bei Dichten zwischen 1,10 und 1,2 kg/l ist Restwasser lediglich zu 50% einsetzbar.⁸⁰

5.2.2 Bi-Komponenten Material

Die Ringspaltverfüllung mit Bi - Komponenten besteht aus einer Zementschlempe (A - Komponente) und einem Beschleuniger (B - Komponente). Das Anwendungsgebiet liegt bei allen Arten von Tunnelvortriebsmaschinen und kann sowohl im standfesten als auch im nicht standfesten Gebirge verwendet werden.

Die Hinterfüllung erfolgt wie bereits erwähnt mit zwei verschiedenen Komponenten, die in getrennten Leitungen transportiert und erst in den Lisenen vermischt werden (siehe Kapitel 5.3.2). Die A - Komponente besteht aus ca. 70 - 80% Wasser, Bentonit, Zement und Stabilisator.⁸¹

Der Stabilisator wirkt als Verzögerer und kann die Hydratation des Zementes um bis zu 72 Stunden verzögern. Dies ist erforderlich um einerseits bei Stillständen eine Erhärtung der A - Komponente in den Leitungen zu verhindern, andererseits verbessert sich die Verarbeit- und Pumpbarkeit der

⁷⁸ Vgl. Heimburger, 2010, S.57.

⁷⁹ Vgl. Heimburger, 2010, S.62.

⁸⁰ Vgl. Betontechnologie 1, 2013, S.41.

⁸¹ Vgl. Maidl B., 2011, S.180.

Zementschlempe. Bei Stillständen, die länger als die Verzögerungsdauer anhalten, muss die Leitung der A - Komponente mit Wasser gereinigt werden.

Der Anteil an Stabilisator beträgt zwischen 5 und 10% am Mischungsverhältnis.⁸² Die Wirkungsweise beruht auf dem Gesetz der elektrostatischen Abstoßung. Die Teilchen des Stabilisators lagern sich zwischen den Zementteilchen ab und verstärken deren elektrische Abstoßung, wodurch der Platz zwischen den Teilchen größer wird. Die Dichte der A - Komponente nimmt ab und die Hydratation des Zementleims wird verzögert.

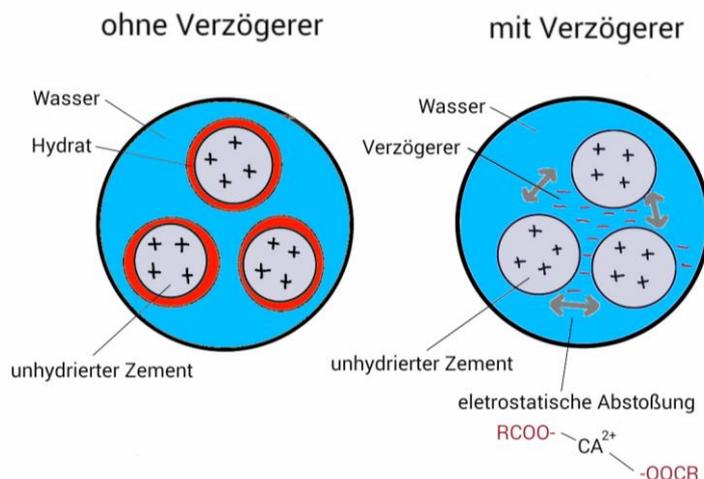


Abb. 5-8: Wirkungsweise eines Verzögerer

Eine Beispielmischung der A - Komponente vom Projekt Green Line Underground Doha kann folgender Tabelle entnommen werden:

Bestandteil	Zement	Wasser	Bentonit	Stabilisator	Gesamt
Anteil [kg/m ³]	300	833	40	80	1.253
Anteil [Massen%]	23,9	66,5	3,2	6,4	100

Tab. 5-1: Beispielmischung A - Komponente Green Line Underground Doha

Durch das Mischungsverhältnis der Komponenten lassen sich die Eigenschaften der Zementschlempe mehr oder weniger stark beeinflussen. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Beeinflussbarkeit in Abhängigkeit der Komponenten:

Parameter	Pumpbarkeit	Verzögerung / Hydratation	Bluten
w/z - Wert	++	+	+
Gehalt Stabilisator	+	++	+
Gehalt Bentonit	++	-	++
Temperatur	-	+	-

- nicht beeinflussbar + beeinflussbar ++ stark beeinflussbar

Tab. 5-2: Beeinflussbarkeit der A - Komponente durch das Mischungsverhältnis⁸³

⁸² Vgl. Maidl B., 2011, S.180.

⁸³ Condat Lubrications GmbH, 2007, S.7.

Die B - Komponente ist der Beschleuniger, der die Hydratation einleitet. In der Regel wird als Beschleuniger Wasserglas verwendet. Durch Zugabe der B - Komponente zur A - Komponente werden mineralische Ionen ergänzt und somit die abstoßende Wirkung des Stabilisators aufgehoben und die Hydratation eingeleitet. Desweiteren hat der Beschleuniger positive Auswirkungen auf das „Bluten“ und Auswaschen des Betons, da das zur Hydratation benötigte Wasser im Mörtel verbleibt. Nach der Zugabe des Beschleunigers zur Zementschlempe setzt die Gelierungszeit ein, die in Abhängigkeit vom Anteil der B - Komponente auf 10 - 15 s verringert werden kann. Interessant ist, dass bei einer Zugabe von mehr als 10 - 12% Beschleuniger die Gelierungszeit nicht mehr abnimmt, im Gegenteil - sie nimmt sogar zu.⁸⁴

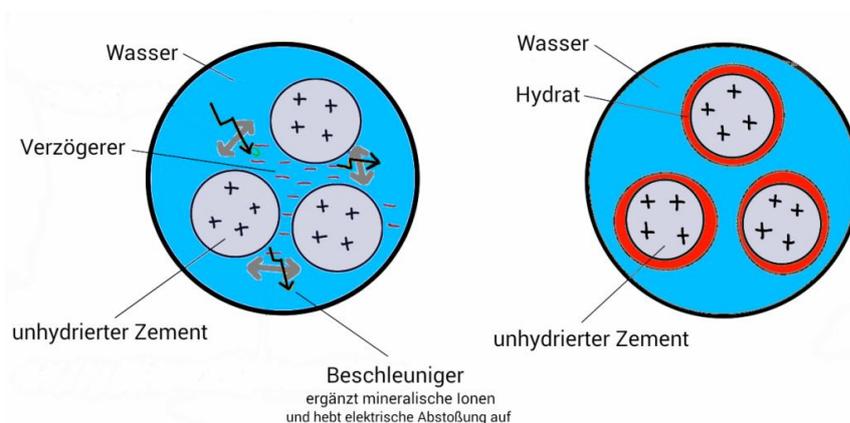


Abb. 5-9: Wirkungsweise eines Beschleunigers

Die für den Hinterfüllmörtel wichtigen Parameter und deren Beeinflussbarkeit können folgender Tabelle entnommen werden.⁸⁵

Parameter	Gelierzeit	Erstarrungszeit	Druckfestigkeit	E – Modul
Gehalt Stabilisator	+	++	-	-
Volumenverhältnis $0,05 \leq \frac{B - Komponente}{A + B - Komponente} \leq 10$	++	++	+	-
w/z – Wert	-	+	++	++
Mischungseffizienz	+	-	-	-
Mineralische Zusätze	-	-	+	+

- nicht beeinflussbar + beeinflussbar ++ stark beeinflussbar

Tab. 5-3: Beeinflussbarkeit der Parameter durch Komponentenmischung

⁸⁴ Quelle: ausgeführte Tests im Zuge eines Besuches bei MC Bauchemie (15.09.2014, 14:30).

⁸⁵ Condat Lubrications GmbH, 2007, S.7.

5.2.3 Feinkies (Perlkies)

Feinkies ist eine Gesteinskörnung aus natürlichen, mineralischen Stoffen die einer mechanischen Aufbereitung unterzogen wurde. Zur Hinterfüllung können sowohl gebrochene als auch runde Gesteinskörnungen verwendet werden, wobei letztere folgende Vorteile aufweist:⁸⁶

- geringerer Verschleiß an Leitungen und Pumpen
- besseres Fließverhalten in den Leitungen
- höherer Füllgrad der Pumpen
- keine Verkantung im Ringspalt
- gleichmäßigere Verteilung im Ringspalt

Üblicherweise werden zur Ringspaltverfüllung enggestufte, grobe Gesteinskörnungen mit einer 4/8 oder 8/16 - Sieblinie verwendet.

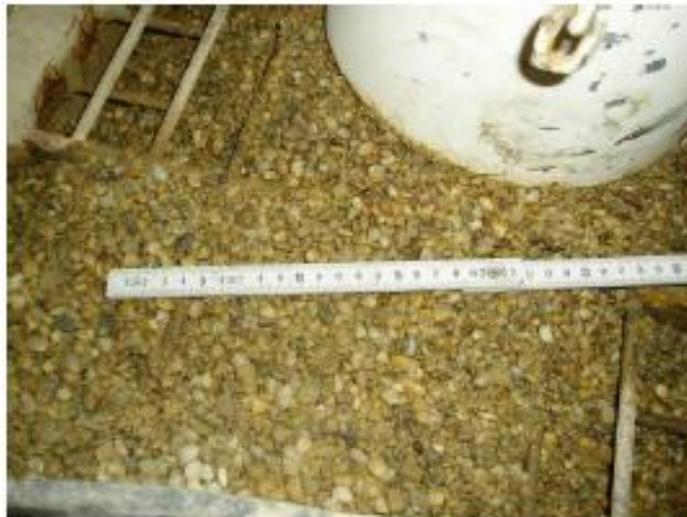


Abb. 5-10: Runde Körnung – Perlkies⁸⁷

Eine Hinterfüllung mit Kies bewirkt eine zusätzliche Drainage in Tunnellängsrichtung, dadurch kann bei starkem Wasserandrang der Druck auf die Tunnelschale verringert werden.⁸⁸ Um eine stabilere Bettung der Tübbingringe zu gewährleisten wird häufig eine Mischung aus groben und feinen Gesteinskörnungen verwendet.

Sollte eine Drainage in Längsrichtung unerwünscht sein, kann der Ringspalt mit Zementsuspension nachverpresst werden. Dies geschieht über Öffnungen in der Tunnelfirste und ist nur bei geringem Wasserandrang möglich, da ansonsten die Zementsuspension ausgewaschen wird. Nach dem Einbringen der Suspension im Firstbereich verläuft das Material entlang der Tübbingaußenkante und füllt den Ringspalt von der Sohle her auf.

⁸⁶ Vgl. Heimbürger, 2010, S.86.

⁸⁷ Heimbürger, 2010, S.86.

⁸⁸ Vgl. Wittke W., 2007, S.311.

5.3 Einbringverfahren

5.3.1 Kontinuierliches Einbringen – Mörtel

Der Nassmörtel wird in einem Werk gemischt und mittels Mörtelkübel zur TVM gebracht. Anschließend wird dieser in einen Mörteltank auf die TVM gepumpt. Der Mörteltank muss eine Wischerwendel besitzen, um den Mörtel ständig in Bewegung und somit pumpbar zu halten.

Für die eigentliche Hinterfüllung wird der Mörtel mit Pumpen – meist Doppelkolbenpumpen (siehe Abb. 5-11) – durch Lisenen in den Ringspalt gepumpt. Die Länge der Leitungen kann dabei, in Abhängigkeit des Maschinendesign mehr als 20 m betragen. Über die Länge der Leitung nimmt der Druck in Abhängigkeit folgender Elemente ab:⁸⁹

- Durchmesser der Leitung
- Form der Leitung (rund/oval)
- Leitungsmaterial
- Pumpstrecke
- Korngrößen der Gesteinskörnung
- Kornform der Gesteinskörnung
- Zusatzmittel im Mörtel
- Wassergehalt des Mörtels

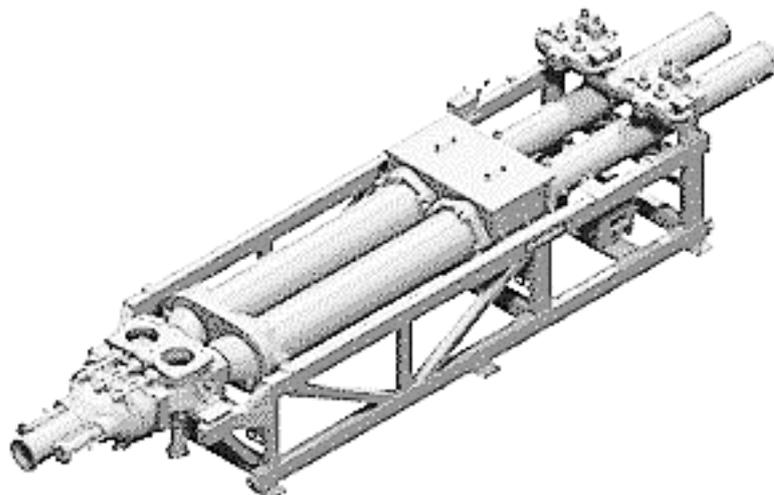


Abb. 5-11: Mörtelpumpe für Ringspaltverfüllung⁹⁰

⁸⁹ Vgl. Heimburger, 2010, S.70.

⁹⁰ Quelle: <http://www.schwing.de/product=ksp-110-hd> (11.11.2014, 11:52).

Der notwendige Pumpendruck errechnet sich somit aus oben genannten Punkten und dem Wasserdruck, gegen die der Ringspaltmörtel im Ringspalt ankämpfen muss. Die Druckeinstellung kann dabei sowohl automatisch als auch manuell am Nachläufer eingestellt werden.

Eine Alternative zum Nassmörtel stellt der Trockenmörtel dar. Dieser wird im Gegensatz zu Erstgenannten in einem Werk hergestellt und auf die Baustelle mittels Silos, Big Packs oder Säcken transportiert und in einem Silo auf der TVM gelagert. Die Mischung erfolgt anschließend durch Zugabe von Wasser in einem Durchlaufmischer. Mittels Pumpen wird der erzeugte Ringspaltmörtel durch Lisenen in den Ringspalt gepumpt.

Vor- und Nachteile von Trocken- bzw. Nassmörtel kann folgender Tabelle entnommen werden:

	Vorteile	Nachteile
Trockenmörtel	<ul style="list-style-type: none">• genauere Mischrezeptur möglich• keine Erhärtung bei Stillständen• keine Mischanlage vor Ort	<ul style="list-style-type: none">• erhöhte Kosten (Rücktrocknung der Komponenten im Werk, Anlieferung und Verpackung)• Rezepturänderung aufwändig
Nassmörtel	<ul style="list-style-type: none">• geringere Kosten• Rezepturänderung leicht möglich	<ul style="list-style-type: none">• Gefahr der Erhärtung bei Stillständen• Mischanlage vor Ort erforderlich

Tab. 5-4: Vor- und Nachteile von Trocken- bzw. Nassmörtel

5.3.2 Kontinuierliches Einbringen – Bi - Komponente

Beim kontinuierlichen Verpressen der Bi - Komponente können zwei Verfahrensarten zur Anwendung kommen, auf der einen Seite das Premix - System, auf der anderen Seite das Injektionsblock - System, wobei letzteres Verfahren den Stand der Technik darstellt.

Beim Premix Verfahren werden beide Komponenten in einem Mischerblock vor den Lisenen zusammengemischt. Die A - Komponente wird mittels Leitungen auf die TVM gepumpt, auf der ein Tank für die Zementschlempen installiert ist. Die B - Komponente wird mittels wechselbaren Tanks auf die TVM gebracht. Um eine Reinigung der Mörtelleitung zu ermöglichen ist in dieser ein 3 - Wege Kugelhahn installiert. Im Spülvorgang bewegt ein Hydraulikzylinder einen Absperrkolben in der A - Komponenten Leitung und blockiert somit den Zufluss von Mörtel. Dieser Absperrkolben besitzt eine Ringöffnung, durch die Spülwasser in die Mörtelleitung gelangt, jedoch verhindert sie das Spülwasser in den Ringspalt eindringt. Vor dem Reinigungsvorgang wird der 3 - Wege Kugelhahn umgestellt und der ausgespülte Mörtel gelangt in einen Entsorgungstank auf der TVM. In Abb. 5-12 ist das Premix - System sowohl im Verpress- als auch im Spülmodus dargestellt.

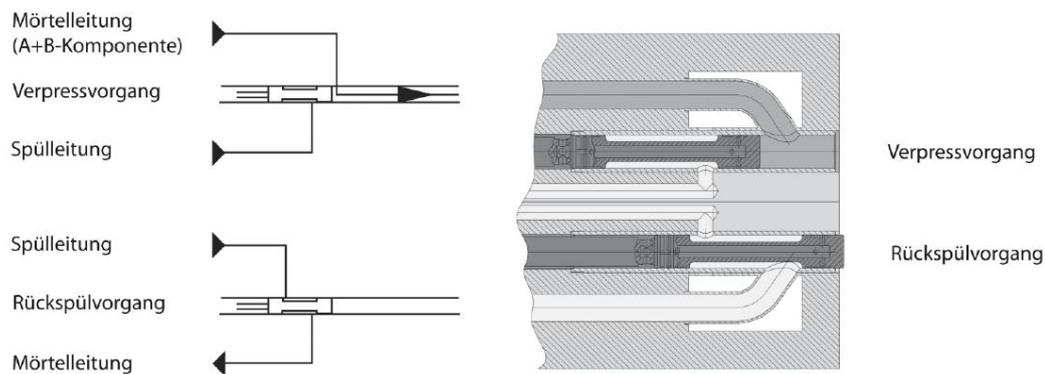


Abb. 5-12: Verpress- und Rückspülvorgang Premix - System⁹¹

Eine Alternative zum Premix – System ist das Injektionsblock - System. Die Mischung beider Komponenten erfolgt dabei rund einen Meter vor der Austrittsöffnung am Schildschwanz. Auf der Lisene ist ein Injektionsblock installiert, an dem sowohl die B – Komponenten - Leitung als auch eine Spülleitung angeschlossen sind. Der Druck in der B - Komponenten Leitung muss höher als in der A - Komponenten Leitung sein, um in diese gepresst und anschließend vermischt zu werden. Durch ein Rückschlagventil wird ein Rückfluss der A - Komponente in die Leitung der B - Komponente verhindert.

