



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
  
VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY



UNIVERSITÄT FÜR ARCHITEKTUR,  
BAUWESEN UND GEODÄSIE – SOFIA  
  
UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL  
ENGINEERING AND GEODESY - SOFIA

# DIPLOMARBEIT

Master Thesis

## ANALYSE VON BAUVERFAHREN IM U-BAHNBAU IN SOFIA

ANALYSIS OF SOFIA METRO CONSTRUCTION METHODS

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer Diplom-Ingenieurin  
unter der Leitung von

**O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans Georg JODL**

am

**Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement**

**E234**

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Irena SULAY**  
**Matr. Nr. 0427339**

„General Kolev“ 70 / 6 / 14  
BG – Varna

Sofia, Juni 2010

.....  
Irena Sulay

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement der TU Wien im Rahmen eines Doppel-Degree Studiums zwischen der Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie Sofia und der Technischen Universität Wien entwickelt. Diese Diplomarbeit stellt den Abschluss meines Studiums der Richtung "Verkehrsbauwesen" dar.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herr O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans Georg Jodl seitens des Instituts für interdisziplinäres Bauprozessmanagement für die Bereitstellung des Themas, die Betreuung und die erworbenen Kenntnisse und Ideen bedanken.

Mein Dank gilt ebenso Univ. Ass. Dipl.-Ing. Bettina Bogner für die wissenschaftliche Betreuung und intensive Durchsicht, für die Ratschläge und Hinweise während der Anfertigung meiner Arbeit.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern, die mir das Studium nahe legten und mit viel Verständnis, Geduld und Ihrer ganzen Großzügigkeit es mir ermöglichten.

## **Kurzfassung**

Die Untergrundbahn ist ein eigenständiges Schienenverkehrssystem, das kreuzungsfrei, völlig unabhängig von den anderen Verkehrssystemen konzipiert ist und dessen Liniennetz sich auf das Gebiet der Stadtgrenzen beschränkt. Der U-Bahnbau umfasst ein großes Spektrum von zweckmäßigen, vernünftigen, sicheren, optimal begründeten Bauarten. Durch den Einsatz verschiedener Bauverfahren wird die Herstellung von Tunnelstrecken und Stationsbauwerken ermöglicht.

In der vorliegenden Diplomarbeit werden folgende drei zur Anwendung kommenden Bauverfahren im U-Bahnbau in Sofia systematisch analysiert. Es sind die

- Offene U-Bahnbauweise
- Halboffene U-Bahnbauweise
- Geschlossene U-Bahnbauweise

Die Wahl- und die Anwendungsprinzipien jeder Bauweise sowie die daraus folgenden Konstruktionstypen und baulichen Teilvorgängen werden auf Grundlage der ausgebauten und bereits in Betrieb genommenen U-Bahnanlagen in der Stadt Sofia erklärt. Zur Einleitung jeder Bauweise wird grob der Herstellungstyp der Methode erwähnt. Anschließend wird die verfahrensspezifische Bauausführung in nacheinander gereihten Bauphasen geteilt. Jede Bauphase wird getrennt behandelt und wird nach den herrschenden Planungs- und Durchführungslösungen in Sofia schrittweise dargestellt und aufgelistet. Weiters werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Bauweisen erörtert. Abschließend werden die wichtigsten Baustoffe im U-Bahnbau Sofia erklärt und auf die begleitende Qualitätssicherung während des Ausbaus der unterirdischen U-Bahnkonstruktionen eingegangen.

## Abstract

The underground railway is this kind of independent rail system for transportation, which is designed without any crossings, fully independent from the other transport systems and which linear network is limited within the city. The construction of the metro comprises a wide range of expedient, reasonable, secure and well-grounded types of construction works. The construction of tunnel sections and stations becomes possible thanks to the application of different construction methods.

In the present diploma paper, the three construction methods, which are applied for the construction of the metro in Sofia, are systematically analyzed. The

- Open Construction Method
- Semi-open Construction Method
- Closed Construction Method

are described under the same criteria for consideration. The principles for selection and application of each construction method, the structural types and construction partition approaches thereupon are discussed and explained based on the extended, commissioned facilities of the metro in the city of Sofia. The type of production of the method is mentioned briefly as an introduction of each construction method. Thereafter, the specifics of the construction realization of the method are divided in consistent construction stages. Each construction stage is discussed separately and it is presented and arranged step by step according to the approved plan and implementation decision in Sofia. Later on, the advantages and disadvantages of the different construction method are summarized. At the end, the most important materials for the construction of Sofia metro, as well as the accompanying quality security during the extension of the underground metro structures are discussed.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort.....</b>	<b>1</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>2</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>9</b>
1.1    Geschichtliche Entwicklung des U-Bahnbaus in Europa.....	11
1.2    Sofia und die geschichtliche Entwicklung des U-Bahnbaus in der Stadt.....	14
<b>2 Bauausführung im U-Bahnbau.....</b>	<b>17</b>
2.1    Ingenieurgeologische Rahmenbedingungen.....	20
2.2    Hydrogeologische Rahmenbedingungen.....	23
2.3    Ökonomische Rahmenbedingungen.....	24
2.4    Ökologische Rahmenbedingungen.....	24
2.5    Lokale Rahmenbedingungen.....	24
<b>3 U-Bahnbau in offener Bauweise .....</b>	<b>25</b>
3.1    Tunnelherstellung in einer Baugrube mit freien Böschungen.....	28
3.1.1    Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten .....	30
3.1.2    Bauphase 2: Herstellung der Baugrube mit freien Böschungen.....	31
3.1.3    Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte .....	34
3.1.4    Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung .....	35
3.1.5    Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung .....	36
3.1.6    Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk .....	36
3.1.7    Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse .....	36
3.2    Tunnelherstellung in einer Baugrube mit temporärer Baugrubenumschließung: Trägerverbau 38	
3.2.1    Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten .....	41
3.2.2    Bauphase 2: Herstellung des Trägerverbau .....	41
3.2.3    Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte .....	46
3.2.4    Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung .....	46
3.2.5    Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung .....	47

3.2.6	Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk .....	47
3.2.7	Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse .....	47
3.3	Tunnelherstellung in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung: Schlitzwand .....	49
3.3.1	Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten .....	51
3.3.2	Bauphase 2: Schlitzwandherstellung .....	51
3.3.3	Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte .....	59
3.3.4	Bauphase 4: Herstellung der Dachkonstruktion .....	60
3.3.5	Bauphase 5: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk .....	62
3.3.6	Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse .....	63
3.4	Tunnelherstellung in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung: Bohrpfahlwand .....	65
3.4.1	Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten .....	68
3.4.2	Bauphase 2: Bohrpfahlwandherstellung .....	68
3.4.3	Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte .....	73
3.4.4	Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung .....	73
3.4.5	Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung .....	73
3.4.6	Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk .....	73
3.4.7	Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse .....	74
<b>4</b>	<b>U-Bahnbau in halboffener Bauweise .....</b>	<b>76</b>
4.1	Tunnelherstellung in halboffener Bauweise .....	78
4.1.1	Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten .....	78
4.1.2	Bauphase 2: Voraushub und Schlitzwandherstellung .....	78
4.1.3	Bauphase 3: Aushub bis zur ersten Decke .....	79
4.1.4	Bauphase 4: Einbau der ersten Decke .....	80
4.1.5	Bauphase 5: Aushub bis zur Tunnelsohle .....	81
4.1.6	Bauphase 6: Herstellung der Sohlplatte .....	81
4.1.7	Bauphase 7: Herstellung der Deckenplatte .....	81
4.1.8	Bauphase 8: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk .....	82
4.2	Tunnelherstellung in halboffener Bauweise - Sonderfall .....	82
4.2.1	Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten .....	83
4.2.2	Bauphase 2: Voraushub und Schlitzwandherstellung im ersten Bauabschnitt .....	83
4.2.3	Bauphase 3: Herstellung der Deckenplatte im ersten Bauabschnitt .....	84

4.2.4	Bauphase 4: Voraushub und Schlitzwandherstellung im zweiten Bauabschnitt.....	85
4.2.5	Bauphase 5: Herstellung der Deckenplatte im zweiten Bauabschnitt.....	86
4.2.6	Bauphase 6: Aushub bis unter Tunnelsohle .....	86
4.2.7	Bauphase 7: Herstellung der Sohlplatte .....	86
4.2.8	Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse .....	87
<b>5</b>	<b>U-Bahnbau in geschlossener Bauweise - Schildvortrieb.....</b>	<b>89</b>
5.1	Tunnelherstellung in geschlossener Bauweise - Schildvortrieb.....	105
5.1.1	Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten .....	106
5.1.2	Bauphase 2: Herstellung des Startschachtes .....	106
5.1.3	Bauphase 3: Montage des Erddruckschildes .....	108
5.1.4	Bauphase 4: Ausbau des Tunnels.....	108
5.1.5	Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse .....	115
<b>6</b>	<b>Die wichtigsten Materialien und ihre Anwendung im U-Bahnbau Sofia</b>	<b>117</b>
6.1	Beton .....	117
6.1.1	Betonmischungen .....	117
6.1.2	Spritzbeton .....	118
6.2	Stahl.....	119
6.3	Stützflüssigkeit.....	120
6.4	Abdichtung.....	121
<b>7</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>131</b>
7.1	Literaturverzeichnis.....	131
7.1.1	Fachliteratur .....	131
7.1.2	Webseiten.....	133
7.2	Abbildungsverzeichnis .....	134
7.3	Tabellenverzeichnis.....	137

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
an.	analog
BDS	Bulgarischer Staatliche Standard
Blvd.	Boulevard
BPW	Bohrpfahlwand
bzw.	beziehungsweise
C	Celsius
ca.	circa
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
$E_b$	Elastizitätsmodul
EPBS	Earth Pressure Balanced Shield
evtl.	eventuell
f.	folgende Seite
ff.	folgende Seiten
$G_b$	Schermodul
GOK	Geländeoberkante
GW-niveau	Grundwasserniveau
h	Stunde
i.d.R.	in der Regel
kg	Kilogramm
l	Liter
m	Meter
mind.	mindestens
mittl.	mittler
mm	Milimeter
MS	Metrostation
max.	maximal
NDK	Nationaler Palast der Kultur in Sofia
°	Grad
S.	Seite
sg.	so genannt
Tab.	Tabelle
z.B.	zum Beispiel

## 1 Einleitung

**Jede Untergrundbahn ist anders,**

**U-Bahnbau ist die Kunst, in Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen, vorausschauend zu planen und vor Ort, d.h. auf kleinstem Raum, rechtzeitig versorgt mit Material und Werkzeug, zahlreiche Arbeitsvorgänge und Handgriffe in geordneter Reihenfolge durchzuführen.**

Die Untergrundbahn, U-Bahn, ist eine in der Stadt unterirdisch geführte elektrisch betriebene Schnellbahn, deren Liniennetz sich weitgehend auf das Gebiet der Stadtgrenzen beschränkt. Ihre Entwicklung in den Großstädten der Welt hat gezeigt, dass Massenverkehrsmittel und Individualverkehr in Stadtgebieten eine Gemeinschaft eingehen können. Die U-Bahnnetze sind jene wichtige Voraussetzung, die den bautechnischen Fortschritt jedes Landes vorstellt.

Der Bau einer U-Bahn ist eng mit der Auswahl an Bauverfahren verbunden. Jedes U-Bahnprojekt wird durch unterschiedliche konstruktive, hydrogeologische, technische, wirtschaftliche, ökologische und rechtliche Rahmenbedingungen charakterisiert. Die Herstellung von Tunnelstrecken und Stationsbauwerken umfasst eine Summe bestimmter Vorgänge und Arbeitsweisen, die optimal gewählt und zweckmäßig begründet werden müssen. Die ausgebaute U-Bahn jedes Staates veranschaulicht die vernünftigen Entscheidungen von Planer und Architekten hinsichtlich der existierenden Situation und der betrachteten Auswahlkriterien.

Jede Analyse ist eine systematische Untersuchung eines Gegenstandes oder auch von mehreren hinsichtlich aller einzelnen Komponenten und Faktoren, die sie bestimmen. Durch sinnvolle, vergleichende, kritische und gründliche Zergliederung werden Ergebnisse gefunden und daraus Schlussfolgerungen geschlossen.

Die U-Bahn verkehrt keineswegs nur im Untergrund. Drei Bauarten sind im U-Bahnbau weltweit bekannt:

- U-Bahn in Hochlage (auf Brücken und Hochstraßen)
- U-Bahn im Einschnitt
- U-Bahn im Tunnel

Eine übergeordnete Gliederung der zur Anwendung gebrachten Bauweisen ist dabei zu unterscheiden:

- Offene Bauweise
- Halboffene Bauweise
- Geschlossene Bauweise

In dieser Diplomarbeit werden gezielt, unter Berücksichtigung der vorhandenen geotechnischen Bedingungen in Sofia und konstruktiven Anforderungen der Anlagen im U-Bahnbau, die:

- Einsatzgrundsätze jeder Bauweise vorgestellt,
- Vor- und Nachteile erörtert,
- wichtigsten Herstellungsprozesse systematisiert und
- qualitätssichernden Maßnahmen und wichtigsten Baustoffe aufgelistet.

Ziel der vorliegenden Analyse von Bauverfahren im U-Bahnbau in Sofia ist die angewandte Erfahrung der bulgarischen Bauingenieure im Fachbereich „U-Bahnherstellung“ darzustellen und die getroffenen Entscheidungen zu erläutern. Der Fokus wird speziell auf die einzelnen Arbeitsweisen zur Herstellung von den unterirdischen Konstruktionstypen in Sofia gelegt. Die U-Bahnbauwerke sind diese wichtigen und verfahrensspezifischen Anlagen, die möglichst in der richtigen und wirtschaftlichsten Bauweise gebaut werden sind.

## 1.1 Geschichtliche Entwicklung des U-Bahnbaus in Europa

Der Bau von Untergrundbahnen hat heute eine ungefähr 150-jährige Geschichte, die das internationale Interesse an dem Tunnelbau im Stadtbereich vorstellt. Die Menschheit geht vorwärts und das unterirdische Bahnsystem hält jede große Millionenstadt am Leben. Infolge der starken Bevölkerungszunahme, erheblichen Bebauungsdichte, zunehmenden Intensität des Verkehrs und der wachsenden Problemen der Umweltverschmutzung ist der Bau von U-Bahnen oftmals der einzige Ausweg. Die umfangreichen, wertvollen Erfahrungen und Erkenntnisse im Bereich des großstädtischen U-Bahnbaus waren und sind weltweit eine der wichtigsten Grundlagen für die unterirdischen Verkehrsbauten.

Eröffnung der 1. Strecke	Land	Stadt	U-Bahn
10. Jan. 1863	Großbritannien	London	London Underground
02. Mai. 1896	Ungarn	Budapest	Metro Budapest
19. Juli. 1900	Frankreich	Paris	Métro Paris
15. Feb. 1902	Deutschland	Berlin	U-Bahn Berlin
16. Sep. 1904	Griechenland	Athen	Metro Athen
17. Okt. 1919	Spanien	Madrid	Metro Madrid
25. Sep. 1925	Italien	Neapel	Metropolitana di Napoli
15. Mai. 1935	Russland	Moskau	Metro Moskau
01. Okt. 1950	Schweden	Stockholm	Tunnelbana
29. Dez. 1959	Portugal	Lissabon	Metro Lissabon
06. Nov. 1960	Ukraine	Kiew	Metro Kiew
16. Okt. 1966	Norwegen	Oslo	Oslo T-bane
09. Feb. 1968	Niederlande	Rotterdam	Metro Rotterdam
09. Mai. 1974	Tschechien	Prag	Metro Prag
08. Mai. 1976	Österreich	Wien	U-Bahn Wien
20. Sep. 1976	Belgien	Brüssel	Metro Brüssel
16. Nov. 1979	Rumänien	Bukarest	Metro Bucarest
01. Juni. 1982	Finnland	Helsinki	Metro Helsinki
26. Juni. 1984	Weißrussland	Minsk	Metro Minsk
19. Dez. 1984	Schweiz	Saas Fee	Metro Alpin
07. Apr. 1995	Polen	Warschau	Metro Warschau
28. Jan. 1998	Bulgarien	Sofia	Metropolitan Sofia
16. Sep. 2000	Türkei	Istanbul	Metro Istanbul
19. Okt. 2002	Dänemark	Kopenhagen	Metro Kopenhagen

**Tab. 1: Die ersten U-Bahn Strecken in Europa**

Seit dem 19. Jahrhundert gilt Großbritannien als Ursprungsland des U-Bahnbaus. Am 10. Januar 1863 wurde die erste U-Bahn der Welt „Metropolitan Linie“ in London eröffnet. Sie war für eine Dampflokomotive betriebene Eisenbahn konzipiert. Die erste elektrische U-Bahn der Welt war die im Jahr 1890 eröffnete „City and South London Line“. In Kontinentaleuropa wurde die älteste

U-Bahnstrecke in Budapest (Ungarn) am 02. Mai 1896 eröffnet. Die Budapester U-Bahn wurde in nur 20 Monaten erbaut und in Betrieb genommen. Frankreich (Paris 1900) und Deutschland (Berlin 1902) folgten in den nächsten Jahren dem erfolgreichen Budapester Beispiel. Anfang der dreißiger Jahre begann in der Sowjetunion (Moskau, Leningrad) eine zielstrebige Entwicklung des U-Bahnbaus. Die stürmische Entwicklung des modernen U-Bahnbaus hat ihr Einsatzgebiet in jedem der europäischen Länder gefunden. Am 28. Januar 1998 wurde die Eröffnung der 1. U-Bahnstrecke in der Hauptstadt Bulgariens zur Realität (siehe Tab. 1).

Schon damals wurde erkannt, wie ausschlaggebend die Abhängigkeit der Bauweise von der Beschaffenheit des Untergrundes und den hydrogeologischen Bedingungen sein kann. Folgende zwei voneinander abweichende Bauweisen wurden schon damals beim U-Bahnbau angewendet, die offene und die geschlossene Bauweise.



London: Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse in der Hauptstadt Englands sind durch wasserdichte Tone, Londoner Clay (homogen und standfest), stellenweise Erosionsrinnen mit stark wasserführenden Bodenarten (Sande und Kiese) und hoch liegender Grundwasserspiegel bestimmt. Als herrschende Bauweise im U-Bahnbau in London galt die geschlossene Bauweise. Der Schildvortrieb, genauer der Druckluftschildvortrieb, hatte breites Anwendungsgebiet in der Hauptstadt gefunden.



Budapest: Die geologischen Verhältnisse in der Hauptstadt Ungarns sind durch Tone, Schluffe, Sande- und Kiesschichten bestimmt. Budapest liegt an der Donau, deshalb sind die hydrologischen Verhältnisse durch hochliegenden Grundwasserspiegel und wassergesättigte Bodenarten charakterisiert. Die am meisten angewendete Bauweise war die offene Bauweise. Nach sowjetischem Vorbild hatte auch die geschlossene Bauweise mit Schildvortriebmaschinen in Budapest ein breites Einsatzgebiet gefunden.



**U** Berlin: Die geologischen Verhältnisse in Berlin sind durch wasserführende Sande mit Schichten aus bindigen Bodenarten charakterisiert. Der U-Bahnbau war mit dem Unterfahren von Flüssen und Kanälen gekennzeichnet. In der Periode des intensiven Ausbaus von Tunnel- und Stationsbauwerke wurde die offene Bauweise zur Anwendung gebracht. Berlin gilt noch heute als Heimatort des Trägerverbaus oder sg. Berliner Verbau. Die später entwickelte Hamburger Bauweise wurde auch im U-Bahnbau in Berlin häufig angewendet.



**M** Paris: Die geologischen Verhältnisse in der Hauptstadt Frankreichs sind durch vielschichtig und örtlich stark wechselnde Bodenarten bestimmt: Fein- bis Mittelsandschichten, Tone, Mergel und eingelagerte Kalksteinbänke. Die hydrologischen Verhältnisse sind mit einem hohen Grundwasserniveau gekennzeichnet. Bei dem U-Bahnbau in Paris wurde eine kombinierte Bauweise angewendet: ein zwischen der offenen und der Untertagebauweise kombiniertes Verfahren. Das Belgische Verfahren hatte hier ein breites Einsatzgebiet gefunden.



**M** Moskau: Die geologischen Verhältnisse in Moskau sind durch wasserdichte Ton- und Mergelschichten bestimmt. Das breiteste Anwendungsgebiet hatte die geschlossene Bauweise (Schildvortriebsmethode) gefunden.



Die U-Bahnbau Pioniere dienen noch heute als Vorbild der menschlichen Bestrebung im Bereich der unterirdischen Verkehrsbauten. Die oberflächennahe offene U-Bahn Bauweise hatte in den Jahren eine weltweite Anwendung gefunden. Die geschlossene Bauweise dagegen hat ihre lange Tunnelbau Tradition beibehalten und seine Einsatzmöglichkeiten im U-Bahnbau weiterentwickelt.

## 1.2 Sofia und die geschichtliche Entwicklung des U-Bahnbaus in der Stadt

Sofia ist die Hauptstadt Bulgariens, eine der ältesten europäischen Hauptstädte mit mehr als 7000 jähriger Geschichte. Sofia war Jahrhunderte lang ein wichtiges kulturelles Zentrum, das noch v. Chr. als eine thrakische Stadt gegründet wurde. Während der Römischen Epoche entwickelte sich die Stadt zu einem literarischen, administrativen und wirtschaftlichen Zentrum, dass das Erbe von Slawen und Protobulgaren speicherte. Die Renaussanceepoche hat jene wichtige Rolle in der geschichtlichen Entwicklung Sofias gespielt, damit heute Sofia als moderne, zeitgenössische europäische Stadt dargestellt werden kann.

Das Gebiet der Stadt Sofia beträgt über 490 km<sup>2</sup> auf dem ca. 1.400.000 Menschen leben. Das historisch geplante und gebaute Straßennetz ist von vielen schmalen Straßen und Boulevards geprägt. Bis heute sind noch keine Hauptentlastungsverbindungen, sowie Input-Output-Arterien vollständig realisiert worden. Die vorhandene Infrastruktur kann die zunehmende Intensität des Verkehrs nicht mehr zur Gänze aufnehmen. Der zentrale Teil der Stadt ist in den Hauptverkehrszeiten überlastet. Die überlasteten Boulevards und Straßen sind zu schmal gegen die Anzahl der Autos, die sie pro Tag nutzen müssen. Das stetig wachsende Verkehrsproblem, die Staus, die Bildung von großen Passagierströmen und die begrenzte Durchlaßfähigkeit der Straßen führen zu:

- erheblichen Fahrzeiten und das sowohl mit öffentlichen als auch mit privaten Verkehrsmittel
- Verminderung der Fahrgeschwindigkeiten bis zu 7-8 km/h in den Hauptverkehrszeiten
- Umwelt- und Lärmbelästigungen

Die globalen Trends, die Analyse der entstandenen Probleme und die Prognosen der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung erfordern die Notwendigkeit eines effektiven öffentlichen Verkehrsmittel, dies in Sofia durch den Bau einer U-Bahn realisiert wird.

Der Gedanke, in Sofia eine Untergrundbahn zu bauen, ist noch gar nicht alt. Erstmals wurde dies in den sechziger Jahren als ein geeignetes innerstädtisches Massenverkehrssystem diskutiert. Zu jener Zeit stieg die Bevölkerung in der Hauptstadt rasant an (~ 10.000 Einwohner/Jahr). Es wurden neue Stadtviertel, wie „Lyulin“, „Mladost“, „Drujba“, „Nadejda“, „Ovcha Kupel“, „Obelya“ am Rande der Stadt errichtet. Die Daten der damaligen Statistik für die aufkommenden Passagierströme lieferten:

- Richtung „Ost-West“ → 40 000 Passagiere pro Stunde
- Richtung „Süd-Nord“ → 32 000 Passagiere pro Stunde

Diese Passagierströme überlasteten die Kapazitätsmöglichkeiten des existierenden öffentlichen Verkehrs und das Verkehrsaufkommen wurde von Jahr zu Jahr größer.

Im Jahr 1967 wurden die ersten Untersuchungen für die Entwicklungsphasen des Projektes „Tram unmittelbar unter dem Straßenpflaster in der Stadt Sofia“ durchgeführt. Der technisch-wirtschaftliche Bericht wurde vom Institut für Projektierung „Sofprojekt“ ausgearbeitet. Alle in Frage kommenden Varianten des Netzes wurden unter Acht genommen und die wichtigsten Aspekte detailliert geprüft und berechnet. Die Tendenzen zur Stadtentwicklung und zu einem Wachstum der Bevölkerung, die Fragen der Verteilung von Wohnbevölkerung und Arbeitsplätzen, sowie der Koordinierung der existierenden Verkehrsmittel wurden bautechnisch und wirtschaftlich berücksichtigt. Verschiedene Verkehrsströme wurden analysiert und die wichtigsten Verkehrsverbindungen bewertet. Die Idee wurde in Richtung U-Bahnbauprojekt weiterentwickelt. Im Dezember 1968 wurde der ausgearbeitete technisch-wirtschaftliche Bericht „Untergrundbahn der Stadt Sofia“ abgegeben und im Jahr 1972 vom Ministerrat endgültig genehmigt. Im Jahr 1973 wurde die Direktion „Metroprojekt“ gegründet und schon zwei Jahre später (1975) wurde das Projekt für den Bau der Untergrundbahnlinien bewilligt.

Laut dem bewilligten technisch-wirtschaftlichen Bericht soll das U-Bahnnetz folgende technische Charakteristiken aufweisen:

- Gesamtlänge des U-Bahnnetzes: 52 km
- 47 Stationen mit einem durchschnittlichen Stationsabstand von 1100 m
- Exploitationsgeschwindigkeit der Züge: 90 km/h
- Tatsächliche Geschwindigkeit der Züge: 45 km/h÷60 km/h
- Standardspurweite 1435 mm
- Stromzufuhr über seitliche Schiene
- Maximale Förderkapazität pro Stunde: 50 000 Passagiere pro Richtung

Während den einzelnen Etappen des technisch-wirtschaftlichen Berichtes wurden verschiedene Streckenführungen des Hauptnetzes diskutiert und angefertigt. Das U-Bahnnetz wurde endgültig durch drei Hauptdurchquerungen charakterisiert (siehe Abb. 1).

- Erste Durchquerung: „Obelya“ – „Lyulin“ – Stadtzentrum – „Mladost“
- Zweite Durchquerung: „Hladilnika“ – „Lozenetz“ – Stadtzentrum – „Iliyanci“
- Dritte Durchquerung: „Knyajevo“ – Stadtzentrum – „Poduyane“ – „Vasil Levski“

Im Jahr 1975 wurden vom Ministerrat Bulgariens letzte wichtige organisatorische Fragen in Richtung Ausbau der U-Bahn Sofia geklärt. Die staatlich wirtschaftliche Organisation „Hydrostroj“ wurde als Hauptbaufirma der U-Bahn Sofia bestimmt. Zu der staatlichen wirtschaftlichen Organisation „Hydrostroj“ wurde eine neue fachtechnische Bauorganisation „Metrostroj“ gegründet, die sich mit

der Bauausführung der U-Bahn Sofia beschäftigen sollte. Zu dieser Zeit wurde auch eine Investitionsdirektion „Metropoliten“ geschaffen. Sie war für die Finanzierung des Projektes im Laufe der Bauausführung verantwortlich.

Im Jahr 1977 wurde vom Ministerrat Bulgariens das angefertigte technische Projekt für die erste Hauptdurchquerung (Wohnviertel „Lyulin“ - Zentrum) bewilligt.

Der Ausbau der U-Bahn Sofia konnte nun beginnen.

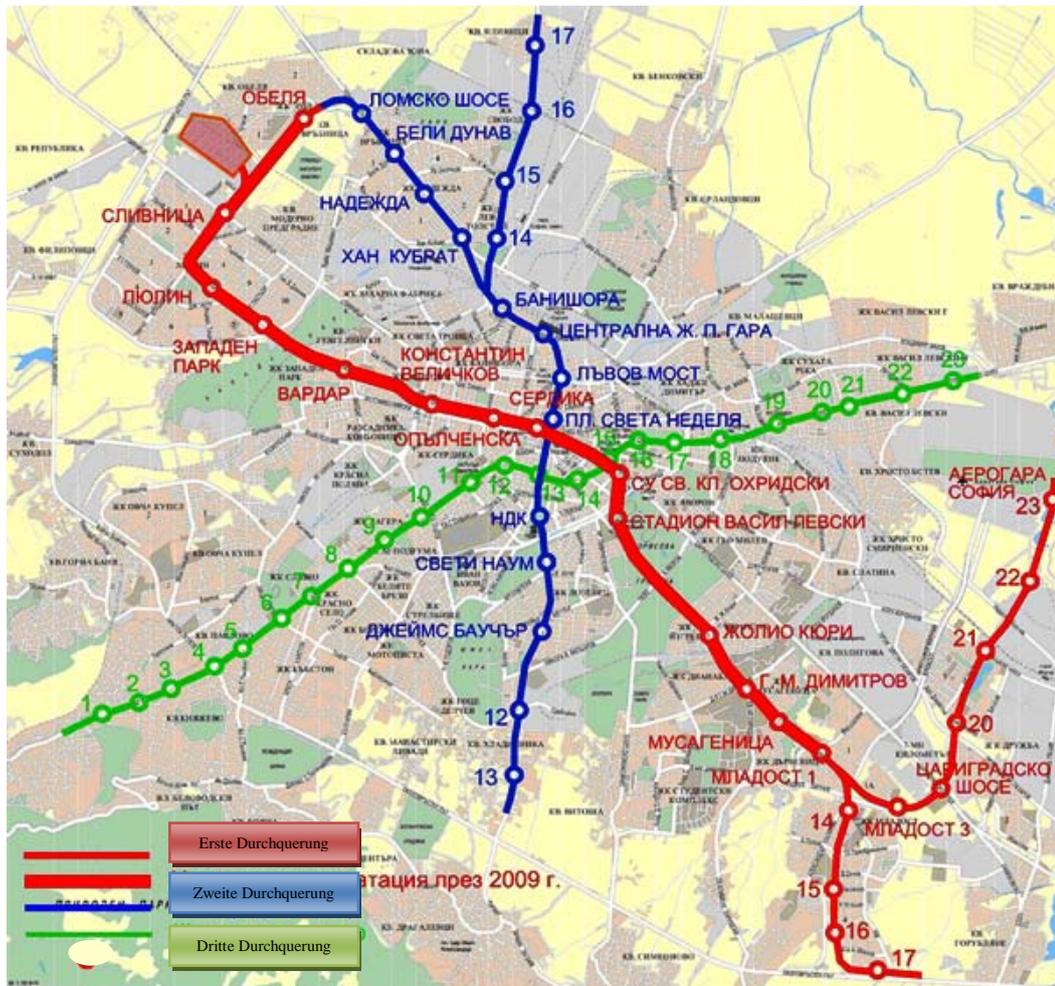


Abb. 1: Hauptschema des U-Bahnnetzes Sofia 2009 [2.2]

## 2 Bauausführung im U-Bahnbau

Für den Bau der Tunnelstrecken und Stationsbauwerke der U-Bahn wurden zahlreiche Varianten entwickelt und untersucht. Es wurde die günstigste Lösung gewählt. Durch die optimale Wahl der zur Anwendung kommenden Bauverfahren und der präzisen Abwicklung der gestellten Bauaufgaben wurde das notwendige Maß an Sicherheit und Qualität bei der Bauausführung erreicht.

Die Bauaufgabe beim Ausbau einer U-Bahn ist ein sicheres Bauwerk zu konzipieren und zu erstellen. Die gesamte Planung und Umsetzung einer U-Bahnstrecke oder U-Bahnstation muss unter soziologischer, bautechnischer, wirtschaftlicher Gesichtspunkte durchgeführt werden. Für die Optimierung von Planung, Umsetzung und für eine Vereinfachung der konstruktiven Bearbeitung wird die Bauaufgabe in bauteilorientierte Gesichtspunkte in sogenannten Bauphasen (z.B. Baugrube, Wände, Decken) gegliedert. Die Erstellung der einzelnen Bauwerksteile werden von der gewählten Bauweise stark beeinflusst.

Die Bauweise beschreibt die Art und Weise in der gebaut wird. Es sind bestimmte Verfahren beim Bauen zu unterscheiden. Für die Bauart "U-Bahn im Tunnel" können folgende Bauweisen zur Anwendung kommen:

- **Offene Bauweise:**
  - o Baugrube mit freien Böschungen
  - o Baugrube mit temporärer Baugrubenumschließung
    - Trägerverbau (sg. Berliner Bauweise, Hamburger Bauweise usw.)
  - o Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung
    - Schlitzwände
    - Bohrpfahlwände
- **Halboffene Bauweise:** Deckelbauweise
  - o Schlitzwand-Deckelbauweise
  - o Bohrpfahl-Deckelbauweise
- **Geschlossene Bauweise:**
  - o Konventioneller Tunnelvortrieb
  - o Maschineller Tunnelvortrieb (Schildvortrieb)

Bei der Herstellung der U-Bahn in Sofia der Ersten Durchquerung (siehe

Abb. 2) wurden die obengenannten Bauweisen angewendet. Bis heute haben nur die Bohrpfahl-Deckelbauweise und der konventioneller Tunnelvortrieb keine Anwendung im U-Bahnbau Bulgariens gefunden.

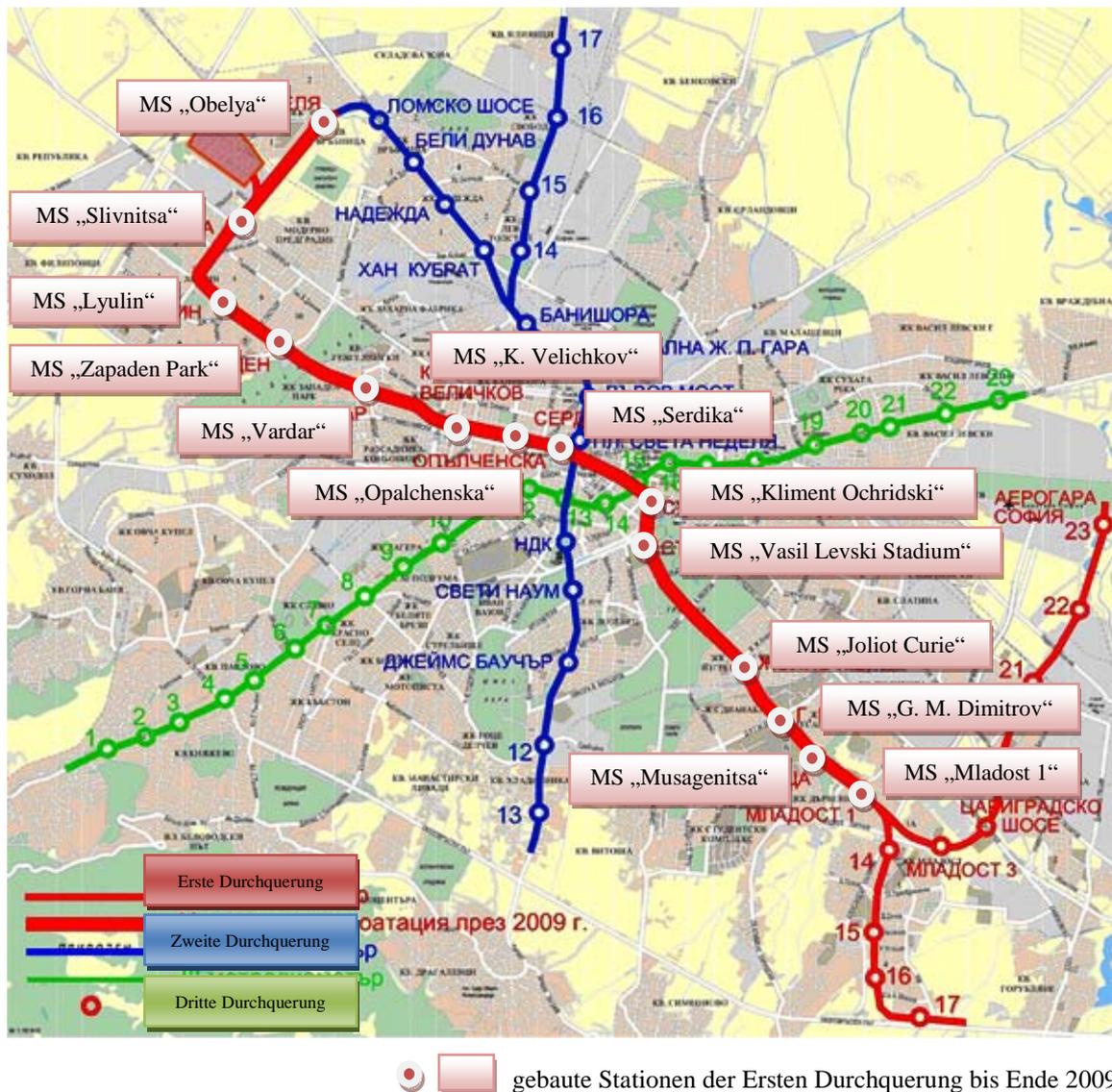


Abb. 2: Das Sofioter U-Bahnnetz 2009 [2.2]

Die Tab. 2 (siehe S. 19) gibt ein Überblick über die Reihenfolge der ausgebauten Sofioter U-Bahnstationen und –strecken, sowie ihre Tiefenlage und entsprechende Technologie der Bauausführung. Die Anzahl der hergestellten Metrostationen und –strecken betrug bis Ende 2009 14 Stationen und 13 Metrostrecken. Die Analyse der Tab. 2 zeigt, welche dominierende Bauweisen und Bauverfahren in Bulgarien, der bis heute hergestellten Teilen der Ersten Durchquerung, am meisten zur Anwendung kamen:

**Offene Bauweise:** 10 Metrostationen und 8 Metrostrecken

- Baugrube mit freien Böschungen: 5 U-Bahnanlagen
- Baugrube mit temporärer Baugrubenumschließung: 1 U-Bahnanlage
- Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung: 12 U-Bahnanlagen

**Halboffene Bauweise:** 2 Metrostationen und keine Metrostrecken

**Geschlossene Bauweise:** keine Metrostationen und 2 Metrostrecken

Es wurden noch 2 Metrostationen in Hochlage und 3 Metrostrecken in Hochlage realisiert.

<b>Metropolitan Sofia - Erste Durchquerung</b>		
<b>Metrostation/Metrostrecke</b>	<b>Tiefenlage</b>	<b>Bauweise</b>
MS "Obelya"	oberhalb GOK	-
MS "Obelya" - MS "Slivnitsa"		-
<b>MS "Slivnitsa"</b>	unterhalb GOK	<b>Offene Bauweise: Baugrube mit freien Böschungen</b>
<b>MS "Slivnitsa" - MS "Lyulin"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit freien Böschungen</b>
<b>MS "Lyulin"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit freien Böschungen</b>
<b>MS "Lyulin" - MS "Zapaden Park"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit freien Böschungen</b>
<b>MS "Zapaden Park"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit freien Böschungen</b>
<b>MS "Zapaden Park" - MS "Vardar"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Bohrpfahlwand)</b>
<b>MS "Vardar"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit wiedergewinnbarer Baugrubenumschließung</b>
<b>MS "Vardar" - MS "K. Velichkov"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "K. Velichkov"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "K. Velichkov" - MS "Opalchenska"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "Opalchenska"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "Opalchenska" - MS "Serdika"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "Serdika"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "Serdika" - MS "Kl. Ochridski"</b>		<b>Geschlossene Bauweise: Schildvortrieb</b>
<b>MS "Kl. Ochridski"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "Kl. Ochridski" - MS "Vasil Levski"</b>		<b>Geschlossene Bauweise: Schildvortrieb</b>
<b>MS "Vasil Levski"</b>		<b>Halboffene Bauweise (Schlitzwand)</b>
<b>MS "Vasil Levski" - MS "Joliot Curie"</b>		<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "Joliot Curie"</b>	<b>Halboffene Bauweise (Schlitzwand)</b>	
MS "Joliot Curie" - MS "G. M. Dimitrov"	oberhalb/unterhalb	Hochlage
<b>MS "G. M. Dimitrov"</b>	<b>unterhalb GOK</b>	<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
<b>MS "G. M. Dimitrov" - MS "Musagenitsa"</b>	<b>unterhalb/oberhalb</b>	<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>
MS "Musagenitsa"	oberhalb GOK	Hochlage
MS "Musagenitsa" - MS "Mladost 1"	oberhalb/unterhalb	Hochlage
<b>MS "Mladost 1"</b>	<b>unterhalb GOK</b>	<b>Offene Bauweise: Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand)</b>

**Tab. 2: U-Bahnstationen und –strecken, Technologie der Bauausführung**

Die U-Bahnstationen MS „Obelya“ und MS „Musagenitsa“ sind oberhalb der Geländeoberkante situiert. Die Metrostrecken MS "Obelya" - MS "Slivnitsa", MS "Joliot Curie" – MS "G. M. Dimitrov", MS "G. M. Dimitrov" – MS "Musagenitsa", MS "Musagenitsa" – MS "Mladost 1" sind entweder oberhalb der Geländeoberkante situiert, oder werden wechselnd zwischen oberirdischer und unterirdischer Tiefenlage geführt. Sie werden daher in der Diplomarbeit nicht weiter unter Acht genommen. Nachfolgend werden die U-Bahnanlagen unterhalb GOK und ihre Herstellung behandelt.

Der Bau von Untergrundbahnen im Stadtbereich bedarf einer zweckmäßigen, vernünftigen, sicheren und einer optimal begründeten Herstellung. Jede Bauweise erfordert eine Reihe vorlaufender und begleitender Beobachtungs- und Erkundungsarbeiten. Baudauer, Kosten und Probleme in der Herstellung werden von ingenieurgeologischen, hydrogeologischen, ökonomischen, ökologischen sowie von lokalen Rahmenbedingungen beeinflusst.

## **2.1 Ingenieurgeologische Rahmenbedingungen**

Ein U-Bahntunnel wird in seiner Bauvorbereitung, Bauausführung und Überwachung durch das Verhalten des Baugrundes bestimmt. Voraussetzung für die richtige Wahl einer bestimmten Bauweise ist eine ausreichende ingenieurgeologische Untersuchung. Das Baugrundrisiko soll in engen Grenzen gehalten werden.

Die Baugrunderkundung dient in erster Linie den geologischen Bau im Hinblick auf die anstehenden Bodenarten (Bodenklassen) zu bestimmen, sowie ihren Schichtenverlauf, ihre Schichtdicke und Tiefenlage der einzelnen Schichten des Untergrundes zu ermitteln. Durch ingenieurgeologische Untersuchungsverfahren können die bodenmechanischen und -physikalischen Kennwerte des Baugrundes (z.B. Korngrößenverteilung, Durchlässigkeit, Filtereigenschaften, Frostempfindlichkeit, Porenanteil und Porenzahl, Konsistenz, Wassergehalt, Lagerungsdichte, Zusammendrückbarkeit, Scherfestigkeit, Stömpfindlichkeit) bestimmt werden, die die Eigenschaften und das Verhalten des Bodens stark beeinflussen. Die Feststellung von Ausgasungen im Baugrund, Hindernisse (Findlinge, Bauwerke, Steine, Blöcke, bauliche Anlagen) oder Altlasten und Kontaminationen kann für oder gegen einer Bauweise sprechen.

Probleme bei der Wahl einer Bauweise aufgrund der geologischen Bedingungen ist die lockere Ablagerung der Bodenschichten, d.h. relativ geringe Scherfestigkeiten des Untergrundes, was in wesentlichen Setzungen oder Rutschungen resultieren kann. Auf Grund von organischen Substanzen im Boden kann betonaggressives Grundwasser (sg. saure Reaktion) entstehen. Das neu entstandene Wasser verändert die Konsistenz des Bodens, was seine Eigenschaften verschlechtert.

Die geologischen Verhältnisse Sofias sind durch die besondere geographische Lage der Stadt bestimmt.

Die Stadt Sofia befindet sich im südöstlichen Teil des breiten Sofia Feldes (begrenzt durch vier Gebirgszüge – Lyulin, Mittelwald, Balkengebirge, Gebirge Losen), unmittelbar neben dem nördlichen Hang des Witoschagebirges. Sie liegt zwischen dem Balkengebirge, dem „Alten Gebirge“, im Norden und dem Witoscha-Gebirge im Süden in einem Talkessel. Die geographische Lage des Sofia Feldes beeinflusst die Art und die Beschaffenheit der Natur, Topographie, Klima, Wasser, Geologie und Seismizität.

Die Geologie Sofias wurde durch gewaltige tektonische Vorgänge in der Vergangenheit geprägt. Der Sofia Talkessel ist ein geologischer Graben, der durch einen Krustenblock gebildet wurde. Im

Vergleich zu seiner Umgebung ist dieser Block abgesunken. Der Graben trat als Folge tektonischer Dehnungen und Brüchen in den Schwächezonen der Erdkruste auf.

Während der Periode des Neogens füllte sich der Sofia Talkessel mit Wasser. Im Laufe von mehreren Millionen Jahren wurde der Graben, durch abgelagerte Sedimentgesteine, wieder aufgefüllt. Große Mengen Biomasse wurden fossilisiert. An den Hängen der Berge und Täler setzten sich gewaltige pliozäne Ablagerung von Sande, Tone und Braunkohlen an.

Aufbauend auf den genauen Kenntnissen, die durch intensive geologische Forschungen in den Jahren gewonnen worden sind, kann die geologische Entwicklung des Sofias Talkessels in drei Perioden unterteilt werden.

In der **ersten Periode** des Sedimentationsvorganges, vor ca. 8 - 9 Millionen Jahren, lagerten sich infolge der oberirdisch fließenden Gewässer (Flüsse und Bäche) dicke Schichten von Tone und Sande im nordöstlichen Teil des Kessels ab. Gesteine aus dieser Periode der Sedimentation sind nicht an der Oberfläche bekannt. Information über ihre Existenz wurde durch Einsatz modernster Technik (z. B. Kernbohrungen, Isotropenversuche) bewiesen.

In der **zweiten Periode** des Sedimentationsvorganges, vor ca. 7 Millionen Jahren, verbreiterte sich der Sofia Talkessel durch gewaltige und intensive tektonische Vorgänge. In diesem Zeitraum bildeten sich Sperren, die zur Folge die Entstehung mehrerer mit Moorwasser gefüllte Becken hatten. Diese Periode hatte die längste Dauer. Die existierenden Kies-, Sand- und sandigen Lehmlagerungen wurden mit gewaltigen, vernässten, schlammigen Tonschichten bedeckt. Die abgelagerten Tonschichten dieser Periode sind zwischen 48 und 132 m mächtig.

1 Million Jahre später bildete sich im gesamten Sofia Talkessel ein Süßwassersee. Die tiefsten Stellen dieses Sees bedeckten sich mit tonigem Material. An den Rändern hin lagerten sich Sande und Kiese ab. Die Dicke dieser Schichten beträgt zwischen 100 und 400 m. Schrittweise bildete sich der See bishin zur vollen Austrocknung zurück. Gewaltige schlammige Ablagerungen blieben zurück. Am Ende der zweiten Periode entstand eine große Anzahl von Flüssen, die wiederum die alten Sedimentablagerungen mit neuen bedeckten. In dieser Periode bildeten sich in Summe Ablagerungen bis zu 200 m Höhe.

In der **dritten Periode** des Sedimentationsvorganges, vor ca. 5 Millionen Jahren, entwickelten sich im Sofia Talkessel die heutigen geologischen Charakteristiken. Alluviale und deluvial-proluviale Sedimente lagerten sich ab.

Im Folgenden werden die bautechnisch bedeutsamen Schichten des Sofioter Untergrundes (in der Tab. 3), beginnend bei den oberflächennahen, beschrieben:

	Gesteinsarten und Erkennungsmerkmale	Periode	Epoche [mya]
Schicht 1	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>zeitgenössische anthropogene Aufschüttungen:</b> schwarze und braune Lehme, die mit Kies, Bau- und Hausmüll beigemischt sind. <b>Anmerkungen:</b> Die Aufschüttungen mit größerer Mächtigkeit haben veränderliche Dichten. Sie besitzen keine homogene Struktur und Zusammensetzung. Oberflächensetzungen sind möglich.</li> <li>schlecht sortierte <b>deluviale Tone</b>, die reich an organischen Bestandteilen sind. <b>Anmerkungen:</b> dunkelbraun bis schwarz, mit steif-plastischer Konsistenz. Der hohe Gehalt an organischer Substanz (zwischen 2%-7%) hat starken Einfluss auf ihre hydrophile Eigenschaften.  Die Schichtmächtigkeit ist 0,5 m bis 4,0 m.</li> </ul>	Quartär	Holozän 0,0117-0
	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>quartäre staubige Tone</b> <b>Anmerkungen:</b> dunkelbraun, hellbraun und braun-rostrot, mit steifplastischer Konsistenz. Nach der Kornzusammensetzung werden diese Tone als staubig bestimmt.</li> <li><b>sandige und kiesige Bestandteile</b> <b>Anmerkungen:</b> das Vorkommen von weichen Kerne und Kalk-Körner verschlechtern die physikalisch-mechanischen Eigenschaften dieser Schichte stark  Die Schichtmächtigkeit beträgt 0,5 m bis 7 m.</li> </ul>		Pleistozän 2,59-0,0117
Schicht 3	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>alluviale Kiese</b> <b>Anmerkungen:</b> nach der Kornzusammensetzung sind die Kiese grob- bis mittelkörnig. Gesteinsart: Andesit, Granit und Quarzit. Die Stücke sind hart und kugelig geformt.</li> <li><b>lehm-sandige Bestandteile</b> <b>Anmerkungen:</b> gelb-braun oder gelb-grau</li> </ul>		
Schicht 4	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>pliozäne staubige und staub-sandige Tone</b> <b>Anmerkungen:</b> mit mittel- oder steifplastischer Konsistenz. Die pliozänen Tone beinhalten weiche kalkige Kerne und Konkretionen, die im Feuchtzustand die physikalisch-mechanischen Eigenschaften dieser Schichte stark verschlechtern.</li> </ul>		Pliozän 5,332-2,59

<b>Schicht 5</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>pliozäne Kiese</b> <b>Anmerkungen:</b> Gesteinsart – Andesit, Quarzit und Sandstein. Die Stücke sind hart und kugelig geformt. Sie haben ähnliche Eigenschaften wie die quartären Kiese.</li> <li>• <b>lehm-sandigen Bestandteilen</b> <b>Anmerkungen:</b> gelb oder grau</li> </ul>	<b>Neogen</b>	<b>Pliozän</b> 5,332-2,59
<b>Schicht 6</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>pliozäne feinkörnige Sande</b></li> <li>• <b>lehmige Sande</b></li> <li>• <b>sandige Lehme</b></li> </ul>		
<b>Schicht 7</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>pliozäne lehmige staubige Sande</b></li> <li>• <b>Linsen vom staubigen Feinsand oder Lehm</b></li> </ul>		

**Tab. 3: Schichten des Sofioter Untergrundes**

Die einzelnen geologischen Zeitabschnitte haben Einfluss auf die typischen Eigenschaften und das Verhalten der Gesteine. Die ingenieurgeologischen Daten geben Hinweise, welche eventuellen bautechnischen Probleme sich ergeben können.

Zu den oberliegenden, jüngsten quartären Schichten in Sofia zählen die zeitgenössischen anthropogenen Dämme, die deluvialen Tone, die staubigen Tone und die alluvialen Kiese. Die Mächtigkeit der quartären Ablagerungen ist sehr unterschiedlich von 2,0 m bis 10,0 m. Örtlich kommen Einlagerungen von Steinen (Andesit, Granit und Quarzit) und Sanden vor. Der hohe Gehalt an organischer Substanz hat seinen starken Einfluss auf die hydrophilen Eigenschaften der Schichten.

## 2.2 Hydrogeologische Rahmenbedingungen

Die Grundwasserverhältnisse beeinflussen entscheidend die Wahl der Bauweise und die zukünftige Tiefenlage der U-Bahn sowie die Abdichtungsmaßnahmen am Bauwerk. Zum Beispiel erfordert die Wahl der offenen Bauweise im Fall mit vorhanden hohem Grundwasserniveau Grundwasserabsenkungsmaßnahmen, sowie die Feststellung von Chemismus des Wassers die Zusammensetzung der später zur Anwendung kommenden Baumaterialien bestimmt.

Die Grundwasserverhältnisse in Sofia sind sehr vielfältig, Schichten mit einer beträchtlich hohen Wassersättigungszahl bis hin zu Schichten die wasserundurchlässig sind, sind vorhanden. Das Grundwasserniveau der Ersten Durchquerung der U-Bahn in Sofia liegt bei einer Tiefe von 3,0 m bis 5,0 m unter GOK und an ihren Erweiterungsstrecken „Mladost 1 - Flughafen Sofia“ und „Mladost 1-Drujba 2“ bei 2,5 m bis 8,0 m Tiefe.

Im Stadtzentrum Sofias befindet sich die U-Bahntrasse in einem beträchtlichen Abstand von den vorhandenen Mineralquellen. An manchen Stellen ist das Grundwasser schwach sulfat- und karbonataggressiv, was besondere Anforderungen an die spätere Abdichtung der Bauwerke stellt.

Die vorhandenen ingenieur- und hydrogeologischen Bedingungen in Sofia sind für die Herstellung von unterirdischen U-Bahnkonstruktionen gut geeignet.

