

Institut für Geotechnik und Baubetrieb – Tunnelbau und Baubetriebslehre  
Technische Universität München

# **Ein Beitrag zur Verfahrenstechnik der Schildvortrie- be mit im Schildschwanz hergestellter fugenloser Stahlbetonauskleidung als alleiniger Sicherung**

Gerhard Lang

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Schikora

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bösch

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lukas

Leopold-Franzens-Universität Innsbruck/Österreich

Die Dissertation wurde am 10.11.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 29.01.2004 angenommen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>11</b>
1.1	Aufbau und Gliederung.....	12
1.2	Zielsetzung und -gruppen.....	13
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Fertigteilbeton (Betontübbinge).....</b>	<b>15</b>
2.1.1	Allgemeines .....	15
2.1.2	Herstellung .....	15
2.1.3	Mögliche Schadensbilder bei einschaligem Tunnelausbau in Tübbingbauweise .....	18
2.1.4	Diskussion .....	21
<b>2.2</b>	<b>Extrudierbeton .....</b>	<b>23</b>
2.2.1	Allgemeines .....	23
2.2.2	Extrudierverfahren mit Gleitschalung .....	26
2.2.3	Extrudierverfahren mit Umsetzschalung .....	27
2.2.4	Diskussion .....	28
<b>3</b>	<b>ANFORDERUNGEN AN DAS NEUE VERFAHREN (PFLICHTENHEFT).....</b>	<b>30</b>
3.1	Anforderungen hinsichtlich der Betontechnologie.....	31
3.2	Bewehrungstechnische Anforderungen .....	33
3.3	Verfahrenstechnische Anforderungen .....	33
3.4	Betriebswirtschaftliche Anforderungen.....	35
3.5	Generelle Anforderungen.....	36
<b>4</b>	<b>TUNNELSCHALE .....</b>	<b>38</b>
4.1	Ortbetonring.....	38
<b>4.2</b>	<b>Spezialbeton (gesteuerter Schnellbeton) .....</b>	<b>40</b>
4.2.1	Zusammensetzung .....	40
4.2.2	Abbindeverlauf .....	42
4.2.3	Verarbeitung .....	42
4.2.4	Schwinden/Quellen.....	43
4.2.5	Abbindetemperaturentwicklung (Hydratationswärme).....	43
4.2.6	Bettung des Frischbetonrings .....	44

<b>4.3</b>	<b>Bewehrung</b> .....	<b>46</b>
4.3.1	Dimensionierung .....	47
4.3.1.1	Lastfall: Vortriebskräfte.....	47
4.3.1.2	Lastfall: Äußere Lasten.....	47
4.3.1.3	Lastfall: Zwangsbeanspruchungen.....	51
4.3.1.4	Maßgebender Bewehrungsanteil.....	52
4.3.1.5	Verankerungs-, Übergreifungslänge .....	52
4.3.2	Bewehrungsanordnung .....	53
<b>4.4</b>	<b>Schalung</b> .....	<b>63</b>
4.4.1	Aufbau, Herstellung und Kurvenfahrt .....	63
4.4.2	Schalungsringbau .....	67
4.4.3	Demontage der Schalungsringe .....	69
<b>4.5</b>	<b>Kraftflußbetrachtung der Vortriebskräfte</b> .....	<b>70</b>
<b>4.6</b>	<b>Der Vortriebszyklus des neuen Verfahrens</b> .....	<b>74</b>
<b>4.7</b>	<b>Der Betonierzyklus</b> .....	<b>76</b>
4.7.1	Die Betonbereitstellung .....	76
4.7.2	Der Betonierprozeß.....	78
4.7.3	Reinigungsprozeß .....	83
4.7.4	Bedienung und Sensorik.....	86
<b>5</b>	<b>VORTRIEBSANLAGE</b> .....	<b>90</b>
<b>5.1</b>	<b>Eingesetzte Verfahren</b> .....	<b>90</b>
<b>5.2</b>	<b>Genereller Aufbau und Einsatzbereich des neuen Verfahrens</b> .....	<b>90</b>
<b>5.3</b>	<b>Die Vortriebseinheit</b> .....	<b>92</b>
5.3.1	Schneidrad samt Antrieb und Getriebe.....	92
5.3.2	Schneidenschuß samt Steuerpressen und Schleuseninstallation .....	93
5.3.3	Mittelschuß samt Vortriebspresen.....	95
5.3.4	Schildschwanz samt Schildschwanzgelenkpressen und Dichtungen .....	97
5.3.5	Erektor samt Leitungen .....	100
<b>5.4</b>	<b>Nachläufer-Einheit</b> .....	<b>100</b>
5.4.1	Energie-Nachläufer.....	102
5.4.2	Betonier-Nachläufer .....	104
5.4.3	Brücken-Nachläufer.....	104
5.4.4	Demontage-Nachläufer.....	105
5.4.5	Logistik-Nachläufer.....	106

<b>6</b>	<b>TUNNEL-LOGISTIK .....</b>	<b>108</b>
6.1	Allgemeines.....	108
6.2	Der Logistik-Mix.....	108
<b>7</b>	<b>GESAMTBETRACHTUNG .....</b>	<b>110</b>
7.1	Wirtschaftlichkeit .....	110
7.2	Ausführungsqualität.....	113
7.3	Ausführungssicherheit.....	115
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>117</b>
	<b>ANHANG.....</b>	<b>120</b>
<b>9</b>	<b>NAßBETON ALS ALTERNATIVE BETONVARIANTE ZU TROCKENBETON.....</b>	<b>120</b>
9.1	Pulverförmiger Beschleuniger (Woermann) .....	120
9.2	Flüssige Beschleuniger (Heidelberger).....	120
9.3	Dispersionsbeschleuniger (Sika) .....	121
9.4	2-Komponenten-Beton (u.a. DMT).....	121
<b>10</b>	<b>VERSUCHE ZUR INLINE-MISCHUNG VON FLÜSSIGEN ZUSATZMITTELN .....</b>	<b>123</b>
<b>10.1</b>	<b>Allgemeines.....</b>	<b>123</b>
10.1.1	Versuchsziel .....	123
10.1.2	Bingham Fluide.....	123
10.1.3	Versuchsaufbau und –durchführung .....	124
10.1.4	Beton- und Dosiermittelpumpe .....	125
10.1.5	Versuchsbeton .....	128
<b>10.2</b>	<b>Injektorverfahren .....</b>	<b>128</b>
<b>10.3</b>	<b>Statikmischerverfahren.....</b>	<b>130</b>
10.3.1	Mischprinzip .....	130
10.3.2	Modifizierter Kenics-Mischer .....	130
10.3.3	Modifizierter Fingermischer (Sulzer).....	132
<b>10.4</b>	<b>Aktivmischerverfahren.....</b>	<b>134</b>

**LITERATURVERZEICHNIS.....137**

**KONTAKTADRESSE: .....140**

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abb.1-1: EU railroad priority projects (www.europa.eu.int).....</i>	<i>11</i>
<i>Abb.2-1: Tübbingsegmente: Lagerzustand, Einbauzustand .....</i>	<i>15</i>
<i>Abb.2-2: Tübbing Fertigungsstraße .....</i>	<i>16</i>
<i>Abb.2-3: Vermessung der Tübbingschalung, Bewehrungskorb und Einbauten.....</i>	<i>16</i>
<i>Abb.2-4: Betoniervorgang, Einfahren der Schalung in die Klimakammer .....</i>	<i>17</i>
<i>Abb.2-5: Aufkleben der Tübbingfugendichtung.....</i>	<i>17</i>
<i>Abb.2-6: Einleitung der Vortriebspresenkräfte in die Tübbingschale .....</i>	<i>18</i>
<i>Abb.2-7: Kaubitstreifen in der Ringfuge.....</i>	<i>19</i>
<i>Abb.2-8: Mängel beim Setzen der Tübbingsegmente (Bloom, C.B.M., 2001) .....</i>	<i>20</i>
<i>Abb.2-9: Schadensbilder (Bloom, C.B.M., 2001).....</i>	<i>21</i>
<i>Abb.2-10: Fugendichtung (Ringfuge) (Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L., 1994).....</i>	<i>22</i>
<i>Abb.2-11: Geologieseitige Abplatzungen an der Fugendichtung nach dem zwangs- beanspruchten Einbau .....</i>	<i>22</i>
<i>Abb.2-12: Versatz in der Ringfuge.....</i>	<i>23</i>
<i>Abb.2-13: Betonzuführung beim Extrudierverfahren (Barbendererde, S., 1985) .....</i>	<i>24</i>
<i>Abb.2-14: Entwicklung der Betonfestigkeit (Barbendererde, S., 1985).....</i>	<i>24</i>
<i>Abb.2-15: Filtratwasserabgabe des Betons in den Boden (Barbendererde, S., 1985) .....</i>	<i>25</i>
<i>Abb.2-16: Konzept eines Systems mit Gleitschalung für extrudierte Tunnelauskleidung (Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L., 1994) .....</i>	<i>26</i>
<i>Abb.2-17: Schematische Darstellung des Extrudierverfahrens (Barbendererde, S., 1985) .....</i>	<i>27</i>
<i>Abb.2-18: Elastische Stützung der Stirnschalung (Barbendererde, S., 1985) .....</i>	<i>28</i>
<i>Abb.3-1: Generelle Anforderungen an das neue Verfahren mit Kapitelhinweis .....</i>	<i>31</i>
<i>Abb.3-2: Anforderungen an den Abbindeverlauf des gesteuerten Schnellbetons.....</i>	<i>33</i>
<i>Abb.3-3: Längsschnitt durch Betonschale, Schalung und Geologie mit Vortriebskräften.....</i>	<i>35</i>
<i>Abb.3-4: Querschnitt mit Geologie- und Hydrologiedaten .....</i>	<i>36</i>

<i>Abb.4-1: Vertikaler Teilschnitt durch den Schildschwanz, Betonschale, Schalung, angrenzende Geologie.....</i>	<i>38</i>
<i>Abb.4-2: Detail: horizontaler Schnitt durch die Betonierkammer .....</i>	<i>39</i>
<i>Abb.4-3: Beispielrezeptur gesteuerter Schnellbeton.....</i>	<i>40</i>
<i>Abb.4-4: Dreistoff Diagramm .....</i>	<i>41</i>
<i>Abb.4-5: Abbindeverlauf des gesteuerten Schnellbetons (Beispiel) .....</i>	<i>42</i>
<i>Abb.4-6: Quellen / Schwinden bei verschiedenen Entschalungszeiten des gesteuerten Schnellbetons.....</i>	<i>43</i>
<i>Abb.4-7: Versuchsergebnisse der maximalen Hydratationswärmeentwicklung.....</i>	<i>44</i>
<i>Abb.4-8: Bettung der Betonschale im Schildschwanzbereich.....</i>	<i>45</i>
<i>Abb.4-9: Bettung der Betonschale im Schildschwanzbereich.....</i>	<i>45</i>
<i>Abb.4-10: Lastkollektiv aus der Geologie .....</i>	<i>48</i>
<i>Abb.4-11: Normalkraftverlauf [kN] .....</i>	<i>49</i>
<i>Abb.4-12: Querkraftverlauf [kN].....</i>	<i>49</i>
<i>Abb.4-13: Biegemomentenverlauf [kNm].....</i>	<i>50</i>
<i>Abb.4-14: Bewehrungsanteil [cm<sup>2</sup>/m] .....</i>	<i>50</i>
<i>Abb.4-15: Dimensionierung des Bewehrungsgehaltes aufgrund von Zwängungen in der Betonschale nach DBV-Sachstandsbericht Stahlbetoninnenschalen im U-Bahnbau und gemäß DIN 1045 . .....</i>	<i>51</i>
<i>Abb.4-16: Beispielberechnung der Verankerungslänge gem. DIN 1045-1 (12.6.2). ..</i>	<i>53</i>
<i>Abb.4-17: Beispielberechnung der Übergreifungslänge gem. DIN 1045-1 (12.8.2).. ..</i>	<i>53</i>
<i>Abb.4-18: Überlappungsstoß in Umfangsrichtung (tangential).....</i>	<i>54</i>
<i>Abb.4-19: Überlappungsstoß in axialer Richtung .....</i>	<i>54</i>
<i>Abb.4-20: Ausführungsformen der Übergreifungsstöße .....</i>	<i>55</i>
<i>Abb.4-21: Tabelle der Übergreifungslängen.....</i>	<i>56</i>
<i>Abb.4-22: Berechnung des Bewehrungsgehaltes.....</i>	<i>57</i>
<i>Abb.4-23: Schalungselement mit Bewehrungskorb.....</i>	<i>58</i>
<i>Abb.4-24: Schalungselement mit Bewehrungsbefestigung .....</i>	<i>58</i>
<i>Abb.4-25: Schalenelement, mit Befestigung, Abstandshalter und Bewehrungskorb ..</i>	<i>59</i>
<i>Abb.4-26: Schematischer Schalungs- und Bewehrungsringbau.....</i>	<i>60</i>
<i>Abb.4-27: Flanken-Korb rechts.....</i>	<i>61</i>

<i>Abb.4-28: Schlußkorb mit Klauen für Klauenverbindung</i> .....	62
<i>Abb.4-29: Schlußkorb mit Flanken-Korb links und recht</i> .....	62
<i>Abb.4-30: Konischer Schalungsring für Kurvenfahrt rechts</i> .....	63
<i>Abb.4-31: Normal-Schalungselement mit Beschriftung</i> .....	64
<i>Abb.4-32: Schnitt G-G: aus Abb.4-31</i> .....	64
<i>Abb.4-33: Konenverbindung der Schalungsringe</i> .....	65
<i>Abb.4-34: Flankenschalungs- und Schluß-Schalungselement</i> .....	66
<i>Abb.4-35: Setzen der Schalungselemente im Schutze des Schildschwanzmantels.</i>	67
<i>Abb.4-36: Phasenweises Versetzen des ersten Normal-Schalungselementes</i> .....	67
<i>Abb.4-37: Phasenweises Versetzen des zweiten Normal-Schalungselementes</i> .....	68
<i>Abb.4-38: Phasenweises Versetzen des Schluß-Schalungselementes</i> .....	69
<i>Abb.4-39: Schnitt durch Schildschwanz mit Vortriebskräften und Reaktionskräften.</i>	71
<i>Abb.4-40: Diagramm der kumulierten Reibkraftübertragung über die gesamte Schalungslänge</i> .....	72
<i>Abb.4-41: Vortriebszyklus</i> .....	74
<i>Abb.4-42: Betonier-Nachläufer</i> .....	76
<i>Abb.4-43: Vorratsbehälter mit Austrags- und Dosierorgane</i> .....	77
<i>Abb.4-44: Rührwerk im Trichter der Betonpumpe (Fa. Waitzinger)</i> .....	79
<i>Abb.4-45: Betonierschema</i> .....	79
<i>Abb.4-46: Betonierventil in Betonierstellung</i> .....	80
<i>Abb.4-47: Betonierventil in Durchschaltstellung</i> .....	80
<i>Abb.4-48: Betonierreihenfolge</i> .....	81
<i>Abb.4-49: Schema Überdruckventil inaktiver Zustand</i> .....	82
<i>Abb.4-50: Schema Überdruckventil aktivierter Zustand</i> .....	82
<i>Abb.4-51: automatische Ballaufgabeeinheit (Ansicht)</i> .....	83
<i>Abb.4-52: automatische Ballaufgabeeinheit in Lade- und Sendestellung (im Schnitt)</i> .....	84
<i>Abb.4-53: Reinigungsschema linke Betonierseite</i> .....	85
<i>Abb.4-54: Reinigungsschema rechte Betonierseite</i> .....	85
<i>Abb.5-1: Genereller Aufbau der Vortriebsanlage</i> .....	91
<i>Abb.5-2: Vortriebseinheit mit Hauptbaugruppen</i> .....	92

<i>Abb.5-3: Schneidrad mit Schneidenschuß</i> .....	93
<i>Abb.5-4: Schnitt durch Abbau- und Arbeitskammer eines Hydroschildes (Fa. Herrenknecht)</i> .....	94
<i>Abb.5-5: Spülkreislauf</i> .....	94
<i>Abb.5-6: Mittelschuß mit Vortriebs- und Steuerpressen</i> .....	95
<i>Abb.5-7: Pressenschuhe mit aktivierter Pressenschuhdichtung</i> .....	96
<i>Abb.5-8: Vortriebspresse im ausgefahrenen Zustand mit Pressenschuh und Dichtung</i> .....	97
<i>Abb.5-9: Phasen des Vortriebs im Schnitt durch Betonierkammer und den angrenzenden Bauteilen</i> .....	98
<i>Abb.5-10: Schildschwanznotdichtung</i> .....	99
<i>Abb.5-11: Ausrichten des Schildschwanzes über die Schildgelenkpressen vor jedem neuen Betoniervorgang</i> .....	99
<i>Abb.5-12: Ansicht Nachläufer-Einheit</i> .....	101
<i>Abb.5-13: Energie-Nachläufer</i> .....	103
<i>Abb.5-14: Brücken-Nachläufer und Demontage-Nachläufer</i> .....	105
<i>Abb.5-15: Ansicht Demontage-Nachläufer</i> .....	106
<i>Abb.5-16: Ansicht Logistik-Nachläufer</i> .....	107
<i>Abb.6-1: Materialzu- und -abfuhr</i> .....	108
<i>Abb.7-1: Mehr- oder Minderaufwand der Ortbetonbauweise im Vergleich zur Tübbingbauweise</i> .....	111
<i>Abb.7-2: Kostenabschätzung in Vergleich zur Tübbingbauweise</i> .....	112
<i>Abb.7-3: Tübbing mit Dichtungen</i> .....	113
<i>Abb.7-4: Schlußstein in Einbausituation (Dichtungsproblematik)</i> .....	114
<i>Abb.:10-1 Fließkurve von Bingham-Fluiden</i> .....	123
<i>Abb.10-2: Genereller Versuchsaufbau</i> .....	124
<i>Abb.10-3: Beispiel für zersägte Probezylinder</i> .....	125
<i>Abb.10-4: Pumpendiagramm Betonpumpe</i> .....	126
<i>Abb.10-5: Lippendüse-Injektordüse Kombination (Zeichnung)</i> .....	127
<i>Abb.10-6: Schema der Funktionsweise: Lippendüse offen, - geschlossen</i> .....	127
<i>Abb.10-7: Rezeptur Versuchsбетон</i> .....	128

<i>Abb.10-8: Düsenanordnung 90°, Eindringtiefe: 3x25mm, 3x15mm.....</i>	<i>129</i>
<i>Abb.10-9: Düsenanordnung 40° in Strömungsrichtung, Eindringtiefe: 3x25mm, 3x15mm .....</i>	<i>129</i>
<i>Abb.10-10 Modifizierter Kenicsmischer mit Injektoreinheit mit zwei Mischereinheiten .....</i>	<i>131</i>
<i>Abb.10-11 Ergebnis Farbversuch mit modifiziertem Kenicsmischer (10 Mischerelemente) und einer Injektoreinheit 40° in Strömungsrichtung .....</i>	<i>131</i>
<i>Abb.10-12 Ergebnis Farbversuch mit modifiziertem Kenicsmischer (10 Mischerelemente) und einer Injektoreinheit 90° .....</i>	<i>131</i>
<i>Abb.10-13 Modifizierter Fingermischer (Zeichnung).....</i>	<i>132</i>
<i>Abb.10-14 Modifizierter Fingermischer (Bild).....</i>	<i>132</i>
<i>Abb.10-15: Ergebnis modifizierter Fingermischer.....</i>	<i>132</i>
<i>Abb.10-16: Aktiver Inline-Mischer (Zeichnung).....</i>	<i>134</i>
<i>Abb.10-17: Aktiver Inline-Mischer (Bild) .....</i>	<i>134</i>
<i>Abb.10-18: Aktivmischer ohne Rohr.....</i>	<i>135</i>
<i>Abb.10-19: Ergebnis Aktivmischerversuch .....</i>	<i>135</i>

## 1 Einleitung

Der Bedarf an unterirdischen Bauwerken / Tunnelbauwerken ist enorm. Weltweit wird an Konzepten gearbeitet, die eine Bewältigung des wachsenden Güter- und Personenverkehrs in den Metropolen durch unterirdische Transportsysteme vorsehen. Die EU hat im Rahmen des Ausbaus der Hochgeschwindigkeitsnetze in Europa für die sogenannten „priority projects“ ein Investitionsvolumen von 91 Milliarden ECU bereitgestellt.

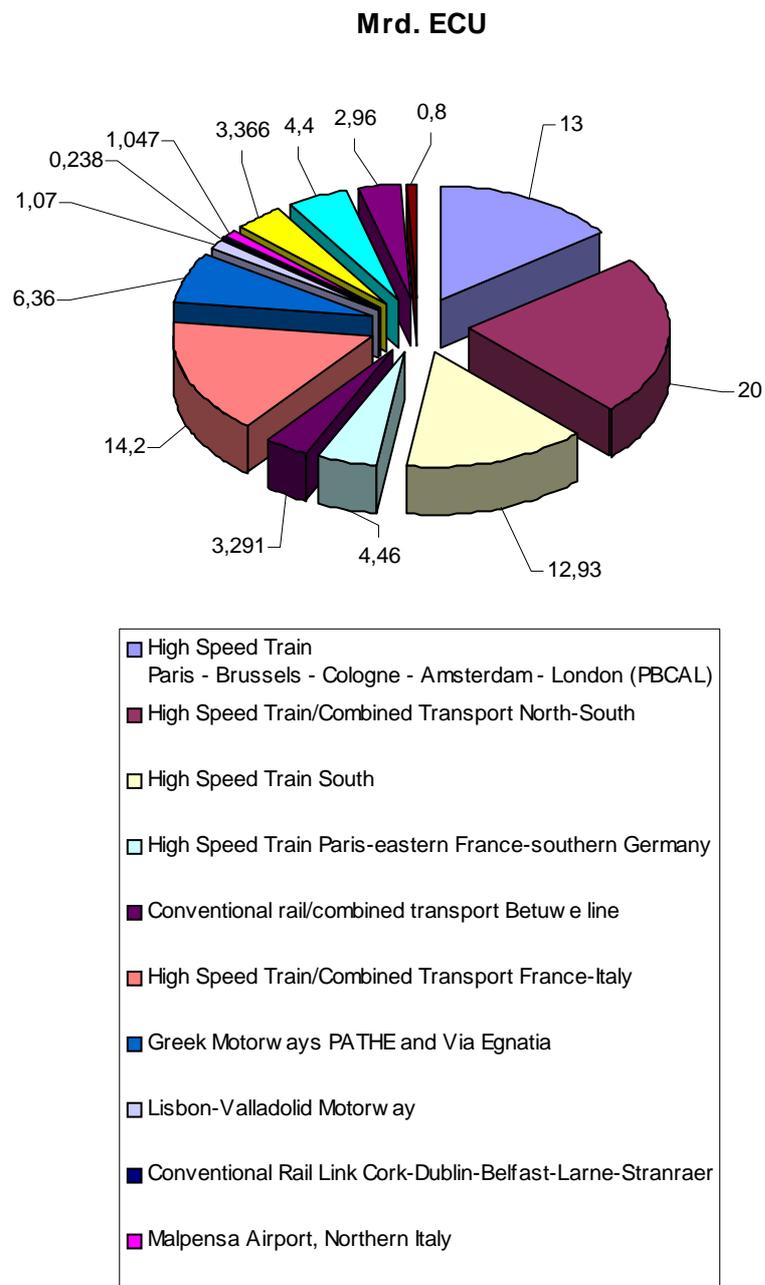


Abb.1-1: EU railroad priority projects ([www.europa.eu.int](http://www.europa.eu.int))

Zudem haben vergangene Tunnelkatastrophen sowie Untersuchungen bestehender Tunnel die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen zur Sanierung und sicherheitstechnischen Umrüstung von Verkehrstunneln aufgezeigt. Um den prognostizierten Bedarf an Tunnelbauwerken decken zu können, werden effiziente Verfahren zur Herstellung nachhaltiger Bauwerke gefordert.

Kernstück dieser Arbeit ist die Diskussion eines neuen, mechanisierten Verfahrens zur Herstellung einer endlosen Tunnelschale in Ortbetonbauweise im Schutze eines Schildvortriebes in beliebiger Geologie und Hydrologie.

Dieses Verfahren soll eine wirtschaftliche Alternative zu den bestehenden Verfahren darstellen. Es basiert auf den neuesten Entwicklungen in der Zusatzmittel- und Zementindustrie.

Wie bereits bei früheren Projekten erwiesen, hängt die Akzeptanz eines neuen Vortriebsverfahrens hauptsächlich von der Vortriebsleistung, der Qualität und den Gesamtkosten des Tunnelbauwerks ab.

Dieses soll im Folgenden näher beleuchtet werden.

### **1.1 Aufbau und Gliederung**

Nach der Einleitung in **Kapitel 1** wird in **Kapitel 2** näher auf den Stand der Technik eingegangen. Dabei geht es ausschließlich um bereits etablierte Verfahren zur Herstellung von einschaligen Tunnelinnenschalen aus dem Baustoff Beton. Die Diskussion dieser Verfahren, mit dem Aufzeigen ihrer Vor- und Nachteile, bildet die Grundlage für die in **Kapitel 3** behandelten Anforderungen an das neue Verfahren (Pflichtenheft).

Für die im Pflichtenheft festgelegten Anforderungen werden in den folgenden Kapiteln Lösungen aufgezeigt, mit denen Nachteile bereits bestehender Verfahren vermieden werden können. Dazu wird in **Kapitel 4** zunächst auf die Tunnelauskleidung als dauerhafte Sicherung des unterirdischen Hohlraums eingegangen. Im Mittelpunkt des Interesses stehen die Betontechnologie, die Dimensionierung und das Design der Stabstahlbewehrung, die für den Bauszustand erforderliche Umsetzschalung aus Stahl sowie das Betonierkonzept samt Vortriebszyklus. Dieses Kapitel stellt den technologischen Kern des neuen Verfahrens dar einschließlich des neuentwickelten Reinigungskonzeptes samt Betonierventil und Reinigungseinheit.

Das **Kapitel 5** beschäftigt sich mit der Vortriebsanlage, die sich in Vortriebseinheit und Nachläufereinheit unterteilt. An dieser Stelle wird näher auf den generellen Auf-

bau von Schildvortriebsanlagen sowie die technischen Besonderheiten des neuen Verfahrens, wie beispielsweise die Schalungsdemontage auf dem Demontage-Nachläufer, eingegangen. Betrachtete Vortriebsart ist das Schildvortriebsprinzip mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust (Hydroschild-Prinzip).

In **Kapitel 6** wird die Tunnellogistik behandelt. Dabei wird nach einer theoretischen Abhandlung möglicher Verfahren, auf den speziell erforderlichen Logistik-Mix eingegangen. Ziel ist die Gewährleistung einer hohen Vortriebsleistung und Verfügbarkeit der gesamten Vortriebsanlage.

In **Kapitel 7** wird eine Gesamtbetrachtung vorgenommen. Als Vergleichsvortrieb dient der maschinelle Tunnelvortrieb mit Tübbingbauweise. Es werden Aspekte der Wirtschaftlichkeit, Ausführungsqualität und Ausführungssicherheit beleuchtet.

**Kapitel 8** soll nach einer Zusammenfassung einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen maschineller Tunnelvortriebe geben.

Einige der zur Erstellung der Arbeit vorgenommenen Untersuchungen und Versuche werden im **Anhang** beschrieben.

Dazu zählen die in **Kapitel 9** dargestellten weiteren Betonvarianten, welche sich zum Teil im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befinden und in den nächsten Jahren einsetzbar werden.

**Kapitel 10** beschäftigt sich mit dem Untermischen von flüssigen Beschleunigern in den Betonierstrom (inline), welches an beliebiger Stelle der Pumpbetonleitung erfolgen soll. Dabei werden das Injektions-, Statikmischer und Aktivmischerverfahren betrachtet. Unterschiedliche Mischertypen und -varianten wurden zu diesem Zweck entwickelt und in einem Versuchsprogramm untersucht.

### **1.2 Zielsetzung und -gruppen**

Ziel dieser Arbeit ist es, ein neues Verfahren zur Herstellung unendlich langer unterirdischer Bauwerke aus Ortbeton vorzustellen. Aufbauend auf den Problemen bereits etablierter Verfahren sowie neuester Entwicklungen in der Betontechnologie und Verfahrenstechnik, soll der Einsatzbereich von Ortbeton bei maschinellen Tunnelvortrieben erweitert und darüber hinaus ein Anreiz für den Einsatz in alternativen Anwendungsfeldern gegeben werden.

Zielgruppe dieser wissenschaftlichen Arbeit sind alle Techniker und Ingenieure, die einer zukunftsorientierten Weiterentwicklung hoch mechanisierter Vortriebe offen ge-

genüberstehen. Nicht zuletzt diejenigen, welche in vergangenen Projekten negative Erfahrungen mit den derzeit angewandten Verfahren gemacht haben.

## 2 Stand der Technik

Stahlbeton ist der Baustoff, aus dem Bauwerke mit verschiedenster Nutzung und Gestaltung erstellt werden. Diese Einsatzvielfalt wird durch die Kombination von Bewehrungsstahl und Beton erreicht. Der Beton übernimmt dabei den Großteil der im Bauwerk auftretenden Druckbeanspruchungen, der Bewehrungsstahl im Gegenzug die Zugbeanspruchungen. Die nahezu identischen Wärmeausdehnungskoeffizienten ermöglichen den Einsatz bei wechselnden Temperaturen. Der Beton umhüllt den Bewehrungsstahl und schützt diesen durch seinen basischen Charakter vor Korrosion. Beim Betoniervorgang ist daher darauf zu achten, daß es zu keinen Lufteinschlüssen kommt. Dies wird durch nachträgliches Verdichten oder durch die Verwendung von selbstverdichtenden Betonen gewährleistet.

Bewehrungsgehalt sowie Bewehrungsanordnung sind entsprechend der Belastung im Bau- und Gebrauchszustand des Betonbauwerks sowie der verwendeten Betonrezeptur zu wählen. Zusätzlich sind die Anforderungen an das Betonbauwerk hinsichtlich der Rißweitenbeschränkung bzw. Rißvermeidung zu berücksichtigen.

Im Tunnelbau wird Stahlbeton als

- Spritzbeton
- Innenschalenbeton
- Fertigteilbeton
- Extrudierbeton

eingesetzt.

**Spritzbetone** werden in der Regel nur zur Herstellung der primären Tunnelsicherung von konventionell, nach der Spritzbetonbauweise hergestellten Tunneln verwendet, welche i. d. R. nicht wasserdicht hergestellt werden. Sie fungieren fast ausschließlich als temporäre Sicherung für den Bauzustand. Die wasserdichte, permanente Stahlbetonschale wird erst nach dem Vortrieb, meist nach Beendigung der Vortriebsarbeiten, im Ortbetonverfahren erstellt. Dies geschieht abschnittsweise mit Schalwagen (Schallängen von ca. 10 m) nachdem vorab die Matten- und Stabbewehrung für den zu betonierenden Abschnitt verlegt wurde. Oft wird noch eine Dichtungsfolie im Übergang zwischen Primär- und Sekundärschale angefügt, welche als Regenschirmabdichtung oder als dauerhafte Druckdichtung einen zusätzlichen Schutz der zweiten (permanente) Schale bildet.

Da in dieser Arbeit ein Verfahren zur Herstellung einschaliger Tunnel aus Ortbeton als alleiniger Sicherung, welche mit Hilfe des Schildvortriebsprinzipes hergestellt werden, beschrieben wird, gehe ich im folgenden nicht weiter auf die Spritzbetone ein, sondern beschränke mich auf maschinelle Vortriebe aus Fertigteil- und Extrudierbeton.

## 2.1 Fertigteilbeton (Betontübbinge)

### 2.1.1 Allgemeines

Bei Betontübbingen handelt es sich um im Fertigteilwerk vorgefertigte Betonelemente, welche aneinandergesetzt einen geschlossenen Betonring ergeben.

Dieser nimmt die Lasten aus dem Grundwasser und der Geologie auf und verhindert, daß Grundwasser in den Tunnel gelangt. Dazu sind diese aus wasserdichtem Beton hergestellt und an den Kontaktstellen Dichtungen mit in den Beton integriert.



Abb.2-1: Tübbingsegmente: Lagerzustand, Einbauzustand

### 2.1.2 Herstellung

Die Herstellung der Tübbingsegmente erfolgt in speziellen Fertigteilwerken. Dort werden zunächst speziell erstellte Bewehrungskörbe in extra dafür angefertigte Fertigteil Schalungen positioniert und fixiert. Zuvor ist die Schalung auf ihre Maßhaltigkeit hin zu überprüfen.



Abb.2-2: Tübbing Fertigungsstraße

Sehr wichtig bei der Herstellung von Stahlbetontübbingungen ist die Maßgenauigkeit und Maßhaltigkeit, da dies für die Wasserdichtigkeit und Dauerhaftigkeit des Tunnelbauwerks ausschlaggebend ist.

Um dies zu gewährleisten sind folgende Toleranzmaße einzuhalten (DAUB, Tunnel 3/2001):

- Tübbingbreite:  $\pm 0,6 \text{ mm}$
- Tübbingdicke:  $\pm 3,0 \text{ mm}$
- Tübbingbogenlänge:  $\pm 0,8 \text{ mm}$
- Längsfugenebenheit:  $\pm 0,5 \text{ mm}$
- Ringfugenebenheit:  $\pm 0,5 \text{ mm}$
- Verschränkungswinkel in Längsfugen:  $\pm 0,04^\circ$
- Winkel der Längsfugenkonizität:  $\pm 0,01^\circ$

Die Bewehrung wird mittels Stahlfaser- oder Matten- bzw. Stabbewehrung, welche als Bewehrungskörbe vorgefertigt werden, realisiert.

Vor dem Fixieren der Bewehrungskörbe wird die Innenfläche der Schalungen mit Trennmittel versehen sowie Befestigungsmittel wie Bewehrungsdübel und Abstandshalter integriert.



Abb.2-3: Vermessung der Tübbingschalung, Bewehrungskorb und Einbauten

Nach einer geodätischen Überprüfung kommt die Schalung in die Betonierkammer. Dort wird über eine Öffnung Frischbeton in die Schalung gefüllt und gerüttelt. Die nichtgeschalte Fläche im Einfüllbereich wird manuell geglättet.



*Abb.2-4: Betoniervorgang, Einfahren der Schalung in die Klimakammer*

Anschließend kommt die frisch verfüllte Schalung in eine separate Klimakammer, in der eine Raumtemperatur von 35 °C bei 90 % Luftfeuchtigkeit herrscht. Dies sind optimale Bedingungen für ein spannungsarmes Abbinden des Betons. Nach dem Erreichen einer Ausschalfestigkeit von etwa 5 N/mm<sup>2</sup> wird das Fertigteil mittels einer Hebevorrichtung (Vakuum-Saugplatte) aus der Schalung gehoben und nach Zwischenlagerung von ca. 14 Tagen auf eine separate Vorrichtung gesetzt. Dort erfolgt die Endvermessung. Treten Maßungenauigkeiten oder Fehlstellen auf, erfolgt hier die Nachbesserung mit Reparaturmörtel. Nach der Freigabe werden die Dichtungsprofile angebracht. Dazu wird zunächst ein spezieller Kleber auf die Kontaktstellen aufgebracht und anschließend die vorgefertigte Dichtung mit einem speziellen Gerät angedrückt. Die Druckkraft wird solange aufrechterhalten, bis die Dichtung vollständig fixiert ist.



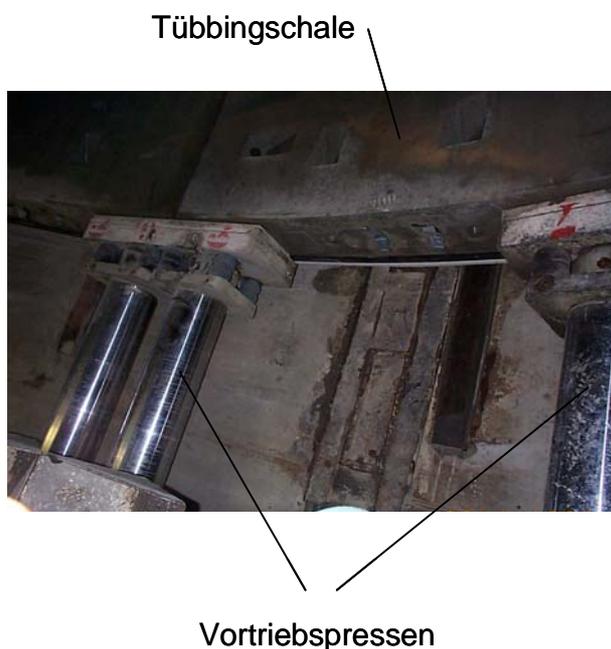
*Abb.2-5: Aufkleben der Tübbingfugendichtung*

In einem weiteren Fertigungsschritt werden Ausgleichsmaterialien wie Kaubit- oder Sperrholzstreifen auf die Stirnflächen der Fertigteile geklebt, welche im eingebauten Zustand die Unebenheiten aus der Fertigung unter Belastung durch die Vortriebspressen ausgleichen sollen. Damit soll vermieden werden, daß es zu einer Punktbelastung an den Kontaktstellen zweier benachbarter Tübbingringe kommt und dadurch Spannungsspitzen und Risse auftreten.

Nach der Endkontrolle erfolgt der Transport zum Zwischenlager, welches bei der Fertigungsstätte oder auf der Baustelle eingerichtet ist.

### **2.1.3 Mögliche Schadensbilder bei einschaligem Tunnelausbau in Tübbingbauweise**

Die Tübbingelemente, welche zu einem geschlossenen Ring kombiniert werden, stellen die fertige (permanente) Tunnelauskleidung dar. Sie tragen die Belastungen aus dem Baugrund (Hydrologie und Geologie) im Gebrauchszustand sowie die Belastungen aus dem Vortrieb im Bauzustand. Die zum Auffahren des Tunnels im Schildvortrieb erforderlichen Vortriebskräfte (Vortriebspressenkräfte) werden dabei direkt in die frisch versetzte Tübbingschale eingeleitet.



*Abb.2-6: Einleitung der Vortriebspressenkräfte in die Tübbingschale*

Die zum Vortrieb der Schildvortriebsmaschine erforderlichen Kräfte (Pressenkräfte) setzen sich beim hier beispielhaft aufgeführten Hydroschildprinzip aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Schneidradanpresskraft (evtl. zusätzlich aktiver Zentrumsschneider)
- Druck in der Arbeitskammer zu Stabilisierung der Ortsbrust
- Widerstand der Schildschneide
- Mantelreibung des Schildes im Erdreich
- Rückhaltekraft der Schildschwanzdichtung (Reibung auf der Tübbingringaußenseite bzw. Lösekraft beim Anfahren nach längeren Vortriebsunterbrechungen)

Diese werden mit Hilfe der gleichmäßig am Umfang verteilten Vortriebspresen und deren Pressenschuhen direkt in den zuletzt versetzten Tübbingring eingeleitet. Von dort aus erfolgt die Kraftverteilung auf die weiteren Ringe.

*Beispiel: Bei einem Hydroschildvortrieb in Berlin, der Verlängerung der U-Bahnlinie U5 vom Reichstag zum Pariser-Platz kamen 28 Vortriebspresen mit einer Gesamt-vortriebspresenkraft von 46.000 kN zu Einsatz. Der U-Bahntunnel hat einen lichten Innendurchmesser von 6.000 mm und eine Tübbingschalendicke von 350 mm.*

Bei der Krafteinleitung und Weiterleitung (Verteilung) in den nachfolgenden Ring muß sichergestellt sein, daß die Kontaktflächen im Kraftflußbereich planar und frei von Unebenheiten sind. Dies wird dadurch gewährleistet, daß die Fertigungstoleranzen eingehalten und weitere unvermeidbare Unebenheiten durch Zwischenlagen aus Kaubit oder Weichholz ausgeglichen werden.



*Abb.2-7: Kaubitstreifen in der Ringfuge*

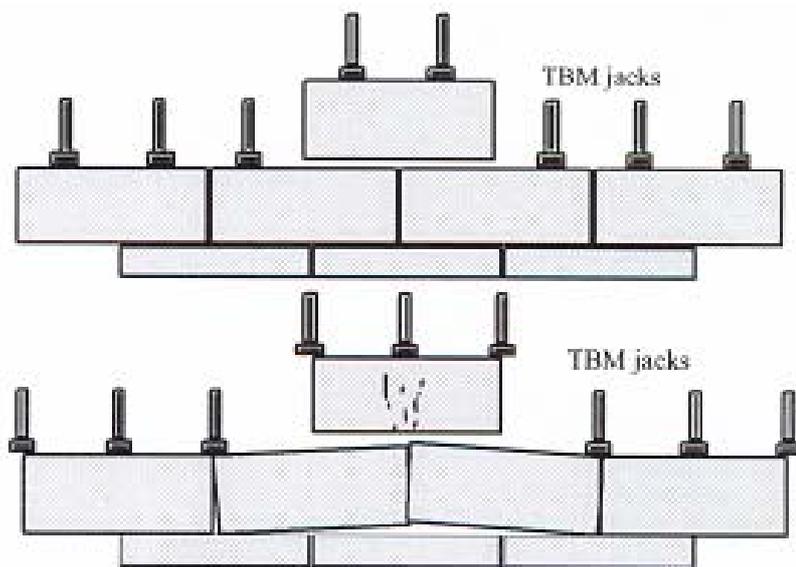
Wird dies nicht eingehalten, so kommt es zu lokalen, punktförmigen Kraftein- und -weiterleitung der Vortriebskräfte und damit zu Spannungsspitzen, welche die Belastbarkeit der Fertigbetonschale überschreiten können.

Weitere Schadensursachen sind Mängel bei der Herstellung, wie z.B. unzureichende Dimensionierung sowie Bewehrungsauslegung und -anordnung.

Nicht zu vernachlässigen sind Beschädigungen aufgrund mangelnder Bettung der Tübbingröhre im angrenzenden Erdreich. Der zum Auffahren des Tunnels erforderli-

che Ringspalt (Spalt zwischen Tübbingringaußenseite und Geologie in dem der Schildschwanzmantel verfährt) wird im Anschluß an den Schildschwanz mit Verpreßmörtel verfüllt. Erfolgt diese Hohlraumverfüllung unvollständig oder mit dem falschen Verpreßmörtel, der nicht auf die angrenzende geologische und hydrologische Situation abgestimmt ist, so kann es zu einer Radialverschiebung einzelner Tübbingringe und dem Auftreten von Folgeschäden kommen.

Vor allem beim Einbau der Tübbinge im Schutze des Schildschwanzmantels am hinteren Ende des Schildes ist darauf zu achten, daß dieser sauber, exakt und vorschriftsmäßig geschieht. Wird ein Tübbingstein nicht korrekt positioniert, so ist dies Auslöser für eine Serie von Beschädigungen, Undichtigkeiten, Rissen und Abplatzungen im Umfeld von diesem.



*Abb.2-8: Mängel beim Setzen der Tübbingsegmente (Bloom, C.B.M., 2001)*

Auftretende Schäden haben oft nicht nur eine Ursache, sondern stellen eine Verkettung möglicher Ursachen dar. Die Ursachen im Nachhinein zu ermitteln ist oft sehr aufwendig und bedarf einer Vielzahl von Informationen, die während des Vortriebes gesammelt werden müßten. Oft reichen diese Informationen nicht aus um eine eindeutige Schadensursache zu ermitteln.

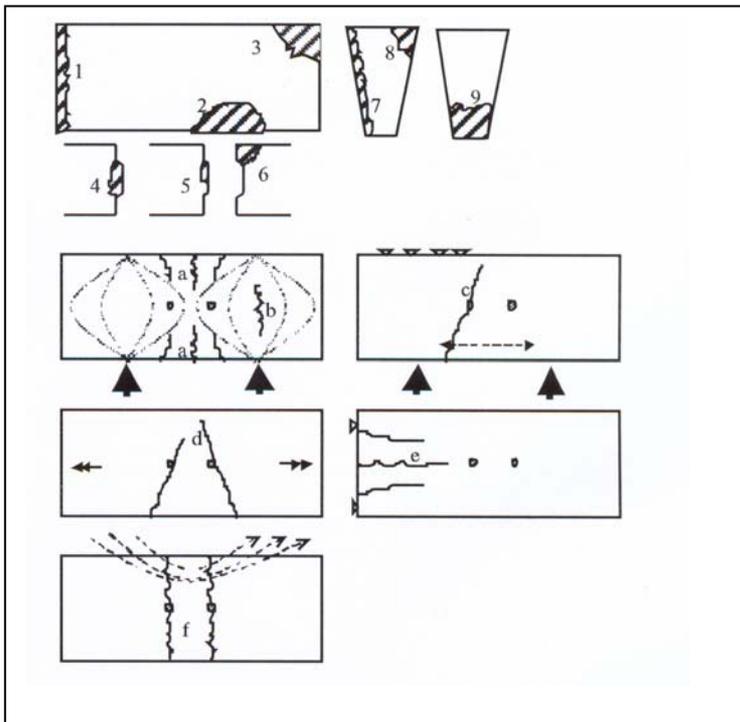


Abb.2-9: Schadensbilder (Bloom, C.B.M., 2001)

Die hier gezeigten Schadensbilder haben ihre Ursache hauptsächlich im unpräzisen Einbau der einzelnen Segmente bzw. der Nichteinhaltung von Fertigungstoleranzen bei der Herstellung.

Bei den mit den Zahlen 1-9 gekennzeichneten Beschädigungen handelt es sich um Abplatzungen von Ecken und Kanten aufgrund der Überschreitung von zulässigen Scherspannungen (unbewehrte Randbereiche).

Die mit Buchstaben a-f gekennzeichneten Schadensbilder stellen Risse dar, die sich aufgrund der Überschreitung der zulässigen Zugbeanspruchung ergeben. Gründe dafür liegen neben den bereits erwähnten, in der mangelnden Bettung des kompletten Ringes, des unzureichenden Bewehrungsgehaltes, der ungünstigen Bewehrungsanordnung, zu geringer Schalendicke oder mangelnder Betonqualität.

Die Behebung der Schäden kann zu längeren Stillständen und aufwendigen Sanierungsarbeiten führen.

Die folgende Diskussion soll die Vor- und Nachteile der Tübbingbauweise noch einmal zusammenfassen.

#### 2.1.4 Diskussion

##### Vorteile der Tübbingbauweise

- hohe Betonqualität aufgrund optimaler Bedingungen im Fertigteilwerk
- ausreichende Betonfestigkeit aufgrund frei wählbarer Zeitdifferenz von der Herstellung bis zum Einbau im Tunnel.

### Nachteile der Tübbingbauweise

- die Stoßstellen zwischen den Tübbingsegmenten (Fugen) sind potentielle Undichtigkeitsstellen.

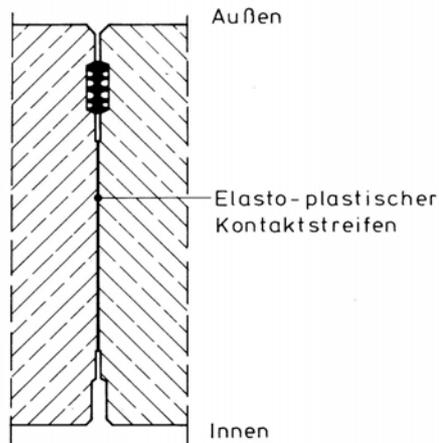


Abb.2-10: Fugendichtung (Ringfuge) (Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L., 1994)

- enge Fertigungstoleranzen
- erhöhter Bewehrungsaufwand
- exaktes Versetzen der Tübbingsegmente beim Ringbau erforderlich, da es sonst zu Problemen beim Einfügen des Schlußsteins bzw. undefinierten punktuellen Spannungsspitzen bei den Folgeringen kommt.
- Fugendichtungen sind derart im Beton zu verankern, daß diese sich vor allem beim Einschieben des Schlußsteins nicht lösen und zu Undichtigkeiten bzw. Zwängungen führen, welche die maximalen Schubspannungen des Betons überschreiten und Abplatzungen hervorbringen können. Problematisch sind dabei die Abplatzungen, welche von der Tunnelinnenseite aus nicht mehr erkannt werden können und im Hinblick auf Dauerhaftigkeit und Dichtigkeiten des fertigen Tunnelbauwerkes ein Risiko darstellen können.



Abb.2-11: Geologieseitige Abplatzungen an der Fugendichtung nach dem zwangsbeanspruchten Einbau

- an den Koppelstellen der einzelnen Tübbingringe können nur sehr geringe Querkraften übertragen werden. Kommt es nun zu einer Querkraftbelastung an den Radialfugen aufgrund von zu hohen Drücken bei der Ringspaltverpressung oder Kraftübertragung aus dem Schildschwanz (komprimierte Schildschwanzdichtung) bei starken Steuerbewegungen der Schildvortriebsmaschinen, kann es dort zu Abplatzungen, Undichtigkeiten und Querschnittssprüngen in der Betonschale kommen.