Im Reinigungsvorgang muss nur die Strecke zwischen Injektionsblock und Lisenaustritt gereinigt werden. Die Reinigung sollte, um mögliche Stopfer zu verhindern, nach jedem Vortrieb erfolgen. Ziel der Reinigung ist es den Injektionsblock und den Bereich nach diesem frei von der B - Komponente zu bekommen, die A - Komponente darf auf Grund ihrer verzögerten Erhärtung in der Lisene verbleiben. Um dieses Ziel zu erreichen wird die Pumpe der B - Komponente früher abgeschaltet und der Spülvorgang wird gestartet. Beim Spülvorgang kann zwischen Spülung mit Wasser und Spülung mit A - Komponente unterschieden werden.

Bei erstgenanntem Spülvorgang wird solange Wasser eingeleitet bis der Injektionsblock inklusiver anschließender Lisene frei von jeglichem Material ist. Ein Nachteil dieser Reinigungsmethode ist das Wasser in den Ringspalt eindringt, jedoch handelt es sich dabei um eine so geringe Menge, dass dies keine Auswirkungen auf die Festigkeit oder die Erstarrungszeit des Mörtels hat.

Bei zweitgenanntem Vorgang erfolgt die Spülung mit Mörtel, dazu wird wiederum die B - Komponente gestoppt und nur kurz mit Wasser gespült, zur Reinigung selbst wird anschließend die A - Komponente durch die Lisene gepumpt. Dies hat den Vorteil das vor allem die A - Komponente in den Ringspalt fließt und je nach Verzögerer nach bis zu 72 h erhärtet. Dies hat ebenfalls keinen Einfluss auf die Festigkeit oder Erstarrungszeit des Mörtels.

⁹¹ Maidl B., 2011, S.180.

5 Ringspaltverfüllung

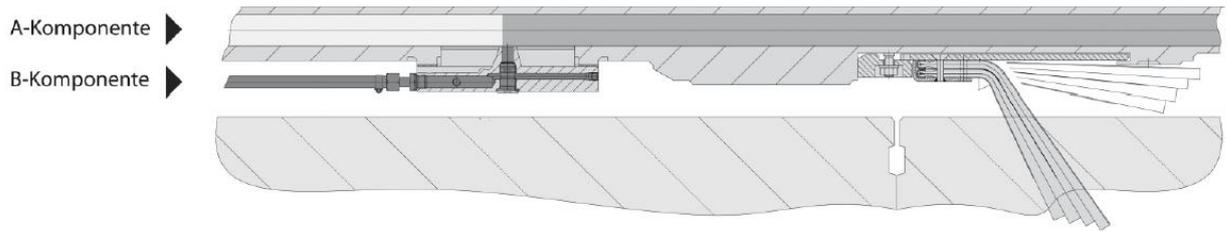


Abb. 5-13: B-Komponentenzugabe beim Injektionsblock - System⁹²

In Abb. 5-13 sind die Leitungsführungen bei dem Injektionsblock - System zu sehen. Die B - Komponente wird im Injektionsblock mit der A - Komponente vermischt und anschließend in den Ringspalt gepumpt. Abb. 5-14 und Abb. 5-15 zeigen den Injektionsblock im Detail.

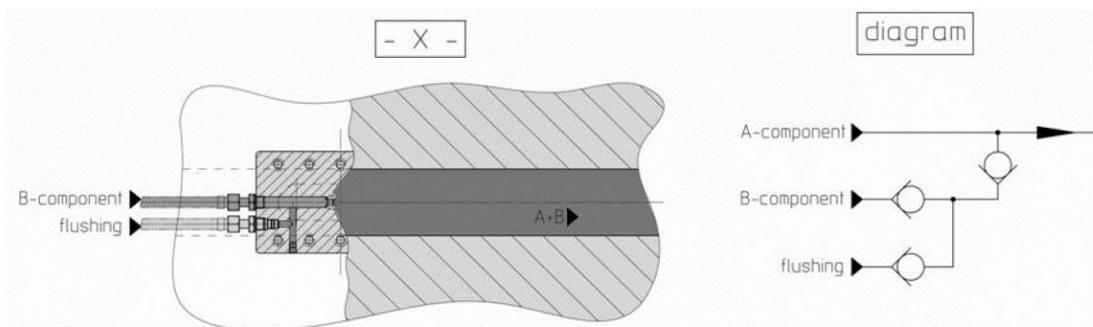


Abb. 5-14: Injektionsblock - System⁹³

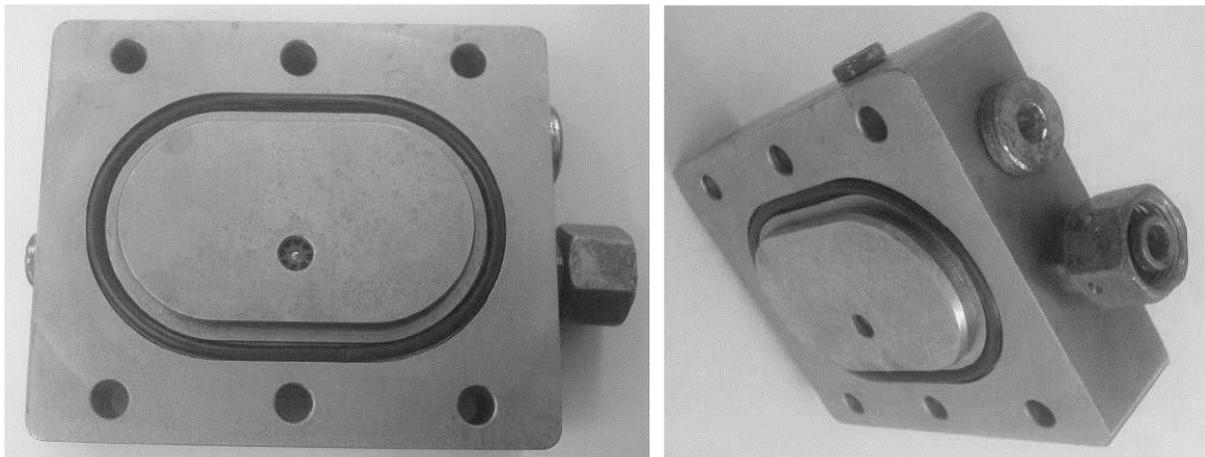


Abb. 5-15: Injektionsblock - TVM Green Line Underground Doha

In Abb. 5-15 kann der verwendete Injektionsblock beim Bauvorhaben Green Line Underground in Doha gesehen werden. Über die vorhandenen Anschlüsse wird sowohl das Spülwasser als auch die B - Komponente zugeführt.

⁹² Maidl B., 2011, S. 180.

⁹³ Herrenknecht, Schildhandbuch, 2014, S.60.

Die wesentliche Vorteile des Injektionsblock - Systems gegenüber dem Premix - System sind:

- Schmale Bauart

Die ovalen Lisenen sind im Schildschwanzaufbau integriert und führen somit zu keiner zusätzlichen Verdickung des Schildschwanzes. Der Injektionsblock sitzt im Inneren des Schildschwanzes auf der Lisene ohne jedoch den Spalt zwischen Tübbingring und Schildschwanz zu verringern.

- Einfache Bauweise

Im Vergleich zum Premix-System besteht das Injektionsblock-System aus keinen Einzelteilen, wodurch dieses weniger fehler- und reparaturanfällig ist. Desweiteren ist der Injektionsblock gut erreichbar, ein Austausch ist jedoch nicht möglich, da die B - Komponente ständig unter Überdruck stehen muss, um ein Einlaufen der A -Komponente zu verhindern.

- Kurze Austrittslänge nach Mischung

Der Injektionsblock sitzt rund einen Meter vor der Austrittsöffnung am Schildschwanz. Durch diesen geringen Weg bis zum Austritt wird die Gefahr eines Erhärtens (Stopfer) des Mörtels in der Lisene verringert. Dies senkt sowohl die Reparatur- als auch die Reinigungskosten.

5.3.3 Nachträgliches Einbringen – Mörtel und Kies

Das nachträgliche Einbringen von Ringspaltmaterial kann sowohl beim Verfüllen mit Feinkies (Perlkies) als auch mit Mörtel im standfesten Gebirge verwendet werden. Dazu muss jedoch zuerst der Tübbingring im Sohlbereich in seiner Lage fixiert werden, um ein Verrutschen oder Verdrehen durch das Befahren mit den Nachläufern zu verhindern. Die Lagesicherung erfolgt in einem Winkelbereich von 60°-120° durch Verfüllen mit Trocken- oder Nassmörtel. Dazu werden am Schild montierte Lisenen verwendet. Ein gleichmäßiges Verfüllergebnis kann durch gleichmäßig angeordnete Lisenen erfolgen.

Im oberen Bereich (240°) erfolgt eine Verfüllung des Ringspaltes mit Perlkies durch Öffnungen in den Tübbingingen. Dazu wird von unten nach oben mit der Verfüllung gestartet, ist der Kies im jeweiligen Bereich so weit eingeblasen, dass kein Rücklauf des Materials durch die Öffnung mehr möglich ist, so ist der Verpressvorgang für diesen Bereich abgeschlossen. Zuletzt erfolgt die Verpressung im Firstbereich.

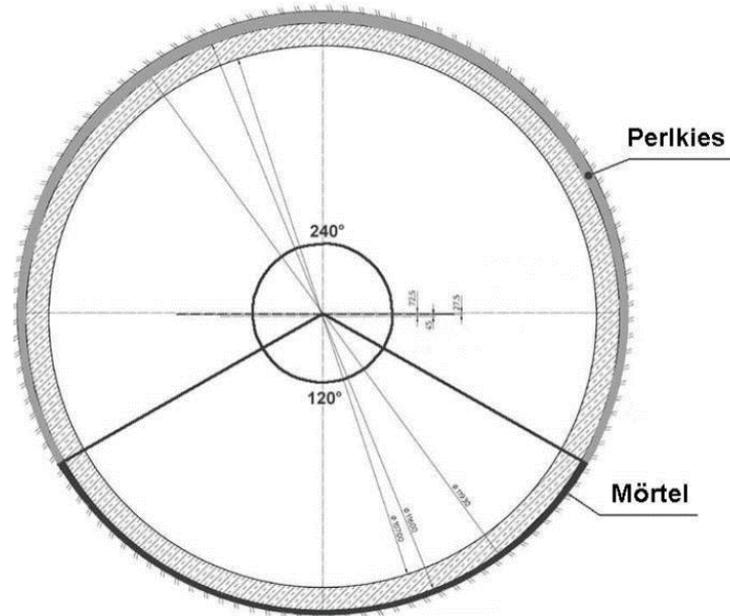


Abb. 5-16: Übersicht Lagesicherung Tübbingung⁹⁴

Die Verpressung mit Perlkies erfolgt drei bis fünf Tübbingringe im Nachgang, maßgebend für diesen Wert ist der Reibungswinkel des einzubringenden Materials, dieser liegt meistens zwischen 30 und 37,5°. Um eine stabile Tübbinglage zu garantieren, muss die Ringspaltverfüllung mindestens bis auf Höhe der Tunnelachse reichen. Dazu wird die Kieseinbringung bereits zu jenem Zeitpunkt gestartet, um eine Verfüllung beim Schildschwanz bis auf Höhe der Tunnelachse zu garantieren. Wie in Abb. 5-17 dargestellt, bleibt der Firstbereich der zuletzt eingebauten Ringe aufgrund des Reibungswinkels vorerst unverfüllt.

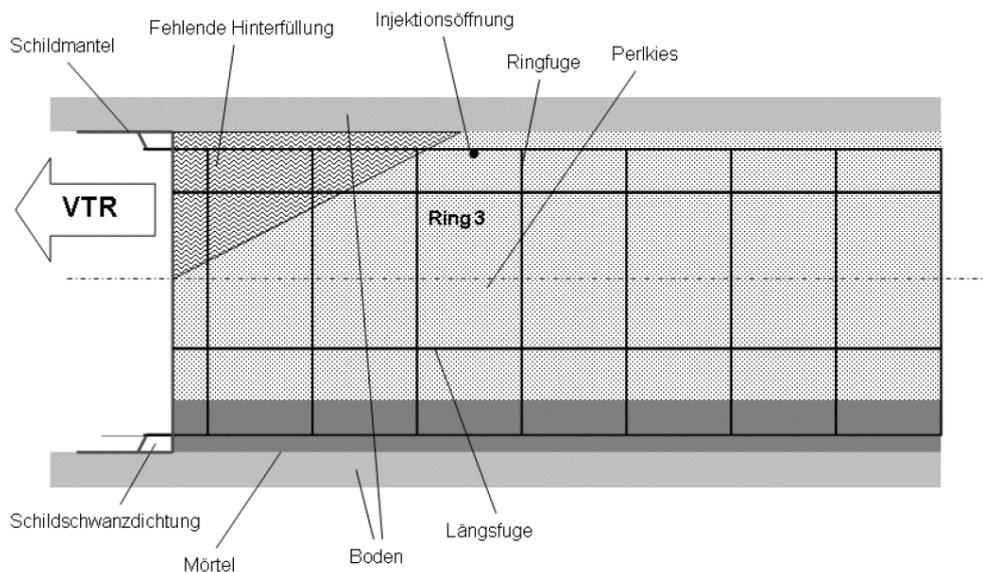


Abb. 5-17: nachträgliche Ringspaltverfüllung⁹⁵

⁹⁴ Heimburger M., 2010, S.90.

Eine frühzeitigere Verpressung des Firstbereichs wäre auch möglich, birgt jedoch größere Risiken in sich. So kann es z.B. durch erhöhten Druck im Schlauch zum Platzen dieses führen, die Schildschwanzdichtung (siehe Kapitel 6) kann ebenfalls durch den Austritt des Materials beschädigt werden. Auch ein Lösen des Schlauches während dem Verpressen ist denkbar. Neben der Beschädigung der Maschine birgt dies auch Sicherheitsrisiken für das Bedienpersonal.

Durch die erzeugten Vibrationen des Schildschwanzes wird der Perlkies verdichtet und es kommt zu einem Nachsacken des Materials im Firstbereich. Um dennoch eine ausreichende Hinterfüllung zu gewährleisten, wird ca. 40 bis 100 m nach dem Schild eine sogenannte Sekundärverpressung durchgeführt. Dazu kann entweder im Firstbereich erneut Kies über die vorhandenen Öffnungen eingebracht werden, oder es kann mit Zementsuspension verpresst werden. Bei letztgenannten wird jedoch die Durchlässigkeit der Ringspaltverfüllung reduziert, im Gegensatz dazu erreicht man jedoch eine deutlich höhere Stabilität.

Bei der Hinterfüllung mit Perlkies kommen spezielle Pumpen zum Einsatz. Durchgesetzt haben sich adaptierte Spritzbetonpumpen mit Rotor, automatischer Abschaltung und Mengemessung. Über einen Trichter kommt das Material in die Rotorkammer. Hier wird durch die Oberluft der Perlkies in die Abblaskammer befördert, wo er schließlich mit Unterluft in Förderleitung und anschließend in den Ringspalt getrieben wird.

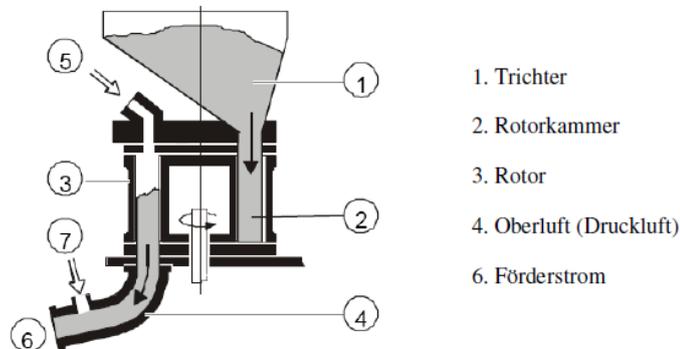


Abb. 5-18: Pumpe zum Einbringen von Kies⁹⁶

Zu den Vorteilen der nachträglichen Verfüllung mit Perlkies zählen:⁹⁷

- Wirtschaftlichkeit

Verpressung mit Perlkies ist im Vergleich zu Verpressung mit Mörtel oder Zweikomponenten Material deutlich billiger, da rund $\frac{2}{3}$ des Ringspaltmaterials aus Kies bestehen. Desweiteren werden durch die Verwendung von Kiesmaterial die Kosten für Reinigungsarbeiten vermindert, da Kies in den Verfüllschläuchen nicht erstarren kann. Die Lisenen im Bereich der Sohle müssen trotzdem gereinigt werden, da hier Nass- oder meist

⁹⁵ Heimbürger M., 2010, S.92.

⁹⁶ Quelle: Aliva, Bedienungsanleitung Aliva AL – 263, S.2-6.

⁹⁷ Vgl. Heimbürger, 2010, S.96.

Trockenmörtel verwendet wird. Auch die Wirtschaftlichkeit der Maschinenkomponenten schlägt sich positiv zu Buche, da bei Verwendung von Trockenmörtel im Sohlenbereich keine Mischanlagen benötigt werden. Es muss lediglich ein viel preiswerterer Durchlaufmischer installiert werden. Als Schildschwanzdichtung kommen Lynacell-Dichtungen (siehe Kapitel 6.1.1) zum Einsatz, welche bereits günstiger als Stahlbürstendichtungen sind. Zusätzlich kann dadurch auf das kostspielige Schildschwanzfett verzichtet werden

- Aushärtezeit

Da bei einer Verpressung mit Perlkies keine Aushärtezeit notwendig ist, ist der Tübbingring ab dem Einbringen der Ringspaltfüllung im Firstbereich sofort vollflächig gebettet und es kann zu keinen Verformungen oder erhöhten Belastungen des angrenzenden Bodens kommen

- Vorhaltezeit

Durch den Verzicht auf Nassmörtel können die benötigten Materialien der Ringspaltverfüllung auf der TVM selbst gelagert werden. Dazu muss jedoch ausreichend Platz vorhanden sein und es müssen Behälter installiert werden. Ein weiterer Punkt ist dadurch die Unabhängigkeit einer Mischanlage, die Materialien können unabhängig von Steh- und Wartungszeiten geliefert werden und müssen nicht „just in time“ an der TVM ankommen. Desweiteren werden dadurch auch Stehzeiten durch fehlendes Ringspaltmaterial vermindert.