### **2.3 Ökonomische Rahmenbedingungen**

Aufgabe der Planung ist es im Zuge der Ausschreibungserstellung für die Angebotskalkulation die Bauaufgabe in Leistungsposition zu beschreiben. Die Leistungsbeschreibung bildet dabei die Grundlage der Preisbildung. Für jede Leistungsposition muss der Unternehmer die dafür notwendigen Geräte-, Personal- und Materialkosten kalkulieren. Jede Leistung muss dabei eindeutig, technisch richtig, vollständig und ohne ungewöhnliches Wagnis vom Auszuschreibenden beschrieben werden.

### **2.4 Ökologische Rahmenbedingungen**

Jede Bautätigkeit im Baugrund ruft Lärmemissionen hervor. Beim U-Bahnbau im dicht bebauten innerstädtischen Bereich ist es Ziel sein, die Belästigung der Anwohner, aber auch der auf der Baustelle Arbeitenden, so gering wie möglich zu halten. Einige Bauverfahren in offener Bauweise (z.B. Einrammen von Stahlträgern beim Trägerverbau) rufen Erschütterungen des Untergrundes hervor. Jede Erschütterung kann zu einer potentiellen Gefahr werden, die zu schädlichen Fundamentbewegungen oder Beschädigungen an existierenden Leitungen und Kanäle führen kann. Die Erschütterungen können auch zu Schäden an baulichen Einrichtungen führen. Entstehende Schadstoffemissionen werden überprüft und präzise überwacht.

### **2.5 Lokale Rahmenbedingungen**

Für die optimale Wahl einer geeigneten Bauweise beim Bau einer U-Bahn im Stadtbereich müssen auch lokale Parameter berücksichtigt werden, die das Baufeld und die örtlichen Gegebenheiten betreffen. Das wären: Neigung und Ebenheit der Geländeoberfläche, vorhandene Befahrbarkeit des Untergrundes, Abmessungen der Zufahrtswege, existierende angrenzende Bebauung und vorhandene bautechnische Randbedingungen, vorhandene Platzverhältnisse für das Material und die Gerätetechnik, existierende Behinderungen des öffentlichen Verkehrs bei der Bauausführung, sowie Möglichkeiten für eventuelle Sperrzeiten des Strassenverkehrs, Umleitungen von existierenden Leitungen und Aufkommen von baulichen Erschwernisse.

Unter Berücksichtigung der einzelnen Faktoren ergeben sich beim Bau einer U-Bahnstrecke Abschnitte unterschiedlicher Charakteristika, deshalb ist es notwendig die technologischen Beziehungen und Möglichkeiten der einzelnen Verfahren zu kennen.

### 3 U-Bahnbau in offener Bauweise

Im innerstädtischen Bereich wird die offene Bauweise bei der Herstellung oberflächennahen U-Bahnanlagen mit geringer Überdeckung zwischen 2,0 m bis 4,0 m angewendet.

Bei der offenen Bauweise unabhängig von der Baugrubenumschließung wird nach dem Aushub bis zur Baugrubensohle eine Sauberkeitsschicht eingebracht und anschließend die Tunnelsohle betoniert. Es erfolgt kein weiterer Aushub. Der restliche Tunnelquerschnitt wird anschließend mittels konventioneller Schalung, Schalwagen an Ort und Stelle oder mittels Fertigteilelementen hergestellt. Zur Abdichtung des Tunnels können entweder Abdichtungsbahnen aus Kunststoff oder Bitumen angewendet werden oder eine Abdichtung durch wasserundurchlässigen Beton („Weiße Wanne“) erfolgen. Zuletzt wird das hergestellte Tunnelbauwerk überschüttet und die ursprünglichen Gelände- bzw. Nutzungsverhältnisse wieder hergestellt.

Die Vorteile der offenen Bauweise liegen in der risikoarmen, kostengünstigen und technisch einfachen Herstellung. Nachteil dieser Bauweise ist der große erforderliche Platzbedarf sowie die Unwirtschaftlichkeit ab einer gewissen Tiefenlage.

Im Jahr 1979 wurde in Sofia mit dem Bau der U-Bahn der Strecke von MS „Slivnitsa“ bis MS „Serdika“ (siehe Abb. 3) begonnen. Dieser U-Bahnabschnitt hat eine Länge von 8,1 km und wurde durchgehend mittels der offenen Bauweise erstellt. Hauptgrund der Anwendung dieser Bauweise war die Streckenführung in dem früher noch dünn besiedelten Gebiet und die Möglichkeit einer oberflächennahen Herstellung.

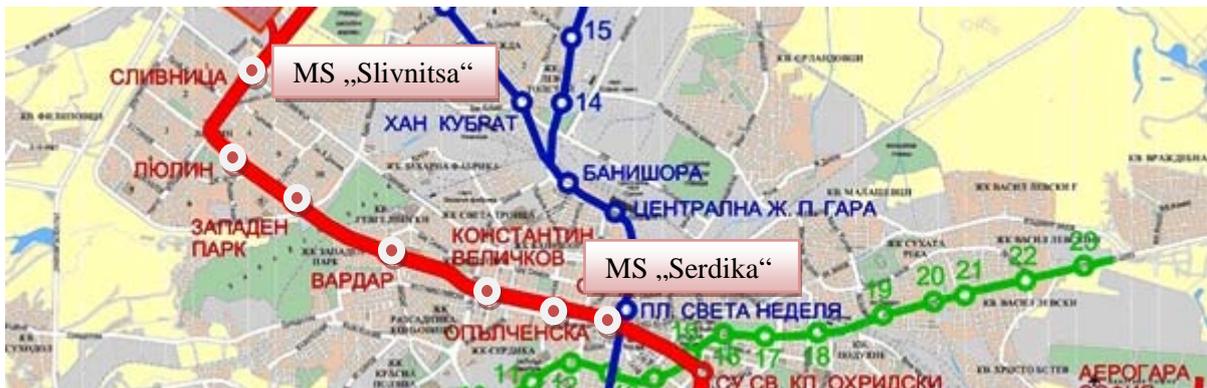


Abb. 3: U-Bahnstrecke: MS „Slivnitsa“ – MS „Serdika“; völliger Ausbau in offener Bauweise [2.2]

Die wesentlichsten Unterschiede bei der Herstellung der U-Bahn in offener Bauweise lagen in Sofia in der Art der Baugrubenumschließung.

In Sofia wurden folgende drei unterschiedliche **Arten der Baugrubenumschließungen** angewendet, die nachfolgend in den Kapiteln 3.1 (S. 28), 3.2 (S. 38), 3.3 (S. 49) und 3.4 (S. 65) analysiert werden:

- nicht verbaute Baugruben: geböschte Baugruben
- verbaute Baugruben mit temporärer Baugrubenumschließung: Trägerbohlwand
- verbaute Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung: Schlitzwand, Bohrpfahlwand

Nachstehende Tabellen zeigen die wesentlichsten Rahmenbedingungen, die bei der Wahl der optimalen Baugrubenumschließung in Sofia von Bedeutung waren.

<b>Bodenbeschaffenheit</b>			
<b>Verbauart</b>	<b>Maßgebende Bodeneigenschaften</b>		
<b>Geböschte Baugrube</b>	Korngrößenverteilung	Kurzzeitstandfestigkeit: Konsistenz, Lagerungsdichte	Rammbarkeit
- mit Abdichtungswand - ohne Abdichtungswand			
<b>Trägerbohlwand</b>	Wichte		
<b>Bohrpfahlwand (BPW)</b>	Scherfestigkeit	Durchlässigkeit des Bodens Organische Bestandteile	
- tangierende BPW - überschnittene BPW	Zusammendrückbarkeit		
<b>Schlitzwand</b>			

Tab. 4: Maßgebende Bodeneigenschaften bei der Wahl der optimalen Baugrubensicherung

<b>Grundwasserverhältnisse</b>			
<b>Verbauart</b>	<b>Grundwasser vorhanden</b>		<b>kein Grundwasser</b>
	Grundwasserabsenkung möglich	Grundwasserabsenkung nicht möglich	
<b>Geböschte Baugrube</b>			
- mit Abdichtungswand		√	
- ohne Abdichtungswand	√		√
<b>Trägerbohlwand</b>	√		√
<b>Bohrpfahlwand (BPW)</b>			
- tangierende BPW	√		√
- überschnittene BPW		√	
<b>Schlitzwand</b>		√	√

Tab. 5: Grundwasserverhältnisse und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung

√ anwendbare Verbauart

Platzverhältnisse		
Verbauart	ausreichende Platzverhältnisse	nicht ausreichende Platzverhältnisse
<b>Geböschte Baugrube</b>		
- mit Abdichtungswand	√	
- ohne Abdichtungswand	√	
<b>Trägerbohlwand</b>	√	√
<b>Bohrpfahlwand (BPW)</b>		
- tangierende BPW	√	√
- überschrittene BPW	√	√
<b>Schlitzwand</b>	√	√

Tab. 6: Platzverhältnisse und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung

 anwendbare Verbauart

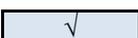
Verformbarkeit		
Verbauart	biegeweiche Verbauart	biegesteife Verbauart
<b>Geböschte Baugrube</b>		
- mit Abdichtungswand		
- ohne Abdichtungswand		
<b>Trägerbohlwand</b>	√	
<b>Bohrpfahlwand (BPW)</b>		
- tangierende BPW		√
- überschrittene BPW		√
<b>Schlitzwand</b>		√

Tab. 7: Verformbarkeit der Verbauart und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung

 anwendbare Verbauart

Umweltschutz			
Verbauart	Lärmemission	Erschütterung	Schadstoffemission
<b>Geböschte Baugrube</b>			
- mit Abdichtungswand			
- ohne Abdichtungswand			
<b>Trägerbohlwand</b>	√	√	
<b>Bohrpfahlwand (BPW)</b>			
- tangierende BPW	√		√
- überschrittene BPW	√		√
<b>Schlitzwand</b>	√	√	√

Tab. 8: Umweltschutz und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung

 Einfluss der Verbauart

### 3.1 Tunnelherstellung in einer Baugrube mit freien Böschungen

In den achtziger Jahren wurde das Verfahren bei dem Bau der Zweiten Durchquerung in Sofia MS „№9“ im Bereich des Kultur National Palastes und MS „№10“ im Bereich des Hotels „Hemus“, und den dazu gehörigen Verbindungstunneln erfolgreich angewendet (siehe Abb. 4). Die Möglichkeit diese zwei U-Bahnabschnitte im Zentrum der Stadt in einer Baugrube mit freien Böschungen zu errichten war damals gegeben.

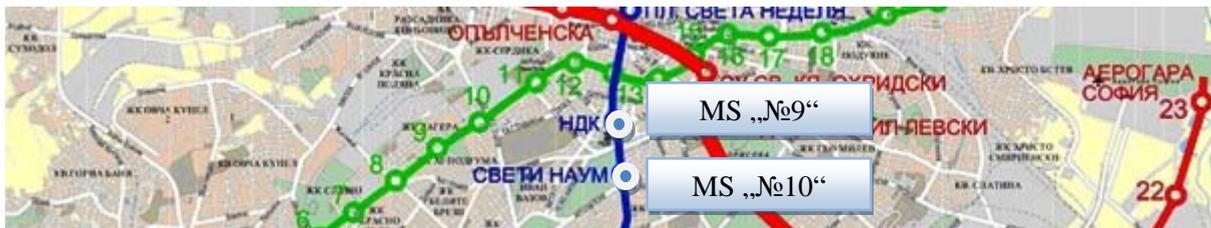


Abb. 4: Die ersten zwei hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in Baugruben mit freien Böschungen, II Durchquerung [2.2]

Nach Fertigstellung dieser zwei U-Bahnabschnitte der Zweiten Durchquerung wurden drei weitere Metrostationen und zwei Tunnelstrecken der Ersten Durchquerung mittels Baugruben mit freien Böschungen hergestellt (siehe Abb. 5).

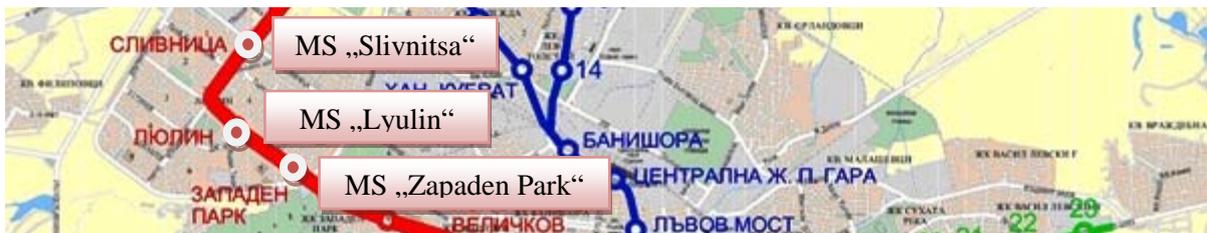


Abb. 5: Die ersten drei hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in Baugruben mit freien Böschungen, I Durchquerung [2.2]

Um Baugruben sichern oder umschließen zu können, werden oftmals Böschungen angeordnet. Eine Böschung ist eine geneigte künstlich hergestellte Geländeoberfläche. Da geböschte Baugruben viel Platz benötigen kommen sie hauptsächlich außerhalb der Stadtgrenzen zur Anwendung.

Baugruben mit freien Böschungen können für die Zwecke des U-Bahnbaus bis zu einer maximalen Tiefe von ca. 15 Meter und in nahezu allen Bodenarten hergestellt werden. Die Herstellung kann sofort beginnen, da keine zeitaufwendigen und mühsamen vorbereitenden Teilprozesse erforderlich sind. Bei dem Aushub der Baugrube mit freien Böschungen werden keine Spezialgeräte eingesetzt, sowie ist keine aufwendige und teure Baustelleneinrichtung erforderlich. Die Aushubarbeiten und die Herstellung der U-Bahnkonstruktion können ungehindert durchgeführt werden, da keine Aussteifungen und Verbaulementen vorhanden sind. Der Wegfall der Behinderungen durch Verbauarbeiten wirkt sich positiv auf die Bauausführung und den Bauablauf aus. Das Bauverfahren charakterisiert sich als einfach, günstig und risikoarm.

Die Ausbildung von Böschungen erfordert aber sehr viel Platz. Im Normalfall kann angenommen werden, dass die Breite der Böschung gleich der Baugrubentiefe ist. Mit zunehmender Tiefe der

Baugrube und entsprechend zunehmender Breite der Böschung nehmen die Aushubarbeiten, der Umfang an Transport-, Zwischenlagerungs- und Verfüllarbeiten und damit verbunden die Kosten beträchtlich zu. Unter anderem werden große Reichweiten der außerhalb der Baugrube arbeitenden Baugeräte (z.B. Kräne, Bagger usw.) bedingt. Um diese Nachteile der Baugrube mit freien Böschungen möglichst gering zu halten, ist die Anwendung eines senkrechten Verbaus möglich. Für die Herstellung von geböschten Baugruben sind die vorherrschenden Grundwasserverhältnisse von großer Bedeutung. Befindet sich die Baugrubensohle unterhalb des Grundwasserspiegels sind Grundwasserabsenkungen und Abdichtungsmaßnahmen gegen den Wasserzutritt notwendig.

Die Frage der Wirtschaftlichkeit und Zweckmäßigkeit dieses Bauverfahrens muss durch Kostenvergleiche und aufgrund der praktischen Erfahrungen für das jeweilige Projekt entschieden werden.

Die Methode der Herstellung eines U-Bahnbauwerks (Tunnel- oder Bahnhofkonstruktion) in einer Baugrube mit freien Böschungen ist grundsätzlich mit folgenden Vor- und Nachteilen verbunden (siehe Tab. 9):

<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Bauweise: Technologie und Bauablauf</li> <li>• Baubeginn sofort möglich</li> <li>• keine aufwendige, teure Baustelleneinrichtung erforderlich</li> <li>• in allen Böden herstellbar</li> <li>• keine Verbauarbeiten erforderlich</li> <li>• kein Einsatz von Spezialgeräten beim Aushub notwendig</li> <li>• für geringe Überdeckung des U-Bahnprofils <math>\leq 2,0</math> m ideal</li> <li>• günstige, störungsfreie Herstellung der U-Bahnkonstruktion (keine Aussteifungen, kein Verbau)</li> <li>• Umweltverträglichkeit: lärmarm, erschütterungsfrei</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefengrenze bei ca. 15 m</li> <li>• großer Platzbedarf</li> <li>• großes Aushub- und Verfüllvolumen</li> <li>• bei Grundwasserströmungen nicht anwendbar: umfangreiche Grundwasserabsenkung und Abdichtungsmaßnahmen notwendig</li> <li>• große Transport- und Zwischenlagerungsarbeiten</li> <li>• in urbanen Gebieten schwer ausführbar (Nachbarbebauung, Verkehrswege, Platzbedarf)</li> <li>• große Reichweiten der Baugeräte bei der Bauausführung notwendig</li> </ul>

**Tab. 9: Vor- und Nachteile der Baugruben mit freien Böschungen**

Aufgrund der Vorteile und der damals vorhandenen ausreichenden Platzverhältnisse in den noch dünn besiedelten Wohnbereichen der Hauptstadt, sowie der vorherrschenden günstigen Grundwasserverhältnisse, hat sich in den achtziger Jahren in Sofia die Herstellung von U-Bahnbauwerken in Baugruben mit freien Böschungen erfolgreich durchgesetzt.

Die Herstellung eines sofiotischen U-Bahnbauwerks in offener Bauweise, in Baugrube mit freien Böschungen erforderte eine Reihe verfahrensspezifischer Bauphasen, die im Folgenden analysiert werden.

### **3.1.1 Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

Der problemlose und qualitative Ausbau eines U-Bahnbauwerks in offener Baugrube mit freien Böschungen erforderte in Sofia nur geringe vorbereitende Maßnahmen.

Bei den Vorbereitungsmaßnahmen hatte die sehr gute Kenntnis der vorhandenen Baugrundverhältnisse eine wesentliche Bedeutung (d.h. Bodenarten und Schichtenverlauf). Generell standen für die Durchführung der Baugrunduntersuchungen zahlreiche Bohrverfahren, Entnahmemöglichkeiten und Untersuchungssysteme zur Verfügung. Im U-Bahnbau Sofia wurden hauptsächlich zur Identifikation von Boden und zur Ermittlung geotechnischer Eigenschaften des Baugrundes das Entnahmeverfahren angewendet. Ziel war Gewinnung von Bohrkernen, die ein sehr genaues Bodenprofil ergaben. Für die Qualität der zu gewinnenden Bodenproben war die Wahl der Entnahmeverfahren von entscheidender Bedeutung. Einsatz als Entnahmemöglichkeiten fanden die Hohlbohrschnecke, die Rammkernbohrung und die ungestörte Bodenprobe. Die Daten der Bodenuntersuchungen (Bodenkennwerte und Bodeneigenschaften) wurden in den Ausschreibungsunterlagen systematisiert, damit später die Firmen ihre Verfahrens- und Gerätepositionen bei der Bauausführung optimal entwickeln konnten. Es wurden Nachweise der Standsicherheit der Baugrube mit freien Böschungen und ihre Sicherung durchgeführt, die von größter Bedeutung bei diesem Bauverfahren waren.

Weiters kamen zu den Vorbereitungsmaßnahmen in Sofia die Untersuchungen über die hydrologischen Verhältnisse im Bereich der geplanten Trasse der U-Bahnanlage. Befandete sich die geplante Baugrubensohle oberhalb des Grundwasserspiegels waren keine Zusatzmaßnahmen erforderlich, unterhalb des Grundwasserspiegels waren jedoch Grundwasserabsenkungen mit der Hilfe von Brunnenanlagen und Abdichtungsmaßnahmen gegen den Wasserzutritt notwendig.

Nicht nur die präzisen geologischen Untersuchungen, sondern auch die guten Vorerkundungen der Lage der existierenden Leitungen, Kanäle, sowie die genauen Kenntnisse der existierenden Fundamentreste oder tiefliegenden Hindernisse führten im U-Bahnbau Sofia zu einer problemlosen Bauausführung in offener Bauweise.

Weiters konnte der existierende Verkehr als vorbereitende Maßnahme umgeleitet werden, damit die Verkehrssicherung weiter in der Stadt garantiert war. Bei der Herstellung der U-Bahn in Sofia in Baugruben mit freien Böschungen waren die Geländeoberflächen in den einzelnen Teilabschnitten völlig frei vom Verkehr.

Im Gang der Vorbereitung des Baubeginns wurde das Baufeld freigemacht. Es wurden Rodungsarbeiten durchgeführt und schrittweise wurde das Arbeitsplanum erstellt.

Verfahrensspezifische Teilvorgänge bei der Herstellung der U-Bahn in Sofia in Baugrube mit freien Böschungen waren Einmessen und Abstecken der Baugrubenböschungen im Gelände sowie die Vorbereitung der Großflächenschalung für die spätere Bauausführung der Konstruktion des U-Bahnbauwerks.

Vor Baubeginn wurde das Baufeld mit den entsprechenden Zufahrtswege erschlossen und die notwendigen Leitungen und Kabeln (z.B. Wasser- und Stromanschlüssen) verlegt.

Die obengenannten Vorarbeiten mussten rechtzeitig und präzise durchgeführt werden und galten später als Maßnahmen zur Vorbereitung und Anfang des Baubeginns bei der Herstellung von Baugruben in offener Bauweise aller Arten.

### **3.1.2 Bauphase 2: Herstellung der Baugrube mit freien Böschungen**

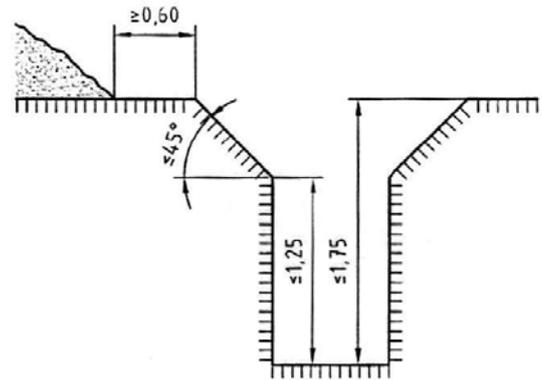
Für die Zwecke des U-Bahnbaus in Sofia wurden die Baugruben mit freien Böschungen bis in Tiefen von 10,0 m hergestellt. Die tatsächliche Herstellung begann mit dem Abtrag der oberflächenliegenden Bodenschichten (sg. Lösen des Bodens) und wurde mit dem fortschreitenden Aushub der Baugrube in die Tiefe fortgesetzt. Weiters wurde der ausgehobene Boden geladen und abtransportiert. Die Baugrube wurde bis zur Sohlentiefe ausgehoben. Grundsätzlich gibt es zwei Verfahrensmöglichkeiten für den Aushub der Baugrube:

- Baugrubenaushub von der Geländeoberfläche aus und
- Aushub aus der Baugrube

Der Aushub der Baugrube von der Geländeoberfläche aus stellt das am meist angewendete Bauverfahren dar. Hierbei werden Tieflöffelbagger eingesetzt. Seilbagger werden bei großen Tiefen, wenn der Aushub mittels Tieflöffel nicht mehr erfolgen kann, eingesetzt. Die Verfahrenswahl ist von der Tiefe, der Größe der Baugrube, den vorhandenen Platzverhältnissen und der angewendeten Bautechnik abhängig. In Sofia kamen bei der Herstellung der Baugruben mit freien Böschungen beide Verfahrensmöglichkeiten zum Einsatz.

Mit den Aushubarbeiten wurden gleichzeitig die Böschungflächen hergestellt. Durch die Anordnung der Böschungen, von der Geländeoberkante bis zur geplanten Sohlentiefe, wurde erreicht, dass keine Erdmassen herabfallen können.

Baugruben können höchstens bis zu einer Tiefe von 1,25 m ohne zusätzliche Sicherungen senkrecht hergestellt werden. Bei nichtbindigen und weich bindigen Böden darf die anschließende Geländeoberfläche nicht stärker als 1:10 geneigt sein. Bei steif bindigen Böden darf die Neigung von 1:2 nicht überschritten werden.



**Abb. 6: Baugrubenaushub mit geringerer Sicherung [1.13]**

Bis zu einer Tiefe von 1,75 m müssen die Baugruben senkrecht ausgeschachtet werden. In diesem Fall wird die Zone, die sich ab 1,25 m über der Baugrubensohle

befindet, unter einem Winkel  $\beta < 45^\circ$  abgebösch (siehe Abb. 6) oder im oberen Bereich gesichert.

Bei Tiefen ab 1,75 m müssen die Baugruben mit einer Böschungen hergestellt werden und können zusätzlich mit Bermen versehen werden. Die Berme ist ein annähernd waagrechter Absatz in einer Böschung zum Auffangen von abrutschenden Teilen (z.B. Steine, kleine Erdmassen), zur Herabsetzung der gesamten mittleren Neigung und zur regelmäßigen Inspektion der Böschungsoberfläche. Sie wird in Stufen von  $b \leq -3,0$  m angeordnet und muss mindestens 1,5 m breit sein. Über die Notwendigkeit und Ausbildung von Bermen muss im speziellen Einzelfall entschieden werden. Bei der Herstellung von den Baugruben der Metrostationen und -strecken der Ersten Durchquerung in Sofia wurden in den Böschungen keine Bermen angeordnet, da die Platzverhältnisse zum Böschchen ausreichend waren.

Böschungen werden mit einem bestimmten Böschungswinkel hergestellt. Der Böschungswinkel ist jener Winkel, der die Horizontale der Baugrubensohle mit der Fall-Linie der Böschungswand bildet. Beiderseits der Baugrube können die Baugrubenwände mit verschiedenen Neigungen ausgeführt werden. Die Grenzwerte der Böschungsneigungen sind auf Grund praktischer Erfahrungen systematisiert. Maßgebende Faktoren sind die vorhandenen bodenmechanischen Eigenschaften (Kohäsion, Reibungswinkel und Wichte), die Öffnungsdauer sowie die wirkenden äußeren Bedingungen (z.B. Witterungsverhältnisse, Auflasten).

In Tab. 10 sind die maximalen Böschungswinkeln  $\beta$  zusammengestellt, die bei Überschreitung eines rechnerischen Nachweises der Standsicherheit bedürfen.

Darstellung des Böschungswinkels $\beta$	Böschungswinkel $\beta$ [°]	Art des Bodens	Gesteinsart
	$\beta \leq 45^\circ$	nicht bindiger und weicher bindiger Boden	Mutterboden, Sande, Kiese
	$\beta \leq 60^\circ$	steifer und halbfester bindiger Boden	Lehm, Mergel, Ton, Boden mit festem Zusammenhang
	$\beta \leq 80^\circ$	Fels	nicht gebräuche und nicht verwitterte Felsen, Schichten ohne Klüfte

**Tab. 10: Maximaler Böschungswinkel nach der Art des Bodens [1.13]**

In nicht bindigen und weich bindigen Böden kann die Böschungsneigung größer sein als der Winkel der inneren Reibung. Die Ursache ist die sg. scheinbare Kohäsion. Damit diese nicht verloren geht, muss der natürliche Wassergehalt bei längerer Standzeit erhalten bleiben.

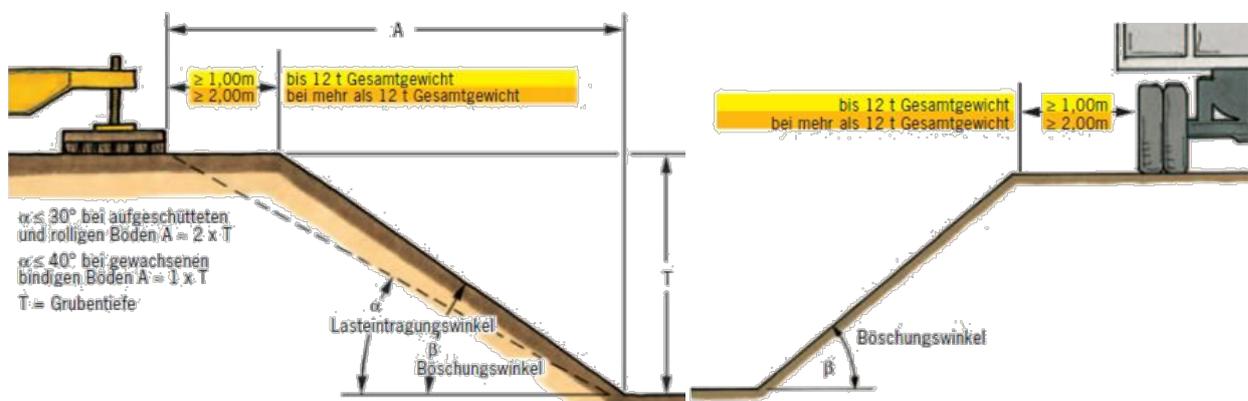
Die freien Böschungen der Baugruben beim U-Bahnbau in Sofia wurden mit einer Neigung 1:1 hergestellt. Die Wahl richtete sich nach den schon obengenannten Faktoren. Geringere Böschungswinkeln und entsprechend begrenzte Höhen der Baugrubenwände in Sofia wurden dann ausgeführt, wenn das Bodengefüge durch offene Trennflächen gestört und die Verdichtung der Aufschüttung unzureichend war oder der Grundwasserspiegel durch offene Wasserhaltungen abgesenkt werden konnte.

Während der Herstellung der Böschungen mussten sie bis zu einem bestimmten Grad verdichtet werden, damit später keine ungewollten Böschungsbrüche entstehen konnten.

Generell muss ein Abstand zwischen Böschungskante der Baugrube und Außenkante der Aufstandsfläche für schwere Straßenfahrzeuge (z.B. Bagger, Kräne, Walzen) mit hohen Achslasten (nach Strassenverkehrszulassungsordnung vom 23.4. 1965 (StZO)) freigehalten werden. Nachfolgend sind die geregelten Beziehungen zwischen Gesamtgewicht eines Fahrzeuges und Abstand bis zur Böschungskante gegeben (siehe Abb. 7).

Gesamtgewicht bis zu 12 t → Abstand  $\geq 1,0$  m

Gesamtgewicht 12 t ÷ 40 t → Abstand  $\geq 2,0$  m



**Abb. 7: Sicherheitsabstände von Fahrzeuge, Baumaschinen oder Geräten bei Baugruben mit freien Böschungen [2.9]**

Nach der Herstellung der Böschungen sind Maßnahmen zur Sicherung gegen Oberflächenabtrag und Böschungsbruch zu treffen. Folgende wesentliche Maßnahmen können getroffen werden: Auftrag von bewehrtem oder unbewehrtem Spritzbeton, Einbringen von Geotextilien, Abdecken der Böschungswand oder Böschungskrone mit Kunststofffolien und die Einrichtung von Gräben und Wasserfassungen um die Wasserströmung abzufangen und abzuleiten. Bei der Herstellung der Baugruben mit freien Böschungen im U-Bahnbau in Sofia wurde weder Spritzbeton noch andere Sicherungen angewendet.

Nach der Herstellung der Baugrube mit freien Böschungen mussten die geböschten Baugrubenwände während der Bauausführung der U-Bahn in regelmäßigen Abständen auf folgendes kontrolliert werden:

- entstandene Verwerfungen und Klüfte
- Auflockerung und Entfestigung der Böschung infolge von äußeren Wirkungen (z.B. Klima: Temperatur, Niederschlag)
- Zuflüsse von Schichtenwasser oder Oberflächenwasser in die Böschung
- kräftige Erschütterungen aus Verkehr, Verdichtungsarbeiten, Rammarbeiten

### 3.1.3 Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte

Nach Fertigstellung der Baugrube mit freien Böschungen begann in Sofia die schrittweise Bauausführung der Sohlplatte. Für die Sohlplatte musste zuerst präzise die Baugrubensohle hergestellt werden. Generell muss ein bestimmter Arbeitsraum in der Baugrube, der betreten wird, in Hinblick auf die Sicherheit der Beschäftigten und einer problemlosen Bauausführung freigehalten werden. Der Arbeitsraum bei Baugruben mit freien Böschungen ist der waagrecht gemessene Abstand zwischen dem Böschungsfuß und der Außenseite des Bauwerks. Als minimale Arbeitsraumbreite bei geböschten Baugruben gilt die Breite von 0,5 m (siehe Abb. 8).

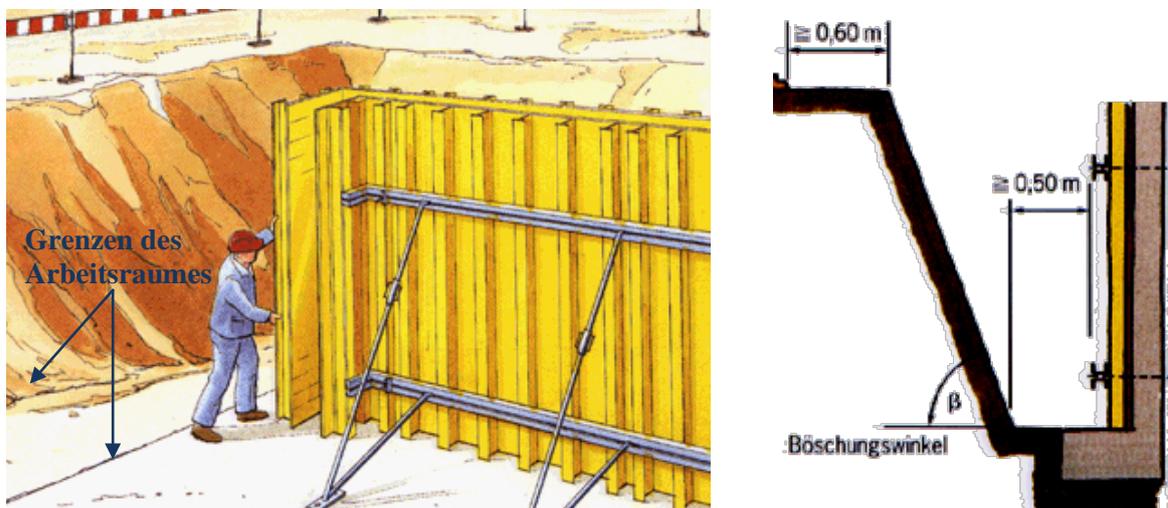


Abb. 8: Arbeitsraumbreite bei Baugruben mit freien Böschungen [2.9]

Die Breite der hergestellten Baugrubensohle beim U-Bahnbau in Sofia wurde die Konstruktionsbreite um 1 m auf jeder Seite vergrößert. Der 1 m breite Streifen ermöglichte die Bauausführung der U-Bahnkonstruktionsteile (z.B. Stellen der Schalung). In der vorhandenen Baugrubensohle wurde ein temporäres System für Entwässerung des Planums ausgeführt. Die Sohle wurde geebnet und verdichtet. Danach folgte die Verdichtung einer 20 cm dicken Schotterschicht und das Einbringen einer bewehrten Unterbetonschicht. Die Dicke der aufgetragenen Betonschicht betrug mind. 10 cm mit einer Betonfestigkeit von B15 (C 12/15). Während des Betoniervorganges musste eine ebene

Betonoberfläche erstellt werden. Weiters wurde die Abdichtung schichtweise verlegt. Als Abdichtung für die Sohlplatten der Metrostationen und der Tunnelbauwerken der sofiotischen U-Bahn, die in Baugruben mit freien Böschungen errichtet wurden, wurden die Schweissbahnen Typ „Voalit“ und Typ „Biteksint“ angewendet. Diese Abdichtungsschichten wurden direkt auf die völlig trockene, erhärtete Betonschicht aufgelegt und mit dem Schweissverfahren (Erwärmung) eingebaut. Jede nachfolgende Abdichtungsrolle musste die vorher verlegte und geklebte Dichtungsrolle um mind. 75 mm überdecken. Nach dem Verlegen der Abdichtungsschicht folgte die Herstellung einer bewehrten Schutzbetonschicht, die aus Beton der Festigkeitsklasse B15 (C 12/15) mit einer Stärke von 10 cm bestand. Die Aufgabe dieser Schutzschicht war die verlegte Abdichtung vor mechanischen Beschädigungen während des Bewehrungs- oder Betoniervorganges zu schützen, eine gleichmäßige Verpressung der Dichtungsbahnen zu gewährleisten, sowie vertikale Kräfte zur Dichtungsfläche aufzunehmen.

War die Schutzbetonschicht erstmal hergestellt, konnten die nächsten Teilvorgänge, Bewehren und Betonieren der Sohlplatte, durchgeführt werden.

#### **3.1.4 Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung**

Die Herstellung von Wand- und Deckenkonstruktionen können mittels Schalungssysteme und Ortbeton (Tunnelschalung, Großflächenschalung: Wand- und Deckenschalung) ausgeführt oder mittels zusammengesetzter Wand- und Deckenfertigteile zusammengebaut werden. Anstatt monolithisch ausgeführter oder vorgefertigter Bauwerkselemente werden oft großflächige Kastenelemente eingesetzt. In den achtziger Jahren kamen im U-Bahnbau Sofia für das Herstellen von Wandkonstruktionen die Großflächenschalungssysteme zur Anwendung. Diese Schalungsart wurde als funktionell und optimal angenommen, weil je größer ein Schalelement war, desto niedriger war der spezifische Stundenaufwand je m<sup>2</sup> Schalung [1.2].

Nach der Fertigstellung der Sohlplatte begannen in Sofia die Schalarbeiten für das Herstellen der Wandelementen des U-Bahnbauwerks. Zu Beginn der vierten Bauphase wurde die erste Wandschalung (1. Wandseite des U-Bahnbauwerks) gestellt und abgesteift. Die Länge eines Schalungselementes in Sofia wurde gleich an dem geplanten Abstand von zwei nacheinanderfolgenden Dehnungsfugen angepasst:  $\sim 10 \div 15$  m (projektspezifische Daten). So ein großflächiges Schalelement ließ sich nicht von Hand bewältigen. Jedes einzelne Schalelement musste mit dem Mobilkran Typ K-162 (max. Traglast: 160 kN = 16 t) bis an die Baustelle transportiert und mit Kranhilfe positioniert und montiert werden. Danach wurden die erforderlichen Einbauten wie Fugenbänder oder geplante Aussparungen hergestellt und die Bewehrung präzise verlegt. Die Stahleinlagen wurden durch Abstandshalter von den Schalungselementen weggehalten. Nun wurde die zweite Wandschalung gestellt und abgesteift. Nachdem die beiden Wandschalungen für die Herstellung der zukünftigen Wandkonstruktion des U-Bahnbauwerks gestellt und gegeneinander abgesteift waren, wurde der Beton mit der Festigkeitsklasse B30 (C 25/30) eingebaut.

Die vierte Phase wurde mit dem Ausrüsten und dem Ausschalen der Wandkonstruktion beendet. Die fertigen Wandelemente wurden von der Außenseite durch Abdichtung, Geotextilschicht und Mauerwerk gegen eindringendes Wasser isoliert. Anschließend wurden die Schalungselemente gereinigt und umgesetzt.

### **3.1.5 Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung**

Nach der Herstellung der Wandelemente begann die Bauausführung der Deckenplatte des U-Bahnbauwerks. In Sofia wurden großflächige Deckenschalungen sg. Schaltische (max. Traglast: bis 15 kN) zur Herstellung der Tunnel- und Stationsdecken angewendet. Sie wurden speziell für Sofia entwickelt, da die sofiotischen U-Bahnkonstruktionen mit sich häufig wiederholenden Schalungsflächen geplant wurden.

Die großflächigen Deckenschalungen bestehen aus Schalhaut (sg. Schalfäche) und Unterkonstruktion (Quer- und Längsträger, Stahlrohrstützen). Die Schaltische wurden an Ort und Stelle zusammengesetzt und zwischen den beiden Außenwänden der Konstruktion positioniert. Danach wurde die Bewehrung verlegt und der Beton mit der Festigkeitsklasse B30 (C 25/30) eingebaut. Die hergestellte Deckenplatte wurde nach dem Erhalten der Normfestigkeit ausgeschalt. Die Schalung wurde gereinigt und umgesetzt. Danach wurde eine Schicht Abdichtung verlegt, die mittels bewehrten Betons (Festigkeitsklasse B15 (C 12/15)) mit einer Stärke von 10 cm geschützt wurde.

Nach der Fertigstellung der endgültigen hohlraumsichernden U-Bahnkonstruktion (Boden, Wände und Deckel) begann die letzte und sechste Bauphase.

### **3.1.6 Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk**

Die ausgebauten U-Bahnbauwerke und die vorher ausgehobene Baugrube wurden schrittweise mit Schotter in Schichten von max. 30 cm verfüllt. Die geschütteten Bodenmassen wurden bis zum Erreichen eines bestimmten Verdichtungsgrades  $k > 0,95$  verdichtet.

Innerhalb der städtischen Bebauung und der bestehenden Verkehrsanbindungen in Sofia ist die Errichtung von U-Bahntunneln und -stationen in geböschten, nicht eingefassten Baugruben eine bevorzugte, aber heutzutage eine komplizierte, mühsame und oftmals eine unmögliche Aufgabe.

### **3.1.7 Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse**

#### **Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

- geotechnische Untersuchungen und Beurteilung der anstehenden Böden (z.B. mittels Probebohrungen und Proberammungen)
- Erkundung des Grundwasserspiegels
- gute Vorerkundung und genaue Kenntnis der Lage der:
  - o existierenden Leitungen, Kanäle und ihre Umleitungen

- o existierenden Fundamentreste oder tiefliegenden Hindernisse und ihre Zertrümmerung
- Verlegung von Leitungen und Kabel im Baufeld vor Baubeginn
- Verkehrsumleitung und Verkehrssicherung
- Freimachen des Baufeldes (Rodungsarbeiten)
- Erstellen des Arbeitsplanums
- Erschließen des Baufeldes (Zufahrtswege, Wasser- sowie Stromanschlüssen)
- Abstecken der Baugrubenböschungen im Gelände
- Vorbereitung der Großflächenschalung und Herstellung von Bewehrungskörbe

#### **Bauphase 2: Herstellung der abgeböschten Baugrube**

- Baugrubenaushub
- Herstellen der Böschungswände
- Maßnahmen zur Sicherung der freistehenden Böschungen

#### **Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte**

- Verdichtung der Schotterschicht
- Planieren und Betonieren der Unterbetonschicht
- Verlegen der Abdichtung
- Herstellung von bewehrter Schutzbetonschicht
- Bewehren und Betonieren der Sohlplatte

#### **Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung**

- Stellen der Wandschalung (1. Wandseite)
- Aufstellen erforderlicher Einbauten (Aussparungen, Fugenbänder)
- Verlegen der Bewehrung
- Stellen der Wandschalung (2. Wandseite)
- Einbau des Betons
- Ausschalen
- Reinigung und Umsetzung der Schalung

#### **Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung**

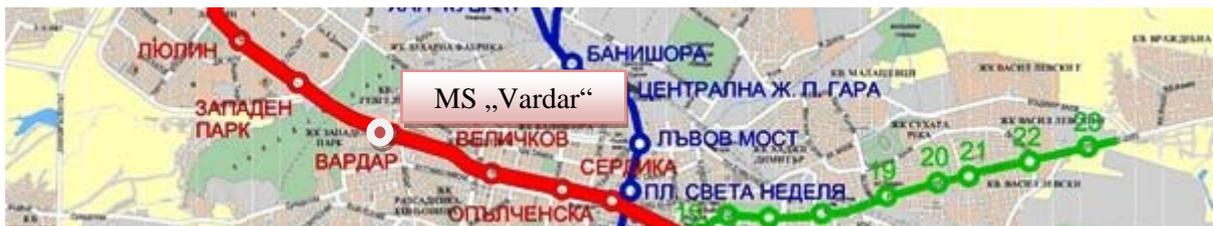
- Stellen der Deckenschalung
- Verlegen der Bewehrung
- Einbau des Betons
- Ausschalen
- Reinigung und Umsetzung der Schalung

#### **Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk**

- schrittweise Verdichtung der geschütteten Bodenmassen in Schichten

### 3.2 Tunnelherstellung in einer Baugrube mit temporärer Baugrubenumschließung: Trägerverbau

In den achtziger Jahren wurde zum ersten Mal das Verfahren des Trägerverbaus bei dem Bau der Ersten Durchquerung in Sofia MS №4 „Vardar“ angewendet (siehe Abb. 9). Damals war diese Methode mit der Hilfe von den sowjetischen Fachleuten erfolgreich eingesetzt worden. In den Jahren 1980 – 1987 wurden insgesamt 13.737 m Stahlträger bei der Herstellung der Station eingerammt. Nach Fertigstellung der MS „Vardar“ kam diese temporäre Baugrubenumschließung im U-Bahnbau in Sofia nur noch teilweise als Baumethode zum Einsatz.



**Abb. 9: Die erste und einzige völlig hergestellte Metrostation der sofiotischen U-Bahn in einer Baugrube mit temporärer Baugrubenumschließung, I Durchquerung [2.2]**

Die Baugrubenumschließung, die nach Fertigstellung des Tunnels wieder entfernt wird, wird als temporäre Baugrubenumschließung bezeichnet. Der Trägerverbau (sg.Trägerbohlwand) ist ein entweder freistehendes, ausgesteiftes (im U-Bahnbau und Leitungsbau) oder rückverankertes, gestütztes Verbausystem (bei großflächigen Baugruben), das zwischen senkrechten Stahlträgern ausgefacht ist. Diese Baumethode eignet sich für stützende Aufgaben und findet ein breites Anwendungsfeld bei der Herstellung von unterirdischen Bauwerken.

Der Trägerverbau gilt als ein wirtschaftliches und gebräuchliches Bauverfahren, dass bis zu einer maximalen Tiefengrenze von ca. 18 Meter angewendet werden kann und Einsatzmöglichkeit in nahezu allen Bodenarten aufweist. Die Herstellung kann sofort beginnen und erfordert keine mühsamen vorbereitenden verfahrensspezifischen Teilprozesse. Der besondere Vorteil liegt in der Rückbaubarkeit (teilweise oder völlig) der Stahlträger und der Ausfachung. Der Trägerverbau ist an anderen Bauweisen (z.B. Schlitz- und Bohrpfahlwände) und existierenden Hindernissen (z.B. Leitungen, Kanäle, Fundamentreste usw.) anpassungsfähig, was seine Anwendung als Bauverfahren besonders vorteilhaft macht. Das Bauverfahren charakterisiert sich als platzsparend, einfach und risikoarm.

Der Einsatzbereich wird dadurch eingeschränkt, dass der Trägerverbau nicht wasserdicht hergestellt werden kann. Nur wenn der tatsächliche oder der schon abgesenkte Grundwasserhorizont unter der Baugrubensohle liegt, kann dieses Verbausystem universell angewendet werden. Der Trägerverbau gehört zu den biegeweichen Verbausystemen, d.h. dieser Verbau ist zur Sicherung von Baugruben neben hohen Lasten bzw. setzungsempfindlichen Bauwerken (z.B. Verkehrswegen, Gebäuden) nicht geeignet. Im innerstädtischen Bereich und bei nahe gelegenen Bauanlagen sind auch im Hinblick auf

Erschütterungs- und Lärmemissionen erhöhte Anforderungen an das Einbring- und Ziehverfahren für Stahlträger zu beachten.

Der Trägerverbau ist grundsätzlich mit folgenden Vor- und Nachteilen verbunden (siehe Tab. 11):

<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Bauweise: Technologie und Bauablauf</li> <li>• Baubeginn sofort möglich</li> <li>• keine aufwendige, teure Baustelleneinrichtung erforderlich</li> <li>• anpassungsfähig an Hindernisse (Leitungen, Fundamente, Schächte usw.)</li> <li>• in allen Böden herstellbar</li> <li>• platzsparend</li> <li>• Wiedergewinnbarkeit der Bauteile (teilweise oder völlig)</li> <li>• Wirtschaftlichkeit des gesamten Verbaus</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefengrenze bei ca. 18 m (in Sonderfällen bis 20 m)</li> <li>• mind. 10 m Abstand der Trägerbohlwand gegen die Nachbarbebauung</li> <li>• langsame Herstellung (höhe Anzahl der Trägerbohlen)</li> <li>• Rückbau erforderlich</li> <li>• nicht druckwasserdicht</li> <li>• biegeweiches Verbausystem</li> <li>• Setzungen und Nachverdichtung des Bodens möglich</li> <li>• Verbleiben der Holzverbohlung, die nicht wiedergewonnen werden kann (z.B. Berliner Verbau)</li> <li>• Erschütterungen und Lärmbelästigungen bei der Bauausführung</li> <li>• hohe Wahrscheinlichkeit von Fehlrammungen bei nicht hinreichend bekanntem Baugrund</li> </ul>

**Tab. 11: Vor- und Nachteile der Baugruben mit temporärer Baugrubenumschließung Trägerverbau**

Der Trägerverbau als klassisches Verbausystem ist bis zum heutigen Tag durch eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten und Abwandlungen charakterisiert. Er wird auch noch als „Berliner Verbau“, „Hamburger Verbau“, „Heidelberger Verbau“, „Essener Verbau“, „Stuttgarter Verbau“ und „Münchener Verbau“ bezeichnet. Jede von diesen Varianten hat ihre spezifischen Unterscheidungsmerkmale im Vergleich mit den anderen, z.B. Zahl der Steifenlagen, Größe des freien Arbeitsraumes zwischen dem Trägerverbau und dem Bauwerk, Art der Ausfachung usw. Im Folgenden werden die obengenannten Varianten des Trägerverbau kurz dargestellt.

**Berliner Verbau:** ist die klassische Grundform des Trägerverbau. Der „Berliner Verbau“ ist eine Rammträgerbohlwand. Die Stahlträger (HEA-, HEB- oder HEM-Träger) werden senkrecht in den Boden eingerammt. Danach wird eine Holzausfachung hinter die Trägerflanke geschoben, die entweder durch Keile fest an das Erdreich gepresst ("angekeilt") oder durch Halteklammern an den

Flanschen der Stahlträger befestigt wird. Die Besonderheit dieser Verbauart besteht in der fehlenden Anordnung von freien Arbeitsräumen zwischen der senkrecht gesicherten Baugrube und des unterirdischen Bauwerks. Die Ausfachung kann nicht wiedergewonnen werden und dient als Unterlage für die Abdichtung des Tunnelbauwerks.

**Hamburger Verbau (sg. vorgehängter Verbau):** Bei der Herstellung eines vorgehängten Verbaus werden die Holzbohlen durch Anker, die jeweils hinter den Trägerflansch fassen, mit Hilfe von kurzen Brustträgern und Keilen außen am Stahlträger befestigt. Beiderseitig werden freie Arbeitsräume (im Normalfall 0,80 m breit) zwischen der senkrecht gesicherten Baugrube und des unterirdischen Bauwerks angeordnet. Die angewendete Ausfachung dient nicht als Unterlage für die Abdichtung des Tunnelbauwerks und kann wiedergewonnen werden.

**Heidelberger Verbau:** Weiterentwicklung des Hamburger Verbaus, die selten zum Einsatz gelangt. Die Stahlträger (verankert oder ausgesteift) und die Ausfachung werden räumlich derart voneinander getrennt, dass die Bohrungen innerhalb des verfügbaren Baugrundstücks niedergebracht werden und die Außenkante des Trägerverbaus an der Grundstücksgrenze liegen kann. Die Verbauwand befindet sich hinter den Stahlträgern. Ziel ist es Platz zu sparen. Als Ausfachung werden Betonfertigteile angewendet, die in die endgültige Außenwand integriert werden.

**Essener Verbau:** Der Essener Verbau wird bei standfesten Böden als senkrechter Verbau verwendet. Ist die Bodenbeschaffenheit weniger standfest, kann der Verbau geneigt werden. Für den Essener Verbau werden Doppel-U-Profile als Stahlträger verwendet, die nicht rammbaar sind und deshalb müssen immer in vorgebohrte Löcher eingestellt werden müssen. Der Vorteil liegt darin, dass die Anker durch die Lücke zwischen den beiden U-Profilen geführt werden können. Der Einsatz einer Gurtung ist nicht notwendig. Die Ausfachung besteht aus Spritzbeton mit einer Baustahlmatten-Einlage. Eine Anordnung von freien Arbeitsräume ist nicht vorgesehen, wo durch der Aushub für die Baugrube verringert und Platz eingespart wird.

**Stuttgarter Verbau:** Bei der Herstellung dieses Verbaus wird der Boden zwischen den geramnten Stahlträgern durch eine bewehrte Ortbetonausfachung von ca. 15 cm Dicke abgestützt. Wenn eine Trennlage (z.B. Isolierpappe) zwischen Ortbetonschale und Stahlträger angeordnet wird, können die Träger wiedergewonnen werden.

**Münchener Verbau:** Die Besonderheit dieser Verbauart besteht darin, dass die Stahlträger in vorgebohrte Löcher gestellt werden. Die Stahlträger werden danach bis in bestimmter Tiefe von der Bohrlochsohle aus in den Boden eingerammt. Die vorgebohrten Löcher können am Fuß der Bohrungen mit Betongemisch (im Normalfall Magerbeton) verfüllt werden. Der Ringraum wird mit geeignetem leicht einbaubaren Bodenmaterial verfüllt. Es darf während des Aushubs nicht aus dem Ringraum fallen. In der Regel werden mit Kalk verfestigte, nichtbindige Böden verwendet.

Bei der Herstellung der Sofioter U-Bahn wurde als Variante des Trägerverbaus der sg. „Berliner Verbau“ eingesetzt. Im Folgenden werden die wesentlichsten verfahrensspezifischen Bauphasen bei der Herstellung der Metrostation „Vardar“ (MS №4, I Durchquerung) in offener Bauweise mittels der temporären Baugrubenumschließung analysiert.