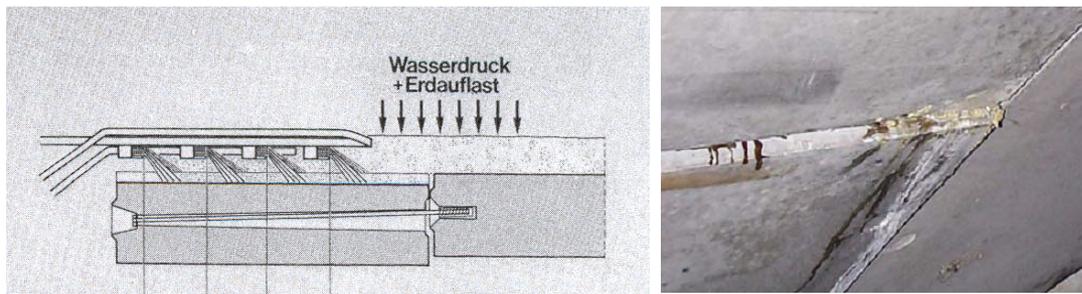


Abb.2-12: Versatz in der Ringfuge

- die Kräfte aus dem Vortrieb werden über Vortriebspresen direkt in die Tübbingsegmente eingeleitet. Diese extremen Belastungen sind nur im Bauzustand vorhanden. Dies erfordert jedoch einen höheren Bewehrungsgehalt, als aufgrund der Belastungen aus der Geologie und Hydrologie im Gebrauchszustand notwendig wäre.
- aufgrund des Schwindens des Betons kann keine absolute Ebenhaftigkeit an den Berührungsstellen garantiert werden.

## 2.2 Extrudierbeton

### 2.2.1 Allgemeines

Das Extrudierverfahren wurde bisher ausschließlich bei Messerschilden eingesetzt, weil dabei keine Rückstellkräfte entstehen. Dabei wird der flüssige Beton unmittelbar in den Ringraum hinter der Vortriebsmaschine gepumpt. Der Ringraum ist nach außen durch das angrenzende Gebirge, nach innen durch eine Gleit- oder Umschaltung und nach vorne durch eine Stirnschalung begrenzt. Die Verteilung des Betons erfolgt über Rohrleitungen, welche abwechselnd über eine angeschlossene Betonpumpe mit Beton versorgt werden. Diese Leitungen sind an der Stirnschalung bzw. der Gleitschalung angeordnet.

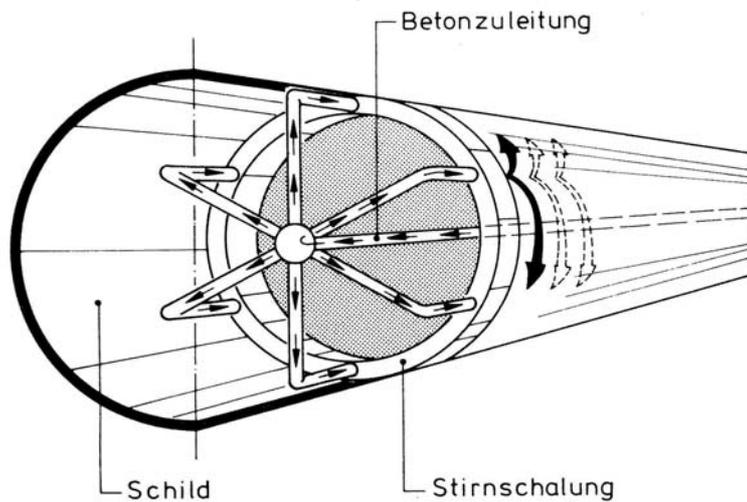


Abb.2-13: Betonzuführung beim Extrudierverfahren (Barbendererde, S., 1985)

Der durch den Vortrieb des Messerschildes entstehende Hohlraum wird kontinuierlich mit Frischbeton gefüllt. Dafür muß sichergestellt sein, daß der Beton einen zuvor berechneten Druck auf den gesamten Umfang des Tunnelausbaus, ohne Abminderung, übertragen kann. Dazu ist er jedoch nur im flüssigen Zustand in der Lage.

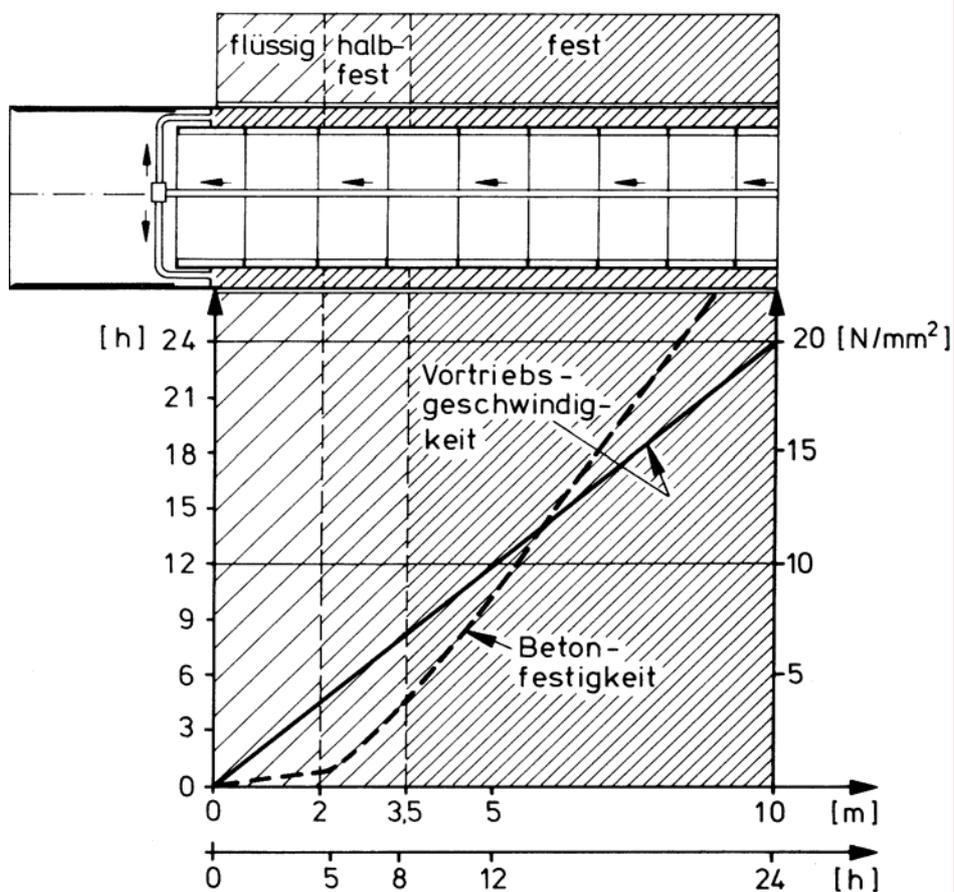


Abb.2-14: Entwicklung der Betonfestigkeit (Barbendererde, S., 1985)

Im halbfesten Zustand reichen die Pumpenkräfte, wegen des gewachsenen Scherwiderstandes nicht aus, um die Druckkräfte auf den gesamten Umfang des Tunnelausbaus zu übertragen. Aus diesem Grund muß der Beton möglichst lange flüssig und fließfähig gehalten werden. Deshalb werden keine gebrochenen Zuschläge verwendet und der Mörtelanteil verhältnismäßig hoch gewählt. Zusätzlich werden Elektrofilterasche als Ergänzung zum Feinstoffgehalt sowie chemische Zusätze, welche das Fließvermögen erhöhen und den Abbindeprozeß verzögern, der Betonrezeptur zugegeben.

Die Gesamtlänge der Schalung ist abhängig von der Festigkeitsentwicklung des Betons und der projektierten maximalen Vortriebsleistung.

Entscheidend für dieses Verfahren ist die gleichmäßige Druckübertragung und vollständige Stützung des angrenzenden Gebirges in der Betonierzone hinter dem Schild. Dazu muß der Beton ein ausreichendes Fließvermögen besitzen. Dies kann problematisch werden, wenn die angrenzende Geologie aus sehr durchlässigen, rolligen Boden besteht. Der Betonierdruck übersteigt dann sehr schnell den Porenwasserdruck des angrenzenden Gebirges, was zu Filtratwasserabgabe führt. Dieser Wasserverlust bewirkt kurzfristig eine Reduzierung des Fließvermögens des Extrudierbetons. Aus diesem Grund ist bei der Anwendung dieses Verfahrens besonders auf einen druckstabilen Einbau des Betons zu achten und dieser in Versuchen an Modell-Geologien nachzuweisen.

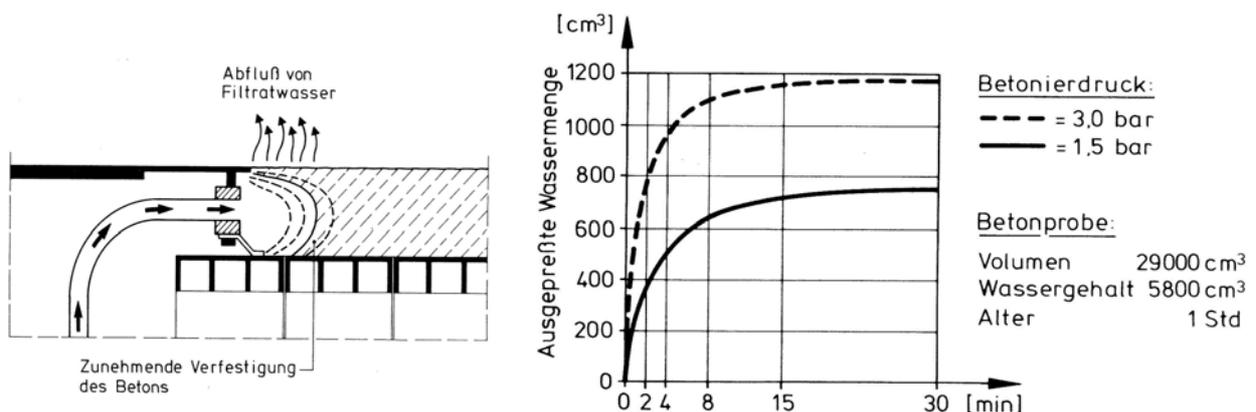


Abb.2-15: Filtratwasserabgabe des Betons in den Boden (Barbendererde, S., 1985)

Bislang wurden zwei maschinelle Vortriebsverfahren entwickelt, welche nach dem Extrudierprinzip arbeiten.

- Extrudierverfahren mit Gleitschalung
- Extrudierverfahren mit Umsetzschalung

## 2.2.2 Extrudierverfahren mit Gleitschalung

Bei diesem Verfahren wird hinter der Vortriebsmaschine eine Gleitschalung mit flüssigkeitsgefüllten Gummimembranen mitgezogen. Dadurch werden die Steuerbewegungen der Vortriebsmaschine erleichtert.

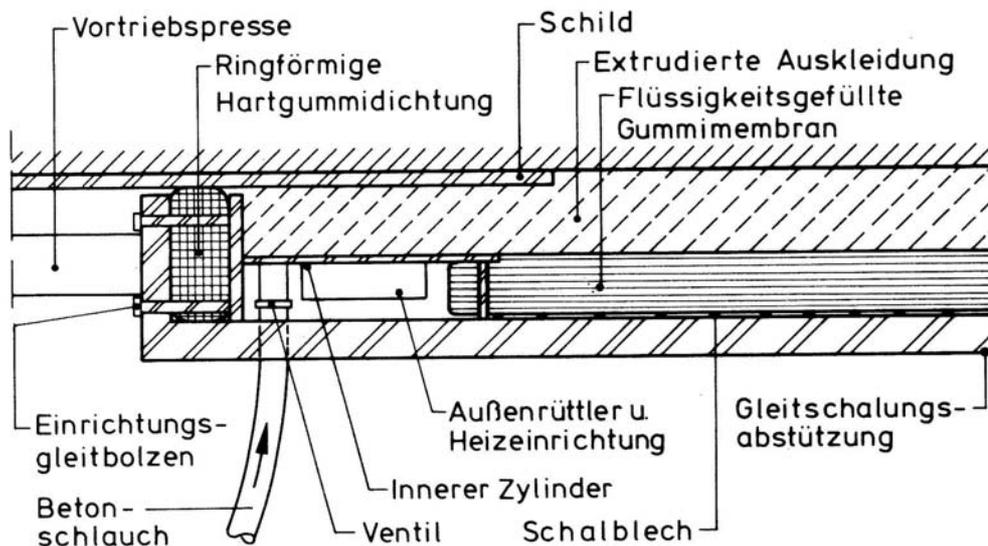
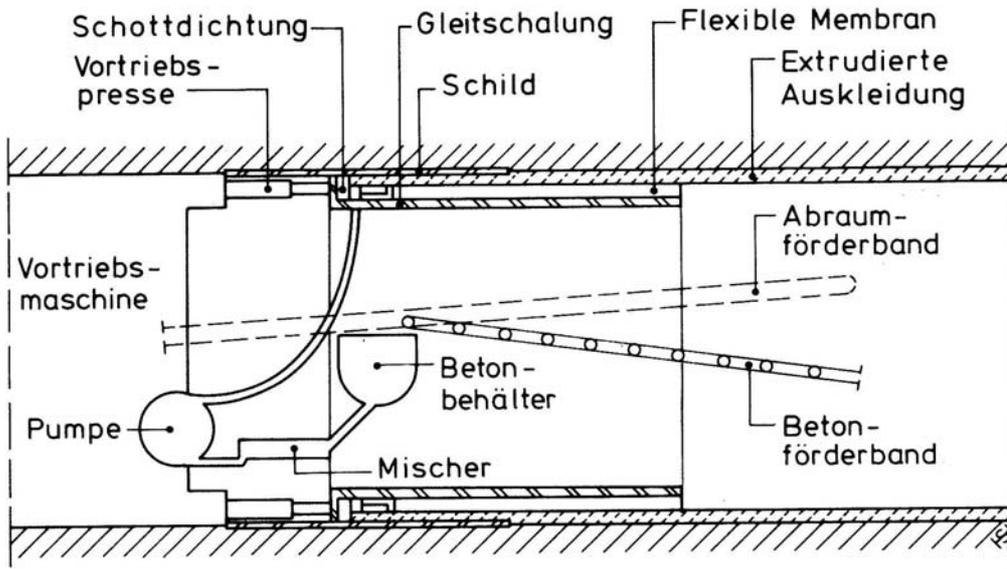


Abb.2-16: Konzept eines Systems mit Gleitschalung für extrudierte Tunnelauskleidung (Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L., 1994)

Der flüssige Beton wird dabei radial über die Gleitschalung in den durch den Vortrieb der Maschine entstehenden Ringraum gepumpt. In axialer Richtung erfolgt die Abdichtung über eine ringförmige Hartgummidichtung.

Zurückzuführen ist dieses System auf Herrn Lucke, der sich 1975 damit beschäftigte. Dieses System kam nie zum Einsatz. Es bildete jedoch die Grundlage für das von der Firma Hochtief entwickelte Extrudierverfahren mit Umsetzschalung.

### 2.2.3 Extrudierverfahren mit Umsetzschalung

Statt der Gleitschalung wird hier eine Umsetzschalung verwendet. Diese Umsetzschalung besteht aus mehreren Stahlsegmenten, die aneinandergesetzt einen geschlossenen Ring ergeben. Diese werden mit einer speziellen Einrichtung im Schutze des Schildschwanzes aufgebaut und stützen den Beton während des Abbindeprozesses. Nachdem die Betonschale eine ausreichende Festigkeit erlangt hat, werden die Schalungselemente wieder demontiert und stehen zur Wiedermontage im Schildschwanzbereich zur Verfügung.

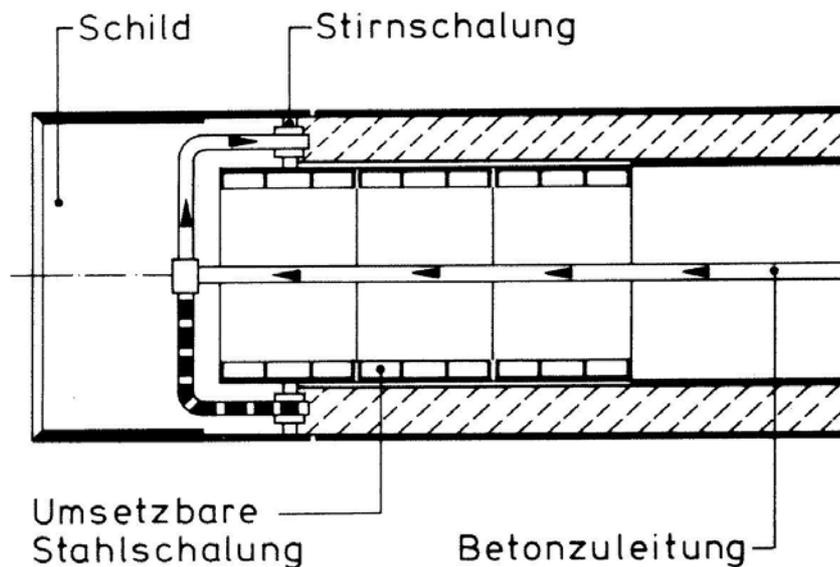


Abb.2-17: Schematische Darstellung des Extrudierverfahrens (Barbendererde, S.,1985)

Die Betonzugabe des flüssigen Betons erfolgt hier axial über entsprechende Öffnungen in der Stirnschalung. Die Stirnschalung ist dabei axial elastisch gelagert, mit jeweils einer inneren und äußeren Umfangsdichtung. Die axiale elastische Lagerung wird über mehrere am Umfang verteilte Hydraulikzylinder, welche über ein geschlossenes und vorgespanntes Hydrauliksystem verfügen, realisiert. Über das Gasvolumen in den Hydraulikspeichern können die Druckschwankungen, die beim Betonieren entstehen, ausgeglichen werden. Die Drücke können über entsprechende Steuerorgane voreingestellt werden.

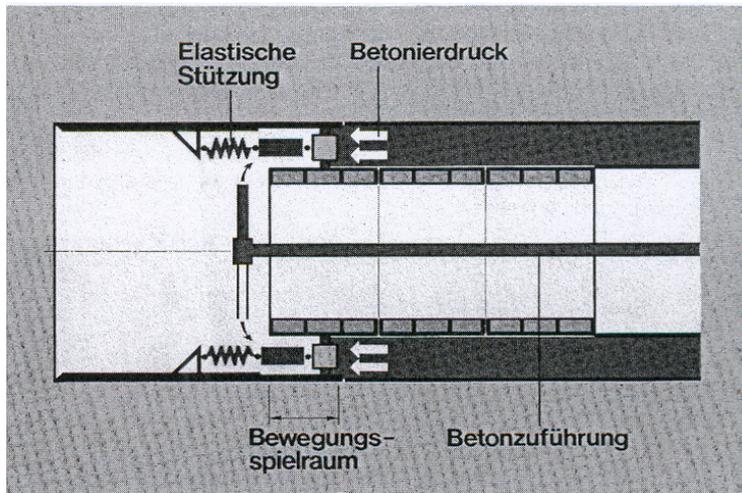


Abb.2-18: Elastische Stützung der Stirnschalung (Barbendererde, S., 1985)

Zum ersten Mal fand dieses System 1978/79 in Hamburg/Harburg beim Bau eines Abwassersammlers Anwendung.

#### 2.2.4 Diskussion

##### *Vorteile des Extrudierverfahrens*

- Reduktion von Setzungen aufgrund von der Druckstabilisierung des Bodens während des Vortriebs bei gewissen Geologien
- Sicherungseinbau parallel zum Vortrieb (kontinuierlicher Vortrieb)

##### *Nachteile des Extrudierverfahrens*

- Die Bewehrung kann nur mittels Stahlfasern sichergestellt werden:  
Das Einbringen einer Stabstahl- oder Stahlmattenbewehrung ist mit diesen Verfahren nicht möglich. Dies stellt sich vor allem bei den Betonierfugen als kritisch heraus, da die Stahlfaserbewehrung an diesen glatten Kontaktflächen (Aufgrund der glatten Stirnschalungsflächen) nicht zur Kraftübertragung und damit zur Abdichtung der Schale gegen Grundwasser herangezogen werden kann. Dies führte zu einer Vielzahl undefinierter Leckagestellen, durch die Grundwasser in den Tunnel gelangen kann. Die Kriterien für eine wasserdichte Schale werden damit nicht erfüllt.
- Bei der Verwendung von Stahlfaserbewehrung kann ausschließlich mit Doppelkolbenpumpen gearbeitet werden. Da diese jedoch diskontinuierlich arbeiten, ist der Druck im Betoniererring nicht bzw. nur durch erheblichen Systemregelaufwand konstant zu halten.
- Der Stahlfasergehalt ist derzeit auf 50% ( $60 \text{ kg/m}^3$ ) beschränkt und somit zu gering für den Gebrauchszustand.

- Mögliche Undichtigkeiten an der passiven Lippendichtung am Umfang der Stirnschalung können zu Druckverlust und damit zu Druckschwankungen führen.
- Bei diesem System kann immer nur eine Leitung mit Beton versorgt werden, was bei größeren Schilddurchmessern zwangsläufig zu einer ungleichmäßigen Druckverteilung in dem Betonring führt.
- Hoher Aufwand beim Anfahren nach Vortriebsunterbrechungen, da das System nur funktioniert wenn der Beton sich im fließfähigen Zustand befindet und der Beton nach einer gewissen Zeit, im Zuge des Abbindeprozesses, seine Konsistenz ändert. Nach Überschreiten des fließfähigen Zeitfensters ist so lange zu warten, bis der Beton eine ausreichende Festigkeit besitzt, so daß der Ring in sich stabil steht. Anschließend muß die Stirnschalung entfernt und der Beton an der Stirnseite aufgerauht werden. Dadurch soll ein ausreichender Verbund zwischen den Betonierabschnitten hergestellt werden.
- Abdichtungsprobleme an der Arbeitsfuge machen nach längeren Stillständen nachträgliche Injektionsmaßnahmen erforderlich. Diese können jedoch nur mit geringen Injektionsdrücken durchgeführt werden, da ein Widerlager fehlt.

Die sich aus der Diskussion der hier beschriebenen bereits mehrmals eingesetzten Verfahren ergebenden nachteiligen Verfahrenskriterien, bilden die Grundlage für den im folgenden dargestellten Anforderungskatalog für das neue Maschinenkonzept.

### **3 Anforderungen an das neue Verfahren (Pflichtenheft)**

Mit dem neuen Verfahren soll eine unendlich lange Tunnelschale aus Ortbeton hergestellt werden, welche den Belastungen aus der Geologie und Hydrologie standhält. Die Schale soll abschnittsweise (ca. 2,0 m Abschnittslänge) herstellbar und mit allen gängigen Schildvortriebsverfahren kombinierbar sein.

Die Betonrezeptur ist derart auszulegen, daß ein Betonier- und Vortriebszyklus von 2 Stunden, bei einer Betonierabschnittslänge von 2,0 m erreicht werden kann. Dabei ist beim Abbindeverlauf auf ein schnelles Erreichen einer Mindestfestigkeit von  $1,0 \text{ N/mm}^2$  zu achten, welche ein stirnseitiges Ausschalen des frisch betonierten Betonrings erlaubt. Weiterhin soll der Beton nach dem Anmachen noch für ausreichende Zeit verarbeitbar (unikonsistent) sein, so daß ein problemloses Verfüllen der Betonierkammer (Betoniererring) sowie die Reinigung der mit Beton beaufschlagten Leitungen möglich ist.

Die Bewehrung des Stahlbetons soll mit Hilfe von Stab- bzw. Mattenbewehrung realisiert werden können. Die zu Bewehrungskörben verarbeitete Bewehrung soll aneinander gefügt einen geschlossenen Bewehrungsring ergeben. Dabei ist auf ausreichende Übergreifungsstoßlänge in axialer und tangentialer Richtung zu achten. Das Betonieren im Schutze des Schildschwanzes soll frisch in frisch erfolgen. Bei längeren Stillständen ist die Möglichkeit des Einbringens einer Fugendichtung vorzusehen. Die Vortriebskräfte sollen dabei, über eine Umsetzschalung aus Stahl in die Bereiche der Betonschale umgeleitet werden, in denen der Beton bereits eine ausreichende Festigkeit besitzt. Diese Schalung soll die innere Kontur der fertigen Betonschale bilden. Sie ist derart zu gestalten, daß während des Vortriebes eine Raumkurve aus Beton erzeugt werden kann. Nachdem der Beton eine ausreichende Festigkeit für die Lasten des Gebrauchszustandes erreicht hat, muß diese Stahlschalung mit einfachen Mitteln demontiert und zum Wiedereinsatz in den Schild transportiert werden können.

Bei der Verarbeitung des Betons soll der neueste Stand der Misch- und Fördertechnik berücksichtigt werden. Der Betonierprozeß soll sensorüberwacht stattfinden, so daß die Betonfachkraft nur bei Unregelmäßigkeiten eingreifen muß. Die fertige Betonschale soll wasserdicht, frei von Rissen und Querschnittssprüngen sein.

Aus diesen Hauptanforderungen ergeben sich Anforderungskriterien, welche nach folgenden Anforderungsgruppen gegliedert sind:

- betontechnologische Anforderungen

- bewehrungstechnische Anforderungen
- verfahrenstechnische Anforderungen
- betriebswirtschaftliche Anforderungen
- generelle Anforderungen

<b>Anforderung</b>	<b>Kapitel</b>
<b>Anforderungen hinsichtlich der Betontechnologie</b>	<b>4.2</b>
pumpfähige Konsistenz	4.2.3
mind. 20 min verarbeitbar	4.2.2
einaxiale Druckfestigkeit größer 1,0 N/mm <sup>2</sup> nach einer Stunde	4.2.2
selbstverdichtend	4.2.2
niedrige Abbinde­temperatur	4.2.5
geringes Schwindmaß	4.2.4
Anforderungen an normalen Konstruktionsbeton	4
<b>Bewehrungstechnische Anforderungen</b>	<b>4.3</b>
<b>Verfahrenstechnische Anforderungen</b>	<b>4.7</b>
Betonieren frisch in frisch	4.7.2
Arbeitsfugendichtung bei längeren Stillständen	7.2
automatisierte Betonanmischung und Verarbeitung	4.7.1
automatisches Reinigen der Betonierleitungen	4.7.3
Stabilisierung der im Abbinden begriffenen frischen Betonschale (Schalung)	4.4
bei allen Schildvortriebssystemen einsetzbar	5.2
<b>Betriebswirtschaftliche Anforderungen</b>	<b>7</b>
kostengünstige Alternative	7.1
Reduzierung des Risikos auf Nachbesserungsarbeiten (hohe Qualität der Schale)	7.3
Brandschutz	7.2
Elektrische Durchverbindung	4.3
<b>Generelle Anforderungen</b>	
in-situ hergestellte Ortbetonschale	4.7
Krafteinleitung der Reaktionskräfte aus dem Vortrieb	4.5
bei beliebigen Geologien einsetzbar	5.1
glatte Innenschale homogener Farbgebung	5.4
Setzungsminimierung	5.3.4
Möglichkeit der Nachinjektion bei Undichtigkeiten	7.2
Personaleinsatz, Verfügbarkeit	7.1
Messdatenerfassung	4.7.4

Abb.3-1: Generelle Anforderungen an das neue Verfahren mit Kapitelhinweis

### 3.1 Anforderungen hinsichtlich der Betontechnologie

Bei dem hier geforderten Beton handelt es sich um einen Spezialbeton der im Folgenden als gesteuerter Schnellbeton bezeichnet wird. Er soll ein exakt einstellbares-chemisches- und physikalische Reaktionsverhalten zeigen. Toleranzschwankungen im Abbindeverhalten, wie sie bei den derzeit baustellenüblichen Betonen auftreten, können bei dem hier vorgestellten Verfahren nicht akzeptiert werden. Die Hersteller

der Betonausgangsstoffe sind deshalb angehalten, ihre Fertigungsprozesse, vor allem die Mahl- und Mischprozesse dahingehend zu optimieren, daß eine gleichbleibend homogene Qualität garantiert werden kann.

Der gesteuerte Schnellbeton soll folgende Eigenschaften besitzen:

▪ **pumpfähige Konsistenz:**

Der Beton soll mit Hilfe einer Schlauchquetsch- oder Doppelkolbenpumpe durch mindestens 50 m Betonleitung, mit geringen Pumpendrücken ( $< 20$  bar), gefördert werden können. Dabei soll es zu keinem Ausbluten bzw. keiner Stopferbildung kommen.

▪ **mindestens 20 Minuten verarbeitbar:**

Nach Aktivierung der Abbindereaktion durch Wasser- bzw. Zusatzmittelzugabe soll der Beton noch mindestens 20 Minuten verarbeitbar sein, d. h. eine gleichbleibende Konsistenz besitzen. Dadurch soll gewährleistet werden, daß während dieser Zeitspanne ein problemfreies Verpumpen des Betons sowie ein vollständiges Füllen der Betonierkammer, samt Reinigung der Betonierleitungen, möglich ist.

▪ **einaxiale Druckfestigkeit größer  $1,0 \text{ N/mm}^2$  nach einer Stunde:**

60 Minuten nach Aktivierung des Betons soll dieser stirnseitig ausgeschalt werden können, sowie den Ziehvorgang des Schildschwanzes ermöglichen.

▪ **einaxiale Druckfestigkeit größer  $30,0 \text{ N/mm}^2$  nach 4 Tagen:**

Der Beton soll spätestens nach 4 Tagen ausgeschalt werden können. Dies bedeutet, daß er nach dieser Zeit eine ausreichende Festigkeit besitzen muß um die Belastungen aus der Geologie und Hydrologie schadlos aufzunehmen. Dieser Schwellenwert wurde hier mit  $30,0 \text{ N/mm}^2$  festgelegt.

▪ **selbstverdichtend:**

Der Beton soll selbstverdichtend sein, so daß ein nachträgliches Rütteln vermieden werden kann.

▪ **niedrige Abbinde temperatur:**

Um Spannungsrisse aufgrund zu hoher Temperaturentwicklung während des Abbindens zu vermeiden, soll der Beton eine geringe Temperaturentwicklung aufweisen.

▪ **geringes Schwindmaß:**

Um Spannungsrisse aufgrund zu großen Schwindens zu verhindern, welche die Wasserdichtigkeit und Dauerhaftigkeit der Betonschale gefährden würde, soll der Beton über ein geringes Schwindmaß verfügen.

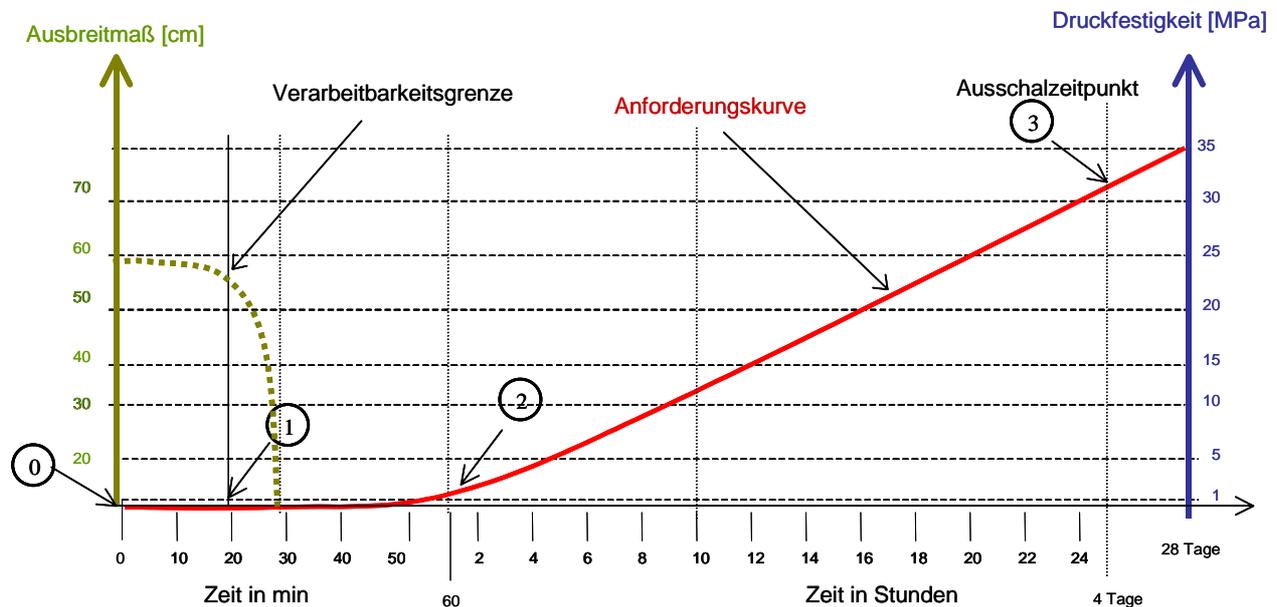


Abb.3-2: Anforderungen an den Abbindeverlauf des gesteuerten Schnellbetons

▪ **Anforderungen an normalen Konstruktionsbeton:**

Weiterhin soll der Beton alle Anforderungen an einen normalen Konstruktionsbeton erfüllen.

### 3.2 Bewehrungstechnische Anforderungen

Als Bewehrung für die einschalige Tunnelauskleidung soll sowohl **Matten-, Stab-** als auch **Stahlfaserbewehrung** eingesetzt werden können. Der Bewehrungsgehalt sowie die Bewehrungsanordnung sind so zu wählen, daß Risse vermieden und eine wasserdichte Betonschale erzeugt werden kann. Die Überlappungsstöße, vor allem bei Arbeitsfugen, sind derart zu dimensionieren, daß Belastungen aus Temperatur und Schwinden des unendlich langen Betonbauwerkes übernommen werden können.

### 3.3 Verfahrenstechnische Anforderungen

Den hier geforderten gesteuerten Schnellbeton, der nach 20 Minuten annähernd gleichbleibender Konsistenz sehr schnell seine Konsistenz ändert, störungsfrei und mit gleich bleibend hoher Qualität verarbeiten zu können, ist die Anforderung an die Verfahrenstechnik.

- **Betonieren frisch in frisch:**

Der Vortriebs- und Betonierzyklus soll so abgestimmt sein, daß ein Betonieren frisch in frisch ermöglicht werden kann.

- **Arbeitsfugendichtung bei längeren Stillständen:**

Bei längeren Stillständen (> 5 Stunden) soll die Arbeitsfuge, vor der Wiederaufnahme des Betoniervorganges, mit einer zusätzlichen Dichtung versehen werden können.

- **automatisierte Betonanmischung und Verarbeitung:**

Die Betonanmischung soll automatisiert, auf dem Nachläufer der Schildvortriebsmaschine, erfolgen. Dabei soll nur soviel Beton angemischt werden, wie für den jeweiligen Betoniervorgang erforderlich ist. Durch automatische Regelung der Dosier- und Mischorgane sollen unterschiedliche Volumenströme realisiert werden und nachträgliche Variationen in der Betonrezeptur ermöglicht werden können. Die Misch- und Betonverarbeitungsanlage soll derart mit Sensoren ausgestattet sein, daß eine homogene Betonqualität sichergestellt werden kann. Der Bediener der Anlage soll nur bei Unregelmäßigkeiten eingreifen müssen.

- **automatisches Reinigen der Betonierleitungen:**

Da der Beton nach 20 Minuten sehr schnell seine Konsistenz ändert, ist dieser spätestens nach dieser Zeit vollständig aus dem Leitungssystem zu entfernen. Dazu ist ein automatischer Reinigungszyklus samt entsprechender Gerätschaft zu entwickeln. Dabei soll der manuelle Eingriff des Bedienerpersonals minimiert werden. Der Rest- bzw. Reinigungsbeton ist dabei vollständig aufzufangen und aus dem Tunnel zu transportieren. Dies soll die Voraussetzung für eine saubere Baustelle unter Tage darstellen.

- **Stabilisierung der im Abbinden begriffenen frischen Betonschale (Schalung):**

Die Schalung soll der Stützung des abbindenden Betons dienen. Über die Schalung wird die Kontur der fertigen Tunnelschale festgelegt. Die einzelnen Schalungselemente sind derart zu gestalten, daß durch entsprechende Kombination einzelner Elemente eine Raumkurve (Helix) erzeugt werden kann. Die Vortriebskräfte sollen dabei über die Vortriebspresen direkt in die Schalung und später in die erhärtete Betonschale eingeleitet werden können.

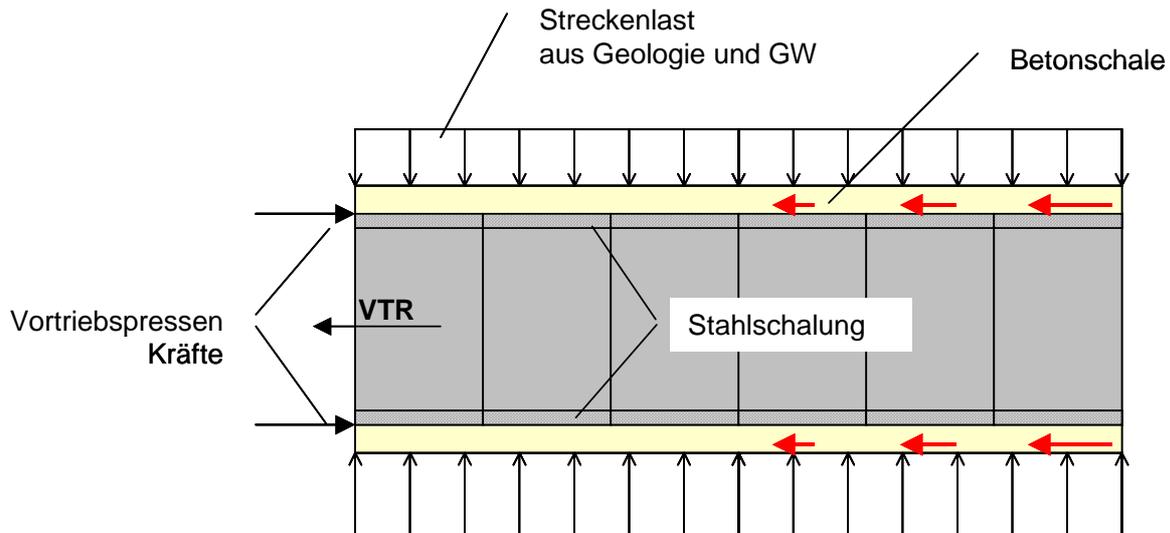


Abb.3-3: Längsschnitt durch Betonschale, Schalung und Geologie mit Vortriebskräften

Auf der Innenseite der Schalungsrings verfährt der Nachläufer. Die Schalungselemente dienen dabei der Verteilung der Kräfte des Nachläufers auf die junge Betonschale.

Nachdem der eingeschaltete Beton seine geforderte Festigkeit erlangt hat, sind die einzelnen Schalungselemente zu demontieren. Diese sollen, mit geringem Arbeitsaufwand im Nachläuferbereich für den Wiedereinsatz aufbereitet werden können. Bei der Auswahl des Schalungsmaterials ist auf Verschleiß, Verarbeitbarkeit sowie leichte Handhabbarkeit zu achten.

- **bei allen Schildvortriebssystemen einsetzbar:**

Das neue Verfahren soll bei allen Schildvortriebssystemen einsetzbar sein.

### 3.4 Betriebswirtschaftliche Anforderungen

- **kostengünstige Alternative:**

Es soll eine kostengünstige Alternative zu den herkömmlichen Verfahren darstellen.

- **Reduzierung des Risikos von Nachbesserungsarbeiten:**

Bei dem neuen Verfahren sollen keine Fugendichtungen erforderlich werden (außer in Ausnahmesituationen). Dadurch sinkt das Risiko von Undichtigkeiten der Tunnelschale im Gegensatz zu Tunnelschalen aus Fertigbeton erheblich.

- **Brandschutz:**

Weiterhin soll das Risiko für das Versagen der Tunnelschale im Brandfall verringert, bzw. der Aufwand dafür minimiert werden. Derzeit sind bei Baumaßnahmen

mit Fertigteilbeton (Tübbingbauweise) eine Vielzahl von Zusatzmaßnahmen erforderlich, die vor allem die Fugendichtungen im Brandfall schützen sollen (Aufbringen von Feuerschutzplatten bzw. Aufsprühen von Dämmstoffen).

Durch die Vermeidung von Fugendichtungen kann z.T. darauf verzichtet werden.

- **Elektrische Durchverbindung :**

Durch die monolithische Ausführung der Schale entfällt die elektrische Durchverbindung der blockweisen Herstellung beim schienengebundenen Verkehr.

### 3.5 Generelle Anforderungen

- **in-situ hergestellte Ortbetonschale:**

Die Sicherung des erstellten unterirdischen Hohlraums soll mit Hilfe einer vor Ort erstellten einschaligen Stahlbetonschale erfolgen. Diese hat nur die Lasten aus der Geologie und Hydrologie im Gebrauchszustand aufzunehmen.

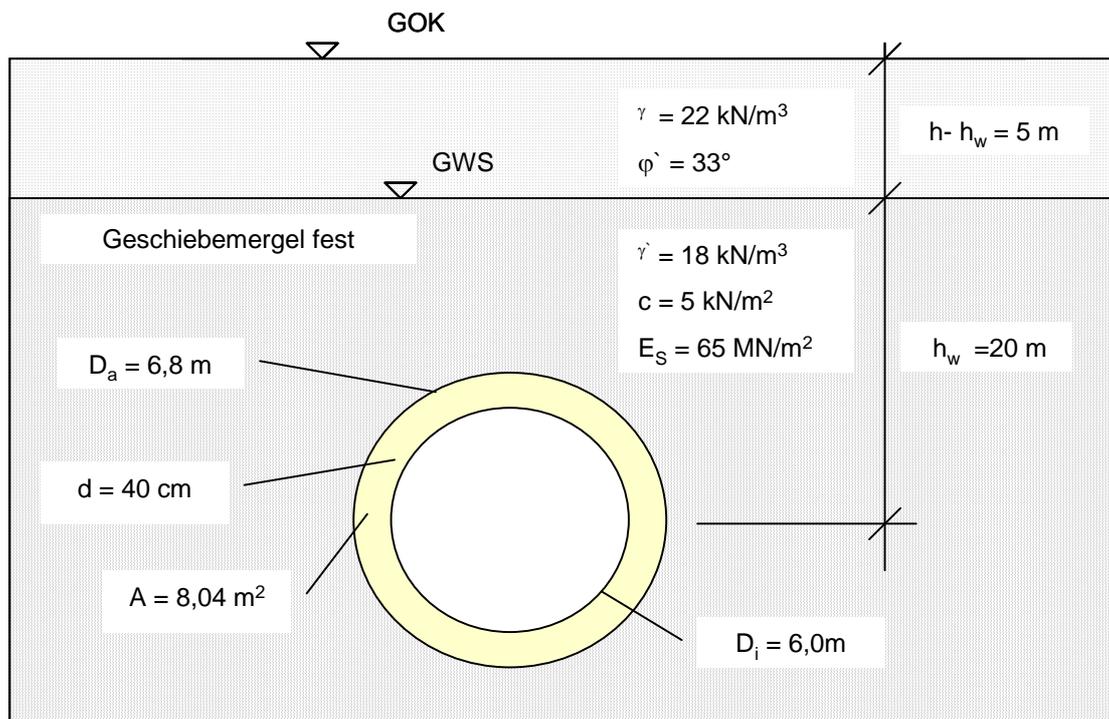


Abb.3-4: Querschnitt mit Geologie- und Hydrologiedaten

- **Krafteinleitung der Kräfte aus dem Vortrieb:**

Die Vorpreßkräfte aus dem Vortrieb sollen im Bauzustand über eine Stahlschalung abgetragen werden. Die Einleitung konzentrierte Einzellasten in die Betonschale sollen damit vermieden werden.

- **bei beliebigen Geologien einsetzbar:**

Das Verfahren soll bei sämtlichen Geologien Anwendung finden, bei denen klassische Schildvortriebe mit Tübbingausbau zum Einsatz kommen. Dazu zählen

bindige Böden, kohäsionslose Böden, Festgesteines bzw. eine Kombination aus diesen. Der Vortrieb soll sowohl unterhalb als auch oberhalb des Grundwasserspiegels erfolgen können.

- **glatte Innenschale homogener Farbgebung:**

Die tunnelseitige Betonoberfläche soll einfarbig, homogen, glatt und frei von Rissen sowie Fehlstellen (Lunkern) sein. Querschnittssprünge, Unebenheiten und Maßabweichungen sind auszuschließen. Um dies zu erfüllen ist eine glatte Schalungsaußenfläche erforderlich. Sie stellt letztendlich die Kontur der fertigen Tunnelinnenschale dar. Aus diesem Grund kann mit Ausnahme der Stirnflächen die Stahlschalung mit Stahlbautoleranzen gefertigt werden.

- **Möglichkeit der Nachinjektion bei Undichtigkeiten:**

Undichtigkeiten, vor allem im Bereich der Arbeitsfugen, sollen durch nachträgliche Injektionsmaßnahmen abgedichtet werden können.

- **Personaleinsatz, Verfügbarkeit**

Durch einen hohen Automatisierungsgrad ist der Personalbedarf so gering wie möglich zu gestalten. Eine hohe Verfügbarkeit von über 90 % ist anzustreben. Prozesse, die auf dem kritischen Weg liegen, sind möglichst redundant auszuliegen.

- **Meßdatenerfassung**

Entsprechende Sensorik sowie Meßdatenerfassung sollen die Grundlage für einen transparenten Tunnelvortrieb bilden. Dies soll der Ausführungssicherheit dienen und einen kontinuierlichen Optimierungsprozeß gewährleisten.

Im Folgenden wird die Realisierung des neuen Verfahren im Detail dargestellt. Aus Anschaulichkeitsgründen wird zunächst auf die Tunnelschale eingegangen. Diese besteht aus Stahlbeton mit Stabstahlbewehrung und einem vor Ort hergestellten, gesteuerten Schnellbeton. Die betontechnologischen und bewehrungstechnischen Besonderheiten sowie die verfahrenstechnischen Neuerungen bei der Herstellung, Verarbeitung und Reinigung des Schnellbetons sind ebenfalls Bestandteil des folgenden Kapitels wie der während des Abbindens erforderliche Schalungsring aus Stahlelementen einschließlich deren Montage, Demontage.

## 4 Tunnelschale

### 4.1 Ortbetonring

Die Sicherung der Tunnelröhre erfolgt mittels einer im Schildschwanzbereich hergestellten Ortbetonschale mit Stabstahlbewehrung. Sie soll gleichzeitig den endgültigen Ausbau der Tunnelröhre darstellen. Als Schalung zur Tunnelinnenseite dient ein Schalungsring, der aus mehreren Stahlschalungselementen zusammengesetzt ist. Zur Gebirgsseite hin verhindert der Schildschwanz das Eindringen von Gesteinsbestandteilen und Grundwasser in den Betoniererraum.

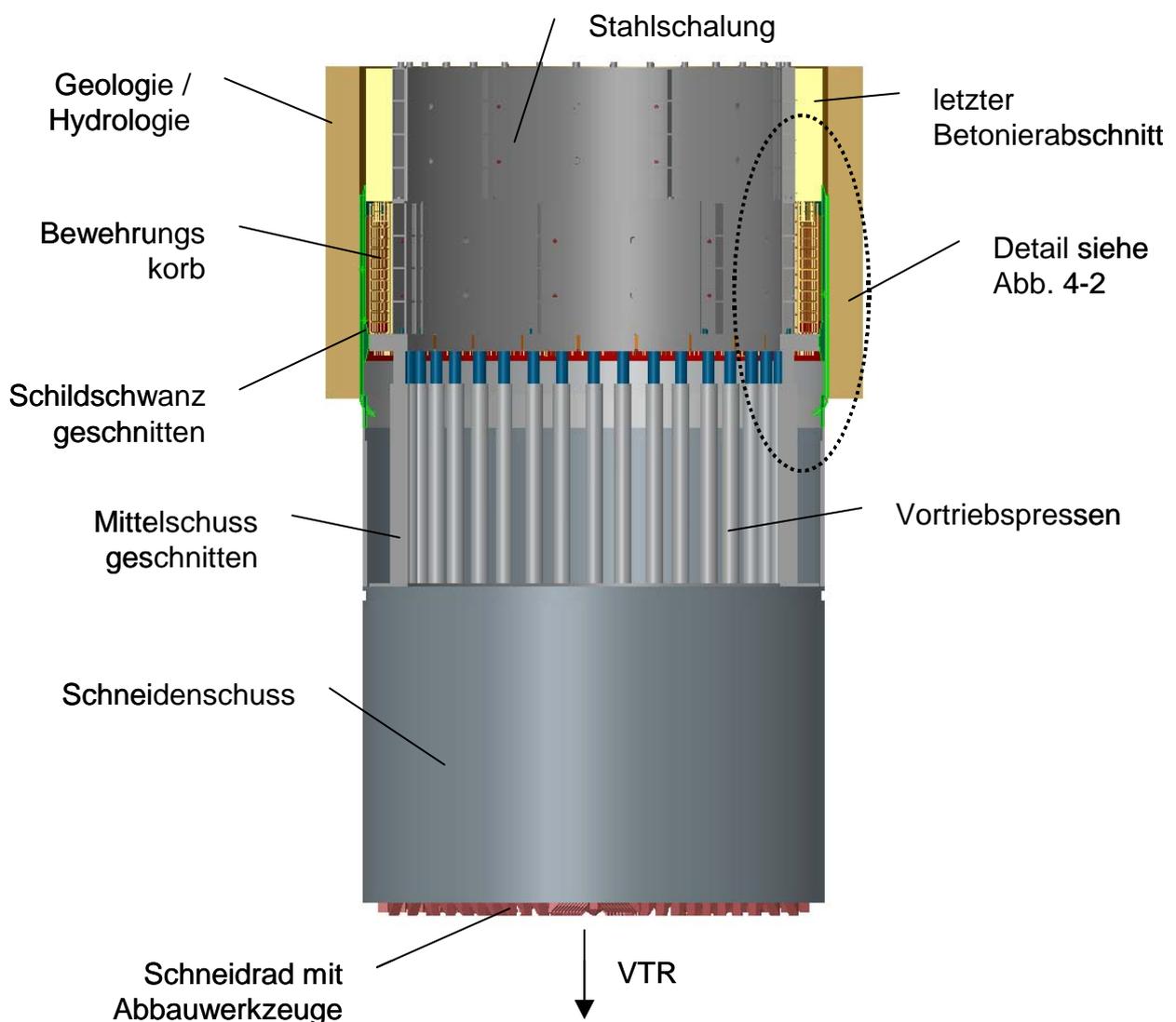


Abb.4-1: Vertikaler Teilschnitt durch den Schildschwanz, Betonschale, Schalung, angrenzende Geologie

Dadurch entsteht ein ringförmiger Betonierraum, welcher entgegen der Vortriebsrichtung durch den letzten Betonierabschnitt samt Schalung und in Vortriebsrichtung durch die Pressenschuhe der einzelnen Vortriebspressen eingegrenzt ist. Auf Höhe der Pressenschuhe ist an der Schildschwanzinnenseite eine aufblasbare Elastomerdichtung (Ringdichtung) angebracht, die im aktivierten Zustand den aufgrund der Kurvenfahrt notwendigen Ringspalt abdichtet.