- Sicherheit gegen Verpressen des Schildes

Durch den Entfall von Mörtel als Ringspaltmaterial, ausgenommen im Sohlbereich wo jedoch mit geringem Druck verpresst wird, wird die Gefahr eines möglichen Mörtelaustritt im Bereich des Schildes vermindert, dadurch kann es zu keinem Festsetzen des Schildes kommen. Auch der Kies im Ulmenbereich wird erst drei bis fünf Ringe nach dem Schildende verpresst und es kann somit zu keinem wesentlichen Festsetzen kommen.

Den oben angeführten Vorteilen stehen folgende Nachteile gegenüber:⁹⁸

- Einbaukontrolle

Bei einer Verpressung mit Perlkies ist eine ausreichende Einbaukontrolle nicht möglich. Die reine volumengesteuerte Betrachtung zwischen theoretischem Ausbruch und verwendetem Material trifft keine Aussagen über eventuelle Mehrausbrüche. Eine Sekundärverpressung, die jedenfalls notwendig ist um den Firstbereich zu verpressen, ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt der bei der kontinuierlichen Verpressung nicht zwingend notwendig ist.

⁹⁸ Vgl. Heimbürger, 2010, S.96.

- Schildschwanzdichtung

Die Dauerhaftigkeit der Lynacell – Dichtungen ist geringer als jener der Stahlbürstendichtungen, häufigere Instandhaltungen und Austausche können daher die Folge sein. Der Kostenvorteil durch das nicht benötigte Schildschwanzfett muss diesem Faktor gegengerechnet werden.

- Nachrutschender Boden

Nachträgliches Verpressen kann prinzipiell nur in standfesten Böden erfolgen, sollte dennoch bei einer nachträglichen Verfüllung Bodenmaterial in den Ringspalt vor der Verfüllung nachrutschen, so ist eine sichere und ordnungsgemäße Ringspaltverfüllung nicht mehr gewährleistet. Problematisch wird dies vor allem wenn mehrere Tübbingelemente in einer Reihe betroffen sind.

6 Schildschwanzdichtung

Bei Schildvortrieben entsteht durch die im Kapitel 5 beschriebenen Vorgänge ein Ringspalt, der außen durch das anstehende Gebirge und innen durch den fertigen Tunnel begrenzt wird. Getrennt wird die Schildmaschine vom Ringraum durch eine Schildschwanzdichtung. Ihre Konstruktionshöhe kann in Abhängigkeit vom Schilddurchmesser zwischen 85 mm und 185 mm liegen. Meist liegt sie jedoch im Bereich von 115 bis 140 mm.⁹⁹

Die Schildschwanzdichtung muss erhebliche Erd- und Wasserdrücke sowie entstehende Drücke aus der Ringspaltverpressung aufnehmen und die Fuge zwischen Schildmantel und Außenseite der Tübbinge verlässlich abdichten. Mögliche Verpressdrücke können dabei, wie beim Eurotunnel auf der französischen Seite, die 12 bar Marke überschreiten.¹⁰⁰

6.1 Arten der Schildschwanzdichtung

Zu Beginn wurde mit nachgiebigen Materialien wie Putzlappen, Stricke, Sackleinen und Holzwolle der Ringspalt per Hand gestopft um ein Auslecken des Ringspaltmörtels oder ein entweichen der Druckluft zu verhindern. Heutzutage haben sich vor allem Kunststoffprofildichtungen (Gummimanschetten) und Stahlbürsten durchgesetzt. Diese werden in den folgenden Kapitel genauer erläutert.

6.1.1 Kunststoffprofildichtung

Die ersten Kunststoffprofildichtungen bestehen aus einem Schaumstoff und Federblechelementen zur Unterstützung und kommen vor allem bei nachträglicher Ringspaltverfüllung mit Mörtel in der Sohle und Perlkies in der Ulme und Firste zur Anwendung (Kapitel 5.3.3). Diese Art von Kunststoffprofildichtung ist auch als Lynacelldichtung bekannt und überzeugt vor allem durch ihre einfache Bauart und wirtschaftlichen Vorteil gegenüber Stahlbürsten durch geringere Anschaffungskosten und dem Verzicht auf Sekundärmaterial (Schildschwanzfett). Desweiteren können im Schadensfall einzelne Federblechelemente einfach ausgetauscht werden. Nachteile der Lynacelldichtung bestehen zum einen in der Dichtigkeit bei erhöhtem Wasser- und Verpressdruck, zum anderen wird ein gleichmäßiger Ringbau vorausgesetzt.¹⁰¹

⁹⁹ Vgl. Maidl B., 2011, S.169.

¹⁰⁰ Dewner, W.: Moderner Tunnelbau in Frankreich (Teil 2), 1998, S.21.

¹⁰¹ Vgl. Girmscheid G., 2013, S.458.

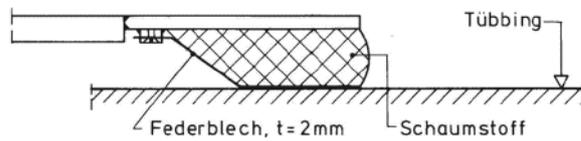


Abb. 6-1: Lynacelldichtung¹⁰²

Durch Weiterentwicklung der Lynacelldichtung entstand die S1 - Dichtung. Diese besteht aus einzelnen Gummisegmenten welche über Kugelstangen am Schildschwanzende befestigt werden. Die Dichtungslippe gleitet über die Tübbingrückseite und dichtet somit den Ringspalt ab. Es soll bei Verwendung einer Kunststoffprofildichtung auf eine aufblasbare Notdichtung nicht verzichtet werden, um auch die Dichtigkeit bei größerem Versatz der Tübbingringe zu gewährleisten.

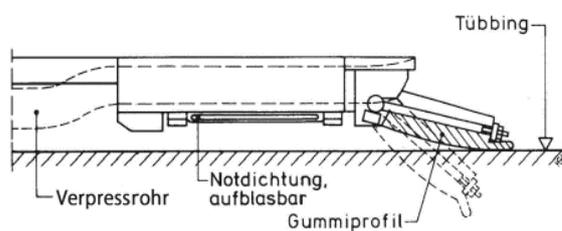


Abb. 6-2: S1 Kunststoffprofildichtung inkl. Notdichtung¹⁰³

Vorteile der S1 - Dichtung sind zum einem die Verpressmöglichkeit durch die Schildschwanzdichtung, zum anderen kann diese bei Verpressdrücken bis 3,5 bar eingesetzt werden. Bei zu großen Änderungen des Ringspalts, Tübbingversätze in den Längsfugen, rauen Tübbingaußenflächen oder lokalen Verpressdrücken kann es dennoch zu Problemen kommen.

6.1.2 Stahlbürstendichtung

Die Stahlbürstendichtung ist ebenfalls fest am Schild montiert. Sie besteht aus bis zu vier hintereinander angeordneten Bürstenreihen, die mit dem Tübbing und äußerem Schildschwanz mehrere Dichtkammern ergeben. In die einzelnen Dichtkammern wird eine Dichtmasse (Schildschwanzfett) gepresst. Um ein Eindringen von Wasser, Boden oder Verpressgut zu verhindern,

¹⁰² Maidl B., 2011, S.171.

¹⁰³ Maidl B., 2011, S.171.

6 Schildschwanzdichtung

wird die Dichtmasse ständig mit einem Überdruck von 2 bar gegenüber dem Mörtel - Verpressdruck in die Kammern eingepresst. Sollte es zu einem Druckabfall im Verpressgut kommen bietet die Stahlbürstendichtung den Vorteil, dass kein Boden oder Wasser in den Ringspalt eindringt, sondern nur die unter Druck stehende Dichtmasse.

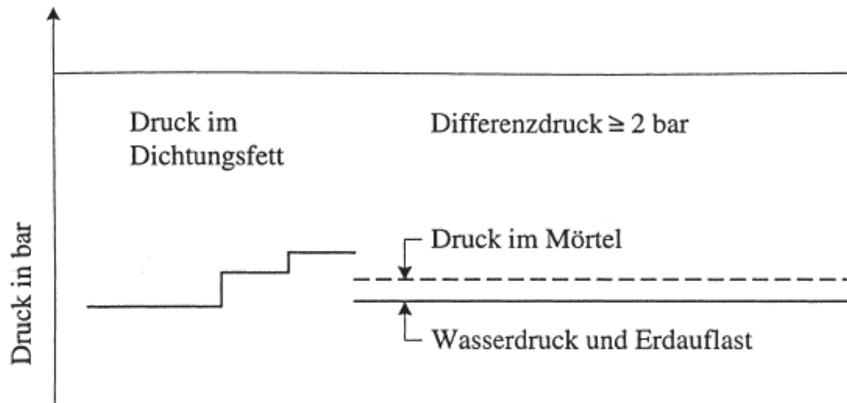


Abb. 6-3: Druckgradient im Ringspalt¹⁰⁴

Vorteile bestehen auch bei Versatz der Längsfugen, da mit Hilfe der Stahlbürsten und der Dichtmasse hier ein Ausgleich geschaffen werden kann. In Punkto Robustheit besteht auch ein Vorteil gegenüber den Kunststoffprofildichtungen. Sollte es dennoch zu Beschädigungen der Stahlbürsten kommen, kann diese durch einen Mehrverbrauch der Dichtmasse wieder wettgemacht werden. Ein Austausch der letzten Bürstenreihe, die meist geschraubt ausgeführt wird, ist ebenso möglich wie der Austausch der inneren Reihen durch sequentiellen Ausbau der letzten Tübbinge.

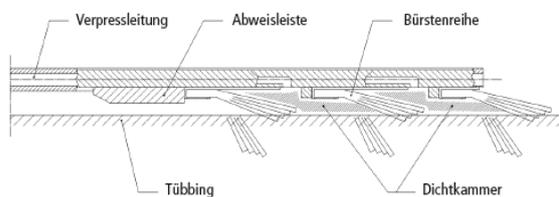


Abb. 6-4: drei-reihige Stahlbürstendichtung¹⁰⁵

¹⁰⁴ Girmscheid G., 2008, S.459.

¹⁰⁵ Maidl B., 2011, S.172.

Als Nachteile können die möglichen Umweltbeeinflussungen der Dichtmassen und deren Kosten gesehen werden. Im Notfall steht als Sofortmaßnahme das Verpumpen einer speziellen wasseraktiven „Kaugummi - Dichtmasse“ zur Verfügung.¹⁰⁶

6.1.3 Äußere Schildschwanzdichtung

Die in Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 erläuterten Methoden zählen zu den inneren Schildschwanzdichtungen. Eine äußere Schildschwanzdichtung ist bei offenen Schilden notwendig, bei denen beim Verpressen des Ringspaltes ein aktiver Gegendruck aus der Ortsbruststützung fehlt. Dieser fehlende Gegendruck würde zu einem Hinterlaufen des Schildes und Bohrkopfes mit Verpressmaterial und schließlich zu einem Festfahren der TVM führen. Eine äußere Schildschwanzdichtung wird generell bei allen EBP-Maschinen installiert, um auch einen Vortrieb im offenen Modus zu erlauben.

Um einem Festfahren entgegenzuwirken kann eine äußere Schildschwanzdichtung (Excluder), die aus geschindelten Federblechpaketen besteht, vorgesehen werden. Die Abdichtung hängt vor allem vom Anliegen des Federbleches an die mehr oder weniger glatte Fläche des anstehenden Gebirges ab. Abhilfe kann durch eine vorgeschaltete zweite Reihe und einer möglichen Verpressung des Zwischenraumes mit Dichtmasse erfolgen. Dieses „zweite“ Sicherungssystem hat jedoch den Nachteil des erhöhten Anfahrwiderstandes.



Abb. 6-5: äußere Schildschwanzdichtung¹⁰⁷

6.1.4 Elastisch gestützte Stirnschalung beim Extrudierverfahren¹⁰⁸

Das Prinzip der elastisch gestützten Stirnschalung entspricht jenem der Tunnelsicherung mit Extrudierverfahren, einem Verfahren, dass in den 1970er Jahren entwickelt wurde, um im Zuge eines maschinellen Vortriebs eine Tunnelsicherung mit pumpfähigen Ortbeton zu erzielen. Dazu wird zum

¹⁰⁶ Vgl. Maidl B., 2011, S.172.

¹⁰⁷ Maidl B., 2011, S.173.

¹⁰⁸ Vgl. Maidl B., 2011, S.173 f.

einen eine elastisch gestützte Stirnschalung und zum anderen eine Stahlschalung gegen den Innenraum des Tunnel benötigt, in diese während dem Vortrieb Beton injiziert wird.

Aus oben beschriebenen Verfahren wurde eine Ableitung zur Abdichtung des Ringspalts entwickelt. Die elastisch gestützte Stirnschalung wird wie oben beschrieben verwendet, anstatt der Stahlschalung gegen den Innenraum wird der bereits eingebaute Tübbing verwendet. Vorteil des Systems ist die Möglichkeit der druckkonstanten Verpressung des Ringraumes.

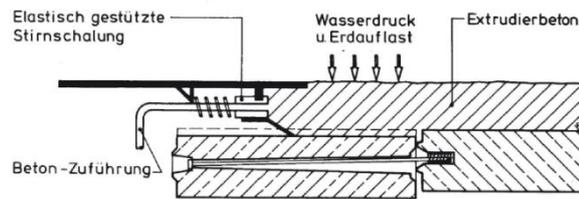


Abb. 6-6: elastisch gestützte Stirnschalung

Die elastisch gestützte Stirnschalung besteht aus Hydraulikzylindern, in deren geschlossenem Hydrauliksystem ein Gaspolster eingebaut ist. Mit einem voreingestellten Druck kann das System vorgespannt werden. Die Voreinstellung des Gasvolumens wird so gewählt, dass die Druckschwankungen durch Bewegungen der Dichtungen möglichst gering sind. Dadurch wird gewährleistet, dass der Druck auf die Dichtung vom Verpressmaterial und umgekehrt nahezu gleich und konstant ist und vorhandene Druckschwankungen der Betonpumpe ausgeglichen werden.

Der Vorteil der druckkonstanten Verpressung ist die sehr gute Bettung der Tübbinge und bei geeignetem Verpressmaterial eine Erhöhung der Dichtigkeit des Tunnelsystems.

Dem gegenüber besteht ein Nachteil in der erforderlichen Konstruktionshöhe, wodurch mehr Ringspalt entsteht und somit auch mehr Ringspaltmaterial eingebracht werden muss. Als letztes Projekt wurde die Passante Ferroviaria (Fertigstellung 2008) mit einer elastisch gebetteten Stirnschalung ausgeführt. Dabei wurden Tübbinge mit einer Stärke von 300 mm und ein anschließender Ringspalt von 250 mm verwendet.

6.2 Dichtmasse für Schildschwanzdichtung

6.2.1 Schildschwanzfett

Bei der im Kapitel 6.1.2 beschriebenen Schildschwanzdichtung wird in den entstehenden Raum zwischen den Stahlbürsten, Schildmantel und Tübbingsegment Schildschwanzfett eingepumpt. Dies geschieht um den Widerstand gegen eindringendes Wasser, Boden und Ringspaltmaterial in den Tunnel zu erhöhen. Auch bei der äußeren Schildschwanzdichtung kann Schildschwanzfett eingebracht werden, dies wird jedoch, aus oben beschriebenen Gründen, selten gemacht.

Beim Schildschwanzfett wird generell zwischen einer Erstfüllung und dem Schildschwanzfett für den kontinuierlichen Vortrieb unterschieden. Je nach Hersteller der Dichtmassen werden unterschiedliche Rezepturen und Zusatzmittel verwendet, wobei generell folgende Hauptinhalte vorhanden sind:

- mineralische und/oder synthetische Öle
 - Verdicker
 - Zusatzstoffe
 - Fasern
- } Schmierfett

Wichtige Eigenschaften der Dichtmassen, unabhängig von Erstfüllung oder kontinuierlichen Füllung und Hersteller sind:

- Widerstand gegen Wasser und Ringspaltmaterial

Beim Widerstand gegen Wasser und Ringspaltmaterial ist es wichtig, dass sich die Dichtmasse nicht mit anderen Medien vermischt, da sonst der Schutz der Stahlbürsten bzw. das Verhindern eines Eintritts von Wasser bzw. Ringspaltmaterial nicht mehr gegeben ist. Einfache Tests können einen visuellen Aufschluss über das Verhalten von Schildschwanzfett gegen Wasser geben (siehe Kapitel 6.3.1).

- Adhäsion an Metalloberflächen

Die Dichtmasse soll an dem Schildmantel und am Beton haften, um ein Unterlaufen des Schildschwanzfettes durch fremde Medien (Wasser, Ringspaltmaterial) zu verhindern. Außerdem verhindert die Adhäsion das Auswaschen des Schildschwanzfettes aus den Kammern im Leckagefall (siehe auch hier Kapitel 6.3.1).

- Konsistenz/Zähigkeit/Rheologie

Eine höhere Konsistenz führt zu einer besseren Verbindung mit den Stahlbürsten und schützt diese somit besser. Die Konsistenz kann je nach Temperatur der Dichtmasse variieren, dadurch kann auch der tatsächliche Verbrauch an Schildschwanzfett während des Vortriebes variieren (siehe Kapitel 6.2.2). Die ausreichende Pumpfähigkeit des Materials muss jedoch in Abhängigkeit der Konsistenz stets gewährleistet sein.

- Dichte

Je höher die Dichte des Schildschwanzfettes ist, desto schwieriger wird es für andere Medien den Widerstand der Dichtmasse zu überwinden.

- Flammpunkt

Um die Brandschutzsicherheit auf der TVM zu erhöhen ist ein höherer Flammpunkt anzustreben. Je nach Hersteller liegt der Flammpunkt ab 190 °C, manche Produkte sind nicht entzündbar bzw. selbstlöschend (siehe Kapitel 6.3.1).