### **3.2.1 Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

Die Herstellung eines Trägerverbaus erforderte in Sofia nur geringe Maßnahmen zur Vorbereitung und Anfang des Baubeginns. Die wichtigsten Vorbereitungsmaßnahmen sind im Kapitel 3.1.1 (S. 30 ff.) näher erläutert.

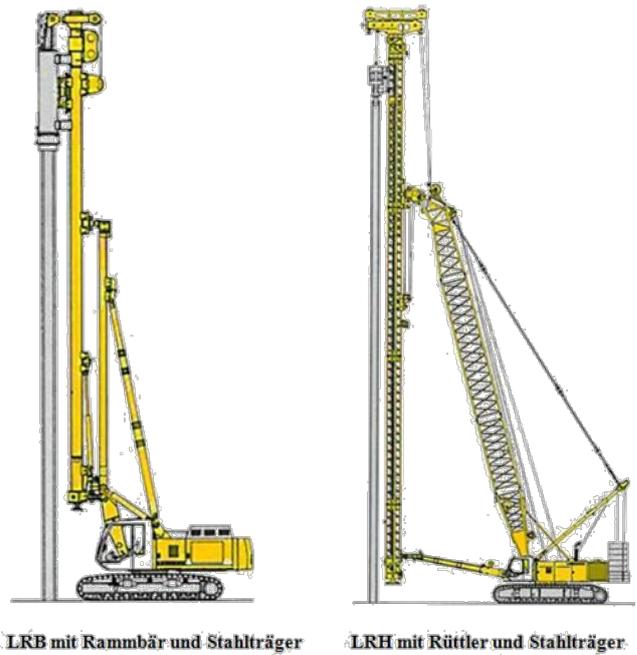
Die präzisen und qualitativen Baugrunduntersuchungen, und die ganzheitliche Betrachtung der ausschlaggebenden Ergebnisse (z.B. Bodenarten, Rammbarkeit des Bodens, Niveau des Grundwasserspiegels) führten später zu einem problemlosen Ausbau der Metrostation „Vardar“.

Verfahrensspezifischer Teilvorgang in Sofia war das Abstecken der Trägerbohlwandachse im Gelände. Bevor der eigentlichen Einbau der Stahlträger erfolgte, mussten entlang der abgesteckten Trägerbohlwandachse „Kontrollgräben“ ausgehoben werden. Die Gräben wurden mit einer Tiefe von 1,0 m bis 1,5 m und mit einer Breite von 0,5 m bis 0,8 m hergestellt. Die Herstellung der Gräben sollte eine eventuelle Beschädigung der existierenden und nicht umgelegenen Leitungen verhindern. Als Grabwerkzeug kam ein Hydraulikbagger mit Tieflöffelausrüstung zum Einsatz. Weiters wurden die Großflächenschalungen für die spätere Bauausführung der Konstruktion des U-Bahnbauwerks vorbereitet.

### **3.2.2 Bauphase 2: Herstellung des Trägerverbaus**

Die Herstellung des Trägerverbaus begann in Sofia mit dem Einbau der Stahlträger. Die Wahl des Trägertyps war von der Bodenbeschaffenheit, der Art des Trägereinbaues und den statischen Erfordernissen abhängig. Grundsätzlich werden als Stahlträger entweder Normalträger der IPE-Reihe oder Breitflanschträger (HEA (alt: IPB1), HEB (alt: IPB) oder HEM (alt: IPBv)) verwendet. Die am meisten fast ausnahmslos verwendeten Trägergrößen liegen im Bereich HEB 300 bis 500 bei Baugrubentiefen von 10 bis 18 m. In den achtziger Jahren kamen bei der Herstellung des Trägerverbaus in Sofia Stahlträger IPE 550 (nach damaligem BDS: I-Träger №55) zur Anwendung. Die projektierte Länge der Stahlträger richtete sich nach der geplanten Tiefe der Baugrube und nach der Tiefe, die sie unter das Sohlniveau reichen mussten (sg. Einbindetiefe). Die Tiefenlage der MS „Vardar“ lag bei ca. 9 m unterhalb der GOK. Die erforderliche Einbindetiefe wurde nach dem Satz von Tschebotariow berechnet:  $H_E = 0,43 \cdot H_B$  ( $H_E$  - erforderliche Einbindetiefe;  $H_B$  - Tiefe der Baugrube). Die Stahlträger wurden mit einer Länge von 10 m auf die Baustelle geliefert und konnten beliebig je nach projektspezifischer Tiefe des Trägerverbaus an Ort und Stelle mittels Leisten verlängert werden.

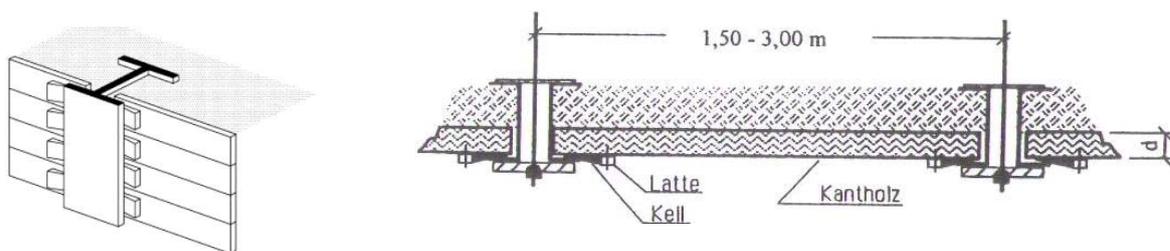
Im Allgemeinen kann der Trägereinbau durch Rammen oder Rütteln erfolgen. Das Rammen von Stahlträgern erfolgt mit Hilfe von schlagenden Rammgeräten, sog. Rammhämmern verschiedener Art (Dieselhämmer, Fallhämmer, doppelwirkende Hydraulikhämmer oder Schnellschlaghämmer), so dass die Stahlträger mit herabfallenden Gewichten in den Boden geschlagen werden. Das Rütteln von Stahlträgern beruht auf dem Prinzip, dass die Stahlträger unter dem Eigengewicht und den Schwingungen des Rüttlers infolge der sich reduzierenden Reibung zwischen ihr und dem Boden in den Untergrund eingebracht werden. Die Rammhämmern oder die Rüttler werden an einem sog. Trägergerät und



**Abb. 10: Baggergeräte mit Ausrüstung zum Rammen oder Rütteln [1.17]**

Mäklern geführt (siehe Abb. 10). Als Trägergeräte werden meistens Hydraulikbagger mit Dienstgewicht von 20 t bis 40 t universell eingesetzt und als Mäklern kommen vor allem die sog. Teleskopmäklern zur Anwendung, da eine Ausfahrhöhe bis zu 17 m erreicht werden kann. Seilbagger mit Dienstgewicht von 45 t bis 60 t und Hänge- oder Schwingmäklern eignen sich besonders gut für den Einbau von sehr langen und schweren Stahlträgern. Für den Trägereinbau bei der Bauausführung der MS „Vardar“ entschied man sich für die Methode des Rammens und verwendete folgende Gerätekombination: Seilbagger auf Raupenfahrwerk, Hängemäklern und Dieselhammer. Die Methode des Rüttelns kam in Sofia aufgrund der erforderlichen Gerätetechnik und der nicht ausreichenden Erfahrung des Personals nicht zur Anwendung.

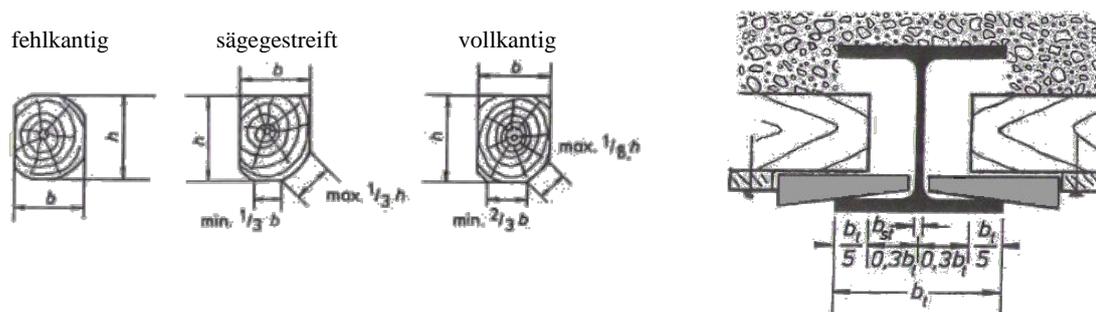
Nun konnte der Einbau der Stahlträger beginnen. Generell werden die Stahlträger im Abstand von 1,5 m bis 3,0 m in den Boden eingebaut (siehe Abb. 11). Mit Rücksicht auf die Durchbiegung und Verarbeitung wird der Abstand selten bis 3,5 m vergrößert. Die IPE-Träger wurden in Sofia im Abstand von 1,5 m gerammt. Jeder Stahlträger wurde in seiner Lage und Stellung präzise kontrolliert. So konnte ein lotrechtes Rammen sowie ein leichtes und schädigungsloses Ziehen der schon gerammten Stahlträger nach Fertigstellung des U-Bahnbauwerks gewährleistet werden.



**Abb. 11: Trägerverbau Typ „Berliner Verbau“**

Nach dem vollständigen Rammen der Stahlträger begann in Sofia der stufenweise Baugrubenaushub mit gleichzeitiger Einbringung und Verkeilung der Ausfachung zwischen den Feldern der gerammten Träger. Im Allgemeinen ist mit der Ausfachung zu beginnen, wenn eine Aushubtiefe von 1,25 m erreicht ist. Das Einbringen der weiteren Ausfachung muss hinter dem Aushub bei festen und steifen bindigen Böden höchstens um 1 m, und bei vorübergehend standfesten nichtbindigen Böden höchstens um 0,50 m zurück sein. In Sofia war aufgrund des standfesten Bodens die Freilegung des Trägerverbaus beim Einbringen der Ausfachung bis zu einer Höhe von 1 m zugelassen.

Bei der Herstellung des Trägerverbaus Typ „Berliner Verbau“ kommt verfahrensspezifisch die waagrechte Holzausfachung zur Anwendung. Sie kann aus Holzbohlen, Kant- oder Rundhölzern bestehen. Die Holzbohlen und die fehlkantigen, sägegestreiften oder vollkantigen Hölzer werden fast ausnahmslos angewendet, da die Verarbeitung von Rundhölzern sehr aufwendig ist. Die einzelnen Teile der Holzausfachung müssen eine Mindestauflage von  $1/5$  der Stahlträgerbreite betragen (siehe Abb. 12).

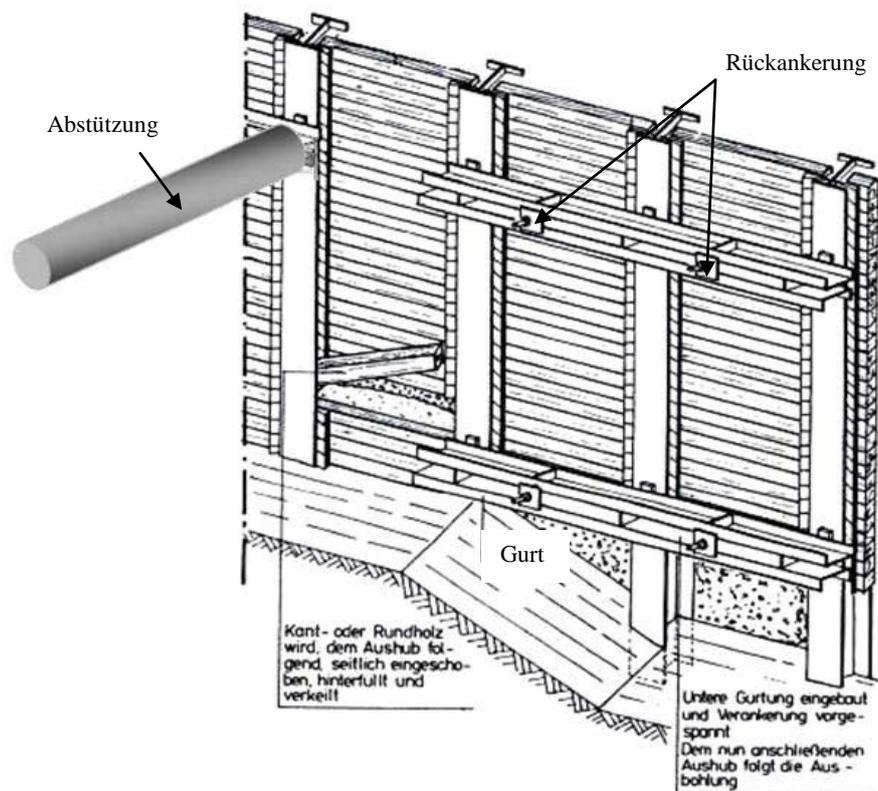


**Abb. 12: Holzschnittformen und Kantholzauflage (Detail) [1.6]**

In Sofia wurden Holzbohlen mit einer Mindestlänge von 1,6 m und einer Dicke von 5 cm angewendet. Die Dicke der Ausfachung war von dem Winkel der inneren Reibung des Bodens, der Tiefe der Baugrube und dem Abstand zwischen den Stahlträgern abhängig. Die Holzbohlen wurden mit Keilen, die zwischen den Bohlen und den Stahlträgerflanschen, fest und unverschiebbar gegen den Boden gepresst, verkeilt. Um ein Herausfallen der Keile verhindern zu können, wurden die Keile durch Leisten gesichert. Bei locker gelagerten nichtbindigen und bei geschichteten Böden mit Einlagerungen von weichen bindigen Böden oder Fließsand wurde die bereits verkeilte Ausfachung durch aufgenagelte Laschen oder Hängestangen zusätzlich gesichert. Bei der Herstellung des Trägerverbaus in Sofia waren dies nicht erforderlich.

Generell kann die Holzausfachung nur vorübergehenden Zwecken dienen. Die Funktionstüchtigkeit der Holzausfachung in Sofia dauerte max. zwei Jahre. Aufgrund des Kontaktes mit dem permanent feuchten Boden faulten die Holzbohlen und es kamen Bodenrutschungen vor. Die Holzbohlen mussten an Ort und Stelle gewechselt werden, was eine aufwendige konstruktive Aufgabe war.

Jede entstandene Verformung des Trägerverbaus (Stahlträger und Ausfachung) kann zu Verformungen und Setzungen hinter der Konstruktion führen, deshalb ist der freistehende Trägerverbau ab einer Verbauhöhe von etwa 3 bis 4 m nicht mehr empfehlenswert. Für die Zwecke des U-Bahnbaus in Sofia wurden die Baugruben bis in einer Tiefe von 9 bis 10 m hergestellt. Aus diesen Gründen musste der Trägerverbau entweder gestützt oder ein- oder mehrfach rückverankert werden (siehe Abb. 13). Im Allgemeinen nimmt die eingebrachte Ausfachung die Erddruckkräfte auf, die in die gerammten Stahlträger eingeleitet werden. Weiters werden sie über horizontal liegende Gurte verteilt und an die Abstützung oder an die Rückankerung, sowie an den Boden unterhalb der Baugrubensohle abgegeben.

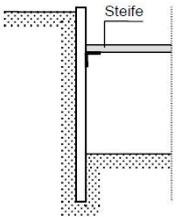
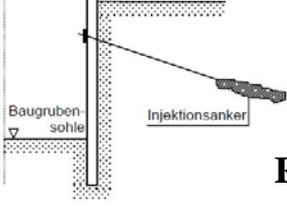


**Abb. 13: Abstützung des Trägerverbaus**

In Sofia entschied man sich gegen die Abstützung, denn die Rückankerung hatte die folgenden ausschlaggebenden Vorteile, die unter Acht genommen wurden (siehe Tab. 12): störungsfreie Einsatz von Großgeräten beim Aushub und Herstellung des U-Bahnbauwerks mittels Großflächenschalung, geringere Verformungen und damit Schadensminimierung (d.h. die Verformung konnte nahe null gebracht werden), und beträchtlichen Materialersparnis (statisch optimale Stahlträgerabstände, geringere Einbindetiefe und Gewichte der Träger). Die Sicherung des Trägerverbaus bestand aus zwei vor den Stahlträgern horizontal verlaufenden Gurte, die durch Anker gehalten wurden.

Die Gurte wurden gleichzeitig mit dem Einbringen der Ausfachung eingebracht. Sie sicherten den seitlichen Abstand der Stahlträger und dienten zum Ausrichten des gesamten Trägerverbaus. Grundsätzlich können sie aus Stahlträgern und Spundwandprofilen bestehen. Bei der Herstellung des Trägerverbaus in Sofia wurden als Gurte U-Profile №50 angewendet. Sie wurden nicht direkt an den

vertikalen Stahlträgern befestigt, sondern zur sicheren Auflage auf Konsolen gelegt, die an den Stahlträgern angeschweißt wurden.

	 <p style="text-align: center;"><b>Abstützung</b></p>	 <p style="text-align: center;"><b>Rückankerung</b></p>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• die Steifen sind wiedergewinnbar</li> <li>• durch Vorspannung kann die Verformung des Trägerverbaus sehr gering gehalten werden</li> <li>• kostengünstig</li> <li>• der Aushub kann sofort nach dem Einbau einer Steifenlage fortgesetzt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• die Baugrube ist frei von Einbauten</li> <li>• störungsfreier Einsatz von Großgeräten beim Aushub und der Herstellung des Bauwerks</li> <li>• erlaubt geringere Verformungen und Schadensminimierung</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Behinderung des Bauablaufes</li> <li>• der Einsatz von Großgeräten und der Aushub wird erschwert</li> <li>• kein Einsatz von Großflächenschalungen möglich</li> <li>• bei großen Baugrubenbreiten (ca. 12-15 m) sind zusätzliche Knickverbände, Mittelbohrträger erforderlich</li> <li>• zeit- und materialaufwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• die im Boden verbleibenden Anker erschweren die späteren Bauarbeiten</li> <li>• wegen evtl. vorhandener Nachbarbebauung im innerstädtischen Bereich nicht immer anwendbar</li> <li>• Aushub kann erst nach Abbinden des Verpreßkörpers und Prüfung der Anker (d.h. 7 Tage nach der Herstellung) fortgesetzt werden</li> <li>• nicht in allen Böden herstellbar</li> </ul>

**Tab. 12: Vor- und Nachteile der Abstützung und Rückankerung**

Die Gurte dienen als Auflager für die Anker und der Ankerabstand war damit unabhängig vom Abstand der Stahlträger. Generell werden die Rückankerungen mit vorgespannten Verpreßankern ausgeführt. Die Verpreßanker als Zuelemente übernehmen die Aufgabe einer Vorspannung und erhöhen die Tragwirkung des Trägerverbaus. Die Ankerlasten und die Längen der Anker werden in Abhängigkeit von den Baugrundverhältnissen gewählt und mit erdstatischen Berechnungen nachgewiesen. Für alle Arten der Verankerungen wird zwischen temporären (bis zu zwei Jahren) und dauerhaftem Einsatz unterschieden. In Sofia war der Einsatz von temporären Verpreßankern zweckmäßig. Die Anker wurden systematisch in zwei Reihen eingebaut und möglichst senkrecht zu den Bodenschichten angeordnet. Sie verblieben nach ihrer planmäßigen Gebrauchsdauer in der Regel entweder gespannt oder entspannt im Boden. Dazu wurde nur der Ankerkopf entfernt.

Die Herstellung eines Verpreßankers begann mit dem Herstellen eines verrohrten Bohrloches. Weiters wurde die Bohrspitze abgestoßen und ein Stahlzugglied in den Boden eingeführt. Als Stahlzugglied wurden Litzenanker eingesetzt. Durch Verpressen von Zementmörtel wurde um den hinteren Teil des eingebrachten Stahlzuggliedes ein Verpreßkörper hergestellt. Gleichzeitig wurde das Bohrgestänge gezogen. Der Verpreßkörper wurde über das Stahlzugglied und den Ankerkopf mit dem zu verankernden Trägerverbau kraftschlüssig verbunden. Der Verpreßanker wurde ca. 6 – 8 Tage nach

dem Verpressen geprüft und auf die gewünschte Vorspannkraft festgezogen. Die von ihm aufzunehmende Kraft wurde nicht über die gesamte Ankerlänge, sondern nur im Bereich des Verpreßkörpers in den Boden eingeleitet, deshalb wurde der vordere Teil des Ankers mit einem Hüllrohr umgeben. Bei der Herstellung von einigen Verpreßankern wurde in Sofia zur Erreichung der ausreichenden Tragfähigkeit ein Ein- oder Mehrfachnachverpressen durchgeführt. Die Herstellung von den Rückankerungen wurde durch umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen überwacht und dokumentiert. Die Verpreßanker wurden nach Lage, Neigung und Tiefe kontrolliert, ihre Bauausführung und die angewendeten Baustoffe überwacht, sowie ihre Tragfähigkeit geprüft.

Zur Sicherung des rückverankerten Trägerverbaus und als konstruktive Maßnahme wurden die gegenüberliegenden Stahlträger auf größere Abschnitte der Baugrube abgestützt. Sie bestanden aus Stahlrohren mit einem Durchmesser DN 630 und einer Wandstärke von 8 mm.

Nach Fertigstellung des Trägerverbaus konnte in Sofia die schrittweise Herstellung vom U-Bahnbauwerk beginnen. Die Herstellung erfolgte in zwei getrennten Bauvorgängen: schalungsfreie Sohle und geschalter Oberrahmen.

### **3.2.3 Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte**

Für die Sohlplatte musste zuerst in Sofia die Baugrubensohle hergestellt werden. In der Regel muss ein bestimmter Arbeitsraum in der Baugrube freigehalten werden. Als Breite des freien Arbeitsraums bei verbauten Baugruben gilt der waagrecht gemessene Abstand zwischen der Luftseite der Verkleidung bzw. der Vorderseite der Gurtung und der Außenseite des Bauwerks. Die Besonderheit der „Berliner Verbau“ aber besteht in der fehlenden Anordnung von freien Arbeitsräumen zwischen der senkrecht gesicherten Baugrube und des unterirdischen Bauwerks.

In der verbauten Baugrube mittels rückverankertes Trägerverbaus, mit einer Breite gleich dem lichten Abstand zwischen den freien Enden gegenüberliegender Stahlzugglieder, erfolgte in Sofia die Herstellung der Konstruktionsteile der MS „Vardar“.

Der Arbeitslauf der Herstellung der Sohlplatte wird im Kapitel 3.1.3 (S. 34 unten ff.) näher erläutert.

### **3.2.4 Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung**

Der Arbeitslauf der Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung wird im Kapitel 3.1.4 (S. 35 ff.) näher erläutert.

Anmerkung: Die Besonderheit des „Berliner Verbaus“ lag im direkten Kontakt zwischen Trägerverbau und Tunnelwand. Die Herstellung der Wandkonstruktion erfolgte mit Hilfe von einseitiger Großflächenschalung. Der rückverankerte Trägerverbau diente direkt als erste Wandschalung (1. Wandseite des U-Bahnbauwerks). Die eingebrachte Ausfachung konnte nicht wiedergewonnen werden und wurde als Unterlage bei der Herstellung der seitlichen Schutzschicht für die Abdichtung verwendet. Die Schutzschicht wurde gegen den Trägerverbau betoniert. Weiters wurde für das Herstellen der zweiten Wandseite eine Großflächenschalung gestellt und abgesteift.

### **3.2.5 Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung**

Der Arbeitslauf der Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung wird im Kapitel 3.1.5 (S. 36) näher erläutert.

### **3.2.6 Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk**

Die Bauphase 6 wird im Kapitel 3.1.6 (S. 36) näher erläutert.

Die Herstellung von Tunnelbauwerken in Baugruben mit temporärer Baugrubenumschließung Trägerverbau hat bis heute keine breite Anwendung in Sofia gefunden. Nur die MS „Vardar“ wurde bis heute in dieser Bauweise hergestellt. Innerhalb der dichten städtischen Bebauung sind die entstehenden Erschütterungen und Lärmbelastigungen beim Rammen der Stahlträger unerwünscht und das relativ hoch liegende Grundwasserniveau in Sofia machte diese Verbauart unwirtschaftlich.

### **3.2.7 Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse**

#### **Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

- geotechnische Untersuchungen und Beurteilung der anstehenden Böden (z.B. mittels Probebohrungen und Proberammungen)
- Erkundung des Grundwasserspiegels
- gute Vorerkundung und genaue Kenntnis der Lage der:
  - o existierenden Leitungen, Kanäle und ihre Umleitungen
  - o existierenden Fundamentreste oder tiefliegenden Hindernisse und ihre Zertrümmerung
- Verlegung von Leitungen und Kabel im Baufeld vor Baubeginn
- Verkehrsumleitung und Verkehrssicherung
- Freimachen des Baufeldes (Rodungsarbeiten)
- Erstellen des Arbeitsplanums
- Erschließen des Baufeldes (Zufahrtswege, Wasser- sowie Stromanschlüssen)
- Abstecken der Trägerbohlwandachse im Gelände
- Herstellung von „Gräben für Kontrolle“

#### **Bauphase 2: Herstellung des Trägerverbaus**

- Einbau der vertikalen Stahlträger
  - o Transportieren der Träger zur Baustelle
  - o Rammen der Träger in den Baugrund
- Schrittweiser Erdaushub und gleichzeitiges Einbringen der Ausfachung
  - o Beginn des Aushubs
  - o Transportieren, Einbringen und Abstützen der Ausfachung

- o Fortsetzen des Aushubs bis zur gezielten Tiefe der geplanten Baugrubensohle und Einbringen der Gurte und Rückankerung des Trägerverbaus

### **Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte**

- Verdichtung der Schotterschicht
- Planieren und Betonieren der Unterbetonschicht
- Verlegen der Abdichtung
- Herstellung von bewehrter Schutzbetonschicht
- Bewehren und Betonieren der Sohlplatte

### **Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung**

- Abdichtung des Trägerverbaus und Verwendung als erste Wandschalung (1. Wandseite)
- Aufstellen erforderlicher Einbauten (Aussparungen, Fugenbänder)
- Verlegen der Bewehrung
- Stellen der zweite Wandschalung (2. Wandseite)
- Einbau des Betons
- Ausschalen
- Reinigung und Umsetzung der Schalung

### **Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung**

- Stellen der Deckenschalung
- Verlegen der Bewehrung
- Einbau des Betons
- Ausschalen
- Reinigung und Umsetzung der Schalung

### **Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk**

- schrittweise Verdichtung der geschütteten Bodenmassen in Schichten

### 3.3 Tunnelherstellung in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung: Schlitzwand

In den Jahren 1986 – 2009 kamen in Sofia als verbleibende Baugrubenumschließung vor allem Schlitzwände zum Einsatz. Sie fanden ihr breites Anwendungsfeld bei der Herstellung von unterirdischen Bauwerken. Insgesamt wurden sechs Metrostationen und fünf Tunnelstrecken der sofiotischen U-Bahn mittels des Schlitzwandbauverfahrens hergestellt (siehe Abb. 14).

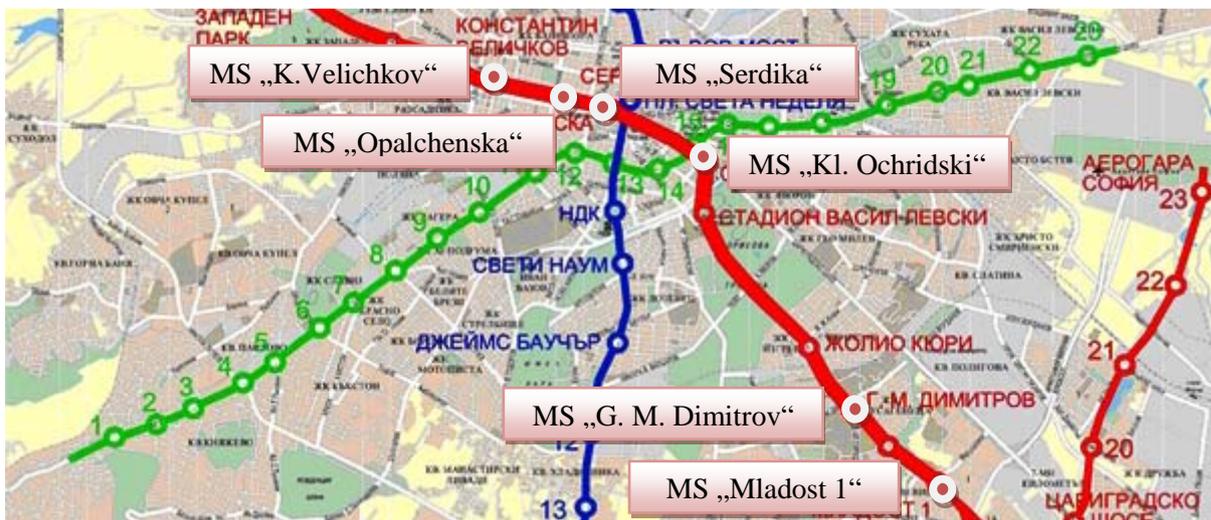


Abb. 14: Die sechs hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung - Schlitzwand, I Durchquerung [2.2]

Schlitzwände sind Grabenwände, die aus Beton, Stahlbeton oder zementgebundenen Stoffen hergestellt werden. Sie eignen sich sowohl für temporäre wie auch für permanente Aufgaben. In beiden Fällen können sie statische und/oder abdichtende oder abschirmende Funktionen erfüllen. Sie werden besonders zur Sicherung von Baugruben und Schächten in den innerstädtischen Bereichen, bei statisch horizontal und vertikal belasteten Gründungselementen und zur Abdichtung des Untergrundes, wie z.B. unter Staudämmen angewendet.

Schlitzwände können bis zu einer maximalen Tiefe von ca. 150 Meter und in nahezu allen Bodenarten hergestellt werden. Das Bauverfahren ist bei großen Tiefen und großen Verbaulängen mit großen Beanspruchungen wirtschaftlich. Die Schlitzwände sind als Umschließungsart verformungsarm (bei Rückankerung der Schlitzwand kann ihre Horizontalverformung bis auf 1 bis 2 ‰, bezogen auf die Wandhöhe, begrenzt werden). Ihr besonderer Vorteil liegt in der Minimierung der Aushubarbeiten auf die Kubatur des tragenden Baukörpers. Für die Herstellung von Schlitzwände sind die vorherrschenden Grundwasserverhältnisse nicht von all zu großer Bedeutung, da sie sowohl im als auch außerhalb des Grundwassers herstellbar sind. Das Bauverfahren charakterisiert sich im wesentlichen als schonend (lärmarm, erschütterungsfrei) und platzsparend (nahezu ohne Zwischenraum vor Gebäuden oder Fundamenten anwendbar).

Die Schlitzwände sind im Vergleich zu den temporären Baugrubenumschließungen (Spundwand- oder Trägerverbau) nicht wiedergewinnbar. Die Schlitzbarkeit muss uneingeschränkt möglich sein.

Aussparungen für querende Leitungen oder Kanäle sind problematisch, da die Schlitzwandkonstruktion als System unflexibel ist. Die Bauausführung erfordert einen erhöhten Materialverbrauch und eine aufwendige Baustelleneinrichtung. Die verunreinigte Stützflüssigkeit muss gesondert entsorgt werden. Bei kleinen Schlitzwandflächen, beengten Platzverhältnissen und geringen Tiefen ist diese Verbauart im Vergleich mit der Bohrpfehlwand oder dem Trägerverbau nicht sehr vorteilhaft.

Die Methode der Herstellung eines U-Bahnbauwerks (Tunnel- oder Bahnhofkonstruktion) in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung der Schlitzwand ist grundsätzlich mit folgenden Vor- und Nachteilen verbunden (siehe Tab. 13):

<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefengrenze bei ca. 150 m</li> <li>• in allen Böden herstellbar</li> <li>• wirtschaftliche Konstruktion: Schlitzwände als Bestandteil des U-Bahnbauwerks</li> <li>• wasserdichte Verbauart</li> <li>• verformungsarmer Verbau (Minimierung der Oberflächensetzungen und Verhinderung von Schäden an Gebäuden)</li> <li>• Umweltverträglichkeit: lärmarm, erschütterungsfrei</li> <li>• in urbanen Gebieten ausführbar (unmittelbar vor einer Wohnbebauung)</li> <li>• platzsparend</li> <li>• Minimierung der Aushubarbeiten auf die Kubatur des tragenden Baukörpers</li> <li>• im Laufe der Anwendung des U-Bahnbauwerks können die Schlitzwände als Trennwände dienen, die das entstandene Vibrieren minimieren (falls die Schlitzwände nicht als Bestandteil des Bauwerks einbezogen sind)</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baubeginn nicht sofort möglich</li> <li>• unflexible und nicht sofort belastbare Schlitzwandkonstruktion</li> <li>• aufwendiger Materialverbrauch</li> <li>• aufwendige Baustelleneinrichtung (schwere Transport- und Hebezeuge)</li> <li>• Entspannung des Bodens beim Aushub der Schlitzwände und Auflockerung der Sohle</li> <li>• spezielle Entsorgung und Deponierung des mit Stützflüssigkeit verunreinigten Aushubmaterials</li> <li>• geschultes Personal</li> </ul>

**Tab. 13: Vor- und Nachteile der Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung - Schlitzwand**

Die Herstellung eines U-Bahnbauwerks in offener Bauweise mittels des Schlitzwandbauverfahrens, erfordert eine Reihe verfahrensspezifischer Bauphasen. Im Folgenden werden die wesentlichsten Bauphasen am Beispiel der Metrostation „Kliment Ochridski“ (MS №8, I. Durchquerung) analysiert.

### 3.3.1 Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten

Die Herstellung einer Schlitzwand erforderte in Sofia bestimmte Maßnahmen zur Vorbereitung und Anfang des Baubeginns. Sie gewährleisteten die Qualität und die hohe Sicherheit während der Schlitzwandherstellung.

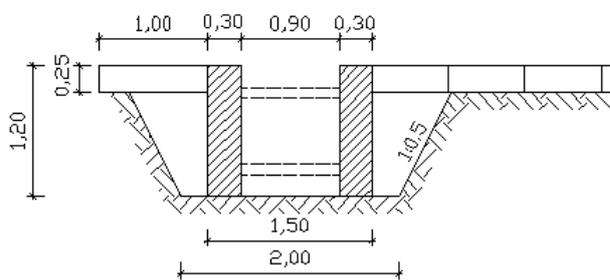
Die präzisen Baugrunduntersuchungen und die ganzheitliche Betrachtung der ausschlaggebenden Ergebnisse (z.B. Bodenarten, Schichtenverlauf, Niveau des Grundwasserspiegels) führten später zu einem problemlosen Ausbau der MS „Kliment Ochridski“. Generell wurde die Schlitzwandtiefe basierend auf den Aufschlussbohrungen festgelegt. Die universellen Vorbereitungsmaßnahmen sind im Kapitel 3.1.1 (S. 30 ff.) näher erläutert.

Verfahrensspezifische Teilvorgänge in Sofia waren: Einmessen und Abstecken der Schlitzwände im Gelände, Festlegung der Stützflüssigkeitseigenschaften (d.h. Art, Zusammensetzung, Dichte, pH-Wert, Viskosität, Filtratwasserabgabe, Fließgrenze) und Ausführungsbeschreibung aller Materialien, und Geräte. Bevor die eigentlichen Schlitzwandherstellung erfolgte, wurden sg. Testlamellen erstellt. Die Erstellung der Lamellen sollte die Zweckmäßigkeit der gewählten Schlitzwandtechnik beweisen.

### 3.3.2 Bauphase 2: Schlitzwandherstellung

Die Herstellung der Schlitzwand begann in Sofia mit der Bauausführung der Leitwände auf beiden Wandseiten. Für die Leitwände, zwei parallel zueinander angeordnete Hilfskonstruktionswände, die noch vor dem eigentlichen Aushub des Schlitzes errichtet werden, musste zuerst eine Baugrube von 1,2 m Tiefe hergestellt werden. In Sofia kamen aufgrund des standfesten Bodens Leitwände mit Rechtecksprofil zur Anwendung. Generell können, je nach vorherrschenden Bodenverhältnisse, Leitwände auch als Winkelstützwände errichtet werden. Sie kommen dann zur Ausführung, wenn keine ausreichende Standfestigkeit des Bodens gegeben ist. Falls der Spiegel der Stützflüssigkeit aus statischen Gründen über dem Geländeniveau gehalten werden muss (z.B. bei sehr hoch liegendes GW-niveau), werden die Leitwände höher als das Arbeitsplanum (als Trog für die Stützflüssigkeit) betoniert. Grundsätzlich soll die Oberkante der Leitwände 10 bis 30 cm tiefer als das Arbeitsplanum liegen. Beim Herunterfahren oder Eintauchen des Greifers (speziell beim Greiferaushub) kann die Stützflüssigkeit überschwappen oder aus dem Greifer auslaufen. Die obengenannte Abstufung gewährleistet, dass sie wieder in den Schlitz zurückfließen kann. Die Oberkanten der Leitwände in Sofia wurden hierbei nicht höher als das Arbeitsplanum betoniert. Um das Arbeitsplanum sauber zu halten, wurden horizontale Stahlbetonfertigteile (sg. Stahlbetonplatten mit einer Dicke von 25 cm) entlang der Leitwände angeordnet (siehe Abb. 15). Die Leitwände wurden je nach den Bodenverhältnissen mit einer einseitigen Schalung hergestellt. Nachdem die Wände geschalt und bewehrt waren, wurde der Beton mit der Festigkeitsklasse B30 (C 25/30) eingebaut. Leitwände bestehend aus Betonfertigteilen und Stahlfertigteilen wurden in Sofia nicht ausgeführt. Um ein

sicheres und leichtes Positionieren der hydraulischen Pressen zum Ziehen der Abschalkonstruktionen sowie eine höhengerechte Auflagerung der Bewehrungskörbe gewährleisten zu können, wurde die Oberkante der Leitwände möglichst eben, glatt und horizontal hergestellt. Der Abstand der beiden Leitwände entsprach der herzustellenden Nennstärke der Schlitzwand plus 5 cm an jeder Seite. Dieses Toleranzmaß, in Summe von 10 cm, sollte eine eventuelle Verkeilung des Aushubwerkzeuges während des Aushubs verhindern. Die Leitwände werden meist mit einer Höhe von ca. 1,0 bis 1,5 m ausgeführt. Sie hatten in Sofia eine Höhe von 1,2 m. Um die Wände gegen Kippen und Gleiten zu sichern, wurden in Abständen von 3,0 m die Leitwände jeweils mit Kanthölzern gegeneinander ausgesteift. Die Leitwände der MS „Kliment Ochridski“ zeigten folgende Abmessungen auf:



**Abb. 15: Leitwände, MS „Kl. Ochridski“ [1.37]**

Die Aufgabe der Leitwände war es den Erddruck im oberen Bereich der Wand aufzunehmen und ein Nachfallen des Bodens zu verhindern. Weiters dienten sie dem Aushubwerkzeug als Führung und gewährleisteten somit eine genaue, geradlinige und glatte Ausführung der zukünftigen Schlitzwand. Gleichzeitig ermöglichten sie auch, den schwankenden Stützflüssigkeitsspiegel zu kontrollieren und zu halten.

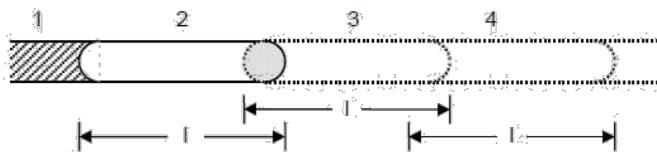
Nach Fertigstellung der Leitwände wurden entlang der Wände Zufahrtswege mit einer Breite von 4,5 m als Arbeitsebene für die verfahrensspezifischen Geräte hergestellt.

Nun konnte der Aushub und somit die eigentliche Herstellung der Schlitzwand beginnen. Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Schlitzwand Herstellungsverfahren die zur Anwendung kommen können. Das 1-Phasen- und das 2-Phasenverfahren. Der Unterschied zwischen 1-Phasen und 2-Phasenverfahren besteht darin, dass bei dem 1-Phasenverfahren die Stützflüssigkeit, die sich in dem ausgehobenen Schlitz befindet, um den Boden vor eventuellen Nachrutschungen zu stützen, nicht ausgetauscht wird. Die Stützflüssigkeit wird in diesem Fall mit Zement angereichert, so dass sie nach ca. 10 Stunden von selbst erhärtet. Bei dieser Herstellungsart können, bevor die Stützflüssigkeit erstarrt, konstruktive oder dichtende Wandelemente in den Schlitz eingebaut werden (sg. Kombinationsverfahren). In Sofia wurde das 2-Phasenverfahren angewendet, das baubetrieblich umfangreicher und deswegen auch erheblich teurer war. Hier erfolgte in der ersten Phase der Bodenaushub bei gleichzeitiger Stützung der Schlitzwandung durch eine nicht selbst erhärtete

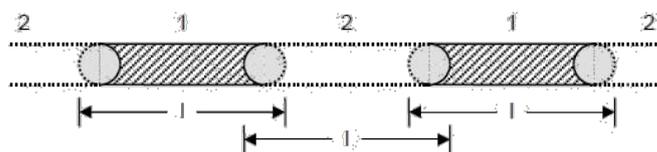
Stützsuspension. In der zweiten Phase wurde die Schlitzwandlamelle mit gleichzeitiger Verdrängung der stützenden Suspension betoniert. In Sofia entschied man sich gegen das 1-Phasenverfahren, da es hauptsächlich für die Herstellung von Dichtwänden eingesetzt wird, die nicht als konstruktive Elemente einsetzbar sind.

Bevor der Aushub des Schlitzes erfolgte wurde die zu erstellende Wand in Lamellen (Teilelementen) eingeteilt. Generell kann die Reihenfolge, in der die einzelnen Schlitzwandlamellen ausgehoben werden, unterschiedlich sein. Die gebräuchlichsten Verfahren der Schlitzwandherstellung sind: das kontinuierliche Verfahren und das Pilgerschrittverfahren (siehe Abb. 16). Für den Aushub und die

#### Kontinuierliches Herstellungsverfahren



#### Pilgerschrittverfahren



**Abb. 16: Reihenfolge der Lamellenherstellung [2.8]**

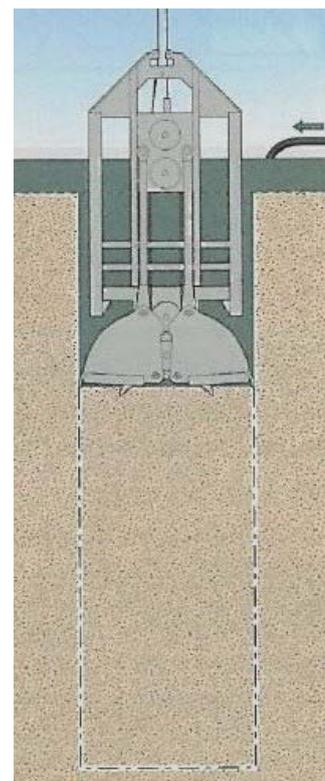
Betonage der Schlitzwandlamellen entschied man sich in Sofia für das kontinuierliche Herstellungsverfahren. Das Verfahren charakterisierte sich als einfacher. Es wurde nur ein Abschälrohr benötigt. Die Schlitzwandlamellen wurden demnach aufeinander folgend ausgehoben bzw. betoniert. Die Lamellen wiesen, bis auf die Anfangslamelle, gleiche

Abmessungen auf, was für die Ausbildung der Bewehrungskörbe und die Anordnung von Ankern und Steifen von Vorteil war. Während die Lamellendicke von der jeweilig geplanten Nenndicke der Schlitzwand abhängig war, richtete sich die Lamellenlänge nach den örtlichen Verhältnissen, dem Herstellungsverfahren, der Baustelleneinrichtung, der Anzahl der Geräte und der zur Verfügung stehenden Baudauer. Die Vorläuferlamelle (Lamelle 1) hatte demnach eine Länge von 2,2 m, alle anderen Lamellen (sg. Läuferlamellen) eine Länge von 3,0 m. Da in Sofia die Schlitzwand mit einer Dicke von 0,80 m projektiert war, so wurden die Lamellen entsprechend auch in einer Dicke von 0,80 m ausgeführt. Grundsätzlich hätte der Aushub und die Betonage der Lamellenelemente auch im Pilgerschrittverfahren erfolgen können. Bei diesem Verfahren wäre erst nach Fertigstellung einer Schlitzwandlamelle stets erst der übernächste Abschnitt betoniert worden, wobei aufgrund des Abschälrohres die Vorläufer- und Nachläuferlamellen unterschiedliche Abmessung hätten. Im Pilgerschrittverfahren ist ein optimaler Einsatz von Ressourcen möglich, die Teilvorgänge können parallel ausgeführt und zeitlich optimiert werden. In Sofia entschied man sich gegen diese Herstellungsart, aufgrund des hohen technischen und baubetrieblichen Aufwands und daraus resultierenden überdurchschnittlich hohen Preises für einen  $\text{m}^2$  Schlitzwandfläche.

Der Aushub des Schlitzes in Sofia begann mit der Entfernung der Kanthölzern, die die Leitwände gegeneinander aussteiften, an der jeweiligen Lamellenstelle. Die projektierte Schlitzwandtiefe betrug zwischen 16 und 20 m und reichte zwischen 6 und 8 m unter das geplante Sohlniveau (Einbindetiefe). Während des Aushubs wurde der Schlitz zur Verhinderung von eventuellen Nachrutschungen des

Bodens mittels einer Stützflüssigkeit bestehend aus Wasser, Bentonit und Natrit gestützt (siehe Kapitel 6.3; S. 120 ff.). Sie wurde auf das Korngerüst des anstehenden Bodens abgestimmt. Der Mischungsprozess erfolgte kontinuierlich und langsam mit mechanischen Mixern (Typ „SMR-4“), um eine qualitative Suspension ohne Klumpen herstellen zu können. Die Stützflüssigkeit wurde mittels Schläuche DN 100 in den offenen Schlitz zugeführt. Der Bodenaushub erfolgte unter dauernder Zufuhr der Stützflüssigkeit (siehe Abb. 17). Der Suspensionspiegel wurde auf einem Niveau von 0,50 m unter Leitwandoberkante gehalten.

Im Allgemeinen werden für den Aushub spezielle Aushubgeräte eingesetzt. Als Grabwerkzeuge kommen üblicherweise Greifer (mechanische oder hydraulische) oder Fräsen (siehe Abb. 18) zum Einsatz die auf einem Trägergerät, in der Regel ein Bagger auf einem Raupenfahrwerk, angebaut bzw. angehängt werden. Der Aushub kann demnach intermittierend (im Greiferverfahren) oder kontinuierlich (im Fräsverfahren) erfolgen. Die Wahl- und die Anwendungsprinzipien jedes

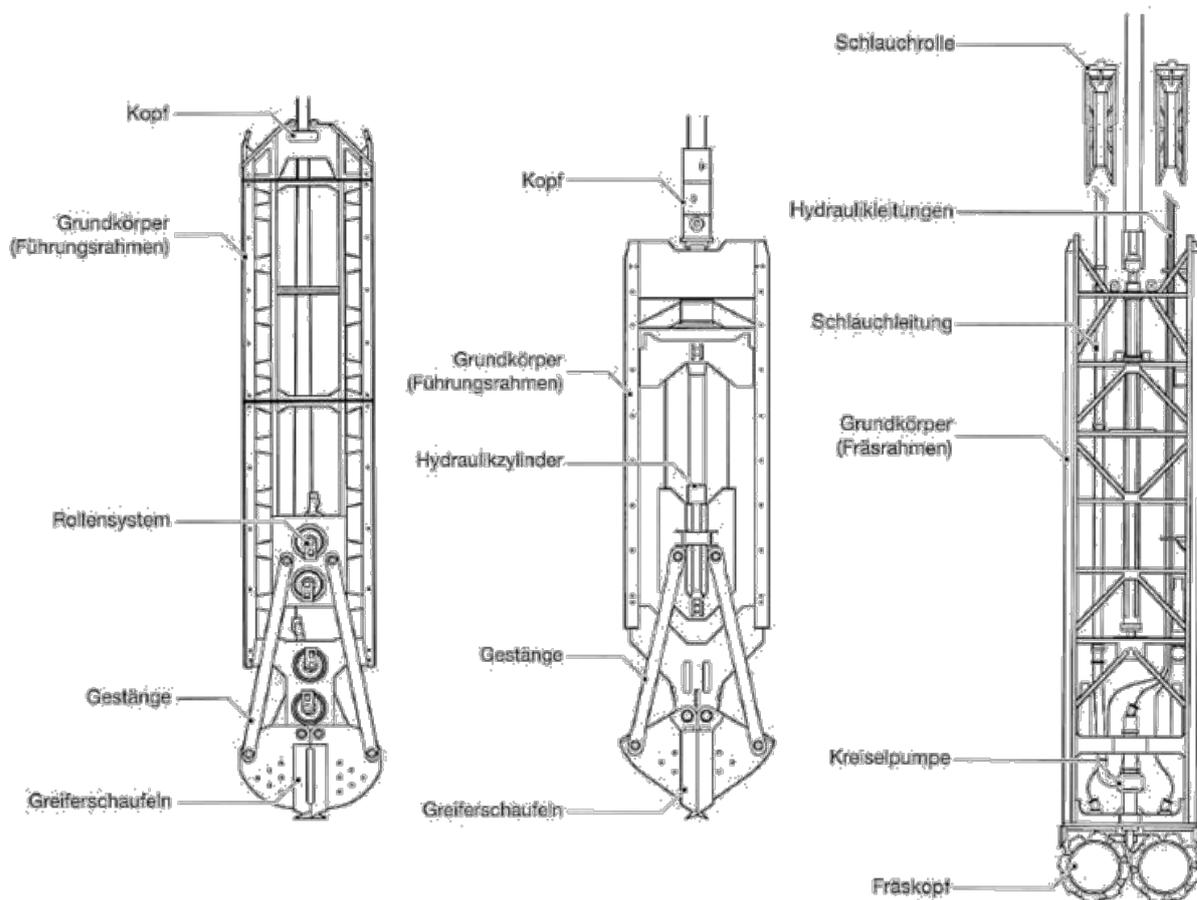


Verfahrens und die daraus folgenden Konstruktionstypen und baulichen Teilvorgängen sind von der Schlitzwandtiefe und -breite, und der Bodenbeschaffenheit abhängig.

**Abb. 17: Aushub mit Greifer unter Zugabe von Stützflüssigkeit [1.17]**

In Sofia kamen als Grabwerkzeuge mechanisch und hydraulisch angetriebene Schlitzwandgreifer von den Firmen Casagrande, Benati und Bauer zum Einsatz. Das am meist genutzte Aushubwerkzeug zur Schlitzwandherstellung in Lockergesteinsböden (Korngrößen bis 100 mm) ist der mechanische Schlitzwandgreifer, sg. Seilgreifer (siehe Abb. 18). Er besteht aus dem Grundkörper, den zweischaligen Greiferschaufeln und dem in Grundkörper eingebrachten Rollensystem, über das hohe Schließkräfte erzeugt werden können. Mit mechanischen Greifern wurden für die Zwecke des U-Bahnbaus in Sofia Schlitz bis etwa 25 m Tiefe hergestellt. Bei der Bauausführung der MS „Kliment Ochridski“ wurde folgende Gerätekombination angewendet: Bagger BEN 370-C5B als Trägergerät und Hydraulikgreifer, der an einer Kellystange KRC-2 montiert war. Bei dem hydraulischen Schlitzwandgreifer erfolgte das Öffnen und Schließen mit einer hydraulisch betriebenen Gestängekonstruktion (siehe Abb. 18). Die Hydraulik wurde dabei über Schläuche vom Bagger aus versorgt. Mit Hilfe der Kellystange wurde eine besonders gute und präzise Führung im Schlitz gewährleistet. Die hydraulischen Schlitzwandgreifer wurden in Sofia mit einem Mess- und Steuersystem ausgerüstet, dies eine genaue und sichere Herstellung des Schlitzwandaushubs nach Lage und Richtung ermöglichte. In Sofia kam bis heute nur das Greiferverfahren zum Einsatz. Bei der Schlitzwandfräse würde an der Stelle des Greiferwerkzeuges am unteren Ende des Grundkörpers ein Fräskopf montiert sein (siehe Abb. 18). Mit Hilfe des Fräskopfes würde der Boden kontinuierlich gelöst werden. Der mit Stützflüssigkeit verunreinigte Boden musste gepumpt und in einer

Regenerierungs- und Abscheideanlage gereinigt werden. Das Fräsverfahren war für Sofia wenig vorteilhaft und nicht zweckmäßig. Lagen die projektierten Schlitzwandtiefen unter 100 m Tiefe und die Schlitzwandflächen unter 7 500 m<sup>2</sup>. Die hohen Leistungsfähigkeiten dieses Verfahrens (i.d.R. bei homogenen Böden) konnten in Sofia aufgrund der inhomogenen Bodenbeschaffenheit nicht gewährleistet werden.



**Abb. 18: Mechanischer Schlitzwandgreifer (links), hydraulischer Schlitzwandgreifer (mitte), Schlitzwandfräse (rechts) [1.17]**

Da der Aushub mit einem Greifer bewerkstelligt wurde, erfolgte der Aushub in Sofia intermittierend. Der geförderte Boden war mit der Stützflüssigkeit vermischt und wurde in einem Stahlbehälter gelagert. Die gebrauchte Stützflüssigkeit wurde speziell deponiert. Die Verfuhr auf eine Deponie war in Sofia aus Kosten- und Umweltschutzgründen nicht gegeben. Grundsätzlich können Stützflüssigkeiten in einer Regenerierungs- und Abscheideanlage (bestehend aus: Pumpensystem, Vibrationssieb, Auffangbehälter, Hydrozyklon) zur Wiederverwendung aufbereitet werden. Eine Regenerierungsanlage wurde bis heute in Sofia noch nie eingesetzt.