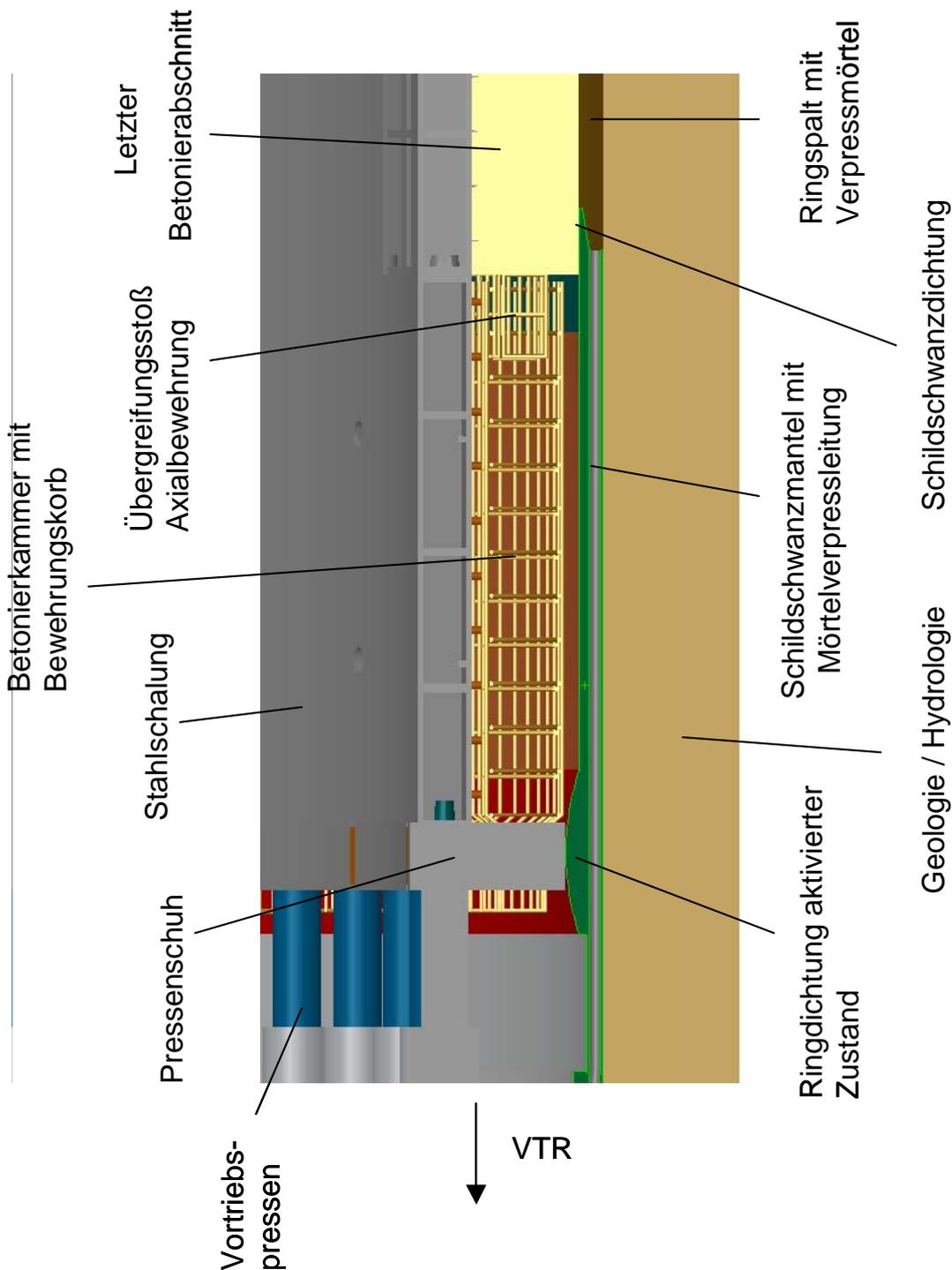


Abb.4-2: Detail: horizontaler Schnitt durch die Betonierkammer

Die für die Stabilität der Betonschale erforderliche Stabstahlbewehrung wird gleichzeitig mit den Schalungselementen versetzt. Nach dem Schließen des Schalungsringes, wenn die Vortriebspresen in Position sind und die Ringdichtung aufgeblasen ist, wird der verbleibende Hohlraum mit Pumpbeton verfüllt. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Systemkomponenten eingegangen.

#### 4.2 Spezialbeton (gesteuerter Schnellbeton)

Bei dem eingesetzten Spezialbeton handelt es sich um einen Baustoff auf Portlandzementbasis, dessen Zusammensetzung nach den im letzten Kapitel beschriebenen Anforderungen gewählt wurde. Aus Wettbewerbsgründen sind die an der Entwicklung beteiligten Zement- und Zusatzmittelhersteller nur bedingt bereit, nähere Informationen über genaue Zusammensetzung und Reaktionsverhalten ihrer Systeme zu veröffentlichen.

Eine Ausnahme stellt die Firma Schretter & CIE dar, welche sich sehr engagiert und kooperativ gezeigt hat. Auf diesem Baustoff soll im Folgenden näher eingegangen werden. *(Weitere Betonvarianten sind im Anhang unter Kapitel 9 aufgeführt).*

##### 4.2.1 Zusammensetzung

Der Trockenbeton besteht aus Zement, Zuschlag, Zusatzmittel und bei Bedarf auch Zusatzstoffen wie Flugasche oder Farbstoffe.

Pos.	Bestandteil	Anteil [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Volumenanteil [l/m <sup>3</sup> ]
1	CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R-SE	420,0	3,1	135,5
2	Zuschlag A/B 16	1.738,0	2,6	669,5
3	Wasser	195,0	1,0	195,0
	W/B-Wert	0,46		
4	ZM <1,0 Gew.-%			

Abb.4-3: Beispielrezeptur gesteuerter Schnellbeton

Beim Bindemittel handelt es sich gemäß Nomenklatur nach EN 197 um einen **CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R-SE**.

Die erwünschten materialtechnologischen Eigenschaften werden durch normgemäße Zumahlstoffe erreicht. Die Einstellung des Erstarrungsbeginns erfolgt über die Beigabe hochwirksamer Agenzien < 1 Gew.-%.

Die hohen Frühfestigkeiten werden mit Hilfe eines speziellen Klinkers erzielt. Wie der Portlandzementklinker enthält dieser als Hauptbestandteile Trikalziumsilikat (C<sub>3</sub>S) und Dikalziumsilikat (C<sub>2</sub>S). Weiter befindet sich in diesem Klinker, wie auch im Port-

landzement, Kalziumaluminatferrit ( $C_4AF$ ). Lediglich der Anteil der Aluminate, die generell für die Frühfestigkeiten verantwortlich sind, besteht in diesem speziellen Klinker aus einer aluminiumreicheren Phase, dem  $C_{12}A_7$  (Mayenit). Im Portlandzementklinker liegen die Aluminate als  $C_3A$  vor. Durch den höheren Aluminiumanteil muß auch der Gipsanteil im Bindemittel entsprechend erhöht werden.  $C_{12}A_7$  und Gips hydratisieren zu Ettringit, welcher für die Frühfestigkeit verantwortlich ist.

Die entsprechenden Punkte im Rankin'schen Diagramm liegen bei dem verwendeten speziellen Klinker und dem Portlandzementklinker sehr nahe beieinander, während jener des Tonerdeschnellzementes weit davon abweicht.

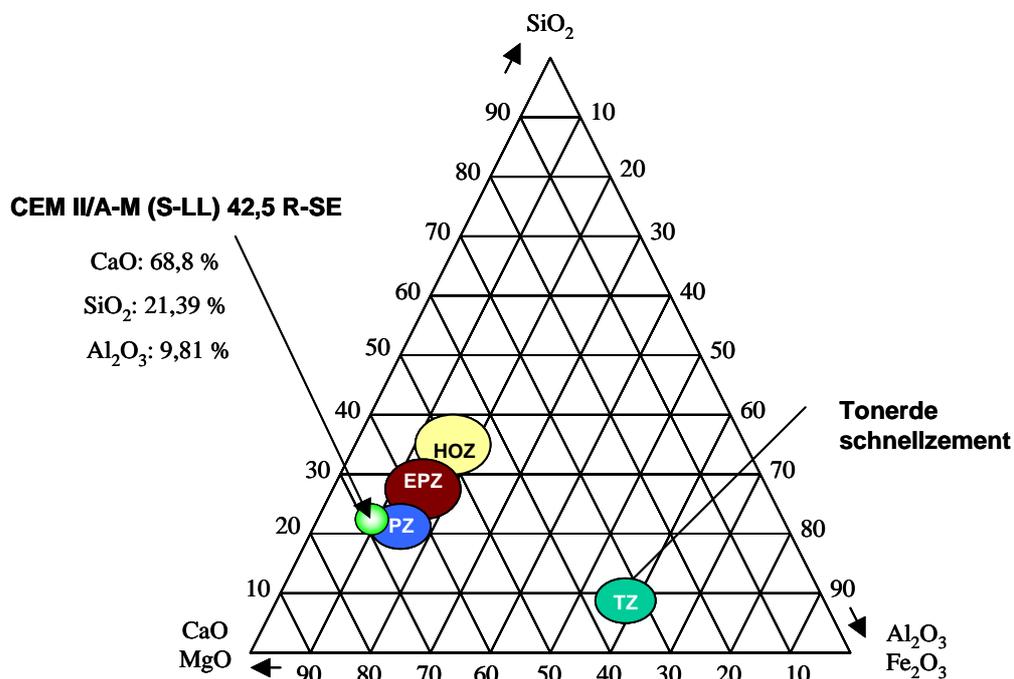


Abb.4-4: Dreistoff Diagramm

Eine mineralogische Nähe zum Tonerdeschnellzement ist also keinesfalls gegeben.

### 4.2.2 Abbindeverlauf

Der Abbindeverlauf ist nach den Anforderungen aus der Verarbeitbarkeit, frühzeitige Ausschalfestigkeit, moderate Hydratationswärmeentwicklung und der gewünschten Endfestigkeit eingestellt.

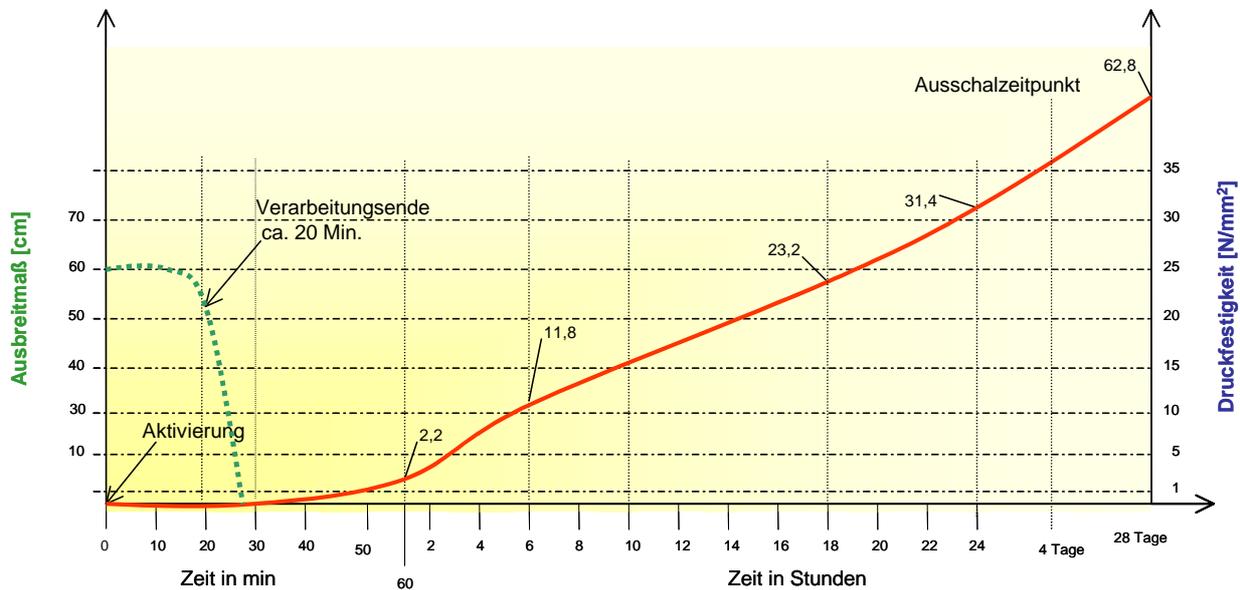


Abb.4-5: Abbindeverlauf des gesteuerten Schnellbetons (Beispiel)

Nach der Aktivierung der Trockenbetonmischung verbleibt diese für ca.15-20 Minuten unkonsistent. Dies ist der Zeitraum in dem das Mischen, die Verarbeitung und anschließende Reinigung der Betonierorgane erfolgt. Voraussetzung hierfür ist eine hohe Betonierleistung und ein automatisierter Reinigungsprozeß, welcher im Kapitel 4.7.3 beschrieben wird.

Nach ca. 20 Minuten beginnt die Erstarrungsphase, welche stetig in die Erhärtungsphase übergeht. Dieser Verlauf hängt stark vom Mischungsverhältnis und der Systemtemperatur der Betonmischung ab. Diese haben großen Einfluß auf das Abbindeverhalten. Aus diesem Grund ist die Betonieranlage mit einem sensorgesteuerten Regelkreis ausgestattet, der eine nahezu konstante Systemtemperatur gewährleistet.

### 4.2.3 Verarbeitung

Um den fertig angemischten Beton verarbeiten zu können, muß in der Rezeptur eine pumpfähige Konsistenz eingestellt sein. Die Konsistenz wird festgelegt durch den Zuschlag, den Zementgehalt, den Wassergehalt und Zusatzmittel wie Fließmittel. Der Zuschlag wird anhand einer entsprechend abgestuften Sieblinie zusammengestellt.

Da in diesem Anwendungsfall auf eine nachträgliche Verdichtung des Betons verzichtet werden soll, ist hier eine sehr fließfähige Konsistenz von F6 (Ausbreitmaß >

63cm) gewählt, welche für die Herstellung von selbstverdichtenden Betonen geeignet ist.

Die bei der Betonmischung erzeugte Konsistenz bleibt während der Verarbeitung und Reinigung der Förderorgane konstant. Dies wird durch Beimischung eines entsprechenden Verzögerers erreicht. Dadurch wird das Stopferrisiko in der Leitung minimiert und eine problemlose Verfüllung des Betonierings garantiert.

Die Verarbeitung erfolgt über eine Doppelkolbenpumpe, welche den frisch angemischten Beton aus dem Trichter über Betonierleitungen in den Betonierraum fördert.

#### 4.2.4 Schwinden/Quellen

Um die Schwind- und Quellmaße zu ermitteln wurden Versuche mit Mörtelprismen (4x4x16cm) und dem Graf-Kaufmann-Messgerät durchgeführt.

Dabei wurden folgende Werte ermittelt:

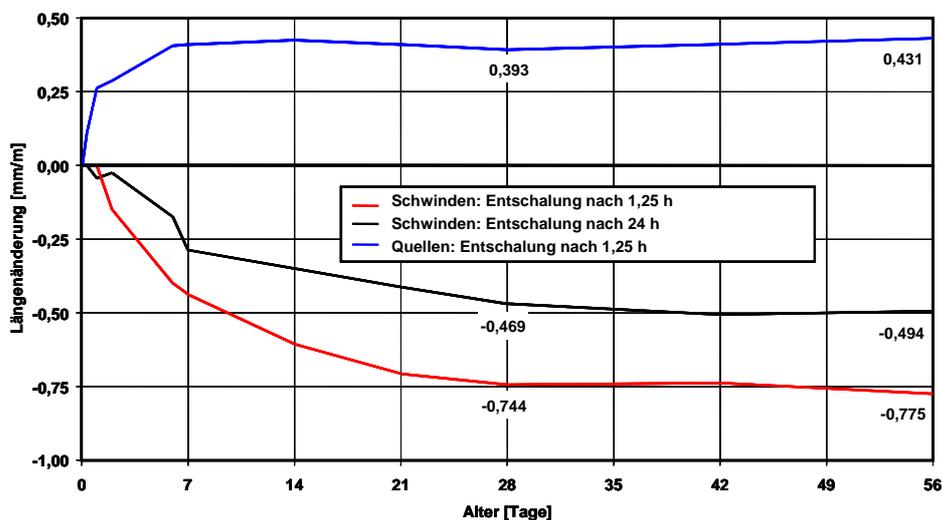


Abb.4-6: Quellen / Schwinden bei verschiedenen Entschalungszeiten des gesteuerten Schnellbetons

Wie anhand der Meßergebnisse zu ersehen ist, heben sich die Verformungen aufgrund Schwindens teilweise durch die Quellverformungen auf. Optimal wäre ein zeitlich vollkommen identischer Verlauf. Die Schwindwerte für eine Entschalung nach 4 Tagen sind vermutlich noch geringer (Versuche stehen noch aus).

#### 4.2.5 Abbinde-temperaturentwicklung (Hydratationswärme)

Das Bindemittel des gesteuerten Schnellbetons ist ein CEM II/A und enthält daher bis zu 20 % Zusatzstoffe, die an der Festigkeitsentwicklung in den ersten 24 h nicht beteiligt sind. (CEM I bis zu 5 % Zusatzstoffe). Dies "dämpft" die Wärmeentwicklung. Würde man an Stelle des Spezialbindemittels einen CEM I verwenden, so wäre die Hydratationswärme naturgemäß höher.

CEM I 52,5 R	Tmax 71,1°C	Tdiff 47,1°C	Blaine 5.300 cm <sup>2</sup> /g
CEM II / A-M 42,5 R	Tmax 61,0°C	Tdiff 37,0°C	Blaine 4.600 cm <sup>2</sup> /g

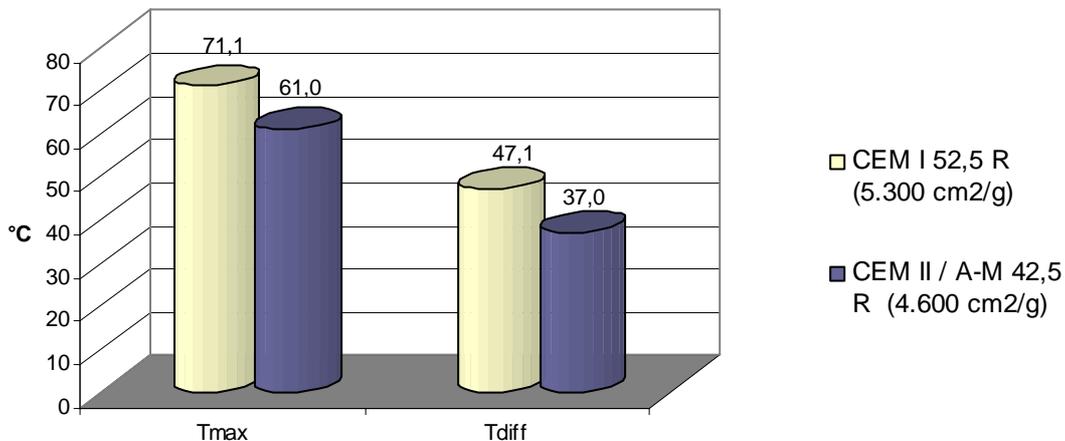


Abb.4-7: Versuchsergebnisse der maximalen Hydratationswärmeentwicklung

Die Wärmeentwicklung wird zudem vom Blainewert (Oberfläche der Zementkörner; entspricht der "Mahlfeinheit" des Zementes) stark beeinflusst. Je höher der Blainewert, um so schneller ist die Hydratation und damit die Hydratationswärme. Der vergleichsweise niedrige Blainewert des hier beschriebenen Spezialbindemittels wirkt sich positiv aus.

Die Messung der Hydratationswärme gibt nur den Maximalwert (einer Wärmeentwicklung) an. Das ist kein Maß für die gesamte Wärmeentwicklung. Diese würde der Fläche unter dieser Wärmeentwicklungskurve entsprechen. Für die Baupraxis ist letztendlich aber der Maximalwert ausschlaggebend.

Weiterhin sind mit dem Zementhersteller Garantiewerte zu vereinbaren um ein gleich bleibendes Materialverhalten und Temperaturentwicklung zu gewährleisten.

#### 4.2.6 Bettung des Frischbetonrings

Bei dem hier beschriebenen Verfahren werden Abschnitte von 2,0 m Länge im zeitlichen Abstand von 2,0 Stunden betoniert. In dieser Zeit entwickelt der Beton eine Frühfestigkeit von  $>1,0 \text{ N/mm}^2$ . Das Betonieren findet im Schutze des Schildschwanzmantels der Vortriebsmaschine statt.

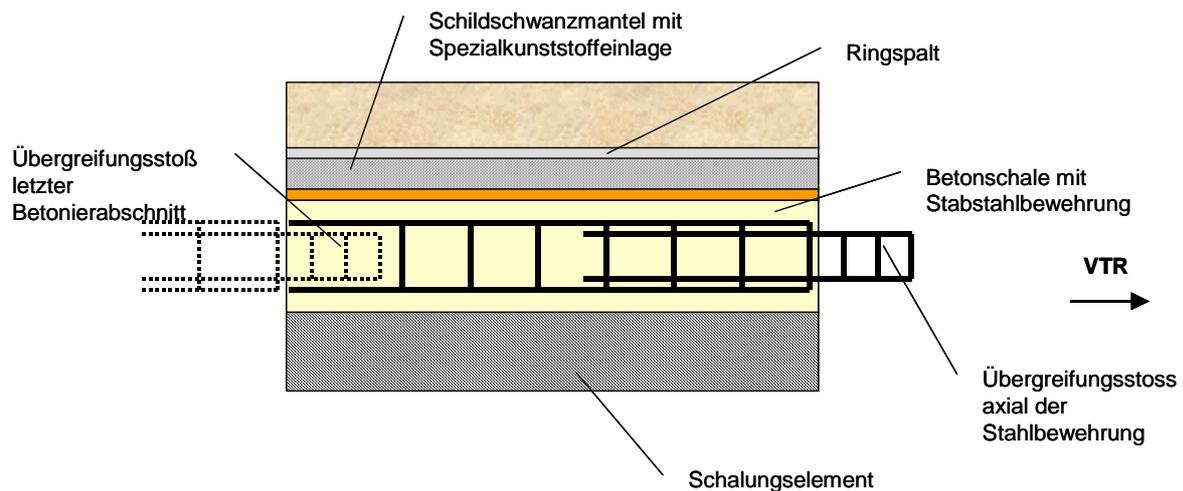


Abb.4-8: Bettung der Betonschale im Schildschwanzbereich

Nach etwa einer Stunde nach dem Betonieren des Rings wird der Schildschwanz in Vortriebsrichtung verfahren und der entstehende Hohlraum unmittelbar durch Verpreßmörtel ersetzt. Dieser Verpreßmörtel gelangt über die Verpreßleitungen, die im Schildschwanzmantel integriert sind, in den Ringspalt und umhüllt den frisch betonierten Abschnitt. Gleichzeitig preßt er die Schildschwanzdichtung, welche hier als S1-Dichtung bezeichnet wird gegen den jungen Beton. Dieser hat in diesem Abbindestadium bereits eine Festigkeit von größer  $1,0 \text{ N/mm}^2$  (10 bar), welche ausreicht um eine Beschädigung durch den Verpreßdruck auszuschließen. Der Verpreßmörtel wird in der Regel mit einem Druck verpreßt, der dem Wasserdruck plus einem Sicherheitswert von 0,5-1,0 bar entspricht. Bei einer Grundwasserüberdeckung von 50 m würde dies einen Verpreßdruck von 5,5 – 6,0 bar bedeuten. Bei der S1 Dichtung handelt es sich um eine elastische Elastomergummidichtung, welche mit Hilfe von Kugelkopfschrauben an der Hinterseite des Schildschwanzmantels befestigt wird.

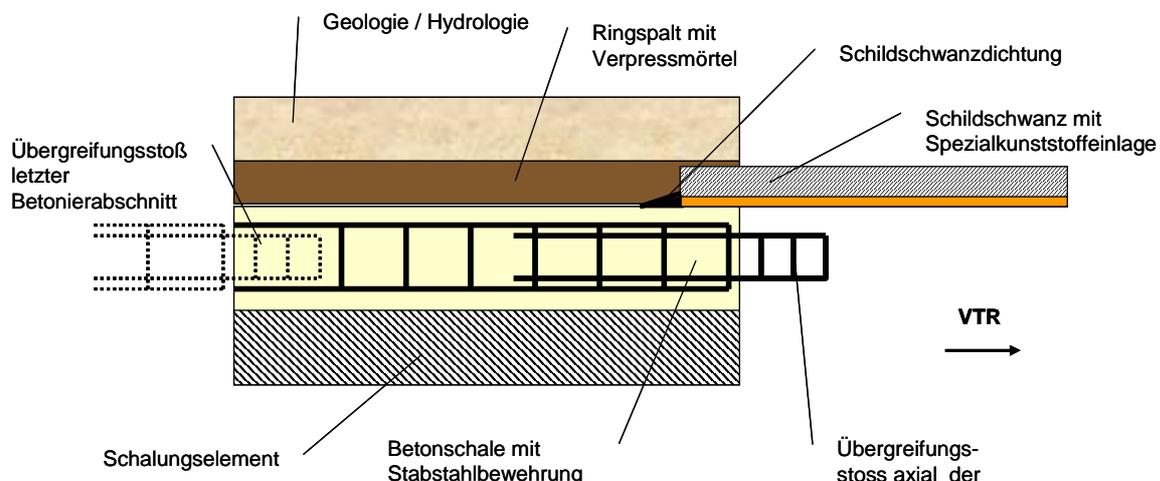


Abb.4-9: Bettung der Betonschale im Schildschwanzbereich

Der Verpreßmörtel ist ein ebenfalls hydraulisch abbindenden Baustoff der i.d.R. aus Zement, Wasser und Zuschlag besteht. Je nach Geometrie der Verpreßleitungen können unterschiedliche Zuschlagkörnungen gewählt werden. Die Abstufung der Zuschläge (Sieblinie) ist an die angrenzende Geologie anzupassen. Der Zuschlag samt Zement soll im Ringspalt ein Stützgerüst ausbilden, um schädigende Setzungen zu verhindern und den frisch betonierten Ring zu stabilisieren. Dabei ist darauf zu achten, daß das für die Abbindereaktion des Verpreßmörtels erforderliche Wasser nicht aus der Mischung gepreßt wird. Dies ist durch einen ausreichenden Mehlkorngelalt sicherzustellen. Die Zementart, -gehalt, und Zugabewassermenge bestimmen das Abbindeverhalten des Verpreßmörtels im Ringspalt. Bisherige Lösungen sind hierfür anwendbar.

Der abbindende Beton in der Betonschale ist somit auf der Außenfläche umgeben mit ebenfalls im Abbindestadium befindlichen Verpreßmörtel und auf der Innenseite mit der Stahlschalung. Aufgrund der Hydratationswärme des abbindenden Verpreßmörtels ist ein günstiges Klima für die Abbindereaktion des Schalenbetons geschaffen. Die Stahlschalung auf der Innenseite ist durch die Wärmekopplung aus dem letzten Betonierabschnitt vorgewärmt. Weiterhin wird durch die Schalung verhindert, daß der Beton auf der Innenseite zu schnell austrocknet, was die Erhärtung im Randbereich beeinflussen würde. Dies ist die Voraussetzung für die Vermeidung von Spannungsrissen aufgrund zu großer Temperaturunterschiede in der Betonschale.

Der Schildschwanz ist, wie im Kapitel 5 näher beschrieben wird, an den Stellen, an denen betoniert wird, mit einem speziellen Material ausgekleidet, welches das Anbacken des Betons verhindert und geringe Haft- und Reibkräfte beim Verschieben des Schildschwanzes mit sich bringt. Dadurch wird eine glatte Oberfläche zwischen der Mörtelverpreßschicht und der Betonschale erzeugt. Auf der Innenseite der Betonschale wird die Stahlschalung vor dem Einbau mit Schalöl behandelt.

### **4.3 Bewehrung**

Mit dem beschriebenen Konzept erhalten wir ein nahezu unendlich langes unterirdisches Bauwerk. Kritisch zu betrachten ist dabei die Rißbildung infolge von Zwangsspannungen aus Schwinden und Temperatur.

Die Bewehrung dient der Aufnahme von Zugspannungen. Sie verhindert, daß der Beton nach Überschreiten der Zugfestigkeitsgrenze die für die Wasserundurchlässigkeit zulässigen Rißweiten übersteigt.

Kritische Spannungszustände sind dabei

- äußere Lasten
- Vortriebskräfte
- Zwangsbeanspruchungen

Aus diesen Spannungen leitet sich der erforderliche Bewehrungsgehalt ab.

### 4.3.1 Dimensionierung

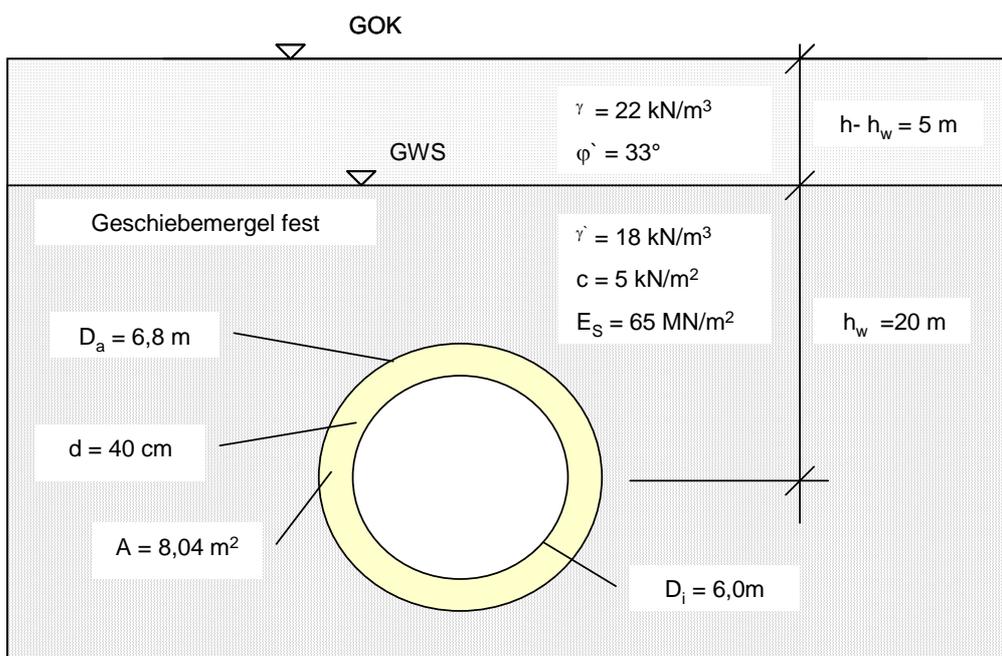
#### 4.3.1.1 Lastfall: Vortriebskräfte

Der Lastfall Vortriebskräfte ist bei einem Großteil der Schildvortriebe mit Tübbingausbau maßgebend für die Bemessung des Bewehrungsgehaltes im Stahlbetontübbing. Die Vortriebskräfte werden dabei direkt über die Vortriebspresen in den Tübbingring, der im Schutze des Schildschwanzes gebaut wird, eingeleitet. Dieser erhöhte Bewehrungsgehalt ist jedoch nur für den Bauzustand erforderlich.

Bei dem hier vorgestellten Verfahren werden die Vortriebskräfte, direkt in die temporäre Stahlschalung eingeleitet. Aus diesem Grund ist eine Bemessung der Bewehrung, aufgrund des Lastfalls Vortriebskräfte nicht erforderlich bzw. nicht maßgebend.

#### 4.3.1.2 Lastfall: Äußere Lasten

Der maßgebende Lastfall ist der Lastfall "Äußere Lasten", der im Bau- wie im Gebrauchszustand auftritt. Der Bemessung der Bewehrung in der Stahlbetonschale wurde die Beispielgeologie aus Abbildung 3-3 zu Grunde gelegt.



Kopie Abb.3-3: Lastkollektiv aus der Geologie

Im Rahmen einer überschlägigen Berechnung, wurden die Grundlastfälle Primärspannung, Wasserdruck, Ausbruch und Sicherung berücksichtigt. Die Bettung der Betonschale wurde radial angenommen. Eine mögliche tangentielle Bettung wurde nicht berücksichtigt.

Die Berechnung wurde nach zwei Verfahren durchgeführt.

- Stabzugberechnung
- FE Berechnung

Bei beiden Verfahren wurde mit dem Programm Sofistik gearbeitet. Unterstützt wurde ich dabei von dem Ingenieurbüro Laabmayr & Partner.

Für die Stabzugberechnung wurde folgender Lastfall zugrundegelegt.

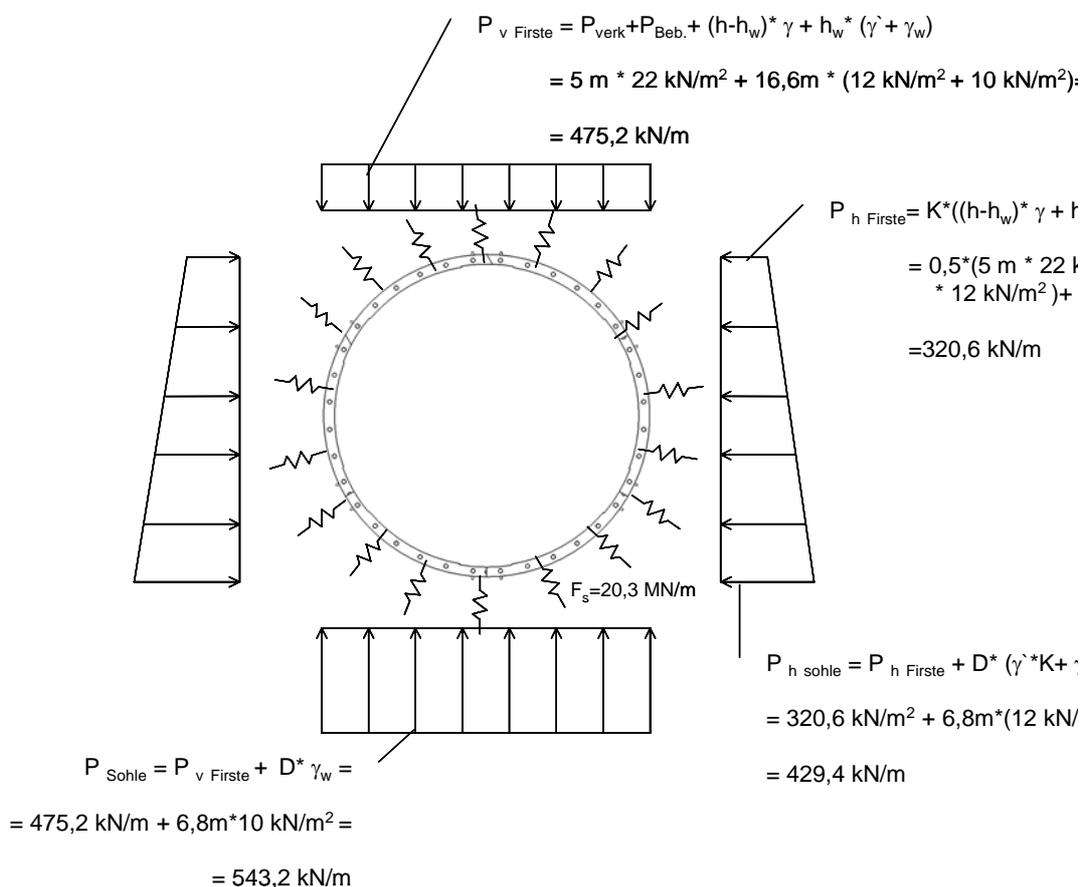


Abb.4-10: Lastkollektiv aus der Geologie

Dieses Lastkollektiv ergibt folgenden Normalkraft-, Querkraft- und Biegemomentenverlauf.

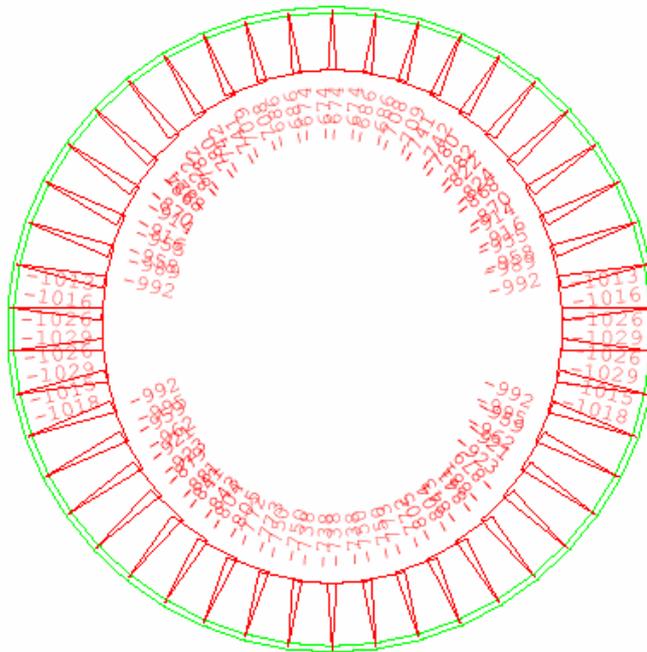


Abb.4-11: Normalkraftverlauf [kN]

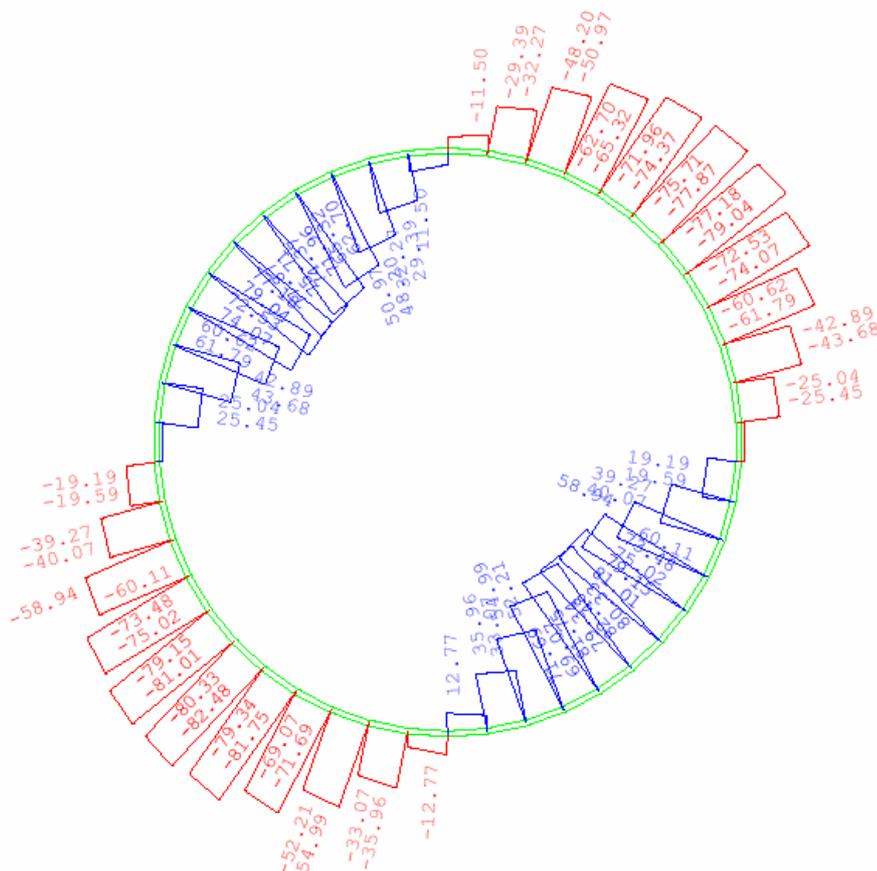


Abb.4-12: Querkraftverlauf [kN]



In der FE-Berechnung errechnet sich die Belastung der Schale aus dem Gesamtsystem bestehend aus Boden- und Ringparametern. Eine Rückrechnung zeigt, daß die Belastung aus der Geologie an der Schalenfirste nur ca. 200 bis 250 kN/m beträgt (statt der angesetzten 475,2 kN/m). Dieser Einfluß verkleinert sich jedoch mit geringer werdender Überdeckungshöhe und abnehmenden Werten für die innere Reibung, die sich je nach Bodengegebenheiten ergeben.

#### 4.3.1.3 Lastfall: Zwangsbeanspruchungen

Der Lastfall "Zwangsbeanspruchung" kann vor allem dann maßgebend werden, wenn es zu starken Temperaturunterschieden in der Betonschale in Längs- und Radialrichtung kommt. Im Folgenden soll beispielhaft die Ermittlung des erforderlichen Bewehrungsgehaltes aufgrund von Zwängungen in der Betonschale nach DBV-Sachstandsbericht Stahlbetoninnenschalen im U-Bahnbau und gemäß DIN 1045 dargestellt werden.

Berechnung 1: Mindestbewehrung nach DIN 1045 für zentrischen Zwang:

$$\mu_1 = k_0 \frac{A_{s1}}{100 * d / 2} \rightarrow A_{s1} = k_0 * \mu_1 * 100 * d / 2$$

$$A_{s1} = k_0 \frac{Z_{s1}}{\sigma_{s1}} = k_0 \frac{\beta_{BZW} * 100 * d / 2}{\sigma_{s1}}$$

Beispiel:

$$A_{s1} = k_0 \frac{Z_{s1}}{\sigma_{s1}} = 1,0 * \frac{2,6 * 100 * 40 / 2}{500} = 10,40 [cm^2 / m]$$

Berechnung 2: Vorschlag Mindestbewehrung Tunnelinnenschalen nach Prof. Schikora:

$$A_{s1} = \mu_1 * 100 * d / 2$$

$$A_{s2} = A_1 / 2$$

$$\mu_1 \leq \frac{(0,6 \div 0,65) * \beta_{BZW}}{\sigma_{s1}}$$

Beispiel:

$$\mu_1 \leq \frac{(0,6 \div 0,65) * 2,5}{500} = 0,30 \div 0,32\%$$

$$A_{s1} = 0,004 * 100 * 40 / 2 = 8,0 [cm^2 / m]$$

$$A_{s2} = 8,0 / 2 = 4,0 [cm^2 / m]$$

Berechnung 3: Vorschlag Mindestbewehrung Tunnelinnenschalen bezogen auf den Querschnitt  $A_b$  der Innenschale nach Prof. Schikora :

$$A_b = 100 * 35 = 3500 [cm^2 / m]$$

$$A_{s1} = 0,2\% * 3500 = 7,0 [cm^2 / m] - \text{Mindestbewehrung}$$

$$A_{s2} = 0,1\% * 3500 = 3,5 [cm^2 / m]$$

Beispiel:

$$A_b = 100 * 40 = 4.000 [cm^2]$$

$$A_{s1} = 0,2\% * 4.000 = 8,0 [cm^2 / m] - \text{Mindestbewehrung}$$

$$A_{s2} = 0,1\% * 4.000 = 4,0 [cm^2 / m]$$

Abb.4-15: Dimensionierung des Bewehrungsgehaltes aufgrund von Zwängungen in der Betonschale nach DBV-Sachstandsbericht Stahlbetoninnenschalen im U-Bahnbau und gemäß DIN 1045.

Der kritische Wert hier ergibt sich nach der Berechnung nach DIN 1045 für zentrischen Zwang zu  $10,40 \text{ cm}^2/\text{m}$  sowohl für die Außenlage als auch für die Innenlage in axialer und tangentialer Richtung.

### 4.3.1.4 Maßgebender Bewehrungsanteil

Der maßgebende Wert für die Konzeption der Bewehrungslagen ergibt sich gemäß der Stabzugberechnung aufgrund äußerer Lasten mit  $A_{s \text{ erf. innen}} = 11,8 \text{ [cm}^2/\text{m]}$  für die innere Bewehrungslage und aufgrund Lasten aus Zwangsbeanspruchungen zu  $A_{s \text{ erf. außen}} = 10,40 \text{ [cm}^2/\text{m]}$  für die äußere Bewehrungslage (siehe Abb.: 4-14, 4-15).

### 4.3.1.5 Verankerungs-, Übergreifungslänge

Aus Montagegründen ist der Bewehrungsring, wie im nächsten Kapitel näher beschrieben wird, aus einzelnen Bewehrungskörben aufgebaut, welche nach dem Nut- und Feder-Prinzip ineinander geschoben werden. Um jedoch die Zugkräfte aus den vorab beschriebenen Beanspruchungen an den Stoßstellen zu übertragen, ist an diesen die Bewehrung überlappend auszuführen. Dieser als Übergreifungslänge bezeichnete Überlappungsbereich der jeweiligen Bewehrungslagen ist in der DIN 1045 12.8.2 geregelt. Je nach Stabstahlgüte, Betonfestigkeitsklasse, Stabstahldurchmesser und geometrischer Ausführung der Übergreifungsenden der Stabstähle können gewisse Abminderungsfaktoren herangezogen werden, welche die Übergreifungslänge  $l_s$  reduzieren. So hat z.B. ein gerader Stabstahl mit einem Durchmesser von 16 mm eine 40 % größere erforderliche Übergreifungslänge als ein in Form eines Winkelhakens ausgeführter Bewehrungsstab (Biegerollenradius und Biegung berücksichtigt) gleicher Stärke.

Im Folgenden ist beispielhaft der Rechengang für die Berechnung der Übergreifungslänge des Tangentialstoßes dargestellt. Die Ergebnisse der Übergreifungsstoßberechnungen sind in Abb.: 4-21 zusammengefaßt.

*Grundmaß der Verankerungslänge :*

$$l_b = \frac{d_s}{4} * \frac{f_{yd}}{f_{bd}} = \frac{16,0 \text{ mm}}{4} * \frac{434,78}{3,0} = 579,71 \text{ mm}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500 \text{ N / mm}^2}{1,15} = 434,78 \text{ N / mm}^2$$

$$f_{bd} = 3,0 \text{ gem. Tab.25 (C30 / 37)}$$

*erforderliche Verankerungslänge :*

$$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * \frac{A_{s,erf}}{A_{s,vorh}} \geq l_{b,min}$$

$$\frac{A_{s,erf}}{A_{s,vorh}} = 1,0 \text{ (Abb.4 - 25 : } \frac{A_{s,erf}}{A_{s,vorh}} = 0,9 \text{ nicht angesetzt)}$$

$$\alpha_a = 0,5 \text{ gem. Tab.26 (2c)}^b \text{ } d_{br} \geq 15d_s$$

$$l_{b,net} = 0,5 * 579,71 * 1,0 = 289,85 \text{ mm}$$

$$l_{b,min} = 0,3 * \alpha_a * l_b \geq 10d_s$$

$$l_{b,min} = 0,3 * 0,5 * 579,71 = 86,96 \text{ mm}$$

$$10d_s = 10 * 16 \text{ mm} = 160,0 \text{ mm}$$

Abb.4-16: Beispielberechnung der Verankerungslänge gem. DIN 1045-1 (12.6.2)

*Übergreifungslänge :*

$$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 \geq l_{s,min}$$

$$l_{b,net} = 289,85 \text{ mm gem. Berechnung Abb.4 - 16}$$

$$\alpha_1 = 1,4 \text{ gem. Tab.27 (2 / 2}^b \text{ : } s \geq 10d_s \text{ und } s_0 \geq 5d_s)$$

$$l_s = 289,85 * 1,4 = 405,79 \text{ mm}$$

$$l_{s,min} = 0,3\alpha_a * \alpha_1 * l_b \geq 15d_s$$

$$\geq 200 \text{ mm}$$

$$\alpha_a = 0,5 \text{ gem. Tab. 26 DIN1045 - 1}$$

$$l_b = 579,71 \text{ mm gem. Abb.4 - 16}$$

$$15d_s = 15 * 16,0 \text{ mm} = 240,0 \text{ mm}$$

$$l_{s,min} = 0,3 * 0,5 * 1,4 * 579,71 \text{ mm} = 121,74 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow l_{s,min} = 405,79 \text{ mm}$$

Abb.4-17: Beispielberechnung der Übergreifungslänge gem. DIN 1045-1 (12.8.2)

### 4.3.2 Bewehrungsanordnung

Der im vorhergehenden Kapitel ermittelte erforderliche Bewehrungsanteil und – verteilung wird als Bewehrungsring, bestehend aus mehreren Bewehrungskörben realisiert. Die einzelnen Bewehrungskörbe werden nach dem Nut- und Feder-Prinzip

ineinandergefügt. Der Überlappungsbereich (Federtiefe, Nuthöhe) stellt die erforderliche Übergreifungslänge dar.