- Umweltverträglichkeit

Schildschwanzfette, die auf Mineralölbasis bestehen, sind ökologisch gesehen sehr problematisch. Bei der Verarbeitung gelangt das Produkt häufig in das Grundwasser.

Alternative Lösung verschiedener Unternehmen stellt ein umweltverträgliches Schildschwanzfett auf Bentonitbasis mit Naturfasern dar.^{109,110}

Die Erstfüllungen besitzen in der Regel, unabhängig von Hersteller, eine höhere Konsistenz und in der Regel längere Fasern (siehe Beschreibung unterschiedlicher Dichtmassen beim Projekt Green Line Underground Doha im Kapitel 6.3.1). Ziel der Erstfüllung ist es in die Stahlbürsten einzudringen und sie während dem Vortrieb von eindringendem Wasser, aber vor allem vor Ringspaltmaterial zu schützen und somit die Stahlbürsten flexibel zu halten. Durch längere Fasern in der Dichtmasse ist eine bessere Verzweigung mit den Stahlbürsten möglich, wodurch das Risiko des Auswaschens vermindert wird.

Das Schildschwanzfett für den kontinuierlichen Vortrieb besitzt im Vergleich zur Erstfüllung eine geringere Konsistenz, die Faserlänge unterscheidet sich je nach Hersteller. Wichtig bei der weiteren Füllung mit Schildschwanzfett ist, dass der Druck um etwa zwei bar höher liegt als der Verpressdruck des Ringspaltmaterials.¹¹¹ Das Einbringverfahren und die unterschiedlichen Betriebsmodi werden im folgenden Kapitel erläutert.

6.2.2 Equipment – TVM

Beide Schildschwanzfette werden, unabhängig von Hersteller, in Fässern zu 158,98 l (engl. drums) auf die Baustelle geliefert. Je nach Transportkonzept für die Tübbinge werden auch die Drums schienen- oder radgebunden auf die TVM geliefert und je nach Bedarf ausgetauscht.

Auf der TVM können zwei unterschiedliche Modi zur Bedienung der Schildschwanzförderpumpe verwendet werden, der Automatic- und Manual-Mode. In Abb. 6-7 können die unterschiedlichen Eingabeparameter für die zwei Modi gesehen werden.

¹⁰⁹ Quelle: <http://www.fundb-gmbh.de/topsealaqua.html> (12.11.2014, 11:45).

¹¹⁰ Quelle: http://www.condat-lubricants.com/lubricants/tunnelling-lubricants_new-tail-seal-grease_WR89NewGeneration.htm (12.11.2014, 11:45)

¹¹¹ Vgl. Girmscheid G., 2013, S.459

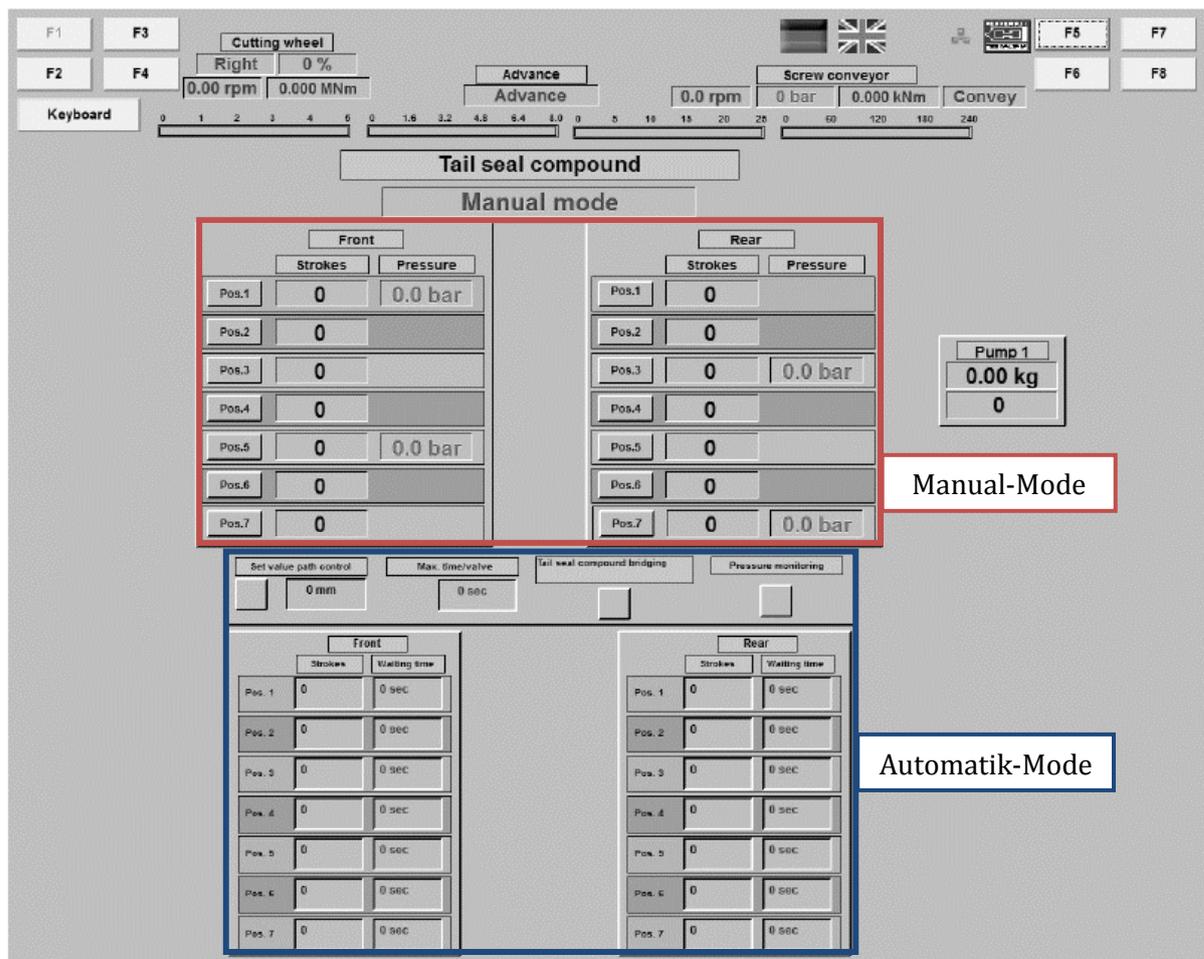


Abb. 6-7: Bedienfeld Schildschwanzdichtung einer Herrenknecht Maschine¹¹²

Im Manual-Mode werden jene Linien (engl. lines) vom Maschinenfahrer ausgewählt, durch welche Schildschwanzfett gepumpt werden soll. Dies geschieht ständig und unabhängig von der Vortriebsgeschwindigkeit, auch während der Ringbauzeit. Der Manual-Mode soll ausschließlich zum Einbringen der Erstfüllung und während der Ringbauzeit im Falle von Leckagen verwendet werden.¹¹³

Im Automatic-Mode müssen vorerst folgende Parameter definiert werden:¹¹⁴

- Hübe (engl. number of strokes)

Gibt die Anzahl an Hübe in einer Reihe und Linie, ohne Wartezeit dazwischen, an. Nach Wahl der Hübe muss die Wartezeit zwischen den Linien derart gewählt werden, dass während der Vortriebszeit die Gesamtanzahl erforderlicher Hübe – siehe Formel (26) – untergebracht werden kann. Sollte dabei die Wartezeit zwischen den Linien kürzer als die Vorgangsdauer für die gewählten Hübe sein, muss die Hubanzahl erhöht und die Wartezeit neu berechnet werden.

¹¹² Herrenknecht, Schildhandbuch, 2014, S.45.

¹¹³ Vgl. Andrea Picchio, 2014, S.4.

¹¹⁴ Herrenknecht, Schildhandbuch, 2014, S.48 ff.

Im Bedarfsfall kann die Hubanzahl z.B. im Sohlbereich erhöht werden, um dem dort herrschenden höheren Druck der Ringspaltverpressung entgegen zu wirken. Dies ist dann der Fall, wenn man bei der Ringspaltverpressung nicht von einem festen Medium mit konstanten Druckverhältnissen ausgeht, sondern die hydrostatischen Druckverhältnisse in der Gelierungszeit berücksichtigt. Desweiteren kann auch bei zwei oder mehreren Dichtkammern in die außenliegende mehr Dichtmasse eingebracht werden um in der direkten Kontaktfläche mit anderen Medien mehr Widerstand zu erhalten.

$$V_{Ring} = D_a * \pi * l * \frac{c}{\rho} * 1000 \quad (25)$$

mit:

c	=	Verbrauch an Schildschwanzfett laut Hersteller [kg/m ²]
D _a	=	Durchmesser der Tübbingaußenkante [m]
L	=	Länge des Tübbingringes [m]
V _{Ring}	=	Volumen an Schildschwanzfett pro Ring [l]
ρ	=	Dichte des Schildschwanzfett laut Hersteller [kg/m ³]

$$M_{Hub} = V_{Ring} / V_{Hubvol} \quad (26)$$

mit:

M _{Hub}	=	Gesamtanzahl an Hübe pro Ring
V _{Hubvol}	=	Hubvolumen der Fettförderpumpe laut Datenblatt [l]
V _{Ring}	=	Volumen an Schildschwanzfett pro Ring [l]

$$M_{Zykl} = M_{Hub} / M_{Injekt} \quad (27)$$

mit:

M _{Hub}	=	Gesamtanzahl an Hübe pro Ring
M _{Injekt}	=	Anzahl der Injektionskanäle
M _{Zykl}	=	Anzahl der Zyklen pro Ring

- Wartezeit (engl. waiting time)

Gibt die Zeitdauer zwischen den Hübten unterschiedlicher Linien an. Im Automatik-Mode wird je eine Linie nach der anderen benutzt, um die Dichtmasse in die Dichtkammern der Schildschwanzdichtung zu pumpen. Nach verstreichen der Wartezeit schaltet das System automatisch auf die nächste Linie um. Mit Hilfe der Wartezeit kann unter anderem der Verbrauch an Dichtmasse an die Vortriebsgeschwindigkeit angepasst werden, je niedriger die Vortriebsgeschwindigkeit ist desto länger muss die Wartezeit eingestellt werden.

- Sollwert Wegsteuerung (engl. set value path control)

Definiert die Strecke, innerhalb derer alle Linien (Zyklus) einmal mit Dichtmasse verpumpt werden. Die Berechnung erfolgt über die Anzahl der Zyklen pro Ring und der Ringlänge.

$$s = \frac{l}{M_{Zykl}} \quad (28)$$

mit:

l	=	Länge des Tübbingringes [mm]
M_{Zykl}	=	Anzahl der Zyklen pro Ring
s	=	Sollwert Wegsteuerung [mm]

- Max. Zeit/Ventil (engl. max. time/valve)

Die maximale Zeit pro Ventil muss mindestens so lange gewählt werden, dass die Anzahl der Hübe mit den Wartezeiten eines Ventils untergebracht werden. Sollte die maximale Zeit zu gering gewählt werden, können nicht alle Hübe pro Linie vollzogen werden. Dies bedeutet es wird weniger Schildschwanzfett als benötigt verwendet, was am Ende des Vortriebes in der unterschiedlichen Anzahl an Hüben pro Linie ersichtlich ist. In diesem Fall kann während der Ringbauzeit auf Manual-Mode umgestellt werden, um den Raum zwischen den Bürsten wieder mit genügend Schildschwanzfett zu füllen. Die Einstellung der maximalen Zeit pro Ventil muss jedenfalls angepasst werden.

Sollte sich die Vortriebsgeschwindigkeit der TVM erhöhen, muss einerseits die Wartezeit zwischen den Linien verringert oder die Anzahl der Hübe erhöht werden, auch beides ist möglich. Während des Vortriebes sollte auf jeden Fall die Temperatur der Pumpe überprüft werden, ist die Temperatur zu hoch sollte die Wartezeit zwischen den Linien und die maximale Zeit pro Ventil auf jeden Fall erhöht werden um ein Heißlaufen der Pumpe zu verhindern.¹¹⁵ Der Druck des Schildschwanzfetts muss am Ende des Vortriebs kontrolliert werden, dieser muss mindestens genauso hoch sein wie der Druck des Ringspaltmaterials, wie bereits oben beschrieben wird jedoch ein um zwei bar höherer Druck angesetzt um höhere Sicherheiten im Falle von Druckschwankungen zu haben.

Fettfördereinrichtungen, die zum Pumpen der Dichtmasse verwendet werden, bestehen in der Regel aus einer Rahmenpresse und einer Schöpfkolbenpumpe. Die Fässer werden direkt unter die Pumpe gestellt und die Rahmenpresse drückt die Schöpfkolbenpumpe mit der Folgeplatte in das geöffnete Fass. Je nach verwendeter Bauart besitzt die Schöpfkolbenpumpe unterschiedliche Fördervolumen per Hub, wobei die TVM die verwendete Masse pro Ring mit Hilfe des Fördervolumens der Pumpe, der Anzahl der verwendeten Hübe pro Ring, einer mittleren Dichte des Schildschwanzfetts von 1,3 t/m³

¹¹⁵ Vgl. Andrea Picchio, 2014, S.4.

und einem mittleren Füllungsgrad von 80% berechnet. Letztgenannter Punkt hängt vor allem von der Zähigkeit des Schildschwanzfettes in Abhängigkeit der verwendeten Temperatur ab und liegt in einem Bereich von 60% bis 80%.¹¹⁶

$$m = M_{Hub} * V_{Hubvol} * \rho * \alpha \quad (29)$$

mit:

m	=	Masse Schildschwanzfett pro Ring [kg]
M_{Hub}	=	Gesamtanzahl an Hübe pro Ring
V_{Hubvol}	=	Hubvolumen der Fettförderpumpe laut Datenblatt [l]
α	=	Füllgrad [%]
ρ	=	Dichte des Schildschwanzfett – im Mittel 1300 kg/m ³

Die kalkulierte Berechnung des Verbrauches durch die TVM ist dadurch einigen Unsicherheiten unterworfen, deswegen wird während dem Vortrieb oft auf die Messmethode mit einem Zollstock zurückgegriffen. Dabei wird die Höhe der Presszylinder vor und nach dem Vortrieb gemessen, über die Fläche des Fasses und der genauen Dichte des Materials je nach Hersteller kann anschließend der tatsächliche Verbrauch an Schildschwanzfett pro Ring ermittelt werden.

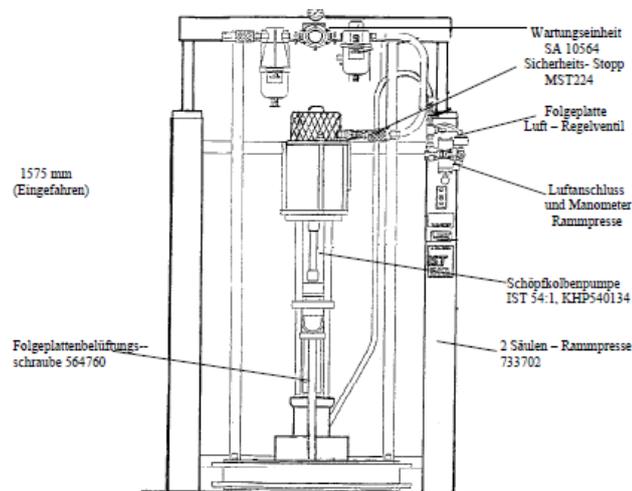


Abb. 6-8: Schematische Darstellung einer Fettfördereinrichtung¹¹⁷

Der theoretische Verbrauch liegt je nach Hersteller zwischen 0,7 und 1,5 kg/m² für den kontinuierlichen Vortrieb und 30 bis 50 kg/m Umfang für die Erstfüllung einer dreireihigen Stahlbürstendichtung.¹¹⁸

Durch folgende Faktoren kann der Verbrauch jedoch wesentlich beeinflusst werden:

¹¹⁶ Quelle: persönliches Gespräch mit Leiter PLC-Herrenknecht Green Line Underground Doha (5.11.2014, 16:00).

¹¹⁷ Quelle: IST Pumpen und Dosiertechnik GmbH, Betriebsanleitung GP0145-200-54-V, 2006.

¹¹⁸ Quelle; Datenblätter verschiedener Dichtmassen, 2014.

- Qualität der Stahlbürsten

Durch Leckagen in den Stahlbürsten kommt es zu einem deutlichen Mehrverbrauch an Schildschwanzfett. Sowohl im Manual- als auch im Automatik-Mode kann eine solche Schwachstelle durch gezielten Mehrverbrauch, nur in diesem Bereich, einigermaßen wirtschaftlich ausgemerzt werden.

- Kurvenfahrten

In engen Kurvenfahrten kommt es zum einen an der Kurveninnenseite zu einem Mehrverbrauch an Schildschwanzfett, da die Bürsten in diesen Bereichen mehr gequetscht werden als üblich und zur Vermeidung dessen Zerstörung mehr Dichtmasse verwendet wird. Auf der anderen Seite ist auch an der Kurvenaußenseite mit einem höheren Verbrauch zu rechnen, da der Spalt zwischen den Stahlbürsten und der Tübbingaußenkante höher ist als normal.¹¹⁹

- menschlicher Einfluss

Unter dem Punkt menschlicher Einfluss sind zum einen die Einflüsse durch den Maschinenfahrer zu sehen, der die oben beschriebenen erforderlichen Einstellungen vornehmen und gegebenenfalls anpassen muss. Zum anderen ist auch das TVM - Bedienpersonal in die Pflicht zu nehmen, das verantwortlich dafür ist, die Schildschwanzfässer sauber zu entleeren und gegebenenfalls die Reste wiederzuverwenden (siehe Kapitel 6.3.3).

¹¹⁹ Vgl. Andrea Picchio, 2014, S.4.

6.3 Schildschwanzdichtung am Beispiel Green Line Underground Doha

Im Zuge des Projektes Green Line Underground Doha wurde eine Vergleichsstudie von drei unterschiedlichen Subunternehmen im Bereich Schildschwanzfett erstellt. Die Subunternehmer, die an dem Wettbewerb teilnehmen durften, wurden bereits vorab von der ARGE auf Grund von Angeboten ausgewählt. In der Vergleichsstudie berücksichtigt werden einerseits visuelle Testversuche vor Ort, andererseits ist eine Verbrauchsanalyse der unterschiedlichen Produkte erstellt worden um diese anschließend mit den Herstellerangaben zu vergleichen. Zuletzt wird der Faktor Mensch auf den Verbrauch der Dichtmasse aufgezeigt und bewertet. Im Folgenden werden zuerst die unterschiedlichen Produkte (Dichtmasse für kontinuierlichen Vortrieb und Erstfüllung) und deren visuellen Unterscheidungen herausgearbeitet.

