

GRUPPE GEOTECHNIK GRAZ



Herausgeber: M. Dietzel, S. Kieffer, W. Schubert, H.F. Schweiger, S. Semprich

Heft 33

Beiträge zum 23. Christian Veder Kolloquium

**SONDERMASSNAHMEN BEI DER ERSTELLUNG
INNERSTÄDTISCHER INFRASTRUKTURBAUTEN**

Redaktionelle Bearbeitung:
Institut für Bodenmechanik und Grundbau

GRAZ, 27. und 28. März 2008

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ 2008

Sondermaßnahmen beim Light Rail Zagreb Projekt

D. Kolić¹⁾, T. Ivšić²⁾

¹⁾Neuron Consult ZT, Pasching

²⁾Faculty of Civil Engineering, University Zagreb

1 Einführung

Die Stadt Zagreb weist am Übergang in das 21. Jahrhundert 800 000 Einwohner auf. Die urbane Entwicklung der Stadt geschah im Wesentlichen in drei Phasen: Ende des 19. Jahrhunderts erfolgte die Entwicklung des Donji Grad, zwischen den beiden Kriegen dehnte sich die Stadt bis zur Save aus und nach 1950 auch über die Save hinaus. In jeder dieser Phasen wurden Überlegungen zu Verkehrszonen und entsprechenden Kapazitäten angestellt. Allerdings hat die intensive Entwicklung des Individualverkehrs der letzten 20 Jahren alle Erwartungen übertroffen. Der Stadt Zagreb fehlt es heutzutage an ausreichend breiten Straßen, Parkplätzen und Garagen. Auch der öffentliche Verkehr hat sich nicht entsprechend weiterentwickelt und wird somit den heutigen Bedürfnissen der Stadt Zagreb nicht gerecht. Die Fahrzeuge bewegen sich innerhalb der Stadt nur mit einer niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeit und stecken ständig in Staus. Deshalb wurden im vergangenen Jahrzehnt verschiedene Projekte zur Lösung der Verkehrsproblematik im Einklang mit den Entwicklungsplänen der Stadt erarbeitet. Die „Verkehrsstudie 1999“ und das neue Stadtentwicklungsprojekt „GUP 2003“ haben neue Lösungen für das Verkehrsproblem der Stadt durch die Entwicklung eines Light Rail Projektes aufgezeigt. Auf diese Weise soll der öffentliche Verkehr in Zagreb zukünftig gestärkt werden.

2 Das Light Rail Zagreb Projekt

Das Light Rail Projekt (LRP) basiert auf dem Stadtentwicklungsprojekt „GUP 2003“. Es soll das Angebot des öffentlichen Verkehrs stärken und damit den Stadtverkehr entlasten und in bedeutendem Ausmaß die Anzahl der täglichen Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln erhöhen. In diesem Sinn wurden neben dem LRP auch weitergehende Varianten entwickelt und analysiert. Einigkeit bestand darin, dass grundsätzlich die beiden Hauptrichtungen Ost-West und Nord-Süd (Abb. 1) städteplanerisch entwickelt werden sollten. Dafür zog man insgesamt 4 Linienvarianten in Betracht:

- Variante 0: Entwicklung von Light-Rail Linien mit Richtungen entsprechend dem „GUP 2003“ und einer Anbindung an das ZET (Straßenbahn) Netz.
- Variante 1: Vereinfachtes Light-Rail System bei Beibehaltung der Light-Rail Führungstechnologie und einer Anbindung an das ZET (Straßenbahn) Netz.
- Variante 2: Linienführung und Light-Rail System wie in Variante 1 mit einer Anbindung an das HZ (Eisenbahn) Netz.
- Variante 3: Entwicklung von Light-Rail Linien identisch mit den ZET Linien und gleichzeitiger Anbindung an das ZET (Straßenbahn) Netz.

Im Grundriss war man bemüht, die Elemente der LRP Linien innerhalb der Grenzen der vorgesehenen Korridore zu entwickeln. Diese waren zuvor unter Einbeziehung der Topographie, der Ergebnisse von Verkehrszählungen, der Berücksichtigung von Zwangsverkehrspunkten, einer Prognose zur zukünftigen Stadtentwicklung und der Bedürfnisse und Gewohnheiten der Reisenden festgelegt worden.

Darüber hinaus sollten die Linien größtenteils einer für den Fahrgast als angenehm empfundenen Linienführung mittels relativ großzügiger Kurvenradien entsprechen. Gleichzeitig sollte damit auch eine größere Durchschnittsgeschwindigkeit erreicht werden.

Für die Linienführung haben sich unterirdisch gelegene, auf der Geländeoberfläche verlaufende und oberhalb der Geländeoberfläche liegende Streckenabschnitte ergeben.

Unterirdisch geführte Streckenabschnitte beschränken sich vorerst auf den Bereich des Stadtzentrums, da hier aus Platzgründen eine oberirdische Linienführung ausscheidet.