Nach dem vollständigen Aushub der Schlitzwandlamelle wurde mit dem präzisen und qualitativen Einbringen der Abschalelemente zur Abgrenzung der Lamelle begonnen (siehe Abb. 19). Im Fugenbereich musste in Sofia die Wasserundurchlässigkeit gewährleistet werden, da die Schlitzwände

nach Fertigstellung dauerhaft als endgültige Bestandteile von den U-Bahnbauwerken genutzt wurden. Jede Undichtigkeit wegen mangelhafter Bauausführung (z.B. keine präzise Fugenausbildung oder ungenauer Aushub des Schlitzes) musste verhindert werden.

Generell werden fünf Fugensysteme angewendet: Abschalrohre, Betonfertigteile, Flachfugenelemente, Fugenbänder und Fugenherstellung mittels Überfräsung. Als Abschaltung wurden in Sofia Abschalrohre aus Stahl mit einem Rohrdurchmesser DN 800 eingesetzt. Sie wurden aufgrund der verhältnismäßig geringen Kosten angewendet. Die Abschalrohre die aus einzelnen Rohrschüssen bestanden und somit gut an die Schlitzwandtiefe angepasst werden konnten, wurden jeweils am Ende einer Lamelle als Begrenzung zum anstehenden Boden positioniert.

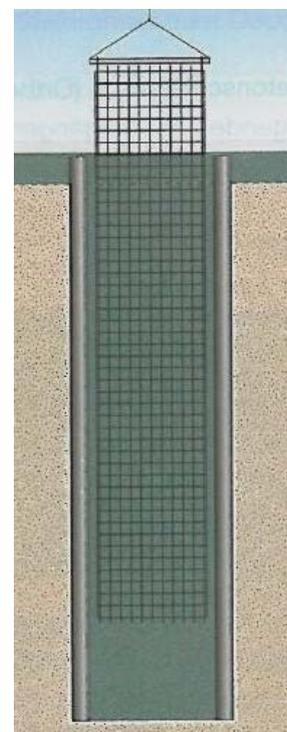
Durch das Anheben, Fallenlassen und Drücken des Rohres wurde das Rohr etwa 10 bis 15 cm in den Boden eingebunden um ein Eindringen des Betons beim Betonieren verhindern zu können. So wurde auch die Standsicherheit während dem Aushärten des Betons gewährleistet. Diese Abschalrohre sorgten für eine glatte und saubere Fuge zwischen den Schlitzwandlamellen. Die halbkreisförmigen Abschlüsse ermöglichten eine gute Verzahnung der einzelnen Elemente, da der Beton in die Ausnehmungen fließen konnte.



**Abb. 19: Einbringen der Abschalrohre [1.17]**

Nach dem Einbringen der Abschalrohre wurde mit dem Einbringen der erforderlichen Bewehrung begonnen (siehe Abb. 20). Bevor dies geschah musste die Stützflüssigkeit homogenisiert werden, dies durch mehrmaligen Greiferfahrten (Auf- und Abbewegen über die Höhe der Schlitzlamelle) oder direkt durch das Auf- und Abbewegen des Bewehrungskorbes vor seinem Einsetzen passierte. Durch die Homogenisierung der Stützflüssigkeit konnte eine gleichmäßige Verteilung der Aushubaufladung (d.h. beigemengten Bodenpartikeln) in der Suspension erzielt werden, so dass eine problemlose Verdrängung der Suspension durch den Beton gegeben war.

Die ausgesteiften vormontierten Bewehrungskörbe in Sofia wurden in sg. Schüssen von 14 m bis 20 m auf die Baustelle geliefert, die beliebig je nach Schlitztiefe mittels Klammern verlängert werden konnten. Die Korbabmessungen entsprachen den Abmessungen jeder Schlitzwandlamelle. Die Einbringung erfolgte über Hebegeräte. In Sofia kamen Fahrzeugkräne mit Teleskopausleger (Traglast von etwa 6 t und Hubhöhe bis ca. 30 m) zur Anwendung. Jeder Bewehrungskorb wurde präzise in den Schlitz eingestellt. Es mussten große Durchbiegungen des Korbes und demzufolge schädliche Deformationen vermieden werden, deshalb wurde der Bewehrungskorb aus Stahl der Klasse III an den



**Abb. 20: Einstellen der Bewehrung [1.17]**

Leitwänden befestigt. Um den Bewehrungskorb an den hergestellten Leitwänden aufhängen zu können, wurden Bewehrungsstäbe am Korb befestigt. Somit konnte die Höhe des Korbes genau festgelegt werden. Um die Betonüberdeckung der Bewehrungsstäbe zu gewährleisten, wurden an dem Bewehrungskorb Abstandshalter befestigt. Sie sorgten für die Qualität der Betonüberdeckung.

In der Konstruktion des Bewehrungskorbes wurden sog. Dübelkasten eingebaut (siehe Abb. 21). Sie wurden im Bereich des Anschlusses Sohlplatte/Schlitzwand eingesetzt. Hier erfolgte bei der Sohlplatten Herstellung der Anschluss der Sohlbewehrung, so dass die aufzunehmenden Kräfte der Sohlplatte in die Schlitzwandkonstruktion eingeleitet werden konnten.

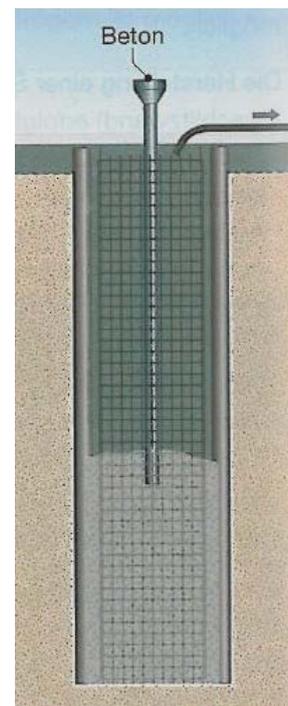


**Abb. 21: Dübelkasten im unteren Bereich einer Schlitzwand, MS "Kl. Ochridski" [1.37]**

Das Betonieren der Schlitzwandlamelle kann üblicherweise erst dann beginnen, wenn die Bewehrungskörbe und die Abschalung eingebaut sind.

Für das Betonieren von Schlitzlamellen in Sofia kam das Kontraktorverfahren mit speziell entwickelten Schüttröhren zum Einsatz. Das Schüttrohr (mit einem Rohrdurchmesser DN 273) wurde in der von Bewehrung freigehaltene Betoniergasse eingesetzt. Das Schüttrohr wurde mit wasserdichten Kupplungen, Steckverbindungen und Verriegelungsseile errichtet, so dass keine Stützflüssigkeit eindringen konnte.

Das Einbringen des Betons erfolgte von unten nach oben bei gleichzeitigen Abpumpen der Stützflüssigkeit (siehe Abb. 22). Der Beton durfte sich niemals mit Stützflüssigkeit oder Einschlüsse von Stützflüssigkeit vermischen. In Sofia wurden Maßnahmen gesetzt, die die Vermischung verhindern sollten. Das Schüttrohr wurde nicht auf die Schlitzsohle aufgesetzt, sondern mit Hilfe von speziellen Halterungen an der Oberseite der Leitwände gehalten. Das untere Ende des Rohres wurde 15 bis ca. 20 cm über der Schlitzsohle positioniert. Grundsätzlich muss das Schüttrohr während des gesamten Betoniervorganges mit einer Tiefe in den Frischbeton eintauchen,



**Abb. 22: Einbringen des Betons und Abpumpen der Stützflüssigkeit [1.17]**

welche mind. 3,0 m bis maximal der Länge des Schlitzabschnittes entspricht. Die Eintauchtiefe des Schüttrohres betrug in Sofia während des Betonierens 2,0 m bis 2,5 m und wurde nicht unterschritten, da sich bei einer zu geringen Eintauchtiefe ein sog. Betonierkegel (stark geneigte Frischbetonoberfläche) ausbilden konnte. Generell kann die steile Neigung der Frischbetonoberfläche

beim Ziehen des Schüttrohres zu einem Umfallen und Umschlagen des Kegels und damit zur Vermischung von Stützflüssigkeit und Beton führen. Solche Fehlstellen sind sehr aufwendig zu sanieren und verschlechtern die Qualität der betonierten Schlitzwandlamelle.

Der Frischbeton wurde in Sofia niemals im Freienfall durch das Schüttrohr fallen gelassen. Bevor der Beton in den Schüttrohreinlauf geschüttet wurde, wurde der Einlauf mit Hilfe von einem Betonierball aus Gummi verschlossen. Danach wurde der Beton eingegossen. Wenn der Betoniertrichter eine ausreichende Frischbetonfüllung hatte, drückte der gegossene Beton den Ball langsam nach unten zur Schlitzwandsohle. Gleichzeitig wurde die im Rohr stehende Stützflüssigkeit verdrängt. Der Ball wird aus dem Schüttrohr getrieben. Während des Betonierens mussten längere Betonierunterbrechungen über 15 Minuten vermieden werden, um keine Vermischung des Betons mit der Stützflüssigkeit gewährleistet zu werden. In Sofia wurde eine Steiggeschwindigkeit des Betons von 3 bis 4 m/h eingehalten. Je höher die Steiggeschwindigkeit des Betons ist, desto qualitativer ist die Oberfläche der betonierten Schlitzlamelle.

Nach dem Betonieren einer Schlitzwandlamelle (d.h. 2 bis 3 Stunden nach dem Anfang des Betonierens) wurden die Abschalrohre in Sofia wenige Zentimeter ausgehoben und wieder hinunter gelassen. Diese Bewegung erleichterte das spätere endgültige Ziehen der Abschalrohre, da die Haftung des Betons am Abschalrohr zuvor verringert wurde. Während seiner Aushärtung wurde der Beton vom Baustellenlabor regelmäßig überwacht, um im richtigen Zeitpunkt das Rohr zu ziehen, d.h. wenn der Beton noch jung, aber schon in Abbindeprozess war. Im Allgemeinen ist das Ziehen der Abschalrohre zeitlich nicht universell zu bestimmen. Je steifer und fester der Beton wird, desto größer sind die erforderlichen Ziehkräfte sein. In Sofia wurden die Rohre etwa 8 Stunden nach dem Anfang des Betonierens gezogen. Die Ziehgeschwindigkeit betrug ca. 2 m/h. Grundsätzlich können die Rohre mit hydraulischen Ziehvorrichtungen oder Baggern gezogen werden. In Sofia entschied man sich für hydraulische Rohrziehpressen.

Nach dem vollständigen Ziehen der Abschalrohre wurden sie gereinigt, damit sie wieder für die nächste Schlitzwandlamelle eingesetzt werden konnten. Weiters folgte der Aushub, das Bewehren und Betonieren der nächsten Lamellen. Jede Fuge zwischen zwei Lamellen wurde präzise geputzt. Dort sollten keine Sand- oder Kiesnester verbleiben, um die Dichtheit der Fuge und somit der Schlitzwand zu gewährleisten. Generell können sich die Fugen zwischen den Schlitzwandlamellen geringfügig öffnen. Die Schlitzwand kann sich infolge von Erd- und/oder Wasserdrücken, oder Schwinden des Betons verformen. Um die Dichtigkeit der Schlitzwände in Sofia garantieren zu können, wurden Dehnungsfugen angeordnet.

Nach Fertigstellung der Schlitzwände konnte der Aushub zwischen den Wänden und später die tatsächliche Herstellung der Sohlplatte beginnen.

### 3.3.3 Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte

Der Aushub für das unterirdische Bauwerk konnte in Sofia beginnen. An der Aushubseite der fertigen Schlitzwände wurden die Leitwände abgebrochen. Um die Verschiebungen der Wandköpfe gering zu halten, wurden die Schlitzwände durch Steifen aus Stahl gegeneinander ausgesteift. Die Steifen behinderten nicht den weiteren Bauvorgang.

Bei dem Aushub wurden Bagger, die mit luftbereiften Fahrwerken ausgerüstet waren (am meist Tieflöffelbagger), eingesetzt. Der Boden wurde gelöst und geladen (siehe Abb. 23, Abb. 24). Der Aushub erfolgte schrittweise bis zur Sohlplattenunterkante.

Gleichzeitig wurde auch die Güte der hergestellten Schlitzwandoberfläche geprüft. Unregelmäßigkeiten an der Wandoberfläche waren vorhanden. Grundsätzlich sind bei grobkörnigen Böden „Betonnasen“ zu erwarten, da die stützende Wirkung der Suspension infolge von ihrer erheblichen Eindringung in den anstehenden Boden an dessen Oberfläche nicht voll wirksam wird. Die ausgebildeten Betonnasen wurden in Sofia abgebrochen und das anfallende Material wurde abtransportiert.

Während des Aushubs wurde auch die Lage und die Vertikalität jeder Schlitzwandlamelle geprüft, sowie wurden die Abschlüsse kontrolliert. Keine Lage- oder unzulässige Neigungsabweichungen der betonierten Schlitzwände wurden festgestellt. Zulässige und unzulässige Erscheinungsformen der betonierten Schlitzwände sind in der Abb. 25 dargestellt. Während des Aushubs wurden in Sofia Setzungsmessungen der Nachbarbebauung (Gebäude, Verkehrswege) durchgeführt, die Festigkeit des Betons geprüft und entstandene Rissbreiten gemessen.

Nun konnte die Herstellung der Sohlplatte beginnen. Diese Herstellung ähnelte in hohem Maße der Herstellung der Sohlplatte in Baugrube mit freien Böschungen. Nachfolgend sind die verfahrensspezifischen Unterschiede näher erläutert. In der Baugrube wurde schrittweise ein temporäres System für Entwässerung des Planums (mittels Dränleitungen) ausgeführt, eine



Abb. 23: Aushubarbeiten, MS „Kl. Ochridski“ [1.37]



Abb. 24: Aushubarbeiten unter dem Niveau der Abstützung, MS „Kl. Ochridski“ [1.37]

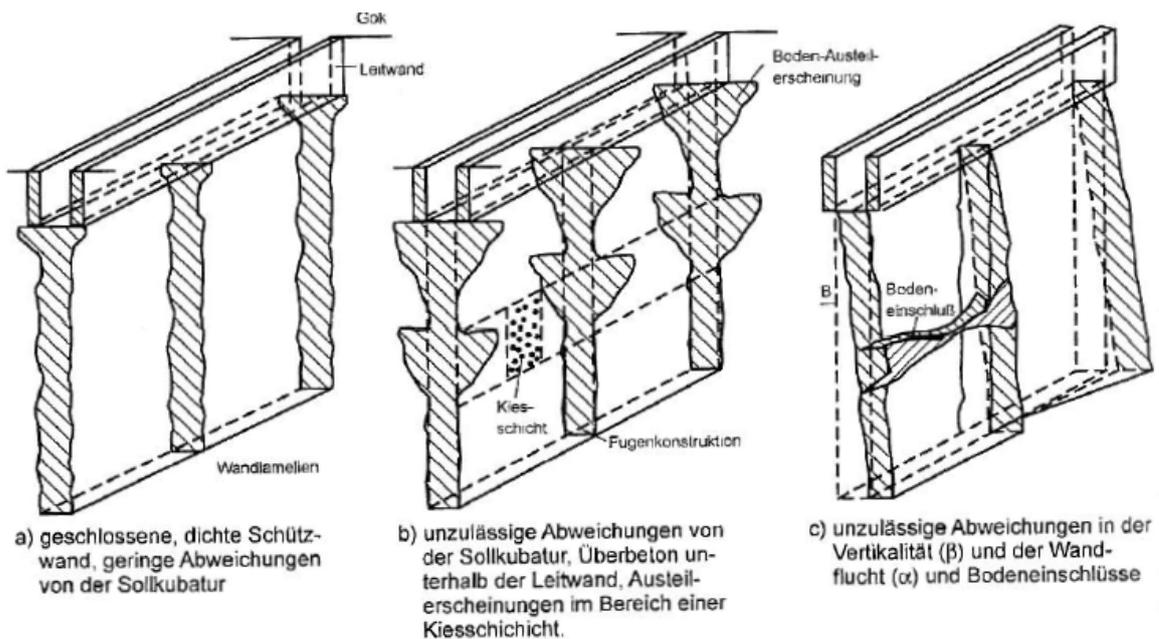


Abb. 25: Schlitzwand: zulässige und unzulässige Erscheinungsformen [1.25]

Schotterschicht verdichtet, eine Unterbetonschicht eingebracht und Abdichtungen verlegt. Bei der Herstellung der Sohlenabdichtung von den U-Bahnbauwerken in Sofia, die in Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung errichtet wurden, kamen zwei Abdichtungsarten „Dual seal“ und „Preprufe“ zur Anwendung (siehe Kapitel 6.4; S. 121 ff.). Ausschlaggebend für die Wahl der geeigneten Art war der Zustand (trocken oder feucht) der unterliegenden Oberfläche. Nach dem Verlegen der Abdichtung wurde ein Geotextil ( $\sim 500\text{g/m}^2$ ) aufgetragen. Diese Schicht sollte die Abdichtung gegen mechanische Beeinträchtigungen schützen. Weiters folgte die Herstellung einer Schutzbetonschicht und das Bewehren der Sohlplatte. Die Bewehrungsstäbe der Sohlplatte wurden planmäßig verlegt und in den Bereichen der sg. Dübelkasten (siehe Abb. 21; S. 57) mit der Bewehrung der hergestellten Schlitzwände kraftschlüssig verbunden. Der Anschluss erfolgte mit Hilfe von Bewehrungsstahl und Schraubmuffen. Anschließend wurde die Sohlplatte betoniert.

Der Arbeitslauf der Herstellung der Sohlplatte wird im Kapitel 3.1.3 (S. 34 unten ff.) näher erläutert. Obengenannte Unterschiede sind hierbei unter Acht zu nehmen.

Nach der Herstellung der Wandelemente und der Sohlplatte begann in Sofia die Bauausführung der Deckenplatte.

### 3.3.4 Bauphase 4: Herstellung der Dachkonstruktion

Die Dachkonstruktion der MS „Kliment Ochridski“ wurde als klassische Stahlbetonkonstruktion, bestehend aus Hauptträger und Deckenplatte, in monolithischer Bauweise hergestellt.

Die Herstellung begann mit dem teilweisen Abbruch der Schlitzwände im oberen Bereich. Der obere halbe Meter der Schlitzwand konnte die entsprechende Qualität des Betons nicht gewährleisten, da der Beton mit Stützflüssigkeit und Aushubmaterial durchsetzt war. Nach Aushärtung des schlechten Betons, wurde er schrittweise entfernt. Die Anschlußbewehrung blieb frei (in Bulgarien „wartende“

Anschlußbewehrung genannt), die als Bewehrung der Verbindungsträger später diente (siehe Abb. 26). Die Verbindungsträger hatten die Aufgabe, die Schlitzlamellen in Längsrichtung gegeneinander auszusteifen. Die Querschnittsabmessungen dieser Verbindungsträger waren bei der MS „Kl. Ochridski“ 0,80 m/1,50 m. Im Stoßbereich zwischen der Schlitzwand und dem Verbindungsträger wurde das quellfähige Fugenband „Bentorub“ eingebaut (siehe Kapitel 6.4; S. 121 ff.). Diese Vorsorgemaßnahme wurde zum Verhindern von Feuchtstellen in die Fuge gesetzt.

Die Verbindungs- und die Hauptträger sowie die Deckenplatte wurden geschalt und bewehrt.

Die Verbindungsträger, die Hauptträger und die Deckenplatte wurden gleichzeitig an Ort und Stelle betoniert. Die Abmessungen eines Hauptträgers betragen bei der MS „Kl. Ochridski“: 1,50 m Höhe, 0,40 m Breite und 20 m Länge. Die Dicke der Deckenplatte war 0,80 m.

Nach dem Erhalten der Normfestigkeit wurden die Elementen der Dachkonstruktion ausgeschalt. Die Schalung wurde gereinigt und umgesetzt.

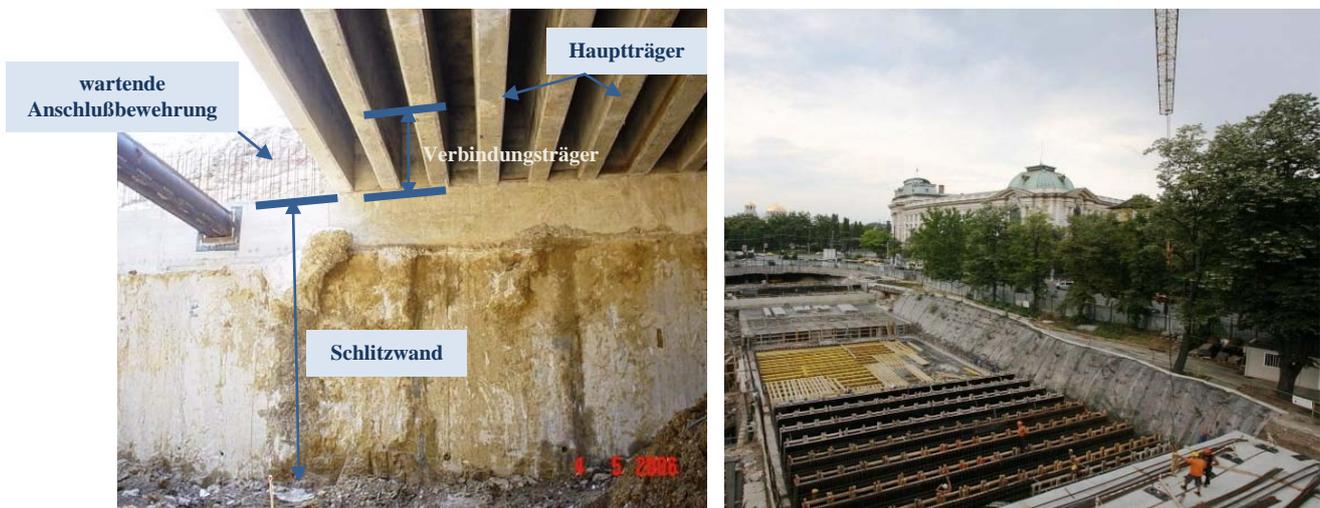


Abb. 26: Dachkonstruktion der MS „Kliment Ochridski“ [1.37]

Nach Fertigstellung der Deckenplatte wurde eine Schicht Zementestrich aufgebracht, in der die Abdichtung „Bituthen 4000“ (siehe Kapitel 6.4; S. 121 ff.) verlegt wurde. Die Abdichtungsschicht hatte die Aufgabe das Eindringen des Grundwassers in das U-Bahnbauwerk von Oben zu verhindern. Anschließend wurde ein Geotextil ( $\sim 500\text{g/m}^2$ ) aufgetragen und eine Stahlbetonschicht der Festigkeitsklasse B15 (C 12/15)) betoniert.



Abb. 27: Verlegte Abdichtungsschicht [2.4]

Nach Fertigstellung der endgültigen hohlraumsichernden U-Bahnkonstruktion (Boden, Wände und Deckel) konnte die letzte fünfte Bauphase beginnen.

### **3.3.5 Bauphase 5: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk**

Die Bauphase 5 wird im Kapitel 3.1.6 (S. 36) näher erläutert.

Die Herstellung von Tunnelbauwerken in Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung Schlitzwand hat bis heute die breiteste Anwendung in Sofia gefunden. Als Nachweis dafür gilt die Vielzahl der Tunnelbauwerken, die in dieser Bauweise hergestellt wurde. Wegen ihren wesentlichen Vorteilen ist die Schlitzwand, das bevorzugte Bauverfahren im U-Bahnbau in Sofia.

### 3.3.6 Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse

#### **Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

- geotechnische Untersuchungen und Beurteilung der anstehenden Böden (z.B. mittels Probebohrungen und Proberammungen)
- Erkundung des Grundwasserspiegels
- gute Vorerkundung und genaue Kenntnis der Lage der:
  - o existierenden Leitungen, Kanäle und ihre Umleitungen
  - o existierenden Fundamentreste oder tiefliegenden Hindernisse und ihre Zertrümmerung
- Verlegung von Leitungen und Kabel im Baufeld vor Baubeginn
- Verkehrsumleitung und Verkehrssicherung
- Freimachen des Baufeldes (Rodungsarbeiten)
- Erstellen des Arbeitsplanums
- Erschließen des Baufeldes (Zufahrtswege, Wasser- sowie Stromanschlüssen)
- Abstecken der Schlitzwände im Gelände

#### **Bauphase 2: Schlitzwandherstellung**

- Herstellung der Leitwände
  - o Voraushub
  - o Schalen, Bewehren und Betonieren der Leitwänden
  - o Einbau von Aussteifungen
  - o Bodenverfüllung und Bodenverdichtung hinter der hergestellten Leitwand
  - o Warten auf das Erreichen der Normfestigkeit der Leitwände in 28 Tagen
- Herstellung des flüssigkeitsgestützten Schlitzes
  - o Entfernung der Aussteifungen zwischen den beiden Leitwänden
  - o Aufbereiten und Transportieren der Stützflüssigkeit
  - o Aushub der Schlitzwandlamelle
  - o Beobachtung des Stützflüssigkeitsspiegels und kontinuierliche Überprüfung der Stützflüssigkeit
  - o Abtransport des ausgehobenen Bodens
  - o Separierung der Stützflüssigkeit, Abtransport und Deponierung
- Einbau der Fugen und Abschalkonstruktionen
- Positionieren und Einbau der Bewehrung
- Betonieren
- Ziehen der Abschalelemente

#### **Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte**

- Verdichtung einer Schotterschicht
- Planieren und Betonieren der Unterbetonschicht
- Verlegen der Abdichtung

- Herstellung von bewehrter Schutzbetonschicht
- Bewehren und Betonieren der Sohlplatte

#### **Bauphase 4: Herstellung der Dachkonstruktion**

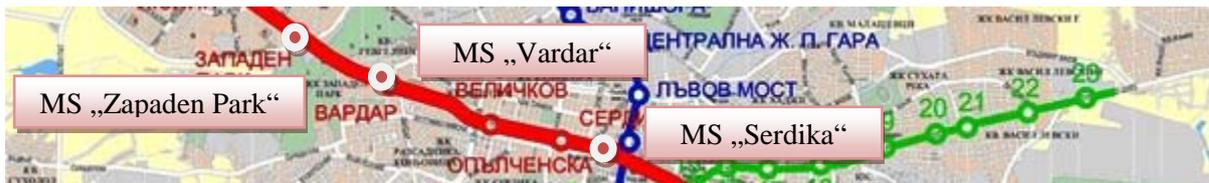
- Herstellen der Hauptträger
- Herstellen der Deckenplatte
- Verlegen der Abdichtung

#### **Bauphase 5: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk**

- schrittweise Verdichtung der geschütteten Bodenmassen in Schichten

### 3.4 Tunnelherstellung in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung: Bohrpfahlwand

In den Jahren 1980 – 2009 kamen in Sofia als verbleibende Baugrubenumschließung auch Bohrpfahlwände zum Einsatz. Die U-Bahnstrecke MS „Zapaden Park“ - MS „Vardar“ und der Zielschacht im Bereich der MS „Serdika“ wurden mittels des Bohrpfahlwandverfahrens hergestellt (siehe Abb. 28). Generell wurden die Bohrpfahlwände in Sofia zur Sicherung von Baugruben angewendet und wurden selten mit in das zu erstellende Bauwerk einbezogen.



**Abb. 28: Die erste hergestellte Tunnelstrecke der sofiotischen U-Bahn in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung - Bohrpfahlwand, I Durchquerung [2.2]**

Bohrpfahlwände bestehen aus nebeneinanderstehenden, einzeln hergestellten Bohrpfählen. Sie eignen sich für temporäre wie auch für permanente Aufgaben. In beiden Fällen können sie statische und/oder abdichtende Funktionen erfüllen. Die Bohrpfahlwände werden angewendet, wenn größere horizontale und/oder vertikale Lasten abgetragen werden müssen und wenn aufgrund angrenzender Bebauung die Verformungen der Baugrubenumschließung klein bleiben muss. Sie sind eine Alternative zur ersten Art der Ortbetonwände, den Schlitzwänden.

Bohrpfahlwände können bis zu einer maximalen Tiefe von ca. 25 Meter und in allen, d.h. auch in nicht oder nur schwer rambaren Böden hergestellt werden. Sie können senkrecht als auch mit Neigung bis zu 15° gegen die Vertikale hergestellt werden. Als überschnittene Variante sind sie wasserdicht herstellbar und die Grundwasserabsenkung kann unterbleiben. Die Bohrpfahlwände können gut an die vorhandenen Platzverhältnisse und Baugrenzen angepasst werden. Sie sind verformungsarm und können direkt neben bestehenden Bebauungen und hochbelasteten Fundamenten hergestellt werden. Die Bohrpfahlwände sind bei komplizierten Grundrissen (beliebige, auch verwinkelte Grundrissformen) von Baugruben sehr gut anpassbar, da die Anordnung der einzelnen Pfähle flexibel geplant und hergestellt werden kann. Da in der Regel die Bohrungen verrohrt abgeteuft werden, können die Bohrarbeiten genau ausgeführt werden und eine Einsturzgefahr ist auch bei hohen seitlichen Belastungen gering. Bei Bohrpfählen beträgt die zu erwartende waagrechte Fußabweichung aus der Lotrechten etwa 0,5 % der Wandhöhe. Das Bauverfahren charakterisiert sich als lärm- und erschütterungsarm.

Die Bohrpfahlwände sind im Vergleich zu den temporären Baugrubenumschließungen (Spundwand- oder Trägerverbau) nicht wiedergewinnbar. Die möglichen Tiefen sind geringer als bei Schlitzwänden. Die Kosten von Bohrpfahlwänden sind im Vergleich zu anderen Verbauarten (auch mit

Schlitzwänden) sehr hoch. Ihre Herstellung ist dann wirtschaftlich, wenn sie in das Bauwerk einbezogen werden.

Die Methode der Herstellung eines U-Bahnbauwerks (Tunnel- oder Bahnhofkonstruktion) in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung der Bohrpfahlwand ist grundsätzlich mit folgenden Vor- und Nachteilen verbunden (siehe Tab. 14):

<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in allen Böden herstellbar</li> <li>• Baubeginn sofort möglich</li> <li>• Anpassung der Bohrpfahlwandlänge an unerwartete Baugrundsichten möglich</li> <li>• flexible Bohrpfahlwandkonstruktion (d.h. beliebige, verwinkelte Grundrissformen)</li> <li>• wirtschaftliche Konstruktion: Bohrpfahlwände als Bestandteil des U-Bahnbauwerks</li> <li>• verformungsarmer Verbau (Minimierung der Oberflächensetzungen und Verhinderung von Schäden an Gebäuden)</li> <li>• geneigte Herstellung bis zu 15° gegen die Vertikale möglich</li> <li>• Umweltverträglichkeit: lärmarm, erschütterungsfrei</li> <li>• in urbanen Gebieten ausführbar (unmittelbar vor einer Wohnbebauung)</li> <li>• Minimierung der Aushubarbeiten auf die Kubatur des tragenden Baukörpers</li> <li>• direkter Bodenaufschluß</li> <li>• wasserdicht (gilt für die überschnittene Variante der Bohrpfahlwand)</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiefengrenze bei ca. 25 m</li> <li>• nicht sofort belastbar</li> <li>• aufwendige Baustelleneinrichtung (schwere Transport- und Hebezeuge)</li> <li>• Bohrpfahlwand nicht wiedergewinnbar</li> <li>• viele Fugen als Schwachstellen für möglichen Wasserzutritt</li> <li>• teurer Verbau</li> <li>• größer Platzbedarf bei der Herstellung der Wandkonstruktion</li> <li>• Entspannung des Bodens bei der Bohrarbeiten und Auflockerung der Sohle</li> <li>• Gefahr des Abreißen des Betonschaftes beim Ziehen der Rohre</li> <li>• geschultes Personal</li> </ul>

**Tab. 14: Vor- und Nachteile einer Bohrpfahlwand**

Im Allgemeinen unterscheidet man drei Arten von Bohrpfahlwänden nach der Anordnung der Pfähle.

- tangierende Bohrpfahlwand
- aufgelöste Bohrpfahlwand
- überschnittene Bohrpfahlwand

Jede von diesen Arten hat ihr spezielles Einsatzgebiet und spezifisches Unterscheidungsmerkmal im Vergleich zu den anderen. Im Folgenden werden die obengenannten Arten kurz dargestellt und bewertet.

### Tangierende Bohrpfahlwand:

Unter tangierenden Bohrpfahlwänden versteht man nebeneinander angeordnete bewehrte Bohrpfähle, die aus Herstellungsgründen einen lichten Pfahlabstand von ca. 2 - 10 cm aufweisen (siehe Abb. 29). Sie können nur in Böden ohne Grundwasser oder im Schutz einer Grundwasserabsenkung hergestellt werden. Die tangierenden Bohrpfahlwände sind nicht wasserdicht. Eine sorgfältige Bauausführung der Bohrungen kann die Verformungen und die Setzungen hinter der Wand weitgehend verhindern. Die tangierende Anordnung der Pfähle gewährleistet während der Bauausführung, dass keine Auflockerung des Bodens entsteht. Für eine zusätzliche Rückankerung benutzt man einen Gurt oder setzt die Injektionsanker in die Pfahlzwickel.

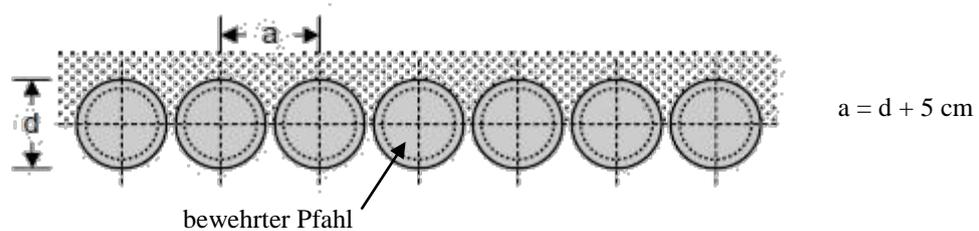


Abb. 29: Tangierende Bohrpfahlwand [2.8]

### Aufgelöste Bohrpfahlwand:

Die aufgelösten Bohrpfahlwände bestehen aus linear oder gekrümmt angeordneten bewehrten Bohrpfählen in Abständen größer als der Durchmesser des Einzelpfahls (üblicherweise ca. 1,0 bis 3,0 m) (siehe Abb. 30). Die Zwischenräume im Aushubbereich werden mit dem fortschreitenden Aushub gesichert. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten: bewehrter und unbewehrter Spritzbeton mit ebener Ausbildung oder Gewölbeausbildung zum Boden. Bei felsigen Bodenverhältnissen kann die Ausfachung zwischen den Bohrpfählen entfallen (siehe Abb. 30). Die aufgelösten Bohrpfahlwände sind nicht wasserdicht. Ihr Einsatzbereich ist dort, wo geringere Lasten zu erwarten sind. Bei einer Rückankerung werden die Anker durch die Pfähle geführt.

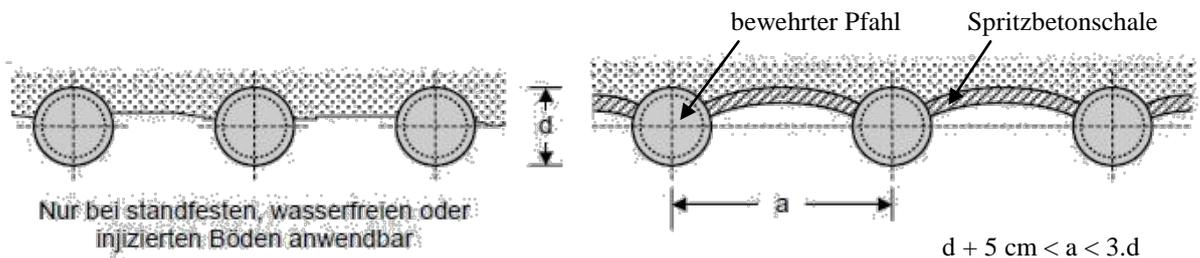


Abb. 30: Aufgelöste Bohrpfahlwand [2.8]

### Überschnittene Bohrpfahlwand:

Die überschnittenen Bohrpfahlwände bestehen aus linear angeordneten bewehrten (sg. Sekundärpfähle) und unbewehrten (sg. Primärpfähle) Bohrpfählen, die sich ca. 10 bis 20 % des Pfahldurchmessers (abhängig von Bohrverfahren und Baugrundverhältnissen) überschneiden. Zunächst beginnt die Herstellung unbewehrter Primärpfähle (siehe Abb. 31; Pfähle 1,3,5,7 usw.) und wenige Tage danach beginnt das Bohren der Sekundärpfähle (Pfähle 2,4,6,8 usw.), die in die

Primärfähle einschneiden. Die überschrittenen Bohrpfahlwände sind durchgehende, wasserdichte Betonwände. Bei einer Rückankerung werden die Anker am meist durch die unbewehrten Pfähle geführt.

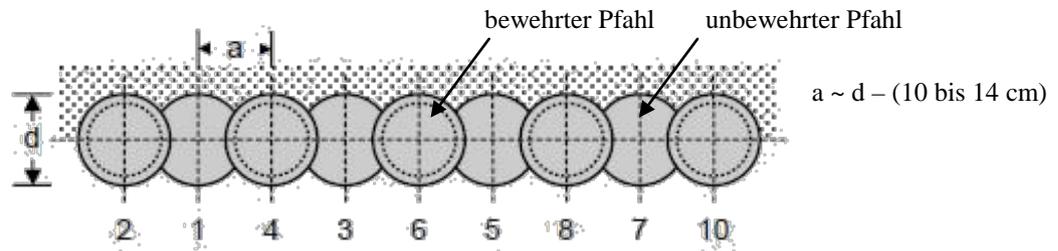


Abb. 31: Überschrittene Bohrpfahlwand [2.8]

Bei der Herstellung der Sofioter U-Bahn wurden als Varianten der Bohrpfahlwände tangierende und aufgelöste Bohrpfahlwände eingesetzt.

Die Herstellung eines U-Bahnbauwerks in offener Bauweise mittels des Bohrpfahlwandbauverfahrens, erfordert eine Reihe verfahrensspezifischer Bauphasen. Im folgenden werden die wesentlichsten Bauphasen am Beispiel der Tunnelstrecke MS „Zapaden Park“ - MS „Vardar“ (I Durchquerung) analysiert.

### 3.4.1 Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten

Die Herstellung einer Bohrpfahlwand erforderte in Sofia bestimmte Maßnahmen zur Vorbereitung und Anfang des Baubeginns.

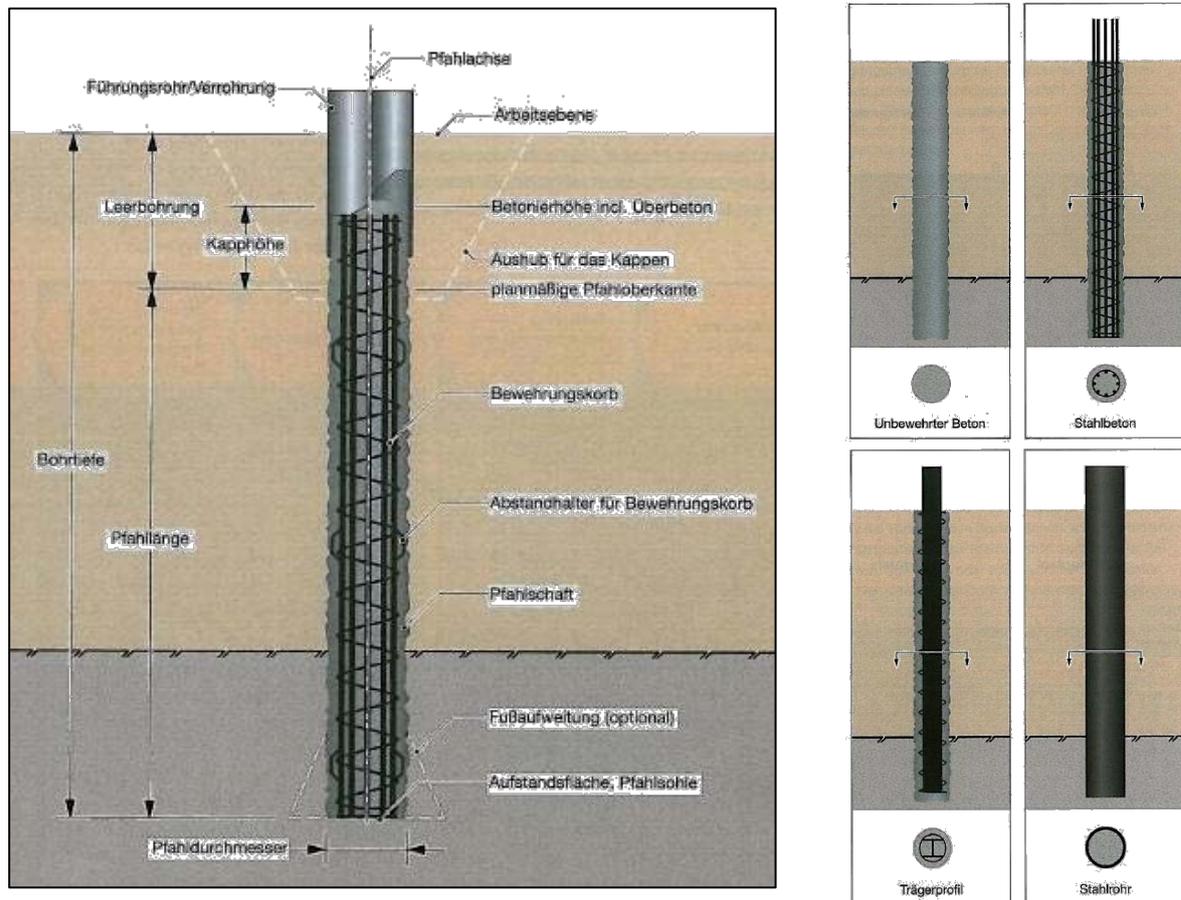
Die genaue Festlegung der Bodenverhältnisse und der Bodeneigenschaften sowie des Niveau des Grundwasserspiegels gewährleistete die Qualität und die hohe Sicherheit während der Bohrpfahlwandherstellung. Die wichtigsten Vorbereitungsmaßnahmen sind im Kapitel 3.1.1 (S. 30 ff.) näher erläutert.

Verfahrensspezifischer Teilvorgang in Sofia war: Einmessen und Abstecken der Bohrpfahlwände im Gelände.

### 3.4.2 Bauphase 2: Bohrpfahlwandherstellung

Die Bauausführung der Bohrpfahlwand begann in Sofia mit der Herstellung einer Bohrschablone (Stahlsegmente, Stahlbeton-Fertigteile oder an Ort und Stelle hergestellte Stahlbeton-Körper) in die Arbeitsebene. Sie ermöglichte die Einhaltung der genauen Abstände der einzelnen Pfähle der geplanten tangierenden Bohrpfahlwand. Die Bohrschablone hatte den Zweck, ein genaues Ansetzen und eine genaue Führung des Bohrrohres während der ersten Bohrmeter zu gewährleisten. Die Schablone wurde in einer Höhe des Bohrplanums von ca. 20 ÷ 30 cm an Ort und Stelle aus bewehrten Stahlbeton hergestellt. In der Regel soll die Bohrschablone stabil ausgebildet sein, da sie hohe Beanspruchungen während des Ausbohrens und Wiederziehens der Bohrrohre aufnimmt.

Die wichtigsten Elementen der Bohrpfehlwand sind aber die Bohrpfähle (siehe Abb. 32). Bohrpfähle sind Ortbetonkörper, für die zur Aufnahme des Pfahles im Boden ein Hohlraum ausgebohrt und ausgehoben wird. Generell können sie aus unbewehrtem oder bewehrtem Beton hergestellt werden. Die tangierenden Bohrpfehlwänden bestanden in Sofia verfahrensspezifisch aus nebeneinander angeordneten bewehrten Bohrpfehlen (sg. Stahlbetonbohrpfähle), was die einzelnen Teilprozesse weitgehend beeinflusste.



**Abb. 32: Bezeichnungen am Bohrpfehl und Pfahlarten [1.17]**

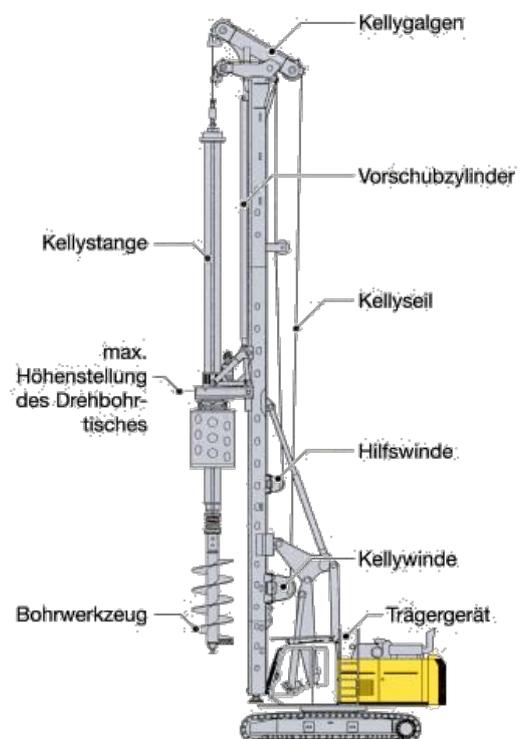
Nach Fertigstellung der Schablone konnte die eigentliche Herstellung der einzelnen Bohrpfähle beginnen.

Grundsätzlich gibt es drei unterschiedliche Bohrpfehlwand Herstellungsverfahren, die zur Anwendung kommen können, das Kellybohrverfahren, das Doppelkopfbohrverfahren und das Greiferbohrverfahren. Gegenwärtig kommt das Greiferbohrverfahren speziell zur Herstellung von Pfahlbohrungen mit großen Durchmessern und in besonderen Situationen zum Einsatz. Der Unterschied zwischen Kellybohrverfahren und Doppelkopfbohrverfahren besteht darin, dass bei Doppelkopfbohrverfahren die Außenverrohrung und die innen laufende Bohrschnecke durch zwei unabhängige, miteinander gekoppelte Bohrantriebe gegenläufig angetrieben werden. Bei Kellybohrverfahren wird mit einem Bohrantrieb die Bohrlochverrohrung eingebracht sowie das an der Kellystange montierte Bohrwerkzeug angetrieben. In Sofia entschied man sich für das am häufigsten

angewendete Herstellungsverfahren – das Kellybohrverfahren, da es sich universell für bindige und nichtbindige Bodenverhältnissen, im oder außerhalb des Grundwassers eignet. Mit Hilfe von speziellen Bohrwerkzeugen konnten Hindernisse durchörtert werden. Das Kellybohrverfahren charakterisierte sich in Sofia als nahezu lärmarm und erschütterungsfrei.

Im Allgemeinen kann die Herstellung eines Bohrpfahles im Kellybohrverfahren mittels Trockenbohrung oder Spülbohrung erfolgen. Für die Zwecke des U-Bahnbaus in Sofia wurde die Trockendrehbohrung als zweckmäßige Bohrmethode gewählt. In dem Fall geschah das Lösen des Bodens drehend mit einem präzise gewählten Bohrwerkzeug (z.B. Bohrschnecke, Bohrgreifer, Bohreimer) und danach wurden die gelösten Bodenmassen mittels ihm zu Tage gefördert. Im Gegensatz zur Trockenbohrung erfolgt bei der Spülbohrung die Förderung des gelösten Bodens mit Hilfe eines Flüssigkeitsstroms (Luft-Wasser-Gemisch oder Ton-Wasser-Gemisch).

In Sofia kam die folgende Gerätekombination mit Ausrüstung zur Anwendung: Trägergerät Bagger „Benati“, Kellystange mit Bohrschnecke „Casagrande“ und Bohrrohr (siehe Abb. 33). Mit der angewendeten Gerätekombination erfolgte die Stützung der Bohrlochwandung verrohrt. Im Allgemeinen musste der durch Bodenentnahme entstandene Hohlraum fast bis zur endgültigen Herstellung des Bohrpfahles gestützt werden, um eine unerwünschte Auflockerung oder Entspannung des angrenzenden Bodens zu verhindern. Das Zusammenfallen des ausgehobenen Bohrloches musste vermieden werden. Die Stützung erfolgte durch die Anwendung eines Bohrrohres, das schrittweise eingebracht wurde.



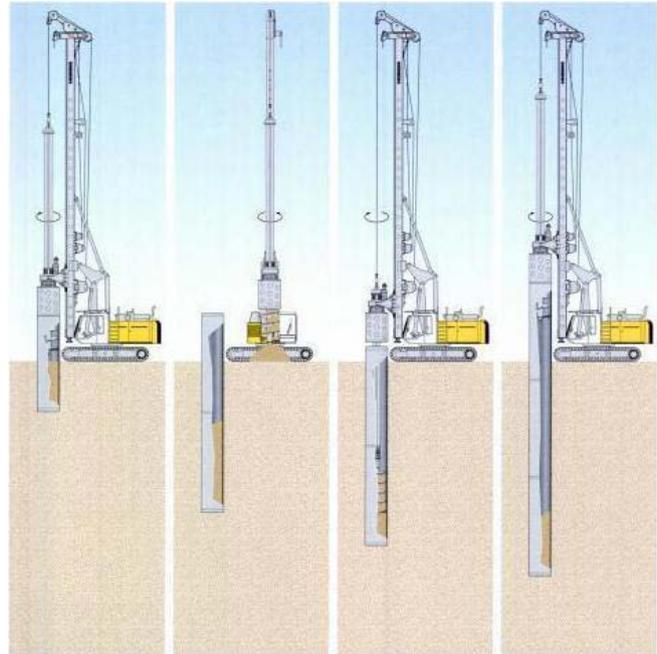
**Abb. 33: Ausrüstung Kellybohren [1.17]**

Nach der Anordnung und dem Ausrichten der gewählten Ausrüstung (d.h. Kontrolle von Lage, Vertikalität, Horizontalität) konnte die Herstellung des ersten Bohrpfahles beginnen.

Die Bauausführung begann mit dem Ansetzen und Eindrehen des ersten Bohrrohres in den Boden. Es war am unteren Ende mit einem Schneidschuh ausgerüstet, was das Eindringen des Bohrrohres erleichterte. Danach folgten der Einbau des zweiten Bohrrohres sowie Ausbohren und seitliches Entleeren, da sich die Bohrschnecke bei Vorschub und Bohrantrieb mit Boden füllte. Der Vorgang wiederholte sich mehrmals. Der ausgebohrte Boden ermöglichte die gleichzeitige Kontrolle der Bodenverhältnisse und der Tragfähigkeit im Boden. Die Bohrröhre wurden kraft- und formschlüssig miteinander verbunden. Die Verrohrung musste immer dem Ausbohren vorausseilen. Das Voreilmaß

soll im Normalfall (in weichen, bindigen und nichtbindigen Böden) mind. einen halben Rohrdurchmesser betragen. Dies verhindert die Möglichkeit einer Auflockerung des Bodens unterhalb der Bohrlochsohle. Das Bohren erfolgte schrittweise in die Tiefe. Irgendwann Zeitpunkt wurde die Bohrtiefe erreicht, die der ersten Stufe des Kelly-Bohrgestänges entsprach. Danach wurde ein weiteres Bohrrohr eingedreht und die zweite Stufe wurde ausgefahren (siehe Abb. 34).

Generell wiederholten sich die beschriebenen Teilprozesse (Anbau und Eindrehen der weiteren Bohrrohren, und Ausbohren des Bodens) bis Erreichen der planmäßigen Endtiefe.



Die Qualitätssicherung bei Eindrehen und Ausbohren des Bohrpfahles erforderte die Kontrolle der Bohrung nach: Lage, Tiefe, Neigung und Querschnitt.

**Abb. 34: Kellybohren eines verrohrten Bohrpfahles [1.17]**

Grundsätzlich sind die Durchmesser von verrohrt hergestellten Bohrpfähle im Kelly-Bohrverfahren von 60 bis 150 cm. In Sofia wurden die Pfähle mit einem Durchmesser von 100 cm hergestellt.

Nach dem Erreichen der Projekttiefe wurde in das Bohrloch mittels eines Kranes eine sg. Schlammpumpe abgeteuft. Es wurden die entstandenen Bodensätze abgepumpt und entfernt. Die Bohrlochsohle wurde gesäubert, um das Entstehen von späteren Setzungen zu verhindern.

Nun konnte das Bewehren des Bohrpfahles beginnen. Die Bewehrungskörbe (in dem Fall radialsymmetrisch angeordnete Längsstäbe mit senkrecht angeordneten Ringen) wurden in Sofia mit kräftigen Aussteifungsringen hergestellt. Die Korbabmessungen entsprachen den Abmessungen des Bohrpfahles. An ihrer Außenseite wurden Abstandshalter angebracht (in einer Abstand von 2,5÷3,0 m), die die Zentralität beim Einbau des Bewehrungskorbes gewährleisteten. In der Regel sollen die Abstandshalter genügend freien Platz zum Innendurchmesser des Bohrrohres haben. Dies garantiert weiters, dass das Bewehrungskorb beim späteren Wiederziehen des Bohrrohres nicht nach oben zu Tage gezogen wird. Die Einbringung des Bewehrungskorbes erfolgte in Sofia über Hebeegeräte. Generell kamen Fahrzeugkräne mit Teleskopausleger (Traglast von etwa 6 t und Hubhöhe bis ca. 30 m) zur Anwendung.