Schildschwanzfett für kontinuierlichen Vortrieb:

Die Eigenschaften der Dichtmasse für die kontinuierliche Füllung der Dichtkammern laut Datenblätter kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

		Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3
Verbrauch	[kg/m ²]	0,9	0,8 - 1,5	0,7 - 1,2
Konsistenz bei 25 ⁰ C	[1/10mm]	220 - 250	210 - 250	235 - 245
Dichte bei 20 ⁰ C	[g/cm ³]	1,30	1,50	1,30
Flammpunkt	[°C]	nicht entzündbar	nicht entzündbar	> 200
Kriechverhalten bei 25 ⁰ C	[min]	≥30	n.A.	n.A.
Pumpbarkeit	[g/min]	40 - 55	n.A.	n.A.
Vernässung	[%]	≤ 7	≤ 5	≤ 7
Matsumara Dichtungstest	[bar]	35	34,3	n.A.
Preis	[QAR/kg] ¹²⁰	7,71	6,50	7,85
	[€/kg] ¹²¹	1,68	1,41	1,71

Tab. 6-1: Eigenschaften Schildschwanzfett für kontinuierlichen Vortrieb

Als wesentlicher Unterschied des Schildschwanzfettes für den kontinuierlichen Vortrieb kann aufgrund der Datenblätter die Dichte festgehalten werden. Durch die höhere Dichte bei dem Produkt 2 ergibt sich aufgrund des im Kapitel 6.2.2 erklärten Einbringverfahrens der Dichtmasse bei gleichem Volumen ein erhöhter Verbrauch. Dementgegen ergibt sich der Vorteil eines erhöhten Widerstandes gegen fremde Medien wie Wasser oder Ringspaltmörtel.

¹²⁰ Quelle: Angebotspreise im Zuge der Vergleichsstudie – Green Line Underground Doha, 2014

¹²¹ Umrechnungskurs: http://www.finanzen.net/devisen/euro-katar_riyal-kurs (29.12.2014, 15:50).



Abb. 6-9: Produkt 1 – Übersicht



Abb. 6-10: Produkt 1 – Großaufnahme



Abb. 6-11: Produkt 2 – Übersicht



Abb. 6-12: Produkt 2 – Großaufnahme



Abb. 6-13: Produkt 3 – Übersicht



Abb. 6-14: Produkt 3 – Großaufnahme

Wie in den Übersichten der Proben ersichtlich ist bei grober Betrachtung kaum eine Unterscheidung der verschiedenen Produkte möglich. Bei genauerer Betrachtung hingegen kann sowohl ein Unterschied in der Viskosität als auch in der Faserlänge und deren Anzahl wahrgenommen werden. Das Produkt 3 hat die größte Viskosität, gefolgt von Produkt 1 und 2. Im Produkt 3 sind im Gegensatz zu den anderen Produkten längere, jedoch dünnere Fasern feststellbar. Die Anzahl der Fasern scheint bei allen Produkten annähernd gleich zu sein.

Schildschwanzfett für die Erstfüllung:

Für die Erstfüllung werden lediglich zwei Produkte in der Vergleichsstudie herangezogen. In der folgenden Tabelle sind wiederum die wesentlichen Eigenschaften der Produkte laut Datenblätter ersichtlich.

		Produkt 4	Produkt 5
Verbrauch	[kg/m]	45	50
Konsistenz bei 25 ⁰ C	[1/10mm]	190 - 220	180 - 220
Dichte bei 20 ⁰ C	[g/cm ³]	1,30	1,70
Flammpunkt	[°C]	nicht entzündbar	nicht entzündbar
Kriechverhalten bei 25 ⁰ C	[min]	≥30	n.A.
Pumpbarkeit	[g/min]	n.A.	n.A.
Vernässung	[%]	≤ 7	≤ 5
Matsumara Dichtungstest	[bar]	35	34,3
Preis	[QAR/kg] ¹²²	11,76	7,00
	[€/kg] ¹²³	2,56	1,52

Tab. 6-2: Eigenschaften Schildschwanzfett für die Erstfüllung

Eine wesentliche Eigenschaft bei der Erstfüllung ist die Faserlänge und die Anzahl der Fasern. Dies ist notwendig um eine ausreichende Verzahnung der Dichtmasse mit den Stahlbürsten der Schildschwanzdichtung und somit einen guten Schutz der Bürsten zu erreichen. Eine visuelle Unterscheidung der in Frage kommenden Dichtmassen wurde vor Ort erstellt und wird in den folgenden Abbildungen wiedergegeben.



Abb. 6-15: Produkt 4 – Übersicht



Abb. 6-16: Produkt 4 – Großaufnahme

¹²² Quelle: Angebotspreise im Zuge der Vergleichsstudie – Green Line Underground Doha, 2014

¹²³ Umrechnungskurs: http://www.finanzen.net/devisen/euro-katar_riyal-kurs (29.12.2014, 15:50).



Abb. 6-17: Produkt 5 – Übersicht



Abb. 6-18: Produkt 5 – Großaufnahme

Wie in Abb. 6-15 und Abb. 6-17 erkennbar, ist auch hier bei grober Betrachtung der Produkte kaum eine Unterscheidung möglich. In der detaillierten Betrachtung können jedoch visuelle Unterscheidungen vorgenommen werden. Zum einem ist die Viskosität bei Produkt 4 höher als bei Produkt 5, zum anderen sind auch mehr, jedoch kürzere Fasern vorhanden. Auf der anderen Seite ist bei Produkt 5 die Dichte höher (siehe Tab. 6-2).

6.3.1 Testversuche vor Ort

Auf der Baustelle in Doha wurden einfache, visuelle Testversuche zur Unterscheidung und besseren Differenzierung der einzelnen Produkte durchgeführt. Die Entscheidungsfindung über die gewählte Dichtmasse für die Erstfüllung fand aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften statt, Testversuche und eine Verbrauchsanalyse wurden daher bei Produkt 4 und Produkt 5 nicht durchgeführt. Deshalb beschränken sich die folgenden Testversuche auf Dichtmassen für den kontinuierlichen Vortrieb, wobei die Testversuche keine absoluten Messergebnisse wiedergeben, sie vergleichen lediglich die getesteten Produkte untereinander.

1) Widerstand gegen Wasser

Bei diesem sehr einfachen Test wird eine Probe der Dichtmasse in einen Behälter mit Wasser gegeben. Nach einer definierten Anzahl an Schüttelvorgängen wird die Probe visuell untersucht und auf Auflösungserscheinungen der Probe geachtet. Bei den drei Versuchen konnte jeweils dasselbe Ergebnis erzielt werden und es sind weder Auflösungserscheinungen der Dichtmasse, noch ein Mischen der Dichtmasse mit Wasser festgestellt worden. In den folgenden Abbildungen ist exemplarisch der Versuch mit dem Produkt 2 dargestellt.



Abb. 6-19: Versuch – Widerstand Dichtmasse gegen Wasser am Beispiel des Produktes 2



Abb. 6-20: Ergebnis – Widerstand Dichtmasse gegen Wasser am Beispiel des Produktes 2

2) Widerstand gegen Bi - Komponente

Im Zuge der Testserie ist auch das Verhalten zwischen Dichtmasse und Bi – Komponente getestet worden. Dazu werden die Dichtmassen für den kontinuierlichen Vortrieb einerseits mit der A - Komponente, andererseits mit der B - Komponente vermischt. Eine Mischung der Dichtmasse mit der fertig gemischten Bi - Komponente ist aufgrund der geringen Gelierungszeit von zwölf Sekunden als nicht sinnvoll erachtet worden. Die Kontaktfläche der Dichtmasse mit dem Ringspaltmaterial wäre zu schnell verschlossen und es würde zu keiner Reaktion kommen.

Für den ersten Testversuch sind folgende Produkte zur Anwendung gekommen:

- Beschleuniger der Ringspaltverfüllung (B - Komponente)
 - Produkt 1
 - Produkt 2
 - Produkt 3
- } Dichtmasse für kontinuierlichen Vortrieb

6 Schildschwanzdichtung

Die drei Dichtmassen wurden in einen Behälter mit dem Beschleuniger (B – Komponente) gegeben und nach 15 min, 16 h und nach 96 h visuell kontrolliert. In den folgenden Abbildungen können die visuellen Ergebnisse wiedergegeben werden. Nach 16 h ist bei den Proben neben der visuellen Untersuchung auch die Konsistenz überprüft worden.



Abb. 6-21: Produkt 1 mit B - Komponente nach 15 min



Abb. 6-22: Produkt 2 mit B - Komponente nach 15 min



Abb. 6-23: Produkt 3 mit B - Komponente nach 15 min

Nach 15 min konnten noch keine Veränderungen der Proben wahrgenommen werden. Alle Proben waren weiterhin kompakt und mit der B - Komponente überzogen. Die Proben wurden nach der visuellen Kontrolle wieder in den Behälter mit dem Beschleuniger gegeben und bei konstanter Temperatur im Labor vor Ort gelagert.



Abb. 6-24: Produkt 1 mit B - Komponente nach 16 h



Abb. 6-25: Produkt 2 mit B - Komponente nach 16 h



Abb. 6-26: Produkt 3 mit B - Komponente nach 16 h

Nach 16 h waren die Proben visuell ähnlich wie zuvor beschrieben. Die Konsistenz war jedoch weicher als zu Beginn. Die lange Testdauer hat keinerlei praktischen Hintergrund für den Vortrieb, da zum einen der Beschleuniger üblicherweise nicht alleine in den Ringspalt gebracht wird, zum anderen wird ständig neue Dichtmasse in die Schildschwanzdichtung gepumpt. Dadurch kann eine mögliche Verweildauer der Dichtmasse mit der B – Komponente als geringer angesehen werden. Dennoch wurden die Proben nach der Kontrolle nochmals in die Behälter mit dem Beschleuniger gegeben und wieder bei konstanter Temperatur im Baustellenlabor gelagert.



Abb. 6-27: Produkt 1 mit B - Komponente nach 96 h



Abb. 6-28: Produkt 2 mit B - Komponente nach 96 h



Abb. 6-29: Produkt 3 mit B - Komponente nach 96 h

Nach 96 h waren zum ersten Mal visuelle Änderungen der Proben festgestellt worden. Wie in den Abbildungen oben ersichtlich haben sich die Produkte 1 und 3 in der B - Komponente aufgelöst. Produkt 2 war, visuell gesehen, weiterhin unverändert. Hierbei soll nochmals erwähnt werden, dass eine solange Versuchsdauer keinerlei baupraktische Hintergründe hat.

Für den zweiten Testversuch sind folgende Produkte verwendet worden:

- Zement
 - Wasser
 - Bentonit
 - Stabilisator
 - Produkt 1
 - Produkt 2
 - Produkt 3
- } A - Komponente
- } Dichtmasse für kontinuierlichen Vortrieb

Die Dichtmassen wurden jeweils mit der A - Komponente der Ringspaltverfüllung gemischt und bei konstanter Temperatur für 168 h in einem Behälter gelassen. Nach der Testdauer sind die Dichtmassen von der erhärtenden A - Komponente getrennt worden. Neben der visuellen Kontrolle ist auch die Konsistenz / Viskosität überprüft worden.



**Abb. 6-30: Produkt 1 mit
A - Komponente nach 168 h**



**Abb. 6-31: Produkt 2 mit
A - Komponente nach 168 h**



**Abb. 6-32: Produkt 3 mit
A - Komponente nach 168 h**

Wie den Abbildungen oben entnommen werden kann sind keine visuellen Änderungen der Dichtmassen im Vergleich zur Ausgangssituation zu erkennen. Auch die Konsistenz fühlte sich ähnlich dem Ausgangsmaterial an. Auch dieser Testversuch ist von den drei Produkten gleichwertig absolviert worden.

3) Adhäsion an feuchter Metalloberfläche

Mit Hilfe des letzten Testversuches ist das Verhalten von Schildschwanzfett auf einer feuchten Metalloberfläche aufgezeigt worden. Dieser Punkt ist, wie bereits im Kapitel 6.2.1 erläutert, im Leckagefall wichtig um unter anderem ein Auswaschen der Dichtmasse zu verhindern.

Für den Testversuch wird jeweils eine Metallplatte mit Wasser befeuchtet, anschließend wird auf einen Träger die Dichtmasse in einer konstanten Stärke aufgebracht. Der Träger wird anschließend mit dem Schildschwanzfett für eine Minute auf die befeuchtete Metallplatte gelegt. Danach neigt man die Metallplatte um 45° zur Horizontalen und der Träger gleitet bis an das Ende der Platte, danach wird der Träger angehoben. Durch die Adhäsion haftet die Metallplatte an dem Träger, wobei die Zeitdauer der andauernden Adhäsion gemessen wird. Abschließend findet eine visuelle Betrachtung der Rückstände von Schildschwanzfett auf der Metallplatte statt.

Folgende Abbildungen zeigen beispielsweise die Schritte der Versuchsdurchführung mit dem Produkt 2.

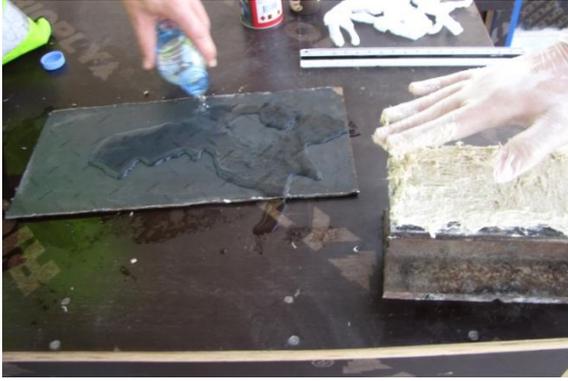


Abb. 6-33: Schritt 1 – Befeuchten der Metallplatte und Auftragen der Dichtmasse auf Stahlträger

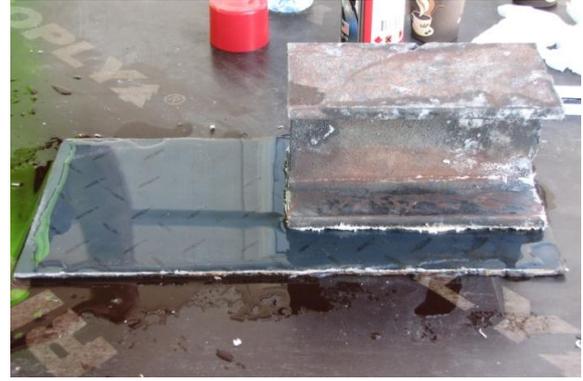


Abb. 6-34: Schritt 2 – Aufsetzen des Trägers auf Metallplatte und 1 min Wartezeit



Abb. 6-35: Schritt 3 – Schrägstellen der Platte um 45° zur Horizontalen



Abb. 6-36: Schritt 4 – Anheben des Trägers und messen der Dauer der Adhäsion

Die oben beschriebenen Verfahrensschritte wurden mit allen drei Dichtmassen gleich ausgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse des Dichtmassenrückstandes auf den Metallplatten. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei den ersten zwei Proben mehr Dichtmasse auf der feuchten Metallplatte vorhanden ist als bei Probe 3.



Abb. 6-37: Dichtmassenrückstand Produkt 1



Abb. 6-38: Dichtmassenrückstand Produkt 2



Abb. 6-39: Dichtmassenrückstand Produkt 3

Auch die gemessene Dauer der Adhäsion ist bei den ersten zwei Proben (Produkt 1 – 22 sec. bzw. Produkt 2 – 20 sec.) deutlich länger als bei Produkt 3 (lediglich 3 sec.).

Zusammenfassend kann bei diesem Testversuch gesagt werden, dass die Produkte 1 und 2 deutlich besser abgeschnitten haben als Produkt 3.

4) Zusammenfassung der Testergebnisse

Folgende Tabelle soll einen Überblick über die gesammelten Ergebnisse der Testversuche geben. Dabei liegen keine absoluten Messwerte der Testergebnisse vor, lediglich der Vergleich der verschiedenen Produkte wird wiedergegeben.

Versuch \ Produkt	Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3
Widerstand gegen Wasser	+	+	+
Widerstand gegen Ringspaltmaterial	+	+	+
Adhäsion an feuchter Metalloberfläche	+	+	-

- nicht befriedigend + befriedigend

Tab. 6-3: Zusammenfassung Testergebnisse Schildschwanzfett

6.3.2 Verbrauchsanalyse unterschiedlicher Produkte

Neben den im Kapitel 6.3.1 durchgeführten Testversuchen sind zur Unterstützung der Entscheidungsfindung über einen Dichtmassen - Lieferanten eine Verbrauchsanalyse an zwei TVM durchgeführt worden. Um einen akkuraten Vergleich an zwei Erddruckschilden durchführen zu können, müssen vorerst folgende Annahmen getroffen werden:

- 1) Aufgrund gleicher geologischen und hydrologischen Bedingungen herrscht bei beiden TVM derselbe Verpressdruck der Ringspaltverfüllung (in Realität können unterschiedliche Bedingungen vorliegen, da der Abstand der Tunnelachsen mehr als 15 m beträgt).
- 2) Aufgrund des letzten Punktes herrschen bei beiden TVM derselbe Verpressdruck der Dichtmasse und dieselben Grundeinstellungen (Anzahl der Hübe, Wartezeit usw.).
- 3) Der Ringspalt ist bei beiden TVM gleich groß, auch die Streckenführung und Richtungsänderungen sind gleich (bei unterschiedlichen Richtungsänderungen unterscheidet sich die Größe des Ringspalt – siehe Kapitel 5).
- 4) Die Qualität der Tübbingaußenfläche sind bei beiden Tunnel gleich, auch der Spalt zwischen den Tübbingringen ist gleich groß (ansonsten könnte dies den Verbrauch negativ beeinflussen).
- 5) Die Maschinenfahrer schalten bei Benutzung des manuellen Modus die Schildschwanzfettpumpe während der Ringbauzeit aus (ansonsten erhöhter Verbrauch an Dichtmasse) und nehmen Änderungen der Parameter wie Anzahl der Hübe, Wartezeit, max. Wartezeit/Ventil vor. (siehe auch Kapitel 6.2.2)

Ein wesentliches Problem bei der Verbrauchsanalyse sind die oben angeführten Annahmen, wobei vor allem die Verbrauchseinstellungen in Abhängigkeit der Vortriebsgeschwindigkeit zu Beginn eines Projektes erhebliche Schwierigkeiten mit sich bringen. Dies ist auch deutlich in den Ergebnissen auf den folgenden Seiten zu erkennen.