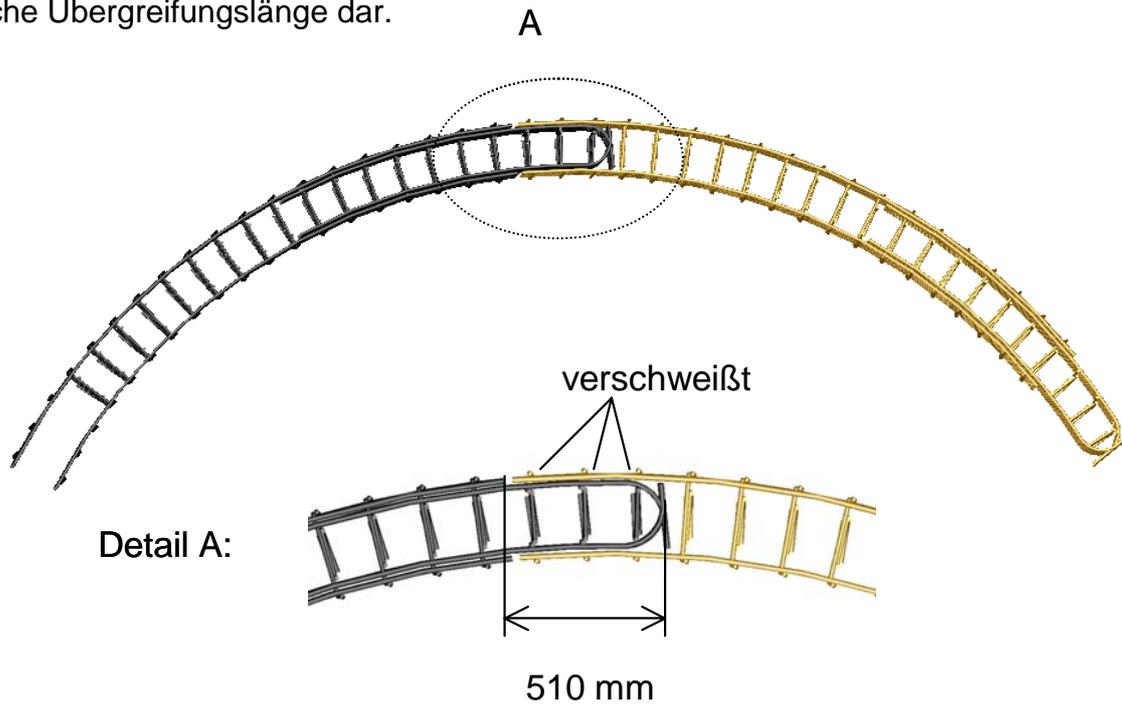


Abb.4-18: Überlappungsstoß in Umfangsrichtung (tangential)

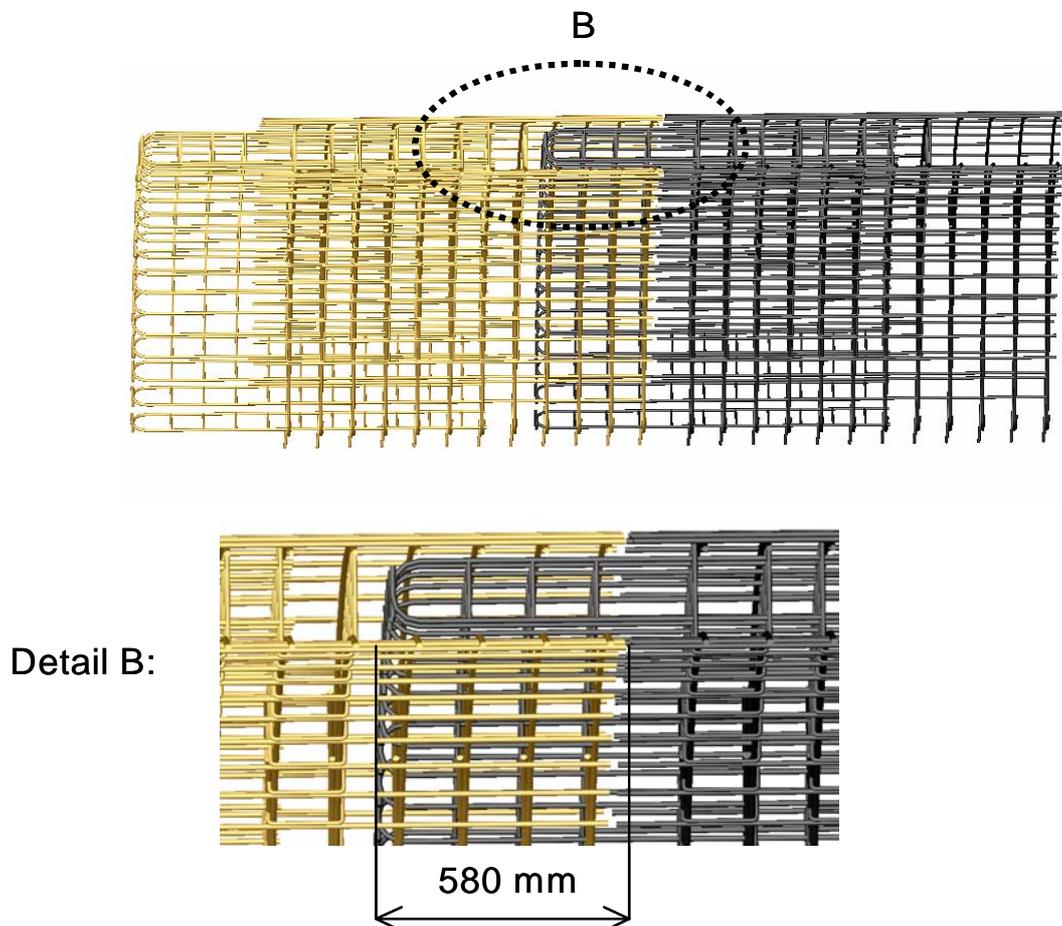


Abb.4-19: Überlappungsstoß in axialer Richtung

Mit dieser Anordnung können die einzelnen Bewehrungsringe beliebig gegeneinander verdreht werden. Das Design der Übergreifungsbewehrung wurde entsprechend der Vorgaben der DIN 1045 gewählt.

Aufgrund der geometrischen Zwangsbedingungen wurden zwei verschiedene Ausführungsformen der Übergreifungsstöße mit den zugehörigen Mindestübergreifungslängen gewählt.

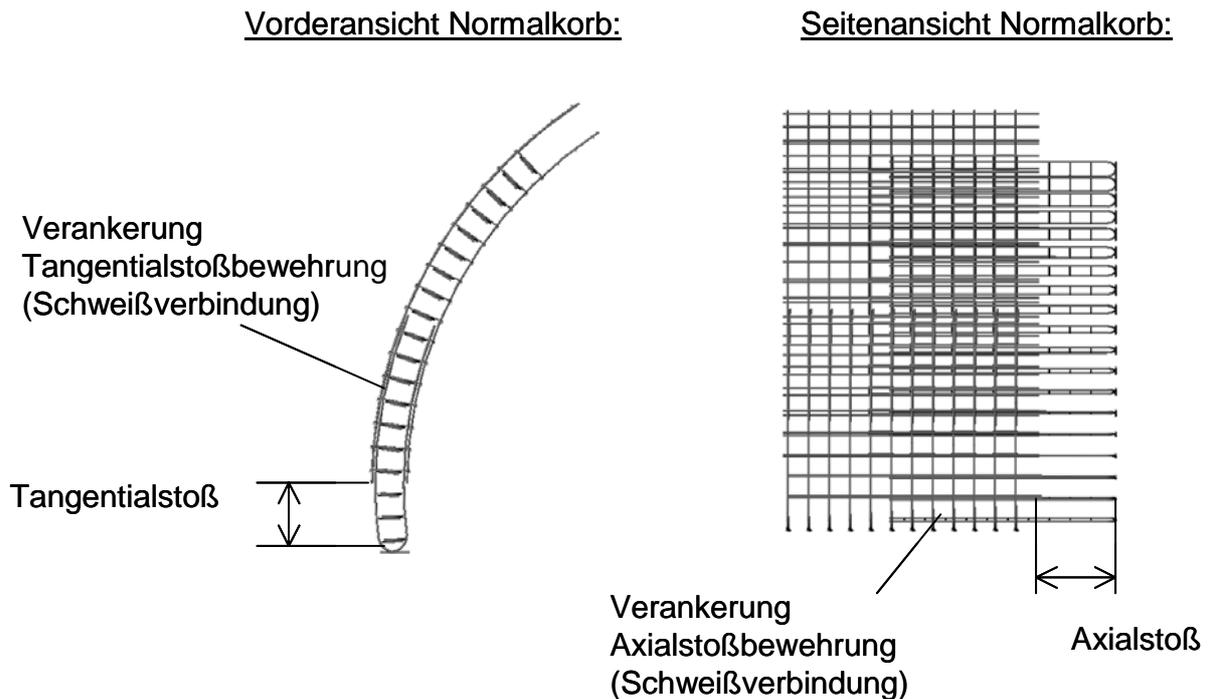


Abb.4-20: Ausführungsformen der Übergreifungsstöße

Die Verankerung der Tangential- und Axialstoßbewehrung im Bewehrungskorb erfolgt über Schweißverbindungen.

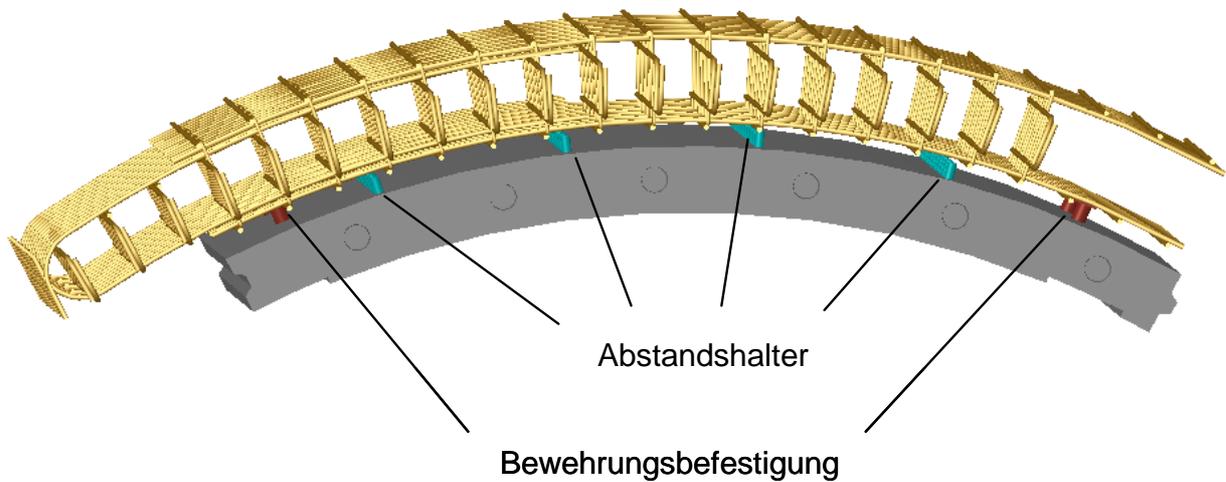
Grundmaß der Verankerungslänge	Betonstahl Streckgrenze $f_{yk} = 500$ N/mm <sup>2</sup>	Teilsicherheitsbeiwert	Verbundspannung $f_{bd}$ gem. Tabelle 25 für C30/37				
$l_b = d_s/4 * f_{yd}/f_{bd}$ [mm]	$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\gamma_s$ [-]	$f_{bd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]				
579,7	434,8	1,2	3,0				
Übergreifungsstoß	erforderliche Verankerungslänge [mm]	DIN 1045 Tab. 26	Bedingungen für $\alpha_a$	erforderliche Übergreifungslänge [mm]	DIN 1045 Tab. 27	Bedingungen für $\alpha_1$	vorhandene Übergreifungslänge [mm]
	$l_{b,net} = \alpha_a * l_b * A_{S,ert} / A_{S,vorth} \geq l_{b,min}$ 289,9	$\alpha_a$	Ausbildung der Verankerung als Winkelhaken $d_{br} \geq 15d_s, l \geq 5d_s$	$l_s = l_{b,net} * \alpha_1 \geq l_{s,min}$ 405,8	$\alpha_1$		
Tangentialstoß		0,5		405,8	1,4	$d_s \geq 16mm,$ $s \geq 10d_s, s_0 \geq 5d_s$	510,0
Axialstoß	405,8	0,7	$l \geq 5d_s$	568,1	1,4	$d_s \geq 16mm,$ $s \geq 10d_s, s_0 \geq 5d_s$	580,0

Abb.4-21: Tabelle der Übergreifungslängen

Der erforderliche Gesamtbewehrungsgehalt und Bewehrungsanordnung wird als voll verschweißter Bewehrungskorb realisiert. Er besteht aus einer Umfangs-, Axial-, Quer-, Überlappungs- und Hilfsbewehrung.

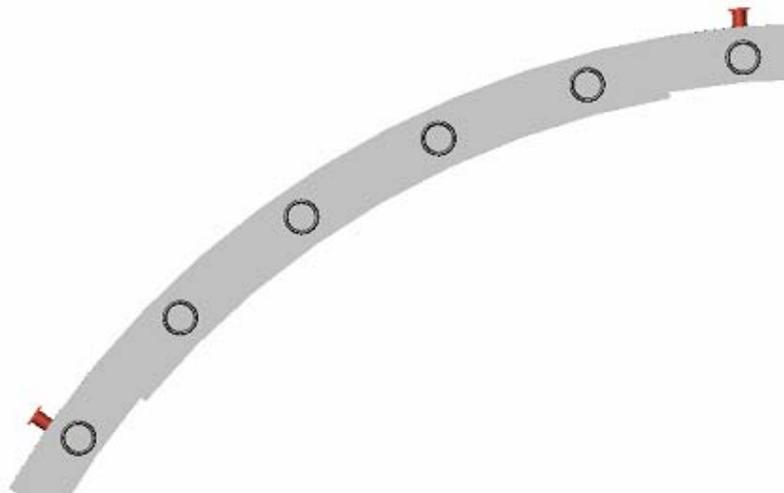


Um die Montage zu erleichtern wird der Bewehrungskorb zusammen mit dem jeweiligen Schalungselement versetzt.



*Abb.4-23: Schalungselement mit Bewehrungskorb*

Dazu ist eine spezielle Bewehrungsbefestigung auf der Außenfläche des Schalenelementes angebracht.



*Abb.4-24: Schalungselement mit Bewehrungsbefestigung*

Die Bewehrungsbefestigung besteht aus einem Stahlrohr mit Innengewinde und aufgeschweißter Kopfplatte. Vier Stück werden im Abstand von ca. 500 mm von den Eckpunkten auf der Oberfläche verteilt und mit einer Schraube rückwärtig befestigt. Anschließend wird der Bewehrungskorb auf den Kopfplatten positioniert und eingemessen. Die folgende Verschweißung garantiert eine exakte Lagefixierung des Kor-

bes in Relation zum Schalungselement. Um die erforderliche Bewehrungsüberdeckung von  $c_{\min}=50$  mm einzuhalten, ist die Befestigung samt Platte 50 mm hoch gewählt. Als weitere Abstandselemente dienen Abstandshalter, welche zwischen der inneren Bewehrungslage und dem Schalenelement verteilt und angepreßt werden.

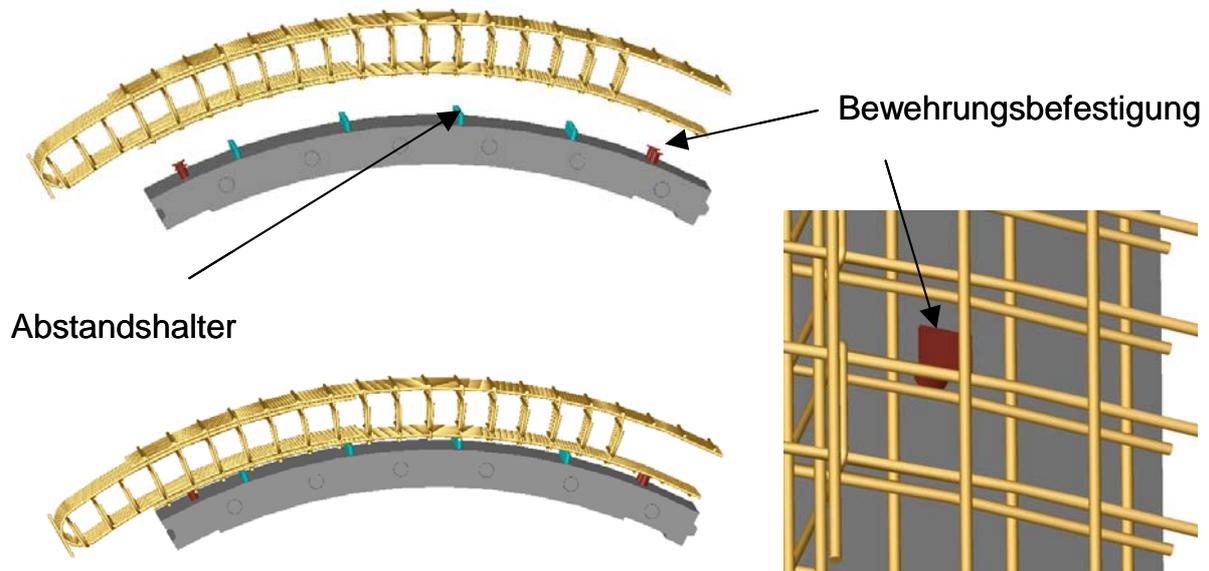
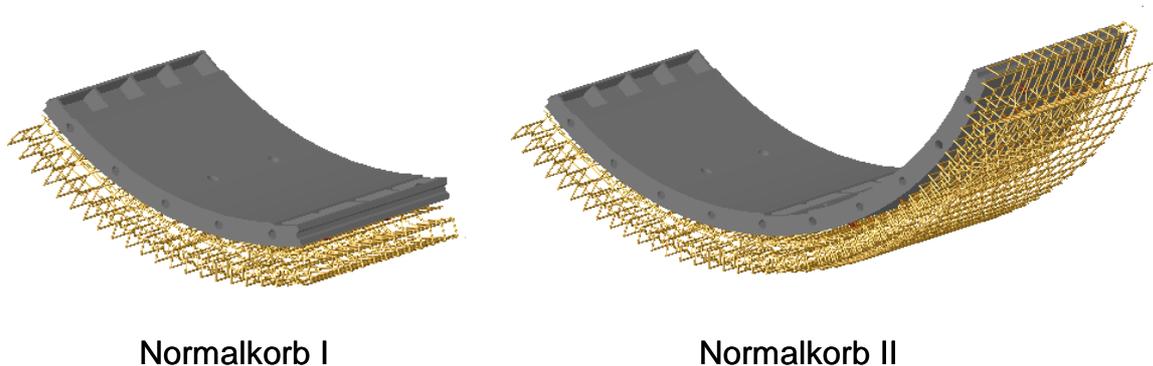
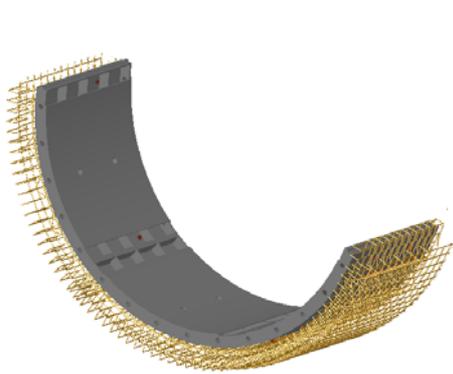


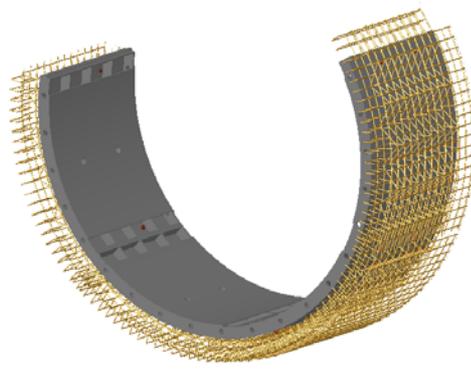
Abb.4-25: Schalenelement, mit Befestigung, Abstandshalter und Bewehrungskorb

Die einzelnen Schalungselemente aneinandergesetzt ergeben einen geschlossenen Schalungsring. Mit den daran befestigten Bewehrungskörben entsteht gleichzeitig der geschlossene Bewehrungsring.

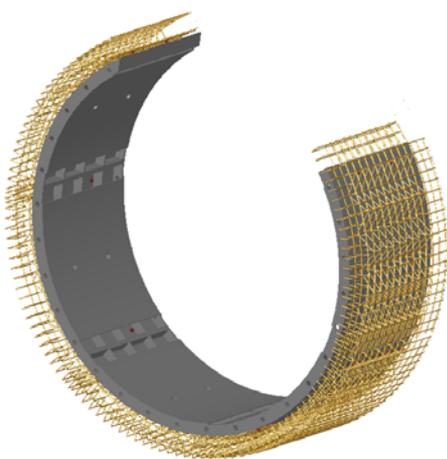




Normalkorb III



Normalkorb IV



Flankenkorb rechts



Flankenkorb links



Schlußkorb

*Abb.4-26: Schematischer Schalungs- und Bewehrungsringbau*

Analog zu den im nächsten Kapitel beschriebenen Schalungselementen, gibt es Bewehrungskörbe für die einzelnen Typen der Schalungselemente.

Unterschiede bestehen in der Seite der ausragenden Überlappungsbewehrung (Federn) in tangentialer Richtung sowie deren Gegenstücke (Nuten).

Bei den Überlappungsbewehrungen in axialer Richtung gibt es keine Unterschiede.

Es gibt also vier verschiedene Typen von Bewehrungskörben:

- Normal-Korb (I, II, III, IV)
- Flanken-Korb links
- Flanken-Korb rechts
- Schlußkorb

*Normalkorb:*

Der Normal-Korb hat in Vortriebsrichtung gesehen, die tangentiale Überlappungsbewehrung auf der im Uhrzeigersinn rechten Seite

Die drei Normalkörbe, Normalkorb I, -II, -III und -IV unterscheiden sich durch ihre unterschiedliche Konizität, welche für die Kurvenfahrt erforderlich sind.

*Flanken-Korb rechts*

Der Flanken-Korb rechts unterscheidet sich vom Normal-Korb nur an der Axialbewehrung. Diese ist im tangentialen Stoßbereich zum Schlußstein, wegen der Schlußstein Stoßausbildung auch in diesem Übergangsbereich vorhanden. Weiterhin sind bereits Klauen mit Verschraubungsbolzen an der Umfangsbewehrung angebracht die eine effiziente Schlußkorbmontage ermöglichen sollen.

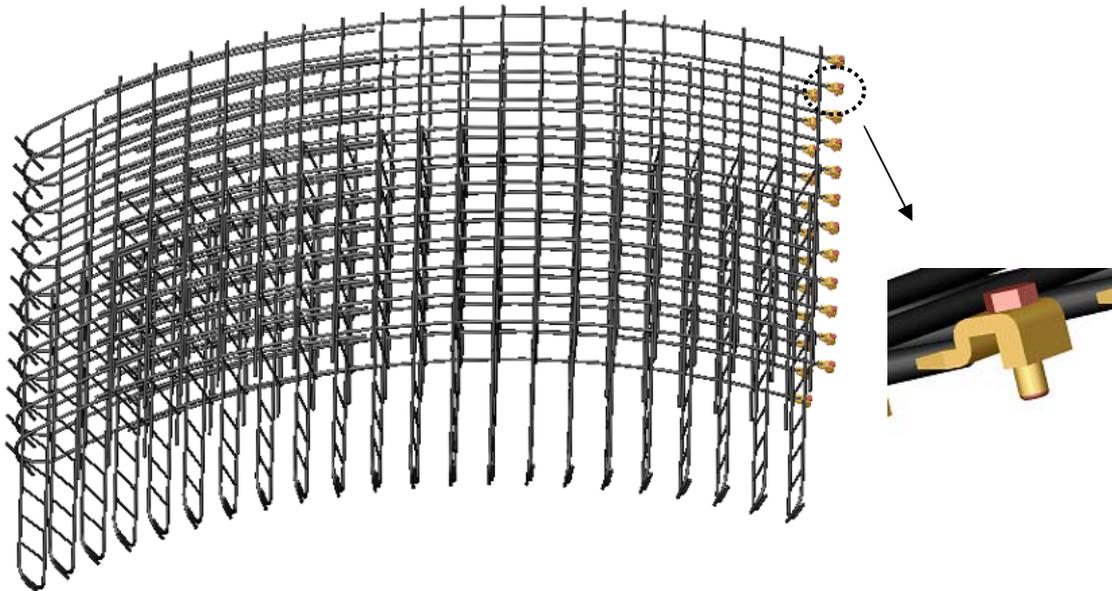


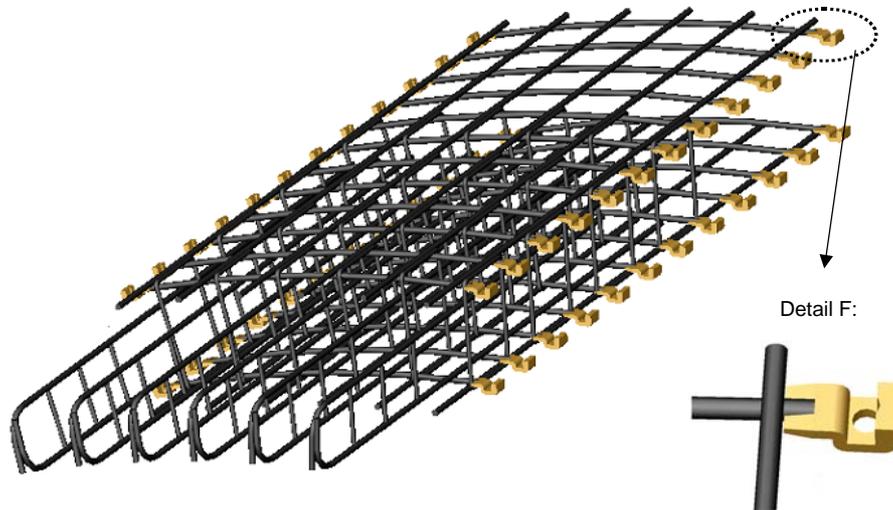
Abb.4-27: Flanken-Korb rechts

*Flanken-Korb links*

Der Flanken-Korb links besitzt anstatt der Feder in Umfangsrichtung die Vorbereitung der Klauenkupplung, ähnlich wie der Flanken-Korb rechts.

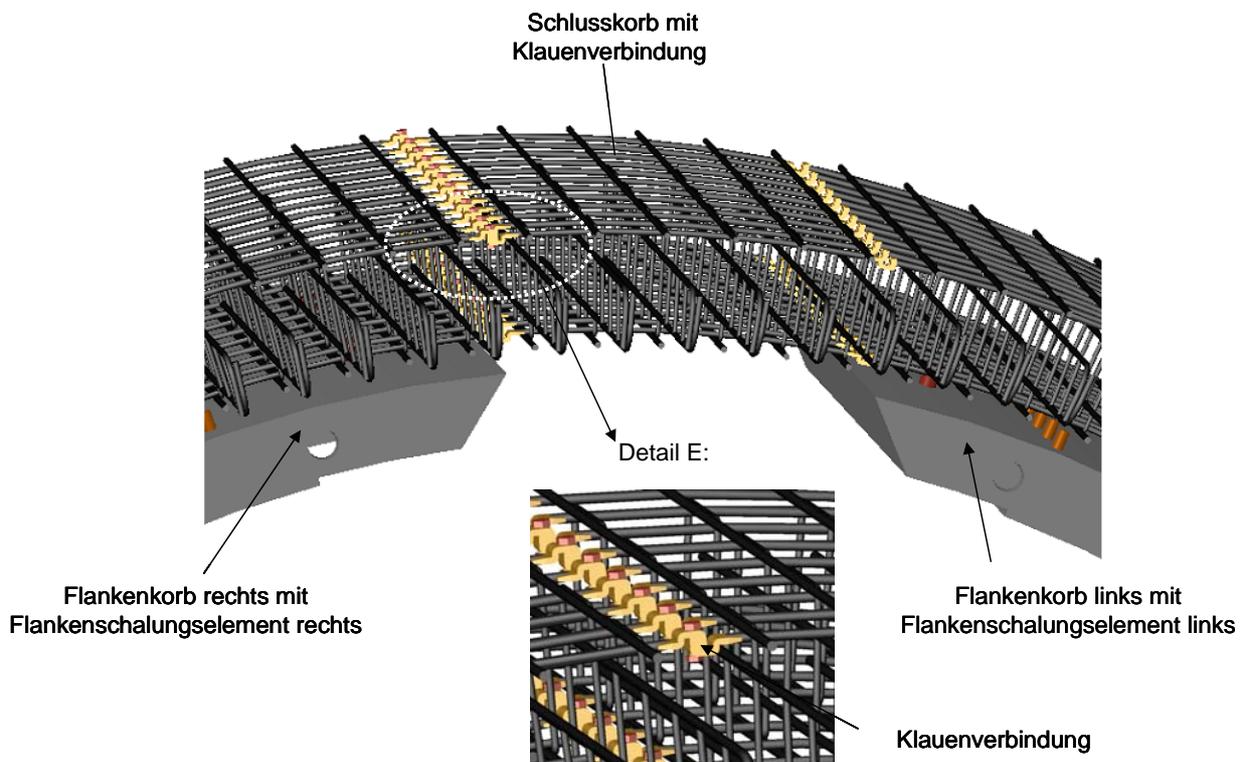
*Schlusskorb:*

Der Schlusskorb besitzt keine Überlappungsbewehrung, da ansonsten ein Versetzen des Schluss-Schalungselementes nicht möglich wäre. Statt dessen besitzt er an beiden Seiten Klauen, welche in Verbindung mit den Klauen der Flankenkörbe eine Klauenkupplungsverbindung darstellen.



*Abb.4-28: Schlusskorb mit Klauen für Klauenverbindung*

Der Schlusskorb wird als letzter Bewehrungskorb versetzt und mit den bereits installierten Flankenkörben verschraubt.



*Abb.4-29: Schlusskorb mit Flanken-Korb links und recht*

Die einzelnen Bewehrungskörbe werden gemeinsam mit der Schalung versetzt, mit Ausnahme des Schlußkorbes. Dieser wird mit einer separaten Adapterplatte, welche auf dem Erektor ausfahrbar montiert ist, installiert, so daß ein manuelles Verschrauben der Schraubbolzen der Klauenkupplung (Schlagschrauber) möglich bleibt. Voraussetzung für das Einfädeln des Schlußkorbes in der Lücke der bereits installierten Flankenkörbe ist eine feinfühlige Steuerbarkeit des Erektors. Nachdem der Schlußkorb gesetzt und die Bolzen der Klauenkupplung angezogen sind, wird das noch fehlende Schluß-Schalungselement in den noch verbleibenden Zwischenraum der Schalung gesetzt.

### 4.4 Schalung

#### 4.4.1 Aufbau, Herstellung und Kurvenfahrt

Die Stahlschalung, welche die Betonschale während des Abbindeprozesses tunnelseitig stützt, besteht aus Schalungsringen eines Typs, welche je nach Kurvenradius gegeneinander verdreht eingebaut werden können. Dieses Prinzip ist angelehnt an das Universalringverfahren, welches bei Schildvortrieben mit Tübbingausbau gelegentlich Anwendung findet. Die Verdrehung der einzelnen Ringe zueinander erfolgt um die Tunnelachse. Je nach Verdrehwinkel können unterschiedliche Kurvenradien aufgefahren werden. Voraussetzung hierfür ist eine einseitig konische Gestaltung des Ringes. Je nach gewünschtem, minimalem Kurvenradius (Korrekturradius) ist die Konizität zu wählen. Einseitig deshalb, da der Konus nur an einer Flanke des Ringes auftritt. Die Gegenseite, Vortriebsrichtungsseite, besitzt eine zur Tunnelachse senkrechte Ringfläche. Kombiniert man nun mehrere Ringe und verdreht diese gegeneinander, so ergibt dies eine Röhre im Raum.

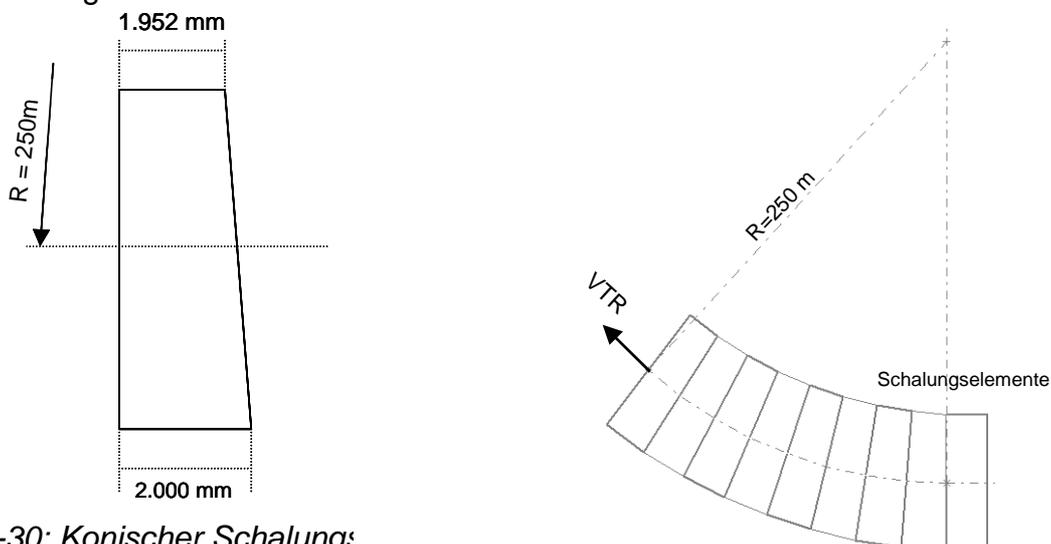


Abb.4-30: Konischer Schalung:

Je nach Trassierung kann so eine wasserdichte Tunnelröhre erstellt werden. Die hier gewählte einseitige Konizität von 48 mm (Schalungsdurchmesser 6,0 m) erlaubt einen minimalen Kurvenradius von 250 m.

Der Schalungsring besteht aus sieben (6+1), einseitig konischen Schalungselementen.

- 4 Normal-Schalungselemente
- 1 Flankenschalungselement links
- 1 Flankenschalungselement rechts
- 1 Schluß-Schalungselement

Prinzipiell sind alle Typen nach folgendem Muster aufgebaut.

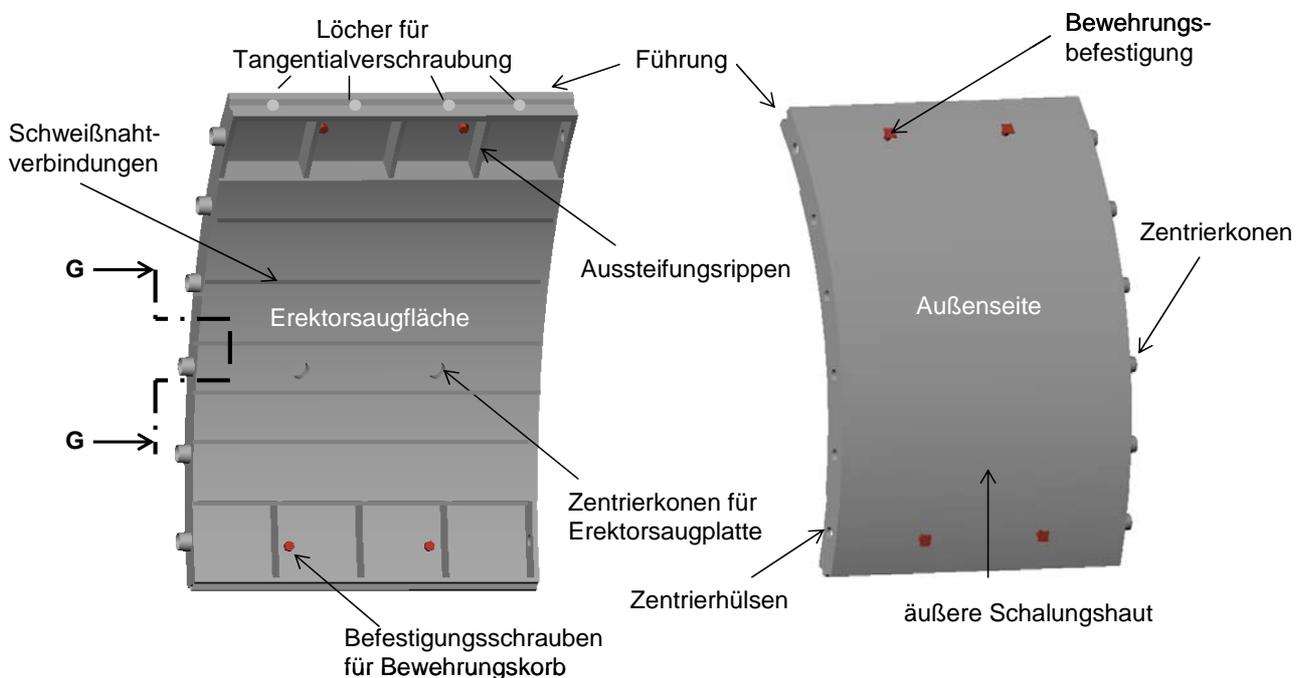


Abb.4-31: Normal-Schalungselement mit Beschriftung

Schnitt G-G:

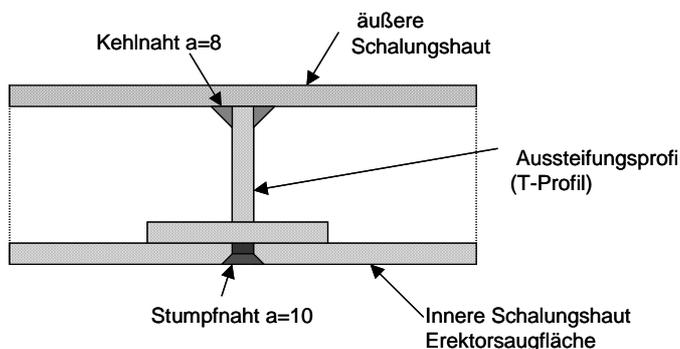


Abb.4-32: Schnitt G-G: aus Abb.4-31

Die Grundkonstruktion besteht aus einem wabenartigen Gerüst aus gewölbten T-Stahlträgern. Auf der Außenfläche wird ein gewalztes Stahlblech aufgeschweißt, welches Bohrungen für die Befestigung der Bewehrungsdübel aufweist (Außenblech). Auf der Innenseite wird ebenfalls ein gewalztes Stahlblech aufgeschweißt, welches zwei konische Bohrungen mit integrierten Konenhülsen sowie Schweißschlitze zum Verschweißen auf den Flanken der T-Stahlträger besitzt (Innenblech). Diese dienen zur Aufnahme der Querkräfte beim Verfahren der Schalungselemente mit dem Erektor. Das innere Stahlblech dient der Vakuumsaugplatte des Erektors als Ansaugfläche.

In der vortriebsseitigen, axialen Schalungsstirnfläche sind in regelmäßigem Abstand ( $9^\circ$ ) Konenhülsen aus Stahl integriert, welche als Zentrierung des nächsten Schalungsrings dienen. Die vortriebsabgewandte Stirnfläche ist mit aufgeschraubten Konen aus Stahl versehen, welche in die Konenhülsen der Gegenfläche passen.

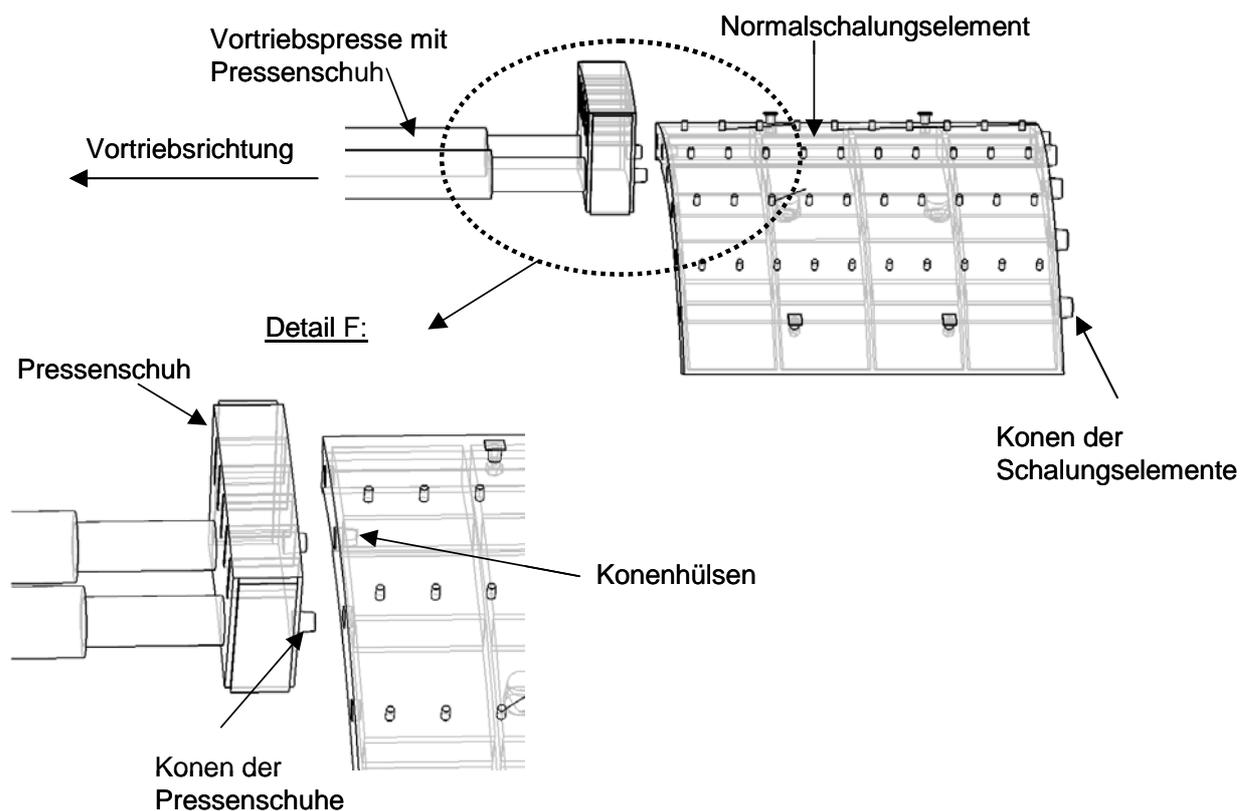


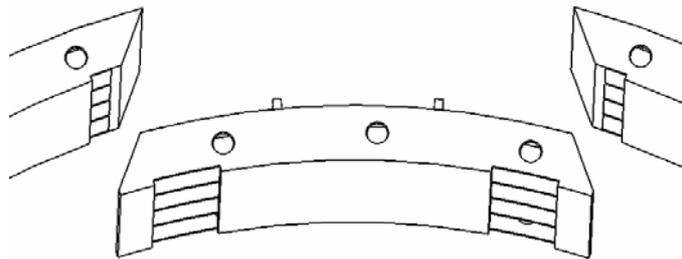
Abb.4-33: Konenverbindung der Schalungsringe

Durch die regelmäßige Anordnung der Konen auf einem genau festgelegten Teilkreis des Schalungsrings ist eine beliebige gerasterte Verdrehung in axialer Richtung der aufeinanderfolgenden Ringe möglich. Der hier ausgeführte Konenabstand beträgt  $9^\circ$ .

Die Konen befinden sich auch auf den rückwärtigen Seiten der Pressenschuhe und bewirken im ausgefahrenen Zustand der Vortriebspresen die Fixierung des zuletzt eingebauten Schalungsrings.

Bei der Fertigung der einzelnen Schalungselemente werden die oben beschriebenen Schalungselementkomponenten lagegenau miteinander verschweißt bevor die Stirnflächen spanend bearbeitet werden. Dadurch kann ein exaktes Versetzen der einzelnen Schalungselemente im Toleranzbereich von 1/10 mm gewährleistet werden.

Die Flankenschalungs- und Schluß-Schalungselemente besitzen an den Kontaktstellen zueinander abgeschrägte und ausgesteifte Kontaktflächen.

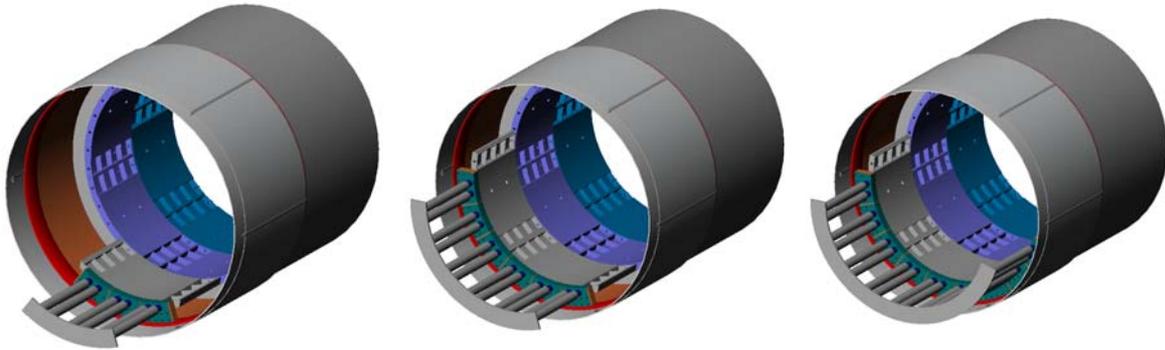


*Abb.4-34: Flankenschalungs- und Schluß-Schalungselement*

Mit den profilierten Führungen der Normalschalungselemente und den abgeschrägten Kontaktflächen der Flanken- und Schluß-Schalungselemente in Umfangsrichtung sowie den Konenverbindungen in axialer Richtung ist eine lagegetreue Kombination der einzelnen Schalungselemente zu einem geschlossenen Schalungsring möglich.

#### 4.4.2 Schalungsringbau

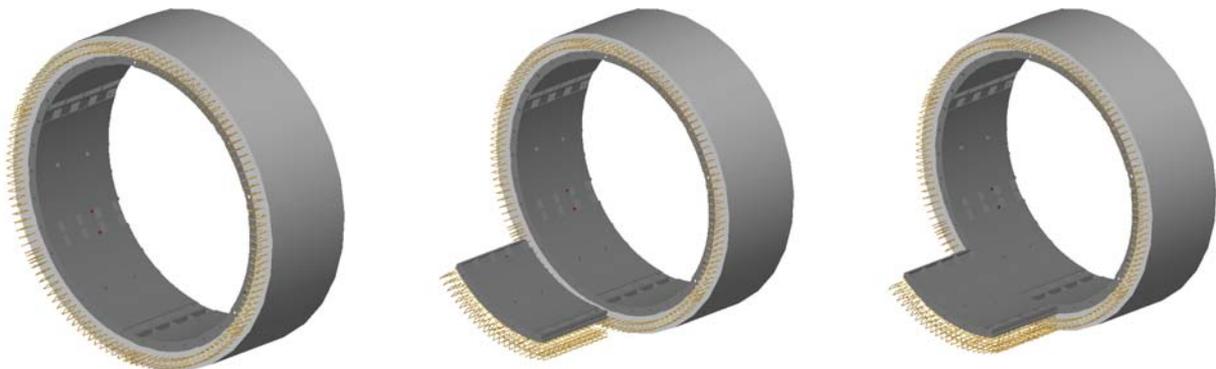
Die Schalungselemente werden im Schutze des Schildschwanzmantels mit dem Erektor positioniert. Zuvor werden an der zu versetzenden Stelle die Vortriebspresen eingefahren.