Die Qualitätssicherung beim Bewehren des Bohrpfahles erforderte: Kontrolle des Bewehrungskorbes als Stahlgüte und Korbform, Kontrolle des Einbaues des Bewehrungskorbes, d.h. Kontrolle seiner vertikalen und horizontalen Stabilität sowie seiner planmäßigen Tiefenlage.

Das Betonieren des Bohrpfahles konnte in Sofia erst dann beginnen, wenn die Pfahlbohrung fertiggestellt, die Bohrlochsohle gesäubert und der Bewehrungskorb des Pfahles eingebaut war. Für das Betonieren von Bohrpfählen in Sofia kam das Kontraktorverfahren zum Einsatz. Es gewährleistete ein qualitatives Betonieren auch wenn evtl. Wasser im Bohrloch vorhanden war. Generell wurde das Eindringen von Wasser kontrolliert und verhindert. Das Betonieren erfolgte mit einem Schüttrohr, das zu Beginn bis zur Bohrlochsohle reichte und während des Betonierens in den frischen Beton in bestimmter Höhe (mind. 1,5 m; in der Regel bei Bohrpfählen mit  $\varnothing \geq 1,2$  m – mind 2,5 m) eintauchen musste. Das Kontraktorverfahren für das Betonieren eines Bohrpfahles ist gleich dem Kontraktorverfahren für das Betonieren einer Schlitzwandlamelle (siehe Kapitel 3.3.2; S. 57).

Die Qualitätssicherung beim Betonieren erforderte: Kontrolle der Betoneigenschaften (Konsistenz, Zusammensetzung), Kontrolle der Eintauchtiefe des Schüttrohres sowie Kontrolle seiner Ziehgeschwindigkeit. Es sollte jede Unterbrechung des Betonierens verhindert werden, da dies zu nachteiligen Einwirkungen führen konnte.

Gleichzeitig mit dem Betonieren erfolgte in Sofia das abschnittsweise Wiederziehen des Bohrrohres, was eine bestimmte Hin- und Herbewegung des Rohres erforderte. In der Regel sollten diese Bewegungen beim Ziehen möglichst klein gehalten werden, damit die Sollage des Bewehrungskorbes unverändert bleibt.

Grundsätzlich ist der Bohrpfahl, nach dem Ende des Betonierens, im oberen Bereich meist verunreinigt, was zu einer Verminderung der Qualität führt. In der Regel muss der Pfahl nach dem Erhärten bis auf Höhe des qualitativen Betons abgeschrämmt werden. Aus diesem Grund sollte jeder Pfahl mind. 20 bis 40 cm über die planmäßige Pfahlkopfoberkante hinaus betoniert werden. Generell ermöglicht dies eine um dieses Maß höher liegende Herstellungsebene.

Nach Fertigstellung des ersten Bohrpfahles konnte die Herstellung des zweiten beginnen. Die einzelnen Bohrpfähle wurden nicht unmittelbar völlig hintereinander hergestellt, um eine Störung der Betonabbildung zu vermeiden. Die obengenannten Teilprozesse wurden solange wiederholt bis die geplante Bohrpfahlwand fertiggestellt war.

Nach Fertigstellung einer Bohrpfahlwand folgten: Güteüberwachung und Ultraschallprüfung der hergestellten Bohrpfähle, Kontrolle ihrer Oberfläche, Kontrolle der Wasserdichtigkeit der tangierenden Bohrpfahlwand, Festigkeitsprüfung des Betons (mit Hilfe von Kernbohrungen), Setzungsmessungen der Nachbarbebauung (Gebäude, Verkehrswege usw.) und Messung der Rissbreiten.

Nach der planmäßigen Fertigstellung der umschließenden tangierenden Bohrpfahlwand konnte der Aushub zwischen den Wänden und später die tatsächliche Herstellung der Sohlplatte beginnen.

### 3.4.3 Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte

Der schrittweise Aushub für das unterirdische Bauwerk konnte in Sofia beginnen. Um eventuelle Verschiebungen gering zu halten, wurden die gegenüberliegenden Bohrpfahlwände durch Gurte und Steifen aus Stahl gegeneinander ausgesteift (siehe Abb. 35).

Die Bauphase 3 – die Herstellung der Sohlplatte eines U-Bahnbauwerks mit einer Bohrpfahlwand-Baugrubenumschließung erfolgte analog der Herstellung der Sohlplatte eines U-Bahnbauwerks mit einer Trägerbohlwand- oder Schlitzwand-Baugrubenumschließung (siehe Kapitel 3.2.3; S. 46).



**Abb. 35: Abstützen gegenüberliegender tangierender Bohrpfahlwänden mit Gurte und Steifen aus Stahl, U-Bahn Sofia [2.4]**

### 3.4.4 Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung

Die Bauphase 4 wird im Kapitel 3.1.4 (S. 35) näher erläutert.

Anmerkung: Die Besonderheit lag im direkten Kontakt zwischen Baugrubenumschließungswand (tangierende Bohrpfahlwand) und Tunnelwand. Die Herstellung der Wandkonstruktion erfolgte mit Hilfe von einseitiger Großflächenschalung. Die Bohrpfahlwände dienten direkt als erste Wandschalung (1. Wandseite des U-Bahnbauwerks).

### 3.4.5 Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung

Die Bauphase 5 wird im Kapitel 3.1.5 (S.36) näher erläutert.

Nach Fertigstellung der endgültigen hohlraumsichernden U-Bahnkonstruktion (Boden, Wände und Deckel) konnte die letzte sechste Bauphase beginnen.

### 3.4.6 Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk

Die Bauphase 6 wird im Kapitel 3.1.6 (S. 36) näher erläutert.

Die hergestellten U-Bahnbauwerke der Ersten Durchquerung (bis Ende 2009) beweisen, dass die Herstellung von Tunnelbauwerken in Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung „Bohrpfahlwand“ am häufigsten als konstruktive Sicherungsmaßnahme zum Einsatz kam und seltener als Bestandteil des Bauwerks herangezogen wurde. Wegen den wesentlichen Vorteilen, die langjährige Erfahrung der Fachleute ist die Bohrpfahlwandherstellung heute aktuell.

### **3.4.7 Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse**

#### **Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

- geotechnische Untersuchungen und Beurteilung der anstehenden Böden (z.B. mittels Probebohrungen und Proberammungen)
- Erkundung des Grundwasserspiegels und evtl. seine Absenkung
- gute Vorerkundung und genaue Kenntnis der Lage der:
  - o existierenden Leitungen, Kanäle und ihre Umleitung
  - o existierenden Fundamentreste oder tiefliegenden Hindernisse und ihre Zertrümmerung
- Verlegung von Leitungen und Kabel im Baufeld vor Baubeginn
- Verkehrsumleitung und Verkehrssicherung
- Einmessen und Abstecken der Bohrpfahlwände im Gelände

#### **Bauphase 2: Bohrpfahlwandherstellung**

- Herstellung einer Bohrschablone
- Eindrehen der Bohrröhre (erster Pfahl)
- Ausbohren der Bohrröhre
- Positionieren und Einbau der Bewehrung
- Betonieren und abschnittsweises Herausziehen der Bohrröhre
- Eindrehen der Bohrröhre (zweiter Pfahl)
- Ausbohren der Bohrröhre
- Positionieren und Einbau der Bewehrung
- Betonieren und abschnittsweises Herausziehen der Bohrröhre usw.

Anmerkung: Die obengenannten Teilprozesse werden solange wiederholt bis die geplante Bohrpfahlwand fertiggestellt ist.

#### **Bauphase 3: Herstellung der Sohlplatte**

- Verdichtung einer Schotterschicht
- Planieren und Betonieren der Unterbetonschicht
- Verlegen der Abdichtung
- Herstellung von bewehrter Schutzbetonschicht
- Bewehren und Betonieren der Sohlplatte

#### **Bauphase 4: Herstellung der Wandkonstruktion mittels Großflächenschalung**

- Abdichtung der Bohrpfahlwand und Anwendung als erste Wandschalung (1. Wandseite)
- Aufstellen erforderlicher Einbauten (Aussparungen, Fugenbänder)
- Verlegen der Bewehrung
- Stellen der zweite Wandschalung (2. Wandseite)
- Einbau des Betons
- Ausschalen

- Reinigung und Umsetzung der Schalung

**Bauphase 5: Herstellung der Dachkonstruktion mittels Großflächenschalung**

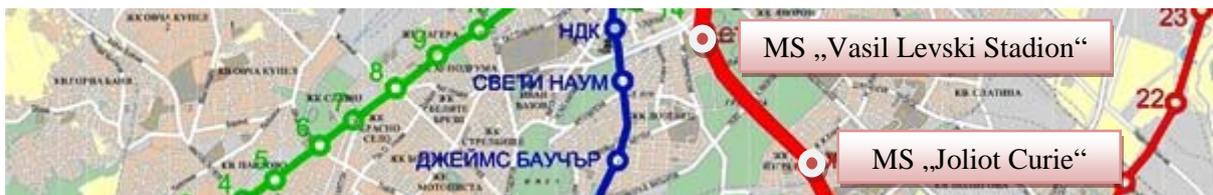
- Stellen der Deckenschalung
- Verlegen der Bewehrung
- Einbau des Betons
- Ausschalen
- Reinigung und Umsetzung der Schalung

**Bauphase 6: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk**

- schrittweise Verdichtung der geschütteten Bodenmassen in Schichten

## 4 U-Bahnbau in halboffener Bauweise

In den Jahren wurde die offene Bauweise bei der Herstellung oberflächennahen U-Bahnanlagen Sofia erfolgreich angewendet. Die halboffene Bauweise, meist als Deckelbauweise oder Mailänder Bauweise bezeichnet, hatte sich relativ spät beim innerstädtischen U-Bahnbau in Sofia durchgesetzt. Durch ihren Einsatz wurde gezielt, die zeitliche Inanspruchnahme von Oberflächen und mögliche Beeinträchtigungen von Anwohnern deutlich reduziert. Die Metrostationen der Ersten Durchquerung MS „Vasil Levski Stadion“, MS „Joliot Curie“ und teilweise MS „G. M. Dimitrov“ wurden mittels dieser Bauweise hergestellt (siehe Abb. 36).



**Abb. 36: Die ersten zwei hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in halboffener Bauweise, I Durchquerung [2.2]**

Im Allgemeinen spricht man von einer halboffenen Bauweise, wenn die Decke des unterirdischen Bauwerks direkt unter Geländeoberkante liegt und die Bauausführung von oben nach unten erfolgt.

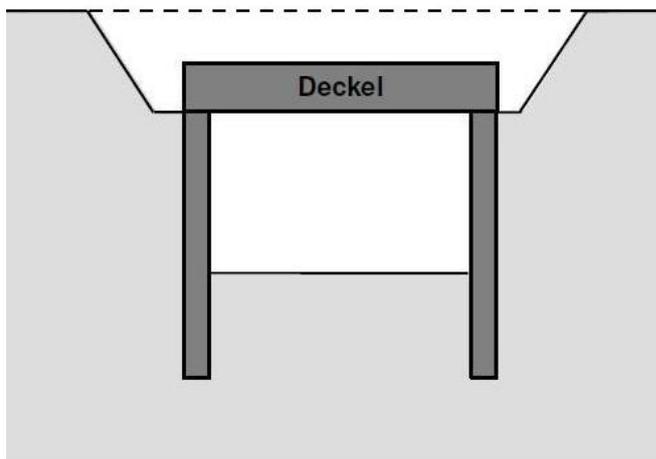
Grundsätzlich wird heutzutage die halboffene Bauweise als wirtschaftliche und zweckmäßige Lösung beim innerstädtischen U-Bahnbau angewendet. Zeitlich parallel mit der anschließenden Herstellung des Bauwerks unter der Decke kann bereits wieder die Oberfläche für den endgültigen Zustand gestaltet und genutzt werden (z.B. Verkehrsführung). Die Bauweise weist Einsatzmöglichkeit in nahezu allen Bodenarten auf (hinsichtlich der Methoden der Wandherstellung und der Aushubarbeiten). Felsige und harte Bodenschichten, sowie Findlinge und andere Hindernisse können leicht durchgefahen werden. Bei sorgfältiger und qualitativer Herstellung der Seitenwände, vor allem Schlitz- und Bohrpfahlwände, können als Teil der endgültigen Tunnelauskleidung betrachtet werden. Die seitlichen Wände und die Decke ergeben eine gute Aussteifung der Baugrube. Der Aushub wird durch Abstütungen nicht behindert. Der Wegfall der Behinderungen wirkt sich positiv auf die weitere Bauausführung aus. Die Bauweise kann in unmittelbarer Nähe zur Nachbarbebauung zum Einsatz kommen, da keine merklichen seitlichen Setzungen und Deformationen entstehen. Sie charakterisiert sich als umweltverträglich (lärmmarm und erschütterungsfrei) mit einem relativ geringerem Platzverbrauch. Die halboffene Bauweise kann über als auch unter dem Grundwasserniveau angewendet werden. Im Grundwasserbereich aber müssen die Seitenwände (Baugruben- und Tunnelwände) auf den vollen Wasserdruck bemessen werden. Generell ist das Verlegen von Rohrleitungen und der Einbau von Unterstützungen für Behelfsfahrbahnen eine aufwendige Aufgabe. Die hergestellte Decke kann die Aushubarbeiten aufgrund der geringen Höhe teilweise behindern und erschweren. Ab einer gewissen Tiefe ist die halboffene Bauweise unwirtschaftlich.

Die Methode der Herstellung eines U-Bahnbauwerks (Tunnel- oder Bahnhofkonstruktion) in halboffener Bauweise ist grundsätzlich mit folgenden Vor- und Nachteilen verbunden (siehe Tab. 15):

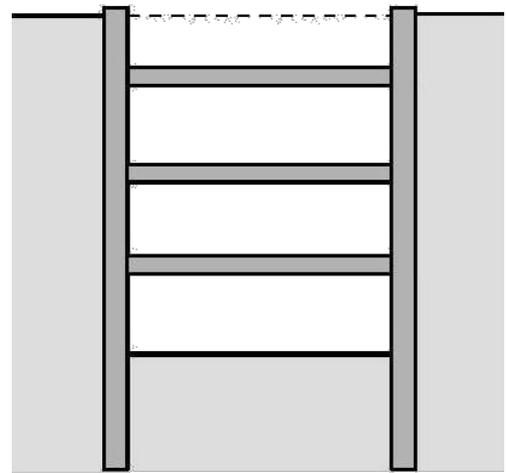
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in allen Böden herstellbar</li> <li>• zeitlich optimierte Bauweise</li> <li>• verformungsarme Bauweise</li> <li>• geringerer Platzverbrauch</li> <li>• Verkehrsführung nach Deckelherstellung möglich</li> <li>• 50 % bis 70 % der Gesamtbauarbeiten werden bei wiederhergestellter Straßenoberfläche ausgeführt</li> <li>• die Baugrube ist frei von Einbauten</li> <li>• wasserdichte Konstruktion des U-Bahnbauwerks</li> <li>• steifere Konstruktion und geringere Deformationen und Setzungen der Nachbarbebauung</li> <li>• in urbanen Gebieten ausführbar (unmittelbar vor einer Wohnbebauung)</li> <li>• wirtschaftliche tragende Konstruktion des U-Bahnbauwerks</li> <li>• Umweltverträglichkeit: lärmarm, erschütterungsfrei</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eventuelle Behinderung des Bauablaufes, mühsame Aushubarbeiten unter der hergestellten Deckenplatte</li> </ul>

**Tab. 15: Vor- und Nachteile der halboffenen Bauweise**

Die Herstellung eines U-Bahnbauwerks in halboffener Bauweise erfordert eine Reihe verfahrensspezifischer Bauphasen. Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Herstellungsarten, die zur Anwendung kommen können. Halboffene Bauweise und einfache Aussteifung der Seitenwände durch die Decke (siehe Abb. 38), und halboffene Bauweise und mehrfache Aussteifungen durch Zwischendecken mit laufendem Baufortschritt (siehe Abb. 37).



**Abb. 38: Halboffene Bauweise I Art: einfache Aussteifung der Seitenwände durch die Decke**



**Abb. 37: Halboffene Bauweise II Art: mehrfache Aussteifungen durch Zwischendecken mit laufendem Baufortschritt**

Der Unterschied besteht darin, dass im ersten Fall nach Fertigstellung der Seitenwände und des Deckels, die Baugrube mit Boden verfüllt und die Straßenoberfläche wiederhergestellt wird. Der weitere Bauablauf bis zur Herstellung des fertigen U-Bahnbauwerks erfolgt unter dem Deckel.

Bei dem zweiten Fall erfolgt der Aushub bis zur ersten Decke des Bauwerks, dann wird die Decke eingebaut und danach beginnt der Aushub unterhalb der ersten Decke. Dieser Teilprozess wiederholt sich bis zur Unterkante Tunnelsohle. Die Straßenoberfläche kann nicht sofort nach dem Einbau der ersten Decke wiederhergestellt werden. Die Herstellungsart eignet sich für Tunnelbauwerke, die eine mehr-Niveau-Konstruktion haben.

In Sofia wurden beide Herstellungsarten angewendet. Die MS „Joliot Curie“ und MS „G. M. Dimitrov“ wurden in halboffener Bauweise erster Art hergestellt und die MS „Vasil Levski Stadion“ wurde in halboffener Bauweise zweiter Art hergestellt.

#### 4.1 Tunnelherstellung in halboffener Bauweise

Im Folgenden werden die wesentlichsten Bauphasen bei der Herstellung eines U-Bahnbauwerks in halboffener Bauweise (II Art) am Beispiel der Metrostation „Vasil Levski Stadion“ (MS №9, I. Durchquerung) analysiert.

##### 4.1.1 Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten

Die Herstellung eines U-Bahnbauwerks in halboffener Bauweise erforderte in Sofia Maßnahmen zur Vorbereitung und Anfang des Baubeginns. Sie waren im wesentlichen von der Baugrubenumschließungsart abhängig. In Sofia wurden die U-Bahnbauwerke in halboffener Bauweise nur mit Schlitzwänden hergestellt. Eine halboffene Bauweise mit Bohrpfahlwänden wurde bis heute in Sofia nicht angewendet.

Die wichtigsten Vorbereitungsmaßnahmen sind im Kapitel 3.3.1 (S. 51 ff.) näher erläutert.

##### 4.1.2 Bauphase 2: Voraushub und Schlitzwandherstellung

Die eigentliche Herstellung des U-Bahnbauwerks begann in Sofia mit den Voraushubarbeiten. Die oberflächenliegenden Bodenschichten wurden bis 5,0 m bis 6,0 m unter Geländeoberkante (d.h. bis zur geplanten Tiefe der Leitwandoberkanten) ausgehoben. Mit den Aushubarbeiten wurden gleichzeitig die Böschungsflächen hergestellt. Die freien Böschungen wurden angeordnet, damit keine Erdmassen herabfallen können. Sie wurden mit

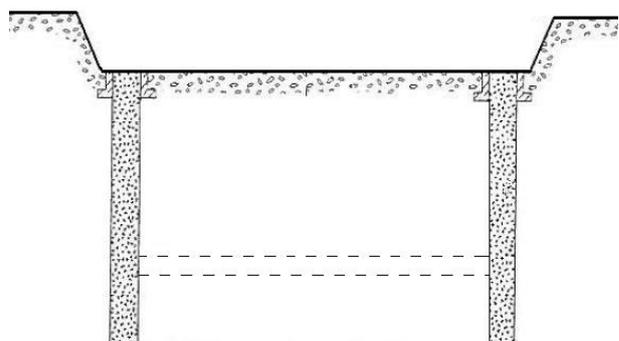


Abb. 39: Voraushub und Schlitzwandherstellung

einer Neigung 1:3 ausgeführt. Die Wahl richtete sich nach der Art des Bodens. Nach der Herstellung der Böschungen wurden Maßnahmen zu ihrer Sicherung gegen Oberflächenabtrag getroffen. Die Böschungswände wurden mit Kunststofffolien abgedeckt.

Nun konnte der Aushub mit einer Breite von 2,0 m für die Errichtung der Schlitzwand-Leitwände beginnen. Die Schlitzwandherstellung ist im Kapitel 3.3.2 (S. 51 ff.) näher erläutert. Keine zusätzlichen und verfahrensspezifischen Teilvorgänge sind zu erwähnen.

Die Schlitzwände als Wandkonstruktion waren besonders geeignet, denn sie konnten in das Tunnelbauwerk miteingebunden werden. Dadurch wurde die Belastung teilweise in die Schlitzwand (sg. Außenschale) übertragen und die Tunnelwand (sg. Innenschale) konnte schwächer bemessen werden.

#### 4.1.3 Bauphase 3: Aushub bis zur ersten Decke

Im Allgemeinen beginnt nach Fertigstellung der Seitenwände, der Aushub bis zur ersten Decke. Die Metrostation „Vasil Levski Stadion“ wurde mit einer fünf-Niveau-Konstruktion (Tiefenlage 22 m unter GOK) geplant. In diesem Fall wurde der schrittweise Aushub nicht bis zur ersten Decke, sondern bis zur vierten Decke ausgeführt. In Sofia kamen beim Aushub Hydraulikbagger mit Tieflöffelausrüstung zum Einsatz (siehe Abb. 40).

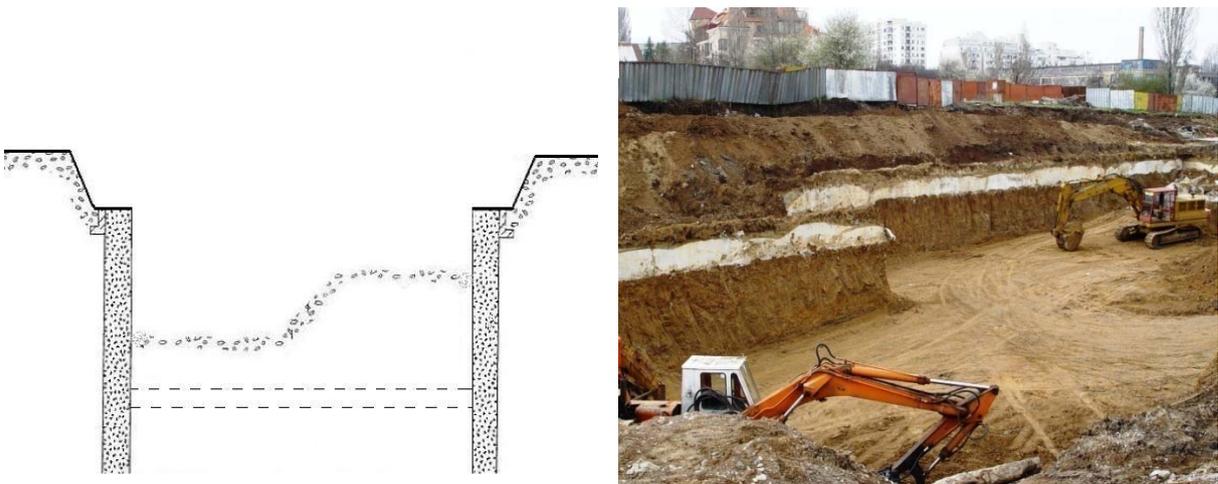


Abb. 40: Aushub bis unter erste Decke, MS „Vasil Levski Stadion“ [1.38]

Eine rationelle Gestaltung der einzelnen Bauvorgänge, eine Bauzeitverkürzung und eine Minimierung des Risikos für benachbarte Bauten können mittels Rückankerung der Baugrubenumschließungswände erreicht werden. Grundsätzlich werden die Schlitzwände (wie Spund- und Bohrpfahlwände) bei großer freier Höhe verankert.

Gleichzeitig mit der Baugrubenaushub wurden daher in Sofia die Baugrubenwände verankert. Die Art der Anker, ihre jeweilige Ankerlast sowie ihre Länge wurden für das betreffende Bauteil in Abhängigkeit von den Baugrundverhältnissen gewählt und mit erdstatischen Berechnungen nachgewiesen. Die Schlitzwände der Metrostation „Vasil Levski Stadion“ wurden mit IBO - Ankern verankert (siehe Abb. 41). Generell werden die IBO – Injektionsbohranker (sg. Selbstbohranker) für Sicherungsarbeiten in bindigen und nichtbindigen Lockerböden und im Fall nicht standfester

Bohrlöcher erfolgreich eingesetzt. Sie sind Stahlrohre aus Feinkornbaustahl mit durchgehend kalt aufgerolltem Außengewinde. Diese hohlen Gewinderohre können zusätzlich noch verzinkt sein, um sie vor Korrosion besser zu schützen. Jedes Gewinderohr ist gleichermaßen ein verlorenes Bohrgestänge, Bewehrungsstab und Injektionsrohr. Das Außengewinde und die



Abb. 41: IBO – Injektionsbohranker [2.9]

Schraubbarkeit des IBO - Ankers ermöglichen das Verlängern mittels Kupplungsmuffen. Der Stirnteil der Ankerstange ist mit einer Bohrkronen- oder Bohrspitze versehen, die abhängig von den jeweils angetroffenen geologischen Gegebenheiten ist. Der IBO-Anker wird in einem Arbeitsgang eingebohrt, versetzt und nachfolgend injiziert. Die Injektionsarbeiten an den Injektionsbohrankern werden mittels Polyurethangemische oder Zementstoffe durchgeführt. Weiters folgt die Endfixierung der Anker mit IBO - Muttern und IBO - Ankerplatten.

Die IBO - Ankerreihen wurden in Sofia, in Etappen eingebaut. Es wiederholten sich die Aushubetappe bis etwa  $0,5 \div 1,0$  m unter die Ankerlage und danach wurde eine neue Ankerlage eingebaut.

Zusätzlich wurde eine Spritzbetonschale aufgetragen, die als Grundlage zur späteren Auftragung der Abdichtung zwischen den beiden Konstruktionsteilen (Außenschale und Innenschale) vorbereitet wurde.

#### 4.1.4 Bauphase 4: Einbau der ersten Decke

Nach dem Aushub der Baugrube bis zur vierten Tunneldecke konnte der Einbau der ersten Decke beginnen. Die Sohle musste zuerst präzise hergestellt werden. Sie wurde geebnet, verdichtet und diente weiters als untere Schalung für die Herstellung der Decke. Danach wurde eine Sauberkeitsschicht planiert und betoniert. Weiters konnten die nächsten Teilvorgänge, Bewehren und Betonieren der Tunneldecke, durchgeführt werden (siehe Abb. 42). Die Decke wurde als Stahlbetonkonstruktion ausgebildet.

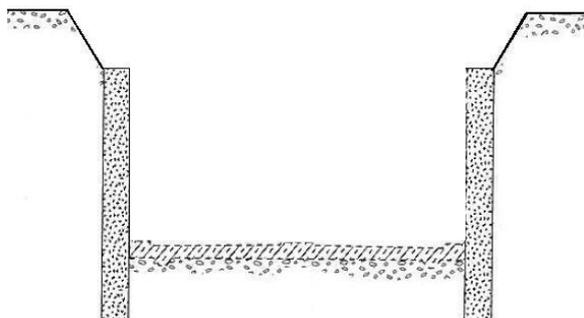


Abb. 42: Einbau der ersten Decke, MS "Vasil Levski Stadion" [1.38]

#### 4.1.5 Bauphase 5: Aushub bis zur Tunnelsohle

Nach der Herstellung der Tunneldecke erfolgte der weitere Bauablauf bis zur Herstellung des fertigen Tunnelbauwerks unterirdisch. Die Erdmassen wurden im Schutze der Decke ausgehoben. Der Aushub erfolgte schrittweise bis zur Unterkante der Tunnelsohle.

#### 4.1.6 Bauphase 6: Herstellung der Sohlplatte

Nach der vollständigen Herstellung des Aushubs bis zur geplanten Sohltiefe, begann die Herstellung der Sohlplatte. Diese Herstellung ähnelte der Herstellung der Sohlplatte wie beim Schlitzwandbauverfahren (siehe Kapitel 3.3.3; S. 60). Als Abdichtung wurde „Preprufe 300 R“ angewendet (siehe Kapitel 6.4, S. 121).

Die Herstellung der Sohlplatte beendete in Sofia die Bauausführung des sg. Rohbauplanums.

#### 4.1.7 Bauphase 7: Herstellung der Deckenplatte

Nach der Herstellung der Sohlplatte begann die Bauausführung der ersten drei Deckenplatten des U-Bahnbauwerks (siehe Abb. 43). Bei der Herstellung der Decken kamen Deckenschalungen zum Einsatz (siehe Kapitel 3.1.5; S. 36).



**Abb. 43: Einbau der Zwischendecke mittels Deckenschalung, MS „Vasil Levski Stadion“ [1.38]**

Die nachträglich hergestellten Innenwände wurden als monolithischer Konstruktionsteil mit Hilfe von einseitigen Wandschalungen hergestellt. Sie hatten eine Dicke von ca. 40 cm und die Funktion den hydrostatischen Druck aufzunehmen. Die Innenwände wurden mit den Umschließungswänden (Schlitzwänden) in eine tragende Konstruktion verbunden. Im Bereich der entstandenen Arbeitsfuge zwischen den beiden Wänden wurde eine Schicht Abdichtung verlegt. Im U-Bahnbau Sofia kamen als Abdichtungsarten für vertikale Konstruktionsteile „Dual seal“ und „Bituthene“ zur Anwendung (siehe Kapitel 6.4, S. 121).

Nach Fertigstellung der endgültigen hohlraumsichernden U-Bahnkonstruktion (Boden, Wände und Decke) konnte die letzte Bauphase beginnen.

#### 4.1.8 Bauphase 8: Verfüllung des Voraushubs und Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberfläche über das U-Bahnbauwerk

Die Bauphase 8 wird im Kapitel 3.1.6 (S. 36) näher erläutert.

#### 4.2 Tunnelherstellung in halboffener Bauweise - Sonderfall

Alternativ der obengenannten Arten (I Art und II Art) der Tunnelherstellung in halboffener Bauweise ist noch ein Herstellungsprinzip möglich. Im Jahr 2009 wurde zum ersten Mal das Verfahren bei dem Bau der Zweiten Durchquerung in Sofia, Tunnelstrecke zwischen MS „№10“ und MS „№11“, angewendet. Die Herstellung dieser Tunnelstrecke (siehe Abb. 44) ist noch im Gang.

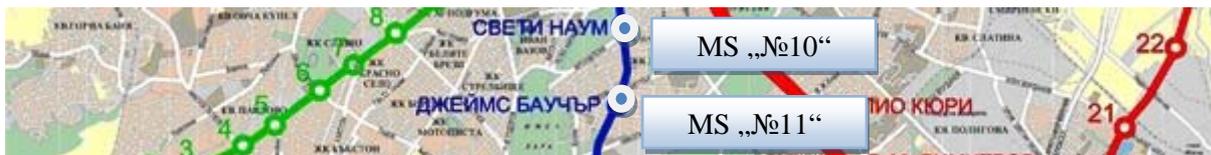


Abb. 44: Tunnelstrecke zwischen MS „№10“ und MS „№11“, II Durchquerung [2.2]

Generell wird die Konstruktion des Tunnelbauwerks in zwei Teile geteilt (siehe Abb. 45):

- erster Konstruktionsteil, d.h. erster Bauabschnitt
- zweiter Konstruktionsteil, d.h. zweiter Bauabschnitt

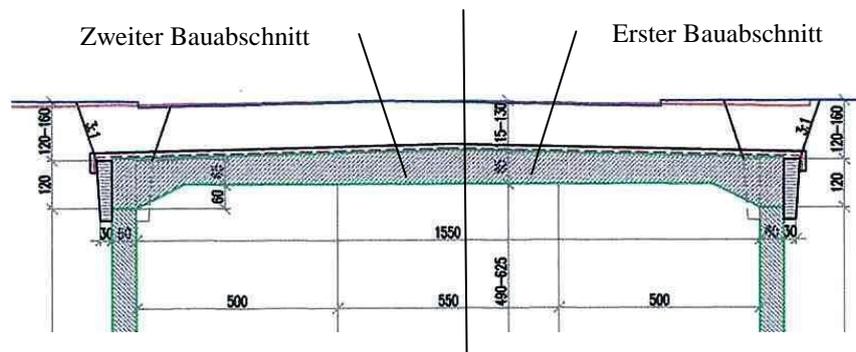


Abb. 45: Erster und zweiter Konstruktionsteil des Tunnelbauwerks [1.38]

Die Bauausführung beginnt mit der Herstellung von den seitlichen Baugrubenwänden und der Deckenplatte des ersten Konstruktionsteils. Der Straßenverkehr wird nur im Bereich dieses Bauabschnittes gestört. Es ist keine völlige Sperrung des Straßenverkehrs erforderlich. Grundsätzlich wird die Straßenoberfläche nach Fertigstellung des ersten Konstruktionsteils wiederhergestellt. Danach kann die Herstellung von den seitlichen Baugrubenwänden und der Deckenplatte des zweiten Konstruktionsteils beginnen.

Im Folgenden werden die wesentlichsten Bauphasen bei der Herstellung des Tunnelbauwerks in halboffener Bauweise (Sonderfall) am Beispiel der Tunnelstrecke der II. Durchquerung dargestellt.

#### 4.2.1 Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten

Die wichtigsten Vorbereitungsmaßnahmen sind im Kapitel 3.3.1 (S. 51 ff.) näher erläutert.

Verfahrensspezifischer Teilvorgang in Sofia war die teilweise Sperrung des Straßenverkehrs nur im Bereich des entsprechenden ersten oder zweiten Bauabschnittes.

#### 4.2.2 Bauphase 2: Voraushub und Schlitzwandherstellung im ersten Bauabschnitt

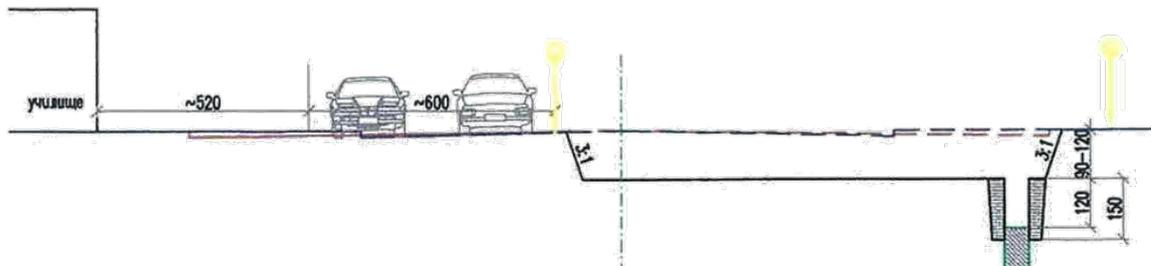


Abb. 46: Teilweise Sperrung des Straßenverkehrs und Voraushub im ersten Bauabschnitt [1.38]

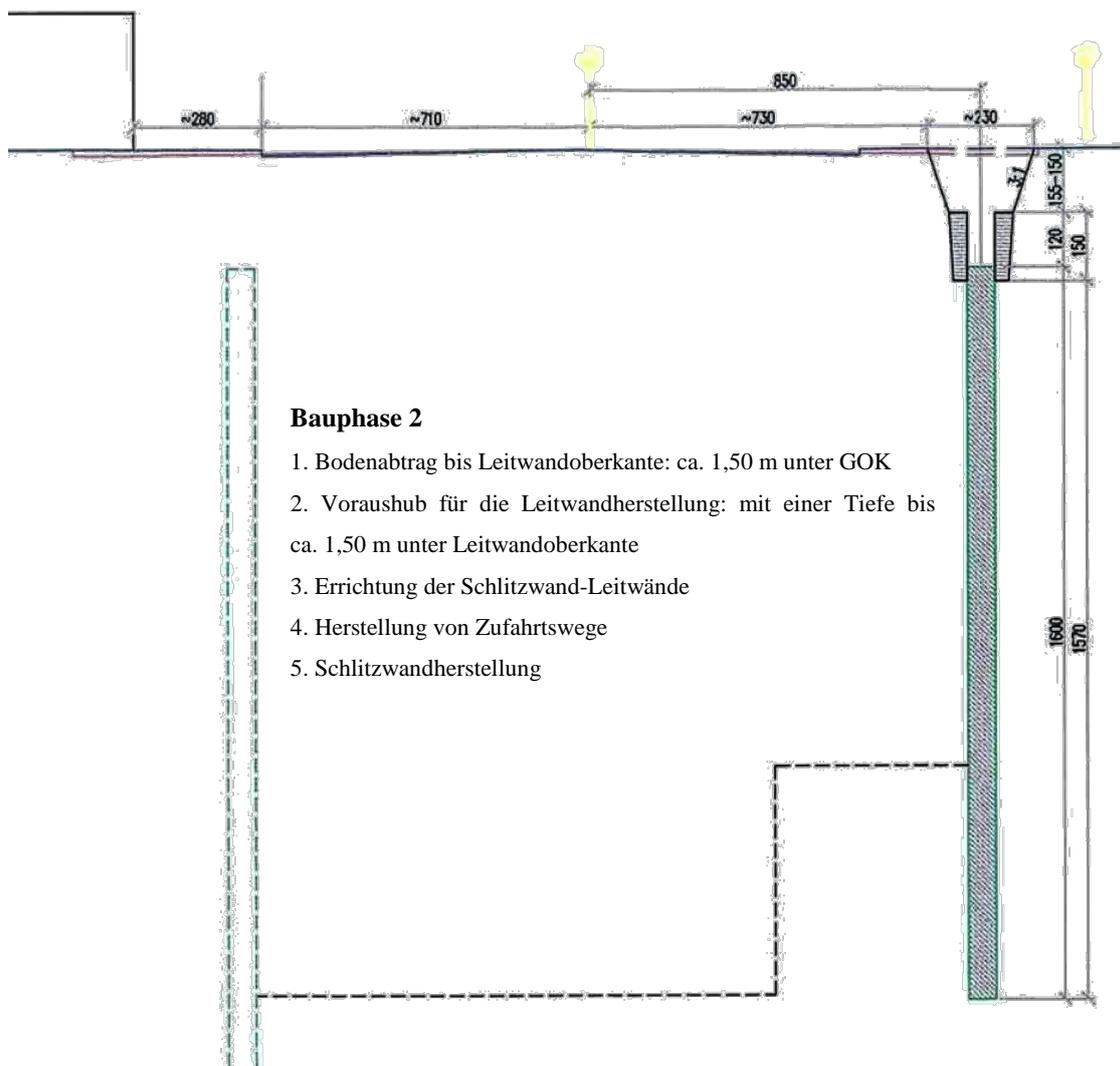


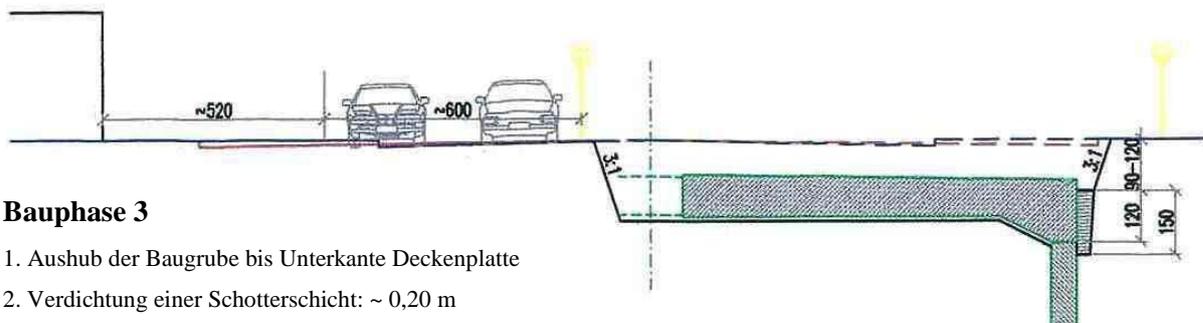
Abb. 47: Schlitzwandherstellung im ersten Bauabschnitt [1.38]

Nach Fertigstellung der Vorbereitungsmaßnahmen begann in Sofia der Voraushub (in einer Tiefe von 0,90 bis 1,50 m) und danach die eigentliche Schlitzwandherstellung im ersten Bauabschnitt. Die Schlitzwandherstellung ist im Kapitel 3.3.2 (S. 51 ff.) näher erläutert. Keine zusätzlichen und verfahrensspezifischen Teilvorgänge sind hier zu erwähnen.

#### 4.2.3 Bauphase 3: Herstellung der Deckenplatte im ersten Bauabschnitt

Nach Fertigstellung der Schlitzwandkonstruktion wurde die Baugrube bis Unterkante Decke ausgehoben. Die inneren Leitwände wurden abgebrochen. In diesem Fall konnte die Abdichtung des Bauwerks qualitativ und präzise verlegt werden. Im oberen halben Meter der Schlitzwand konnte die entsprechende Qualität des Betons nicht gewährleistet werden, da der Beton mit Stützflüssigkeit und Aushubmaterial durchsetzt wurde. Nach Aushärtung des schlechten Betons wurden die oberen 0,30 bis 0,50 m des Betons entfernt.

Nun konnte die Herstellung der Deckenplatte im ersten Bauabschnitt beginnen (siehe Abb. 48).



#### Bauphase 3

1. Aushub der Baugrube bis Unterkante Deckenplatte
2. Verdichtung einer Schotterschicht: ~ 0,20 m
3. Planieren und Betonieren einer Unterbetonschicht: ~ 0,10 m
4. Bewehren und Betonieren der Deckenplatte
5. Herstellen einer Schicht Zementestrich: ~ 2 cm
6. Verlegen der Abdichtung „Bituthen 4000“
7. Verlegen einer Geotextilschicht und Kaschierung mit Polyethilen-Folie
8. Betonieren einer Schutzbetonschicht: ~ 0,10 m
9. Verfüllung des Voraushubs und Verdichtung der geschütteten Bodenmassen (Verdichtungsgrad  $k > 0,95$ )
10. Wiederherstellung der Fahrbahn

#### Abb. 48: Herstellung der Deckenplatte im ersten Bauabschnitt [1.38]

Eine Arbeitsfuge wurde in beiden Deckenteile (d.h. erster und zweiter Konstruktionsteil) der Deckenplatte vorgesehen, da der Arbeitsgang verfahrensspezifisch getrennt durchgeführt wurde. Die Arbeitsfuge stellte hinsichtlich der Dichtheit des Tunnelbauwerks eine Schwachstelle dar. Nach der Bauausführung musste die Wasserdichtigkeit gewährleistet sein.

Nach Fertigstellung der Deckenplatte wurde die ausgehobene Baugrube mit dem vorher ausgehobenen Bodenmaterial verfüllt. Die oberirdischen Flächen wurden bereits für den endgültigen Zustand gestaltet. Die letzten 30 cm der verfüllten Baugrube wurden für den Fahrbahnbelag vorgesehen.

Nun konnte der Straßenverkehr im Bereich des zweiten Bauabschnittes gesperrt werden. Danach wurden der Voraushub und die eigentliche Schlitzwandherstellung durchgeführt.

#### 4.2.4 Bauphase 4: Voraushub und Schlitzwandherstellung im zweiten Bauabschnitt

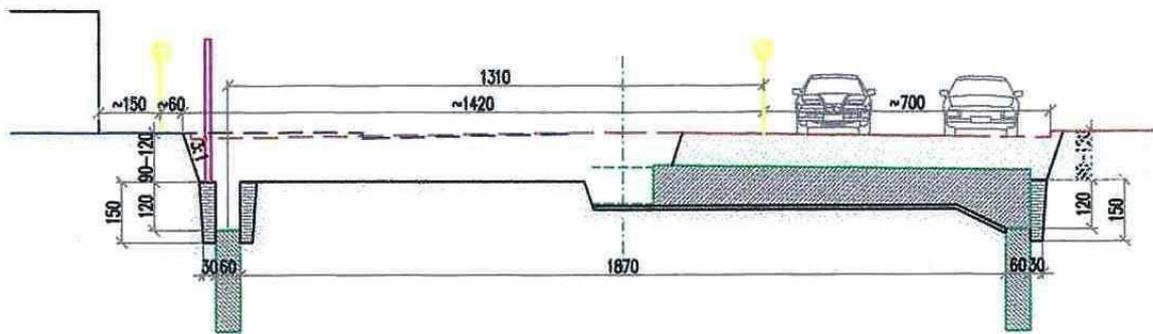


Abb. 49: Teilweise Sperrung des Straßenverkehrs und Voraushub im zweiten Bauabschnitt [1.38]

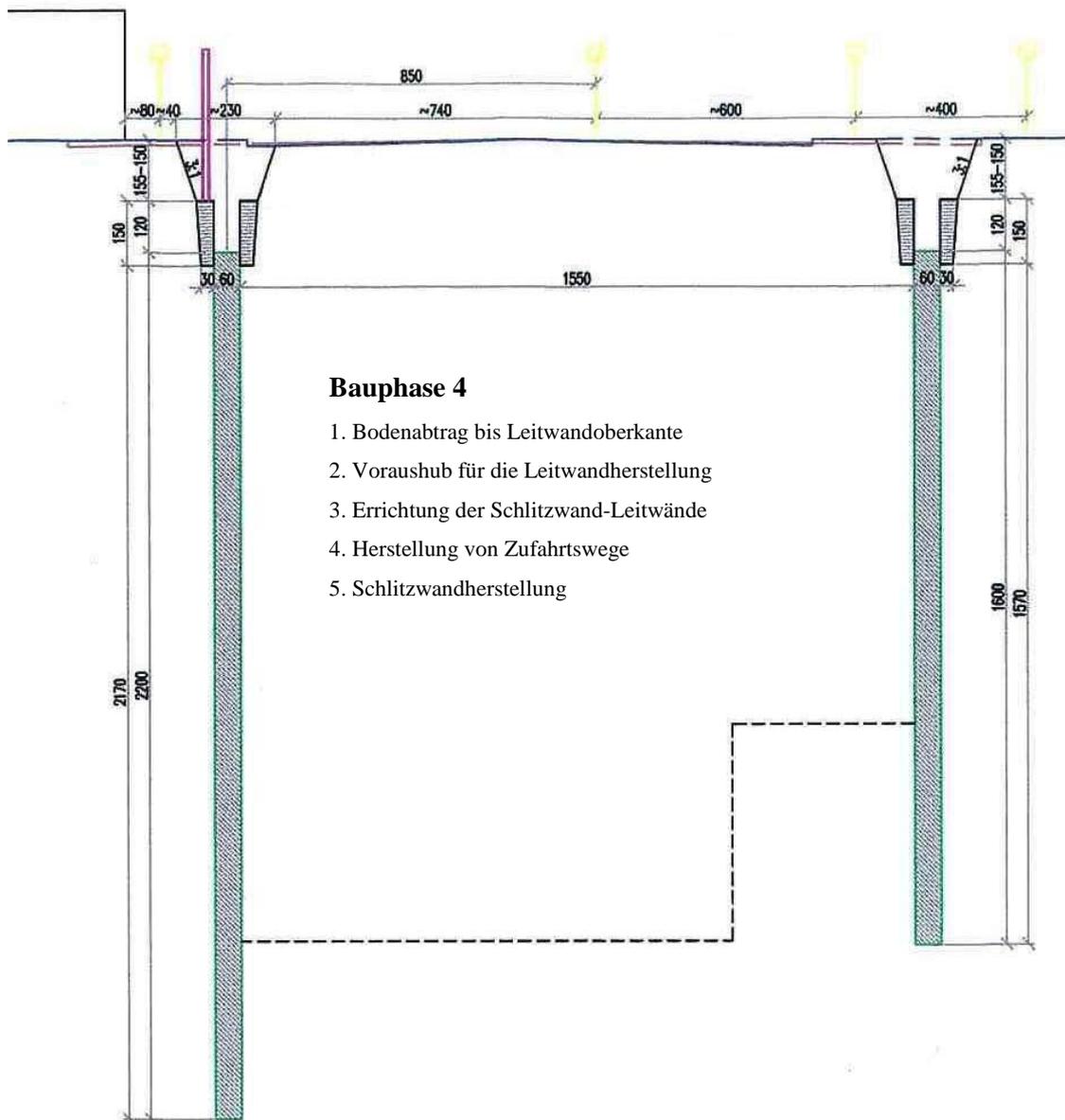


Abb. 50: Schlitzwandherstellung im zweiten Bauabschnitt [1.38]

#### 4.2.5 Bauphase 5: Herstellung der Deckenplatte im zweiten Bauabschnitt

Die Herstellung der Deckenplatte im zweiten Bauabschnitt erfolgte nach denselben Teilprozessen, die bei der Herstellung der Deckenplatte im ersten Bauabschnitt dargestellt wurden (siehe Bauphase 3; S. 84).

Generell erfüllte die zwischen den Schlitzwänden hergestellte Deckenplatte wichtige bauphysikalische Aufgaben des Brand-, Schall-, Wärme- und Feuchtigkeitsschutzes. Sie übernahm als tragendes Bauteil die Funktion der Aufnahme und Abtragung der vertikalen Lasten und horizontaler Kräfte zu den unteren Konstruktionselementen. Die obere Deckenplatte wirkte in Sofia als horizontale Aussteifung gegen den von den Umschließungswänden aufgenommenen Erddruck.

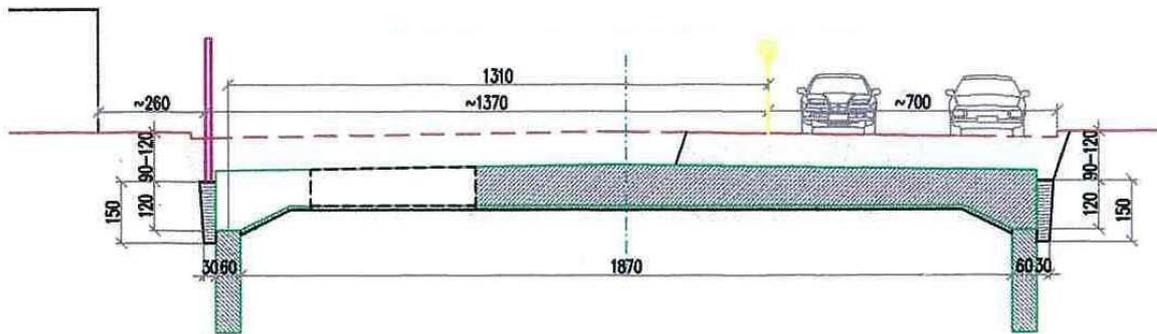


Abb. 51: Herstellung der Deckenplatte im zweiten Bauabschnitt [1.38]

Zeitlich parallel mit dem anschließenden Vortrieb unter der Decke kann oberhalb der Decke bereits wieder die Oberfläche genutzt werden. Der weitere Bauablauf bis zur Herstellung des fertigen Tunnelbauwerks erfolgte unterirdisch. Es war keine weitere Beeinträchtigung des Straßenverkehrs und der Anrainer vorhanden.

#### 4.2.6 Bauphase 6: Aushub bis unter Tunnelsohle

Die Bauphase 6 wird im Kapitel 4.1.5 (siehe S. 81) näher erläutert.

#### 4.2.7 Bauphase 7: Herstellung der Sohlplatte

Die Bauphase 7 wird im Kapitel 4.1.6 (siehe S. 81) näher erläutert.

Im U-Bahnbau in Sofia wurde die halboffene Bauweise im dichtbebauten innerstädtischen Bereich als geeignete, bautechnisch vorteilhafte Methode mit einer hohen Wirtschaftlichkeit eingesetzt. Die halboffene Bauweise wurde zweckmäßig genutzt, um den Straßenverkehr im Baustellenbereich nur teilweise zu stören und unter der Decke ungestört weiter arbeiten zu können.