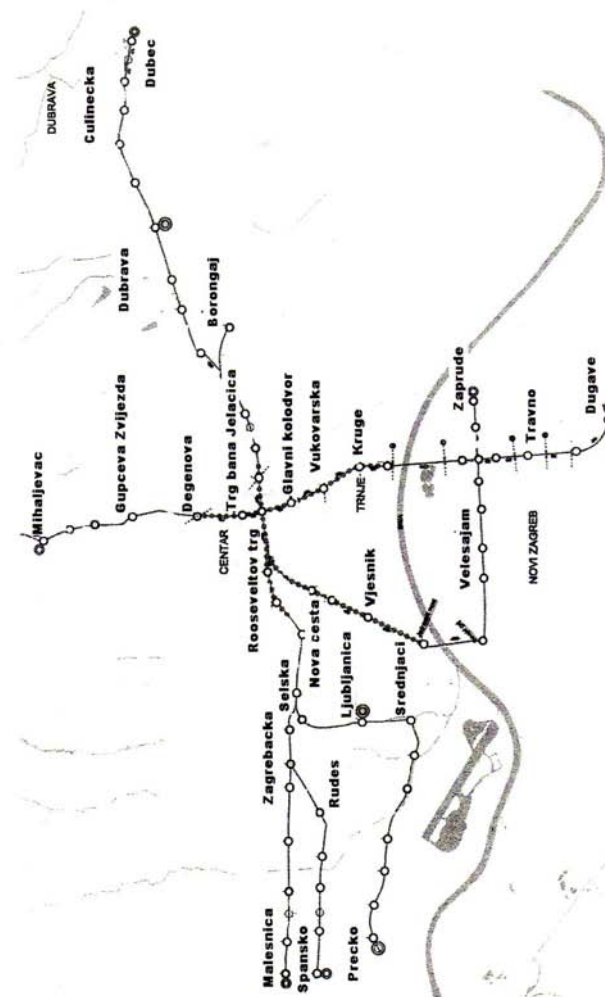


Abb. 1: Linienführung von einer der Varianten des LRP in Zagreb

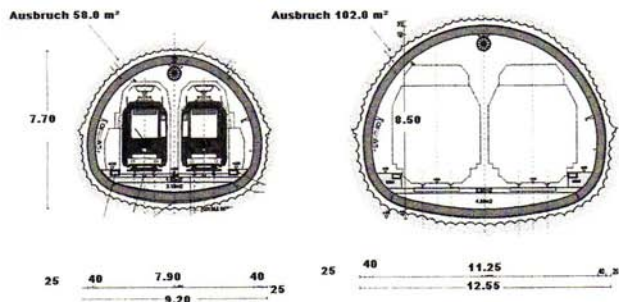


Abb. 2: Typische Tunnelquerschnitte für die Schmalspur (1000 mm) und Normalspur (1435 mm)

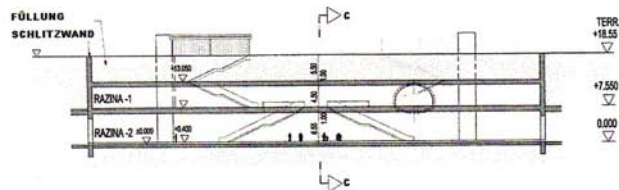


Abb. 3: Unterirdische Station Trg Bana Jelačića mit typischer Geometrie, hergestellt mittels "top-down" Methode

Andererseits verlaufen weitere Streckenabschnitte auf dem Niveau der Geländeoberfläche, da hier in den Baugrund einbindende Bauwerke eine unterirdische Linienführung nicht erlauben, wenngleich auch der Raum auf der Oberfläche nur ein Minimum an Freifläche für die Trassenführung erlaubt. Gleichzeitig sollte eine Anbindung der Linien an das bestehende öffentliche Verkehrsnetz (ZET oder HZ) realisiert werden.

Andere Streckenabschnitte werden auf Viadukten geführt. Insbesondere in den Stadtbereichen, in denen wiederum kein Platz für eine Linienführung in Höhe der Geländeoberfläche vorhanden ist und wo durch eine Aufständigung eine Beschleunigung des LRP Verkehrs erreicht werden kann. Solche Abschnitte erlauben - wie auch bei unterirdischen Strecken - eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit, da keine Behinderung durch anderen Verkehr gegeben ist.