*Abb.4-35: Setzen der Schalungselemente im Schutze des Schildschwanzmantels*

Die Anzahl der Schalungselemente pro Ring ist abhängig vom Tunneldurchmesser und dem Handling der einzelnen Elemente zur und auf der Vortriebseinheit. Die Anzahl der Normalschalungselemente ergibt sich aus der Gesamtzahl abzüglich des Schluß-Schalungselementes und der beiden Flankenschalungselemente. So sind in diesem Beispiel zunächst vier Normalschalungselemente zu versetzen.

Das Versetzen erfolgt durch positionsgenaues Andocken der Schalungskonen in die entsprechenden Konenlöcher der vorausgehenden Schalung. Dabei ist auf eine versetzte Anordnung der Längsfugen zu achten.



*Abb.4-36: Phasenweises Versetzen des ersten Normal-Schalungselementes*

Die weiteren seitlichen Normal-Schalungselemente müssen nun wegen der seitlich überstehenden Bewehrung gemäß dem Nut- und Feder-Prinzip eingefädelt werden. Dazu wird mit dem Erektor das Normal-Schalenelement samt Normal-Korb in ausrei-

chendem Abstand zur überstehenden Bewehrung soweit axial verfahren, daß die Innenfläche zum letzten Ring parallel ist und die Konen geringen Abstand zur Stirnfläche des letzten Schalungsrings haben (Phase 1). Jetzt kann in Umfangsrichtung geschwenkt werden, bis die Flanken der benachbarten Schalungselemente deckungsgleich sind (Phase 2). In dieser Position stehen die Konen nun direkt über den Konenlöchern des letzten Schalungsrings. Die überlappende Bewehrung des Primärkorbes greift dabei gleichsam federartig in den Freiraum des Nachbarbewehrungskorbes (Normal-Korb). Ein anschließendes Verschieben entgegen der Vortriebsrichtung (Phase 3) bewirkt das Einrasten der Konen mit den entsprechenden Konenhülsen aus dem vorhergehenden Ring.



*Abb.4-37: Phasenweises Versetzen des zweiten Normal-Schalungselementes*

In gleicher Weise werden die weiteren Normal-Schalungselemente und die Flanken-Schalungselemente versetzt.

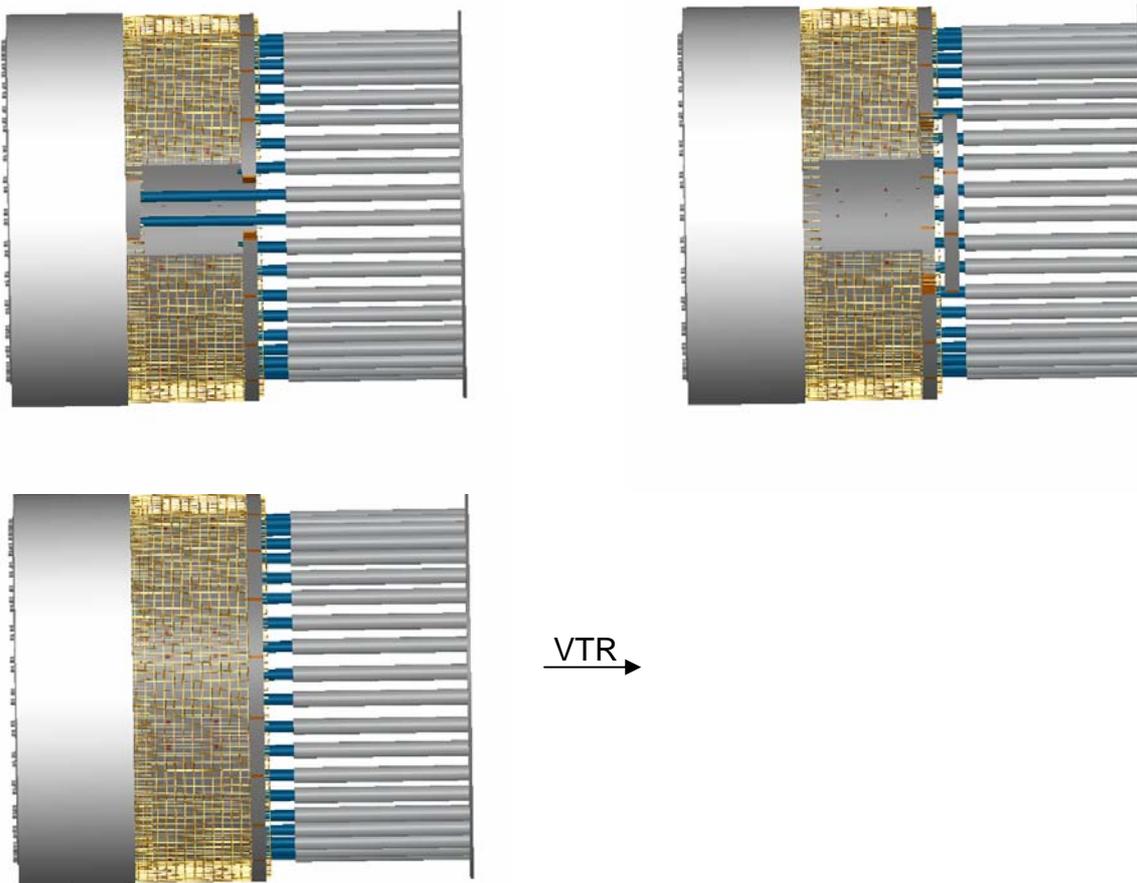
Der Schlußkorb wird, wie bereits erwähnt, zunächst ohne Schluß-Schalungselement in die verbleibende Lücke verfahren und anschließend axial verschoben, so daß die Übergreifungsbewehrung aus dem letzten Betonierabschnitt in die Feder des Schlußkorbes reicht und die Klauen der Klauenverbindung der Umfangsbewehrungsstäbe der Flankenschalungskörbe mit denen des Schluß-Bewehrungskorbes deckungsgleich sind. Jetzt wird die Klauenverbindung geschlossen. Dazu ist der Schluß-Bewehrungskorb auf einer Hilfsadapterplatte fixiert, welche den Zugang zu den Schraubenmuffen per Hand ermöglicht. Unterstützt von Schlagschraubern können so die Klauen verschraubt werden. Siehe dazu Abb. 4-29.

Ist der Schluß-Bewehrungskorb mit den Flankenbewehrungskörben verbunden, kann die Hilfsadapterplatte eingefahren und das Schluß-Schalungselement versetzt werden.

Dazu wird dieses in die verbleibende Lücke verfahren und axial verschoben, so daß die letzten noch freien Konenhülsen aus dem letzten Schalungsring mit denen des

Schluß-Schalungselementes einrasten und durch das Anpressen der Vortriebspres- sen der gesamte Schalungsring fixiert ist.

Vor dem Versetzen der einzelnen Schalungselemente sind die in diesem Bereich befindlichen Vortriebspresen einzufahren. Nach dem Versetzen werden die Vor- triebspresen unmittelbar wieder ausgefahren. Dabei greifen die Konen auf der Soh- le der Pressenschuhe in die Konenhülsen der Schalungselemente und fixieren das Schalungselement in der vorher gewählten Position.



*Abb.4-38: Phasenweises Versetzen des Schluß-Schalungselementes*

### **4.4.3 Demontage der Schalungsringe**

Die Demontage der Schalungsringe erfolgt auf dem Demontage-Nachläufer im hintere- ren Nachläuferbereich. Um Zwangsspannungen zu verhindern, werden die Dübelbe- festigungsschrauben bereits im vorderen Nachläuferbereich, nach dem Betonieren und Ansteifen des Betonringes demontiert. Mit Hilfe eines Demontage-Erektors wer- den die einzelnen Schalungselemente in umgekehrter Montagereihenfolge demon-

tiert. Um ein leichtes Ablösen zu bewerkstelligen, sind die Außenflächen vor der Montage mit Schalöl zu benetzen.

Die demontierten Elemente werden an einen Schalungsförderer übergeben der sich auf der obersten Ebene des Nachläufers befindet. Dort findet im Anschluß die Instandsetzung und Neubestückung der Elemente für den Wiedereinsatz im rückwärtigen Schildbereich statt (siehe auch Kapitel 5).

Die in der Betonschale verbleibenden Dübel können nachträglich zur Befestigung von Brandschutzplatten oder Tunneleinbauten wie Ventilatoren, Feuerschutzdecken usw. verwendet werden. Um sie vor Rost zu schützen, werden sie nachträglich mit Epoxidfarbe behandelt.

### **4.5 Kraftflußbetrachtung der Vortriebskräfte**

Die aus dem Vortrieb der Schildmaschine entstehenden Reaktionskräfte werden direkt über die Vortriebspresen in die Schalungselemente geleitet.

Die Auslegung der Vortriebspresenkräfte ist u.a. von folgenden Faktoren abhängig:

- Geologie/Hydrologie
- Abbauverfahren
- Penetration (Vortriebsgeschwindigkeit)
- Schneidradbestückung
- Schildmantelfläche
- Schildschwanzdichtung (hier Schildschwanzeinbauten)
- Erforderliche Nachläuferschleppkraft
- Steuerbewegungen

Die Kräfte, die zum Vortrieb der Schildmaschine erforderlich sind, werden über Hydraulik in den Vortriebspresen erzeugt. Diese stützen sich üblicherweise auf die Tübbinge des zuletzt versetzten Tübbingringes ab. Die Kräfte werden dabei über Druckkontakt von Ring zu Ring und später über den Verpreßmörtel in die umgebene Geologie geleitet.

Bei dem hier beschriebenen Verfahren greifen die Vortriebspresen nicht an der Betonschale, sondern an den Stirnflächen der Schalungselemente (Schalungstübbings) an. Dadurch wird verhindert, daß die frisch betonierte Betonschale belastet wird. Die Krafteinleitung erfolgt über den Pressenschuh, welcher wie bereits erwähnt, mit Konen versehen ist und dadurch eine zentrische Positionierung auf der vorderen Stirnflächen der Schalungselemente ermöglicht.

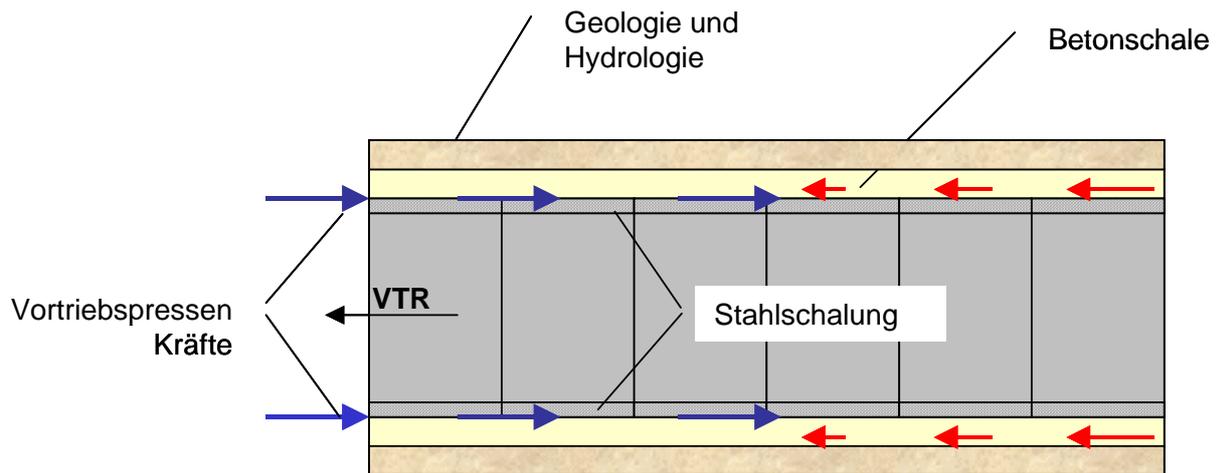


Abb.4-39: Schnitt durch Schildschwanz mit Vortriebskräften und Reaktionskräften

Die Kraft wird von dem Stirnblech in die Stegbleche und weiter in den äußeren Schalungsmantel geleitet. Dort erfolgt die Kraftübertragung an den Beton mittels Mantelreibung. Um zu verhindern, daß die Vortriebskräfte über die Befestigungsschrauben zur Fixierung der Bewehrungskörbe auf die Bewehrung übertragen wird, sind diese vor dem Verschieben zu lösen.

Wie viel Kraft nun welcher Ring aufnimmt, ist von vielen Faktoren abhängig wie z.B.

- E-Modul des Betons
- Belastungen aus Geologie
- Abbindegrad des Betons
- Reibfaktor zwischen der im Abbinden befindlichen Betonschale und dem Stahlmantel der Schalungselemente
- Spannung aus Schwinden des Betonrings

Um die zur Kraftübertragung erforderliche Schalungsmantelfläche näherungsweise zu ermitteln soll folgendes Beispiel dienen.

Grundlage sind die maximalen Vortriebspresenkräfte, die bei der Auffahrung eines U-Bahn Tunnels zwischen Reichstag und Potsdamer Platz (Verlängerung der U 5) im Hydroschildverfahren installiert wurden. Insgesamt wurden dabei 26 Vortriebspresen mit einem Kolben-/Stangenverhältnis von 260/220 mm eingesetzt. Geht man von einer maximalen Beaufschlagung der Pressen mit 360 bar aus ergibt dies eine maximale Vortriebskraft von 45.872 kN, welche über die Schalungsmantelfläche übertragen werden muß.

Reibungsbeiwerte Stahl/...

- Kies=0,55
- Sand=0,45
- Lehm,Mergel=0,35
- Schluff=0,30
- Ton=0,20

Der mittlere Reibfaktor zwischen dem abbindenden Beton und dem Stahlmantel der Schalungselemente wird mit 0,2 gewählt. Die mittlere radiale Belastung aus äußeren Lasten wird mit  $0,24 \text{ N/mm}^2$  gewählt.

Daraus ergibt sich eine Reibkraft von  $48 \text{ kN/m}^2$ . Bei einem Mantelflächendurchmesser von 6,0 m und einer Schalenelementlänge von 2,0 m ergibt dies eine Mantelfläche von  $37,7 \text{ m}^2$ . und somit eine maximale Reibkraft pro Ring von 1.809 kN.

Teilt man nun die maximale Vortriebspresenkraft von 45.872 kN durch die maximal übertragbare Reibkraft pro Schalungsring, ergibt dies eine erforderliche Anzahl von Schalungsringen von mindestens 25 Stück.

Daraus ergibt sich eine erforderlich Gesamtschalungslänge von 50 m.

Die Vortriebskräfte werden somit sektionsweise über die Mantelflächen der Schalungselemente von Schalungsring zu Schalungsring abgetragen.

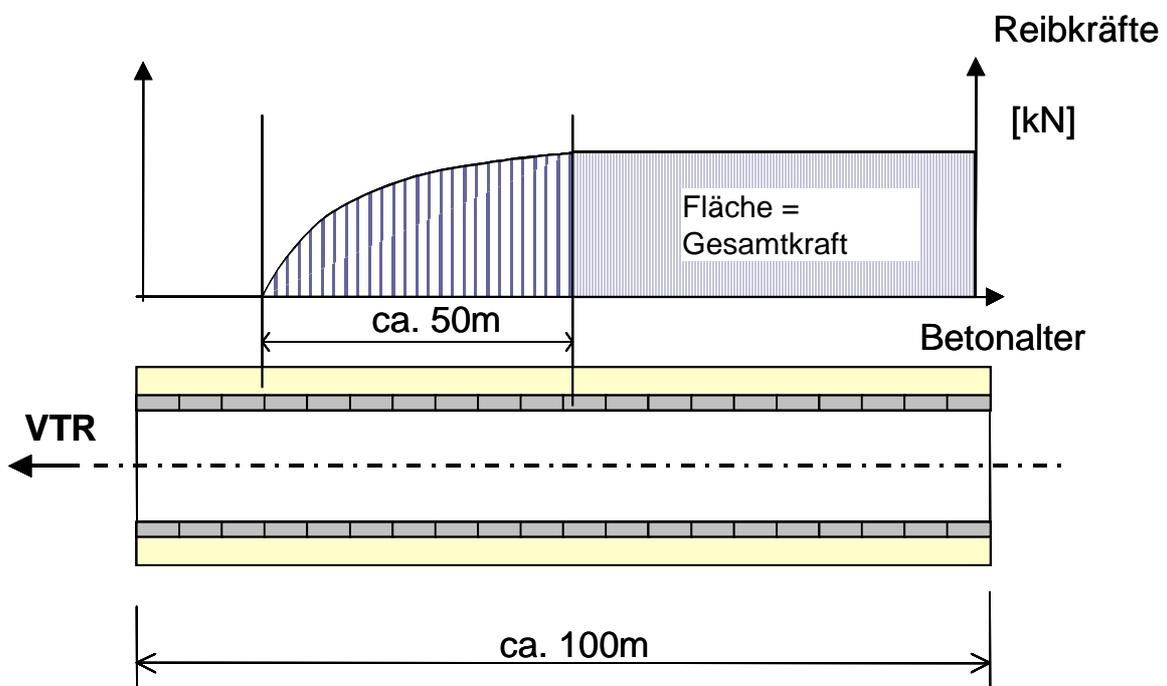


Abb.4-40: Diagramm der kumulierten Reibkraftübertragung über die gesamte Schalungslänge

Diese Berechnung stellt nur eine Abschätzung der erforderlichen Mantelfläche dar. Eine exakte Dimensionierung ist vor der Ausführung mittels Versuchen mit den zum Einsatz kommenden Komponenten erforderlich.

Eine Unterstützung der Kraftübertragung mit Hilfe von angeschraubten Knaggen in der Schalungsaußenhaut, welche vor der Demontage gelöst werden, stellt eine zusätzliche Möglichkeit dar die Vortriebskräfte nicht nur über Mantelreibung in die Betonschale zu übertragen. Dies würde außerdem zu einer Verkürzung der erforderlichen Schalungslänge beitragen.

Auf der sicheren Seite liegend wird im folgenden Konzept eine Schalungslänge von 100 m gewählt.

### 4.6 Der Vortriebszyklus des neuen Verfahrens

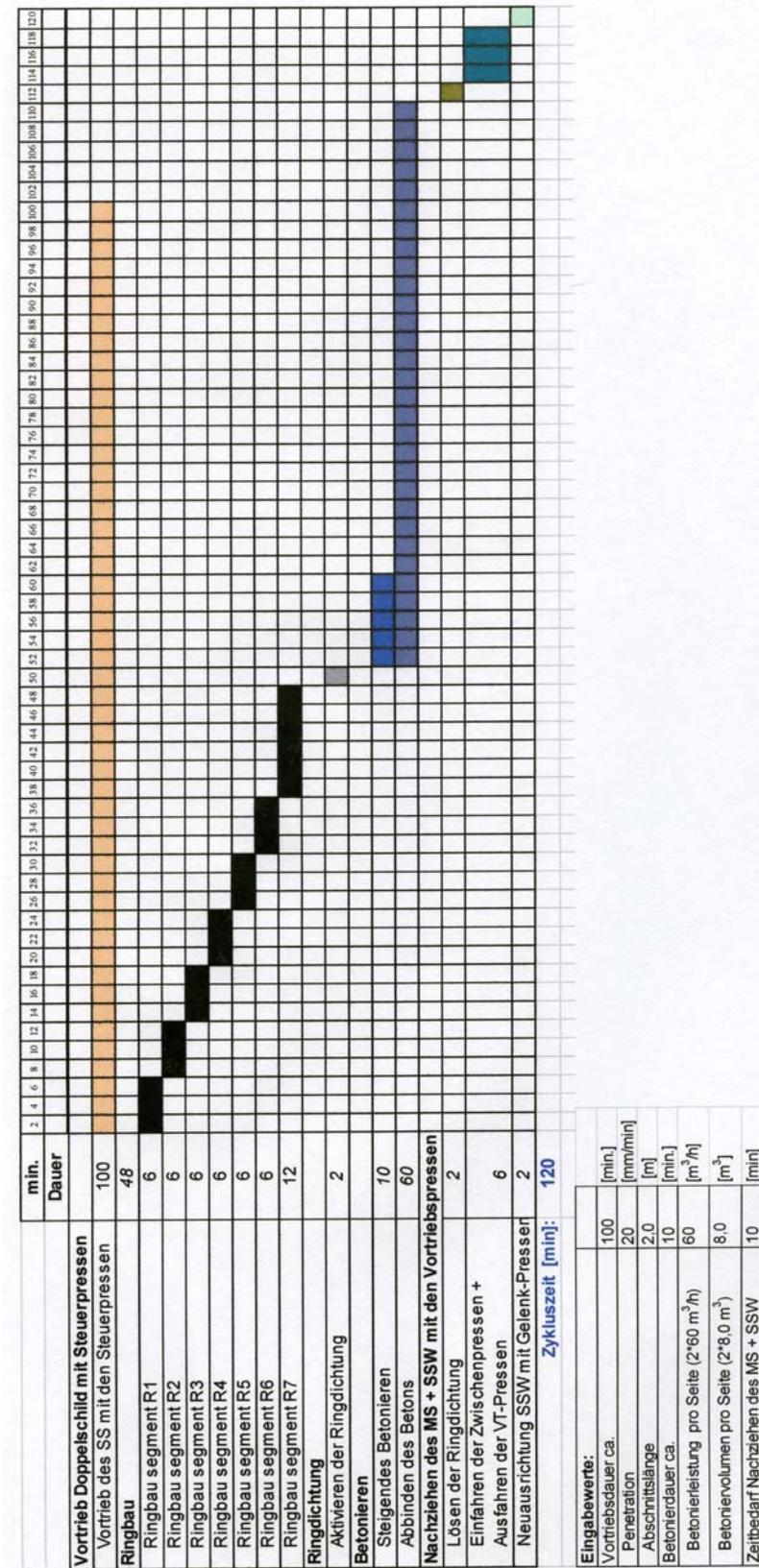


Abb.4-41: Vortriebszyklus

Der Vortriebszyklus des neuen Verfahrens unterscheidet sich von der Tübbingbauweise in der Art, daß anstatt der Tübbinge Schalungselemente versetzt werden sowie weitere Prozeßschritte in den Ablauf integriert sind.

Diese sind:

- Einfüllen des Betons (Betonieren)
- Abbinden des Betons
- Aktivierung und Deaktivieren der Ringdichtung

Der Vortrieb der Vortriebseinheit findet entkoppelt von den Prozessen Betonieren und Abbinden sowie Nachziehen der Schildschwanzereinheit statt. Dies ist durch den Einsatz eines Doppelschildes möglich. Beim Doppelschild ist im Vergleich zum Normalschild der Schneidenschuß, relativ zum Mittelschuß, um die Vortriebslänge von 2,0 m verschiebbar ausgeführt. Dadurch ist gewährleistet, daß der Schildschwanz während des Vortriebes ortsfest verbleiben kann. Bei einer durchschnittlichen Penetration von 20 mm/min dauert das Auffahren einer Abschlagslänge von 2,0 m, 100 Minuten. Danach wird die Schildschwanzringdichtung gelöst, der Schildschwanz nachgezogen und ausgerichtet. Das Nachziehen erfolgt mit den Vortriebspresen, das Ausrichten mit Hilfe der Schildgelenkpressen. Anschließend findet der Ringbau statt. Dabei werden die Schalungselemente samt der Bewehrungskörbe nach einem vorher festgelegten Muster versetzt. Die Reihenfolge und Positionierung ist abhängig von der Kurvenfahrt. Nachdem alle Schalungselemente, wie bereits im Kapitel 4.4 beschrieben, versetzt wurden, wird erneut die Schildschwanzringdichtung aktiviert und der Betonierprozeß in Gang gesetzt. Für den Ringbau werden etwa 48 Minuten benötigt, für das Betonieren 10 Minuten. Nach dem Ringbau kann der Vortrieb des neuen Abschnittes erfolgen. Da der Schildschwanz in dieser Zeit ortsfest bleibt, kann der Beton ungehindert bis zu seiner stirnseitigen Ausschalfestigkeit von ca. 1,0 N/mm<sup>2</sup> abbinden. Dies dauert etwa weitere 50 Minuten. Hat der Beton seine Festigkeit erreicht, wird die Schildschwanzringdichtung gelöst und der Zyklus beginnt von vorn. Nach Abschluß des Betonierens wird der Beton in den Leitungen und dem Pumpentrichter sowie Mischer unmittelbar durch das Starten eines automatischen Reinigungsprozesses entfernt. Die Gesamtzykluszeit beträgt somit 120 Minuten.

Damit ist eine maximale theoretische Vortriebsleistung von 24 Metern pro Tag realisierbar.

## 4.7 Der Betonierzyklus

### 4.7.1 Die Betonbereitstellung

Bei dem hier vorgestellten Verfahren wird der Beton vor Ort auf der Tunnelvortriebsanlage hergestellt. Die Anmischung und Verarbeitung erfolgt auf einer mobilen Mischanlage welche auf dem Betonier-Nachläufer installiert ist. Dieser ist Bestandteil der Nachläufer-Einheit, welche näher im Kapitel 5.4 beschrieben wird. Auf ihm befinden sich alle Komponenten die zur Herstellung und Verarbeitung des gesteuerten Schnellbetons wie auch des Verpreßmörtels benötigt werden.

Diese sind:

- Bindemittel (Zement)
- Zuschlag
- Fließmittel
- pulverförmiger und flüssiger Verzögerer
- pulverförmiger und flüssiger Beschleuniger

Dadurch ist sowohl die Verarbeitung eines fertigen Trockenbetongemisches als auch deren komponentenweise Bereitstellung und Verarbeitung möglich.

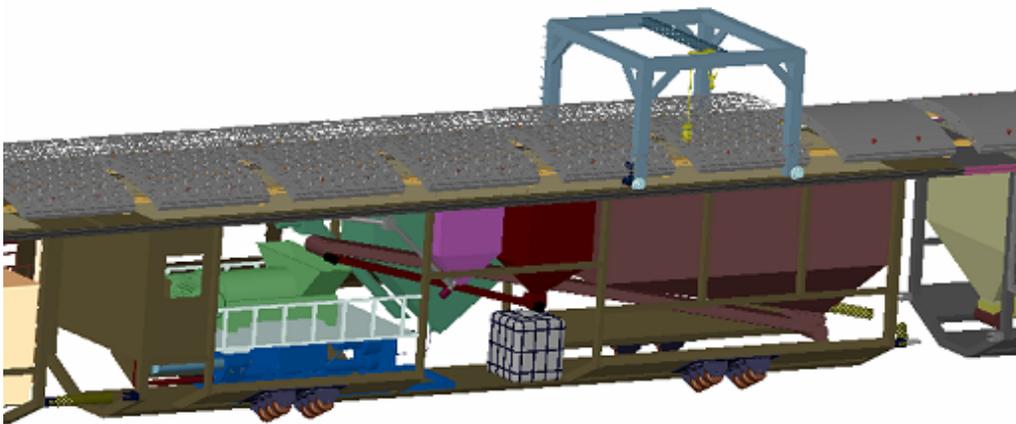


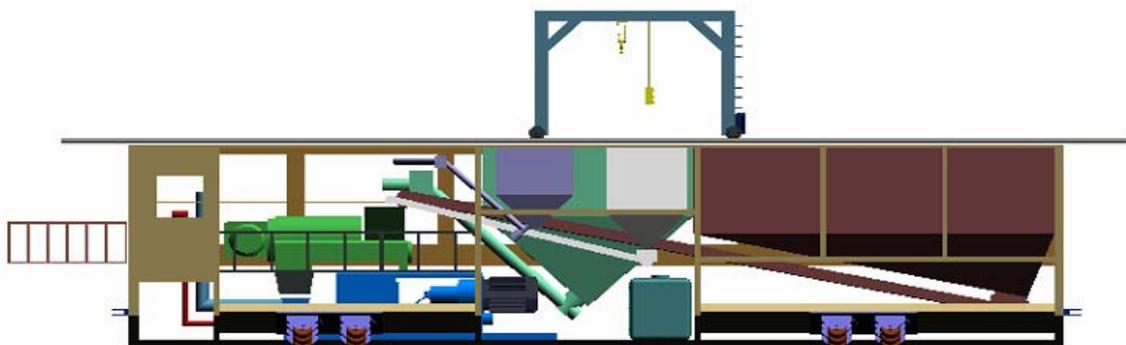
Abb.4-42: Betonier-Nachläufer

Die einzelnen Betonkomponenten (außer Zugabewasser) werden im hier vorgestellten Konzept im gleisgebundenen Betrieb zu dem Nachläufer transportiert. Dabei befinden sich die Zuschläge und der Zement in separaten Silobehältern, welche auf den Plattformwagen der Züge montiert sind. Die flüssigen Komponenten wie Fließmittel, flüssiger Beschleuniger und Verzögerer befinden sich in Gitterboxen von ca. 1.000 Liter Fassungsvermögen.

Weitere pulverförmige Komponenten (Verzögerer, Beschleuniger), deren Mengenbedarf sehr gering ist, werden als Sackware oder in kleinen Big Bags angeliefert.

Der Transport der Gitterboxen, Sackware und Big Bags vom Plattformwagen im weiter hinten befindlichen Logistik-Nachläufer zu den Vorratsbehältern auf dem Betonier-Nachläufer, erfolgt mit dem auf der obersten Ebene verfahrbaren Kranwagen. Die Zuschläge und der Zement, deren mengenmäßiger Bedarf am größten ist, werden pneumatisch von den Silobehältern auf dem Zug in die Vorratsbehälter im Betonier-Nachläufer gefördert. Dazu ist über die Transportstrecke je eine Förderleitung verlegt, welche in den gewünschten Behälter mündet. Ist der Zug eingefahren, muß ausschließlich diese Leitung an das Silo bzw. das entsprechende Förderorgan angeschlossen werden und über ein Ventil die Druckluft zur Förderung freigeschaltet werden. Beim Zement reicht zur Förderung die Beaufschlagung des Liefersilos mit Druckluft aus. Beim Zuschlag ist je nach Abstufung der Sieblinie ein Abzugsorgan (Förderschnecke) sowie eine Druckluftschleuse (Tandemsendeinrichtung), ähnlich dem Transport von Trockenspritzbetonen, vorgesehen. Um die exakte Einhaltung der Sieblinie gewährleisten zu können werden Kornfraktionen von 0-2mm, 2-8mm und 8-16mm getrennt in separate Silos gefördert. Dort stehen sie dem anschließenden Dosier- und Mischvorgang zur Verfügung.

Jeder Vorratsbehälter für pulverförmige Komponenten ist auf der Bodenseite des konisch zulaufenden Behälters mit einer horizontalen Förderschnecke ausgestattet. Diese führt das Material der in Serie geschalteten Dosierschnecke zu und bewirkt eine gleichmäßige und konstante Materialförderung.



*Abb.4-43: Vorratsbehälter mit Austrags- und Dosierorgane*

Die Drehzahl beider kontinuierlich arbeitenden Förderorgane ist aufeinander abgestimmt, so daß ein konstanter Füllungsgrad der Dosierschnecke gewährleistet wer-

den kann. Diese Dosierschnecken können bis zu einer Neigung von 45° angeordnet werden und münden in den Einlaufbereich des Durchlaufmischers. Dort erfolgt die Wasserzugabe und homogene Durchmischung der einzelnen Fraktionen. Ausschlaggebend für die Güte der Durchmischung ist die eingebrachte Mischenergie auf einer möglichst langen Mischstrecke. Form, Art und Anordnung der Mischerpaddel im Durchlaufmischer sind auf die entsprechende Rezeptur angepaßt. Um die Verweilzeit des Mischgutes in der Mischstrecke zu erhöhen wurden Schwellbleche im Auslaufbereich des Mischerrohrs integriert. Mehr Informationen bieten die entsprechenden Hersteller von Durchlaufmischern wie BHS Sonthofen, WAM, m-tec usw. Die flüssigen Komponenten wie Verzögerer oder Beschleuniger werden ebenfalls mittels Dosierpumpen im Trichterbereich des Mischers zudosiert. Das Fließmittel wird direkt in den Dosierstrom des Anmachwassers injiziert. Je nach gewünschten und eingestellten Betonvolumenstrom sind die einzelnen Dosier-, Förder- und Mischorgane zu steuern. Dies geschieht über einen in der Bedieneinheit integrierten Regelkreis.

### **4.7.2 Der Betonierprozeß**

Vom Auslauftrichter des Durchlaufmischers gelangt der frisch hergestellte Ort beton in den Aufgabetrichter der darunter angeordneten Betonpumpe. Dort ist ein Füllstandssensor integriert, der den Durchlaufmischer und die daran angeschlossenen Dosier- und Förderorgane steuert. Im Steuerstand wird vom Maschinenfahrer eine Betonierleistung vorgegeben und ein Signal an die Antriebshydraulik der Betonpumpe geschickt. Ein Regelkreis fragt zunächst ab, ob ausreichend Beton im Trichter der Betonpumpe ist. Ist dies nicht der Fall wird der Betonanmischprozeß gestartet. Nach Überschreiten einer festgelegten Füllstandsmarke beginnt der Betoniervorgang. Ein Rührwerk im strömungstechnisch optimierten Trichter der Pumpe stellt dabei einen konstanten Füllungsgrad der Pumpe sicher.

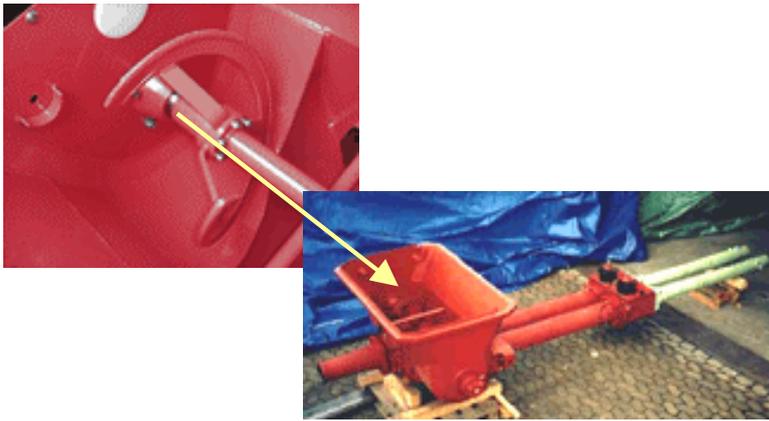


Abb.4-44: Rührwerk im Trichter der Betonpumpe (Fa. Waitzinger)

Über die Füllstandssensorik werden das Freifahren des Trichters und das schädliche Ansaugen von Luft während des Betoniervorganges vermieden. Die angesaugte Betonmenge wird über die Antriebshydraulik der Betonkolben über die S-Rohrweiche in die Förderleitung gepreßt.

Gleichzeitig erfolgt das Ansaugen des zweiten Betonierkolbens der Doppelkolbenpumpe. Ist der Hub abgeschlossen, schlägt das S-Rohr im Trichter in Millisekundenschnelle um und verbindet den soeben gefüllten Betonierkolben mit der Förderleitung. Dadurch wird ein nahezu kontinuierlicher Betonierstrom in der durch den Nachläufer zur Einbaustelle verlegten Betonförderleitung erzeugt.

An der Einbaustelle (Übergang der Förderleitung zur Betonierkammer) ist ein eigens entwickeltes Betonierventil angebracht. Dieses ermöglicht die serielle Versorgung mehrerer in Reihe geschalteter Betonierstellen aus einer Zuleitung.

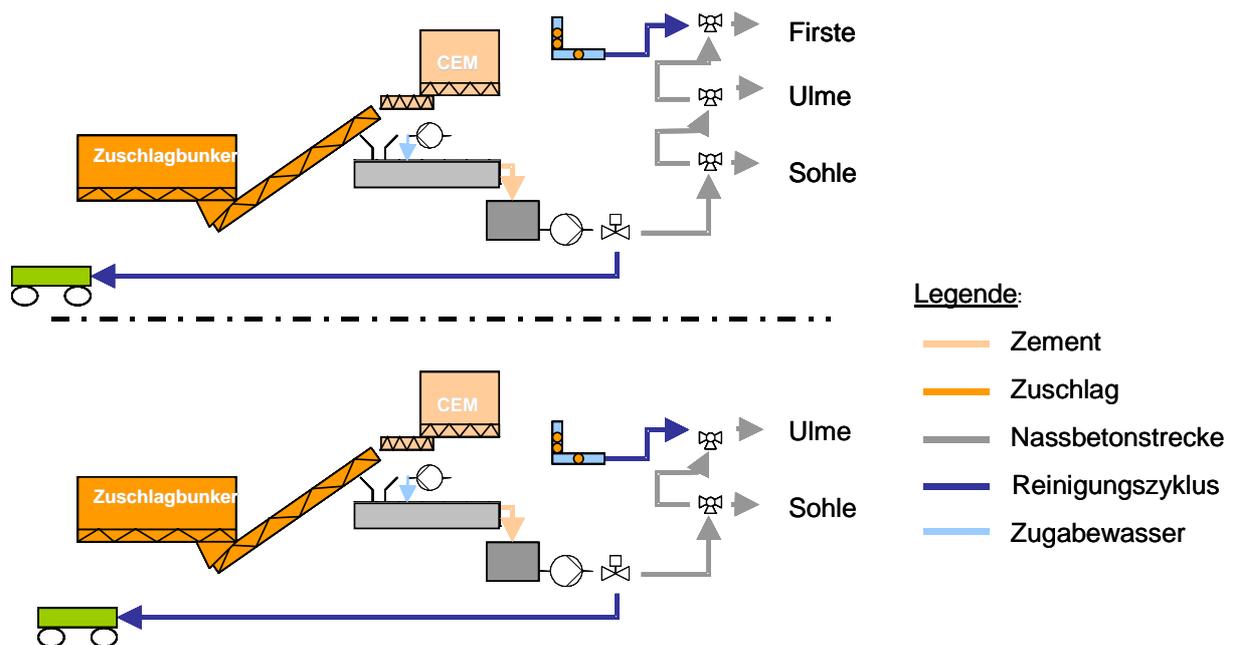


Abb.4-45: Betonierschema

Das Betonierventil selbst, besteht aus einem schwenkbaren Betonrohrbogen der von einem Flachstahlringsegment gefolgt wird. In der Betonierstellung steht die Rohröffnung direkt über der Betonieröffnung der Schalung.

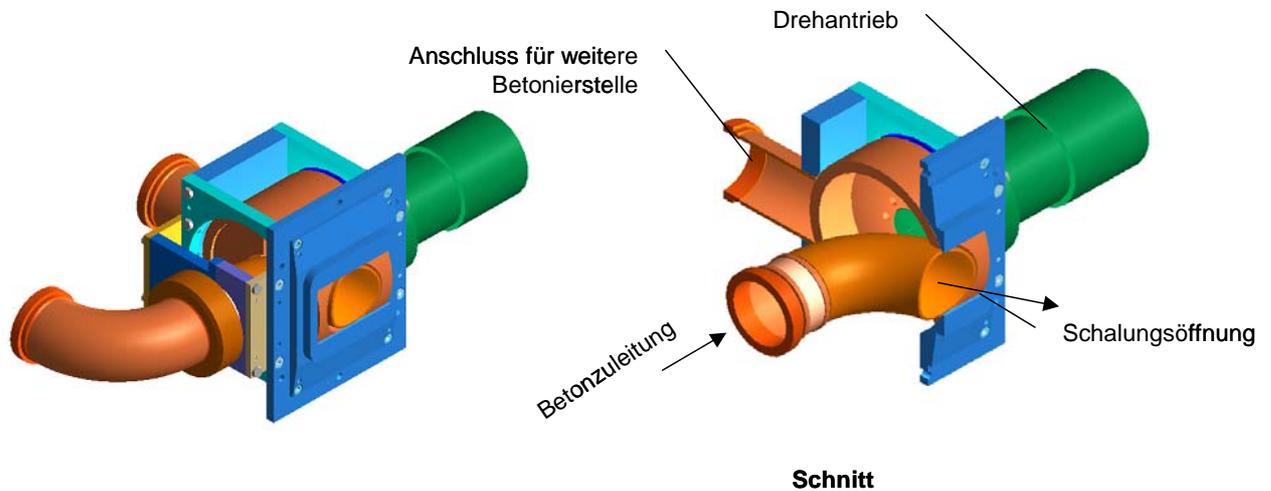


Abb.4-46: Betonierventil in Betonierstellung

Ist die erforderliche Betonierhöhe (Ulme) erreicht, schwenkt der Rohrbogen des Betonierventils um  $180^\circ$  weiter in eine Stellung, in der ebenfalls eine Betonierleitung angeschlossen ist. In dieser Stellung kann eine weitere Betonierstelle versorgt werden. Gleichzeitig verschließt das mit dem Rohrbogen mitgedrehte Flachstahlsegment die vorherige Betonieröffnung bündig.

Nach diesem Prinzip wird jede Betonierstelle versorgt und anschließend verschlossen.

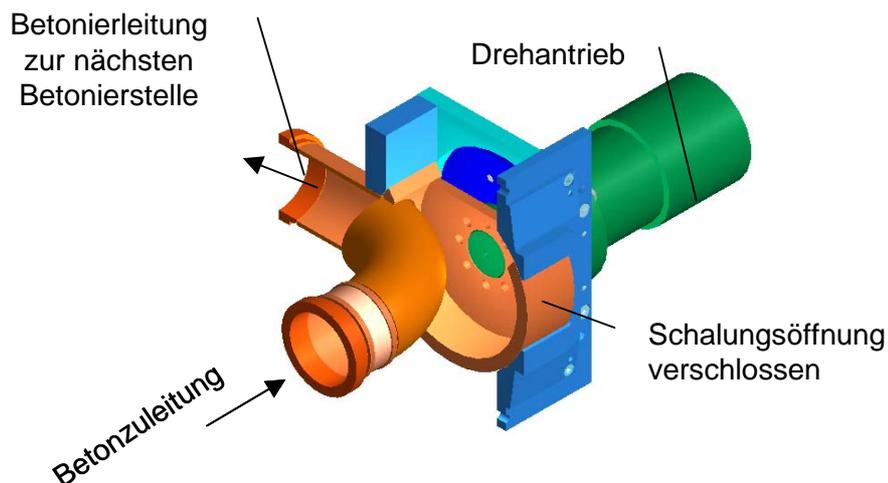


Abb.4-47: Betonierventil in Durchschaltstellung

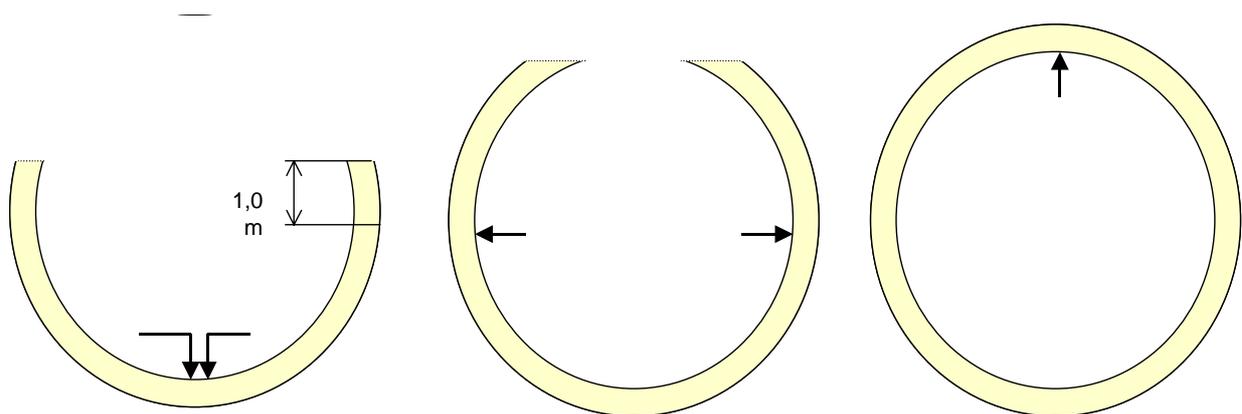
Eine speziell entwickelte Dichtungskonstruktion gewährleistet ein bündiges und druckdichtes Andocken des Rohrbogens an die Folgebetonierleitung. Dazu ist an der

Kontaktstelle ein Verschleißring über einen Elastomerring vorgespannt eingebaut. Diese Technik wird ebenfalls beim Dichten der S-Rohr Übergänge zur Förderleitung eingesetzt. Die Drehbewegung des Betonierventils (Rohrbogen mit Flachstahlringsegment) wird über einen hydraulisch vorgespannten Drehmomentmotor bewerkstelligt. Falls sich Zuschlagkörner verklemmen und die Rotation verhindern, wird der Drehvorgang so lange wiederholt, bis das eingeklemmte Korn verdrängt oder zerstört wurde.

### *Betonierreihenfolge*

Die Betonierreihenfolge ist steigend, beginnend von 2 Injektionsstellen in der Sohle, von denen aus bis zu 1m über die Ulme verfüllt wird. Anschließend werden die Sohlventile geschlossen und die weitere steigende Verfüllung des Betonierringes kann über die beiden Ulmenventile erfolgen. Ist ein 95%-iger Füllstand erreicht wird das letzte Betonierventil in der Firste aktiviert und die vollständige Verfüllung mittels einer Pumpeneinheit mit minimaler Betonierleistung abgeschlossen.

Je eine der beiden installierten Betoniereinheiten versorgt jeweils eine Ringseite. Durch die Reduzierung der Pumpenleistung am Ende des Pumpvorgangs soll eine Drucküberschreitung in der Betonierkammer verhindert werden (Gefahr der Schalungsdeformation). Der Füllstand in der Betonierkammer ist über Drucksensoren an den Pressenschuhen sowie über eine Hubzählvorrichtung an der Betonpumpe feststellbar.



*Abb.4-48: Betonierreihenfolge*

Ein zusätzliches Überdruckventil am letzten Betonierventil in der Firste dient als zusätzliche Absicherung der Betonierkammer. Das Funktionsprinzip ist ein vorgespannter Hydraulikzylinder, der die flexible Schlauchleitung der Betonzuleitung an das Be-

tonierventil andrückt, und durch die konische Verbindungsausbildung druckdicht verschließt.

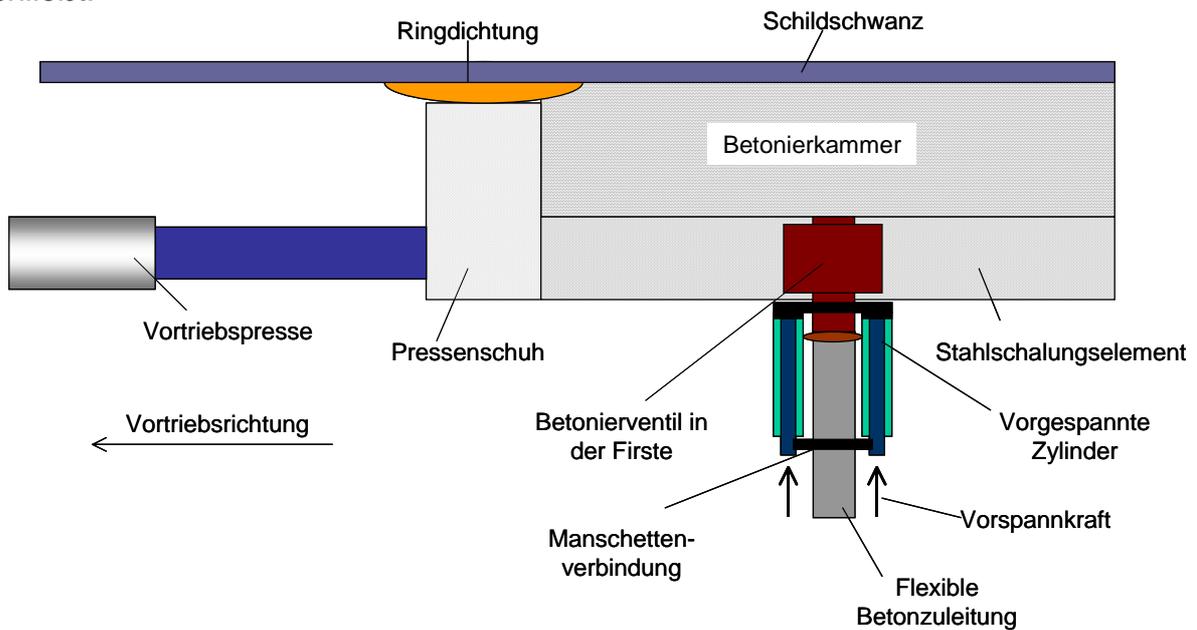


Abb.4-49: Schema Überdruckventil inaktiver Zustand

Steigt nun der Druck in der Betonierkammer über den im Zylinder eingestellten Grenzwert, öffnet der vorgespante Zylinder einen Spalt zwischen dem Betonierventil und der flexiblen Betonzuleitung und der überschüssige Beton kann ins Freie strömen. Ein Sensor an der Kolbenstange erkennt sofort die Gefahr, stoppt den Betonierprozeß und verschließt das Betonierventil. Dadurch ist sichergestellt, daß die Betonierkammer und die angrenzenden Bauteile vor Überlastung aus dem Betonierprozeß geschützt sind.