6 Schildschwanzdichtung

Produkt 1				Produkt 2				Produkt 3			
Ring	Vortriebsgeschw.	Verbrauch		Ring	Vortriebsgeschw.	Verbrauch		Ring	Vortriebsgeschw.	Verbrauch	
	[mm/min]	[kg]	[kg/m ²]		[mm/min]	[kg]	[kg/m ²]		[mm/min]	[kg]	[kg/m ²]
847-1	15,59	74,65	2,19	846-39	18,21	32,02	0,94	847-20	16,32	76,18	2,24
847-2	20,72	65,61	1,93	846-40	23,96	49,48	1,45	847-21	15,76	45,11	1,33
847-3	23,00	59,56	1,75	846-41	28,22	44,96	1,32	847-22	20,32	36,43	1,07
847-4	22,31	45,30	1,33	846-42	32,34	44,71	1,31	847-23	15,07	61,20	1,80
846-5	11,99	31,40	0,92	846-43	22,02	49,14	1,44	847-24	13,78	58,01	1,70
847-5	21,80	75,35	2,21	846-44	21,99	48,18	1,42	847-25	13,30	51,91	1,53
847-6	25,01	40,29	1,18	846-45	23,51	79,29	2,33	847-26	18,57	67,96	2,00
847-7	22,71	61,57	1,81	846-46	29,58	51,27	1,51	847-27	18,62	60,68	1,78
847-8	22,21	56,26	1,65	846-47	31,74	48,53	1,43	847-28	18,40	65,11	1,91
847-9	22,04	59,74	1,76	846-48	24,19	66,07	1,94	847-29	17,99	65,48	1,92
847-10	21,28	72,78	2,14	846-49	22,98	73,96	2,17	847-30	19,25	61,75	1,81
847-11	21,24	50,75	1,49	846-50	20,53	52,14	1,53	847-31	17,76	57,71	1,70
847-12	25,51	52,17	1,53	846-51	18,73	48,41	1,42	847-32	20,96	57,31	1,68
847-13	25,39	62,30	1,83	846-52	29,16	45,43	1,34	846-33	18,43	37,22	1,09
847-14	24,72	16,03	0,47	846-53	25,32	53,12	1,56	847-33	20,69	51,03	1,50
846-15	22,43	54,34	1,60	846-54	29,21	43,20	1,27	847-34	20,45	53,45	1,57
847-15	22,57	64,05	1,88	846-55	28,35	50,35	1,48	846-34	23,30	30,23	0,89
847-16	28,53	58,59	1,72	846-56	29,61	51,92	1,53	846-35	22,01	35,17	1,03
846-16	35,48	36,47	1,07	846-57	23,46	60,64	1,78	847-35	23,80	51,09	1,50
847-17	24,59	60,98	1,79	846-58	19,16	48,48	1,42	846-36	21,36	34,81	1,02
846-17	26,70	41,11	1,21	846-59	15,88	62,14	1,83	847-36	25,23	43,17	1,27
847-18	25,50	22,71	0,67	846-61	29,58	32,16	0,95	847-37	17,88	32,81	0,96
846-18	26,72	47,36	1,39	846-62	30,17	49,28	1,45	846-37	22,43	31,05	0,91
847-19	24,42	89,53	2,63	846-63	36,17	34,33	1,01	846-38	13,33	32,02	0,94
846-22	15,06	68,34	2,01	846-64	33,00	42,73	1,26	847-38	17,67	69,72	2,05
846-23	15,98	79,65	2,34	846-65	31,72	38,28	1,12	847-39	23,82	32,12	0,94
846-24	15,76	66,35	1,95	846-66	27,24	40,06	1,18	847-40	23,41	29,22	0,86
846-25	19,95	40,99	1,20	846-67	24,77	48,09	1,41	847-41	28,11	27,25	0,80
846-26	21,70	40,45	1,19	846-68	30,94	48,34	1,42	847-42	19,70	32,84	0,96
846-27	18,41	42,65	1,25	846-69	26,68	39,90	1,17	847-43	19,31	31,22	0,92
846-28	27,04	35,53	1,04	846-70	34,07	43,40	1,28	847-44	19,66	35,23	1,04
846-29	33,82	27,09	0,80	846-71	35,48	34,44	1,01	847-45	19,02	58,74	1,73
846-30	31,03	28,29	0,83	846-72	28,95	36,50	1,07	847-46	25,24	41,54	1,22
846-31	32,74	26,24	0,77	846-73	32,25	51,15	1,50	847-47	21,90	55,54	1,63
846-32	19,23	46,34	1,36	846-74	29,83	44,86	1,32	847-48	27,29	53,80	1,58

Abb. 6-40: Verbrauch Schildschwanzfett – tabellarisch

Die oben ersichtliche Abbildung zeigt neben der Ringnummer (846 bzw. 847 entspricht der TVM Bezeichnung) auch die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit und den Gesamtverbrauch an Dichtmasse je Ring bzw. den Verbrauch je Quadratmeter Tübbingaußenfläche. Letzterer Wert ist vor allem für die Vergleichbarkeit mit der in Tab. 6-1 angegebenen Verbrauchswerte je Produkt notwendig.

Durch die Abbildung wird ebenfalls deutlich ersichtlich, dass vor allem bei niedrigen Vortriebsgeschwindigkeiten die Verbrauchswerte teilweise dem Zwei- bis Dreifachen der Herstellerangaben entsprechen. Grund dieser hohen Konsumation ist vor allem die fehlende Anpassung der Parameter (Anzahl Hübe, Wartezeit, max. Zeit/Ventil) bei niedrigen Vortriebsgeschwindigkeiten, welche vor allem zu Projektbeginn möglich sind.

Zu beachten ist jedoch das für die Entscheidungsfindung eines geeigneten Subunternehmers nicht die Verbrauchswerte in der Startphase entscheidend sind, sondern jene bei fortschreitendem Vortrieb.

Mit Hilfe einer geschwindigkeitsabhängigen Betrachtung der Verbräuche kann ein Ausblick auf die Konsumation bei höheren Vortriebsgeschwindigkeiten gegeben werden.

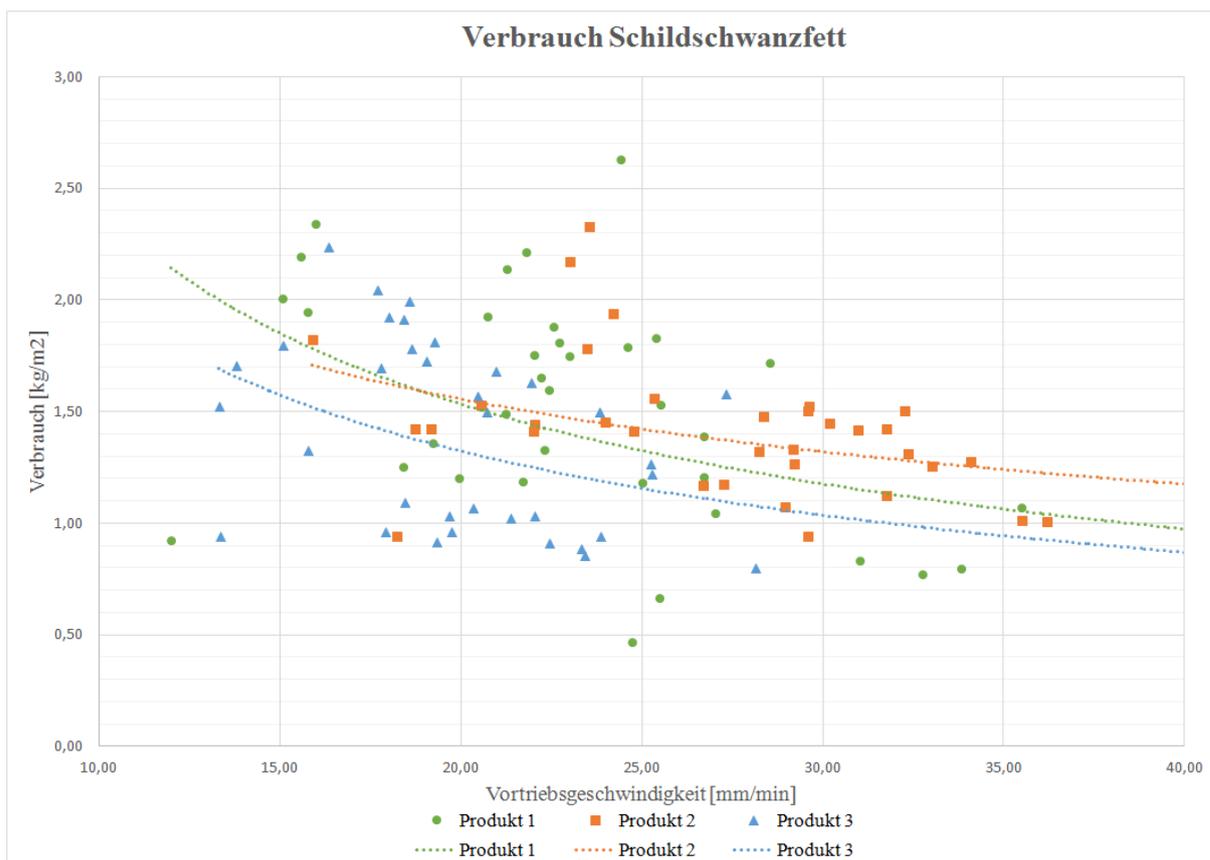


Abb. 6-41: Verbrauch Schildschwanzfett – grafisch

Durch die Erweiterung der Trendlinien in der oben ersichtlichen Abbildung ergeben sich folgende geschätzte Verbrauchswerte ab einer mittleren Vortriebsgeschwindigkeit von 40 mm/min:

		Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3
theoretischer Verbrauch	[kg/m ²]	0,90	0,80 - 1,50	0,70 - 1,20
tatsächlicher Verbrauch ab 40 mm/min	[kg/m ²]	0,98	1,18	0,88
Differenz	[%]	+ 8,2	+ 32,2 bis - 27,1	+ 20,5 bis - 36,4

Tab. 6-4: Vergleich theoretischer und tatsächlicher Verbrauch Schildschwanzfett

Bei den ermittelten Werten muss bei der Entscheidungsfindung jedoch berücksichtigt werden, dass das Produkt 1 nur in der Startphase bei niedrigen Vortriebsgeschwindigkeiten eingesetzt wurde, dadurch wird der ermittelte Verbrauchswert ab 40 mm/min eventuell zu hoch eingeschätzt. Die beiden anderen Produkte liegen sehr gut in der Bandbreite der Herstellerangaben, wobei bei Produkt 2 aufgrund der höheren Dichte (1,5 g/m³ im Vergleich zu 1,3 g/cm² bei Produkt 1 und 3) der höhere Verbrauch erklärbar ist.

Neben den unterschiedlichen Verbräuchen und technischen Eigenschaften ist vor allem die Wirtschaftlichkeit der Produkte maßgebend für die Entscheidungsfindung. Folgende Tabelle zeigt dabei sowohl die theoretischen als auch die praktischen Kosten je Tunnelmeter.

		Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3
theoretische Kosten	[QAR/m]	147,59	110,60 – 207,37	116,87 – 200,35
	[€/m]	32,08	24,04 – 45,08	25,41 – 43,55
tatsächliche Kosten	[QAR/m]	160,70	163,13	146,93
	[€/m]	34,94	35,46	31,94

Abb. 6-42: Vergleich theoretischer und tatsächlicher Kosten Schildschwanzfett

Folgende Anmerkungen sind bei dem Kostenvergleich zu beachten:

- Produkt 1 ist nur im Startbereich bei niedrigen Vortriebsgeschwindigkeiten verwendet worden.
- Produkt 2 ist aufgrund seiner hohen Dichte selbst bei geringstem Preis je Kilogramm das teuerste Produkt je Tunnelmeter.
- Produkt 3 scheint wirtschaftlich gesehen am günstigsten zu sein.
- Eine Betrachtung eventuell anfallender Kosten durch den Tausch oder die Reparatur der Schildschwanzdichtung aufgrund unzureichenden Schutzes des Schildschwanzfettes kann durch diese Berechnung nicht berücksichtigt werden.

6.3.3 menschlicher Einfluss

Menschlichen Einfluss auf den Verbrauch von Schildschwanzfett haben zum einen der Maschinenfahrer, zum anderen das Bedienpersonal, welches die Fässer austauscht.

Die im letzten Kapitel dargelegte Verbrauchsanalyse zeigt, dass im Bereich von niedrigen Vortriebsgeschwindigkeiten die Einstellungen gemäß Kapitel 6.2.2 vom Maschinenfahrer nicht angepasst wurden. Die Schuld hierbei liegt nicht alleine beim Maschinenfahrer, ohne Vorgaben der Bauleitungsebene wählen Maschinenfahrer meist die sichere Seite und verbrauchen mehr Schildschwanzfett um Leckagen und Stillstände bzw. aufwändige Reinigungsarbeiten zu verhindern. Eine einfache Arbeitsanweisung in Abhängigkeit der mittleren Vortriebsgeschwindigkeit und der Verbrauchsangaben laut Hersteller kann hierbei Abhilfe schaffen.

Vortriebsgeschw. [mm/min]	Variante 1			Variante 2		
	Anzahl Hübe []	Wartezeit [sec]	max. Zeit / Ventil [sec]	Anzahl Hübe []	Wartezeit [sec]	max. Zeit / Ventil [sec]
10	1	24	27	2	49	55
15	1	15	18	2	30	36
20	1	11	14	2	21	27
25	1	8	11	2	16	22
30	1	6	9	2	12	18
35	1	5	8	2	10	16
40	1	4	7	2	8	14
45	1	3	6	2	6	12
50	1	2	5	2	5	11
55	1	2	5	2	4	10
60	1	2	5	2	3	9

Abb. 6-43: Beispiel Arbeitsanweisung Schildschwanzfett

Durch die Rahmenpresse und andere mechanische Einflussfaktoren kann die Schöpfkolbenpumpe nicht das komplette Fass entleeren – ein Teil der Dichtmasse bleibt am Boden zurück. Das Bedienpersonal kann beim Wechsel der Fässer diese reinigen und den Rest an Dichtmasse in das neue Fass geben. Bei einem Rundgang auf dem Baustellengelände sind drei „leere“ Fässer geöffnet worden, wobei in jedem noch etwa 5cm Dichtmasse vorhanden waren. Bei einer Füllhöhe von 80 cm entspricht dies in etwa 6%.



Abb. 6-44: „leere“ Fässer mit Schildschwanzfett

Da eine Verschlechterung der Qualität des Schildschwanzfettes bei Lagerung in den Fässern laut Subunternehmen nicht anzunehmen ist, ist neben der Reinigung auf der TVM auch eine Lagerung der Fässer mit anschließender Reinigung in einer Arbeitsstation Übertage möglich. Bei beiden Varianten ist auf jeden Fall auf Hygiene zu achten. Sollten Verunreinigungen in die Dichtmasse kommen,

6 Schildschwanzdichtung

könnten diese die Kolbenschöpfpumpe oder andere mechanische Teile beschädigen. Folgende Berechnung zeigt einen Blick auf den möglichen wirtschaftlichen Schaden bei Nichtverwendung der Restmassen:

Berechnung des „verschwendeten“ Schildschwanzfettes:

Berechnung der Ringe $\frac{32.938 \text{ m}}{1,6 \text{ m}} = 20.586$

Anzahl der Fässer mit Schildschwanzfett
(Wechsel alle 5 Ringe) $\frac{20.586}{5} = 4.117$

Anzahl der „verschwendeten“ Fässer mit
Schildschwanzfett $6\% * 4.117 = 247$

Kostenberechnung:

Gewicht an „verschwendeten“
Schildschwanzfett (250 kg pro Fass) $247 * 250 \text{ kg} = 61.758 \text{ kg}$

Berechnung der Kosten $61.758 * 7,35 \text{ QAR}^{124} = 453.921 \text{ QAR} = 98.679 \text{ €}^{125}$

¹²⁴ Quelle: mittlerer Angebotspreis der Anbieter beim Projekt Green Line Underground Doha, 2014.

¹²⁵ Umrechnungskurs: http://www.finanzen.net/devisen/euro-katar_riyal-kurs (29.12.2014, 15:50).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Durch vermehrte wirtschaftliche Investitionen in Infrastrukturprojekte nimmt auch die Anzahl an Tunnelbaustellen zu. Ein Großteil der maschinell vorgetriebenen Projekte wird dabei mit Erddruckschilden abgewickelt. Dabei gibt es einige wichtige Kernpunkte, die über den Erfolg eines Projektes maßgebend entscheiden können.