## 4.2.8 Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse

### **Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

- geotechnische Untersuchungen und Beurteilung der anstehenden Böden (z.B. mittels Probebohrungen und Proberammungen)
- Erkundung des Grundwasserspiegels und evtl. seine Absenkung
- gute Vorerkundung und genaue Kenntnis der Lage der:
  - o existierenden Leitungen, Kanäle und ihre Umleitung
  - o existierenden Fundamentreste oder tiefliegenden Hindernisse und ihre Zertrümmerung
- Verlegung von Leitungen und Kabel im Baufeld vor Baubeginn
- Verkehrsumleitung und Verkehrssicherung
- Freimachen des Baufeldes (Rodungsarbeiten)
- Erstellen des Arbeitsplanums
- Erschließen des Baufeldes, d.h. Zufahrtswege, Wasser- sowie Stromanschlüsse

### **Bauphase 2: Voraushub und Schlitzwandherstellung**

- Bodenabtrag bis Leitwandoberkante
- Herstellung der Leitwände
  - o Voraushub
  - o Schalen, Bewehren und Betonieren der Leitwänden
  - o Einbau von Aussteifungen
  - o Bodenverfüllung und Bodenverdichtung hinter der hergestellten Leitwand
  - o Warten auf das Erreichen der Normfestigkeit der Leitwände in 28 Tagen
- Herstellung des flüssigkeitsgestützten Schlitzes
  - o Entfernung der Aussteifungen zwischen den beiden Leitwänden
  - o Aufbereiten und Transportieren der Stützflüssigkeit
  - o Aushub der Schlitzwandlamelle
  - o Beobachtung des Stützflüssigkeitsspiegels und kontinuierliche Überprüfung der Stützflüssigkeit
  - o Abtransport des ausgehobenen Bodens
  - o Separierung der Stützflüssigkeit, Abtransport und Deponierung
- Einbau der Fugen und Abschalkonstruktionen
- Positionieren und Einbau der Bewehrung
- Betonieren
- Ziehen der Abschalelemente

### **Bauphase 3: Herstellung der Deckenplatte**

- Bodenaushub bis Unterkante Deckenplatte
- Verdichtung der Schotterschicht
- Planieren und Betonieren der Unterbetonschicht

- Bewehren und Betonieren der Deckenplatte
- Herstellen einer Zementestrichschicht
- Verlegen der Abdichtung
- Verlegen einer Geotextilschicht und Kaschierung mit Polyethilen-Folie
- Herstellung einer Schutzbetonschicht
- Verfüllung des Voraushubs und Verdichtung der geschütteten Bodenmassen
- Wiederherstellung der Fahrbahn

**Bauphase 4: Aushub der Erdmassen unter der Deckenplatte**

- schrittweiser Aushub der Erdmassen unter der Tunneldecke

**Bauphase 5: Herstellung der Sohlplatte**

- Verdichtung der Schotterschicht
- Planieren und Betonieren der Unterbetonschicht
- Verlegen der Abdichtung
- Herstellung einer bewehrten Schutzbetonschicht
- Bewehren und Betonieren der Sohlplatte

## 5 U-Bahnbau in geschlossener Bauweise - Schildvortrieb

Unter der geschlossenen Bauweise wird im Vergleich zu der offenen und halboffenen Bauweise die von der Geländeoberfläche unabhängige Bauweise zur Auffahrung eines Hohlraumes verstanden. Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Vortriebsarten, die zur Anwendung kommen können (siehe Tab. 16) der universelle (Zyklischer/Konventioneller Vortrieb) und/oder der maschinelle Vortrieb (Kontinuierlicher Vortrieb). Der Unterschied zwischen den beiden Vortriebsarten liegt darin, dass bei dem universellen Vortrieb die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Schütterns und des Stützmitteleinbaues zeitlich nacheinander und mittels Einzelgeräten ausgeführt werden. Bei dem maschinellen Vortrieb erfolgen diese Arbeitsvorgänge gleichzeitig und innerhalb einer Tunnelvortriebsmaschine.

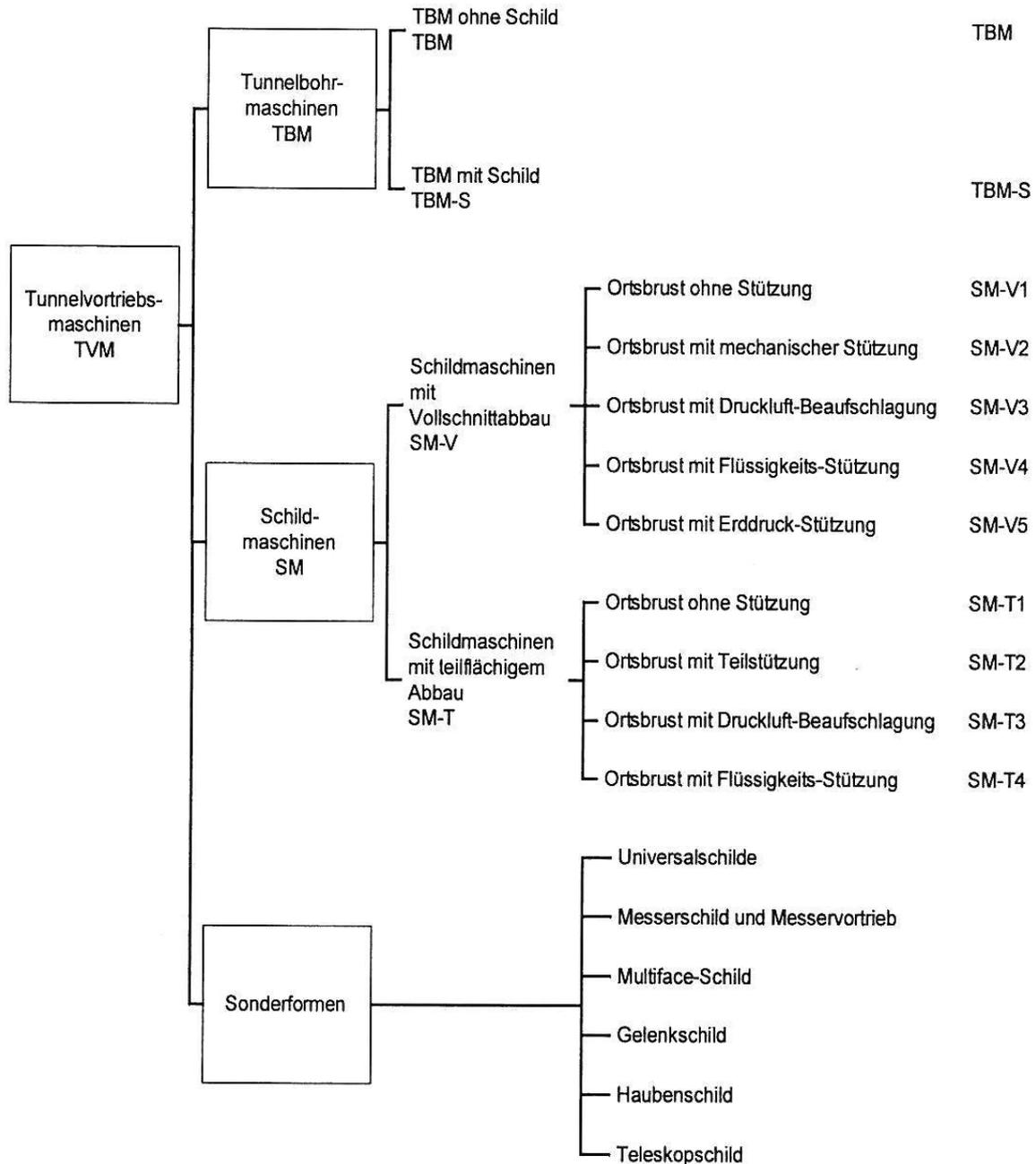
		<b>Tunnel-Bauverfahren in geschlossener Bauweise</b>	
		<b>Universeller Vortrieb</b>	<b>Maschineller Vortrieb</b>
<b>Vortriebsart</b>	• Sprengvortrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tunnelbohrmaschinen TBM</li> <li>• Schildmaschinen SM</li> <li>• Vorpressverfahren</li> </ul>	
	• Baggervortrieb		
• Mischvortrieb			
• TSM-Vortrieb			
• Messervortrieb			

**Tab. 16: Bauverfahren für Tunnel in geschlossener Bauweise**

Für die Herstellung eines Tunnels ist die zweckmäßige Auswahl der Vortriebsart mit der entsprechenden Vortriebsanordnung die wichtigste Voraussetzung für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg der Bauausführung.

Der maschinelle Vortrieb hat sich im Vergleich zum universellen Vortrieb als Vortrieb mit einer hohen Vortriebsgeschwindigkeit durch hochmechanisierte und automatisierte Bauverfahrenstechniken und geringer Beeinflussung der Nachbarbebauung durch Lärm, Erschütterungen, und Setzungen charakterisiert. Generell kommt er dort zum Einsatz, wo aus wirtschaftlichen, verkehrlichen und bautechnischen Gründen eine offene oder halboffene Tunnelbauweise unmöglich ist. Sein Einsatz ist zweckmäßig, wenn die Bauloslänge  $> 2000$  m ist und wenn ungünstige Boden- und Grundwasserverhältnisse vorhanden sind, die ein geschlossenes System erfordern. Der maschinelle Vortrieb in geschlossener Bauweise ist aber mit Schwierigkeiten und beachtlichem Risiko verbunden.

In dichtbesiedelten Städten ist eine verstärkte Tendenz zum Einsatz von Tunnelvortriebsmaschinen bei der Herstellung von unterirdischen Bauwerken zu erkennen. Die Tunnelvortriebsmaschinen werden in Tunnelbohrmaschinen (TBM) zum Abbau von Festgestein, Schildmaschinen (SM) zum Abbau von Lockergestein und Tunnelvortriebsmaschinen, die als Sonderformen der Verfahrenstechniken beider Systeme entwickelt und konzipiert sind, unterteilt (siehe Abb. 52).



**Abb. 52: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [1.11]**

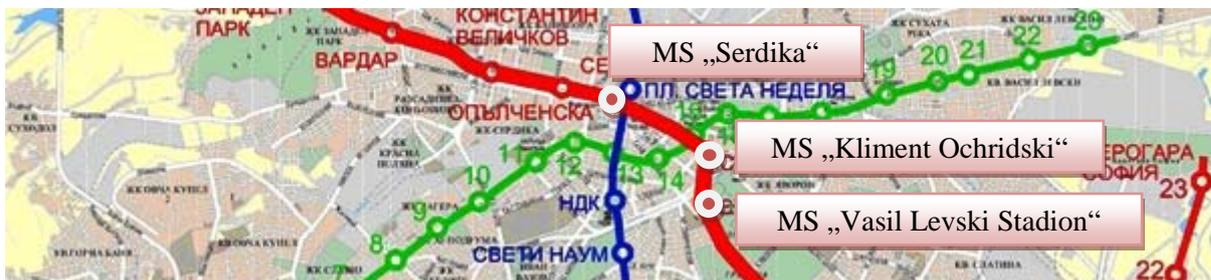
In Sofia erfolgte die Tunnelherstellung mittels einer Schildmaschine mit Erddruck-Stützung. Der maschinelle Vortrieb in geschlossener Bauweise wurde bei dem Bau der Ersten Durchquerung in Sofia erfolgreich angewendet. Die hergestellten U-Bahnstrecken sind im Kern der Hauptstadt anzutreffen. Der U-Bahntunnel (Länge: 2,40 km) zwischen dem „Sveta Nedelya“ Platz und dem „Dragan Tzankov“ Blvd. konnten nicht in der wirtschaftlich günstigeren offenen Bauweise errichtet werden, weil sich dort die Notwendigkeit ergab, Kunstbauten (Denkmale im historischen Zentrum der Stadt, Botschaften, Banken, Ministerien), sowie den Fluss „Perlovska“ zu unterfahren. Insbesondere wollte die Stadt Sofia den Straßenverkehr schonen und die im Boden verlegten Leitungen möglichst unangetastet lassen.

Die Hauptgemeinde Sofia hatte, mit einem speziellen Beschluss, die Errichtung der obengenannten zukünftigen Tunnelbauwerke in Schildvortrieb bewilligt. Für die Finanzierung des Projektes wurde eine Vereinbarung mit der japanischen Bank am 06.02.2002 abgeschlossen. Der Bau der Tunnelstrecken (siehe Abb. 53)

- MS „Vasil Levski Stadion“ – MS „Kliment Ochridski“ (MS №9 – MS №8)
- MS „Kliment Ochridski“ – MS „Serdika“ (MS №8 – MS №7)

wurde von der japanischen Baufirma „Taisei CO“ ausgeführt.

Der Ausbau wurde im Jahr 2004 begonnen. Beide Tunnelstrecken wurden am 07.09.2009 in Betrieb genommen. Ihre Eröffnung hat die Trasse der Ersten Durchquerung von MS „Obelya“ bis MS „Mladost 1“ in einer Länge von 18 km völlig durchfahrbar gemacht.



**Abb. 53: Die ersten zwei hergestellten Tunnelstrecken der sofiotischen U-Bahn in geschlossener Bauweise: Schildvortrieb [2.2]**

Das Grundprinzip des Schildvortriebs besteht darin, dass eine Schildmaschine (im Allgemeinen zylindrische Stahlkonstruktion) in der trassierten Tunnelachse mit Hilfe der Anwendung von hydraulischen Vortriebspresen vorgeschoben wird und gleichzeitig der Abbau vom anstehenden Lockergesteinsboden erfolgt. Die Schildmaschine stützt solange den Tunnelquerschnitt und die Ortsbrust (lotrecht zur Gradiente des Tunnels stehende Fläche) beim Vortrieb, bis an ihrem Ende (sg. Schildschwanz) der temporäre oder der permanente Ausbau eingebaut ist. Die Vortriebspresen wirken in Längsrichtung auf den bereits erstellten Ausbau.

Der Schildvortrieb wird vorwiegend für die Erstellung von unterirdischen langgestreckten Bauwerken (Verkehrstunnel oder U-Bahntunnel mit kreisförmigen Querschnitten) genutzt und beeinflusst die Verkehrsverhältnisse Obertage nicht. Der Vortrieb kann bei kleinen oder größeren Überdeckungshöhen, sowie bei geringer Stehzeit der Ortsbrust zum Einsatz kommen. Begleitmaßnahmen zur Setzungsreduktion oder zur Beherrschung des Grundwassers sind nicht notwendig. Mit Hilfe von Schildmaschinen kann eine grosse Profilgenauigkeit erreicht werden. Es sind nur wenige Baugruben erforderlich. Die Umweltbelästigungen durch Lärm und Schmutz fallen daher deutlich geringer aus. Der Schildvortrieb erfordert aber hohen Investitionsaufwand für die Baustelleneinrichtung, für die Tunnelvortriebsmaschine und für die Nachläufersystem. In offener Bauweise ist ein Start- und Zielschacht für die Schildmaschine herzustellen. Der Schildvortrieb ist aufgrund kurzer Tunnellänge nicht wirtschaftlich. Die Schildmaschinen sind an ihren Durchmesser gebunden, d.h. es ist keine Durchmesservariabilität vorhanden. Spätere Korrekturen sind mit

erheblichem Aufwand verbunden. Hohe Anforderungen werden an die technischen Fähigkeiten sowie praktisches Wissen des Personals gestellt.

Die Methode der Herstellung eines U-Bahntunnels in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb ist grundsätzlich mit folgenden Vor- und Nachteilen verbunden (siehe Tab. 17):

<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erst bei längeren Baulose &gt; 2000 m wirtschaftlich</li> <li>• im und ausserhalb des Grundwassers einsetzbar</li> <li>• hoher Mechanisierungsgrad des Vortriebs</li> <li>• hohe Vortriebsgeschwindigkeit und grosse Vortriebsleistungen möglich</li> <li>• zeitlich optimierte Bauweise</li> <li>• grosse Profilgenauigkeit des Tunnelquerschnitts erreichbar</li> <li>• kleinstmögliche Beeinflussung vorhandener Nachbarbebauung im dichtbebauten innerstädtischen Bereich</li> <li>• Umweltverträglichkeit: lärmarm, erschütterungsfrei</li> <li>• Möglichkeit von qualitativen wirtschaftlichen und hochwertigen inneren Ausbau und Gestaltung der Konstruktion</li> <li>• hoher Sicherheitsgrad für das Personal</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zum Abbau von Lockergesteinsböden</li> <li>• präzise Planung der Schildmaschine in bezug auf die Boden- und Grundwasserverhältnisse, Bodenüberdeckung und Auskleidung erforderlich</li> <li>• Leistungsrisiko bei heterogenen Bodenverhältnissen und unerwarteten Grundwasserverhältnissen</li> <li>• hoher Investitionsaufwand für die Schildmaschine und für das Nachläufersystem</li> <li>• aufwendige Baustelleneinrichtung (schwere Transport- und Hebezeuge)</li> <li>• keine Durchmesser variationsbreite der Schildmaschine</li> <li>• Übermessung der Tunnelauskleidung für die Vortriebskräfte der Vorfahrt der Schildmaschine</li> <li>• hohe Anforderungen an das technische und praktische Know-how des Personals</li> </ul>

**Tab. 17: Vor- und Nachteile des Schildvortriebs**

Der Einsatz des Schildvortriebs kann erfolgreich sein nur, wenn bei der Auswahl des Schildvortriebssystems die wichtigsten Auswahlkriterien in bezug auf die Maschinen- und Verfahrenstechnik betrachtet werden. Die optimalen Einsatzbedingungen und die Vor- und Nachteile des Vortriebs müssen präzise abgewogen werden.

Die Schildmaschine muss für eine Reihe von Anforderungen ausgelegt und optimiert werden. Das Maschinenkonzept, die Stützmethod der Ortsbrust, die Vortriebstechnik und das Logistiksystem

müssen miteinander optimal abgestimmt werden. In der Regel hängt die Wahl stark von den geotechnischen und hydrologischen Aspekten ab (siehe Abb. 54).

Geotechnische Kennwerte	Baugrund		FELS / FESTGESTEIN		BODEN / LOCKERGESTEIN			nicht bindig
	standfest bis nachbrüchig	nachbrüchig bis gebräuch	bindig standfest	bindig nicht standfest	Wechselagerung			
Gesteinsfestigkeit $\sigma_b$ [MN/m <sup>2</sup> ]	300 ± 50	50 ± 5	1,0	0,1				
Zugfestigkeit $\sigma_t$ [MN/m <sup>2</sup> ]	2,5 ± 5	5,0 ± 0,5						
ROD-Wert	100 ± 50	50 ± 10						
Kluftabstand [m]	> 2,0 ± 0,6	0,06						
Kohäsion $c_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]			≥ 30	25 - 30				
Kornverteilung < 0,02 [%]			30	30				
< 0,06 [%]			≥ 30	≥ 30			10	
TBM	o. W.							
m. W.								
TBM-S	o. W.							
mit Schild	m. W.							
SM-V1	o. W.							
ohne Stützung	m. W.							
SM-V2	o. W.							
mechanische Stützung	m. W.							
SM-V3	o. W.							
mit Druckluft	m. W.							
SM-V4	o. W.							
Flüssigkeitsstützung	m. W.							
SM-V5	o. W.							
Erdruckstützung	m. W.							
SM-T1	o. W.							
ohne Stützung	m. W.							
SM-T2	o. W.							
Teilstützung	m. W.							
SM-T3	o. W.							
mit Druckluft	m. W.							
SM-T4	o. W.							
Flüssigkeitsstützung	m. W.							
Abbauwerkzeuge	V							
	T							

o. W. = ohne Grund- bzw. Schichtwasser

m. W. = mit Grund- bzw. Schichtwasser

■ Hauptinsatzbereich

■ Einsatz möglich

■ gültig für Sofia

**Abb. 54: Einsatzbereiche von Tunnelvortriebsmaschinen nach geotechnischen und hydrologischen Aspekten [1.11]**

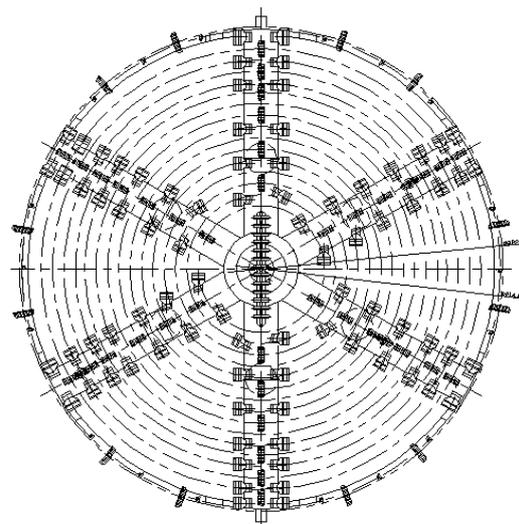
Die Auswahl der Schildmaschine in Sofia richtete sich nach dem Baugrund (Lockerboden mit einem hohen Ton- oder Schluffanteil) und seinen wichtigen geotechnischen Kennwerte (Gesteinsfestigkeit, Zugfestigkeit, Kluftabstand, Kohäsion, Kornverteilung), nach den Grundwasserverhältnissen (höheres GW-niveau und mögliche Grundwasserabsenkung), sowie nach den bauablaufbedingten und geometrischen Randbedingungen.

In Sofia entschied man sich daher für eine Schildmaschine mit Vollschnittabbau (Außendurchmesser:  $\varnothing$  5820 mm) mit einer Ortsbrust Stützung mit Erddruck (siehe Abb. 55).



**Abb. 55: Der Erddruckschild, U-Bahn Sofia, I Durchquerung [1.39]**

Generell können die Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau (SM-T) oder mit vollflächigem Abbau (SM-V) hergestellt werden. Bei SM-T erfolgt dabei der Abbau mittels Schräg- oder Baggerarm. In Sofia wurde eine Schildmaschine mit Vollschnittabbau eingesetzt. Sie besaß ein kreisförmiges Vollschnitt-Schneidrad an der Maschinenfront, das mit Abbaup Werkzeugen bestückt war. Die konstruktive Gestaltung des Schneidrades und sein Werkzeugbesatz wurde zu den erwartenden Bodenverhältnissen abgestimmt. Das Prinzip des Vollschnittabbaus bestand darin, dass das Schneidrad bei jeder Umdrehung des Bohrkopfes gegen die Ortsbrust gepresst wurde und die gesamte Ortsbrustfläche bestreichen und dabei den Boden abbauen konnte (siehe Abb. 56).



**Abb. 56: Konzentrische Laufbahnen von den Abbaup Werkzeugen der sofiotischen Schildmaschine mit Vollschnittabbau [1.39]**

Zur Stabilisierung der Ortsbrust können fünf unterschiedliche Methoden angewendet werden (siehe Abb. 57). Die Stützung der Ortsbrust bei der sofiotischen Schildmaschine mit Vollschnittabbau erfolgte durch die sg. Erddruck-Stützung.

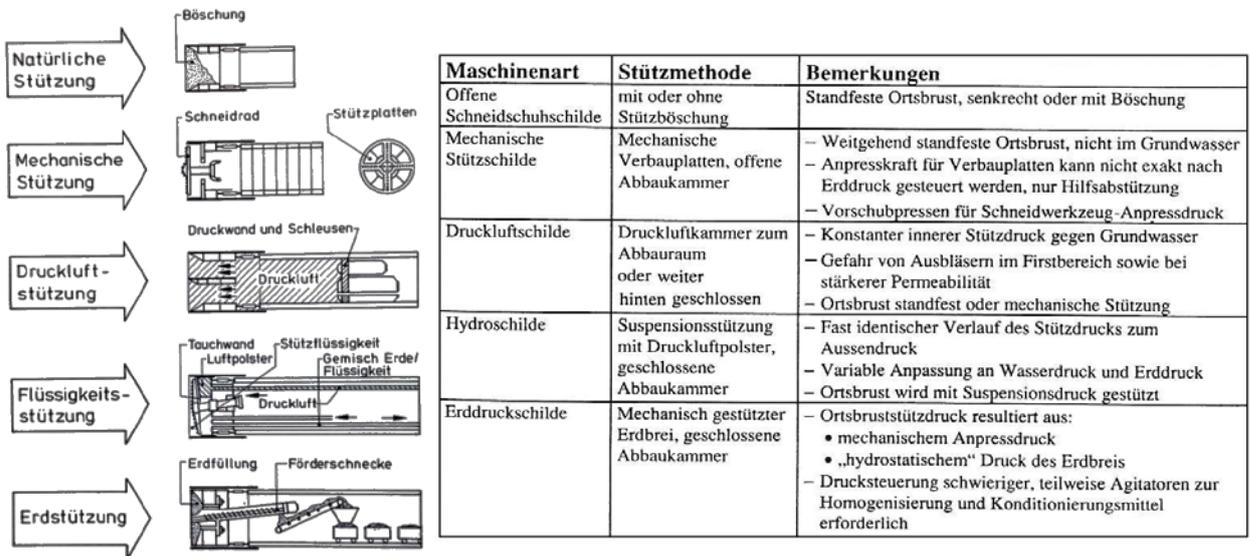


Abb. 57: Methoden zur Ortsbruststützung [1.20], [1.11]

Im Allgemeinen kommen die Schildmaschinen mit Erddruck-Stützung der Ortsbrust (sg. Erddruckschilder) in nicht standfesten, feinteilreichen Böden zum Einsatz. Ihre ungefähren Einsatzbereiche sind (siehe Abb. 58):

- in Böden oberhalb der Linie 1 (d.h. Feinkorngehalt mind. 30 %). Der Betrieb erfolgt ohne Zugabe von Additiven. Der Einsatz im Grundwasser (GW) ist möglich.
- in Böden zwischen den Linien 1 und 2. Bei dem Betrieb müssen Additive zugegeben werden. Der Einsatz im GW ist möglich.
- in Böden zwischen den Linien 2 und 3. Bei dem Betrieb müssen Additive zugegeben werden. Der Einsatz im GW ist nicht möglich.

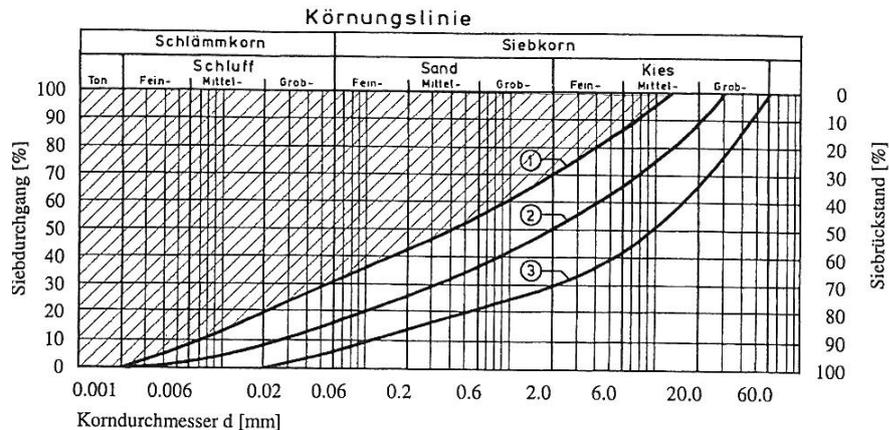


Abb. 58: Einsatzbereiche des Erddruckschildes [1.11]

Unterhalb der Linie 3 ist die Zugabe von Additiven wirkungslos, da die Durchlässigkeit des Bodens zu hoch ist. Die Ortsbrust fließt und die Erzeugung eines Stützdrucks ist nicht möglich.

Der Stabilitätsverlust der Ortsbrust wird durch einen künstlich erzeugten Stützdruck vermieden (siehe Abb. 59). Der Erddruckschild nutzt das vom Schneidrad gelöste Bodenmaterial als Stützmedium. Eine weitere Nutzung von sekundären Stützmedien (z.B. Druckluft, Suspension) ist nicht erforderlich. Wenn das gelöste Bodenmaterial durch den anstehenden Erd- und Wasserdruck nicht weiter verdichtet wird, ist der Gleichgewichtszustand erreicht. Die Erddruckschilde sind sehr umweltfreundlich und sind keine Separieranlagen notwendig.

Hat der Boden nicht die richtige Betriebskonsistenz für einen Erddruckschild, kann es zum Unterbruch der Bodenströmung (z.B. bei Böden mit geringer Plastizität) kommen. Weiters führt dies zu Problemen nicht nur bei der Förderung, sondern führt auch zu einer unzureichenden Druckverteilung an der Ortsbrust und in der Abbaukammer.

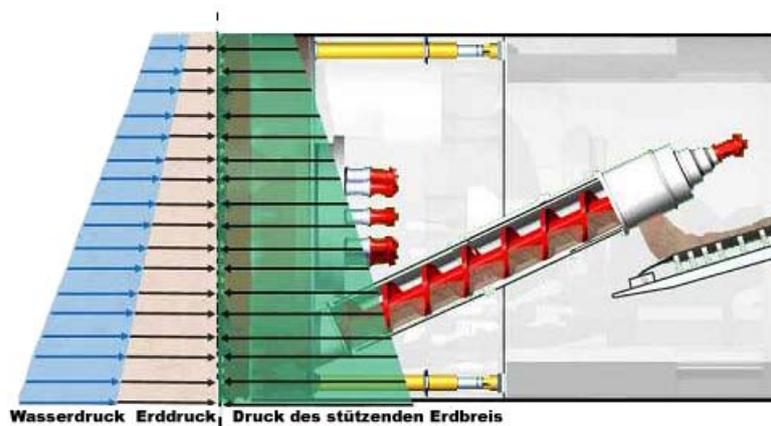


Abb. 59: Prinzip der Erddruck-Stützung der Ortsbrust [2.6]

Die Konzeption der sofotischen Schildmaschine wurden auf die Belange einer Schildmaschine mit Erddruck-Stützung optimiert. In Abb. 60 werden die wichtigsten Elemente des angewendeten sofotischen Erddruckschildes dargestellt (siehe auch Abb. 61 und Abb. 62).

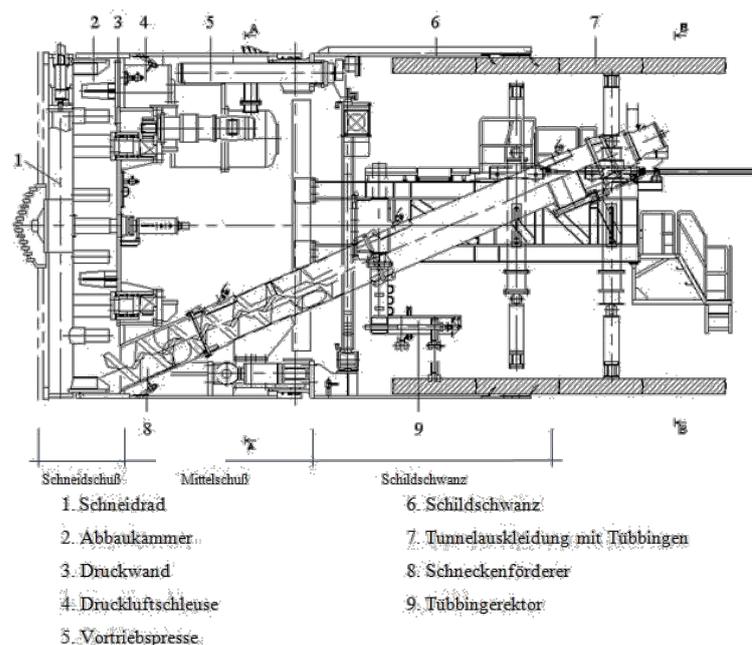


Abb. 60: Technisches Bild des sofotischen Erddruckschildes, I Durchquerung [1.39]

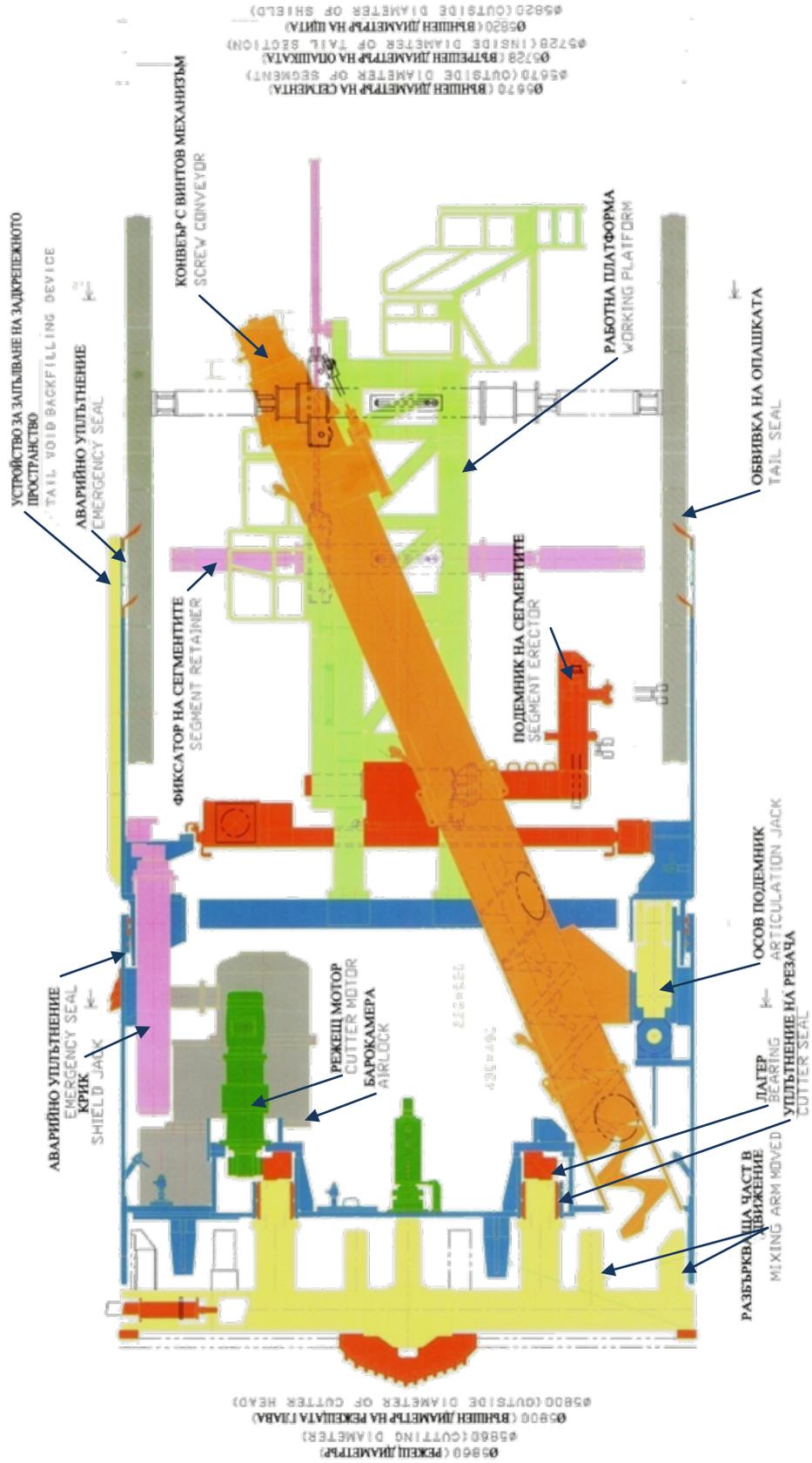


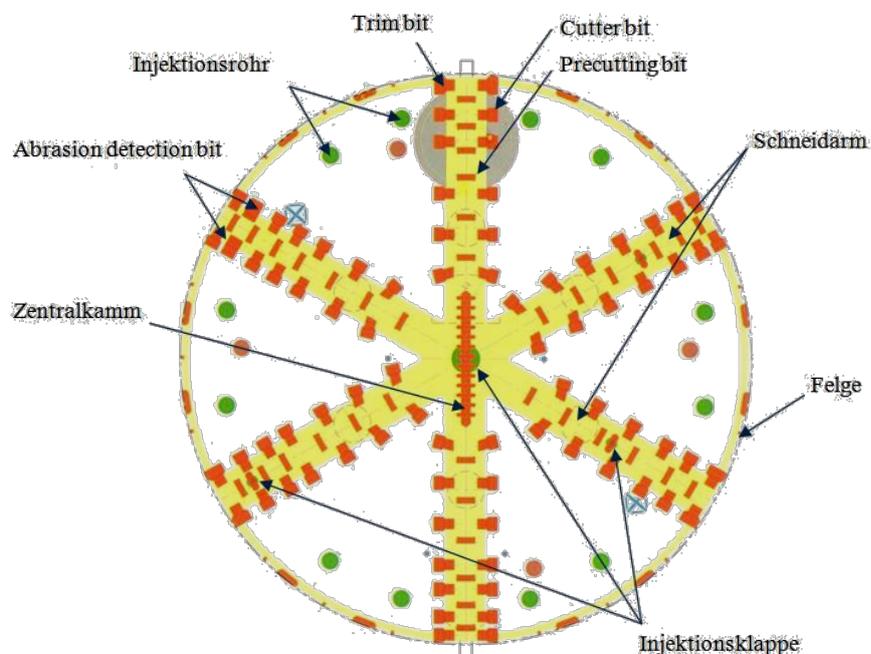
Abb. 61: Detailliertes technisches Bild des softotischen Erddruckschildes, I Durchquerung [1.39]



Im vorderen Bereich des sofiotischen Erddruckschildes, an seiner Spitze befandete sich das lösende Element - das Schneidrad (1) (siehe Abb. 60). Der Schneidraddurchmesser war  $\varnothing$  5860 mm. Grundsätzlich ist das Schneidrad der sg. Werkzeugträger des Erddruckschildes. Die Hauptfunktion des Schneidrads ist den Boden an der Ortsbrust wirkungsvoll, effektiv und schonend zu lösen. Weiters müssen die in die Abbaukammer geförderten Bodenmassen durch seine rotierende Bewegung geknetet und in einen plastischen verformungsfähigen Erdbrei verwandelt werden. Beim Erddruckschild dient das Schneidrad und der gelöste Boden als Stützmedium.

In Sofia entschied sich die japanische Hauptbaufirma „Taisei CO“ für ein offenes Schneidrad (sg. offener Stern mit Felge) mit mittelfreiem Antrieb. Die Auswahl des offenen Schneidrads richtete sich nach den vorhandenen Baugrundverhältnissen. Diese Konstruktionsart eignet sich besonders bei Böden mit bindigen Anteilen, da die Gefahr eines eventuellen Verklebens wesentlich geringer sind.

Das Schneidrad war von einer umlaufenden Felge umgeben, die als Teil des Schildmantels ausgebildet war (siehe Abb. 63). Diese Maßnahme erhöhte nicht nur die Stabilität des Schneidrads, sondern verminderte auch das Setzungsrisiko bei geringen Überdeckungen. Durch die Felge wurde ein Überschnitt durch Kippen des Schneidrads und mittels einer Längsverschiebung erzeugt. Er verringerte die Vortriebspresenkräfte des Erddruckschildes (wegen der reduzierten Reibung) und erleichterte das Steuern durch die Vortriebspresen am Schildende. Durch die Felge wurde aber die erzeugte Reibungsfläche am Umfang des Schneidrads vergrößert, was eine merkliche Erhöhung des notwendigen Drehmomentes erforderte.



**Abb. 63: Schneidrad des sofiotischen Erddruckschildes, I Durchquerung [1.39]**

Generell verteilt die äußere Felge die örtlich angreifenden Lasten auf mehrere Schneidarme. Das Schneidrad des sofiotischen Erddruckschildes besaß sechs radial gegliederte Schneidarme. Ihre Anzahl beeinflusste die Qualität und die Geschwindigkeit des Bodenabbaus. Jeder Arm war auf einen

wesentlichen Anteil der vom Antrieb erzeugten Vortriebspresenkräfte bemessen. Die Räume zwischen den Schneidarmen waren frei gelassen (keine Brustplatten zum Abstützen der Ortsbrust) und dienten zum Abräumen des gelösten Bodens und zur Zwangsförderung. Der gelöste Boden fiel zwischen die Schneidarme und wurde durch die rotierende Bewegung des Schneidrads und den Druck des neu abgeschälten Bodens in den Raum zwischen der Hinterseite der Schneidarme und der Vorderseite der Abbaukammer gedrückt. Somit konnte ein gleichmäßiger Materialfluss gewährleistet werden.

Vor der Nabe des Schneidrads saß der sog. Zentralkamm (siehe Abb. 65), der zu einer vorläufigen Entspannung der Ortsbrust diente. Die Ortsbrust wurde mit seiner Hilfe voreilend gebohrt und eingebrochen. Das Schneidrad war zusätzlich mit Injektionsklappen und -rohren, und mit sog. „Abrasion detection bits“ ausgerüstet. Die Gesteinsabrasivität kann sich besonders negativ beim Schildvortrieb auswirken. In abrasiven Böden besitzt der Erdbrei die Charakteristik einer sog. Schleifpaste. Diese Schleifpaste kann zu einem Verschleiß der Abbauwerkzeuge des Schneidrads sowie zu extremen mechanischen Beanspruchungen der Lagerungskonstruktion sowie des Dichtungssystems führen. Mit Hilfe von den angeordneten „Abrasion detection bits“ kann die Abrasion überprüft werden.

Im Allgemeinen ist die Stirn der Felge, die Schneidarme und der Zentralkamm mit Abbauwerkzeugen bestückt. Die konstruktive Gestaltung der Abbauwerkzeuge steht in enger Beziehung zu den vorhandenen Bodenverhältnissen. In der folgenden Tabelle sind die Abbauwerkzeugtypen nach Einsatzbereichen aufgelistet.

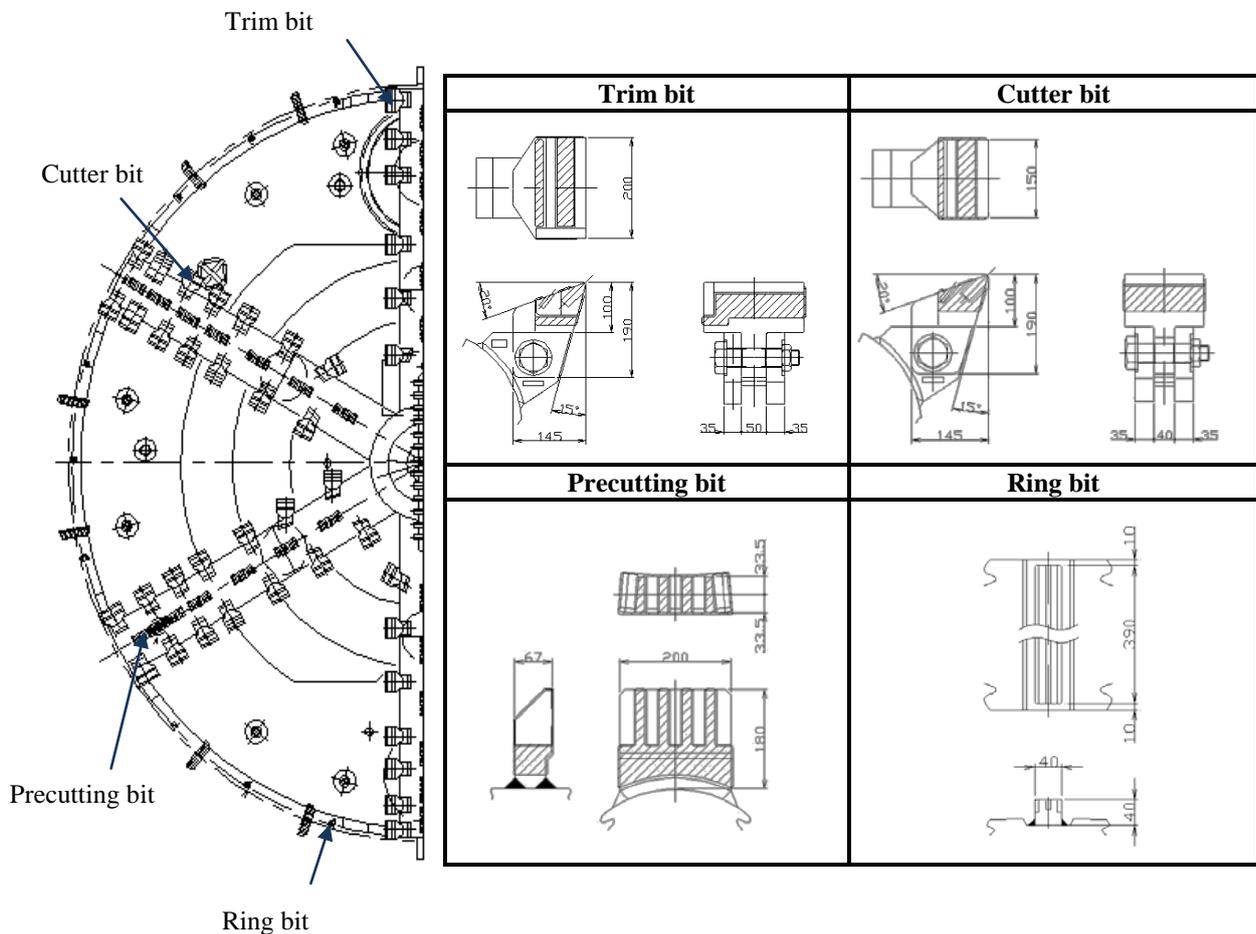
	<b>Bodenklassen</b>	<b>Abbauwerkzeuge / konstruktive Gestaltung</b>
1	<b>Leicht lösbare Bodenarten:</b> – nicht- bis schwachbindige Sande, Kiese etc.	– Schälmesser, durchgehende Schneidkante
2	<b>Mittelschwer lösbare Bodenarten</b> (bindig, leichte bis mittlere Plastizität): – Sand, Kies – Schluff und Ton	– Schälmesser, Stichel – Schälmesser, Stichel, vorseilender Zentrumschneider
3	<b>Schwer lösbare Bodenarten:</b>	
3a	– wie 1 und 2, jedoch Korngrößen > 63 mm, Steine 0,01-0,1 m <sup>3</sup>	– wie 2, sowie Rollendiskens und kleine Steinbrecher
3b	– wie 1 und 2, jedoch Findlinge 0,1- > 1 m <sup>3</sup>	– wie 2, sowie Rollendiskens und grössere Steinbrecher
4	<b>Leicht lösbarer Fels oder vergleichbare Bodenarten:</b> – Fels bröckelig, schieferig, weich, verwittert – vergleichbare, verfestigte, nichtbindige sowie bindige Böden	– Diskens / Rollenmeissel – Meissel – Abräumzähne
5	<b>Schwer lösbarer Fels:</b> – hohe Gefügestärke	– Diskens / Rollenmeissel – Meissel

**Tab. 18: Abbauwerkzeugeinsatz [1.19]**

Um ein schonendes und qualitatives Lösen des Bodens gewährleisten zu können, wurden die Abbauwerkzeugtypen des sofiotischen Schneidrads präzise gewählt. In der Regel wurden die Verschleißcharakteristiken verschiedener Abbauwerkzeugtypen durch Laborversuche bestimmt und anhand der repräsentativen Daten und Erfahrungen wurden die Abbauwerkzeuge gewählt. Ergebnis

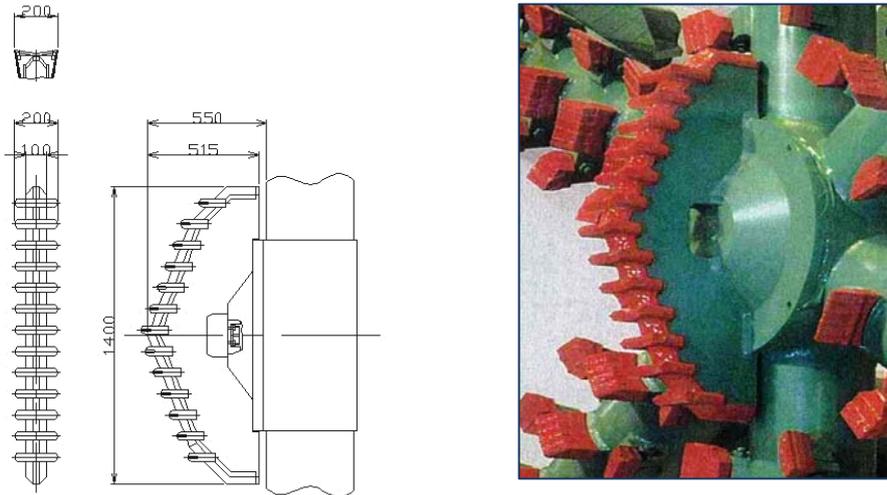
der richtig gewählten Abbauwerkzeuge war eine hohe Qualität des Abbaus sowie eine hohe Vortriebsgeschwindigkeit. Generell wurden Setzungen vermieden, da die Lagerungsstruktur der Bodenschichten gehalten wurde.

Die Felge, die Schneidarme und der Zentralkamm des sofiotischen Schneidrads waren mit Zähnen verschiedener Art für beide Drehrichtungen bestückt. Die Zähne ergaben sich durch eine Vereinzelung der durchgehenden Schneidkanten. Jede einzelne Zahnart hatte eine eigene Form, Stellung, Abmessung, Funktion und Anordnungsstelle (siehe Abb. 64). Die Zähne zur lokalen Auflockerung des festen Bodens wurden in einem deutlichen Abstand von ca. 145 mm vor dem Werkzeugträger (Schneidarm, Zentralkamm, Felge) angeordnet. Sie bestrichen bei jeder Bewegung des Schneidrads die gesamte Ortsbrustfläche und trennten die Bodenmassen schneidend. Der entstandene Span gleitete über ihre Vorderseite ab.



**Abb. 64: Zahnarten des sofiotischen Schneidrads [1.39]**

Die Zähne vor der Nabe des Schneidrads, die den sg. Zentralkamm bestückten, wurden senkrecht zur Ortsbrust eingesetzt (siehe Abb. 65). Ihre Stellung zur Ortsbrust machte die Wirkung des Zentralkammes von der Drehrichtung unabhängig. Das sofiotische Schneidrads konnte in beiden Drehrichtungen betrieben werden, um ein „Verrollen“ des Erddruckschildes auszugleichen.



**Abb. 65: Zahnordnung vor der Nabe des sofitischen Schneidrads [1.39]**

Die Zähne des sofitischen Schneidrads wurden mit austauschbaren Spitzen hergestellt. In diesem Fall konnten sie während des Abbauprozesses wegen Verschleiß gewechselt werden. Die Zähne waren nach hinten ausbaubar, um ein Überprüfen oder Austauschen zu ermöglichen. Jeder Zahn übertrug Kräfte, die nicht im voraus ermittelt werden konnten. Eine obere Lastgrenze war gegeben, die als Zerstörungsfestigkeit der Kontaktzone zwischen Zahn und Ortsbrust bestimmt war.

Grundsätzlich wird die Schneidradlagerung fast ausnahmslos aus maschinenbautechnischen Gesichtspunkten bestimmt. In der folgenden Tab. 19 sind die verschiedenen Lagerungsarten aufgelistet. Jede Bauart ist mit ihren typischen Charakteristiken, Vor- und Nachteilen zusammengestellt. Bei der Wahl können folgenden Einflussfaktoren ausschlaggebend sein: Plastizität des Erdbreis, Geschwindigkeit der Schnecke, Vortriebspressendruck und Umdrehung des Schneidrads beim Anfahren, und im Betrieb.

Bauart	Typische Charakteristik der Schneidradform	Vorteile	Nachteile
Zentralwellenlager	Speichenrad	- kleiner Rollenlager- Ø - kleiner Dichtungs-Ø - einfache Längsverschiebung	- grössere Einbautiefe - kleinere Drehmomente
Umfangslager	Felgen- oder Trommelschneidrad	- grosses Drehmoment - Einstieg in die Speichen durch die Mitte	- kaum kippbar - grösser Dichtungs-Ø
Mittelfreie Kompaktlagerung	Speichenrad, Felgenspeichenrad, Trommelschneidrad	- Längsverschiebung - mittels Pressen kippbares Gleitlager - Einstieg in die Speichen durch die Mitte	- grösserer Dichtungs-Ø

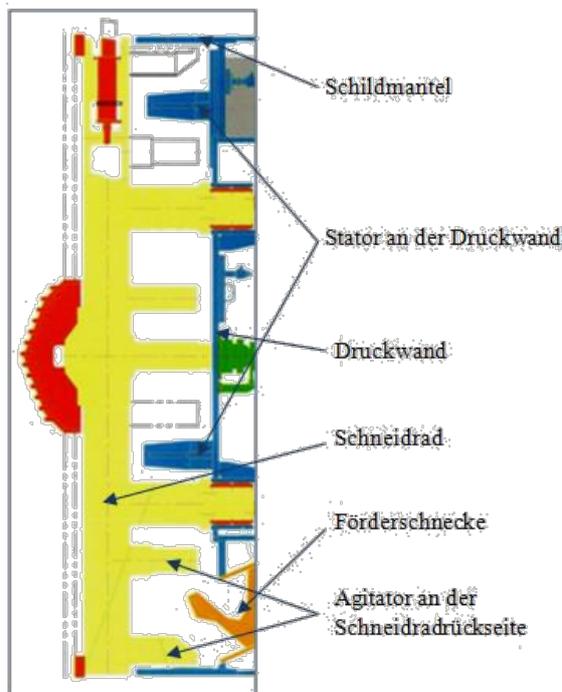
gültig für Sofia

**Tab. 19: Bauarten der Schneidradlagerung [1.11]**

Das Schneidrad des sofiotischen Erddruckschildes war als Felgenspeichenrad ausgeführt. Die Bauart der Schneidradlagerung charakterisierte sich als mittenfrie Kompaktlagerung. Die Lagerung sowie der Antrieb erfolgten über den Umfang des Schneidrads mittels einzelner Stützträger. Die Vorteile dieser Bauart lagen in der stabilen und genauen Führung des Schneidrads, der geringeren Verklebungsfahr des Erdbreis, dem von Antriebseinrichtungen freien Schildzentrum (entsprechend konnte der Schneckenförderer mit einer großer Neigung geführt werden) und der Knetwirkung der Stützträger, die den Konditionierungsprozess unterstützten.

Im Folgendem wird die Konzeption des sofiotischen Erddruckschildes näher erläutert.

Generell wurde der Boden durch die Abbauprozesse des rotierenden Schneidrads an der Ortsbrust gelöst. Er fiel hinunter zum Sohlbereich des Schneidradraumes, gleichzeitig wurde er durchgeknetet und durch die speziellen Öffnungen des Schneidrads (sg. Rechen) in die Abbaukammer (2) gedrückt (siehe Abb. 60). In der Regel befindet sich die Abbaukammer im Bereich zwischen Schneidrad und Druckwand (Wand mit trennender Funktion vom unter atmosphärischem Druck stehenden



**Abb. 66: Abbaukammer des sofiotischen Schneidrades [1.39]**

Schildabschnitt). Die an der Ortsbrust gelösten Bodenmassen werden in diesem Teil des Erddruckschildes mit dem dort bereits vorhandenen plastischen Erdbrei vermischt.