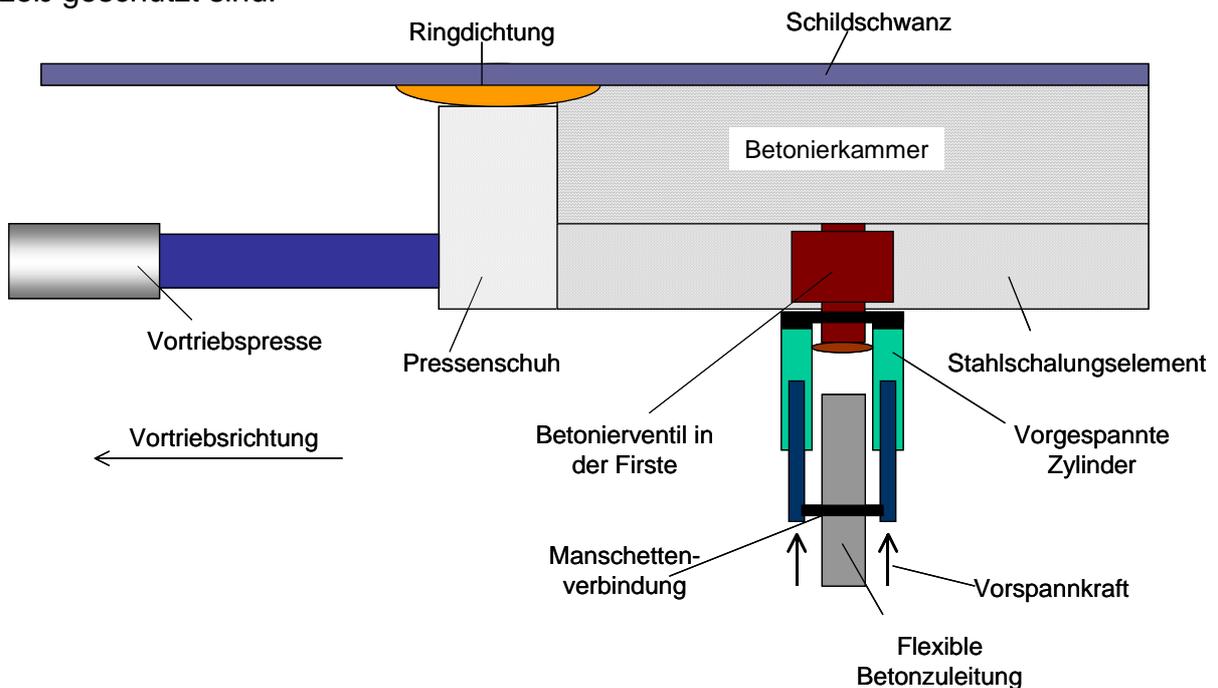


Abb.4-50: Schema Überdruckventil aktivierter Zustand

Die Betonierventile sind an der Innenseite der Schalungselemente angebracht, jedoch an den Stellen an denen die äußere Schalungshaut zugänglich ist.

Vor jedem Betonierprozeß sind diese vom zuletzt betonierten Schalungsring zu demontieren und an dem frisch gesetzten Schalungsring zu montieren. Dies geschieht mit Hilfe des Erektors. Entsprechende Aussteifungskonstruktion und Führungsschienen sollen ein einfaches Versetzen der Betonierventile samt flexiblen Zuleitungen erleichtern.

### 4.7.3 Reinigungsprozeß

Das am Ende der Betonierkette versorgte Betonierventil in der Firste hat neben der Betonierstellung eine Reinigungsstellung. Diese Stellung entspricht der Durchschaltstellung der zuletzt versorgten Betonierventile mit dem Unterschied, daß an der Stelle der weiteren Förderleitung ein Rohrstück zum Aufbringen eines Reinigungsballes angebracht ist.

Um eine manuelle Ballaufgabe zu vermeiden, wurde die folgende automatische Ballaufgabe-vorrichtung entwickelt.

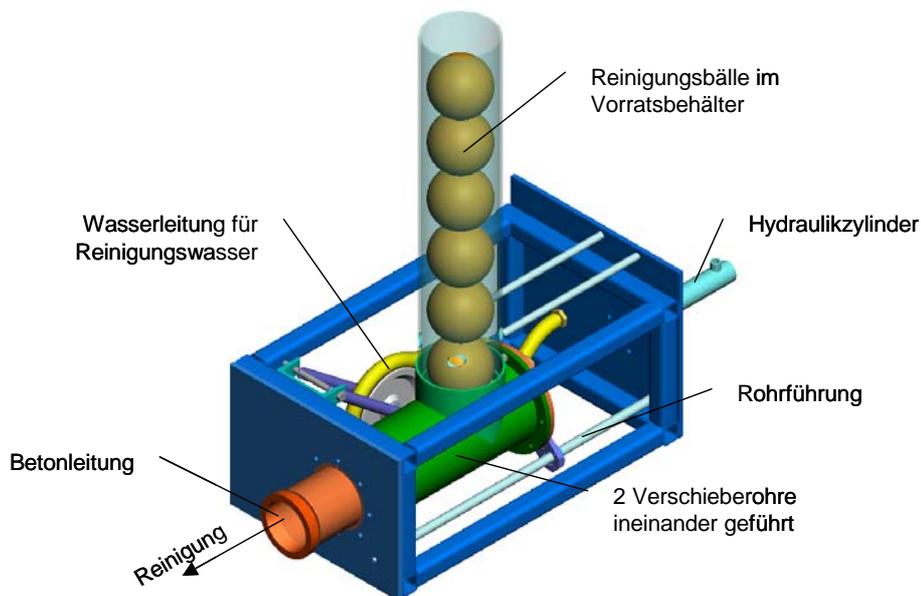
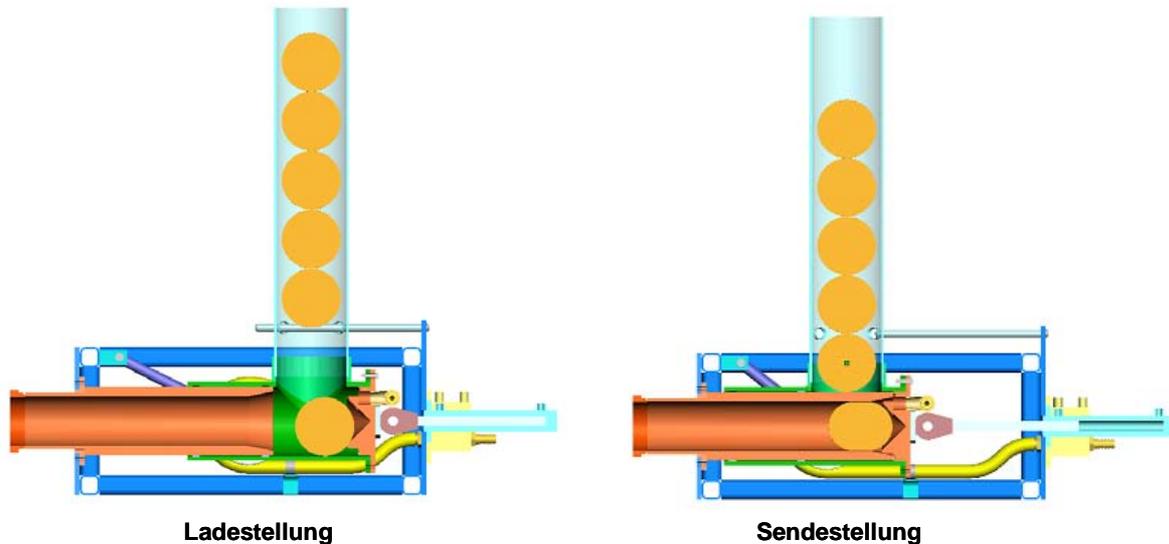


Abb.4-51: automatische Ballaufgabevorrichtung (Ansicht)



*Abb.4-52: automatische Ballaufgabeeinheit in Lade- und Sendestellung (im Schnitt)*

Das Funktionsprinzip entspricht dem eines Repetiergewehres. Das äußere zweier ineinander geführter Rohre besitzt neben einer Öffnung am Umfang ein darüber aufgeschweißtes Rohr (Vorhalterrohr) in dem die Reinigungsbälle vorgehalten werden. Das innere Rohr dagegen besitzt die Maße der Förderleitung und ist an diese druckdicht angeflanscht. Zum Laden eines Reinigungsballes wird das äußere Rohr mittels eines Hydraulikzylinders in eine rückwärtige Stellung verfahren. In dieser Stellung kann der Ball nach unten in die Leitung fallen. Unterstützt wird er dabei mit Druckluft, die im Vorhalterrohr aufgebracht wird. Durch zwei gleichzeitig im Eingriff befindliche Stäbe durch die Wandung des Vorhalterrohres wird das Nachrutschen und Verklemmen weiterer Bälle vermieden. Anschließend wird das äußere Rohr wieder nach vorne verfahren und der Ball (durch einen Dorn zentriert) in das innere Rohr gequetscht. An der Kontaktstelle (Bodenseite des Laderohres) ist eine Dichtung angebracht, die den Raum hinter dem Ball zur Atmosphäre hin abdichtet. Im Anschluß wird das Druckluftventil (alternativ Wasserventil) auf der Bodenseite des Laderohres geöffnet und der Ball in die Förderleitung gepreßt, bis er an der darin befindlichen Betonsäule anstößt. Diese gilt es aus der Leitung zu entfernen.

Dazu wird der Rückhubmechanismus der Betonpumpe (Doppelkolbenpumpe) aktiviert. Die Betonpumpe schiebt also nicht mehr den Beton aus dem Trichter in die Förderleitung sondern saugt den Beton aus der Leitung zurück in den Trichter. Dies wird durch den Reinigungsball, der am entgegengesetzten Ende der Betonsäule gleichsam wie ein Pfropfen abdichtet, sichergestellt. Gleichzeitig wird der Reinigungsball mit Druckwasser an die Betonsäule angedrückt. Mit diesem Prinzip wird

der schnell abbindende Spezialbeton nach dem Betonierprozeß aus der Leitung und den Betonierventilen entfernt.

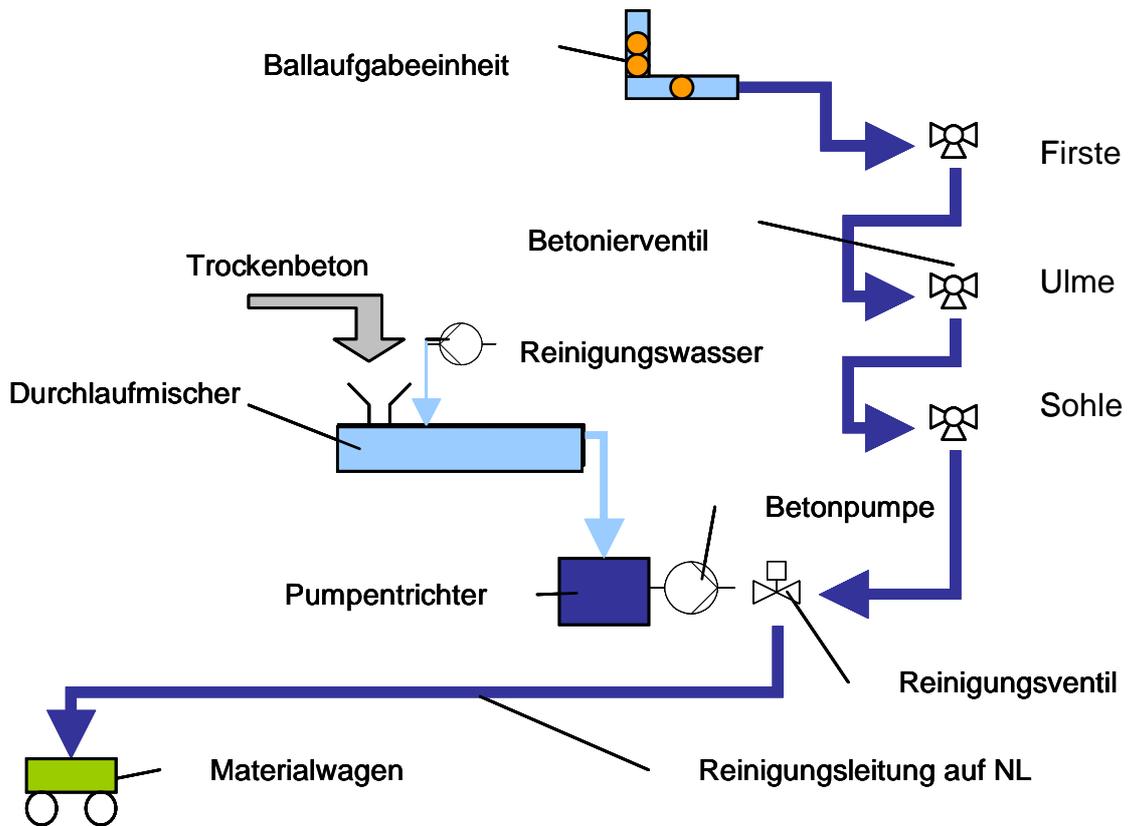


Abb.4-53: Reinigungsschema linke Betonierseite

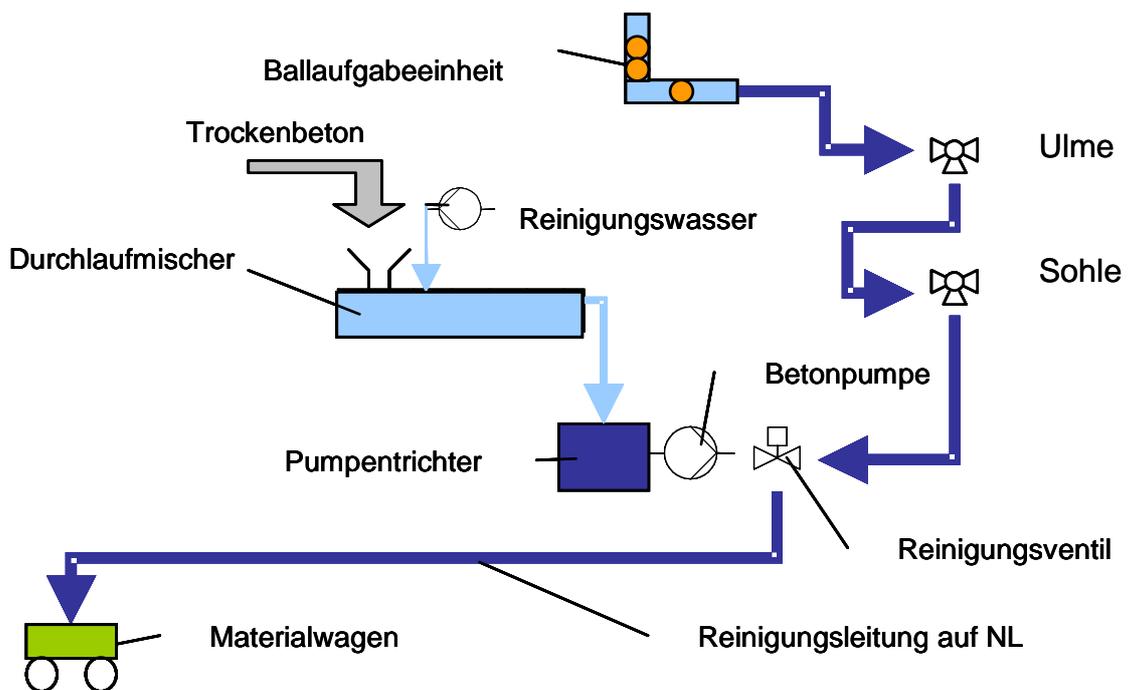


Abb.4-54: Reinigungsschema rechte Betonierseite

Um den Reinigungseffekt zu erhöhen, können über die Ballaufgabeeinheit mehrere Bälle hintereinander aufgegeben werden. Während des Rückhubvorgangs der Pumpe wird im Trichterbereich der frisch aus der Förderleitung ankommende Beton mit flüssigem Verzögerer versetzt und damit in einen unkritischen Zustand übergeführt. Die Untermischung des Verzögerers erfolgt durch das im Trichter angeordnete Rührwerk. Das Trichtervolumen ist auf den Förderleitungsinhalt hin ausgelegt.

Das Ende des Rückhubvorgangs ist dann erreicht, wenn Druckwasser im Trichterbereich aufsteigen oder die Aufsummierung der Kolbenhöhe während des Rückhubprozesses die Wahrscheinlichkeit, daß die Leitung leer sein kann, sicherstellt. Ein anfängliches Überprüfen durch manuelles Öffnen und Kontrollieren der Leitung ist ratsam. Der über dem Pumpentrichter angeordnete Durchlaufmischer wird ebenfalls durch einen aktivierten Spülgang ohne Materialzuführung gereinigt und das Spülwasser in den Trichter entleert. Nachdem also der gesamte Leitungsinhalt im Trichter der Betonpumpe gesammelt und mit Verzögerer versetzt sowie der Durchlaufmischer gespült wurde, kann dieser unbedenkliche Beton über eine weitere Leitung nach hinten, zu einem Reinigungsbehälter auf dem Materialzug gepumpt werden. Dazu ist die Pumpe mit dieser Reinigungsleitung zu verbinden. Dies kann manuell oder über ein weiteres Ventil erfolgen. Der überschüssige Beton gelangt mit dem Materialzug aus dem Tunnel und kann dort entsorgt oder einer Wiederaufbereitung zugeführt werden. Die Endreinigung und Endkontrolle wird durch den Betoniergehilfen durchgeführt. Er ist verantwortlich für die Funktionsfähigkeit des Betonierprozesses und der Qualität des erzeugten Ortbetons.

Aus Gründen einer hohen Vortriebsleistung und der Gewährleistung eines redundanten Systems sind zwei identische Betoniereinheiten auf dem Betonier-Nachläufer installiert. Jede versorgt jeweils eine Seite der symmetrisch angeordneten Betonierstellen.

#### **4.7.4 Bedienung und Sensorik**

Die Bedienung der gesamten Betonieranlage erfolgt über den Maschinenfahrer im Steuerstand. Jedoch überwacht ein Betoniergehilfe sämtliche Prozesse vor Ort und greift bei Unregelmäßigkeiten ein. Darüber hinaus sind Sensoren installiert, die eine permanente Güteüberwachung der Frischbetonherstellung erlauben. Dies wird dadurch erreicht, daß die Betonausgangskomponenten bereits bei der Anlieferung in dem Tunnel einer Qualitätskontrolle unterzogen werden. Tunnelbaustellen haben den Vorteil, daß sie einen einzigen Zugangsweg besitzen, das Tunnelportal. Dort

können sämtliche Güter einer Qualitätsprüfung unterzogen werden. Besitzt z. B. der Zuschlag einen zu hohen Feuchtegehalt, so kann dies bei der anschließenden Verarbeitung auf dem Betonier-Nachläufer berücksichtigt werden. Hat der Zuschlag z.B. eine zu niedrige Temperatur, so besteht die Möglichkeit diese im Pufferbehälter, in den Dosierorganen oder durch ein extra erwärmtes Zugabewasser auf die gewünschte Temperatur zu erhöhen. Ähnlich verhält es sich im Sommer, wenn der Zement und die Zuschläge eine zu hohe Temperatur aufweisen. Können die Temperaturabweichungen durch diese physikalischen Maßnahmen nicht ausgeglichen werden ist eine entsprechende Rezepturanpassung im Labor vorzunehmen. Dies führt dann zu den sogenannten Sommer- oder Winterrezepturen. Qualitätsmängel in der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe können im Tunnel nicht behoben werden und müssen daher bereits zu einer Ablehnung am Tunnelportal führen.

Folgende Sensoren sind an der Betonieranlage vorgesehen:

➤ *Füllstandssensor im Betonpumpentrichter*

Dadurch wird verhindert, daß der Trichterinhalt unter eine kritische Füllstandsgrenze sinkt und die Pumpe Luft mit in die Betonierleitung transportieren kann. Weiterhin wird verhindert, daß der Füllstand über einen oberen Füllstandgrenzwert steigt, und diesen zum Überlaufen bringt. In Abhängigkeit von der aktuellen Pumpen- und Mischerleistung wird der Trichterfüllstand in einem unkritischen Bereich gehalten.

➤ *Füllstandssensoren der Vorratsbehälter zur Füllgradüberwachung:*

Diese Sensoren kontrollieren den Füllgrad in den Vorratsbehältern und verhindern, daß der Betonierprozeß zwecks Materialmangels vor Beendigung gestoppt werden muß.

➤ *Temperatur und Feuchtemesser in den Vorratsbehältern:*

Die Qualität und Güte der Betonmischung hängt neben der Art und Zusammensetzung der Betonausgangskomponenten auch von deren Temperatur und Feuchtegrad ab. Das Abbindeverhalten des Betons ist u.a. von Wassergehalt und Systemtemperatur während des Mischvorganges abhängig. Aus diesem Grund ist es erforderlich die Temperatur und Feuchtegehalt der Mischungskomponenten zu kennen und als Regelparameter in den Dosierprozeß aufzunehmen. Über die Zugabe von temperiertem Wasser ist die Systemtemperatur annähernd konstant zu halten.

- *Wiegezellen an den Dosier und Mischorganen:*

Diese Sensoren sind für eine exakte Dosierung und Füllgradüberwachung der Dosierung- und Mischorgane unerlässlich.
- *Temperatur- und Feuchtemesser in den Mischorganen:*

Diese Sensoren dienen als zusätzliches Kontroll- und Regelorgan für die Systemtemperatur und –feuchte.
- *Stromaufnehmer an den Mischerantrieben:*

Mit Hilfe der Stromaufnehmer kann die Konsistenz der Mischung ermittelt werden. Je steifer die Konsistenz der Mischung ist, um so höher ist der Strombedarf des frequenzgesteuerten Elektroantriebes.
- *Drehzahlüberwachung der Dosierschneckenantriebe:*

Die Drehzahl der Dosierschnecken bestimmt den Volumenstrom des Fördergutes und damit die gewünschte Dosiermenge.
- *Druckaufnehmer in den Betonierleitungen:*

Druckaufnehmer in den Betonierleitungen erfassen den Leitungsdruck und können das Auftreten von Stopfern verhindern. Stopfer können auftreten, wenn die Konsistenz der Mischung nicht den vorgegebenen Werten entspricht oder wenn die Reinigung der Leitung nicht ausreichend war. Konsistenzschwankungen können bereits während des Mischprozesses erkannt und verhindert werden. Unzureichende Güte der automatischen Leitungsreinigung ist jedoch nur sehr schwer festzustellen. Aus diesem Grund dienen die Sensoren dazu die kritischen Stellen zu lokalisieren und den Betoniervolumenstrom zu reduzieren. Dadurch sinkt die Stopfergefahr und die kritischen Leitungspassagen können nach Beendigung des Betonierprozesses manuell nachgereinigt werden.
- *Druck und Hubzähler an den Pumpen:*

Diese sind erforderlich um die Menge an gepumpten Beton ermitteln zu können und den Zeitpunkt zur Reduktion der Betonierleistung auf einen geringen Wert zu bestimmen. Das Volumen der Betonzuführleitungen und der Betonierkammer sind nahezu bekannt. Um nun zu verhindern, daß die Betonierkammer bzw. die Schalung durch den Füllvorgang deformiert wird, ist der Füllstand des Betons im Betoniererring zu kennen.

➤ *Drehmomentaufnehmer in den Betonierventilen:*

Diese Drehmomentaufnehmer dienen als Verschleißanzeige. Steigt das Drehmoment über einen Grenzwert, sind die Betonierventile in der darauf folgenden Wartungsschicht zu wechseln und der Instandsetzung zuzuführen.

Mit Hilfe dieser Sensoren, der Fachkenntnis der Betoniergehilfen und einer Güteüberwachung sämtlicher auf die Vortriebseinheit gelangter Materialien, ist die Herstellung und Verarbeitung eines Frischbetons von höchster Güte und Qualität gewährleistet.

Im folgenden Kapitel wird näher auf die einzelnen Komponenten der Vortriebsanlage eingegangen.

## 5 Vortriebsanlage

### 5.1 Eingesetzte Verfahren

Je nach geologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen sind verschiedene Vortriebsvarianten möglich.

Dazu zählen:

- Hydroschildverfahren
- Erddruckschildverfahren
- Kombination aus Hydroschild- und Erddruckschildverfahren (Mixschild)
- Hartgesteinsverfahren
- Druckluftschildverfahren
- Bühnenschilde
- Fräs- und Baggervortriebe mit Schild

Diese Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich durch die Art der Ortsbruststützung, durch den Materialabbau an der Ortsbrust und dem Materialtransport aus dem Tunnel.

### 5.2 Genereller Aufbau und Einsatzbereich des neuen Verfahrens

Das hier vorgestellte Maschinenkonzept zur Erstellung eines einschaligen Tunnels in Ortbetonbauweise ist mit allen Verfahren kombinierbar, die eine Stahlbetonschale als vorübergehende oder endgültige Sicherung benötigen.

Modifikationen sind bei den Einrichtungen zur Herstellung und Verarbeitung von Ortbeton, dem Schalungstransport und -einbau, der Schalungsdemontage, der Nachläufereinrichtungen und dem Logistikkonzept zu berücksichtigen.

Das im Folgenden vorgestellte Maschinenkonzept beruht beispielhaft auf dem **Hydroschildverfahren**.

Es besteht aus der Vortriebseinheit und der Nachläufer-Einheit (NL- Einheit)

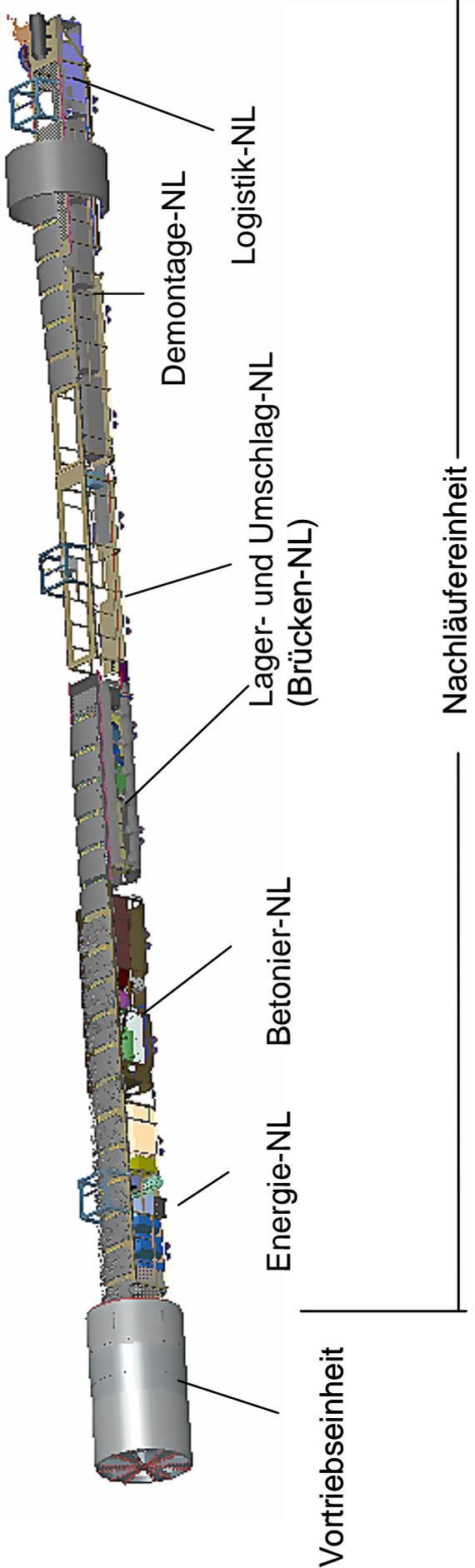


Abb.5-1: Genereller Aufbau der Vortriebsanlage

### 5.3 Die Vortriebseinheit

Die Vortriebseinheit dient der Herstellung des unterirdischen Hohlraums.

Sie besteht aus den Hauptbaugruppen:

- Schneidrad samt Antrieb und Getriebe
- Schneidenschuß samt Steuerpressen und Schleuseninstallation
- Mittelschuß samt Vortriebspresen
- Schildschwanz samt Schildschwanzgelenkpressen und Dichtungen
- Erektor samt Leitungen

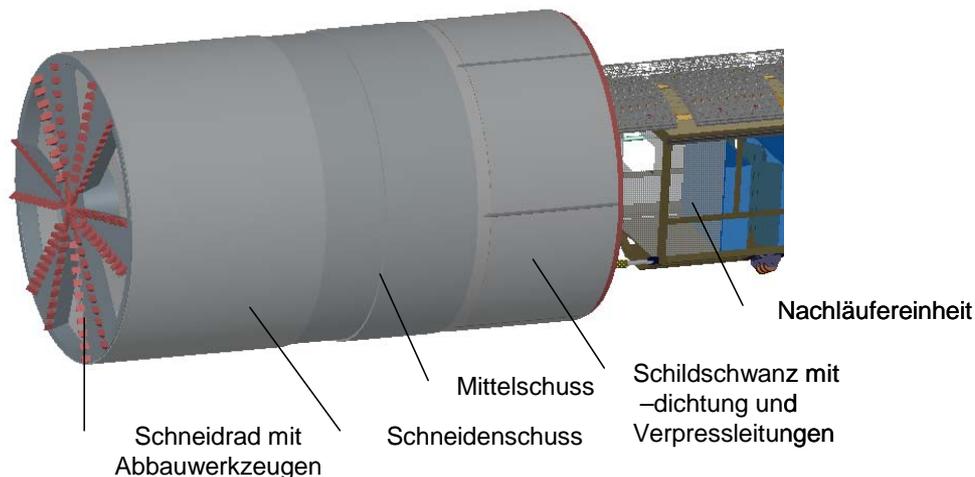
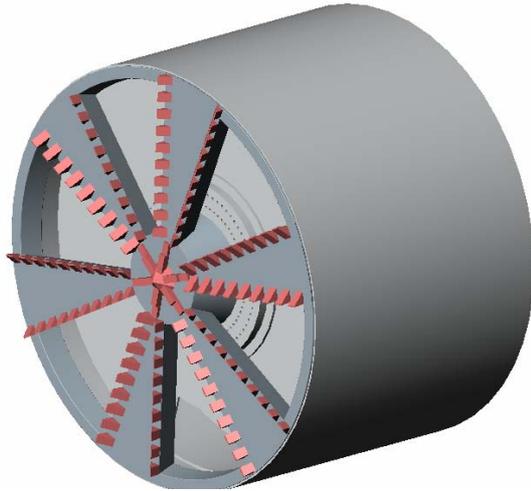


Abb.5-2: Vortriebseinheit mit Hauptbaugruppen

#### 5.3.1 Schneidrad samt Antrieb und Getriebe

Das Schneidrad dient zur Aufnahme der Abbauwerkzeuge und bewirkt durch die gleichzeitige Penetration (Vorschub des Schneirates pro Umdrehung), daß sich die Schneidwerkzeuge in die Ortsbrust arbeiten und durch die Drehbewegung aus dieser Geologiebrocken schneidet. Die Kraft zum Vortrieb des Schneirates wird mittels der Vortriebspresen erzeugt. Dazwischengeschaltet sind die Schneidradvorschubpressen, die gleichsam als hydraulischer Puffer bzw. Überlastschutz für eventuell zu hohe Vorschubkräfte dienen. Das Schneidrad arbeitet bei Lockergesteinsböden im Schutze des Schildmantels des Schneidenschusses und verhindert damit, daß Geologiebereiche an der Firste frei stehen und die Ortsbrust destabilisieren könnten.



*Abb.5-3: Schneidrad mit Schneidenschuß*

Je nach Geologie sind die Felgen und Speichen des Schneidrades breiter ausgebildet, um mit diesen Kontaktflächen die Ortsbrust während des Abbauprozesses zu stützen.

Das Schneidrad ist verschieblich und gelenkig in der Druckwand des Schneidenschusses gelagert. Dadurch besteht die Möglichkeit bei Bedarf einen Überschnitt zu erzeugen. Der Antrieb findet mittels mehrerer kreisförmig angeordneter Hydraulikmotoren mit integrierten Planetengetrieben statt. Je nach Baustellensituation werden auch vermehrt frequenzgeregelte Drehstrommotoren eingesetzt.

### **5.3.2 Schneidenschuß samt Steuerpressen und Schleuseninstallation**

Zur Stabilisierung der Ortsbrust wird beim Hydroschildverfahren neben den Felgen und Speichen des Schneidrades eine Bentonitsuspension in der Abbaukammer eingesetzt. Diese dient als Stützflüssigkeit und verhindert das Einstürzen der Ortsbrust in die Abbaukammer. Sie ist in einem festen Mischungsverhältnis aus Bentonit und Wasser zusammengesetzt. Um während des Vortriebs einen konstanten Druck auf die Ortsbrust zu erzeugen, wird die Suspension in der Abbaukammer über eine Druckluftblase in der Arbeitskammer vorgespannt. Die Arbeitskammer befindet sich hinter der Abbaukammer und ist über die Tauchwandöffnung, welche sich an der Unterseite der Tauchwand befindet, mit dieser verbunden.

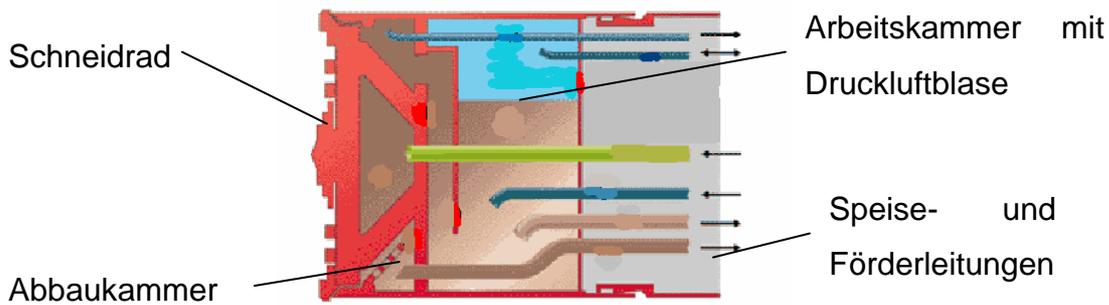


Abb.5-4: Schnitt durch Abbau- und Arbeitskammer eines Hydroschildes (Fa. Herrenknecht)

Die Bentonitsuspension wird außerhalb des Tunnels, in den auf dem Baustellengelände aufgebauten Anmachbecken der Mischanlage erzeugt und über eine Speisepumpe samt der im Tunnel verlegten Speiseleitung zur Abbaukammer gepumpt. Dort wird die Suspension mit den durch das Schneidrad aus der Ortsbrust gelösten Bodenbestandteilen vermischt und über eine Baggerpumpe aus der Kammer, über ebenfalls im Tunnel verlegten Förderleitungen, der Separieranlage zugeführt. Dort erfolgt die Trennung der Suspension von den Abbaumaterialien mittels Schwingsieben und Zyklonen. Die regenerierte Suspension steht somit dem Wiedereinsatz in der Abbaukammer zur Verfügung. Das separierte Abbaumaterial kann über Förderbänder einer Zwischendeponie zugeführt werden.

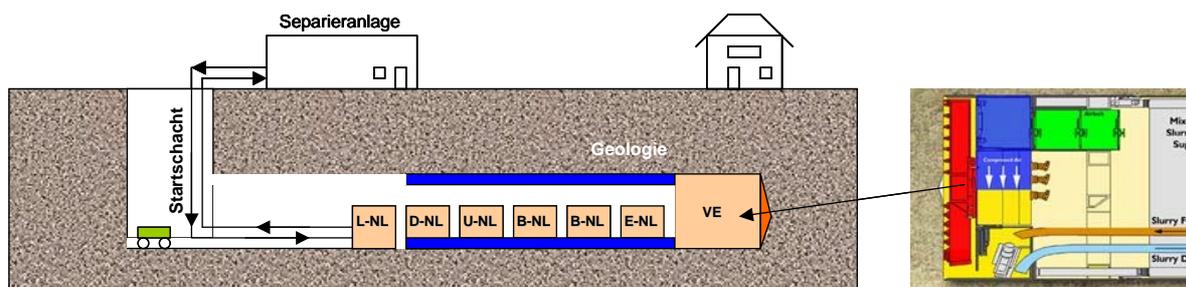


Abb.5-5: Spülkreislauf

Der so erzeugte Spülkreislauf wird durch die Speisepumpe und der Baggerpumpe angetrieben. Mögliche Druckschwankungen in der Abbaukammer werden über die Druckluftblase in der Arbeitskammer ausgeglichen. Dazu ist eine pneumatisch arbeitende Regelanlage installiert, welche über Druckluftventile einen konstanten Druck sicherstellt.

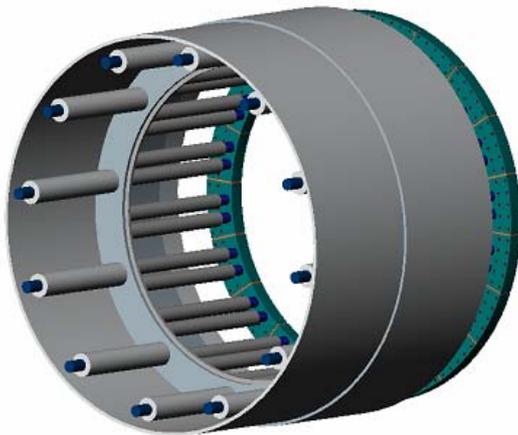
Die Verbindung zum atmosphärischen Bereich im Tunnel bildet die Druckwand, an ihr sind sämtliche Leitungsverbindungen zum Druckbereich angebracht. Weiterhin ist

dort eine Personenschleuse montiert, die das Einschleusen von Personen zu Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten in den Abbaubereich ermöglicht.

Bei dem hier vorgestellten Verfahren handelt es sich um ein Doppelschildprinzip. Dabei kann der Schneidenschuß relativ zum Mittelschuß verschoben werden. Dazu sind Steuerpressen erforderlich, welche an der Druckwand des Schneidenschusses angreifen und den unabhängigen Vortrieb des Schneidenschusses einschließlich des Schneidrades ermöglichen. Eine integrierte Verschiebedichtung zwischen den beiden Schildmänteln, verhindert das Eindringen von Flüssigkeit und Bodenbestandteilen.

### **5.3.3 Mittelschuß samt Vortriebspresen**

Der Mittelschuß ist das Verbindungsstück zwischen Schneidenschuß und Schildschwanz. In ihm sind die Vortriebspresen gelagert. Sie übertragen die Vortriebskräfte von den Schalungselementen über den Mittelschuß auf die Steuerpressen des Schneidenschusses.

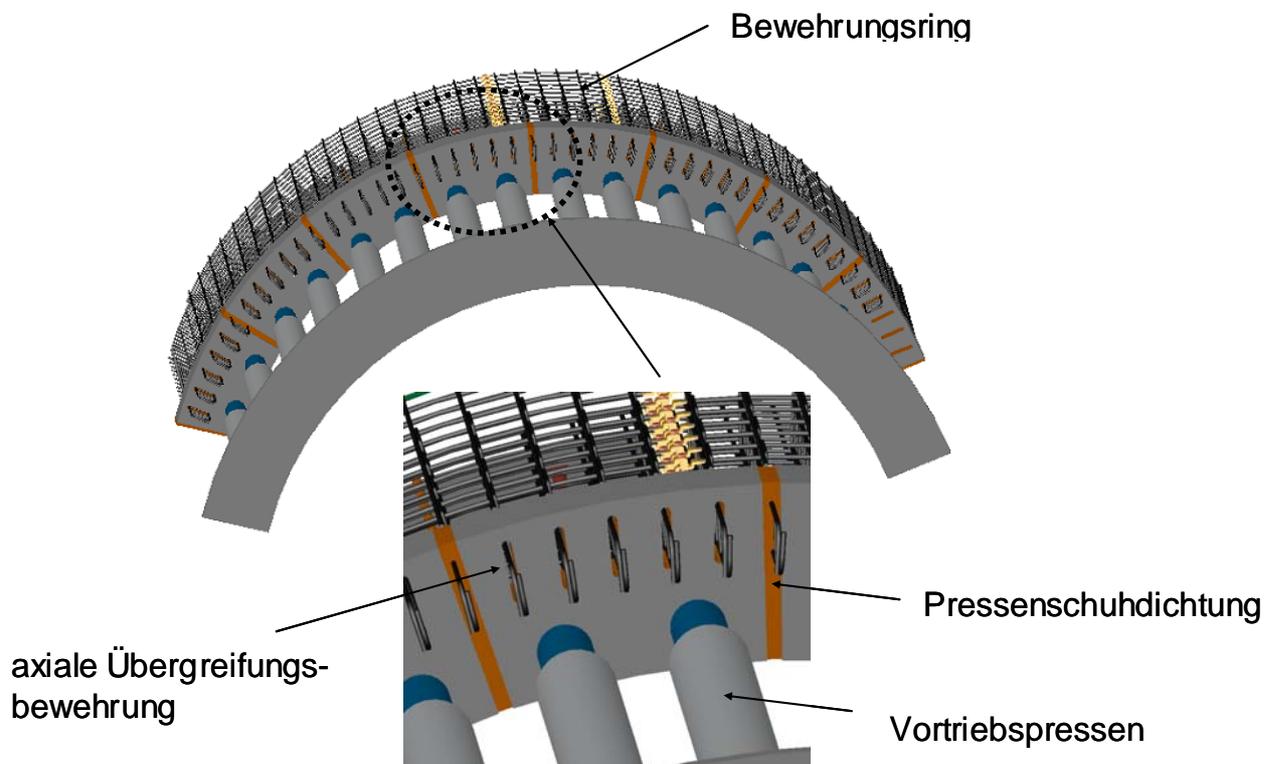


*Abb.5-6: Mittelschuß mit Vortriebs- und Steuerpressen*

Während des Vortriebes sind diese freigeschaltet, d.h. sie wirken wie ein Pendelstab ohne seitliche Lagerung. Dadurch wird eine schädliche Querkraftbelastung der Pressen vermieden.

Sollen die Pressen zum Schalungsringbau eingefahren werden, erfolgt eine automatische Aktivierung der Vortriebspresenzentrierung. Dieses ist eine Zylinderkombination die etwa 1,0m von der Bodenseite entfernt am Schildmantel angebracht ist und die Pressen in der gewünschten Stellung zentriert. Dadurch wird gewährleistet, daß die Vortriebspresen lagegenau ausfahren und die Konen auf der Unterseite des Pressenschuhes genau in die dafür vorgesehenen Konenlöcher (Hülsen) in den Schalungselementen treffen.

Die Pressenschuhe bilden die Stirnschalung der Betonierkammer. Im ausgefahrenen Zustand dienen sie als Gegenlager für die im folgenden Kapitel beschriebene Schildschwanzringdichtung. Der zwischen den Pressenschuhen in Umfangsrichtung vorhandene Spalt wird durch beidseitig ausfahrbare Dichtungselemente realisiert, welche in jedem zweiten Pressenschuh installiert sind.



*Abb.5-7: Pressenschuhe mit aktivierter Pressenschuhdichtung*

Die Bewehrung aus den Übergreifungsstößen der Längsbewehrung ist im Pressenschuh zu integrieren. Dazu ist der Pressenschuh nach dem Muster der Längsbewehrung mit Durchgangsschlitz versehen. In diesen Schlitz sind kleine pneumatisch aktivierbare Manschettendichtungen eingeschraubt, die den Spalt um die Bewehrungsstäbe verschließen und damit verhindern, daß während des Betoniervorganges Beton entweichen kann. Nach dem Erstarren des Betons können diese wieder deaktiviert (entlastet) werden. Die Bohrungen bzw. der Durchmesser der Manschettendichtungen ist so gewählt, daß die einzelnen Bewehrungsstäbe um mindestens 10 mm von ihrer Solllage abweichen dürfen.

Die Länge der Vortriebspressen ist abhängig von der Länge der im eingefahrenen Zustand einzubauenden Schalungselemente und dem zusätzlichen Verfahrbereich aufgrund der axial überstehenden Bewehrung (hier: 3.000mm).



*Abb.5-8: Vortriebspresse im ausgefahrenen Zustand mit Pressenschuh und Dichtung*

Die Anzahl sowie der Pressendurchmesser ergeben sich aus der maximal erforderlichen Vortriebspressenkraft. Die Aufteilung am Umfang ist abhängig von der Schalungsringeinteilung in einzelne Schalungselemente. Für den Schalungsbau werden nur die Pressen abgezogen, an deren Stelle ein Schalungselement versetzt werden soll. Die restlichen verbleiben im aktivierten Zustand und verhindern ein Zurückgleiten der Schildereinheit.

Um Steuerbewegungen durchzuführen sind die Pressen in Pressengruppen zusammengefaßt, welche den hydraulischen und steuerungstechnischen Installationsaufwand minimieren.

#### **5.3.4 Schildschwanz samt Schildschwanzgelenkpressen und Dichtungen**

Der Schildschwanz bildet das rückwärtigste Bauteil des Schildes. Hier findet der Übergang der Betonschale zur Geologie statt.

Die Innenseite des Schildmantels stellt die äußere Schalung des im Schildschwanzbereich zu erzeugenden Betonierings dar. Dort ist ein speziell entwickelter Kunststoff integriert, der das Anhaften des Betons verhindert. Dieser wird auch bei anderen Anwendungen, die im Kontakt mit Beton gelangen, erfolgreich angewendet (z.B. Durchlaufmischer). Im Übergang zur Geologie ist eine Schildschwanzdichtung angebracht, welche sich auf den zuletzt erzeugten Betonrings abstützt und zum Ringspalt hin abdichtet.

Im Schildschwanzmantel sind Mörtelverpreßleitungen integriert, über die Verpreßmörtel in den Ringspalt gelangt. Dadurch wird verhindert, daß beim Vorziehen des Schildschwanzes ein Hohlraum entsteht, der zu Setzungen an der Geländeoberfläche führen würde.

Durch den Verpreßmörteldruck wird außerdem die hintere Dichtlippe der Schildschwanzdichtung an den zuletzt betonierten Abschnitt gepreßt und damit die Dichtwirkung erhöht.

Auf Höhe der Vortriebspressenschuhe ist auf der Innenseite des Schildschwanzmantels eine aufblasbare Ringdichtung installiert. Diese dichtet den Spalt zwischen den

Pressenschuhen und dem Schildschwanzmantel variabel ab. Je nach Kurvensituation und Kurvenradius ist der Spalt nicht gleichmäßig über dem Umfang verteilt. Die aufblasbare Ringdichtung füllt den vorhandenen Spalt aus und gleicht sich somit variabel an die Spaltgeometrie an. Nachdem der Beton erstarrt ist, kann die Ringdichtung deaktiviert werden. Dies geschieht durch aktives Evakuieren des Elastomerschlauches. Aus Schutzgründen und zur Unterstützung des Evakuervorganges ist der Schlauch mit einer weiteren Schicht aus Gummi und Kevlar abgedeckt. Im Folgenden ist ein Schnitt durch die Betonierkammer und den angrenzenden Bauteilen für die einzelnen Vortriebsphasen dargestellt.

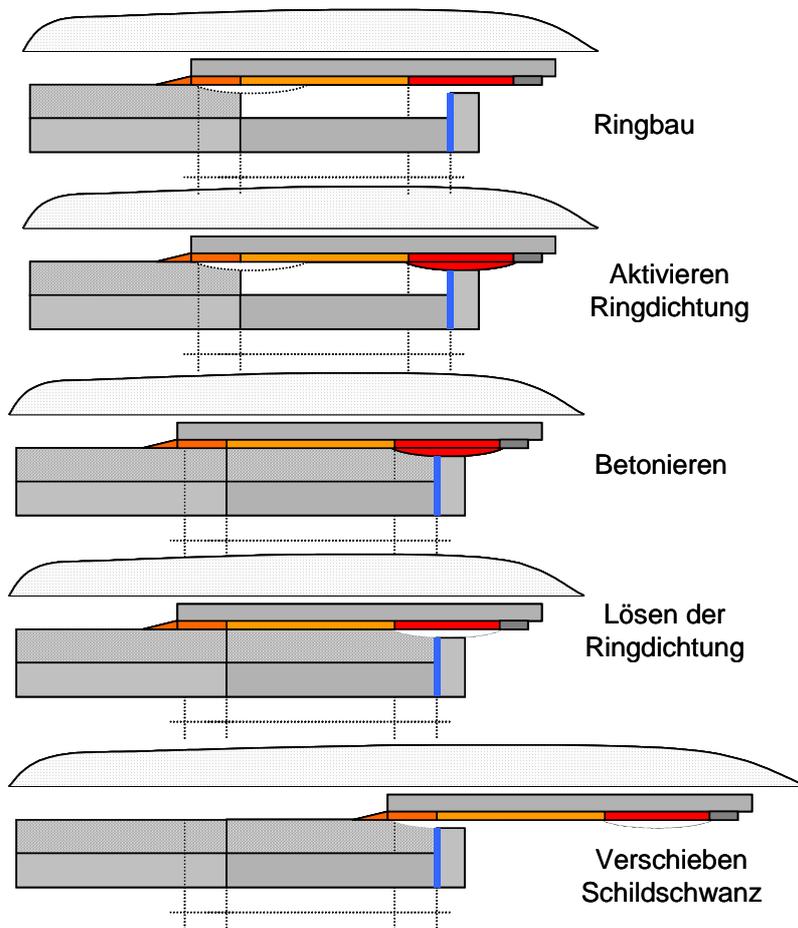


Abb.5-9: Phasen des Vortriebs im Schnitt durch Betonierkammer und den angrenzenden Bauteilen

Kommt es zu Undichtigkeiten der modifizierten Schildschwanzdichtung, so wird dies beim Lösen der Ringdichtung festgestellt und die Schildschwanznotdichtung aktiviert. Sie ist mit einer Kammer versehen, welche pneumatisch aktiviert werden kann und den undichten Spalt bei Bedarf abdichtet.