Die Bodenconditionierung ist ein wesentlicher Bestandteil bei Erddruckschilden. Durch den Einsatz in nicht optimal geeigneten Böden haben sich diverse Conditionierungsmittel zur Erweiterung der Einsatzbereiche herauskristallisiert. Diese erweitern die Einsatzbereiche von Erddruckschilden weit in den Bereich der Hydroschilde. Nach dem theoretischen Überblick über die Möglichkeiten der Bodenconditionierung wurde eine Vergleichsstudie verschiedener Produkte am Beispiel Green Line Underground Doha gemacht. Ein Vergleich auf mehreren TVM erfordert gewisse Annahmen, die eine Interpretation der Ergebnisse schwierig machen, dennoch ist im Zuge dieser Arbeit versucht worden die jeweiligen Ergebnisse richtig einzuordnen und zu interpretieren. Vergleichsstudien unterschiedlicher Produkte im Zuge größerer Bauvorhaben werden immer häufiger um vor allem die technische und wirtschaftliche Gegebenheit der Produkte vergleichen zu können.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei einem maschinellen Vortrieb ist die Ringspaltverfüllung, wobei hierbei vor allem die Ringspaltmaterialien und Einbringverfahren wiedergegeben wurden. Häufigste Ringspaltverfüllung ist in letzter Zeit die Bi – Komponenten Verfüllung. Die Verfüllung des Ringspaltess soll im Idealfall keine Begrenzung der Vortriebsgeschwindigkeit darstellen. Durch die schnelle Erhärtung der Bi – Komponente steht einem raschen Vortrieb nichts im Wege. Verfahrenstechnisch gesehen muss jedoch vor allem auf die Reinigung vor längeren Stillständen geachtet werden. Neuere Entwicklungen gehen auf zementfreie Ringspaltmaterialien, welche vor allem eine Erhöhung der Beständigkeit zur Folge haben. Hinterfragt muss jedoch die Frühfestigkeit dieser Entwicklung werden. Hierbei werden in Zukunft noch wissenschaftliche Arbeiten zur detaillierten Untersuchung notwendig sein.

In der Baupraxis wird die Schildschwanzdichtung häufig als Notwendigkeit hingenommen. Eine genauere Betrachtung der Dichtarten oder Dichtmassen ist häufig nicht der Fall. Im Zuge des Projektes Green Line Underground Doha wurden wesentliche Erfahrungen und einfache Testversuche im Bezug auf Schildschwanzfett dargelegt. Anschließend ist wiederum eine Vergleichsstudie verschiedener Produkte getätigt worden. Ähnlich der Bodenconditionierung ist der Faktor Mensch ein wichtiger Garant für den Verbrauch an Schildschwanzfett. Neben den theoretischen Verbräuchen sind vor allem die tatsächlichen Verbräuche inklusive der zugehörigen Kosten für die Entscheidungsfindung maßgebend. Eine sachgemäße Einstellung der Parameter im Zuge der ersten Vortriebsmeter ist notwendig um die Verbrauchswerte im Rahmen zu halten.

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Einteilung TVM.....	3
Abb. 2-2: Löseprinzip einer Hartgesteindiske.....	4
Abb. 2-3: Komponenten und Vortriebsverfahren einer Gripper - TBM	5
Abb. 2-4: Komponenten und Vortriebsverfahren einer Schild - TBM	7
Abb. 2-5: Komponenten einer Doppelschild - TBM.....	7
Abb. 2-6: Komponenten und Vortriebsverfahren eines Hydroschildes	9
Abb. 2-7: Komponenten und Vortriebsverfahren eines Erddruckschildes.....	10
Abb. 3-1: Übersicht Einsatzbereich Erddruckschild	12
Abb. 3-2: Erddruckmessdose	13
Abb. 3-3: Stützdruckanzeige Steuerstand - Green Line Underground Doha	14
Abb. 3-4: Stützdruckverteilung mit Hilfe von Softwareeinsatz	14
Abb. 3-5: Verschluss- und Dichtungssysteme Schneckenförderer	21
Abb. 3-6: Schneckenwendel mit Seele - Green Line Underground Doha	22
Abb. 3-7: Schneckenwendel ohne Seele (seelenlos).....	22
Abb. 3-8: Digitales Model einer praxisgebräuchlichen Installation einer Schaumanalge für Erddruckschilder auf dem Nachläufer. Details: Tensidbehälter und Förderpumpe (rot) und Schaumgeneratoren (blau).....	23
Abb. 3-9: Schaumlanze "Bubble Tube" mit Sieb als Störkörper - Green Line Underground Doha	24
Abb. 3-10: schematische Darstellung Schaumlanze mit Sieb als Störkörper	24
Abb. 3-11: Schaumlanze mit Glaskugeln als Störkörper - Green Line Underground Doha.....	25
Abb. 3-12: schematische Darstellung Schaumlanze mit Glaskugeln als Störkörper	25
Abb. 4-1: Strömungsbild für die Fließbewegung des Bodens in der Abbaukammer.....	28
Abb. 4-2: Beurteilung der Klebrigkeit von Böden.....	29
Abb. 4-3: Einsatzbereich Erddruckschild.....	32
Abb. 4-4: Einsatzbereich von Erddruckschilden mit Feinstoffsuspension als Konditionierungsmittel	35
Abb. 4-5: Wirkungsweise Tenside	39
Abb. 4-6: Übergang trockener Polyederschaum zu feuchtem Kugelschaum.....	40
Abb. 4-7: Einsatzbereich von Erddruckschilden mit gemischten Konditionierungsmittel	43
Abb. 4-8: Kompressor – Laborcontainer.....	45
Abb. 4-9: Schaumgenerator – Laborcontainer	45
Abb. 4-10: Mixer – Laborcontainer	46
Abb. 4-11: Setzmaß - Versuch – Laborcontainer.....	46
Abb. 4-12: Visualisierung der Wasserdurchlässigkeit mit (links) und ohne (rechts) Bodenkonditionierung.....	53
Abb. 4-13: Eingangswerte zusätzliches Wasser – Vortriebsgeschwindigkeit Diagramm.....	54
Abb. 4-14: Übersicht Tunnelvortriebsmaschinen Green Line Underground Doha.....	54
Abb. 4-15: zusätzliches Wasser – Vortriebsgeschwindigkeit Diagramm	56
Abb. 5-1: konischer Verlauf Schildmantel.....	64
Abb. 5-2: exzentrischer Überschnitt.....	64
Abb. 5-3: Schildschwanzaufbau.....	65
Abb. 5-4: Kurvenfahrt einer TVM	65
Abb. 5-5: Exzentrizität der Sicherung.....	65
Abb. 5-6: Verschiebung der Sicherung	65
Abb. 5-7: Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom W/Z Wert.....	68
Abb. 5-8: Wirkungsweise eines Verzögerer.....	70
Abb. 5-9: Wirkungsweise eines Beschleunigers	71
Abb. 5-10: Runde Körnung – Perlkies	72
Abb. 5-11: Mörtelpumpe für Ringspaltverfüllung	73
Abb. 5-12: Verpress- und Rückspülvorgang Premix - System	75
Abb. 5-13: B-Komponentenzugabe beim Injektionsblock - System.....	76
Abb. 5-14: Injektionsblock - System.....	76

Abb. 5-15: Injektionsblock - TVM Green Line Underground Doha.....	76
Abb. 5-16: Übersicht Lagesicherung Tübinge	78
Abb. 5-17: nachträgliche Ringspaltverfüllung	78
Abb. 5-18: Pumpe zum Einbringen von Kies.....	79
Abb. 6-1: Lynacelldichtung.....	83
Abb. 6-2: S1 Kunststoffprofilabdichtung inkl. Notdichtung	83
Abb. 6-3: Druckgradient im Ringspalt.....	84
Abb. 6-4: drei reihige Stahlbürstendichtung	84
Abb. 6-5: äußere Schildschwanzdichtung	85
Abb. 6-6: elastisch gestützte Stirnschalung.....	86
Abb. 6-7: Bedienfeld Schildschwanzdichtung einer Herrenknecht Maschine.....	89
Abb. 6-8: Schematische Darstellung einer Fettfördereinrichtung.....	92
Abb. 6-9: Produkt 1 – Übersicht	95
Abb. 6-10: Produkt 1 – Großaufnahme	95
Abb. 6-11: Produkt 2 – Übersicht	95
Abb. 6-12: Produkt 2 – Großaufnahme	95
Abb. 6-13: Produkt 3 – Übersicht	95
Abb. 6-14: Produkt 3 – Großaufnahme	95
Abb. 6-15: Produkt 4 – Übersicht	96
Abb. 6-16: Produkt 4 – Großaufnahme	96
Abb. 6-17: Produkt 5 – Übersicht	97
Abb. 6-18: Produkt 5 – Großaufnahme	97
Abb. 6-19: Versuch – Widerstand Dichtmasse gegen Wasser am Beispiel des Produktes 2.....	98
Abb. 6-20: Ergebnis – Widerstand Dichtmasse gegen Wasser am Beispiel des Produktes 2.....	98
Abb. 6-21: Produkt 1 mit B - Komponente nach 15 min	99
Abb. 6-22: Produkt 2 mit B - Komponente nach 15 min	99
Abb. 6-23: Produkt 3 mit B - Komponente nach 15 min	99
Abb. 6-24: Produkt 1 mit B - Komponente nach 16 h	99
Abb. 6-25: Produkt 2 mit B - Komponente nach 16 h	99
Abb. 6-26: Produkt 3 mit B - Komponente nach 16 h	99
Abb. 6-27: Produkt 1 mit B - Komponente nach 96 h	100
Abb. 6-28: Produkt 2 mit B - Komponente nach 96 h	100
Abb. 6-29: Produkt 3 mit B - Komponente nach 96 h	100
Abb. 6-30: Produkt 1 mit A - Komponente nach 168 h	101
Abb. 6-31: Produkt 2 mit A - Komponente nach 168 h	101
Abb. 6-32: Produkt 3 mit A - Komponente nach 168 h	101
Abb. 6-33: Schritt 1 – Befeuchten der Metallplatte und Auftragen der Dichtmasse auf Stahlträger ..	102
Abb. 6-34: Schritt 2 – Aufsetzen des Trägers auf Metallplatte und 1 min Wartezeit	102
Abb. 6-35: Schritt 3 – Schrägstellen der Platte um 45° zur Horizontalen.....	102
Abb. 6-36: Schritt 4 – Anheben des Trägers und messen der Dauer der Adhäsion.....	102
Abb. 6-37: Dichtmassenrückstand Produkt 1	102
Abb. 6-38: Dichtmassenrückstand Produkt 2.....	102
Abb. 6-39: Dichtmassenrückstand Produkt 3.....	102
Abb. 6-40: Verbrauch Schildschwanzfett – tabellarisch.....	104
Abb. 6-41: Verbrauch Schildschwanzfett – grafisch.....	105
Abb. 6-42: Vergleich theoretischer und tatsächlicher Kosten Schildschwanzfett.....	106
Abb. 6-43: Beispiel Arbeitsanweisung Schildschwanzfett	107
Abb. 6-44: „leere“ Fässer mit Schildschwanzfett	107

8.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Antriebs- und Lagerungsarten	18
Tab. 3-2: Vor- und Nachteile der Antriebs- und Lagerungsarten	19
Tab. 4-1: Voraussetzungen und Konditionierungsmittel Erddruckschild	32
Tab. 4-2: Eigenschaften der Schaumkonditionierungsmittel	44

Tab. 4-3: empfohlene Startparameter Subunternehmen B	44
Tab. 4-4: Konditionierungsparameter Versuchsreihe 1	47
Tab. 4-5: zusätzliche Wasserzugabe Versuchsreihe 1	47
Tab. 4-6: Testreihe 1 – Bodenkonditionierung	48
Tab. 4-7: Testreihe 2-1 – Bodenkonditionierung	50
Tab. 4-8: Testreihe 2-2 – Bodenkonditionierung	51
Tab. 4-9: Konditionierungsparameter - Schaumgeneratorentest.....	57
Tab. 4-10: Testergebnis – Schaumlanze 1.....	57
Tab. 4-11: Testergebnis – Schaumlanze 2.....	58
Tab. 4-12: Preisübersicht Green Line Underground Doha.....	59
Tab. 4-13: Ergebnisse Verbrauchsanalyse – generell	60
Tab. 4-14: Parameter für Verbrauchsanalyse – Filtervergleich.....	61
Tab. 4-15: Parameter Ring 40 und 36 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich	61
Tab. 4-16: Auswertung Ring 40 und 36 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich	61
Tab. 4-17: Parameter Ring 52 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich	62
Tab. 4-18: Auswertung Ring 52 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich	62
Tab. 4-19: Parameter Ring 54 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich	62
Tab. 4-20: Auswertung Ring 54 und 53 Verbrauchsanalyse – Filtervergleich	63
Tab. 5-1: Beispielmischung A - Komponente Green Line Underground Doha.....	70
Tab. 5-2: Beeinflussbarkeit der A - Komponente durch das Mischungsverhältnis.....	70
Tab. 5-3: Beeinflussbarkeit der Parameter durch Komponentenmischung.....	71
Tab. 5-4: Vor- und Nachteile von Trocken- bzw. Nassmörtel	74
Tab. 6-1: Eigenschaften Schildschwanzfett für kontinuierlichen Vortrieb	94
Tab. 6-2: Eigenschaften Schildschwanzfett für die Erstfüllung.....	96
Tab. 6-3: Zusammenfassung Testergebnisse Schildschwanzfett	103
Tab. 6-4: Vergleich theoretischer und tatsächlicher Verbrauch Schildschwanzfett.....	105

8.3 Literaturverzeichnis

- [1] Adam, Dietmar: „Vorlesungsunterlagen Grundbau und Bodenmechanik“, TU Wien - Institut für Geotechnik, Wien, 2013
- [2] Babendererde, Siegmund; Babendererde, Lars; Holzhäuser, Jörg: „Verpressen der Schildschwanzfuge hinter einer Tunnelvortriebsmaschine mit Tübbingausbau“, Verlag Glückauf, Essen, 2002
- [3] Bergmeister, Konrad: „Betonkalender 2005 :Fertigteile, Tunnelbauwerke“, 1.Auflage, Ernst und Sohn, Berlin, 2005
- [4] Beton Akademie: „Betontechnologie 1“, Beton Akademie, Wien, 2013
- [5] Budach, Christoph: “Untersuchung zum erweiterten Einsatzbereich von Erddruckschilden in grobkörnigen Lockergestein”, Ruhr - Universität Bochum, Essen, 2012
- [6] Condat: “ Two Part Component Filling Grout For Annular Spaces”, Condat Lubricants GmbH, Chasse-sur-Rhone, 2007

- [7] DAUB: „Empfehlungen für Konstruktion und Betrieb von Schildmaschinen“, Herausgegeben vom Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), Köln, 2000
- [8] DAUB: „Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen“, Herausgegeben vom Deutschen Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), Köln, 1997
- [9] Dewner, Walter: „Moderner Tunnelbau in Frankreich – Teil 2“, Tiefbau BG 100, Berlin, 1998
- [10] Galli, Mario: “Untersuchung zur Nutzung von Tensidschäume für die Konditionierung von kohäsionslosen Lockergesteinsböden bei EBP-Vortrieben unter realitätsnahen Randbedingungen”, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2009
- [11] Girmscheid, Gerhard: “Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau”, 3. Auflage, Ernst und Sohn, Zürich, 2013
- [12] Heimbürger, Markus: „Hinterfüllung des Ringspalts für maschinelle Tunnelvortriebe mit Tübbingausbau - Stand der Technik –“, Hochschule Karlsruhe, Schwanau, 2010
- [13] Herrenknecht: “Schildhandbuch DOHA METRO GREEN LINE”, Herrenknecht Tunneling Systems, Schwanau, 2014
- [14] Herrenknecht: “Tunneling Qatar Integrated Railway Programme - EPB shield TBM and Back-Up Concept”, Herrenknecht Tunneling Systems, Schwanau, 2013
- [15] Jodl, Hans Georg: „Vorlesungsunterlagen Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau“, TU Wien - Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Wien, 2013
- [16] Langmaack, Lars: “Europa & Asien: Einsatz neuer TBM-Konditionierungsmittel”, TBM tunnel.com, Zürich, 2011
- [17] Maidl, Bernhard: „Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band I“, 3.Auflage, Verlag Glückauf, Essen, 2004
- [18] Maidl, Bernhard: „Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band II“, 3.Auflage, Verlag Glückauf, Essen, 2004
- [19] Maidl, Bernhard; Herrenknecht Martin; Anheuser, Lothar: “Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb”, 1.Auflage, Ernst und Sohn, Berlin, 1995

- [20] Maidl, Bernhard; Herrenknecht, Martin; Maidl, Ulrich; Wehrmeyer Ulrich: “Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb”, 2. Auflage, Ernst und Sohn, Bochum, 2011
- [21] Maidl, Ulrich: „Einsatz von Schaum für Erddruckschilde - Theoretische Grundlagen der Verfahrenstechnik“, Springer-Verlag, München, 1995
- [22] Maidl, Ulrich: „Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum“, Ruhr-Universität Bochum, München, 1995
- [23] Picchio, Andrea: „TBM trials with MAPEBIOX T S: general method statement“, Mapei, Mailand, 2014
- [24] Wittke, Walter: “Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling“, VGE - Verlag GmbH, Aachen, 2007