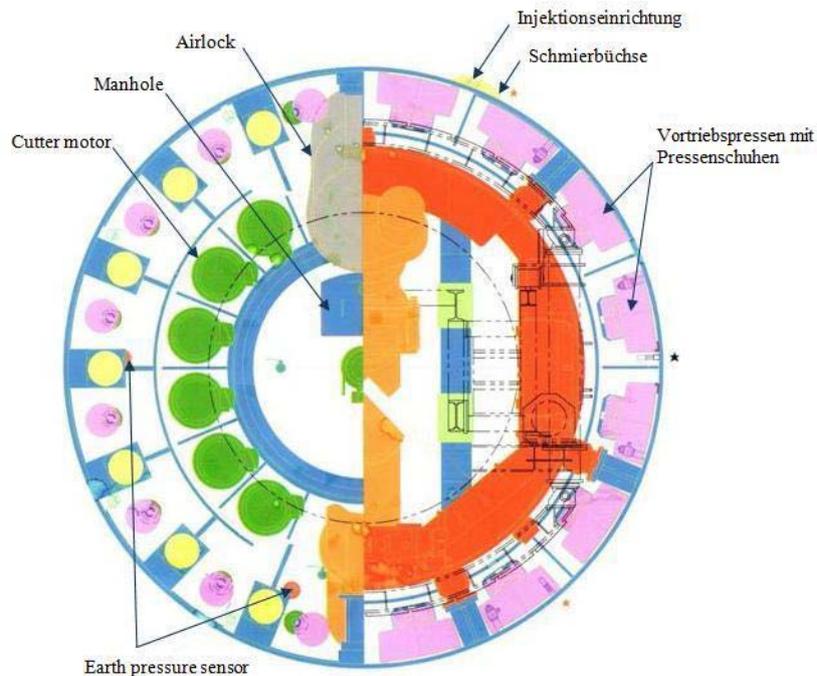
Die Abbaukammer des sofiotischen Erddruckschildes wurde präzise und strömungsgünstig konstruiert. Sie hatte eine Länge von 0,80 m. Die Länge beeinflusste die Verweildauer des plastischen Erdbreis in Zusammenhang mit der Vortriebsgeschwindigkeit. Jede Verstopfungsgefahr sollte vermieden werden, deshalb wurde die Abbaukammer mit konstruktiven Elementen als mechanische Einwirkungsmöglichkeiten ausgerüstet (siehe Abb. 66): Statoren an der Druckwand und Agitatoren an der Schneidradrückseite. Ihre Funktion äußerte sich in der Verbesserung der Konsistenz und

Homogenisierung des Erdbreis in der Abbaukammer. Die Agitatoren wurden mit Hydraulikmotoren angetrieben. Sie durchkneteten mit ihren Rührarmen den Erdbrei. Der Erdbrei des gelösten Bodens als Stützmedium hatte nicht nur eine plastische Konsistenz, sondern wies auch nur eine geringe Wasserdurchlässigkeit auf, so dass kein unkontrolliertes Austreten von Wasser und Bohrgut möglich war. Dies könnte den Stützdruck in der Abbaukammer verringern. Der Stützdruck in der Abbaukammer wurde über Druckmessdosen kontrolliert. Sie wurden auf der Vorderseite der Druckwand verteilt.

Idealerweise soll der Boden aus einer Ton- und Feinschluffmischung mit natürlichem Wasser bestehen. Diese Mischung findet sich jedoch äußerst selten. Die geeignete Konsistenz kann durch die Zugabe von Wasser-, Bentonit-, Tonsuspensionen oder Additiven (Polymersuspensionen, Polymerschäume) verbessert werden. In dem Fall kann eine Verklebungsgefahr in der Abbaukammer vermieden werden, da diese als Schmiermittel und als elastischer Luftpolster innerhalb des gelösten Bodens wirken können. In Sofia wurde daher gezielt, der Boden in der Abbaukammer unter Zugabe von Additiven und mit dem vorhandenen Wasser möglichst plastisch gestaltet, um den Scherwiderstand gering zu halten und das Antriebsmoment des Schneidrads sowie der Förderschnecke in wirtschaftlichen Grenzen zu halten. Dies führte zur Senkung der Energiekosten und zur Optimierung der Leistungsfähigkeit des Erddruckschildes.

Eine Förderschnecke (8) förderte weiters die abgebauten Bodenmassen aus der Abbaukammer (siehe Abb. 60). Sie war im unteren Bereich der Abbaukammer peripher angeordnet und hatte die folgenden Konstruktionsteile: schraubenförmig gebogenes Schneckenblatt und feststehender Trog. Das Zentrum der Förderschnecke war freigelassen (d.h. ohne Welle konzipiert), was den Transport größerer Steine ermöglichte. Ihre Ganghöhe betrug ca. 50 % des Schilddurchmessers. Die Förderschnecke ermöglichte den direkten Austrag der abgebauten Bodenmassen am Trogende und steuerte den Stützdruck in der Abbaukammer (durch die Schneckendrehzahl und durch Kontrolle des Materialaustrags). Am Austritt der Förderschnecke war ein Verschlusschieber angebracht. Er konnte bei Unterbrechung des Bohrbetriebes geschlossen werden, um den Stützdruck in der Abbaukammer aufrecht zu erhalten. Die per Förderschnecke aus der Abbaukammer ausgetragenen Bodenmassen wurden auf ein Übergabeband des Nachläufers übergeben.

Die Steuerung des Stützdruckes in der Abbaukammer erfolgte aber nicht nur über den Materialaustrag der Förderschnecke, sondern auch durch die Veränderung der Vortriebsgeschwindigkeit. Die Vortriebspresenkräfte wurden durch die Vortriebspresen (5) erzeugt (siehe Abb. 60, Abb. 67). Die Vortriebspresen übertrugen über die Druckwand ihren Druck auf den Erdbrei und das Schneidrad. Grundsätzlich kann der Stützdruck in der Abbaukammer durch die Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit und/oder Reduzierung der Schneckendrehzahl präzise gesteuert werden. Er erhöht sich dadurch, dass mehr Boden in die Abbaukammer gelangt als Boden gefördert wird. Der Druck kann durch die Reduktion einer oder beider Einflussparameter gesenkt werden. Das Gleichgewicht ist dann erreicht, wenn die Vortriebspresenkraft gleich der Summe aus Wasserdruck- und Erddruckkraft vor der Ortsbrust ist. Die Vortriebspresenkraft hängt von dem erforderlichen Druck der Schneidradwerkzeuge, um die geplante Abbauleistung zu erzeugen, von der notwendigen Kraft zur setzungsarmen Ortsbruststützung, von der Überwindung der Mantelreibung und von einer notwendigen Reserve bei Kurvenfahrten ab.



**Abb. 67: Schnitt durch den Mittelschuß des sofiotischen Erddruckschildes [1.39]**

Der sofiotische Erddruckschild (siehe Abb. 60) als konzeptioneller Aufbau besaß als Hauptelement einen Tübingerrektor (10). Im Schutz des Schildschwanzes (6) (hinterer Teil des Schildes) wurden durch den Tübingerrektor die Tübbingsegmente (7) als endgültiges Sicherungsmittel in den Tunnel eingebaut.

### 5.1 Tunnelherstellung in geschlossener Bauweise - Schildvortrieb

Die Herstellung eines U-Bahnbauwerks in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb erfordert eine Reihe verfahrensspezifischer Bauphasen. Im Folgenden werden die wesentlichsten Bauphasen am Beispiel der Tunnelstrecken MS „Vasil Levski Stadion“ – MS „Kliment Ochridski“ und MS „Kliment Ochridski“ – MS „Serdika“ (I. Durchquerung) analysiert.

Abb. 68 zeigt die schematische Darstellung dieser U-Bahnstrecken zwischen den entsprechenden U-Bahnstationen sowie die Reihenfolge der Herstellung von den einzelnen Tunnelröhren.

Der Ausbau der Tunnelröhre der U-Bahn Sofia mit Schildvortrieb begann im allgemeinen mit dem Abteufen des Startschachtes (Ort: MS „Vasil Levski Stadion“), von dessen Sohle aus der Bau der ersten Tunnelstrecke in Richtung MS „Kliment Ochridski“ begann. Nach Fertigstellung der ersten Tunnelröhre wurde der Erddruckschild aus dem Zwischenschacht gehoben, wieder nach MS „Vasil Levski Stadion“ zurück transportiert und für den Bau der zweiten linken Tunnelröhre vorbereitet und in Betrieb genommen. Die MS „Kliment Ochridski“ wurde als Zwischenschacht genutzt, in dem der Vortrieb der beiden ersten U-Bahntunnel endete.

Nach der Fertigstellung der beiden eingleisigen Tunnel zwischen MS „Vasil Levski Stadion“ – MS „Kliment Ochridski“ wurde der Erddruckschild für den Ausbau der rechten Tunnelröhre der zweiten Tunnelstrecke aus der linken nach der rechten Seite des Zwischenschachtes umgesetzt. Danach wurde der Ausbau der dritten Tunnelröhre begonnen, der in dem Zielschacht beendet wurde.

Danach folgte die Herstellung der linken Tunnelröhre in Richtung MS „Serdika“ - MS „Kliment Ochridski“. Am Ende der vierten Tunnelröhre wurde das Schild im Untergrund als Tunnelauskleidung belassen. Die Hydraulik wurde ausgebaut und eine Möglichkeit zu ihrer Wiederverwendung wurde geschaffen.

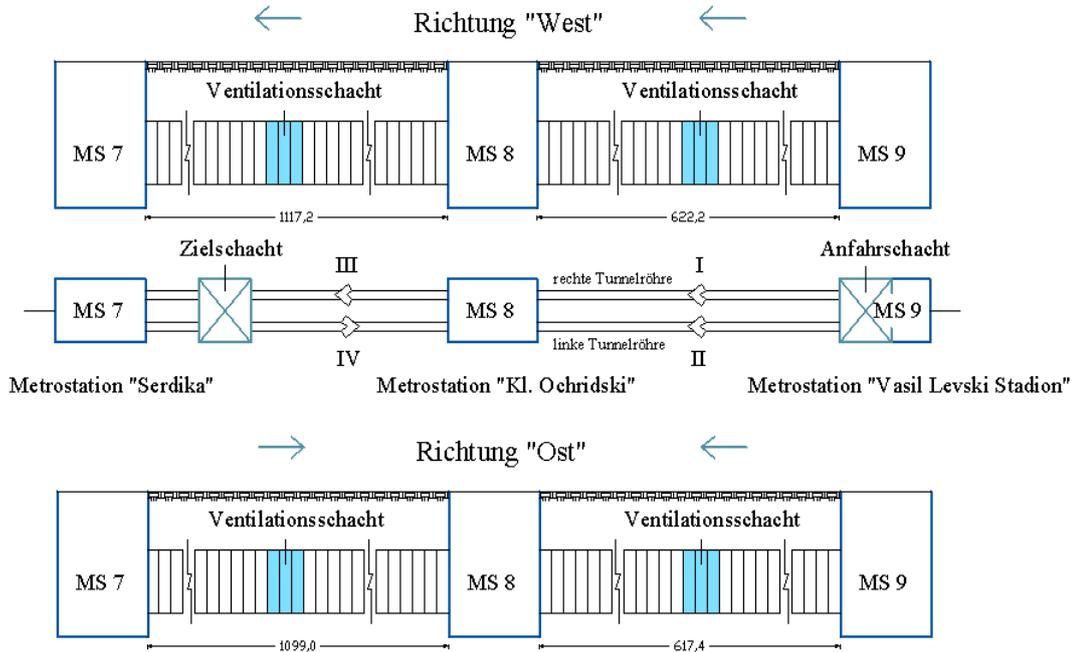


Abb. 68: Schematische Darstellung der hergestellten Tunnelstrecken der sofiotischen U-Bahn in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb

### 5.1.1 Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten

Die Herstellung eines U-Bahnbauwerks in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb erforderte in Sofia bestimmte vorbereitende Maßnahmen.

Generell wurden präzise geologische Untersuchungen durchgeführt. Die gute Vorerkundung der Lage der existierenden Leitungen und Kanäle, sowie die genauen Kenntnisse der existierenden Fundamentreste und tiefliegenden Hindernisse mussten im U-Bahnbau Sofia einen qualitativen Bauvorgang gewährleisten. Der Vortrieb des Erddruckschildes musste problemlos erfolgen. Der Verkehr war im Bereiche des Start- und Zielschachtes umgeleitet. Die Verkehrssicherung war weiter in der Stadt garantiert.

Verfahrensspezifische Teilvorgänge bei der Herstellung der U-Bahn in Sofia in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb waren die Herstellung des Erddruckschildes sowie die Produktion und die Lieferung der Tübbinge für die Herstellung der Tunnelauskleidung.

### 5.1.2 Bauphase 2: Herstellung des Startschachtes

Die eigentliche Bauausführung eines U-Bahntunnels im Schildvortrieb beginnt in der Regel mit der Herstellung eines Startschachtes. Die Startschacht ist am meist eine verbaute Baugrube, die sich durch den Beginn der Ausbaurbeiten eines Tunnels und den Aufbau der Vortriebsanlage charakterisiert.

Hier findet die Baustellenmontage der Tunnelvortriebsmaschine statt. Die Maschine ist hier in der Startposition. Der Startschacht dient auch als Zugang für

- die Entsorgung von abgebauten Bodenmassen
- die Versorgung der Tübbing, aus denen die Tunnelwand gebaut wird, Aggregaten und/oder Mörtel, und Frischbeton
- Kabel und Leitungen für Strom- und Kommunikationsausrüstung
- Lieferung von Materialien und Ausrüstungen für die Fertigstellung des Tunnels
- das Personal

Für die Zwecke des U-Bahnbaus Sofia wurde der Startschacht, im Tunnelbereich der MS „Vasil Levski Stadion“ abgeteuft. Ihre Lage und ihr Grundriss wurde von einer Reihe von Faktoren, wie Trassenführung, Gradienten, Überdeckung, Abmessungen des Erddruckschildes und der Widerlagerkonstruktion, bestimmt. Der sofiotische Startschacht wurde präzise in der zukünftigen Tunnelachse zwischen den MS „Vasil Levski Stadion“ und MS „Kliment Ochridski“ errichtet und später als Bestandteil der endgültigen MS „Vasil Levski Stadion“ verwendet.



**Abb. 69: Startschacht, MS №9 [1.37]**

Grundsätzlich können alle bekannten Verbau- und Sicherungsvarianten für den Bau eines Startschachtes eingesetzt werden. Bei der Auswahl der Baugrubenumschließungsart des Startschachtes wurde Rücksicht auf die vorhandenen Boden- und Grundwasserverhältnisse sowie seine endgültige Nutzung als Konstruktionsbestandteil der MS „Vasil Levski Stadion“ genommen. Der Startschacht in Sofia wurde bei gleichzeitiger Absenkung des Grundwassers (offene Wasserhaltung: Dränrohre und 25 Pumpen) als viereckige Schlitzwandkonstruktion hergestellt. Die Grundrißabmessung (20,24 m/17,75 m/18,23 m/15,84 m) wurde für den Anstich von zwei Tunnelröhren bemessen (siehe Abb. 69), die dicht nebeneinander gelegt wurden. Die lichte Breite des Startschachtes richtete sich nach den freigelassenen Mindestbreiten von 1 m als Arbeitsraum an beiden Seiten des Schachtes. Seine Länge war von der Länge des Erddruckschildes und den Abmessungen der angewendeten Hilfs- und Widerlagerkonstruktionen abhängig. Der Arbeitslauf der Schlitzwandherstellung ist im Kapitel 3.3.2 (S. 51 ff.) näher erläutert. Es wurden 32 Schlitzwandlamellen (Länge: 2,20 m; Dicke 0,80 m; Höhe ~ 26 m; Einbindetiefe: 7,60 m) hergestellt.

Nach Fertigstellung der Schlitzwandkonstruktion wurde der Boden schrittweise bis zur Schachtsohle ausgehoben. Die Schlitzwände wurden mit drei Reihen Stahlrahmen abgestützt und befestigt. Voraussetzung für ihre Anordnung war die Statik der Schlitzwände. Als Stahlträgertyp der Stahl-Schachtrahmen sind Stahlträger mit Doppel T-Profil angewendet.

Danach folgte die Herstellung der Sohlplatte des Startschachtes, die mit einer Dicke von 100 cm hergestellt wurde. Der Arbeitslauf ist im Kapitel 3.3.3 (S. 59 ff.) näher erläutert. Nach Fertigstellung der Sohlplatte wurde die sg. Schildwiege errichtet. Die Schildwiege diente nicht nur als Auflager für das sofiotische Schild bei der Montage, sondern auch zum Einschieben des Schildes in die Startstrecke. In diesem Fall handelte es sich bei der Schildwiege um eine Stahlkonstruktion. Sie wurde als wiederverwendbar geplant und hergestellt.

Zum Anfahren des sofiotischen Erddruckschildes im Startschacht bedarf es einer zusätzlichen Widerlagerkonstruktion. Sie war erforderlich, um die Vortriebskräfte des Schildes aufzunehmen und einzuleiten. Die Widerlagerkonstruktion wurde aus Stahl hergestellt.

Für den Startvorgang des Vortriebes wurde auch eine Anfahrbrille montiert. Die Anfahrbrille ist eine Gleitdichtung zwischen Schildmantel und Startschachtwand. Sie verhindert das Eintreten von Grundwasser oder Schmiermittel in den Startschacht.

Zusätzlich wurde um die Ausfahröffnung herum ein Anfahrblock aus Stahlbeton hergestellt.

Nach Fertigstellung des Startschachtes wurde mit der Montage des Erddruckschildes begonnen.

### 5.1.3 Bauphase 3: Montage des Erddruckschildes

Zunächst wurden die einzelnen Segmente des Schildmantels und der Schneidradantrieb angeliefert und teilweise über Tage montiert. Weiters wurden die Segmente mit Hilfe von einem Schwerlastkran Typ Liebherr (max. Traglast: 200 t) in den Startschacht abgelassen. Die Montage des Erddruckschildes im Schacht erfolgte auf der vormontierten Schildwiege. Anschließend konnten die weiteren Hauptelemente (z.B. Errektor, Förderschnecke) des Schildes eingebaut werden. Die volle Montage wurde unter Tage ausgeführt. Nach erfolgter Verbindung des Schildschwanzes mit dem Schildmantel und dem Bohrkopf wurde das Erddruckschild präzise in der Mitte der Einfahrbrille positioniert und nun konnte der eigentlichen Vortrieb beginnen (siehe Abb. 70).



**Abb. 70: Der sofiotische Erddruckschild in dem Startschacht [1.37]**

### 5.1.4 Bauphase 4: Ausbau des Tunnels

Der Vortrieb der ersten Tunnelstrecke in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb wurde am 28.02.2006 in Sofia begonnen.

Im ersten Schritt wurde der Erddruckschild mit Hilfe von den hydraulischen Vortriebspresen durch die Anfahrbrille im Sohlbereich ca. 5 cm eingepresst. Grundsätzlich ist diese Eindringungstiefe eine Sicherungsmaßnahme vor Vortriebsbeginn. Danach wurde der Schneidrad in Bewegung gesetzt und die sg. Bohrphase wurde begonnen. Die Herstellung von den ersten Metern der Tunnelstrecke erfolgte bei einer langsameren Rotationsbewegung des Schneidrades. Die Vortriebsgeschwindigkeit am Anfang des Vortriebes betrug ca. 1 m pro Tag und die gezielte Vortriebsgeschwindigkeit nach dem Vortriebsbeginn sollte ca. 10 m pro Tag betragen.

In der Anfangszeit wurde der Schild ausprobiert und optimal eingestellt sowie wurde Rücksicht auf die Schulung des Personals, und später auf die Bedienung des Tübbingerrektors genommen. Der Erddruckschild wurde soweit fortgeführt, dass der Tübbingerrektor in Mittellage unter dem ersten Tübbingring angeordnet werden konnte.

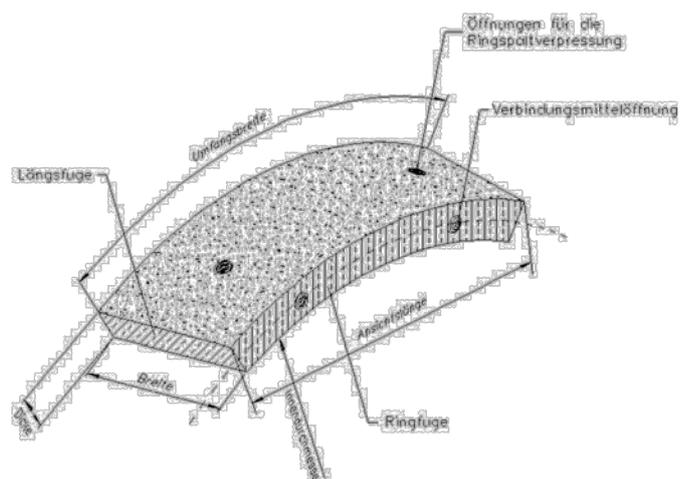
Nun konnte das eigentliche Versetzen des ersten Tunnelrings beginnen.

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche prinzipielle Varianten des Tunnelausbaus den einschaligen oder den zweischaligen Tunnelausbau. Der Unterschied besteht darin, dass bei dem einschaligen Tunnelausbau die temporäre Sicherung im Bauzustand in die permanente Auskleidung integriert wird, d.h. die temporären Sicherungselementen sind bei der Dimensionierung des Endzustandes berücksichtigt. Bei dem zweischaligen Tunnelausbau wird zwischen der temporären Sicherung im Bauzustand und der endgültigen Auskleidungsschale unterschieden. Der einschalige Tunnelausbau ist im Regelfall die günstigere und bevorzugte Lösung (geringste Investitionskosten).

Der Ausbau des Tunnels erfolgte in Sofia einschalig mit Stahlbeton-Blocktübblingen.

Im Allgemeinen ist der Tübbing ein vorgefertigtes Bogensegment, das zur Auskleidung verwendet wird und stützende Funktion hat (siehe Abb. 71). Es ist heute eine Vielzahl von Tübbingsarten vorhanden (nach Material, Form, Abmessungen).

Die einschalige Tunnelausbau Variante beeinflusste die Anforderungen an das Tübbingsystem und an die Herstell- und Versetzgenauigkeit der Tübbinge stark. In diesem Fall hat der Tübbing eine



**Abb. 71: Begriffsdefinitionen der Tübbingabmessungen**

Dreifachfunktion, d.h. Sicherung, zumeist Dichtung und konstruktiver Ausbau.

Bei der Wahl der Tübbingabmessungen werden statische und baupraktische Gründe berücksichtigt. Aus baupraktischen Gründen wird eine Ringunterteilung in weniger als vier Teilsegmente nicht empfohlen, da solche Tübbinge nur aufwendig in Einbauposition gebracht werden können (z.B. wegen

wenig vorhandenem Platz im Schildschwanzbereich). Aus statischen Gründen sollen die Tübbinge möglichst gleich groß sein. Der Tunnelring eines Tunnelausbaus besteht in der Regel aus 5 bis 12 Tübbingen. Für den Ringbau ist jedoch ein kleiner, konischer Schlusstein vorteilhaft. Er vervollständigt den Tübbingring zu einem geschlossenen Tragrings. Vier verschiedene Formen der Ringgeometrie sind zu unterscheiden, die mit den jeweiligen Verbandseigenschaften und der Ringbaubedingung verbunden sind: rechteckig, trapezförmig, rhomboidal und hexagonal.

Das sofiotische Tübbingdesign sah einen Tunnelring bestehend aus 5+1 Teilsegment mit einer Dicke von 25 cm, einer Breite von 1,40 m und einer Umfangslänge von 3,34 m (galt nicht für den Schlusstein) vor. Es wurde eine rechteckige Ringgeometrie gewählt, die projektspezifisch einen raschen, einfachen und sicheren Ringausbau zuließ. Die Ringabfolge erfolgte Ring für Ring. Die Teilsegmente hatten rechteckige sowie trapezförmige Formen (siehe Abb. 72).

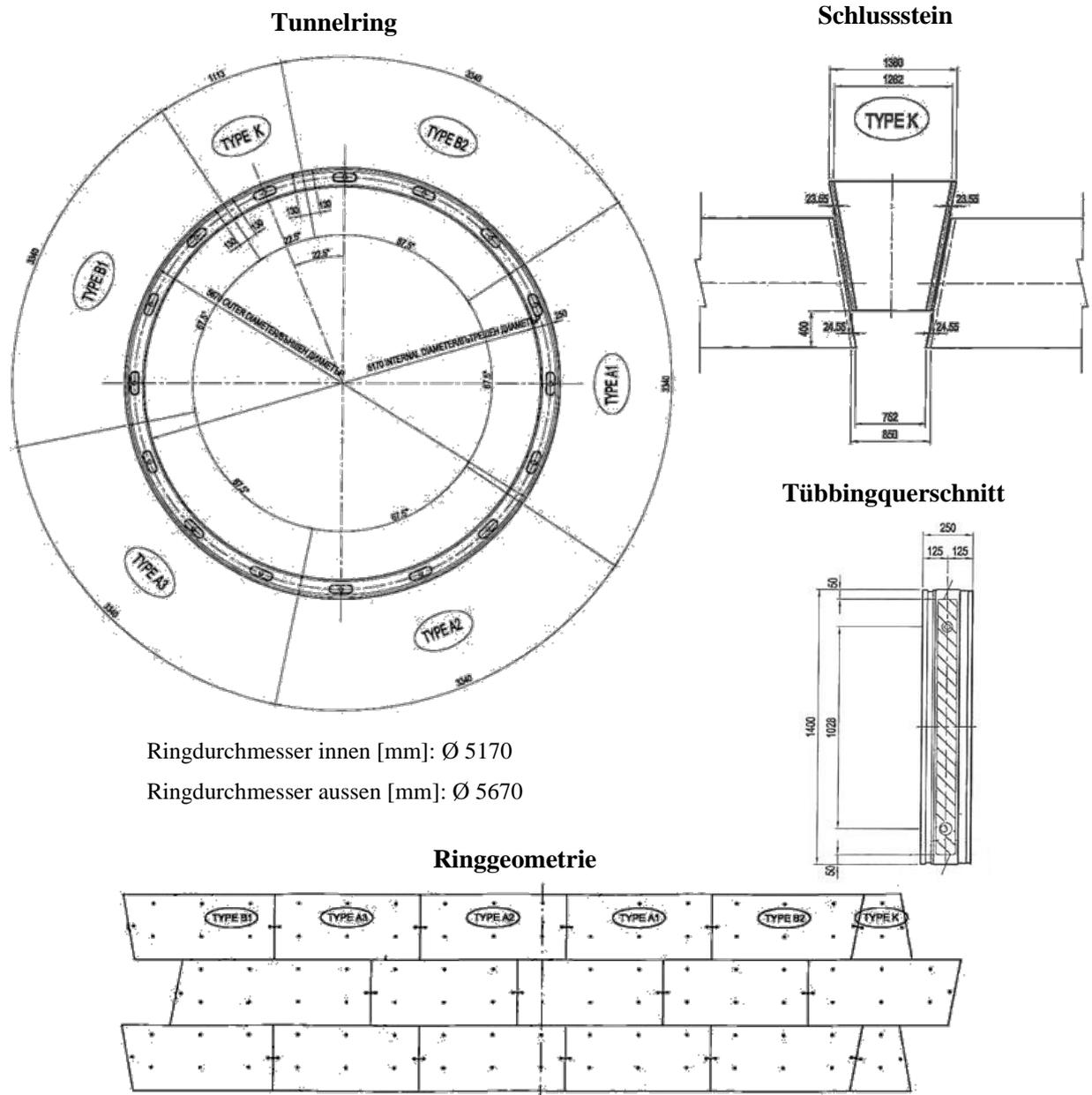


Abb. 72: Schematische Darstellung von: Tunnelring, Schlusstein, Tübbingquerschnitt, Ringgeometrie, U-Bahn Sofia, I Durchquerung [1.37]

Die einzelnen Tübbinge des ersten Tunnelrings wurden in dem Erddruckschild im Schutze der Schildschwanzkonstruktion mit Hilfe des Tübbingerektors mechanisch versetzt. Der Erektor, seine Befestigungsmittel und seine Kraftübertragung waren auf die zu erwartenden Maximalgewichte der Stahlbeton-Blocktübbinge unter Berücksichtigung dynamischer Lasterhöhungen mit ausreichender Sicherheit bemessen. Er konnte die folgenden Bewegungen getrennt voneinander ausführen: Verschiebung in Tunnellängsrichtung, Drehung um die Schildachse um  $360^\circ$ , Verkippen des Erektorkopfes in Tunnellängsrichtung und -querrichtung sowie Verdrehen des Erektorkopfes. Jede Bewegung des Erektors wurde in Sofia ferngesteuert. Die Bedienung der Erektorsteuerung wurde so angeordnet, dass von ihr aus eine direkte Einsichtmöglichkeit zur Einbaustelle eines jeden Tübbingsegmentes gewährleistet war. Der Tübbingerektor gewährleistete in Sofia ein zwängungsfreies Versetzen aller Tübbinge.

Das Versetzen eines Tunnelrings begann in Sofia mit dem Versetzen der Sohlsegmente Typ A1, A2 und A3 (siehe Abb. 72). Die Segmente wurden in einer genauen Reihenfolge geladen und geliefert, da jeder Wechsel der Tübbingsegmente im Tunnelrohr Zeitverlust bedeutete. Die Tübbingübergabe zum Erektor erfolgte auf Sohlenniveau, d.h. die Tübbinge mussten mit dem Rücken nach unten angeliefert sowie der Zwischenspeicher und der Übergabetisch mussten im Verkehrsraum unten angeordnet werden. Das Abziehen des Tübbings erfolgte nach oben vom Transfertisch.

Nach dem Versetzen der Tübbingsegmente Typ A wurden die Segmente Typ B1, B2 versetzt und danach das Schlussstein Typ K eingeschoben.

Die einzelnen Tübbinge wurden im Bauzustand in Längs- und später in Ringrichtung durch geeignete Verbindungsmittel gegeneinander verspannt. Sie wurden verbunden um eine gewisse Stabilität während der Bauausführung zu gewährleisten. In diesem Fall wurde die Bauqualität erhöht, da eine stufenweise Verschiebung der Segmentausrichtung verhindert wurde. Daher konnten die Scherkräfte zwischen den Ringen gleichmäßig verteilt und die Dichtheit der Tunnelröhre aus Tübbingungen gewährleistet werden, da die Dichtungsbänder in den Tübbingfugen vorgespannt wurden.

In den Längsfugen (Lage: in Richtung der Tunnelachse) treten Ringnormalkräfte und Biegemomente durch ausmittige Normalkräfte und Querkräfte auf. In den Ringfugen (Lage: orthogonal zur Tunnel-Längsachse) werden in der Regel die Normalkräfte aus den Vortriebspresen des Erddruckschildes sowie äußere Lasten, z.B. erste Ringspaltverpressung, Auftrieb und Erddruck, übertragen.

In Sofia wurden die Stahlbeton-Blocktübbinge in Längs- und Querrichtung durch schräge Schrauben mit Kunststoffdübeln verbunden. Gerade sowie gekrümmte Schrauben wurden in Sofia nicht angewendet.

Generell war die Kopplung der Tübbinge auch für die Zeit, wo die Ringspaltfüllung noch nicht erhärtet war, notwendig. Dies verhinderte die Verformungen des Tunnelringes.

In der Regel wurde der hinter der Schildschwanzdichtung beim Vorfahren des Erddruckschildes entstehende Spalt, zwischen Boden und Außenleibung des Tübbingringes, mit einem Verfüllmaterial

druckbeaufschlagt verfüllt. Das Verfüllmaterial wurde auf die vorhandene Geologie abgestimmt. Eine satte, druckkontrollierte Verfüllung des Ringraumes musste gewährleistet werden, deshalb musste vorher ein nach allen Seiten abgeschlossenes System hergestellt werden.

Die Tübbinge wurden mit speziell ausgesparten Öffnungen (sg. Einpresslöcher) zur gezielten Verfüllung des Ringraumes hergestellt (siehe Abb. 71). Die Verfüllung wurde in Sofia in die Primärverpressung, die die Bettung der einzelnen Tübbinge ermöglichte und in die Sekundärverpressung, die die eventuellen restlichen Hohlräume um die Tunnelkonstruktion ausfüllte, geteilt.

Nach dem Versetzen des ersten Tunnelrings begann das Taktverfahren, d.h. jede weitere Schreitbewegung des Erddruckschildes erfolgte intermittierend im Takt:

- Vortrieb des Schildes und Abbau des Bodens
- Abtransport des abgebauten Bodenmassen und Ringbau
- Vortrieb
- Ringbau usw.



**Abb. 73: Tunnelröhre mit fertiggestellter Tübbingauskleidung, U-Bahn Sofia [2.4]**

Für jeden weiteren Vortrieb stützte sich der sofiotische Erddruckschild auf dem zuletzt gebauten Tübbingring ab und presste den Schildkörper bei gleichzeitigem Abbau des Bodens um die Länge eines Ringes weiter.

Bei der Stoßausbildung der Tübbingauskleidung kam der T-Stoß zur Anwendung. Der T-Stoß wird ausnahmslos in den Längsfugen bei gedichteten, einschaligen Tübbingsysteme angewendet. In Sofia entschied man sich gegen den Kreuzstoß, da er nur bei ungedichteten und/oder zweischaligen Systemen zum Einsatz kommt.

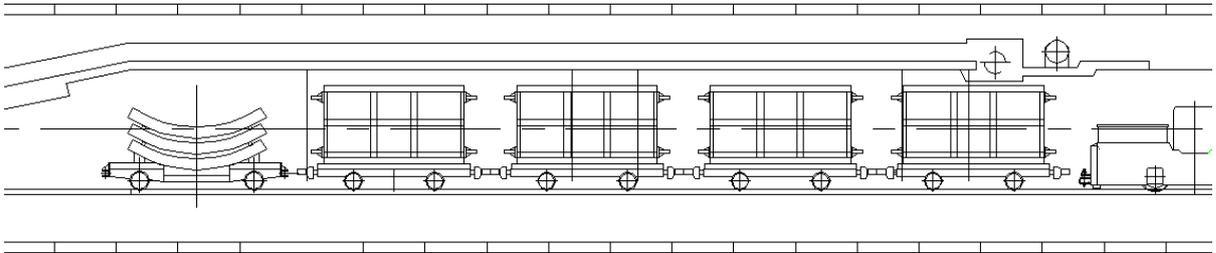
Der erste sowie jeder fortschreitende Tunnelring wurde in Sofia mit hoher Genauigkeit und Qualität errichtet. Grundsätzlich übernimmt die Tunnelauskleidung eine Reihe von Aufgaben: Sicherung des Tunnelhohlraums, Ableitung von ständigen und beweglichen Lasten (Verkehrslasten, Lasten der Einbauten) sowie Begrenzung der Verformungen und der Setzungen. Die hergestellte ebene Innenfläche der Tunnelröhre erleichterte auch die weiteren Bauprozesse im Tunnel.

Mit dem Einbau jedes weiteren Tunnelrings vergrößerte sich die Länge der Tunnelbaustelle. Die qualitative Förderung der abgebauten Bodenmassen sollte gewährleistet werden. Bei dem sofiotischen Erddruckschildes wurden drei verschiedene Abbaumaterialförderabschnitte auf der Tunnelbaustelle unterschieden.

- Förderung der abgebauten Bodenmassen aus der Abbaukammer zum Nachläufer.

- Horizontale Förderung im Nachläuferbereich.
- Vertikale Förderung aus dem Startschacht zur Verlade- oder Zwischenlagerstätte über Tage.

Die abgebauten Bodenmassen wurden an die entsprechende Streckentransporteinrichtung übergeben und zur Startschacht innerhalb der bereits fertiggestellten Tunnelstrecke gefördert. In Sofia entschied man sich für Schutterzüge als Streckentransporteinrichtung. Die Vorteile eines Schutterzuges als



**Abb. 74: Schütterzug, U-Bahn Sofia [1.39]**

Streckentransporteinrichtung liegen in dem energie günstigen Betrieb und der hohen Förderleistung pro Zugeinheit, in der Umweltverträglichkeit der Methode (lärmarm, geringere Abgasbelastung der Tunnelluft) und in dem geringen Personalbedarf. Während der Förderung der abgebauten Bodenmassen sind keine Beschädigung der Sohle des hergestellten Tunnels und keine aufwendige Wartungsarbeiten erforderlich. Generell können auch Dumper oder Förderbänder angewendet werden. In der Regel kommen die Dumper bei sehr grossen Tunnelquerschnitten zum Einsatz. Der Einsatz von einem Förderband erfordert hohen Investitionsaufwand und ist nur bei relativ grossen Tunnellängen von Vorteil. Aus wirtschaftlicher Sicht wurden in Sofia Dumper sowie Förderbänder nicht angewendet. Mit Hilfe von einem Schutterzug erfolgte die Förderung der abgebauten Bodenmassen diskontinuierlich. Die geförderten Bodenmassen wurden auf ein Übergabeband des Nachläufers übergeben zum Beladen des Schutterzuges. Es wurde für den Zug ein Verladebereich im Nachläuferbereich vorgesehen. Die Länge dieses Bereichs richtete sich nach der geplanten Abbaumenge und sollte für den Zug ausreichen. In dem Fall wurde die Bohrphase nicht unterbrochen. Der Zug wurde mit Hilfe von einer Lok zum Startschacht gezogen.

Die einzelnen Teilprozesse der vierten Bauphase wiederholten sich bis zum endgültigen Ausbau der geplanten Tunneröhre.

Der Ausbau der ersten Tunnelröhre erfolgte in Sofia bei gleichzeitiger Herstellung des Zielschachtes. Grundsätzlich endet der Tunnelvortrieb mit dem Einfahrt der Tunnelvortriebsmaschine in dem Zielschacht. Danach kann sie für den weiteren Tunnelvortrieb angewendet werden.

Für die Zwecke des U-Bahnbaus Sofia wurde der Zielschacht im Bereich der MS „Serdika“ abgeteuft (siehe Abb. 68, Abb. 75). Der Zielschacht wurde in Sofia auch als Rotationsschacht bezeichnet. Nach Fertigstellung des gesamten Tunnelvortriebs wurde der Schacht als Bestandteil der endgültigen Konstruktion der MS „Serdika“ verwendet.

Der Zielschacht wurde analog zum Startschacht hergestellt. Ihre Lage und ihr Grundriss wurden mit der Tunnelachse abgestimmt. Der Schacht wurde als viereckige Bohrpfahlwandkonstruktion hergestellt. Der Arbeitslauf der Bohrpfahlwandherstellung ist im Kapitel 3.4 (S. 65 ff.) näher erläutert. Die Bohrpfähle ( $\varnothing$  350 mm, 600 mm, 800 mm) wurden mit einer max. Länge von 16,8 m, einer Einbindetiefe  $\sim$  3,50 m und in Achsabstand von 1,00 m hergestellt. Die Grundabmessungen des Zielschachtes (Breite 28,5 m; Länge 30,0 m) wurden in Richtung des Vortriebs so breit bemessen, dass der Erddruckschild in voller Länge ausgefahren werden konnte. Bei seiner konstruktiven Planung wurde deshalb genug Arbeitsraum freigelassen, da der Zielschacht eine stabile, problemlose und sichere Bewegung des Erddruckschildes beim Übergang vom rechten zum linken Tunnelrohr ermöglichen musste.



**Abb. 75: Einfahrt des softotischen Erddruckschildes in den Zielschacht [1.37]**

Die geschlossene Bauweise mit Schildvortrieb ermöglichte im dicht bebauten innerstädtischen Gebiet Sofias eine sichere, qualitative und effektive Herstellung eines Tunnelbauwerks. Die vorteilhaften technischen Aspekten des Vortriebs und die endgültigen Qualität des Tunnelkonstruktion bestätigten, dass diese Bauweise eine zweckmäßige Bauweise in Sofia war.

### 5.1.5 Zusammenfassung der einzelnen Teilprozesse

#### **Bauphase 1: Maßnahmen zur Vorbereitung und Beginn der Arbeiten**

- geotechnische Untersuchungen und Beurteilung der anstehenden Böden (z.B. mittels Probebohrungen und Proberammungen)
- Erkundung des Grundwasserspiegels und evtl. seine Absenkung
- gute Vorerkundung und genaue Kenntnis der Lage der:
  - existierenden Leitungen, Kanäle und ihre Umleitungen
  - existierenden Fundamentreste oder tiefliegenden Hindernisse und ihre Zertrümmerung
- Verlegung von Leitungen und Kabel im Baufeld vor Baubeginn
- Verkehrsumleitung und Verkehrssicherung (im Bereiche des Start- oder Zielschachtes)
- Herstellung des Erddruckschildes
- Produktion und Lieferung der Tübbinge

#### **Bauphase 2: Herstellung des Startschachtes**

- Herstellung der Baugrubenumschließung
  - Schlitzwandherstellung
- Bodenaushub bis zur Sohle des Startschachtes
- Herstellung der Stahl-Schachtrahmen
- Herstellung der Sohlplatte
- Errichten einer Schildwiege
- Montage der Widerlagerkonstruktion
- Herstellung des Anfahrblocks

#### **Bauphase 3: Montage des Erddruckschildes**

- schrittweise Montage des Schildes über und unter Tage

#### **Bauphase 4: Ausbau des Tunnels**

- Setzen des Schneidrads des Erddruckschildes
- Vorschub der Tunnelvortriebsmaschine in einer Ringbreite
- Einbau des ersten Tunnelrings
- Verfüllung des Ringraumes
- Vorschub der Tunnelvortriebsmaschine in einer Ringbreite
- Einbau des zweiten Tunnelrings
- Verfüllung des Ringraumes und usw.

Anmerkung: Der Ausbau des Tunnels erfolgte bei gleichzeitiger Herstellung des Zielschachtes.

- Herstellung der Baugrubenumschließung
  - Bohrpfahlwandherstellung
- Bodenaushub bis zur Sohle des Zielschachtes

- Herstellung der Stahl-Schachtrahmen
- Herstellung der Sohlplatte
- Errichten einer Schildwiege

## 6 Die wichtigsten Materialien und ihre Anwendung im U-Bahnbau Sofia

Nachfolgend werden die wesentlichsten Materialien Beton, Stahl, Stützflüssigkeit und Abdichtung kurz erläutert.

### 6.1 Beton

Beton ist ein Gemisch aus Zement, Gesteinskörnung bzw. Betonzuschlag (z.B. Sand, Kies, Splitt) und Anmachwasser. Fast ausnahmslos wurde in Sofia der auf der Baustelle verarbeitete Frischbeton von Transportbetonwerken geliefert. In der Regel wurden die Beschaffung der Ausgangsstoffe, die Auswahl der Zusammensetzung und die Herstellung des Betons je nach Funktion des Konstruktionsteils des U-Bahnbauwerks gewählt. Die Betoneigenschaften (z.B. Konsistenz) wurden den baupraktischen Gegebenheiten angepaßt. Im Allgemeinen wurde ein Beton mit Regelkonsistenz angewendet. Die Wahl richtete sich nach seiner Dauerhaftigkeit, Verarbeitbarkeit und Dichtigkeit. Die Qualitätssicherung erforderte termingerechte Anforderung und Verarbeitung des Betons.

Grundsätzlich gibt es zwei Betongruppen: B I und B II. Die Betongruppe B I ist eine Gruppe mit Festigkeitsklasse  $\leq B 30$  (C 25/30) mit geringen Anforderungen an der Baustelle und Überwachung. Die Betongruppe B II ist eine Gruppe mit Festigkeitsklasse  $\geq B 35$  (C 30/37) und umfasst Betone mit besonderen Eigenschaften (z.B. mit hohem Widerstand gegen chemische Eingriffe) und Anforderungen an der Baustelle und Überwachung. Bei der Herstellung von Tunnelbauwerken kamen in Sofia Betone der beiden Betongruppen zum Einsatz.

Im Folgenden werden die wesentlichsten Betonmischungen dargestellt.

#### 6.1.1 Betonmischungen

Zumeist wurde ein B 30 (C 25/30) oder B 35 (C 30/37) für die tragenden konstruktiven Elemente der U-Bahnbauwerke verwendet:

- Wandelemente: Schlitzwand- oder Bohrpfahlwandelemente
- Deckenplatten
- Sohlplatten

Diese Betone wurden mit hohem Wassereindringwiderstand hergestellt (sg. WU-Betone). Im Allgemeinen verhindert der WU-Beton den Durchtritt von flüssigem Wasser und nicht die Diffusion von Wasserdampf. Die Anforderungen an die Zusammensetzung von Beton mit hohem Wassereindringwiderstand sind:

- bei Bauteildicken  $> 0,40$  m: w/z – Wert  $\leq 0,70$
- bei Bauteildicken  $\leq 0,40$  m: w/z – Wert  $\leq 0,60$

In Sofia entschied man sich für WU-Betone, da die U-Bahnbauwerke teilweise oder völlig im Grundwasserbereich lagen. Die WU-Betone sind nach BDS in Klassen geteilt (sg. „Klasse der Wasserundurchlässigkeit“). Die Klasse der Wasserundurchlässigkeit hängt von der Dicke der Konstruktionselemente und dem Wert des vorhandenen hydrostatischen Drucks ab. Die

Festigkeitsklasse und die Klasse der Wasserundurchlässigkeit des Betons stehen in engem Zusammenhang miteinander. Im Normalfall hat der Beton der Festigkeitsklasse B 30 (C 25/30) eine Klasse der Wasserundurchlässigkeit W0,8. Mit der Zahl 0,8 wird der größte hydrostatische Druck (in MPa) bezeichnet, bei dem die Wasserundurchlässigkeit des Betons gewährleistet ist. Der Beton der Festigkeitsklasse B 35 (C 30/37) hat eine Klasse der Wasserundurchlässigkeit W1,0.

Dort, wo das Grundwasser betonaggressive Stoffe enthielt, wurde in Sofia der Beton als sulfatbeständig hergestellt.

Die **Standardrezeptur für einen Kubikmeter WU-Beton der Klasse B 30** setzte sich zusammen aus:

Zement 42,5 (Holsim, Dorf „Beli Izvor“)	365 kg
Flusssand (Steinbruch „Chepintsi“)	815 kg
Steinschlag (Steinbruch „Studena“, Fraktion 5-15mm)	445 kg
Steinschlag (Steinbruch „Studena“, Fraktion 15-25mm)	595 kg
Wasser	220 l

Der Beton für die Tübbinge wurde mit einer Festigkeitsklasse von mindestens B 45 (C 45/53) hergestellt.

Ein B 15 (C 12/15) wurde für unbewehrten Beton verwendet:

- Unterbeton
- Gefällebeton
- Schutzbeton

Die **Standardrezeptur für einen Kubikmeter unbewehrten Beton der Klasse B 15** setzte sich zusammen aus:

Zement 42,5 (Holsim, Dorf „Beli Izvor“)	280 kg
Flusssand (Steinbruch „Chepintsi“)	885 kg
Steinschlag (Steinbruch „Studena“, Fraktion 5-15 mm)	475 kg
Steinschlag (Steinbruch „Studena“, Fraktion 15-25 mm)	630 kg
Wasser	180 l

### 6.1.2 Spritzbeton

Spritzbeton ist eins der wichtigsten Sicherungsmittel im U-Bahnbau. Aufgrund der kleineren Körnung des Zuschlagstoffes wird seine Eigenschaften auch neben den der Mörteln angeordnet. Der Spritzbeton wird mittels Druckluft aufgetragen und durch die vorhandene Aufprallenergie verdichtet. Er bindet an der Auftragsfläche ab. Die Eigenschaften des Spritzbetons können durch Zugabe von Zusatzmitteln beeinflusst werden. Falls z.B. eine Frühfestigkeit erzielt werden möchte, dann werden

Erstarrungsbeschleuniger beigemischt. Der Spritzbeton kann sowohl bewehrt mit Hilfe von Baustahlgitter oder Stahlfasern als auch unbewehrt ausgeführt werden.

Im U-Bahnbau in Sofia besaß der hergestellte Spritzbeton sowohl eine konstruktive als auch keine konstruktive Funktion.

- Spritzbeton ohne konstruktive Funktion: als kurzzeitige Sicherungsmittel oder Verstärkung, für Glättung und Oberflächenvergütung oder für Abdichtung.
- Spritzbeton mit konstruktiver Funktion: bei Baugrubensicherungen (Bohrpfahlwand)

Gegenwärtig kommen zwei Spritzbetonverfahren zur Anwendung: Nassspritzverfahren und Trockenspritzverfahren. Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht darin, dass bei Nassspritzverfahren ein Nassmischgut (Zement, Zuschlagstoffen, Anmachwasser und Verflüssiger) mit Transportmischern zur Einbaustelle gebracht wird, danach von den Transportmischern in der Aufgabetrichter einer Nassspritzmaschine abgegeben und mit Hilfe von einer kurzen Pumpleitung direkt einem mechanischen Spritzarm zugeführt wird. Bei Trockenspritzverfahren wird ein Trockengemisch (Zement, Zuschlagstoffen und evtl. Zusatzmitteln) von der Trockenspritzmaschine mit Druckluft zur Spritzdüse gefördert. In der Spritzdüse erfolgt eine hydrodynamische Mischung des im Dünnstromverfahren geförderte Trockenmischguts mit dem Anmachwasser. Das Gemisch wird verspritzt und aufgetragen. In den beiden Fällen verdichtet sich der Spritzbeton durch die kinetische Energie selbst.

In Sofia kamen beide Spritzbetonverfahren zur Anwendung. Die Auswahl hingte von den örtlichen Platzverhältnissen, dem Straßentransport und vorhandener Gerätetechnik ab.

## 6.2 Stahl

Die Stahleinlagen (Bewehrungsstahl), die zur Aufnahme von Zugspannungen eingebaut und einbetoniert werden, gewährleisten hohe statische Anforderungen und stellen das Rückgrat für den Beton dar.

Im U-Bahnbau in Sofia kamen die folgenden Arten von Bewehrungsstähle zum Einsatz:

- **Betonstabstahl Klasse AIII**

Klasse AIII (nach BDS 4758-84): warmgewalzter, kreisförmiger Stabstahl mit Durchmesser von 8 bis 120 mm. Der Profil ist gerippt mit „Grätenmuster“ und zwei Längsrippen. Die üblichen Lieferlängen in Bulgarien sind bis 18 m (meist 14 m). Dieser Betonstabstahl wurde in Sofia als Tragbewehrung für die konstruktiven Elemente der U-Bahnbauwerke verwendet.

**Betonstabstahl Klasse AIII:** Streckgrenze  $R_{sn} = 410 \text{ N/mm}^2$ , Zugfestigkeit  $600 \text{ N/mm}^2$ .

- **Betonstabstahl Klasse AI**

Klasse AI (nach BDS 4758-84): weicher, kreisförmiger Stabstahl mit Durchmesser von 6 bis 40 mm. Der Profil ist glatt. Die üblichen Lieferlängen sind von 6 bis 12 m. Die kleinen Durchmesser (bis Ø14) werden auf Rollen mit einer Länge max. 40 m geliefert. Dieser Betonstabstahl wurde in Sofia als Montage- und Verteilerbewehrung verwendet.

**Betonstabstahl Klasse AI:** Streckgrenze  $R_{sn} = 235 \text{ N/mm}^2$ , Zugfestigkeit  $425 \text{ N/mm}^2$ .

### 6.3 Stützflüssigkeit

Grundsätzlich ist die Stützflüssigkeit eine Suspension, die bei der Herstellung von Schlitzwänden oder Bohrpfählen zum Einsatz kommt. Sie erfüllt die folgenden Aufgaben: Sicherstellung der Standsicherheit des ausgehobenen Raumes (Schlitzlamelle, Bohrpfahl), Erzeugung von einem Gegendruck zum hydrostatischen Druck des Grundwassers und Trägermedium für Abförderung des gelösten Bodenmaterials. Gegenwärtig können drei Typen von Stützflüssigkeiten verwendet werden: Tonsuspensionen (Bentonitsuspensionen), selbsterhärtende Suspensionen (Bentonit-Zementsuspensionen) und Polymerlösungen (chemische Verbindungen aus makromolekularen organischen Ketten).

In Sofia kamen die Bentonitsuspensionen als Stützflüssigkeit zum Einsatz. Man entschied sich gegen Polymerlösungen, da sie in der Regel relativ teuer sind und ein Verlust an Stützwirkung bei starker Grundwasserströmung möglich ist, sowie gegen selbsterhärtende Suspensionen, die nicht nur als Stützflüssigkeit, sondern auch als endgültige selbsterhärtende Baustoffe verwendet werden können.

Im Allgemeinen entsteht die Bentonitsuspension durch Einmischen pulverförmig gemahlener Bentonite in Wasser unter intensiver Rührtätigkeit. Die volle Wirksamkeit der hergestellten Bentonitsuspension (d.h. Erreichen der Maximalwerte der statischen und der dynamischen Fließgrenze) konnte erst nach einer Quellzeit erreicht werden. Die Quellzeit war von der Bentonitkonzentration, der Qualität und der Temperatur des Anmachwassers und der Art der Aufbereitung anhängig. Die Suspension musste stabil sein, d.h. durfte nicht in ihre Bestandteile zerfallen. Die Konzentration der Bentonitsuspension wird je nach Bodenart aufbereitet. Grundsätzlich beeinflusst sie später den Betoniervorgang sowie die Abstände der Bewehrungsstäbe bei der Bewehrungsführung.