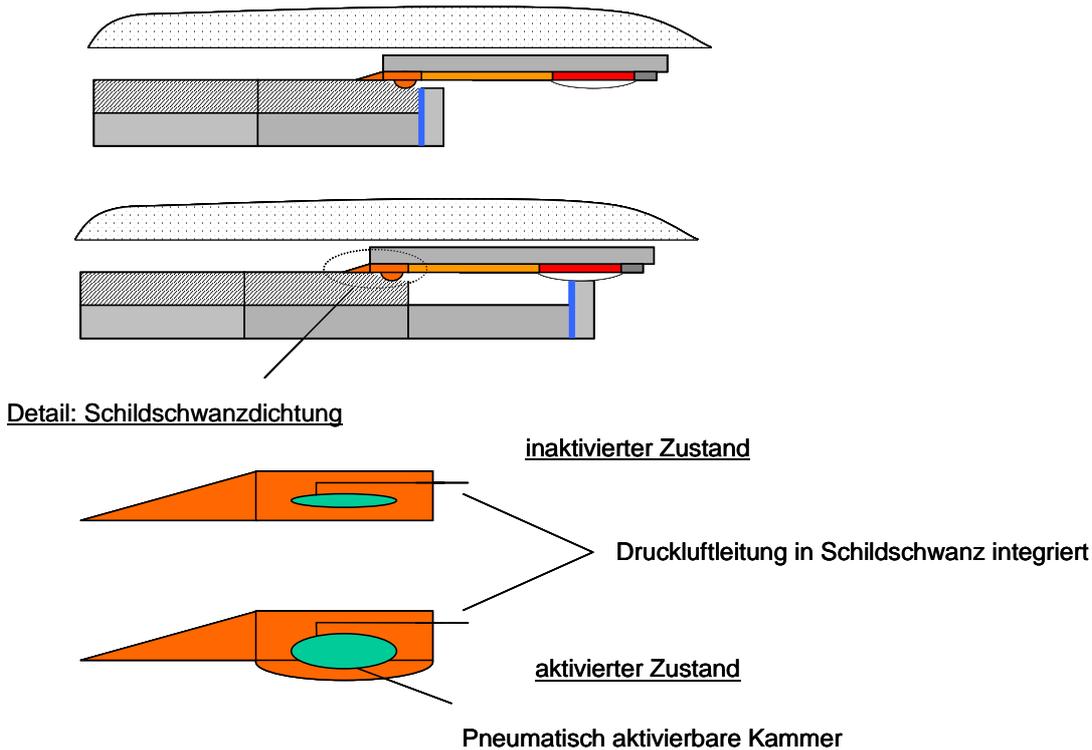


Abb.5-10: Schildschwanznotdichtung

Im Schutze des abgedichteten Spaltes kann der Schalungsringbau stattfinden. Nach Beendigung des Betoniervorganges wird die Schildschwanznotdichtung aktiv evakuiert und der nächste Vorschub des Schildschwanzes kann erfolgen.

Vor dem Aktivieren der Ringdichtung wird der Schildschwanz je nach Kurvengeometrie in die neue Betonierichtung (Vortriebsrichtung) ausgerichtet. Dies geschieht durch aktives Ausrichten des Schildschwanzmantels mittels der Schildgelenkzylinder.

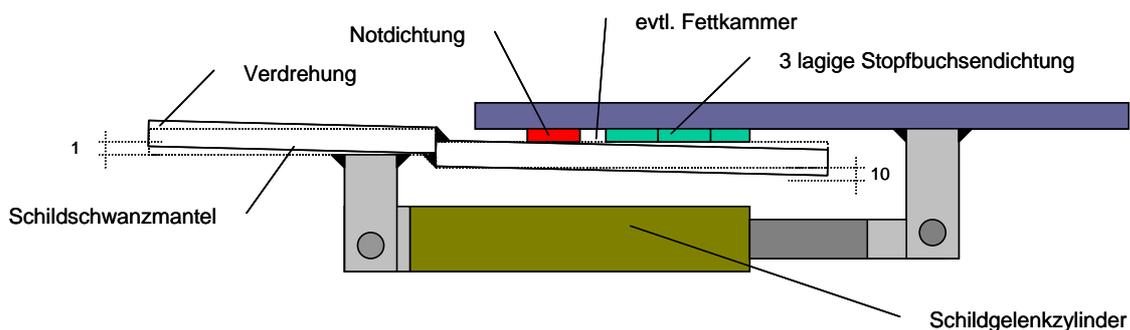


Abb.5-11: Ausrichten des Schildschwanzes über die Schildgelenkpressen vor jedem neuen Betoniervorgang

Dazu sind am Umfang verteilt 24 Schildgelenkzylinder verteilt, die ein Kolben / Stangenverhältnis von 180 / 60 mm aufweisen und damit eine maximale Zugkraft von 10.000 kN übertragen können.

### **5.3.5 Erektor samt Leitungen**

Der Erektor besteht aus einem Längsrahmen und einer Vakuumsaugplatte samt Bewegungshydraulik sowie einer Umsetzvorrichtung für die Betonierventile. Die Erektorsaugplatte dient dem Versetzen der Schalungselemente sowie der daran befestigten Bewehrungskörbe. Eine entsprechende Hydraulikzylinderanordnung verleiht der Saugplatte 6 Freiheitsgrade. Diese sind für das exakte Positionieren der Schalungselemente notwendig. An der Saugplatte ist ein Vakuumaggregat installiert, das ein temporäres Fixieren der Schalenelemente an der Saugplatte ermöglicht.

Die Schalungselemente, welche auf der obersten Ebene des Nachläufers zur weiteren Verarbeitung vorbereitet wurden, werden in der hintersten Verfahrsstellung des Erektors aufgenommen und an den vorbestimmten Platz verfahren. Währenddessen werden die Vortriebspressen in diesem Bereich gelöst und eingefahren. Nach dem Positionieren werden diese wieder ausgefahren und fixieren das frisch versetzte Schalungselement. Die Ansteuerung und Bedienung der einzelnen Funktionen geschieht mittels eines transportablen Bedienerpanels. Dadurch ist gewährleistet, daß sich der Bediener immer den günstigsten Platz wählen kann, von wo er, je nach Stellung des Schalungselementes, den Verfahrbereich gut einsehen kann.

Im hinteren Bereich des Erektorfahrrahmens ist die Umsetzvorrichtung für die Betonierventile angebracht. Sie besteht aus zwei Längsschienen, die ein Verfahren in Vortriebsrichtung erlauben. Nach dem Betoniervorgang werden die Betonierventile verschlossen und in dieser Stellung belassen bis ca. 10 Minuten vor dem nächsten Betoniervorgang. Der Beton hat in dieser Zeit eine ausreichende Festigkeit erreicht, welche ein Demontieren der Betonierventile erlaubt. Mit Hilfe von Hydraulikzylindern werden die Ventile samt flexiblen Schlauchleitungen in die neue Position am frisch gebauten Schalungsring verfahren und dort mittels Schnellverschlüssen fixiert. Anschließend kann der erneute Betonierzyklus beginnen.

## **5.4 Nachläufer-Einheit**

Die NL-Einheit bildet die Versorgungseinheit für die Vortriebsanlage. Auf ihr werden sämtliche Materialien umgeschlagen und zum Verbrauch in der Vortriebseinheit aufbereitet.

Nach Funktionalitäten getrennt ergibt sich folgende Aufteilung:

- Energie-Nachläufer
- Betonier-Nachläufer
- Brücken-Nachläufer

- Demontage-Nachläufer
- Logistik-Nachläufer

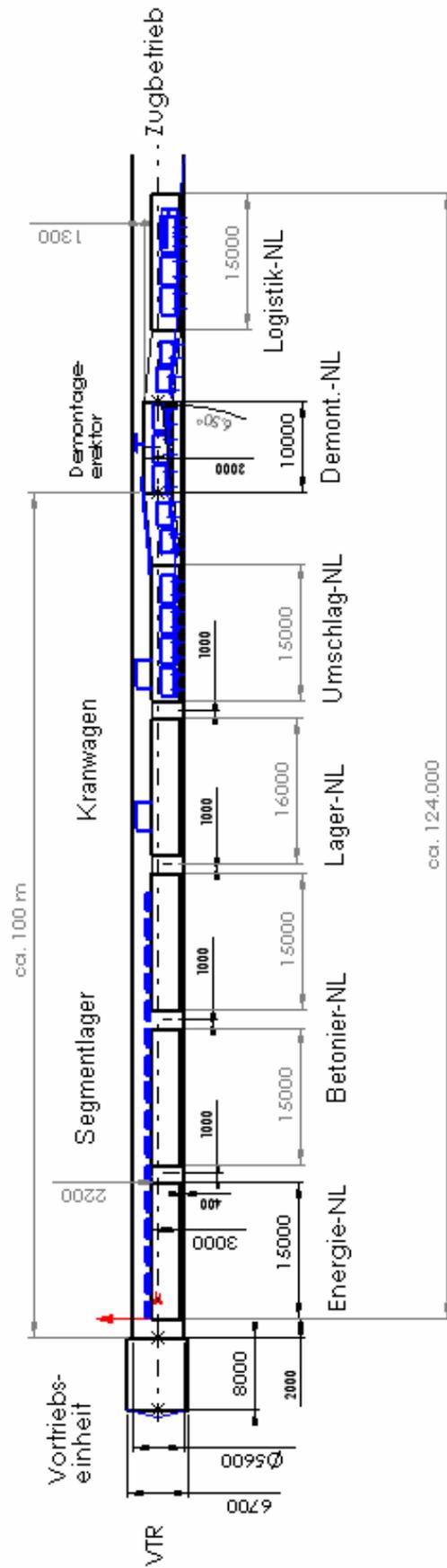


Abb.5-12: Ansicht Nachläufer-Einheit

Die Grundkonstruktion besteht aus einer einheitlichen Stahlrahmenkonstruktion. Je nach Tunneldurchmesser ist diese in mehrere Ebenen einteilbar. Der hier beschriebene Tunnel mit einem lichten Durchmesser von 6,0 m ermöglicht eine Zwei-Ebenen Anordnung.

Die oberste Ebene wird als Transportebene verwendet. Auf ihr werden hauptsächlich die Schalungselemente von dem Demontage- bzw. Lager-Nachläufer zur Übergabestelle an den Erektor transportiert.

Zum möglichst kraftarmen Verfahren der Nachläufereinheiten auf der Schalung im Sohlbereich sind spezielle Fahrwerke installiert. Diese sind an die Tunnelwölbung angepaßt und lenkbar ausgestattet, so daß einem Verrollen, vor allem bei Kurvenfahrten, entgegengewirkt werden kann.

Die einzelnen Nachläufer sind untereinander mit Gelenkbolzen versehen, die ein Nachziehen der einzelnen Nachläufereinheiten erlauben. Um eine Überlastung zu verhindern, sind die Gelenkbolzen mit Kraftmeßsensoren ausgestattet. Bei Überlastung stoppen diese den Vortrieb, bis die Ursache behoben ist.

### **5.4.1 Energie-Nachläufer**

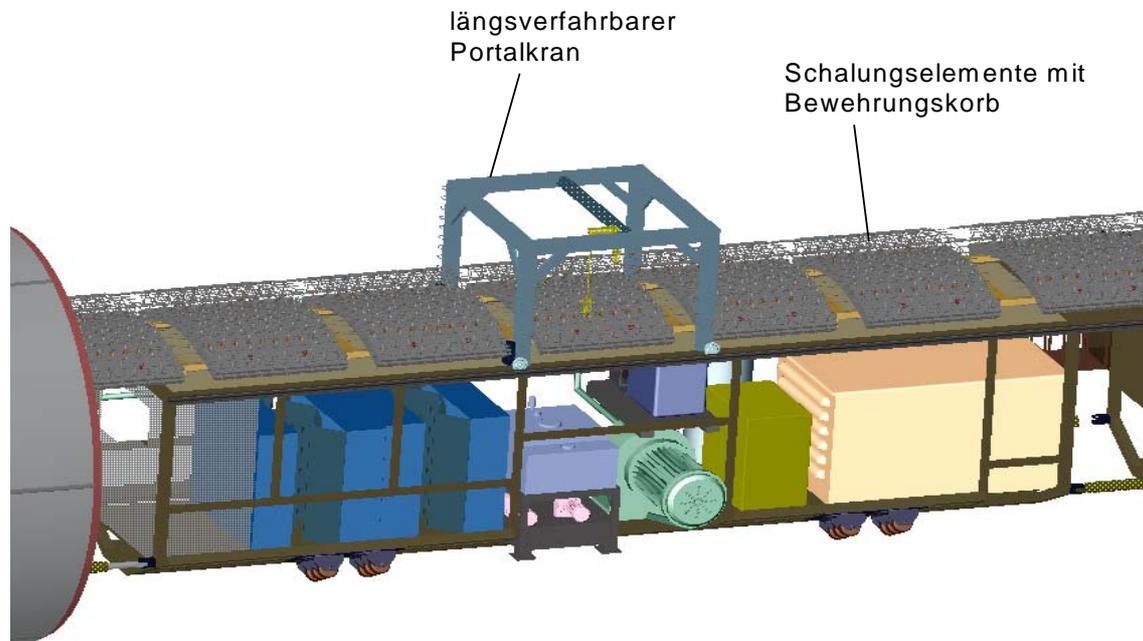
Der Energie-Nachläufer ist das Kraftwerk der Tunnelvortriebsmaschine. Auf ihr wird die elektrische Energie aus dem Stromversorgungskabel in hydraulische und pneumatische Energie umgewandelt. Dazu ist zunächst ein Trafo zwischengeschaltet, der die Hochspannung in Mittelspannung transformiert. Diese versorgt wiederum die Antriebseinheiten der Energiewandelaggregate:

- Hydraulikpumpen
- Druckluftkompressoren
- Wasserpumpen

Die so gewandelte Energie wird den unterschiedlichen Verbrauchern zur Verfügung gestellt. Die druckbeaufschlagte Hydraulikflüssigkeit dient der Versorgung der Hydraulikmotoren des Schneidradantriebes, der Zylinder (Steuer-, Vortrieb-, Verschiebe-, Schildgelenkzylinder), der Mörtelverpreßeinheit, der Betonpumpe sowie der Betonierventile. Die autark erzeugte Druckluft speist den Kessel der Atemluftanlage und das Druckluftnetz, welches sich über die gesamte Anlage erstreckt. Von diesem werden die druckluftbetriebenen Ventile, Pneumatikdichtungen und Druckluftpumpen versorgt.

Die elektrisch betriebenen Wasserpumpen stellen den Kühlwasserkreislauf für die Antriebsaggregate sicher und speisen das Gebrauchswassernetz der gesamten An-

lage. Die Wasserversorgung wird über eine Wasserzuleitung, welche im Tunnel installiert ist, sichergestellt.



*Abb.5-13: Energie-Nachläufer*

Weiterhin befinden sich auf diesem Nachläufer die Steuer- und Schaltschränke für die gesamte Anlage. Zur Versorgung aller für den Betrieb der Anlage erforderlichen Sensoren mit einer Steuerspannung wird die Mittelspannung in eine Niederspannung transformiert. Über diese wird außerdem permanent ein Niederspannungsakkumulator mit Ladespannung versorgt. Bei Stromausfall dient dieser der Versorgung der Steuerungs- und Meßdatenrechner sowie einer Notbeleuchtung. Weiterhin ist ein Notstromaggregat installiert, welches die Stromversorgung der redundanten Druckluftanlage sicherstellt.

Die Steuerung der Anlage wird über einen Steuerstand ausgeführt. In ihm sind Monitore, Bedientableaus und Prozeßrechner installiert, welche die Steuerung und Kontrolle sämtlicher auf der Anlage stattfindender Prozesse erlauben. Die somit zur Verfügung stehenden Zustandsmeldungen der Sensoren werden in einen Meßdatenerfassungsrechner eingelesen und stehen zur späteren Bearbeitung und Kontrolle zur Verfügung. Über eine entsprechende Modemverbindung kann via Internet jederzeit der Betriebszustand der Anlage abgefragt und mit entsprechender Kennung aktiv in das System eingegriffen werden. Dies ist die Grundlage für einen permanenten Op-

timierungsprozeß, mit dem Ziel, der Vermeidung unnötiger Stillstände sowie der Maximierung der Vortriebsleistung.

#### **5.4.2 Betonier-Nachläufer**

Wurde bereits in Kapitel 4.7 behandelt.

#### **5.4.3 Brücken-Nachläufer**

Der Brücken-Nachläufer bildet gleichsam die Brücke zwischen dem Betonier-Nachläufer und dem Demontage-Nachläufer. Er besteht aus dem Lager- und Umschlag-Nachläufer. Er ist erforderlich, da der Beton wie in Kapitel 4.7 beschrieben, auf einer Länge von 100 m eingeschalt bleiben muß. Das Ausschalen findet am Demontage-Nachläufer statt. Dort werden die Schalenelemente wiedergewonnen und auf der oberen Nachläuferebene an ein förderbandartiges Transportsystem übergeben.

Auf der Strecke zwischen Demontage und Wiedereinsatz mittels dem Erektor am vordersten Ende des Energie-Nachläufers, müssen die Schalungselemente folgende Arbeitsschritte durchlaufen:

1. Reinigung
2. Kontrolle der Schalungselemente evtl. Austausch,
3. Auftragen eines Trennmittels
4. Anbringen der Bewehrungsaufnahmedübel
5. Positionieren und Vermessen des Bewehrungskorbes
6. Fixieren des Bewehrungskorbes auf den Bewehrungsaufnahmedübeln
7. Endkontrolle

Diese einzelnen Arbeitsschritte werden auf der obersten Ebene der Nachläufereinheit durchgeführt. Zum Verfahren und Positionieren der einzelnen Schalungselemente sowie der Bewehrungskörbe stehen zwei längsverfahrbare Kranwägen zur Verfügung. Die Bewehrungskörbe werden auf dem Lager-Nachläufer zwischengelagert. Dort werden sie mit Hilfe des Brückenkrans abgelegt. Sind Schalungselemente defekt, können diese dort gegen neue ausgetauscht werden. Dieser Lager-Nachläufer ist außerdem Lagerplatz für Gleise zur Gleisverlängerung, Gitterboxen und Big Bags mit Betonzusatzmitteln, Leitungen zur Leitungsverlängerung oder ähnliches.

Im rückwärtigen Bereich wird diese Ebene auch als Pufferbereich für den Materialzug genutzt, der je nach Beladung unterschiedliche Länge besitzt.

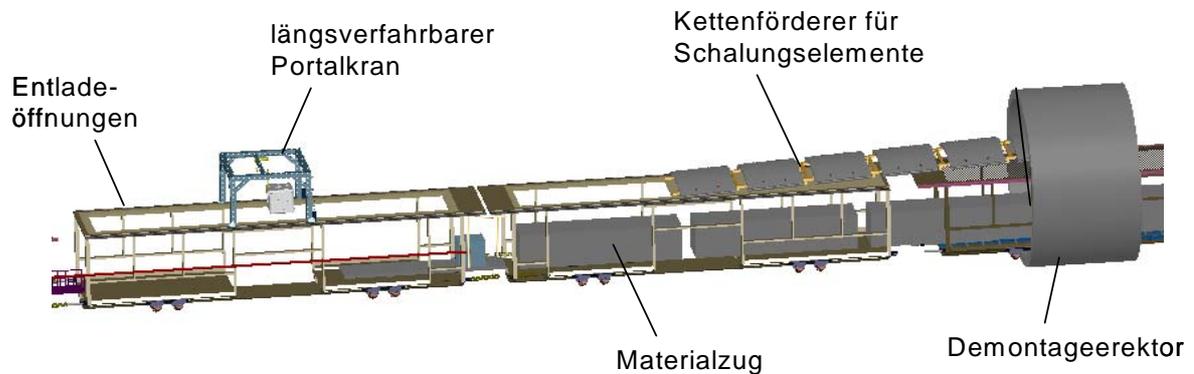
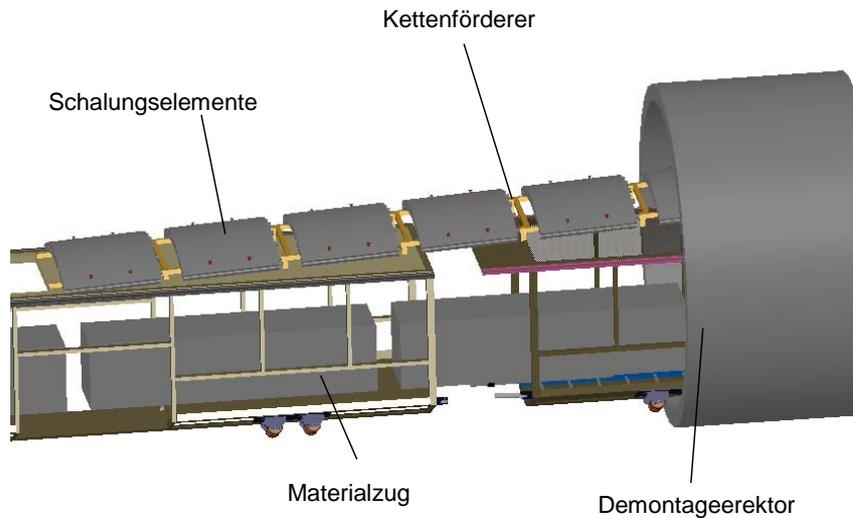


Abb.5-14: Brücken-Nachläufer und Demontage-Nachläufer

Die Aufbereitung und Vorbereitung der Schalungselemente zum Wiedereinsatz wird von geschultem Personal durchgeführt.

#### 5.4.4 Demontage-Nachläufer

Der Demontage-Nachläufer dient, wie bereits erwähnt, der Demontage der Schalungselemente im rückwärtigen Nachläuferbereich. Das Prinzip ähnelt dem umgekehrten Ringbauprozess mit dem Erekter. Zunächst wird das Schluß-Schalungselement aus der Verzahnung der Kone des nächsten Betonierabschnittes gefädelt. Um das Lösen zu erleichtern, kann die Schalung zur Tunnelmitte hin gekippt werden. Damit höhere Kräfte, vor allem Zugkräfte, übertragen werden können, ist die Aufnahmeplatte des Demontageerektors im Gegensatz zur Saugplatte des Ektors mit einem hydraulischen Greifersystem ausgestattet. Die Greiferplatte hat ebenfalls 6 Freiheitsgrade und kann auf einer Kreisbahn um den Nachläuferrahmen verfahren werden. Auf der oberen Ebene befindet sich eine Aufnahmevorrichtung für die demontierten Schalungselemente. Es handelt sich dabei um einen Kettenförderer, der die einzelnen Schalungselemente zur Übergabestelle an den längsverfahrbaren Portalkran transportiert. Der Portalkran verfährt die einzelnen Schalungselemente zum Instandsetzungsbereich auf dem Brücken-Nachläufer. Weiterhin ist der Portalkran für die Be- und Entladung der Materialzüge verantwortlich, welches über die Öffnungen in der oberen Ebene des Brücken-Nachläufers geschieht.



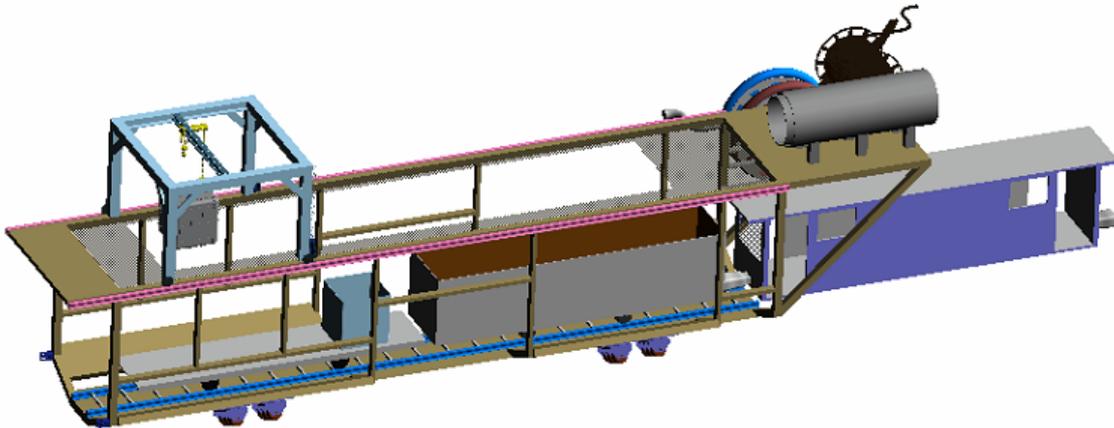
*Abb.5-15: Ansicht Demontage-Nachläufer*

Im Nachläuferrahmen sind Schienen verlegt, welche das Einfahren des Materialzuges erlauben. Im Umschlag-Nachläufer werden die Materialien vom Zug abgeladen und mit Hilfe der Kranwagen zum Lager-Nachläufer oder der entsprechenden Bedarfsstelle verfahren. Weiterhin sind in diesem Querschnitt sämtliche Leitungen verlegt, die im anschließenden Logistik-Nachläufer mit den Tunnelleitungen verbunden werden.

### **5.4.5 Logistik-Nachläufer**

Der Logistik-Nachläufer bildet das Ende der Nachläuferkette. Er besitzt diesen Namen, weil er die Verbindungsstelle zu den im fertigen Tunnel transportierten Materialien darstellt. Der Zug fährt über eine Schlepprampe auf die untere Ebene des Nachläufers und von dort weiter über den Demontage-Nachläufer in den Umschlag-Nachläufer des Brücken-Nachläufers. Die Schlepprampe ist das Verbindungsstück zwischen den Tunnelgleisen und den im Nachläufer verlegten Gleisen. Sie wird während des Vortriebs nachgezogen. Dabei greifen die Schienen ähnlich wie Weichen ineinander und ermöglichen das Einfahren des Materialzuges. Ist der Zug im Tunnel unterwegs besteht die Möglichkeit die Tunnelgleise unter dem Nachläufer zu verlängern. Dazu wird die Bodenklappe des Logistik-Nachläufers hydraulisch aufgeklappt und mit Hilfe des Kranwagens das Gleis in die Tunnelsohle abgelassen und mit dem zuletzt verlegten Gleis verbunden.

Weiterhin dient der Logistik-Nachläufer der Aufnahme des Luttenspeichers, welcher auf der hintersten Position des Nachläufers montiert ist. Der Austausch erfolgt ebenfalls mit Hilfe des Brückenkranes. Des Weiteren sind auf der oberen Ebene die Hochspannungskabeltrommel sowie kleinere Kabeltrommeln für die Daten- und Telefonleitung angebracht. Diese werden automatisch während des Vortriebes abgerollt.



*Abb.5-16: Ansicht Logistik-Nachläufer*

Der Übergang der Förder- und Speiseleitung auf die Tunnelleitung erfolgt über ein teleskopierbares Doppelrohr. Während des Vortriebes wird das jeweilige innere Rohr automatisch mitgezogen. Ist das Rohr ausreichend lang teleskopiert, in der Regel auf eine Länge von drei Abschlügen, kann während einer Vortriebspause die Leitung gelöst, das zuvor teleskopierte Rohr zurückgefahren und an dessen Stelle ein weiteres an der Tunnelwandung fest installiertes Rohr integriert werden. Nachdem die Flanschenden mit Schellen druckdicht verbunden wurden, kann der Vortrieb fortgesetzt werden. Um zu verhindern, daß vor dem Lösen der Schellen der Förder- und Speiseleitungsrohre der Leitungsinhalt in den Tunnel läuft, ist zuvor eine pneumatisch aktivierbare Blasendichtung einzubringen bzw. ein Rohrmolch zu verschieben. Dieser verdrängt den Leitungsinhalt und verschließt anschließend die Rohröffnung. Für die Verlängerung der Wasserleitung wird eine Schlauchtrommel eingesetzt, die ausreichend Schlauch für mindestens drei Abschlüge bevorratet. Ist die Schlauchtrommel abgewickelt, wird der Vortrieb unterbrochen, die Wasserleitung abgesperrt, getrennt und wieder aufgerollt. In den freiwerdenden Raum wird ein weiteres Leitungsstück integriert und wieder an den Verbindungsschlauch angeschlossen. Im folgenden Kapitel wird näher auf die Tunnel-Logistik eingegangen.

## 6 Tunnel-Logistik

### 6.1 Allgemeines

Die Tunnel-Logistik beschäftigt sich mit der Planung und Organisation des An- und Abtransportes aller Materialien, welche für den Betrieb der Tunnelvortriebsanlage erforderlich sind sowie dem Abtransport von Abbaumaterial oder sonstiger Stoffe, unter Gewährleistung der maximalen Vortriebsleistung.

Durch die technische Entwicklung und zunehmende Mechanisierung und Automatisierung im Tunnelbau werden immer höhere Vortriebsleistungen erzielt. Dies erhöht den Druck auf die Leistungsfähigkeit des Logistiksystems im Tunnel.

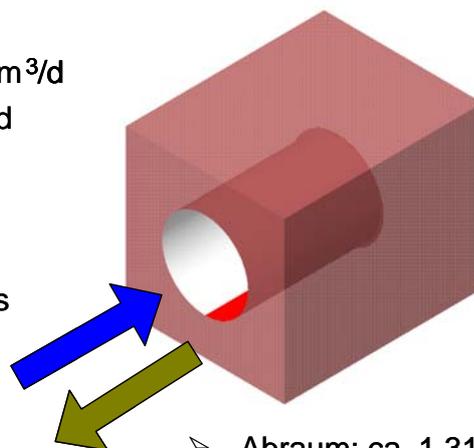
Je nach Vortriebslänge und Förderleistung können unterschiedliche Varianten favorisiert werden. Dabei wird jeweils das optimale Verfahren im Kontext des gesamten Betriebsablaufes untersucht und bewertet. Dies erfolgt in mehreren Iterationsschritten um auf den optimalen Logistik-Mix zu gelangen.

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Tunnel-Logistik sind neben den „harten“ Faktoren (Leistungsdaten der Förderorgane) auch die „weichen“ Faktoren wie Ausbildung, Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft des ausführenden Personals. Die Erfahrungen aus großen Tunnelprojekten beweisen die Wichtigkeit dieser Faktoren. Diese sollen jedoch nicht Thema dieser Arbeit sein.

### 6.2 Der Logistik-Mix

Bei dem hier vorgestellten neuen Vortriebskonzept kommt es zu folgenden Materialströmen in und aus dem Tunnel.

- Betonausgangstoffe: ca. 200 m<sup>3</sup>/d
- Bewehrungskörbe: 84 Körbe/d
- Rohre/Gleise/Kabel: 24 m/d
- Betriebsmittel
- Brauchwasser: ca. 40 m<sup>3</sup>/d
- Luft (Bewetterung): > 9,6 m<sup>3</sup>/s



- Abraum: ca. 1.310 m<sup>3</sup>
- Restbeton/Abfall: ca. 6 m<sup>3</sup>/d

Abb.6-1: Materialzu- und -abfuhr

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, wird die Spülflüssigkeit (Slurry) sowie das Verbrauchswasser mittels Rohrförderung (Kreiselpumpen) von und zur Vortriebsanlage gefördert.

Alles Weitere wird mit dem Zug angeliefert.

Dazu zählen:

- Betonausgangsstoffe
- Schalungselemente und Bewehrungskörbe
- Gleise zur Gleisverlängerung
- Rohre zur Rohrverlängerung
- Verbrauchsstoffe (Öl, Schmiermittel, Werkzeuge, Ersatzteile)
- Personal

Beim Umschlag von Zement und Zuschlag von den Transportsilos auf den Zug wird auf pneumatische Förderung zurückgegriffen, beim Umschlag der Schalungselemente, Bewehrungskörbe, Gleise, Rohre und Verbrauchsstoffe auf die Flurförderung mittels eines Kranwagens. Dadurch entsteht ein Logistik-Mix aus Rohr-, Flur- und gleisgebundener Förderung.

Je nach Präferenzen der ausführenden Baufirmen und deren Maschinenausstattung kann eine andere Logistik-Kombination wirtschaftlich sinnvoll sein.

## 7 Gesamtbetrachtung

### 7.1 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens ist, neben der Ausführungsqualität und der Ausführungssicherheit, das entscheidende Kriterium für dessen Einsatz. In der folgenden Tabelle ist der jeweilige Mehr- oder Minderaufwand der Ortbetonbauweise im Vergleich zur Tübbingbauweise aufgeführt. Das Fehlen einer Position ist mit dem Eintrag „entfällt“ gekennzeichnet. Der Pfeil nach oben bedeutet, daß die Ortbetonbauweise teurer ist, d.h. ein höherer Aufwand (Mehraufwand) zu betreiben ist, um die gleiche Funktion zu erfüllen. Zeigt der Pfeil nach unten bedeutet dies, daß die Ortbetonbauweise günstiger ist und damit einen geringeren Aufwand (Minderaufwand) erforderlich macht (Einsparungspotential).

Pos.:	Tübbingbauweise	Ortbetonbauweise	Mehr-oder Minderaufwand
1	<b>Ausbau (Tunnelschale)</b>		
2	Ringspaldichtung Umfang (Phönix)	entfällt	↓
3	Ringspaldichtung längs (Phönix)	entfällt	↓
4	Kaubiteinlage oder Holz	entfällt	↓
5	äußere Fugendichtung (Verpressspalt)	entfällt	↓
6	Schubbewehrung	Zwangsbewehrung	≈
7	Tübbinfabrikationshalle	entfällt	↓
8	Tübbinglagerhalle	entfällt	↓
9	Tübbingschalung mit Rütteleinrichtung	Schalungselement f. Ortbeton	↑
10	Schalungsvermessungseinrichtung	Schalungsvermessungseinrichtung auf NL	≈
11	Bewehrungskorbfertigung	Bewehrungskorbfertigung	↑
12	Betonmischanlage zur Tübbingherstellung	Betonmischanlage auf dem NL	≈
13	manuelles Glätten der Betonoberfläche	entfällt	↓
14	Schalungstransporteinrichtung in der T. Halle	entfällt	↓
15	Tübbingtransporteinrichtung auf dem NL	Schalungstransporteinrichtung auf dem NL	≈
16	Klimakammer	evtl. Klimakammer-NL	≈
17	Entschalen des Tübbings	Demontage der Schalenelement auf dem NL	≈
18	Reinigen der T.-Schalung	Reinigen der Schalenelemente auf dem NL	≈
19	Schalungsvermessung	Vermessen der Schalungselemente auf dem NL	≈
20	Schalungsjustierung	Justierung der Schalungselemente auf dem NL	≈
21	Montage der Schraubendübel	Montage der Korbbefestigungsdübel	≈
22	Montage und Ausrichtung des Bewehrungskorbes	Montage, Ausrichtung und Fixierung des Bewehrungskorbes	↑
23	Tübbingvermessung	entfällt	↓
24	Tübbingnachbesserung	entfällt	↓
25	Aufkleben des Dichtungsrahmens	entfällt	↓
26	Anbringen der Kaubitstreifen, Holzplatten	entfällt	↓
27	Umschlag auf die Tübbinglagerfläche	entfällt	↓
28	Tübbingtransport auf die Baustelle	Transport der Betonausgangsstoffe auf die Baustelle sowie der Bewehrungskörbe	↓
29	Tübbinglagerung auf der Baustelle	Lagerung Betonausgangsstoffe auf der Baustelle	≈
30	Tübbingumschlaggerät im Tunnel	Schalungsumschlaggerät im Tunnel (Umschlag-NL)	≈
31	Lagerfläche auf dem NL	separate Lagerfläche auf dem NL ( Lager-NL)	≈ ↑
32	Reinigen und Fetten der Dichtflächen vor dem Einbau	Aufbringen von Trennmittel auf die Schalung	≈
33	Tübbingfertigung nach Bedarfsprognose	Betonieren nach tatsächlichen Bedarf	↓
34			
35	<b>Baustelleneinrichtung</b>		
36	Platzbedarf für Tübbinglager	entfällt	↓
37	Platzbedarf Betonausgangsstoffe Tübbingfertigung	Platzbedarf Betonausgangsstoffe für Ortbeton	≈

## Gesamtbetrachtung: Wirtschaftlichkeit

Pos.:	Tübbingbauweise	Ortbetonbauweise	Mehr-oder Minderaufwand
38	<b>Ausbau (Tunnelschale)</b>		
39	<b>Transport, Logistik</b>		
40	Tübbingtransport	Bewehrungskorbtransport	↓
41	entfällt	Transport der Betonausgangstoffe	↑
42	<b>Umschlag auf dem NL</b>		
43	Tübbingumschlag	Bewehrungskorbumschlag	↓
44	entfällt	Umschlag der Betonausgangsstoffe	↑
45	<b>Lagerung auf dem NL</b>		
46	Tübbinglager	Bewehrungskorblager	↓
47	entfällt	Bunker Betonausgangstoffe	↑
48	entfällt	Schalungselementelager	↑
49	<b>Zusätzliche Einrichtungen auf dem NL</b>		
50	entfällt	Demontageerektor der Schalungen	↑
51	entfällt	Schlaungsreinigungsfläche	↑
52	entfällt	Schalungsvermessungs und Ausrichtungseinheit	↑
53	entfällt	Korbmontagebereich	↑
54	entfällt	Korblagerfläche	↑
55	entfällt	Schalungslagerfläche	↑
56	<b>Vortriebsleistung bestimmt durch</b>		
57	Vortrieb und Ringbau	Ringbau, Betonier- und Abbindeprozess	↑
58	<b>Betonqualität</b>		
59	hoch bei exakter Ausführung	hoch bei exakter Ausführung	≈
60	Gefahr von Vor- und Rücksprüngen	glatte Oberfläche durch ohne Fugen	↓
61	<b>Rissegefahr</b>		
62	hoch (Pressenkräfte, SSW-Kräfte)	gering (Lastabtragung aus dem Vortrieb über Schalung)	↓
63	<b>Ausführungssicherheit</b>		
64	hoch	hoch	≈
65	<b>Flexibilität</b>		
66	hoch (bei Uni-Ring)	hoch	≈
67	<b>Vortriebseinheit</b>		
68	beliebig	Doppelschild	↑
69	<b>Fahrbahneinbau</b>		
70	unmittelbar hinter der TVM möglich (wenn Betonqualität gut)	Erst nach Demontage der Schalungselemente und Nachbehandlungs-NL möglich. (Ausnahme: Konzept mit Tübbingsohlstein)	↑
71	<b>NL-Länge</b>		
72	< 100m	> 100m	
73	<b>Personalbedarf Baustelle</b>		
74	identisch (ohne Tübbingfertigung)	identisch	≈
75	<b>Personalbedarf Vortriebseinheit</b>		
76	identisch	Mehrbedarf, aufgrund der Bewehrungskorbmontage auf dem Nachläufer,	↑
77	<b>Nachträgliche Arbeiten</b>		
78	evtl. Rissesanierung	keine	≈
	<b>Legende:</b>		
	↓	Einsparung bei der Ortbetonbauweise	
	↑	Mehrausgaben bei der Ortbetonbauweise	
	≈	keine Mehrausgaben bzw. Einsparungen bei der Ortbetonbauweise	

Abb.7-1: Mehr- oder Minderaufwand der Ortbetonbauweise im Vergleich zur Tübbingbauweise

Der Vergleich läßt erkennen, daß das größte Einsparungspotential dabei die zeit- und kostenintensive Tübbingherstellung in einer zum Teil extra für die Tunnelbaumaßnahme aufgebauten Tübbingfabrik darstellt. Die Kosten die hierdurch entstehen, belaufen sich auf etwa 400 € pro m<sup>3</sup> Tübbing (Kalkulationswert für Vergleichsprojekte in Rotterdam).

## Gesamtbetrachtung: Wirtschaftlichkeit

Die Gesamtkosten für die Herstellung der Tunnelschale lassen sich mit dem hier vorgestellten Verfahren um ca. 5,1% im Vergleich zur Tübbingbauweise reduzieren. Näheres ist der folgenden Kostenabschätzung zu entnehmen.

Wichtig ist dabei, darauf hinzuweisen, daß es sich nur um eine Grobabschätzung der möglichen Kosten- und Einsparungspotentiale handelt.

Bezeichnung	Anteil	Preis/Einheit	Abschreibung [m]	Preis pro m [EUR]
<b>Materialkosten (Lieferung frei Baustelle)</b>				
Bewehrungskörbe	170,0 kg/m <sup>3</sup>	800,0 EUR/to	1,0	1.094,80
Beton	16,1 m <sup>3</sup> /Ring	120,0 EUR/m <sup>3</sup>	1,0	966,00
Bewehrungsbefestigung	28 Stk./Ring	5,0 EUR/Stk.	1,0	70,00
Quelldichtung alle 10 Ringe	2,0 m/Ring	60,0 EUR/m	1,0	60,00
Abstandshalter Bewehrung <sup>1)</sup>	67,0 Stk./Ring	1,0 EUR/Stk.	1,0	33,50
<b>ges.:</b>	<b>276,3 EUR/m<sup>3</sup></b>		<b>ges.:</b>	<b>2.224,30</b>
<b>Personalkosten (zusätzlich 6 Mann auf der Vortriebseinheit)</b>				
Demontage der Schalung	1,5 Ah/m	50,0 EUR/h	1,0	75,00
Reinigen der Schalung	1,5 Ah/m	50,0 EUR/h	1,0	75,00
Montage Bewehrungskorb	1,5 Ah/m	50,0 EUR/h	1,0	75,00
Materialumschlag	1,5 Ah/m	50,0 EUR/h	1,0	75,00
<b>ges.:</b>	<b>37,3 EUR/m<sup>3</sup></b>		<b>ges.:</b>	<b>300,00</b>
<b>Investitionskosten (zusätzlich zur Standard TVM) 100% der Investitionskosten werden auf 5.000 Vortriebsmetern abgeschrieben.</b>				
Schalung	600,0 to/Tunnel	3,0 EUR/kg	5.000,0	360,00
Demontevorrichtung der Schalung		100.000 EUR/TVM	5.000,0	20,00
Modifizierter Pressenschuh		100.000 EUR/TVM	5.000,0	20,00
SSW-Modifikation		50.000 EUR/TVM	5.000,0	10,00
Mischanlage auf Betonier-Nachläufer		400.000 EUR/TVM	5.000,0	80,00
Betonpumpe; Leitungen, Reinigungseinheit		200.000 EUR/TVM	5.000,0	40,00

<sup>1)</sup> Raster: 160 mm in Umfangsrichtung und 320 mm in Längsrichtung

**ges.: 530,00**

### Eingangsdaten:

Ringvolumen	16,1 m <sup>3</sup>
Ringumfang	21,4 m
Ringbreite	2,0 m
Schalung	12,0 to/Ring
Anzahl Schalungen	50,0 Stück
Arbeiterstundenlohn	50,0 EUR

**ges.: 3.054,30**

### Einsparungspotential

Kosten für Tübbingherstellung und Anlieferung	<b>400,0 EUR/m<sup>3</sup></b>
Kosten für Ortbetonherstellung ohne Investitionskosten	313,6 EUR/m <sup>3</sup>
Kosten für Ortbetonherstellung mit Investitionskosten	<b>379,4 EUR/m<sup>3</sup></b>
<b>Kosteneinsparung bei 1.000m Vortrieb<sup>2)</sup></b>	<b>5,1%</b>

<sup>2)</sup> vorausgesetzt gleicher Vortriebsleistung beider Systeme

Abb.7-2: Kostenabschätzung in Vergleich zur Tübbingbauweise

Der durchgeführten Berechnung zugrunde gelegt wurden ein Vortrieb von 1.000 m Länge, ein Ausbruchdurchmesser von 7,1 m, eine Betonschalendicke von 40 cm sowie eine Vortriebsleistung von 24 m/d.

Der zusätzliche Personalmehraufwand bei der Ortbetonbauweise beläuft sich auf 6 Mann pro Schicht. Die höheren Investitionskosten aufgrund der Ortbetonherstellung auf der Vortriebsseinheit im Tunnel (Betonieranlage, Demontagavorrichtung) werden über eine Vortrieblänge von 5.000 m abgeschrieben.

Fairerweise muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Tübbingbauweise höhere Vortriebsleistungen als die zugrunde gelegten 24m/d erzielen kann und damit die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu Gunsten der Fertigteilbauweise ausfallen würde.

Was jedoch unumstritten ist, sind die klaren Vorteile der Ortbetonbauweise im Hinblick auf Ausführungsqualität und Ausführungssicherheit.

## 7.2 Ausführungsqualität

Mit dem hier beschriebenen Verfahren ist eine Betonschale von hoher Qualität herstellbar. Sämtliche zum Vortrieb der Anlage erforderlichen Vortriebskräfte werden über Reibung an den Mantelflächen der Schalungselemente sanft in den Beton eingeleitet. Auf eine gesonderte Bewehrung für die nur ausschließlich während der Bauphase auftretenden Vortriebskräfte kann verzichtet werden.

Weiterhin entfallen sämtliche Längs- und größtenteils die Ringfugen. Diese Kontaktstellen der Tübbingbauweise sind potentielle Gefahrenstellen für Undichtigkeiten sowie bei Brand. Pro Ring (Durchmesser 6,35 m, Länge 2,0 m) sind dies 32,0 m, die im Extremfall nachverpreßt werden müssen. Bei einer Tunnellänge von 1.000 m, beläuft sich die Dichtungsstrecke auf enorme 32.000 m.



*Abb.7-3: Tübbing mit Dichtungen*

Auf dieser Dichtungsstrecke von 32,0 m pro Tübbingring, befinden sich Profildichtungen, welche die Wasserdichtigkeit gewährleisten sollen. Dazu müssen zwei gegenüberliegende Profile genau aufeinander angeordnet und komprimiert werden. Dabei kann es vor allem beim Einschieben des konischen Schlußsteins zu Problemen kommen.



*Abb.7-4: Schlußstein in Einbausituation (Dichtungsproblematik)*

Die Dichtungen in den konischen Längsfugen werden auf den letzten Zentimetern des Einschubens mit Hilfe der Vortriebspresen komprimiert und gleichzeitig gegeneinander verschoben. Diese Verschiebekräfte müssen ohne Verformungen übertragen werden. Gelingt dies nicht, so kommt es zur Längsdehnung des Dichtungsrahmens und zur Ansammlung des Dichtungsmaterials in den Übergangsecken zum zuletzt versetzten Ring. Die Folge sind Undichtigkeiten in diesen Bereichen. Durch die enorme Kraft der Vortriebspresen kann es in diesen Eckbereichen auch zu Spannungsspitzen und zum Abplatzen des Betons kommen.

Die Überprüfung der Ausführungsqualität mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren (Ultraschall, Georadar, Impact- Echo Verfahren) wird aus Kostengründen nur stichprobenartig durchgeführt. Die Qualitätssicherung beschränkt sich dabei auf die Sanierung von auftretenden Undichtigkeiten sowie die Beseitigung der von der Tunnelinnenseite aus ersichtlichen Beschädigungen der Tunnelschale.

Bei der hier vorgestellten Ortbetonbauweise mit Schalungselementen kann ein endloses fugenarmes unterirdisches Betonbauwerk erzeugt werden. Fugen entstehen nur bei längeren Stillständen von mehreren Tagen. An der Stirnfläche des letzten Betonierabschnittes wird vor dem Wiederanfahren der Vortriebsanlage eine Queldichtung zentrisch an der Betonschale fixiert. Diese Dichtung quillt bei Kontakt mit Wasser und dichtet somit den möglicherweise entstehenden Spalt.

Über die Konenverzahnung und Zentrierung der einzelnen Schalenelemente zum letzten Abschnitt und zum Pressenschuh wird eine exakte Positionierung und Lagefixierung der Schalenelemente erzeugt. Dadurch ist eine definierte Kraftübertragung sichergestellt.

Außerdem werden dadurch Kanten bzw. Stufen in der Betonschale vermieden. Dies ist eines der Hauptkriterien bei Tunnels, die für den Einsatz von Hochgeschwindigkeitszügen ausgelegt werden müssen. Lagegenauigkeit und Ebenheit der Schalenoberfläche sind Voraussetzung für eine strömungstechnisch günstige Nutzung des Tunnelbauwerks. Schädliche Turbulenzen, welche die Sicherheit der Hochgeschwindigkeitszüge beeinflussen würde, können dadurch ausgeschlossen werden.

Die Nachbehandlung der Ortbetonschale, welche bei konventionellen Vortrieben üblich ist, erfolgt hier über die geschlossene Schalung, die 100 m (etwa 4 Tage) die Oberfläche auf der Tunnelinnenseite vor dem Austrocknen schützt. Im Anschluß an den Demontage-Nachläufer kann bei Bedarf eine Versiegelung aufgespritzt werden, welche die Betonoberfläche vor Austrocknung schützt.

Durch das neue Verfahren können die Schwachstellen der Tübbingbauweise vermieden und die Einsatzbreite maschineller Tunnelvortriebe erhöht werden.