9 Anhang

9.1 Daten TVM 846 (Produkt B-1)

Datum	Ringnr.	Vortriebsdauer [min]	Vortriebslänge [m]	Ausbruch [m ³]	Vortriebsgeschw. [mm/min]	Moment Schneidrad [MNm]	Geschw. Schneidrad [U/min]	Vorschubkraft [MN]	Stopp [s]	Produkt	Schaumkonzentrat [l]	Schaumkonzentrat durchschn. [l/m]	cf	Wasser [l]	Wasser durchschn. [l/m]	zus. Wasser [l]	zus. Wasser durchschn. [l/m]	summiert			
																		Energie TVM [kWh]	Energie Schneckenförderer [kWh]	Energie pro Ring [kWh]	Energie durchschn. [kWh/m]
26.10.2014	21	118			13,55	1,906	2,71	5,902	4	B-1				6.690		2		110.991	750	9.190	
	22	106	6,40	253	15,06	3,090	2,63	10,440	6	B-1				21.363		9.595		119.431	130	2.998	
	23	100			15,98	3,551	2,53	12,893	0	B-1		81		21.935	11.474	10.317	4.603	122.299	138	3.182	2.703
	24	101			15,76	3,268	2,84	11,525	0	B-1				23.445		9.548		125.344	149	1.931	
27.10.2014	25	80			19,95	2,103	3,07	6,047	1	B-1				15.045		4.510		127.126	163	2.048	
	26	74			21,70	1,927	3,10	6,358	3	B-1				16.648		4.325		129.011	147	1.991	
	27	87			18,41	2,229	3,03	7,858	2	B-1				17.538		583		130.855	160	2.064	
	28	59	12,80	507	27,04	1,500	3,56	7,199	2	B-1		110		12.776	9.185	3.409	2.711	132.759	147	1.301	1.183
	29	47			33,82	2,152	2,97	8,244	1	B-1				10.509		4.815		133.913	100	1.494	
	30	52			31,03	2,924	2,72	11,188	1	B-1				12.184		6.226		135.307	117	1.600	
	31	49			32,74	3,260	2,47	10,880	1	B-1				11.926		4.570		136.789	101	2.429	
	32	83			19,23	3,189	2,98	11,674	0	B-1				20.939		6.265		139.117	140	2.213	
28.10.2014	33	87			18,43	2,038	3,16	7,825	3	B-1				17.261		1.358		141.190	200	2.205	
	34	69	8,00	317	23,30	1,715	3,11	6,939	2	B-1		155		14.213	9.923	1.961	2.117	143.196	151	2.096	1.419
	35	73			22,01	1,823	3,00	7,686	2	B-1				16.864		1.233		145.140	175	1.866	
	36	75			21,36	1,957	2,38	8,559	2	B-1				16.697		4.356		146.831	140	1.582	
37	71			22,43	1,984	2,35	7,545	1	B-1				14.347		8.027		148.273	141	3.602		
29.10.2014	38	120	1,60	63	13,33	2,773	2,79	9,750	1	B-1		154		20.780	12.987	10.494	6.559	151.734	221	19.508	12.193
24.11.2014	39	88			18,21	1,833	2,45	8,189	5	B-1				2.740		1.030		171.021	76	23.421	
	40	67	6,40	253	23,96	2,598	2,28	8,594	0	B-1				16.611	7.222	10.075	4.218	194.366	104	1.424	4.344
	41	57			28,22	2,68	2,38	7,156	0	B-1				13.646		8.314		195.686	88	1.354	
	42	49			32,34	2,689	2,31	7,934	0	B-1				13.226		7.576		196.952	86	1.603	
25.11.2014	43	73			22,02	2,384	2,59	6,772	2	B-1				15.829		11		198.469	94	1.588	
	44	73			21,99	1,812	2,57	7,215	1	B-1				15.974		0		199.963	120	1.968	
	45	68	8,00	317	23,51	2,302	2,48	6,864	0	B-1				19.059	9.226	0	1.828	201.811	121	1.727	1.026
	46	54			29,58	2,557	2,25	8,709	2	B-1				11.565		7.081		203.416	82	1.465	
	47	50			31,74	2,793	2,35	8,211	0	B-1				11.379		7.530		204.800	95	1.462	
26.11.2014	48	66			24,19	2,756	2,66	8,236	0	B-1				15.361		1.783		206.167	96	1.825	
	49	70			22,98	2,592	2,37	9,207	0	B-1				18.005	9.326	4.509	2.623	207.897	149	1.880	1.101
	50	78	8,00	317	20,53	2,882	2,60	9,953	4	B-1		148		16.407		2.688		209.627	125	2.088	
	51	85			18,73	2,24	2,50	9,158	3	B-1				12.289		4.480		211.591	107	1.639	
	52	55			29,16	2,403	2,41	8,197	0	B-1				12.544		7.524		213.123	105	1.378	
27.11.2014	53	63			25,32	2,105	2,70	7,127	1	B-1				11.160		5.009		214.396	112	1.602	
	54	55			29,21	2,778	2,84	8,282	0	B-1				12.032		7.161		215.886	106	1.664	
	55	56	11,2	443	28,35	2,717	2,85	7,162	0	B-1				13.764	7.793	8.579	4.558	217.444	106	1.795	1.070
	56	54			29,61	2,681	2,84	7,743	0	B-1		94		13.714		8.683		219.133	115	1.577	
	57	68			23,46	2,2	2,62	6,805	0	B-1				14.479		8.006		220.595	147	1.577	
	58	84			19,16	2,323	2,59	8,727	3	B-1				10.724		6.492		222.025	95	1.884	
	59	101			15,88	2,293	2,41	8,635	1	B-1				11.414		7.114		223.814	138	1.886	
29.11.2014	60	58			27,78	2,317	2,50	8,848	1	B-1				1.098		285		225.563	5	2.760	
	61	54			29,58	2,782	2,51	8,143	3	B-1				9.298		5.418		228.318	90	1.596	
	62	53			30,17	2,307	2,54	6,037	0	B-1				13.472		6.960		229.823	119	1.119	
	63	44	14,4	570	36,17	2,775	2,62	7,214	1	B-1				9.312	6.601	5.466	3.401	229.823	119	1.168	900
	64	48			33,00	2,459	2,80	6,548	0	B-1		98		11.990		7.298		230.872	98	1.413	
	65	50			31,72	2,515	2,87	8,074	0	B-1				10.918		6.436		232.187	128	1.320	
	66	59			27,24	2,018	2,72	6,819	4	B-1				12.775		5.607		233.379	98	1.403	
	67	65			24,77	2,152	2,86	7,076	2	B-1				13.815		3.891		234.684	110	1.508	
68	52			30,94	2,75	2,89	7,375	0	B-1				12.384		7.610		236.083	113	1.672		
30.11.2014	69	60			26,68	2,625	2,40	7,888	2	B-1				12.419		8.358		237.642	110	1.430	
	70	47			34,07	2,689	2,75	7,735	0	B-1				9.456		6.547		238.961	121	1.364	
	71	45			35,48	2,587	2,62	7,123	0	B-1				9.790		6.568		240.205	88	1.177	
	72	55	11,2	443	28,95	2,638	2,61	7,552	1	B-1				11.006	7.714	5.758	3.885	241.294	98	1.271	920
	73	50			32,25	2,611	2,94	7,825	0	B-1				11.170		7.492		242.468	95	1.553	
	74	54			29,83	2,55	2,83	7,348	1	B-1				13.577		5.194		243.926	123	1.531	
	75	69			23,14	2,621	2,80	8,937	1	B-1				18.980		3.590		245.334	102	1.978	
01.12.2014	76	93			17,26	2,495	2,97	10,036	1	B-1				20.997		1.022		247.209	163	2.171	
	77	100	8,0	317	15,98	2,752	2,83	10,941	0	B-1				18.246	10.854	1.299	2.161	249.217	152	2.210	1.891
	78	89			17,89	3,097	2,68	10,682	2	B-1				15.566		3.445		251.275	121	2.345	
	79	125			12,84	2,881	2,90	10,041	0	B-1				16.481		9.720		253.500	146	2.744	
80	98			16,39	2,479	2,93	8,966	4	B-1				15.542		1.805		256.098	154	5.654		
02.12.2014	81	88			18,13	2,243	3,27	7,010	0	B-1				18.222		50		261.598	111	2.976	
	82	115			13,92	2,215	3,28	7,747	2	B-1				28.572		29		264.464	182	3.125	
	83	148			10,79	2,787	3,12	9,274	2	B-1				21.796		1		267.407	155	2.794	
	84	114	12,8	507	14,04	2,713	2,81	8,793	1	B-1				19.877	14.109	4.320	971	270.046	123	2.804	1.718
	85	114			14,06	2,961	2,80	9,067	0	B-1				22.385		4.717		272.726	140	2.800	
	86	97			16,46	2,156	3,44	6,285	1	B-1				23.757		2.517		275.386	181	2.563	
	87	114			14,00	2,337	3,18	7,240	2	B-1				24.126		321		277.768	148	2.523	
	88	110			14,59	2,514	2,95	7,634	0	B-1				21.856		477		280.143	142	2.405	
03.12.2014	89	81			19,70	2,595	2,85	6,616	1	B-1				19.182		4.548		282.406	159	2.421	
	90	98			16,25	3,061	2,88	10,006	0	B-1				19.764		2.962		284.668	120	2.498	
	91	113	9,6	380	14,19	2,81	2,86	9,935	0	B-1				21.211	14.868	5.171	2.398	287.045	138	2.817	1.960
	92	120			13,29	2,997	2,81	10,265	0	B-1				20.798		4.148		289.724	129	3.092	
	93	145			11,03	2,732	2,89	9,288	2	B-1				25.016		3.588		292.687	147	5.273	
	94	136			11,80	2															

9.2 Daten TVM 847 (Produkt A-1)

Datum	Ringnr.	Vortriebsdauer [min]	Vortriebslänge [m]	Ausbruch [m ³]	Vortriebsgeschw. [mm/min]	Moment Schneidrad [NMm]	Geschw. Schneidrad [U/min]	Vorschubkraft [MN]	Stoppes []	Produkt	Schaumkonzentrat []	Schaumkonzentrat durchschn. [l]	cf []	Wasser [l]	Wasser durchschn. [l/m]	zus. Wasser [l]	zus. Wasser durchschn. [l/m]	summiert			
																		Energie TVM [kWh]	Energie Schneckenförderer [kWh]	Energie pro Ring [kWh]	Energie durchschn. [kWh/m]
	21	102			15,76	1,413	2,687	7,744	6	A-1		77	0,8%	10.118		2.431		89.881	205	2.591	
	22	79			20,32	1,622	2,914	6,684	2	A-1		113	1,0%	11.529		0		92.267	124	1.853	
05.11.2014	23	106	4,80	1,90	15,07	1,508	2,279	7,119	6	A-1		102	0,9%	11.796	10,027	3.746	2,953	93.996	108	2.086	
	24	116			13,78	1,424	2,086	7,357	4	A-1	59	85	0,5%	16.894		6.632		95.974	120	1.811	1.224
	25	120			13,30	1,168	2,081	7,055	5	A-1		94	0,5%	19.439		3.795		97.666	139	1.979	
06.11.2014	26	86			18,57	1,772	2,387	6,706	1	A-1		174	1,0%	17.602		0		99.506	163	1.883	
	27	86			18,62	2,285	2,476	7,024	1	A-1		163	1,0%	16.551		0		101.226	145	1.689	
	28	87	9,60	380	18,40	2,079	2,340	7,518	3	A-1		137	1,0%	14.197	9,385	6.253	2,433	102.770	86	1.797	1.116
	29	89			17,99	1,716	2,459	7,301	3	A-1		128	0,9%	14.398		6.085		104.481	97	1.690	
	30	83			19,25	1,939	2,170	8,124	3	A-1		129	1,0%	13.250		6.925		106.075	97	1.669	
	31	90			17,76	1,797	2,450	6,815	1	A-1		135	1,0%	14.096		4.096		107.647	104	1.987	
07.11.2014	32	76			20,96	1,728	3,036	6,984	3	A-1		140	1,0%	14.313		0		109.530	136	1.665	
	33	77			20,69	1,764	3,060	7,353	0	A-1		151	1,0%	15.186		60		111.058	141	1.750	
	34	78	9,60	380	20,45	1,744	3,011	6,963	2	A-1		154	1,0%	15.774	8,947	158	1,486	112.668	155	1.748	1.155
	35	67			23,80	2,355	2,371	8,289	2	A-1		179	1,3%	14.125		6.550		114.261	114	1.511	
	36	63			25,23	2,315	2,140	8,003	0	A-1		201	1,5%	13.640		6.954		115.658	95	1.617	
	37	89			17,88	1,677	2,378	7,286	3	A-1		305	2,4%	12.855		540		117.180	100	2.802	
08.11.2014	38	91			17,67	1,767	2,597	6,969	1	A-1		185	0,9%	20.049		47		119.882	172	1.682	
	39	67			23,82	2,374	2,298	8,039	2	A-1		115	0,9%	12.799		7.435		121.391	94	1.362	
	40	68	8,00	317	23,41	2,057	7,588	1	A-1		127	3,560	1,0%	13.301	9,221	7.435	2,517	122.659	96	1.466	925
	41	57			28,11	2,845	2,222	7,854	2	A-1		152	1,3%	12.132		8.407		124.029	96	1.377	
	42	81			19,70	1,489	2,572	5,867	3	A-1		147	0,9%	15.484		685		125.310	126	1.512	
10.11.2014	43	83			19,31	1,560	2,779	5,711	2	A-1		136	0,9%	15.361		264		126.696	134	1.411	
	44	81	9,60	380	19,66	0,964	2,984	5,799	1	A-1		79	0,5%	16.206	8,980	353	2,243	127.972	137	1.897	5,271
	45	84			19,02	1,875	2,875	6,850	2	A-1		85	0,5%	17.816		1.959		129.732	166	1.746	
	46	63			25,24	2,406	2,345	8,361	2	A-1		103	0,9%	11.861		6.631		131.312	109	1.537	
	47	73			21,90	2,070	2,162	8,033	2	A-1		108	1,0%	11.195		6.138		132.739	96	2.024	
	48	59			27,29	2,297	2,298	8,460	3	A-1		176	1,3%	13.773		6.188		134.667	100	41.991	
06.12.2014	49	62			25,85	2,193	2,383	10,490	3	A-1		20	1,2%	1.604		5		176.558	4	4.659	
	50	46	8,00	317	34,58	2,778	2,389	9,218	1	A-1		169	1,5%	11.157	5,563	29	1,6	181.213	112	1.240	1,342
	51	49			32,52	1,990	3,008	7,502	1	A-1		154	1,6%	9.846		34		182.341	112	1.529	
	52	60			26,74	2,375	2,988	7,084	1	A-1		174	1,6%	11.127		35		183.757	126	1.665	
	53	56			28,82	2,675	2,972	8,040	0	A-1		171	1,6%	10.765		26		185.296	113	1.641	
07.12.2014	54	57			27,99	2,076	3,024	7,771	1	A-1		173	1,5%	11.457		2.949		186.824	126	1.305	
	55	51			31,43	2,602	2,518	7,446	2	A-1		126	1,4%	8.713		5.877		188.002	94	1.410	
	56	49			32,34	2,437	2,437	7,736	0	A-1		173	1,6%	10.557		7.704		189.318	117	1.392	
	57	50	16,00	633	32,23	2,830	2,521	7,588	0	A-1		160	1,4%	11.071	6,071	7.741	3,793	190.593	111	1.276	840
	58	45			35,89	2,411	2,544	7,873	0	A-1		163	1,6%	10.131		6.514		191.759	108	1.251	
	59	43			37,00	2,444	2,984	7,884	0	A-1		175	1,7%	10.405		6.318		192.902	107	1.084	
	60	49			32,68	2,473	2,992	7,753	2	A-1		142	1,5%	9.326		5.142		193.879	85	1.439	
	61	43			36,79	2,189	3,005	7,985	0	A-1		124	1,6%	7.831		6.029		195.234	108	1.468	
	62	45			35,72	2,247	3,009	7,979	1	A-1		129	1,5%	8.421		5.774		196.594	131	1.388	
	63	48			33,23	2,729	2,987	8,368	0	A-1		147	1,6%	9.228		6.648		197.851	115	1.432	
08.12.2014	64	61			26,307	2,595	9,313	1	A-1		125	1,5%	8.453		5.192		199.168	87	1.695		
	65	49			32,958	2,297	2,611	8,606	2	A-1		192	1,8%	10.434		7.211		200.776	134	1.447	
	66	48	12,80	507	33,228	2,530	2,992	7,720	2	A-1		145	1,5%	9.466	5,091	5.225	3,846	202.088	129	2.446	949
	67	45			35,724	2,247	3,009	7,979	0	A-1		129	1,5%	8.421		5.774		204.406	102	1.310	
	68	48			33,229	2,729	2,987	8,368	1	A-1		147	1,6%	9.228		6.648		205.614	111	1.290	
	69	46			35,036	2,570	3,011	8,803	0	A-1		143	1,6%	9.030		5.746		206.793	102	1.581	
	70	60			26,449	2,458	2,857	9,047	0	A-1		170	1,5%	11.182		6.091		208.272	117	1.627	
	71	54			29,788	2,754	2,537	10,272	1	A-1		158	1,5%	10.469		7.340		209.781	98	758	
09.12.2014	72	43			36,788	2,189	3,005	7,985	2	A-1		125	1,6%	7.852		6.033		210.441	105	764	
	73	50			31,996	2,898	2,533	9,322	1	A-1		172	1,6%	11.000		9.176		211.101	103	1.297	
	74	57	12,80	507	27,963	2,300	2,997	8,479	1	A-1		161	1,6%	10.213	6,274	5.655	4,182	212.295	112	1.384	800
	75	46			34,761	2,345	2,993	8,614	1	A-1		144	1,6%	9.105		6.218		213.567	114	1.477	
	76	55			29,173	2,720	2,986	8,487	1	A-1		165	1,5%	10.669		7.128		214.929	116	1.397	
	77	55			29,162	2,249	3,008	8,009	1	A-1		146	1,5%	9.578		6.393		216.210	109	1.524	
	78	56			28,399	2,397	3,008	7,174	1	A-1		173	1,6%	11.066		7.311		217.624	115	1.375	
	79	55			28,841	2,050	3,012	7,787	1	A-1		169	1,6%	10.828		5.610		218.884	89	1.021	
10.12.2014	80	54			29,727	2,640	2,989	8,360	1	A-1		71	1,6%	4.459		3.005		219.816	49	1.915	
	81	46			34,46	2,262	2,985	7,994	1	A-1		116	1,6%	7.133		4.659		221.683	79	1.150	
	82	45			35,379	2,094	2,961	8,261	1	A-1		159	1,8%	9.038		6.702		222.753	101	1.391	
	83	50	12,80	507	32,069	2,587	2,892	8,479	1	A-1		181	1,7%	10.545	5,053	6.836	3,379	224.043	138	1.237	917
	84	49			32,513	2,229	3,043	9,017	1	A-1		132	1,7%	7.601		5.083		225.142	98	1.634	
	85	48			33,064	2,582	3,014	8,361	1	A-1		188	1,8%	10.562		7.019		226.678	117	1.367	
	86	46			35,123	2,196	3,022	9,632	1	A-1		85	1,7%	5.032		2.888		227.928	65	1.315	
	87	53			30,341	2,204	3,012	10,181	1	A-1		184	1,8%	10.315		7.053		229.178	114	1.726	
11.12.2014	88	49			32,639	2,255	2,817	10,719	1	A-1		178	1,7%	10.793		7.080		230.790	119	1.380	
	89	57			28,25	2,355	2,879	9,429	6	A-1		66	1,6%	4.284		3.035		232.050	54	1.321	
	90	73	11,2																		