Die Zusammensetzung der Bentonitsuspension in Sofia war auf die Randbedingungen des Bauvorhabens abgestimmt. Die Standardrezeptur wies eine Konzentration von 80 g Bentonit pro 1 l Wasser auf. Das Bentonit, das in Sofia zum Einsatz kam, wurde in DMP „Kyrdjali“ hergestellt. Das Anmachwasser musste frei von Elektrolyten und Salzen sein, da ein geringer Salzgehalt ein Ausflocken der Suspension bewirkt und die Suspension unbrauchbar macht. In Sofia wurden Zusätze von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  zugegeben, dies die Stabilität der Bentonitsuspension erhöhte. Ihre Dosierung wurde durch Probeversuche ermittelt. In der Regel garantiert eine Menge zwischen 50 und 2500 g pro  $\text{m}^3$  die optimale Stabilität der Suspension.

Die folgenden Eigenschaften und Kriterien der Bentonitsuspension mussten gewährleistet werden:

- Scherfestigkeit zwischen 0 und  $150 \text{ N/m}^2$ . Die Scherfestigkeit beeinflusste die Stützwirkung der Bentonitsuspension.

- Dichte zwischen  $1,02 \text{ t/m}^3$  (als Mindestwert einer Frischsuspension) und  $1,25 \text{ t/m}^3$  (als Höchstwert einer Suspension mit Sandbeimengungen). Die Dichte beeinflusste den hydrostatischen Druck und die Verdrängbarkeit durch den Beton.
- Fließgrenze zwischen  $0 \text{ N/m}^2$  (als Mindestwert bei tonigen Bodenarten) und  $50\div 60 \text{ N/m}^2$  (als Höchstwert bei kiesigen Bodenarten). Die Fließgrenze beeinflusste die Verarbeitbarkeit der Suspension (d.h. ihre Pumpbarkeit) sowie ihre Verdrängbarkeit.
- Filtratwasserabgabe zwischen  $17 \text{ cm}^3$  (als Mindestwert einer Frischsuspension) und  $40 \text{ cm}^3$  (als Höchstwert einer Suspension mit Sandbeimengungen). Die Filtratwasserabgabe beeinflusste die Stabilität der Suspension und das Eindringverhalten.
- pH-Wert (im alkalischen Bereich) zwischen 9,0 (als Mindestwert) und 10,5 (als Höchstwert). Die Veränderung des pH-Wertes konnte die Brauchbarkeit sowie die Stabilität der Suspension in Frage stellen. Die Thixotropie hängt auch stark von diesem Wert ab.
- Viskosität, als Wert für die Auslaufzeit beim Marsch-Trichter, zwischen  $t = 25 \text{ sec}$  (als Mindestwert) und  $t = 45 \text{ sec}$  (als Höchstwert). Sie galt als Maß für die Fließfähigkeit der Suspension. Je höher die Viskosität, desto dickflüssiger ist die Suspension.

#### 6.4 Abdichtung

Im Allgemeinen bezeichnet man als Abdichtung Dichtelemente oder Dichtkonstruktionen, die die Aufgabe haben, Bauwerke vor den schädigenden Einflüssen des Wassers (d.h. Überschwemmungen, Eindringen von Wasser ins Bauwerk, Durchfeuchtung von Bauteilen, Korrosion, verringerte Festigkeit) zu schützen. Die Abdichtung wird grundsätzlich nach den Regeln und Normen und nach den Hinweisen der Hersteller ausgeführt.

Gegenwärtig kommen folgende Möglichkeiten für Bauwerksabdichtungen zum Einsatz:

- Dichtungsbahnen (für flächige Bauteile): Bitumen- und Polymerbitumenbahnen; Kunststoff- und Elastomerdichtungsbahnen; Elastomer-Dichtungsbahnen mit Selbstklebeschicht; Bitumenverträgliche Kunststoff-Dichtungsbahnen aus Ethylen-Vinyl-Acetat-Terpolymer (EVA); Kaltselfstklebende Bitumen-Dichtungsbahnen (KSK);
- Dickbeschichtungen: Kunststoffmodifizierte, ein- oder zweikomponentige Massen auf Basis von Bitumenemulsion
- WU-Beton
- Fugenbänder (für Abdichtung von Dehnungsfugen) und Fugenbleche (für Abdichtung von Arbeitsfugen) aus Gummi oder Kunststoff

Im Baubereich sind die Fugen einer Konstruktion Schwachstellen. Grundsätzlich ist die Fuge ein Zwischenraum zwischen zwei Bauteilen. Je nach ihrer Lage, kann sie neben ihrem bautechnischen Zweck auch der Gestaltung dienen. Die Fugenabdichtungen müssen den Anforderungen an Schall-, Wärme-, Feuchtigkeits- und Brandschutz genügen. Grundsätzlich gibt es zwei Hauptarten von Fugen: Arbeitsfugen und Dehnungsfugen.

**Arbeitsfuge:** sie entsteht als gewollte Fuge in Beton- oder Stahlbetonbauteilen, wenn der frische Beton gegen eine mehr oder weniger erhärtete Betonlage, also bei zeitlicher Unterbrechung des Betoniervorgangs betoniert wird. Das Betonieren der einzelnen Konstruktionselemente eines Bauwerks in mehreren Abschnitten ist aufgrund des Bauablaufs oft unvermeidlich. Ein möglichst guter Verbund zwischen den beiden angrenzenden Betonabschnitten wird durch Fugenbänder oder Kunststoffprofilen (außenliegend, streifenförmig) hergestellt.

**Dehnungsfuge:** sie entsteht beabsichtigt als Fuge zur Unterbrechung von längeren Bauteilen, um Spannungsrisse vorzubeugen. Ihre Entstehung hängt von den Ausdehnungseigenschaften der verwendeten Materialien – z.B. Kriechen, Dehnung durch Feuchtigkeitsaufnahme, Wärmedehnung ab. Eine schädliche Zerstörung der tragenden Bauteile wird somit verhindert. Zur Fugenabdichtung gibt es verschiedene Möglichkeiten der speziellen Quellabdichtungen, konventionellen Fugendichtmassen, vorgefertigten Profile und Fugenbleche.

Generell hängt die Wahl der Abdichtungsart von dem Bauteil, der Wasserart, der Art der Wassereinwirkung, der Bodenart und dem Zustand der Abdichtungsfläche (trocken oder feucht) ab. Die Abdichtung muss präzise, lagesicher und qualitativ erstellt werden. Grundsätzlich ermöglicht ein Schutz der Abdichtungslagen vor hohen Temperaturwechseln oder auch mechanischen Belastungen während der Bauphase eine lange Lebensdauer des abgedichteten Bauwerks.

Alle U-Bahnbauwerke in Sofia wurden als abgedichtete Stahlbetonkonstruktionen hergestellt, da sie teilweise oder völlig im Grundwasserbereich lagen. Eine ausreichende Wasserdichtigkeit musste gewährleistet werden. Die Wahl der Abdichtungsart richtete sich nach den obengenannten Kriterien.

Im Folgenden werden die wesentlichsten Abdichtungsarten dargestellt, die bei der Herstellung der sofotischen U-Bahn zum Einsatz kamen:

- Dichtungsbahnen: „Voalit“, „Biteksint“, „Preprufe“, „Dual seal“ und „Bituthene“
- Fugenbänder: „Serviseal“, „Bentorub“, „Colflex“

#### **Abdichtung Typ „Preprufe“ (Preprufe 300 R)**

Anmerkung: Die Abdichtungsfläche muss trocken sein.

Die Abdichtung Typ „Preprufe“ ist eine zweischichtige Abdichtung:

- I Schicht: hochdichte Polyethylenfolie (HDPE-Folie), die als Schutz- und Tragschicht dient.
- II Schicht: selbstklebende Schicht, die sich vollflächig mit dem eingebrachten Beton der inneren Konstruktion (min. Dicke 80 mm) verbindet.

Vorteilhafte Anwendung bei wasserführenden Bodenarten. Diese Membrane höchster Klasse hat einen wesentlichen Vorteil, wenn ein Leckage (z.B. mechanische Verletzung der Abdichtungsmembrane während des Einbaus der Bewehrung) entsteht, kann sie sofort lokalisiert und injiziert werden. Die effektive und qualitative chemische Verbindung zwischen Abdichtung und Beton gewährleistet eine

optimale Wasserdichtigkeit des Bauwerks. Mögliche Leistung pro Tag bis 1500 m<sup>2</sup> verlegte Abdichtung.

Im U-Bahnbau Sofia wurde die Abdichtung „Preprufe“ als Abdichtung der vertikalen Spalte zwischen Wandelementen (äußere und innere Konstruktion des U-Bahnbauwerks) sowie als Abdichtung der Sohlplatte verwendet (siehe Abb. 76).

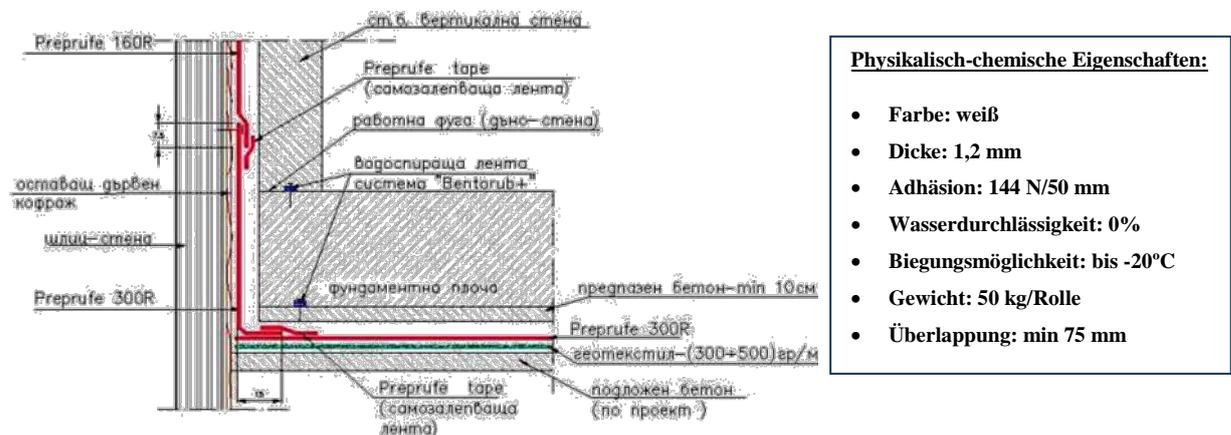


Abb. 76: Detail Wand/Sohle: Selbstklebende Abdichtung „Preprufe“ [2.5]

**Abdichtung der vertikalen Spalte zwischen Wandelementen:** Nach Fertigstellung der Wandelemente eines Tunnelbauwerks konnte in Sofia das Verlegen der Abdichtungsschicht Typ „Preprufe“ beginnen.. Die Abdichtung wurde mechanisch mit Hilfe von Schrauben oder Nägel an den Wänden befestigt. Die Wandelemente mussten stetig sauber und trocken sein. Die Qualität der Verbindung wurde präzise kontrolliert, da sie die Lebensdauer des abgedichteten Bauwerks stark beeinflusste. Danach folgte die Herstellung der inneren Wandkonstruktion des Bauwerks mittels Schalungselemente.

**Abdichtung der Sohlplatte:** Nach der Fertigstellung der Unterbetonschicht (d.h. Planieren und Betonieren) und dem Verlegen einer Schicht Geotextil wurde in Sofia die Abdichtung Typ „Preprufe“ verlegt. Weiters folgte die Herstellung einer Schutzbetonschicht und die weiteren Teilprozesse bei der Herstellung der Sohlplatte.

#### Abdichtung „Dual seal“ (Dual seal R, Dual seal LG)

Anmerkung: Die Abdichtungsfläche kann feucht sein.

Die Abdichtung „Dual seal“ ist eine wasserabweisende weitflächige Membrane, die die sog. „selbstheilende Wirkung“ bei mechanischer Beschädigung hat. Sie kombiniert die Stärke und die Reißfestigkeit der hochdichten Polyethylenfolie (HDPE-Folie) mit den ausdehnenden selbstversiegelnden Fähigkeiten von natürlichem Natrium-Bentonit. Die hochdichte Polyethylenfolie hat Schutz- und Tragfunktionen, und die Bentonitschicht dient als effektive Maßnahme gegen Eindringen von Wasser. Wasser dringt in die beschädigte Membrane ein. Das Natrium-Bentonit

reagiert mit dem Wasser und beginnt in den beschädigten Bereich zu quellen (~4,5-fache Volumenvergrößerung). „Dual seal“ bildet eine 100% wasserdichte Abdichtung

In Sofia kamen die folgenden zwei Typen der Abdichtung „Dual seal“ zum Einsatz: „Dual seal R“ (HDPE-Folie + Bentonitschicht) und „Dual seal LG“ (HDPE-Folie + Bentonitschicht + Schicht Geotextil). Die Abdichtung „Dual seal“ wurde als Abdichtung der vertikalen Spalte zwischen Wandelementen (äußere und innere Konstruktion des U-Bahnbauwerks), als Abdichtung an der Außenseite vertikaler Wandelementen sowie als Abdichtung der Sohlplatten verwendet (siehe Abb. 77, Abb. 78). Das Verlegen der Abdichtung „Dual seal“ charakterisierte sich als schnell, einfach und erforderte nur geringe Vorbereitungszeiten.

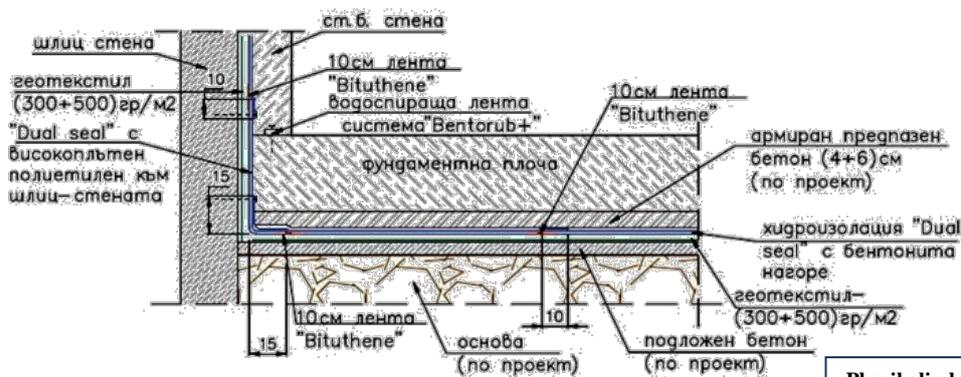


Abb. 77: Detail Wand/Sohle: Abdichtung „Dual seal R“ [2.5]

**Physikalisch-chemische Eigenschaften:**

- Farbe: grau/schwarz
- Abmessungen der Rolle: 7,32 m x 1,22 m
- Zugfestigkeit: 27,5 N/mm<sup>2</sup>
- Wasserdurchlässigkeit: 0%
- Biegemöglichkeit: bis -30°C ÷ +50°C
- Gewicht: 44 kg/m<sup>2</sup>

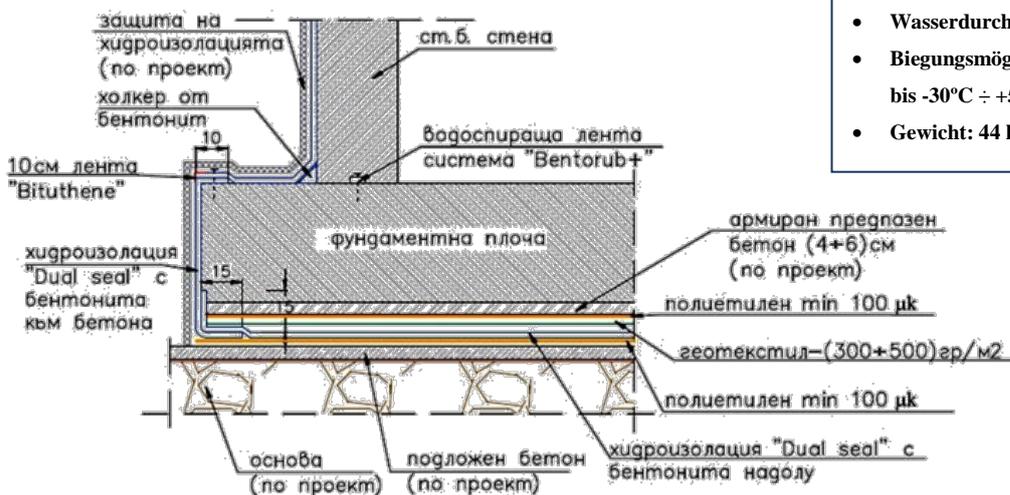


Abb. 78: Detail Wand/Sohle: Abdichtung „Dual seal LG“ [2.5]

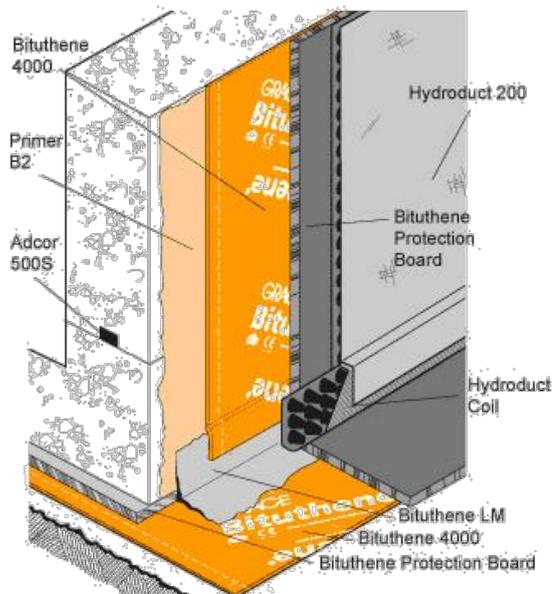
Das Verlegen der Abdichtung „Dual seal“ in Sofia erfolgte wie das Verlegen der Abdichtung „Preprufe“ (siehe S. 123).

**Abdichtung „Bituthene“ (Bituthene 1000, Bituthene 4000)**

„Bituthene 1000“ → Anmerkung: Die Abdichtungsfläche muss trocken sein.

„Bituthene 4000“ → Anmerkung: Die Abdichtungsfläche kann feucht sein.

Die Abdichtung „Bituthene“ ist eine flexible, wasserdichte, selbstklebende Membrane. In Sofia kamen die folgenden zwei Typen der Abdichtung „Bituthene“ zum Einsatz: „Bituthene 1000“ und „Bituthene 4000“. Die Abdichtung „Bituthene“ wurde als Abdichtung an der Außenseite vertikaler Wandelementen sowie als Abdichtung der Decken- und Sohlplatten verwendet.



**Physikalisch-chemische Eigenschaften:**

- Farbe: schwarz
- Dicke: 1 mm ÷ 1,5 mm
- Wasserdurchlässigkeit bis 6 m  
Wassersäule: 0%
- Abmessungen der Rolle:  
1,00 m x 20,00 m

**Abb. 79: Detail Wand: Abdichtung „Bituthene 4000“ [2.5]**

„Bituthene 4000“ wurden in Sofia als Abdichtung für die Sohlplatten eingesetzt. Das Verlegen der Abdichtung der Sohlplatte erfolgte sowie das Verlegen der Abdichtung „Preprufe“ (siehe S. 123).

**Abdichtung an der Außenseite vertikaler Wandelementen:** Nach Fertigstellung der Wandelemente des Tunnelbauwerks konnte in Sofia das Verlegen der Abdichtung Typ „Bituthene 1000“ oder Typ „Bituthene 4000“ beginnen. Bevor das eigentliche Verlegen der Abdichtung beginnen konnte, wurde die äußere Wandoberfläche mit Bitumengrund „Arexsol Lac“ grundiert. Nach dem Verlegen der Abdichtung wurde eine Noppenbahn „Guttabeta“ mit den Noppen zum Baukörper verlegt, um eine optimale Feuchtigkeitsisolierung, eine hohe Stabilität und ausreichenden Schutz der verlegten Abdichtung gewährleisten zu können.

**Abdichtung der Deckenplatte:** Nach Fertigstellung der Deckenplatte (d.h. Bewehren und Betonieren) und dem Verlegen einer Schicht Zementestrich wurde in Sofia die Abdichtung Typ „Bituthene“ verlegt. Weiters folgten das Verlegen einer Schicht Geotextil.

Im Folgenden werden die meist verwendeten Fugenbänder in Sofia dargestellt. Die Fugen sind sog. Schwachstellen jedes hergestellten Bauwerks. Für die Zwecke des U-Bahnbaus musste die Qualität der Fugenabdichtung der Tunnelbauwerke sichergestellt sein.

### Fugenband „Serviseal“ (Serviseal AT 240, Serviseal 240)

Das Fugenband „Serviseal“ kombiniert die Vorteile von den PVC-Streifen und den aktiven hydrophilen Elemente an beiden Enden des Fugenbandes. Es gewährleistet einen aktiven und passiven Schutz des Bauwerks gegen schädliches Wasser und Feuchtigkeit.

Im U-Bahnbau Sofia kam das Fugenband „Serviseal AT 240“ für Dehnungsfugen zum Einsatz (siehe Abb. 80).

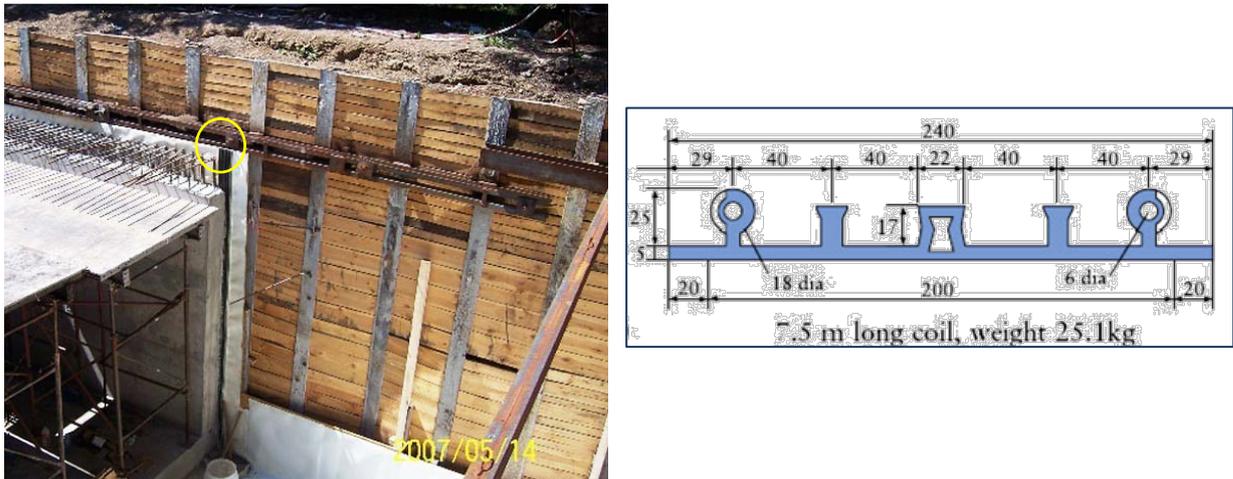


Abb. 80: Fugenband „Serviseal“, Detailabmessungen [2.5]

In Sofia wurde auch das standard Fugenband „Serviseal 240“ verwendet (siehe Abb. 81). Es diente als passiver Schutz.

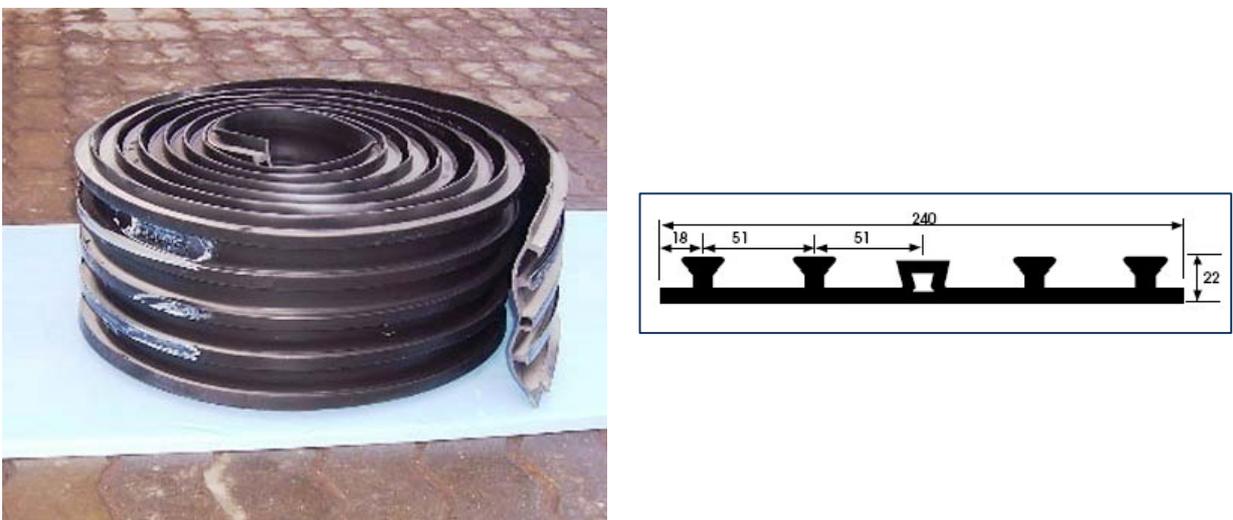


Abb. 81: Fugenband „Serviseal 240“, Detailabmessungen [2.5]

### Fugenband „Bentorub“

Das Fugenband „Bentorub“ setzt sich aus Natrium-Bentonitbasis und synthetischem Kautschuk zusammen.

Im U-Bahnbau in Sofia wurde das quellfähige Fugenband „Bentorub“ für Arbeitsfugen (Wand/Sohlplatte, Wand/Deckenplatte, Sohlplatte/Schutzbetonschicht) verwendet (siehe Abb. 82).

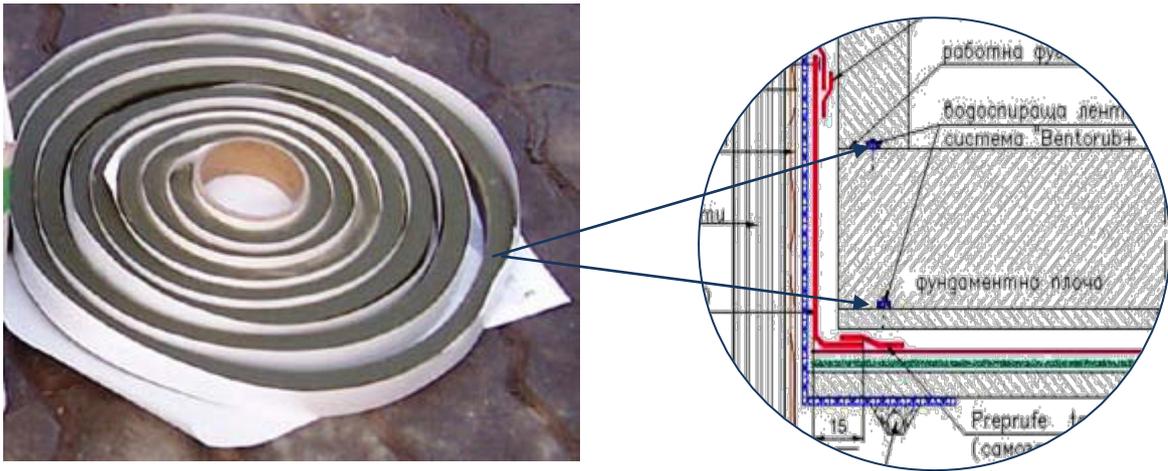


Abb. 82: Fugenband „Bentorub“, Detail Wand/Sohle [2.5]

**Physikalisch-chemische Eigenschaften:**

- Farbe: grün
- Volumenvergrößerung: bis 400 %
- Dichte: 1,44 kg/dm<sup>3</sup>
- Gewicht: 0,72 kg/m
- Beständigkeit gegen Wasserdruck: bis 8 bar
- Aufbewahrung: +5°C ÷ +30°C
- Anwendungsmöglichkeit: von -45°C bis +120°C

**Fugenband „Colflex HN“**

Das Fugenband „Colflex HN“ setzt sich aus NBR Kautschuk zusammen (siehe Abb. 83). Anwendbar bei trockenen sowie bei feuchten Oberflächen der Konstruktionsteilen. Der Beton musste eine ausreichende Druckfestigkeit aufweisen (mind. nach 28 Tagen).

Das Fugenband „Colflex HN“ wurde in Sofia für Arbeits- und Dehnungsfugen verwendet. Das Verlegen erforderte glatte und saubere Abdichtungsflächen im Fugenbereich. Bevor das Fugenband verlegt wurde, erfolgte die Herstellung einer Klebeschicht mittels Klebemitteln oder Klebitumen. Nun konnte das Verlegen des Fugenbandes (bis max. 30 min nach Fertigstellung der Klebeschicht) beginnen. Danach folgte die Herstellung der Schutzschicht.



Das Verlegen des Fugenbandes „Colflex HN“ charakterisierte sich in Sofia als schnell und technisch anspruchslos und es erforderte nur geringe Vorbereitungszeiten.

**Physikalisch-chemische Eigenschaften:**

- Farbe: grau
- Dicke: 1,2 mm
- Breite: 100 bis 200 mm
- Länge einer Rolle: 25 m

Abb. 83: Fugenband „Colflex HN“ [2.1]

## Zusammenfassung

In den achtziger Jahren begann in Sofia der Ausbau der U-Bahn, dies eine wichtige Voraussetzung für eine Weiterentwicklung der Hauptstadt war. Der Bau der U-Bahn, dessen Liniennetz sich auf das Gebiet der Stadtgrenzen beschränkte, wurde als eine zweckmäßige Lösung des stetig wachsenden Verkehrsproblems konzipiert. Die hergestellte Erste Durchquerung der U-Bahn stellt heute die gesamte Erfahrung der bulgarischen und ausländischen Bauingenieure im Fachbereich „U-Bahnherstellung“ dar.

Der Bau einer U-Bahn ist eng mit der Auswahl an Baumethoden verbunden. Bei der Herstellung der U-Bahn in Sofia wurde ein großes Spektrum von folgenden zweckmäßigen und optimal begründeten Bauarten verwendet:

- Offene Bauweise:
  - o Baugrube mit freien Böschungen
  - o Baugrube mit temporärer Baugrubenumschließung (Trägerverbau)
  - o Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung (Schlitzwand, Bohrfahlwand)
- Halboffene Bauweise: Schlitzwand-Deckelbauweise
- Geschlossene Bauweise: Schildvortrieb

Die systematische Analyse zeigt, dass bis heute die **offene Bauweise** das breiteste Anwendungsgebiet in der U-Bahnbaupraxis in Sofia gefunden hat. Die Anzahl der in dieser Bauweise hergestellten Metrostationen und –strecken bis Ende 2009 betrug 10 Stationen (von insgesamt 14) und 8 Metrostrecken (von insgesamt 13). Die Boden- und Grundwasserverhältnisse sowie die lokalen Parameter, die das Baufeld und die örtlichen Gegebenheiten betreffen (z.B. vorhandene Platzverhältnisse, angrenzende Bebauung, Ebenheit der Geländeoberfläche), gewährleisteten in den Jahren eine qualitative, risikoarme, kostengünstige und technisch einfache Herstellung der U-Bahnbauwerke in offener Bauweise.

Die Herstellung eines Tunnelbauwerks (d.h. Boden, Wände und Deckel) in offener Bauweise erfolgte in nacheinander gereihten verfahrensspezifischen Bauphasen. Die Bauausführung begann immer mit Maßnahmen zur Vorbereitung und Anfang des Baubeginns, die im Allgemeinen universell waren. Die Analyse zeigt, dass der wesentlichste Unterschied in der Art und der Herstellung der Baugrubenumschließung (d.h. mit oder ohne) lag. Die Herstellung der Sohlplatte, der Wandkonstruktionen und der Dachkonstruktion des U-Bahnbauwerks erfolgte entweder in monolithischer oder in gemischter Bauweise. Nach Fertigstellung des endgültigen hohlraumsichernden U-Bahnbauwerks folgte die Verfüllung des Voraushubs und die Wiederherstellung der natürlichen Geländeoberflächen über das U-Bahnbauwerk.

In der offenen Bauweise hatte sich in Sofia in den achtziger Jahren die Tunnelherstellung in einer **Baugrube mit freien Böschungen** erfolgreich durchgesetzt. Das Bauverfahren charakterisierte sich als einfach, risikoarm, und günstig für geringere Überdeckungen des U-Bahnprofils. Da geböschte

Baugruben viel Platz benötigten, kamen sie in Sofia hauptsächlich am Rande der Stadt zur Anwendung. Heutzutage ist im dichtbesiedelten Gebiet die Errichtung von U-Bahnbauwerken in geböschten Baugruben eine komplizierte, mühsame und oftmals eine unmögliche Aufgabe.

Die Herstellung von Tunnelbauwerken in **Baugruben mit temporärer Baugrubenumschließung** (Trägerverbau) kam in Sofia nur ein Mal zur Anwendung. Die entstehenden Erschütterungen und Lärmbelastigungen beim Rammen der Stahlträger, und das relativ hoch liegende Grundwasserniveau in Sofia machte diese Verbauart unerwünscht und unwirtschaftlich.

Die Herstellung von Tunnelbauwerken in **Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung** (Schlitzwand, seltener Bohrpfahlwand) hat bis heute das breiteste Anwendungsfeld in Sofia gefunden: insgesamt 12 U-Bahnanlagen. Der hergestellte verformungsarme Verbau wurde entweder als konstruktive Sicherung verwendet oder wurde als Bestandteil des Bauwerks herangezogen. Wegen der Wirtschaftlichkeit des Bauverfahrens bei großen Tiefen und großen Verbaulängen sowie wegen der langjährigen Erfahrung der Fachleute in diesem Fachbereich wurde die Herstellung von U-Bahnbauwerke in Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung bevorzugt.

In **halboffener Bauweise** waren in Sofia zwei U-Bahnstationen und keine vollständig ausgebauten Tunnelstrecken errichtet. Trotzdem hatte sich diese Bauweise als vorteilhaft erwiesen. Die seitlichen Wände und die Decke ergaben eine gute Aussteifung der Baugrube, der Straßenverkehr war nur teilweise gestört sowie die Herstellung war in allen Bodenarten möglich. Dies führte zu einem optimalen Herstellungsprozess in den urbanen Gebieten. Auch heute ist die halboffene Bauweise eine aktuelle Lösung für die Herstellung eines U-Bahnbauwerks in Sofia.

Die **geschlossene Bauweise** hat bis heute nur ein geringeres Anwendungsgebiet im U-Bahnbau in Sofia gefunden. Zwei Tunnelstrecken waren mittels Schildvortriebsmethode erfolgreich ausgebaut. Die Herstellung des Tunnelbauwerks im dichtbebauten innerstädtischen Bereich konnte dadurch sicher, zeitlich optimiert, effektiv, schonend und qualitativ erfolgen.

Die Bauausführung des Tunnelbauwerks in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb erfolgte in nacheinander gereihten verfahrensspezifischen Bauphasen, die stark von der Art der Tunnelvortriebsmaschine abhängig waren. In Sofia wurde eine kreisförmige Vollquerschnitt-Tunnelkonstruktion (Fertigteilkonstruktion) in einschaliger Bauweise hergestellt. Die vorteilhaften technischen Aspekten des Vortriebes und die endgültige Qualität der Tunnelkonstruktion bestätigten, dass diese Bauweise eine zweckmäßige Bauweise in Sofia war.

Die einzelnen Bauverfahren, die im Detail betrachtet wurden, sind nur schwer miteinander vergleichbar, denn jedes Verfahren wird für seine spezifische Anwendung weiterentwickelt und eingesetzt.

Die angewendeten Materialien im U-Bahnbau in Sofia – Beton, Stahl, Stützflüssigkeit und Abdichtung- blieben entlang der gesamten Ersten Durchquerung unverändert.

Die ständige und strenge Überwachung während der Bauausführung der einzelnen Konstruktionsteile garantierte die hochwertige Qualität der Ersten Durchquerung der sofiotischen U-Bahn, die als Vorlage für ihre zukünftige Erweiterung und für die Herstellung der Zweiten und entsprechend auch für die Dritte Durchquerung der U-Bahn dienen könnte.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Literaturverzeichnis

#### 7.1.1 Fachliteratur

- [1.1] APEL, Fritz: Tunnel mit Schildvortrieb, Werner Verlag, Düsseldorf 1968
- [1.2] BAUER, Hermann: Baubetrieb 1 - Einführung, Rahmenbedingungen, Bauverfahren, 2. Auflage, Springer – Verlag Berlin, Heidelberg 1992
- [1.3] BENNETT, David: Metro - Die Geschichte der Untergrundbahn, 1. Auflage, Transpress Verlag, Stuttgart 2005
- [1.4] BRATOEV, Stoyan: Extension of the Sofia Metro, Verlag: Akzent 96, Sofia 2008
- [1.5] BRATOEV, Stoyan: Sofiotische U-Bahn, Verlag: Nota Bene! Communications, Sofia 2004
- [1.6] BUJA, Heinrich-Otto: Handbuch des Spezialtiefbaus, 2 Auflage, Werner Verlag 2001
- [1.7] DACHROTH, Wolfgang: Baugeologie in der Praxis – eine ingenieurtechnische Anleitung für Geowissenschaftler, Springer – Verlag Berlin, Heidelberg 1992
- [1.8] DIETZEL, Martin; SCHUBERT, Wulf; SCHWEIGER, Helmut; SEMPRICH, Stephan: Tunnel in offener Bauweise, Beiträge zum 20. Christian Veder Kolloquium, Heft 26, Graz: Technische Universität Graz, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, 2005
- [1.9] DÖRKEN, Wolfram; DEHNE, Erhard: Grundbau in Beispielen, Teil 3, Werner Verlag, Düsseldorf 2001
- [1.10] EICHLER, Klaus und 14 Mitautoren; Spezialtiefbau – Erkundung und Ausführung – Technik und Umwelt – Methoden und Auswirkungen – Baustoffe und Verfahren, 2. Auflage, Expert Verlag, Renningen 1999
- [1.11] GIRMSCHIED, Gerhard; Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2008
- [1.12] GERLICH, Rudolf: Wiener U-Bahn, Wien 1980
- [1.13] GRABE; Jürgen: Bodenmechanik und Grundbau, 3. Auflage, Scharlau Druckerei, Hamburg
- [1.14] GRONECK, Christoph: Metros in Frankreich, 1. Auflage, Robert Schwandl Verlag, Berlin 2006
- [1.15] HAVERS, Harold C.P.; ORWAT, Fritz: Die Untergrundbahnen der Welt, MVG Moderne Verlag -GmbH, München 1967
- [1.16] HENNINGSEN, Dierk: Geologie für Bauingenieure, 2. Auflage, Springer – Verlag, Berlin 1992
- [1.17] HUDELMAIER, Klaus; HARTMUT, Kufner: Spezialtiefbau, 1. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2009
- [1.18] IVANCHEV, Iliya: Unterirdischer Verkehrsbau – Notizen, \*pdf, Sofia, 2004

- [1.19] JODL, Hans Georg: Studienblätter zur Vorlesung „Bauverfahren im Tiefbau“. Technische Universität Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, 2008
- [1.20] JODL, Hans Georg: Studienblätter zur Vorlesung „Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau“. Technische Universität Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, 2007
- [1.21] JODL, Hans Georg: Studienblätter zur Vorlesung „Bauverfahrenstechnik“. Technische Universität Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, 2006
- [1.22] MAIDL, Bernhard: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band I: Konstruktionen und Verfahren, Verlag Glückauf GmbH, Essen 1984
- [1.23] MAIDL, Bernhard: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band II: Grundlagen und Zusatzleistungen für Planung und Ausführung, Verlag Glückauf GmbH, Essen 1988
- [1.24] MAIDL, Bernhard; HERRENKNECHT, Martin; ANHEUSER, Lothar: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1995
- [1.25] MAYBAUM, Georg; MIETH, Petra; OLTMANN, Wolfgang; VAHLAND, Rainer: Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2009
- [1.26] NORBERT, Peter: Lexikon der Bautechnik, C. F. Müller Verlag, Heidelberg 2001
- [1.27] OGANESOV, Georgii; IVANOV, Stoyan; GADJEV, Ivan: U-Bahnbau, Verlag Technika, Sofia 1990
- [1.28] SCHNELL, Wolfgang: Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben, 2. Auflage, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1995
- [1.29] SCHWANDL, Robert: Hamburg U-Bahn und S-Bahn Album, 1. Auflage, Robert Schwandl Verlag, Berlin 2004
- [1.30] SCHWANDL, Robert: Metros in Britain, 1. Auflage, Robert Schwandl Verlag, Berlin 2006
- [1.31] SCHWANDL, Robert: Schnellbahnen in Deutschland, 1. Auflage, Robert Schwandl Verlag, Berlin 2007, S. 6
- [1.32] SEITZ, Jörn; SCHMIDT, Heinz: Bohrpfähle, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2000
- [1.33] SMOLTCHYK, Ulrich: Grundbau Taschenbuch, Teil 1, 3. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin/München/Düsseldorf 1980
- [1.34] STRIEGLER, Werner: Tunnelbau; 1. Auflage; Verlag für Bauwesen GmbH Berlin; München 1993
- [1.35] TRANKA, Lyuben: Tunnel, Verlag Technika, Sofia 1964
- [1.36] TRIANTAFYLIDIS, Theodoros: Planung und Bauausführung im Spezialtiefbau, Teil I: Schlitzwand- und Dichtwandtechnik, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2004, S. 1-230
- [1.37] Ausschreibungsunterlagen U-Bahn Sofia; Firma „Metropolitan“
- [1.38] Ausschreibungsunterlagen U-Bahn Sofia; Firma „Geotechmin“
- [1.39] Ausschreibungsunterlagen U-Bahn Sofia; Firma „Taisei Corporation“; Jahr:2006

### 7.1.2 Webseiten

- [2.1] [http://de.wikipedia.org/wiki/Metropolitan\\_Sofia](http://de.wikipedia.org/wiki/Metropolitan_Sofia), 2.11.2009
- [2.2] <http://metropolitan.bg/bg/gallery/view/13.html>
- [2.3] <http://www.baulexikon.de/baushop/baubook/bookindex.htm>
- [2.4] <http://www.brueckner-grundbau.de>
- [2.5] [http://www.hydromat.bg/bg/hydroizolacii\\_03.html](http://www.hydromat.bg/bg/hydroizolacii_03.html)
- [2.6] <http://www.igb.tu-bs.de/veroeff/cadfem03.pdf>, 20.11.2009
- [2.7] [www.alwag.com](http://www.alwag.com), 14.04.2010
- [2.8] [www.fh-giessen-friedberg.de](http://www.fh-giessen-friedberg.de), 12.03.2010
- [2.9] [www.praevention.lsv.de](http://www.praevention.lsv.de), 16.10.2009

## 7.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Hauptschema des U-Bahnnetzes Sofia 2009 [2.2] .....	16
Abb. 2: Das Sofioter U-Bahnnetz 2009 [2.2] .....	18
Abb. 3: U-Bahnstrecke: MS „Slivnitsa“ – MS „Serdika“; völliger Ausbau in offener Bauweise [2.2] .....	25
Abb. 4: Die ersten zwei hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in Baugruben mit freien Böschungen, II Durchquerung [2.2] .....	28
Abb. 5: Die ersten drei hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in Baugruben mit freien Böschungen, I Durchquerung [2.2] .....	28
Abb. 6: Baugrubenaushub mit geringerer Sicherung [1.13] .....	32
Abb. 7: Sicherheitsabstände von Fahrzeuge, Baumaschinen oder Geräten bei Baugruben mit freien Böschungen [2.9] .....	33
Abb. 8: Arbeitsraumbreite bei Baugruben mit freien Böschungen [2.9] .....	34
Abb. 9: Die erste und einzige völlig hergestellte Metrostation der sofiotischen U-Bahn in einer Baugrube mit temporärer Baugrubenumschließung, I Durchquerung [2.2] .....	38
Abb. 10: Baggergeräte mit Ausrüstung zum Rammen oder Rütteln [1.17] .....	42
Abb. 11: Trägerverbau Typ „Berliner Verbau“ .....	42
Abb. 12: Holzschnittformen und Kantholzauflage (Detail) [1.6] .....	43
Abb. 13: Abstützung des Trägerverbau .....	44
Abb. 14: Die sechs hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung - Schlitzwand, I Durchquerung [2.2] .....	49
Abb. 15: Leitwände, MS „Kl. Ochridski“ [1.37] .....	52
Abb. 16: Reihenfolge der Lamellenherstellung .....	53
Abb. 17: Aushub mit Greifer unter Zugabe von Stützflüssigkeit [1.17] .....	54
Abb. 18: Mechanischer Schlitzwandgreifer (links), hydraulischer Schlitzwandgreifer (mitte), Schlitzwandfräse (rechts) [1.17] .....	55
Abb. 19: Einbringen der Abschaltrohre [1.17] .....	56
Abb. 20: Einstellen der Bewehrung [1.17] .....	56
Abb. 21: Dübelkasten im unteren Bereich einer Schlitzwand, MS „Kl. Ochridski“ [1.37] .....	57
Abb. 22: Einbringen des .....	57
Abb. 23: Aushubarbeiten, MS „Kl. Ochridski“ [1.37] .....	59
Abb. 24: Aushubarbeiten unter dem Niveau der Abstützung, MS „Kl. Ochridski“ [1.37] .....	59
Abb. 25: Schlitzwand: zulässige und unzulässige Erscheinungsformen [1.25] .....	60
Abb. 26: Dachkonstruktion der MS „Kliment Ochridski“ [1.37] .....	61
Abb. 27: Verlegte Abdichtungsschicht [2.4] .....	61
Abb. 28: Die erste hergestellte Tunnelstrecke der sofiotischen U-Bahn in einer Baugrube mit verbleibender Baugrubenumschließung - Bohrpfahlwand, I Durchquerung [2.2] .....	65
Abb. 29: Tangierende Bohrpfahlwand .....	67
Abb. 30: Aufgelöste Bohrpfahlwand .....	67
Abb. 31: Überschnittene Bohrpfahlwand .....	68
Abb. 32: Bezeichnungen am Bohrpfahl und Pfahlarten [1.17] .....	69
Abb. 33: Ausrüstung Kellybohren [1.17] .....	70
Abb. 34: Kellybohren eines verrohrten Bohrpfahles [1.17] .....	71
Abb. 35: Abstützen gegenüberliegender tangierender Bohrpfahlwänden mit Gurte und Steifen aus Stahl, U-Bahn Sofia [2.4] .....	73
Abb. 36: Die ersten zwei hergestellten Metrostationen der sofiotischen U-Bahn in halboffener Bauweise, I Durchquerung [2.2] .....	76

Abb. 37: Halboffene Bauweise II Art: mehrfache Aussteifungen durch Zwischendecken mit laufendem Baufortschritt.....	77
Abb. 38: Halboffene Bauweise I Art: einfache Aussteifung der Seitenwände durch die Decke .....	77
Abb. 39: Voraushub und Schlitzwandherstellung.....	78
Abb. 40: Aushub bis unter erste Decke, MS „Vasil Levski Stadion“ [1.38] .....	79
Abb. 41: IBO – Injektionsbohranker [2.9] .....	80
Abb. 42: Einbau der ersten Decke, MS “Vasil Levski Stadion” [1.38] .....	80
Abb. 43: Einbau der Zwischendecke mittels Deckenschalung, MS „Vasil Levski Stadion“ [1.38].....	81
Abb. 44: Tunnelstrecke zwischen MS „№10“ und MS „№11“, II Durchquerung [2.2] .....	82
Abb. 45: Erster und zweiter Konstruktionsteil des Tunnelbauwerks [1.38] .....	82
Abb. 46: Teilweise Sperrung des Straßenverkehrs und Voraushub im ersten Bauabschnitt [1.38].....	83
Abb. 47: Schlitzwandherstellung im ersten Bauabschnitt [1.38] .....	83
Abb. 48: Herstellung der Deckenplatte im ersten Bauabschnitt [1.38].....	84
Abb. 49: Teilweise Sperrung des Straßenverkehrs und Voraushub im zweiten Bauabschnitt [1.38]...	85
Abb. 50: Schlitzwandherstellung im zweiten Bauabschnitt [1.38] .....	85
Abb. 51: Herstellung der Deckenplatte im zweiten Bauabschnitt [1.38] .....	86
Abb. 52: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen [1.11].....	90
Abb. 53: Die ersten zwei hergestellten Tunnelstrecken der sofiotischen U-Bahn in geschlossener Bauweise: Schildvortrieb [2.2].....	91
Abb. 54: Einsatzbereiche von Tunnelvortriebsmaschinen nach geotechnischen und hydrologischen Aspekten [1.11] .....	93
Abb. 55: Der Erddruckschild, U-Bahn Sofia, I Durchquerung [1.39] .....	94
Abb. 56: Konzentrische Laufbahnen von den Abbauwerkzeugen der sofiotischen Schildmaschine mit Vollschnittabbau [1.39].....	94
Abb. 57: Methoden zur Ortsbruststützung [1.20], [1.11].....	95
Abb. 58: Einsatzbereiche des Erddruckschildes [1.11].....	95
Abb. 59: Prinzip der Erddruck-Stützung der Ortsbrust [2.6] .....	96
Abb. 60: Technisches Bild des sofiotischen Erddruckschildes, I Durchquerung [1.39] .....	96
Abb. 61: Detailliertes technisches Bild des sofiotischen Erddruckschildes, I Durchquerung [1.39].....	97
Abb. 62: Hauptabmessungen des sofiotischen Erddruckschildes, I Durchquerung [1.39] .....	98
Abb. 63: Schneidrad des sofiotischen Erddruckschildes, I Durchquerung [1.39].....	99
Abb. 64: Zahnarten des sofiotischen Schneidrads [1.39].....	101
Abb. 65: Zahnanordnung vor der Nabe des sofiotischen Schneidrads [1.39] .....	102
Abb. 66: Abbaukammer des sofiotischen Schneidrades [1.39].....	103
Abb. 67: Schnitt durch den Mittelschuß des sofiotischen Erddruckschildes [1.39].....	105
Abb. 68: Schematische Darstellung der hergestellten Tunnelstrecken der sofiotischen U-Bahn in geschlossener Bauweise mit Schildvortrieb .....	106
Abb. 69: Startschacht, MS №9 [1.37] .....	107
Abb. 70: Der sofiotische Erddruckschild in dem Startschacht [1.37] .....	108
Abb. 71: Begriffsdefinitionen der Tübbingabmessungen .....	109
Abb. 72: Schematische Darstellung von: Tunnelring, Schlussstein, Tübbingquerschnitt, Ringgeometrie, U-Bahn Sofia, I Durchquerung [1.37] .....	110
Abb. 73: Tunnelröhre mit fertiggestellter Tübbingauskleidung, U-Bahn Sofia [2.4] .....	112
Abb. 74: Schütterzug, U-Bahn Sofia [1.39] .....	113
Abb. 75: Einfahrt des sofiotischen Erddruckschildes in den Zielschacht [1.37].....	114
Abb. 76: Detail Wand/Sohle: Selbstklebende Abdichtung „Prepufe“ [2.5].....	123
Abb. 77: Detail Wand/Sohle: Abdichtung „Dual seal R“ [2.5].....	124
Abb. 78: Detail Wand/Sohle: Abdichtung „Dual seal LG“ [2.5].....	124

Abb. 79: Detail Wand: Abdichtung „Bituthene 4000“ [2.5] .....	125
Abb. 80: Fugenband „Serviseal“, Detailabmessungen [2.5] .....	126
Abb. 81: Fugenband „Serviseal 240“, Detailabmessungen [2.5] .....	126
Abb. 82: Fugenband „Bentorub“, Detail Wand/Sohle [2.5].....	127
Abb. 83: Fugenband „Colflex HN“ [2.1] .....	127

### 7.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Die ersten U-Bahn Strecken in Europa.....	11
Tab. 2: U-Bahnstationen und –strecken, Technologie der Bauausführung.....	19
Tab. 3: Schichten des Sofioter Untergrundes.....	23
Tab. 4: Maßgebende Bodeneigenschaften bei der Wahl der optimalen Baugrubensicherung.....	26
Tab. 5: Grundwasserverhältnisse und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung.....	26
Tab. 6: Platzverhältnisse und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung.....	27
Tab. 7: Verformbarkeit der Verbauart und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung .....	27
Tab. 8: Umweltschutz und die Wahl der optimalen Baugrubensicherung.....	27
Tab. 9: Vor- und Nachteile der Baugruben mit freien Böschungen.....	29
Tab. 10: Maximaler Böschungswinkel nach der Art des Bodens [1.13].....	32
Tab. 11: Vor- und Nachteile der Baugruben mit temporärer Baugrubenumschließung Trägerverbau .	39
Tab. 12: Vor- und Nachteile der Abstützung und Rückankerung.....	45
Tab. 13: Vor- und Nachteile der Baugruben mit verbleibender Baugrubenumschließung - Schlitzwand .....	50
Tab. 14: Vor- und Nachteile einer Bohrpfahlwand.....	66
Tab. 15: Vor- und Nachteile der halboffenen Bauweise .....	77
Tab. 16: Bauverfahren für Tunnel in geschlossener Bauweise .....	89
Tab. 17: Vor- und Nachteile des Schildvortriebs.....	92
Tab. 18: Abbauwerkzeugeinsatz [1.19].....	100
Tab. 19: Bauarten der Schneidradlagerung [1.11] .....	102