### **7.3 Ausführungssicherheit**

Bei einer Untersuchung von Vortriebkonzepten im Zuge der Qualitätssicherung (Total Quality Management) durch den Auftraggeber tritt vermehrt die Ausführungssicherheit in das Zentrum des Interesses. Verstärkt wurde dies durch die doch häufiger vorgekommenen Bauzeitverlängerungen und damit verbundenen Kostenüberschreitungen.

Gründe dafür liegen oftmals neben den geologischen oder witterungsbedingten Unwägbarkeiten in Folgendem:

- Auslegung der Vortriebskomponenten nahe der theoretische Leistungsgrenze
- Verzicht auf redundante Auslegung kritischer Teilprozesse
- Verzicht auf eine Rückfallebene für den Fall das Schwierigkeiten auftreten
- Zu geringe Anzahl von Sensoren
- Unzureichende Meßdatenerfassung und Auswertung
- Einsatz von unzureichend geschulten bzw. ausgebildeten Personal

Diese bei der Planung und Ausführung aus Einsparungsgründen oder Unkenntnis nicht berücksichtigten Faktoren, führen oft zur Überschreitung der anfänglich kalkulierten Kosten. Ebenso macht die Vernachlässigung der Wichtigkeit der Meßdatener-

fassung und -auswertung ein nachträgliches Nachvollziehen der tatsächlichen Ursachen nahezu unmöglich. Dies verhindert einen kontinuierlichen Lern- und Optimierungsprozeß.

Aus diesen Gründen wurde bei dem hier vorgestellten Konzept sehr auf die Ausstattung der wichtigsten Prozesse mit Sensoren geachtet. Sämtliche Prozesse laufen weitestgehend automatisiert ab. Der Bediener überwacht den Prozeß, den er zu Beginn durch spezielle Parametereinstellung gestartet hat. Er greift nur ein, wenn es zu Unregelmäßigkeiten kommt. Damit wird der Personalbedarf reduziert, gleichzeitig aber höhere Anforderungen an die Ausbildung, Kenntnisse und Fähigkeiten des Bedieners gestellt. Es verbleiben wenige Arbeitsplätze für Spezialisten.

Der vortriebskritische Prozeß der Betonherstellung ist doppelt (redundant) ausgeführt, d.h. es befinden sich zwei komplette autarke Betoniereinheiten auf dem Betonier-Nachläufer. Bei Bedarf kann die eine, die Funktion der anderen übernehmen und umgekehrt. Die Betoniergesamtleistung verringert sich dadurch zwangsläufig. Ein kostspieliger Stillstand der gesamten Vortriebsanlage kann demzufolge verhindert werden.

Die Vorratsbehälter sind derart ausgelegt, daß es bei vorübergehenden Störungen im Logistikablauf zu keinen Materialengpässen kommen kann. Über ein spezielles Meßdatenerfassungs- und -auswerteprogramm können frühzeitig Problemzonen lokalisiert und behoben werden.

Im Extremfall ist mit geringen Umbaumaßnahmen (Modifikation der Pressenschuhe) der klassische Tübbingausbau realisierbar (Rückfallebene).

Dadurch ist die Grundlage für die Maximierung der Ausführungssicherheit und der daraus abgeleiteten Maschinenverfügbarkeit geschaffen.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

Aufbauend auf einen klassischen maschinellen Vortriebsverfahren, dem Hydrochildprinzip, ist hier ein Konzept dargestellt, wie entkoppelt vom Vortrieb im hinteren Schildbereich eine bewehrte Stahlbetonschale ohne Fugen erzeugt werden kann.

Dazu werden mit dem Erektor Schalungselemente samt Bewehrungskörben im Schutze des Schildschwanzmantels versetzt. Sieben (6+1) Schalungselemente aneinandergesetzt ergeben einen Schalungsring. Durch die daran befestigten Bewehrungskörbe wird ein geschlossener Bewehrungsring gebildet. Der Bewehrungskorb besteht aus entsprechend abgelängten und gekanteten Bewehrungsmatten, welche über spezielle Dübel an der Schalungshaut befestigt sind. Übergreifungsstöße an der Schnittstellen gewährleisten eine kraftschlüssige Verbindung der einzelnen Elemente und Betonierabschnitte. Die einzelnen Schalungsringe sind einseitig konisch ausgeführt und können durch gegenseitige Verdrehung eine Röhre im Raum abbilden.

Der durch die Schalung und dem speziell beschichteten Schildschwanz eingegrenzte Ringraum wird mit dem gesteuerten Schnellbeton verfüllt. Die Rezeptur dieses Spezialbetons wurde entsprechend der geforderten Eigenschaften entwickelt. Er wird vor Ort auf einem Betonier-Nachläufer angemischt. Dort sind die einzelnen Betonkomponenten separat zwischengelagert. Über Dosierorgane wie Schnecken oder Pumpen werden die Komponenten einem Durchlaufmischer zugeführt. Von dort aus gelangt der Beton, angetrieben von der Betonpumpe, in die Betonierstelle am Schalungsring. Im Übergang zur Betonierkammer ist ein Betonierventil angebracht, welches die serielle Versorgung mehrerer Betonierstellen aus einer Förderleitung ermöglicht.

Nach dem Betonieren wird ein automatischer Reinigungsprozeß gestartet. Der Reinigungsball wird dabei durch eine Reinigungsballaufgabeeinheit in die zu reinigende Leitung aufgegeben. Der Reinigungszyklus bewirkt das schnellstmögliche Entfernen des gesteuerten Schnellbetons aus den Leitungen.

Die Vortriebspresen der Vortriebseinheit übertragen die Vortriebskräfte auf die Schalung. Von dort aus werden sie über Reibung in die Betonschale eingeleitet. Zur Stützung des abbindenden Betons und zur Übertragung der Vortriebskräfte werden die versetzten Schalungselemente erst nach ungefähr 100 m demontiert. Dies geschieht mittels eines Demontagerektors, der auf dem Demontage-Nachläufer installiert ist. Von dort aus werden die demontierten Schalungselemente auf der obersten

Ebene des Nachläufers gereinigt, vermessen und durch die Montage eines Bewehrungskorbes für den Wiedereinsatz vorbereitet. Die Anlieferung der Bewehrungskörbe und der Betonbestandteile sowie weiterer Materialien erfolgt mittels Zügen, der Umschlag jeweils mit dem optimalen Förderverfahren (Logistik-Mix).

Während der Beton im Schutze des Schildschwanzes, gestützt vom letzten Schalungsring, seine Anfangsfestigkeit von etwa  $1,0 \text{ N/mm}^2$  erreicht, wird der Vortrieb durchgeführt (Doppelschildprinzip). Dadurch wird eine Zykluszeit von 120 Minuten, für eine Schalungslänge (Abschlagslänge) von 2,0 m, erreicht.

Der Einsatz von Sensorik und Automatisierungstechnik reduziert den Personalbedarf, erhöht jedoch den Spezialisierungsgrad des Fachpersonals.

Entsprechende Meßdatenerfassung und -auswertung ermöglicht einen kontinuierlichen Optimierungsprozeß und verringert unnötige Stillstände. Durch diese Daten wird der Vortrieb für den Auftraggeber transparent und ermöglicht eine lückenlose Ursachenforschung bei Unregelmäßigkeiten (die gläserne Baustelle). Dadurch kann Wissen für zukünftige Projekte gewonnen werden.

Diese Ausarbeitung verfolgte das Ziel, die neuesten Entwicklungen in der Betontechnologie und Verfahrenstechnik, zu einem neuen, leistungsfähigen, Vortriebskonzept zu kombinieren. Dabei wurden die Erfahrungen aus früheren Einsatzversuchen analysiert und bei der Konzeption berücksichtigt.

Triebfeder für dieses Vorhaben waren vor allem die zum Teil auftretenden Schwierigkeiten mit der klassischen Tübbingbauweise bei der Herstellung einer Tunnelschale höchster Qualität. Risse, Abplatzungen, Undichtigkeiten, Nachverpressungen und Reparaturmaßnahmen können dieses Verfahren nicht als uneingeschränkt geeignet erscheinen lassen.

Neueste Entwicklungen in der Betontechnologie eröffnen neue Einsatzbereiche. Wer hätte sich vor wenigen Jahren vorstellen können, daß es alkalifreie Beschleuniger geben würde, die eine Verarbeitung des Spritzbetons in der derzeit praktizierten Dimension ermöglichen?

Weiterhin eröffnen derzeitige Entwicklungen mit Polymerbetonen weitere Einsatzfelder.

Mit dem hier vorgestellten Konzept soll der erste Schritt für eine Wiederbelebung des Einsatzes von Ortbeton bei maschinellen Tunnelvortrieben mit hoher Vortriebslei-

stung gemacht werden. Der nächste Schritt ist die Umsetzung und Ausführung in einem konkreten Projekt. Dazu bedarf es innovativer und begrenzt risikobereiter Leute. Vorteilhaft sind Erfahrungen mit monolithischen Betonbauwerken. Die Rückfallebene auf das klassische System mit Tübbingausbau ist vorgesehen.

## Anhang

### 9 Naßbeton als alternative Betonvariante zu Trockenbeton

Voraussetzung für das funktionieren des in den vorigen Kapiteln vorgestellte neuen Vortriebskonzeptes ist u.a. der gesteuerte Schnellbeton. Dieser kann als Trockenbeton (vorgestellte Variante) oder alternativ als Naßbeton realisiert werden.

Der Unterschied ist dabei, daß der Beton bereits angemischt auf die Vortriebseinheit gelangt bzw. dort naß zwischengespeichert werden kann, ohne daß sich in einem gewissen Zeitfenster dessen Verarbeitbarkeit (Konsistenz) verändert.

Der Naßbeton ist durch entsprechende Einstellung oder Zugabe spezieller Verzögerer für eine definierte Zeit verarbeitbar und kann unproblematisch in den Leitungen oder den Zwischenspeichern verbleiben, bis er verarbeitet wird.

Bei der zeitlich unabhängigen Verarbeitung will man jedoch einen ähnlichen Frühfestigkeitsverlauf realisieren können, wie oben beschrieben. Dazu ist die Erstarrungs- und Erhärtungsreaktion gesteuert zu aktivieren.

Diese Aktivierung kann auf folgende Weise geschehen.

- pulverförmiger Beschleuniger
- flüssiger Beschleuniger
- Dispersionsbeschleuniger
- 2-Komponenten-Beton

Der in der Leitung befindliche, für gewisse Zeit unbedenkliche Beton muß also kurz vor der Austrittsstelle aus der Betonierleitung zur Betonierstelle mit dem Aktivator versetzt und dieser möglichst homogen untergemischt werden.

#### 9.1 Pulverförmiger Beschleuniger (Woermann)

Das Untermischen von pulverförmigen Beschleunigern in eine Betonierleitung wurde bereits von einem namhaften Pumpenhersteller angeboten. Aufgrund von Problemen bei der Ausführung wurde das Gerät nach gewisser Zeit wieder vom Markt genommen. Einzig sinnvolle Variante wäre das Zwischenschalten eines atmosphärischen Durchlaufmischers. Da dieses Verfahren sehr nahe an dem Trockenbetonverfahren angelehnt ist, wurde es hier nicht weiter verfolgt.

#### 9.2 Flüssige Beschleuniger (Heidelberger)

Flüssige Beschleuniger werden derzeit beim Naßspritzverfahren eingesetzt. Dabei wird der Spritzbeton von der Dickstromförderung in eine Dünnstromförderung über-

geführt. Der mit der Druckluft injizierte flüssige Beschleuniger wird dabei mit der Druckluft gleichmäßig im aufgelockerten Betonstrom verteilt.

Dieses Verfahren scheidet hier aus folgenden Gründen aus:

- Betonierstelle muß einsehbar sein
- Konstanter Spritzabstand ist einzuhalten

Da hier in eine Schalung betoniert werden soll ist der Einsatz von Spritzbeton wenig sinnvoll.

Weitere Verfahren zum Einbringen und Untermischen von flüssigen Bestandteilen in den Betonierstrom sind:

- Injektionsverfahren
- Statikmischerverfahren
- Aktivmischerverfahren

Auf diese wird in Kapitel 10 näher eingegangen.

### **9.3 Dispersionsbeschleuniger (Sika)**

Bei den Dispersionsbeschleunigern handelt es sich um eine Mischung aus pulverförmigen Beschleunigern und Wasser. Der pulverförmige Beschleuniger ist jedoch nicht wasserlöslich.

Die Verarbeitung kann auf demselben Wege erfolgen wie der flüssige Beschleuniger, mit der Ausnahme daß die Injektionsflüssigkeit (Dispersion) vor dem Eintritt in die Betonierleitung durch einen vorgeschalteten Statikmischer homogen aufgemischt werden muß.

### **9.4 2-Komponenten-Beton (u.a. DMT)**

Beim 2-Komponenten-Beton handelt es sich um zwei Betonierströme die vor der Verarbeitung zusammengeführt und durchmischt werden müssen. Beide Betonierströme sind solange sie nicht miteinander in Kontakt geraten unkritisch, d.h. ändern erst ihre Konsistenz nach einigen, voreingestellten Stunden. Kommen sie gegenseitig in Kontakt, beginnt die Abbindereaktion, je nach Mischungsverhältnis, zeitverzögert.

Das chemische Reaktionsprinzip beruht auf der Kombination von Verzögerer und Beschleuniger. Der verzögerte Betonierstrom A besitzt den Beschleuniger des Betonierstroms B und umgekehrt. Treten diese in Kontakt, wird die Wirkung neutralisiert bzw. die der mengenmäßig höheren Komponente dominiert. Auf diese Weise ist mit

dem 2-Komponenten-Beton ein, in gewisser Bandbreite variables, Erstarrungsverhalten einzustellen.

Vorteil gegenüber der Variante mit dem flüssigen Beschleuniger ist, daß die Erstellung einer homogenen Mischung zweier nahezu gleichwertiger Volumenströme mit wesentlich geringerer Mischenergie zu realisieren ist als die zweier sehr unterschiedlicher Volumenströme (Anteil flüssiger Beschleuniger ca. 8% vom Bindemittelgehalt). Nachteil ist, daß das Dosieren einer flüssigen Komponente mit geringerem Aufwand zu realisieren ist als das Zudosieren eines Beton oder Mörtelstroms.

Im Folgenden soll näher auf die Versuche zur Inline-Mischung von flüssigen Beschleunigern eingegangen werden.

## 10 Versuche zur Inline-Mischung von flüssigen Zusatzmitteln

### 10.1 Allgemeines

#### 10.1.1 Versuchsziel

Ziel der Versuche ist es ein geeignetes System zu entwickeln mit dem Pumpbeton in der Betonierleitung kurz vor dem Austritt mit flüssigen Beschleuniger versetzt und durchmischt werden kann. Der damit erzielte Durchmischungsgrad soll dem Beton das geforderte Abbindeverhalten verleihen.

Da es sich beim Beton um eine Nicht-Newtonsche Flüssigkeit handelt ist eine theoretische Berechnung der Mischgüte nicht exakt durchführbar. Dies war der Grund für die Durchführung der hier vorgestellten praktischen Versuche.

#### 10.1.2 Bingham Fluide

Das Fließverhalten des Betons ähnelt nicht dem einer Newton'schen Flüssigkeit. Wie dem folgenden Diagramm zu entnehmen ist, muß erst ein gewisser Schubspannungsgrenzwert (Fließgrenze) überschritten werden, bevor die "Substanz" zu fließen beginnt.

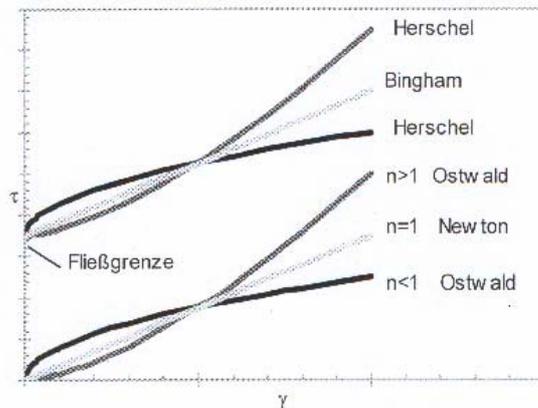


Abb.:10-1 Fließkurve von Bingham-Fluiden

Diese Fließgrenze  $\tau_0$  ist abhängig von der Art und Zusammensetzung der Betonrezeptur.

Dazu zählen vor allem

- Temperatur
- Klinkerzusammensetzung
- mineralogische Struktur
- Feststoffkonzentration (w/z-Wert)
- Korngröße und -verteilung

Um die Fließeigenschaften von Betonen zu verbessern werden Zusatzmittel (Fließmittel) dem Zugabewasser zugegeben. Diese sind exakt auf die Rezeptur abgestimmt. Mit Hilfe von Rotationsviskosimetern wird der Effekt an einer Fließkurve aufgezeigt. Vorteil der Fließmittel ist, daß sie den Wasserhaushalt und damit den Festigkeitsverlauf nicht beeinflussen (wenn Dosiergrenzen 0,1-0,2 Gew.-% des Bindemittels eingehalten werden).

### 10.1.3 Versuchsaufbau und –durchführung

Mit dem folgenden Versuchsaufbau soll der Durchmischungsgrad unterschiedlicher eigens entwickelter bzw. modifizierter Mischer getestet werden.

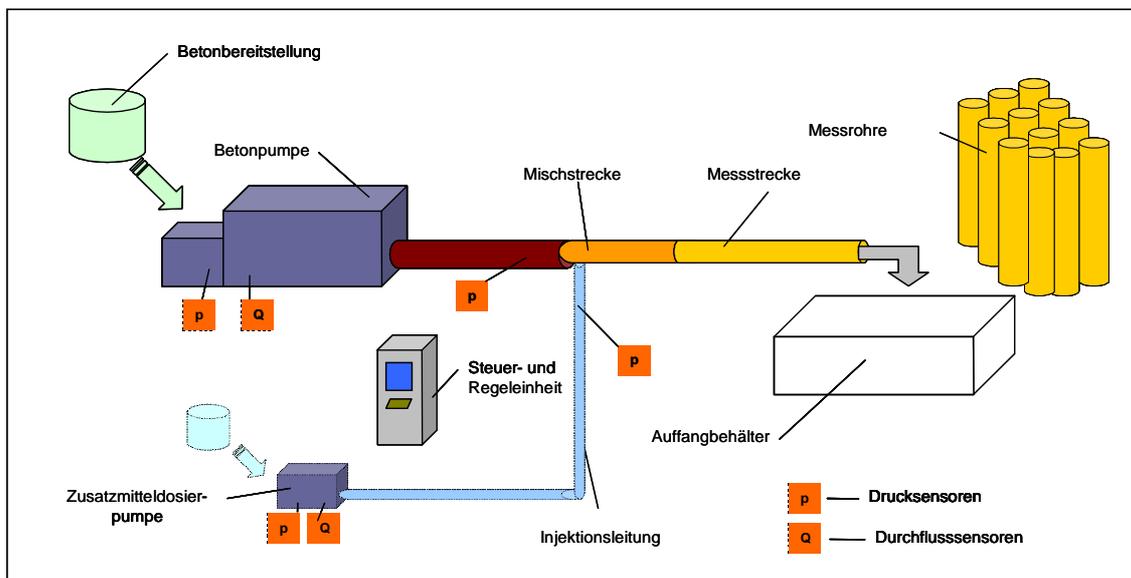


Abb.10-2: Genereller Versuchsaufbau

Mit Hilfe einer Betonpumpe wird ein genau definierter Stahlfaserbeton (Versuchsbeton) über eine Betonierleitung DN 100 durch eine Mischstrecke gepumpt.

In dieser Mischstrecke werden die folgenden Mischervarianten getestet:

- Reine Injektion
- Kombination aus Injektion und Statikmischer
- Statikmischer
- Aktivmischer

Zu Beginn der Mischstrecke wird ein Pigmentfarbstoff, welcher auch zum Einfärben von Betonsteinen verwendet wird, in den Betonierstrom zudosiert. Dieser soll das flüssige Dosiermittel simulieren und über die Einfärbung den Durchmischungsgrad optisch kenntlich machen. Der Farbstoff wird im gleichen Mischungsverhältnis wie das flüssige Zusatzmittel dem Betonstrom zugegeben.

Im Anschluß an die Mischstrecke ist eine Meßstrecke installiert, in der das Mischungsergebnis festgehalten wird. Dies erfolgt durch PVC Rohre DN 100 die direkt im Anschluß an den Mischerausgang angeschlossen sind. Dadurch werden störende Mischeffekte aufgrund zwischengeschalteter Betonierleitungen vermieden. Der Beton gelangt also, getrieben von der Pumpe, durch die Leitung in den Mischer, wird dort mit Dosiermittel versetzt, durchmischt und durch die Pumpenenergie weiter in das Meßrohr (PVC Rohr) geschoben. Von dem Meßrohr Auslauf fließt der durchmischte Beton direkt in einen Auffangcontainer, wo er begutachtet und entsorgt werden kann. Nachdem sich ein stabiler Mischstrom eingestellt hat, wird das etwa 1,5 m lange PVC Rohr aus dem Betonstrom entnommen und sofort bodenseitig mit einem Verschlußstopfen verschlossen, so daß der voll gefüllte Querschnitt erhalten bleibt. Dieses Meßrohr wird gekennzeichnet und senkrecht zur Seite gestellt. Nach dem ausreichenden Abbinden des Betons, der hier unbedenklich eingestellt ist (ca. 24 h), wird das PVC Rohr mit dem abgebundenen Beton in Stücke von ca.150 mm zersägt. Einige davon werden außerdem noch in Längsrichtung durchschnitten, so daß zum einen die Querschnittsfläche aber auch die Längsflächen im Beton eingesehen werden können.



*Abb.10-3: Beispiel für zersägte Probezylinder*

Anhand des Anteils eingefärbter Bereiche an den Schnittflächen kann so die Mischgüte bzw. der Durchmischungsgrad bestimmt werden.

Die Zudosierung erfolgt über ein Dosiermittelpumpe, die sensorgesteuert eine exakte Dosiermenge gewährleistet.

#### **10.1.4 Beton- und Dosiermittelpumpe**

Um ein exaktes Mischungsverhältnis von Beton und Dosiermittel zu realisieren, ist es erforderlich, daß die Betonpumpe und Dosiermittelpumpe gekoppelt sind. Diese Kopplung kann elektrisch sowie hydraulisch erfolgen.

Verfahrensbedingt ist nach jedem Hubvorgang eine Hubunterbrechung im Millisekundenbereich, welche in dem Umschlagen der Rohrweiche der Doppelkolbenpumpe begründet ist. In dieser Förderpause, welche auch als Atmen der Pumpe bezeichnet wird, hat die Dosierpumpe ebenfalls die Förderung einzustellen.

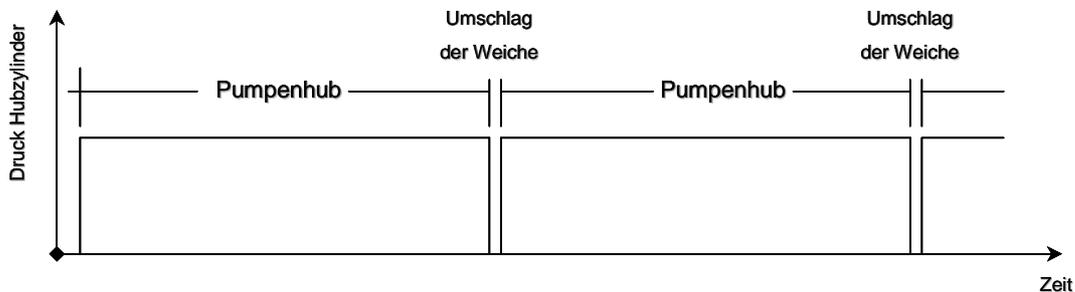


Abb.10-4: Pumpendiagramm Betonpumpe

Bei einer **elektrischen Kopplung** wird der frequenzgeregelte Antriebsmotor der Dosierpumpe entsprechend der Stellung des Förderkolbens der Betonpumpe gesteuert. Über die Regelung der Kolbenhubgeschwindigkeit im Verhältnis zum Dosiermittelstrom gegen Ende jedes Hubvorganges können Dosierunregelmäßigkeiten während der Umschlagphase der Weiche (Doppelkolbenpumpe) weitestgehend ausgeglichen werden.

Bei der **hydraulischen Kopplung** erfolgt die Kommunikation der Betonförderpumpe mit der Dosierpumpe über Hydraulikleitungen. Bei der Dosierpumpe handelt es sich um einen doppelt wirkenden Hydraulikzylinder. Je eine Seite des Zylinders ist hydraulisch mit der entsprechenden Druckseite des Betonförderkolbens verbunden. Ist ein Hubvorgang bei der Betonpumpe (Doppelkolbenpumpe) beendet, erfolgt auch eine Unterbrechung des Dosierstromes für die Zeitspanne bis der zweite Förderkolben seine Arbeit aufnimmt (wenige Millisekunden). Mit diesen Verfahren ist eine exakte Dosierung in den Betonstrom in Abhängigkeit von der Fördergeschwindigkeit gegeben (Abweichungen aufgrund der Leitungselastizität bleiben unberücksichtigt).

Um in dieser Förderpause das Eindringen von Zementbestandteilen in die Dosierleitung zu verhindern, was zum schlagartigen Verstopfen dieser führen würde, ist eine doppelte Absicherung vorgesehen.

### 1. Absicherung:

Einbau eines Rückschlagventils in der Dosiermittelzuleitung sowie eine steife Leitungsauslegung. Bei Gegendruck in der Leitung verschließt das Rückschlagventil diese und verhindert eine Strömungsumkehr. Die Ausführung mit starren Leitungen

soll das Pulsieren des Förderstromes verhindern. Sind die Leitungen zu weich, dehnen sie sich bei Druckanstieg und kontrahieren sich bei Druckreduzierung, was ein exaktes Dosieren unmöglich machen würde.

## 2. Absicherung:

Eine speziell entwickelte Lippendüsenkombination direkt im Auslaufbereich der Injektionsleitung. Damit soll verhindert werden daß Zementbestandteile während Pumpunterbrechungen in Kontakt mit den flüssigen Beschleuniger aus der Dosiermittelleitung kommen kann.

Dabei wird eine Lippendüse aus speziellem Kunststoff vor eine Blende geschaltet.

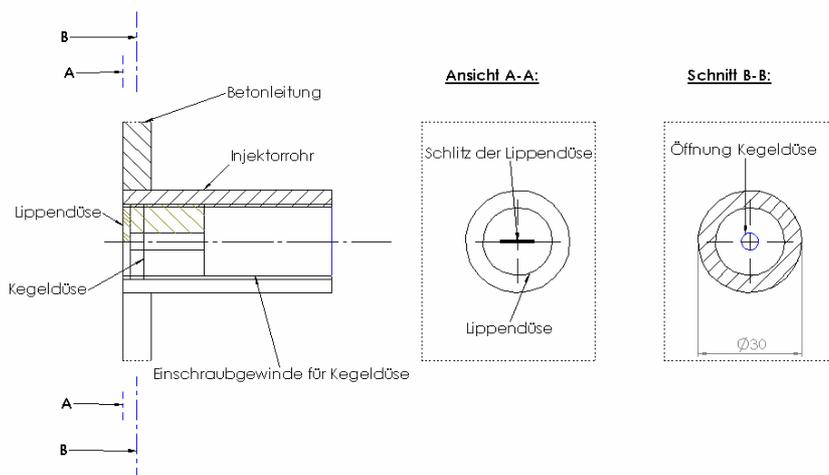


Abb.10-5: Lippendüse-Injektordüse Kombination (Zeichnung)

Die Lippendüse öffnet sich sobald der Druck in der Düse größer ist als der Druck in der Betonleitung, verschließt sich sofort wieder wenn dieser abnimmt. Ein Umklappen der Lippendüse durch spaltfreie Anordnung an dem Düsenaustritt verhindert das Eindringen von kritischen Betonbestandteilen.

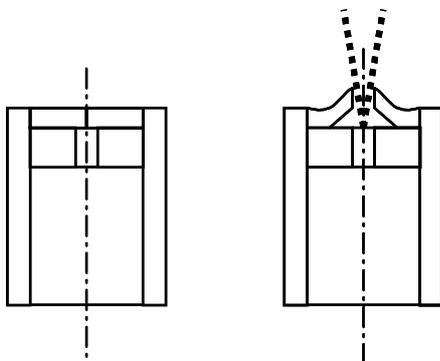


Abb.10-6: Schema der Funktionsweise: Lippendüse offen, - geschlossen

### 10.1.5 Versuchsbeton

Im Folgenden ist die Rezeptur des Versuchsbetons dargestellt.

Pos.	Bestandteil	Anteil	Dichte	Volumenanteil
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[l/m <sup>3</sup> ]
1	CEM II / 32,5 R	420,0	3,1	135,48
2	SFA	0,0	3,1	0,00
3	Summe Bindemittel	420,0		135,48
4	Sieblinie A/B 8	1.741,1	2,6	662,02
5	Summe Zuschläge	1.741,1		662,02
6	Wasser	195,00	1,0	195,00
7	W/B-Wert	0,46		
8	Stahlfasern 30/0,5	60,0	8,0	7,50
9	Summe Stahlfasern	60,0		7,50
10	Summe			1.000,00

Abb.10-7: Rezeptur Versuchsbeton

Der Versuchsbeton wurde nach dem Kriterium der Verarbeitbarkeit (Pumpfähigkeit) und Konsistenzstabilität ausgewählt. Um die Versuchsergebnisse der verschiedenen Betonchargen vergleichbar zu machen wurden jeweils eine identische Betonrezeptur sowie der gleiche Betonlieferant verwendet. Die Grundverzögerung des Betons wurde so gewählt, daß die Konsistenz während der Versuchsdurchführung konstant blieb.

Als Zuschlagkörnung wurde Rheinsand nach der Kornverteilungslinie A/B 8 gewählt. Diese Korngröße wurde vor allem im Hinblick auf die Durchmischungsuntersuchung gewählt. Je kleiner die Korngröße um so höher ist die spezifische Oberfläche und somit die erforderliche Mischenergie zur Realisierung einer konstanten Mischgüte (gleichmäßige Verteilung aller Betonbestandteile).

Beim Zement wurde ein CEM II / 32,5 R verwendet der die geforderten gutmütigen Eigenschaften im Hinblick auf Konsistenzstabilität innerhalb der ersten 1-2 Stunden nach Wasserzugabe besitzt.

Als Stahlfasern wurden die Stahldrahtfasern der Fa. Vulkan Harex mit einem Längen-Durchmesser Verhältnis von 30/0,5 (aspect ratio 60) verwendet. Der Fasergehalt wurde einheitlich auf 60 kg/m<sup>3</sup> festgelegt.

Um evtl. Stopfer aufgrund zu hohem Stahlfasergehalt bei den Statikmischerversuchen auszuschließen, wurde in Vorversuchen die kritische Faserlänge und -gehalt ermittelt.

### 10.2 Injektorverfahren

Beim Injektorverfahren wurde versucht durch Anordnung von mehreren Injektionsrohren am Umfang der Betonierleitung flüssigen Beschleuniger in den Betonierstrom zu injizieren.

Dabei wurden folgende Anordnungen getestet:

- Bis zu 6 Injektionsstellen an einem Querschnitt
- Variation der Eindringtiefen der Injektionsrohre in den Betonierstrom
- Injektionsrichtungen: 90°, 40° in Strömungsrichtung, 40° entgegen Strömungsrichtung
- Art und Orientierung der Düse an der Injektionsstelle: Flachstrahl-, Kegelschtrahldüse
- Düsendurchmesser

In den folgenden Abbildungen sind einige beispielhafte Anordnungen samt Versuchsergebnis dargestellt.

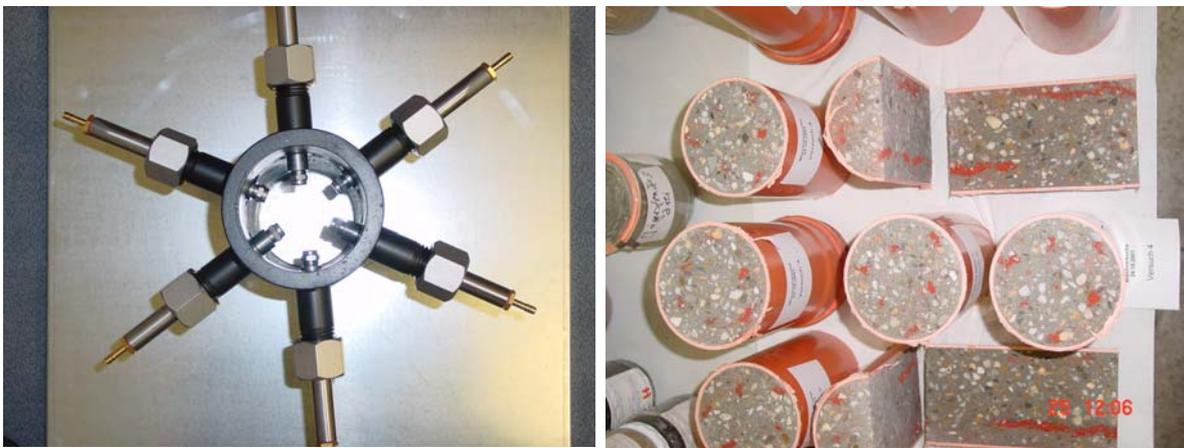


Abb.10-8: Düsenanordnung 90°, Eindringtiefe: 3x25mm, 3x15mm

Aus Kostengründen wurden die farbigen Abbildungen im Anhang II zusammengefaßt.



Abb.10-9: Düsenanordnung 40° in Strömungsrichtung, Eindringtiefe: 3x25mm, 3x15mm

Wie aus der letzten Abbildung zu ersehen ist, ist das reine Injektionsverfahren für das Untermischen von flüssigen Beschleuniger nicht geeignet.

Es konnte in der Betonierleitung aufgrund der Nähe zur Austrittsstelle kein Druck aufgebaut werden, der ein Verteilen des Farbstoffes im Querschnitt ermöglicht hätte. Des Weiteren sind in einer Betoniersuspension keine Hohlräume enthalten die einen Expandieren des Injektionsfarbstoff erlauben würden. Das injizierte Material verbleibt an der Stelle, an der es injiziert wurde. Von dieser Stelle aus muß es, um eine ausreichende Durchmischung zu realisieren, durch weitere Mischwerkzeuge verteilt werden.

Eine Kombination mit dem Statikmischerverfahren schien sinnvoll.

### **10.3 Statikmischerverfahren**

#### **10.3.1 Mischprinzip**

Das Statikmischerverfahren beruht auf dem Prinzip des Teilens und Verdrängens des Betonierstroms in der Leitung. Dabei wird auf das Einbringen einer zusätzlichen Mischenergie verzichtet. Als Mischenergie wird die Strömungsenergie die von der Betonpumpe übertragen wird, verwendet. Getestet wurden je ein modifizierter Kenics-Mischer und ein modifizierter Fingermischer von Sulzer. Als die in den Betonierstrom unterzumischende Komponente wurde wiederum ein flüssiger Pigmentfarbstoff gewählt.

#### **10.3.2 Modifizierter Kenics-Mischer**

Das modifizierte **Kenics-Mischerprinzip** beruht auf dem Teilen und anschließenden Drehen des geteilten Förderstroms um 90-180°. Die Injektionsstelle ist dabei zentrisch auf das erste Mischerelement zu richten, so daß der Volumenstrom der unterzumischenden Komponente (flüssiger Beschleuniger) mit dem ersten Mischerelement in zwei Ströme geteilt wird. Bei der anschließenden Verdrehung wird das Material vermischt, bevor am nächsten Mischerelement aus zwei Strömen vier entstehen und der Verdrehvorgang (Mischvorgang) erneut beginnt.

Je nachdem wie viele Mischereinheiten in Serie geschaltet werden, um so höher ist die Mischgüte. Dieses Verfahren wird hauptsächlich bei der Verarbeitung von Injektionsmörteln auf Kunstharzbasis verwendet. Dabei wird versucht, zwei gleichwertige Volumenströme miteinander zu vermischen, was wiederum den Mischaufwand reduziert und die Mischgüte erhöht.



Abb.10-10 Modifizierter Kenicsmischer mit Injektoreinheit mit zwei Mischereinheiten



Abb.10-11 Ergebnis Farbversuch mit modifiziertem Kenicsmischer (10 Mischerelemente) und einer Injektoreinheit 40° in Strömungsrichtung



Abb.10-12 Ergebnis Farbversuch mit modifiziertem Kenicsmischer (10 Mischerelemente) und einer Injektoreinheit 90°

Das Mischgüte ist abhängig von der Anzahl an Mischerelementen und der Anzahl und Verteilung der Injektionsstellen. Dabei ist darauf zu achten, daß die Injektionsströme auch durch die vorderste Kante der Mischerelemente geteilt werden kann.

### 10.3.3 Modifizierter Fingermischer (Sulzer)

Der **modifizierte Fingermischer (Sulzer)** arbeitet ausschließlich nach dem Verdrängungsprinzip. In der Betonierleitung sind geometrisch exakt festgelegte Widerstandskörper integriert, die eine radiale Strömung verursachen und damit ein Vermischen der beiden zu vermischenden Komponenten veranlassen.

Durch die gegenseitige Anordnung von Lippen und Finger sowie deren Anstellwinkel ist ein Druckgefälle im Anschluß an die Widerstandskörper erzeugbar. Dadurch wird verhindert, daß sich das Material an den Widerstandskörpern staut und ein kontinuierlicher Fluß durch die in Reihe geschalteten Elemente erzeugt werden kann.



Abb.10-13 Modifizierter Fingermischer (Zeichnung)



Abb.10-14 Modifizierter Fingermischer (Bild)



Abb.10-15: Ergebnis modifizierter Fingermischer

Wie beim modifizierten Kenics-Mischer ist die Mischgüte von der Anzahl und Verteilung der Injektionsstellen sowie der Anzahl von Mischererelementen abhängig. Wie die Abbildungen zeigen, kann mit wenigen Mischererelementen und einem in der Versuchsphase ungünstigen Mischungsverhältnis eine gewisse Durchmischung erzeugt werden. Ob diese für das geregelte Abbinden des Betons ausreicht, ist vom Reaktionsprodukt abhängig. Die Bereiche die gut durchmischt sind starten ihre Erstarrungsreaktion am schnellsten und können durch entsprechende thermische Infektionswirkung die verbleibenden Bereiche aktivieren. Je nach Einsatzfall ist dies als unproblematisch zu betrachten. Ist genügend Platz vorhanden können auch entsprechend viele Mischererelemente in Serien geschaltet werden. Damit steigen jedoch auch der erforderliche Förderdruck in der Leitung vor dem Mischer und demzufolge auch das Stopferrisiko.

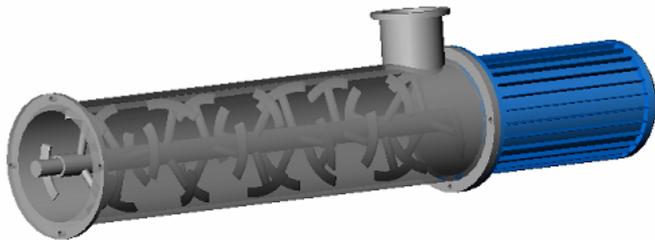
Problematisch erscheint außerdem die Reinigung des Mixers. Möglich wäre z.B. ein permanenter Betrieb des Durchlaufmischer, so daß der Beton mit Beschleuniger versetztem Beton ständig mit frischem Beton ersetzt wird. Eine weitere Alternative ist das Ersetzen des mit Beschleuniger versetzten Betons, mit einem ohne Zusatzmittel bzw. eines aktiv verzögerten Ersatzbetons. Kritisch dabei sind jedoch, die aufgrund der Geometrie vorhandenen Ecken und Totbereiche in denen der Beton nur sehr schwer zu ersetzen ist. Getestet wurde dies durch Abstellen der Injektionszufuhr und anschließende Kontrolle des Betonstroms auf noch vorhandene Farbbestandteile im nachgeschalteten Meßrohr.

Das Abstellen des Injektionsstroms alleine war nicht ausreichend, um den kritischen Beton aus dem System zu entfernen.

Sicherste Variante ist das aktive Reinigen der einzelnen Mischererelemente mit Wasser. Dazu sind die Mischererelemente mit Schnellverschlüssen versehen, wie sie zum Verbinden von Betonierleitungen verwendet werden. Damit können die einzelnen Elemente schnell getrennt und von beiden Seiten ausgewaschen werden. Durch die Verwendung von Betonierschellen ist die Integration einer beliebigen Anzahl von Mischererelementen an einer beliebigen Stelle in der Betonierleitung möglich.

#### 10.4 Aktivmischerverfahren

Die höchste Mischenergie kann durch ein aktiv (elektrisch) betriebenes Mischorgan in den Beton eingebracht werden. Dazu wurde ein Inline-Mischer entwickelt, der beliebig in eine Betonierleitung integriert werden kann.



*Abb.10-16: Aktiver Inline-Mischer (Zeichnung)*

Dieser ist druckstabil (bis zu den maximalen Betonpumpendruck) und verfügt über eine fliegend gelagerte Mischerwelle. Diese Mischerwelle wird extern über einen Elektromotor mit Getriebestufe angetrieben. Während der Versuchsphase wurde ein frequenz geregelter Drehstrommotor verwendet. Dadurch konnte die Wellengeschwindigkeit an den Betonvolumenstrom angepaßt und der optimale Betriebspunkt ermittelt werden.

Die Mischerwerkzeuge wurden speziell für das Untermischen des flüssigen Beschleunigers in einen Betonierstrom angepaßt. Dabei wurde darauf geachtet, daß es zu keiner Ansammlung oder Ausrichtung der Stahlfasern in der Mischstrecke kam. Der Mischer hat im Gegensatz zu den klassischen Systemen, reine Misch- und keine Förderfunktion. Die Förderenergie wird von der Betonpumpe aufgebracht.

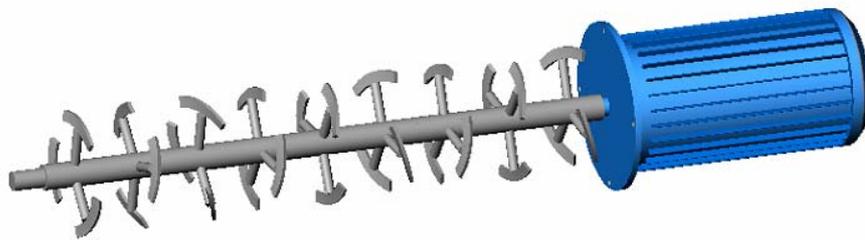


*Abb.10-17: Aktiver Inline-Mischer (Bild)*

Die Verweilzeit des Betons und damit die Mischgüte sind vom Durchmesser und der Mischerlänge abhängig. Diese wurden an die geplanten Förderströme angepaßt.

Im Einlaufbereich wird über eine Injektionsstelle das flüssige Zusatzmittel zugegeben. Von dieser Stelle aus ist der Beton in Strömungsrichtung betrachtet kritisch, d.h. muß nach Beendigung des Betoniervorgangs vollständig aus der Leitung und dem Mischer entfernt oder durch einen unbedenklichen Beton (ohne BE Zugabe) ersetzt werden.

Dazu ist der Mischer mit Schnellverschlüssen versehen, die ein Herausziehen und Reinigender Mischerwelle samt Antriebseinheit aus dem Mischerrohr ermöglichen.



*Abb.10-18: Aktivmischer ohne Rohr*

Im Versuch wurde das flüssige Zusatzmittel durch den bereits erwähnten flüssigen Pigmentfarbstoff ersetzt. Wie aus der nächsten Abbildung zu ersehen ist, konnte mit der gewählten Mischeranordnung ein hervorragendes Mischergebnis erzielt werden.



*Abb.10-19: Ergebnis Aktivmischerversuch*

Mit Hilfe dieses Verfahrens ist man in der Lage, an beliebiger Stelle in der Betonierleitung durch Integration des druckstabilen Aktivmischers einen flüssigen Beschleu-

niger zuzudosieren. Leider sind die Produkte in den Labors der Zusatzmittelhersteller noch nicht reif für den Baustelleneinsatz.

Die Ergebnisse sind jedoch viel versprechend und zusammen mit der hier vorgestellten Verfahrenstechnik ist man bald in der Lage diese einzusetzen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Alten, T. et al: Challenges for the 21st century. Balkema Rotterdam 1999
- [2] Baumann, T.: Tunnelauskleidung mit Stahlbetontübbingen Bautechnik 69 (1992) Heft 1
- [3] Deutsche Bahn AG: Richtlinie Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten, Ril. 853, 1998
- [4] Barkauskas, K., et al: Beton Atlas. Verlag Bau + Technik Düsseldorf 2002
- [5] Beitz, W., Küttner, K.-H.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 17. Auflage. Springer Verlag Berlin 1990
- [6] Blom, C.B.M.: Damage patterns and mechanism of segmented concrete tunnel linings. Delft University of Technology, Delft 2001
- [7] CEN TC 151 Tunnelling machines- Shield machines, thrust boring machines, auger boring machines, lining erection equipment- Safety requirements
- [8] Dahl, J., Nussbaum, G.: Neue Erkenntnisse zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Tübbings im Bereich der Koppelfugen. Tunnelbau 1997
- [9] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., DGGT: Taschenbuch für den Tunnelbau 2002. Verlag Glückauf Essen 2002
- [10] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Vorträge Deutscher Beton und Bautechnik-Tag 2001. Verlag Ernst & Sohn Berlin 2001
- [11] Deutscher Betonverein: Merkblatt Wasserundurchlässiger Baukörper aus Beton, Juni 1996
- [12] DIN 1045, Ausgabe 7.01 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
- [13] Eichler, K.: Fels- und Tunnelbau. Expert Verlag Renningen 2000
- [14] EN 206, Beton; Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis
- [15] Fachzeitschrift für Beton und Technik: Beton 12/2002. Verlag Bau + Technik Düsseldorf 2002
- [16] Girmscheid, G.: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Verlag Ernst & Sohn Berlin 2000
- [17] Herzog, Max A.M.: Elementare Tunnelbemessung. Werner Verlag 1999

- [18] Iken, Lackner, Zimmer: Handbuch der Betonprüfung, 4. Auflage. Beton-Verlag, Düsseldorf 1994
- [19] Nußbaumer, Manfred: Infrastrukturprojekte im Rahmen des Stabilitätspaktes Südosteuropa. Internationales Symposium Tunnelbau 2001
- [20] Krischke, A.: 25 Jahre U-Bahnbau in München. Offsetdruck K.G. München 1990
- [21] Locher, F.: Zement, Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau + Technik Düsseldorf 2000
- [22] Maidl, B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band I und II. Verlag Glückauf GmbH Essen 1984
- [23] Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L.: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb. Verlag Ernst & Sohn Berlin 1995
- [24] Österreichischer Betonverein: Richtlinie Innenschalenbeton, März 1995
- [25] Philip, G.: Schildvortrieb im Tunnel und Stollenbau. Tunnelbau 1986
- [26] Ricker, R.: Maschinentechnik im Betonbau. Verlag Ernst & Sohn Berlin 1996
- [27] Röhling: Zwangsspannung infolge Hydratationswärme. Verlag Bau + Technik Düsseldorf 2002
- [28] Scholz, Hiese: Baustoffkenntnis, 14 Auflage. Werner Verlag Düsseldorf 1999
- [29] Siegel, W.: Pneumatische Förderung, Vogel Buchverlag Würzburg 1991
- [30] Smolczyk, U.: Grundbau Taschenbuch, 5. Auflage. Verlag Ernst & Sohn Berlin 1996
- [31] Stacey, T.R.: AITES ITA 2000 World tunnel congress, R.G. Stimson and J.L. Stimson Durban SA 2000
- [32] Stein, Dietrich: Grabenloser Leitungsbau. Verlag Ernst & Sohn Berlin 2003
- [33] Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlage e.V., STUVA: Unterirdisches Bauen 1971, Tagung 1971. Verlag Bertelsmann Fachzeitschriften Gütersloh 1997
- [34] Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlage e.V., STUVA: Unterirdisches Bauen 1997, Tagung 1979. Verlag Bertelsmann Fachzeitschriften Gütersloh 1979

- [35] Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlage e.V., STUVA: Unterirdisches Bauen 1985, Tagung 1985. Verlag Bertelsmann Fachzeitschriften Gütersloh 1985
- [36] Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlage e.V., STUVA: Unterirdisches Bauen 2001, Tagung 2001. Verlag Bertelsmann Fachzeitschriften Gütersloh 2001
- [37] Pfefferkorn, Steinhilber: Ausgedehnte fugenlose Stahlbetonbauten; Erfahrungsbericht aus drei Jahrzehnten. Beton-Verlag Düsseldorf 2002
- [38] Türke, Henner: Statik im Erdbau, 3. Auflage. Verlag Ernst & Sohn Berlin 1999
- [39] Tunnel Fachzeitschrift Ausgabe 03-2001
- [40] Weber, Tegelaar: Guter Beton. Verlag Bau + Technik Düsseldorf 2001
- [41] [www.europa.eu.int](http://www.europa.eu.int)

**Kontaktadresse:**

Gerhard Lang  
E-Mail: [Lang.Gerhard@vdi.de](mailto:Lang.Gerhard@vdi.de)