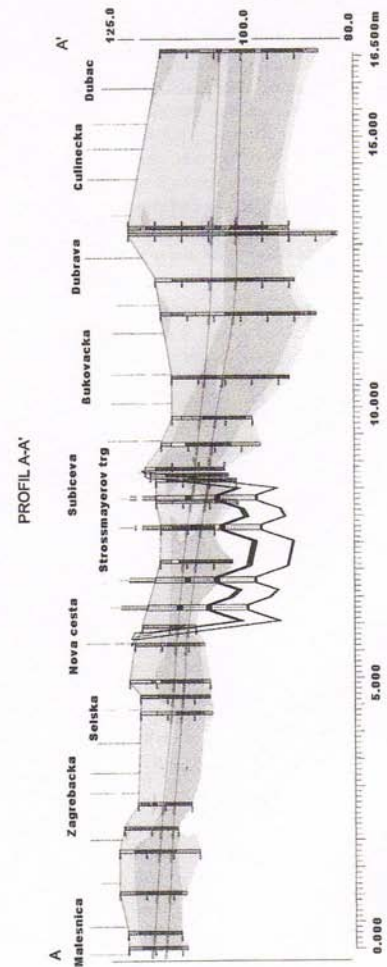


Abb. 4: Geologischer Längsschnitt der West-Ost Strecke des LRP (Variante 1)

Die Erarbeitung der geologischen Profile entlang der Hauptrichtungen Ost-West und Nord-Süd erfolgte mit Hilfe der Datenbasis aus dem GIS System, das von der Stadt Zagreb erstellt wurde. Die Darstellung der Linienführung im Grundriss und im Längsschnitt macht deutlich, dass insbesondere für die unterirdischen Strecken detaillierte Angaben über die Geologie und Hydrogeologie fehlen. Es musste deshalb bei der Darstellung des geologischen Profils auch auf Erfahrungen zurückgegriffen werden.

3 Geologische und hydrogeologische Randbedingungen

Das geplante Verkehrssystem beeinflusst nahezu die gesamte Stadt Zagreb. Die geplanten unterirdischen Arbeiten wirken sich dagegen hauptsächlich im Bereich des Donji Grad und zwei Bereichen südlich der Bahnstrecke aus.

Im Zusammenhang mit den Light-Rail Linien sind die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse von besonderem geotechnischen Interesse. Darüber hinaus ist es relevant im Zusammenhang mit zukünftig geplanten Objekten unterschiedlicher Art wie z. B. weitere Infrastrukturprojekte und der Nutzung von Grundwasser. Es wurden daher Prognoseprofile für den gesamten Einzugsbereich auf der Grundlage von bereits gesammelten und digitalisierten Daten des Projektes „EGPV“ (Evidenz und Nutzung von Kroatischen Grundwässern) und der geologischen Grundkarte (OGK) im Maßstab 1:100.000 (Blätter Zagreb und Ivanić grad) erstellt. Dabei wurden auch vorliegende Daten geotechnischer Elaborate einbezogen. Im Bereich der geplanten unterirdischen Streckenführung südlich der Bahnstrecke konnte auf Daten aus dem Projekt „EGPV“ zurück gegriffen werden, während sie für den Bereich nördlich der Bahnstrecke nicht vorlagen. Da für das Projekt auch Angaben über tiefer gelegene Bodenschichten von Interesse sind, wurden Elaborate von bereits ausgeführten tiefen Baugruben zusammengetragen. Dadurch konnte erreicht werden, dass Kenntnisse über den Untergrund bis in eine Tiefe von 20–30 m unterhalb der Geländeoberfläche vorliegen.

Die vorgesehenen Linien der Light-Rail führen durch Gebiete unterschiedlichen geologischen Alters. Größtenteils handelt es sich dabei um Gebiete von Zagrebako prigorje und Savska potolina, dessen Geländeoberfläche im nördlichen Teil bis zum Fuß des Berges Medvednica ansteigt. Der Bereich der geplanten unterirdischen Streckenführung liegt hauptsächlich im Bereich von Zagrebako prigorje und einem Teil der Savska potolina, während sich der nördliche Zweig zwischen Trg bana Jelacica und Degenova ulica bis in das Gebirge erstreckt.

Bei den oberflächennahen Bodenschichten handelt es sich in dem betrachteten Bereich hauptsächlich um alluviale Schichten. Charakteristisch für diese Schich-

ten sind abwechselnd fein- und grobkörnige Materialien je nach Niveau und Lage.

Der überwiegende Teil der Stadt Zagreb liegt in einer Region mit ausgeprägter tektonischer Aktivität innerhalb der relativ breiten Zone der Žumberak - Medvednica Störung. Die stärksten Erdbeben sind bisher im Gebirge Medvednica aufgetreten. Im Zentralbereich befindet sich die Hauptstörung, die so genannte "Ilički"-Störung. Sie verläuft von Westen kommend längs der Ilica über die Strassen Vlaška und Petrova nach Maksimir Richtung Norden. Darüber hinaus wurden weitere Störungen im innerhalb des Stadtgebietes erkundet. Für den Nachweis der Erdbebensicherheit werden Projekte im Gebiet der Stadt Zagreb in die 8. und 9. Zone der seismologischen Intensitätsskala eingestuft.

Die geplante unterirdische Linienführung bedingt Bauarbeiten (Tunnels) im Untergrund bis zu einer Tiefe von 12-25 m unterhalb der Geländeoberfläche sowie Arbeiten für Rampen und Zugänge zu den unterirdischen Stationen.

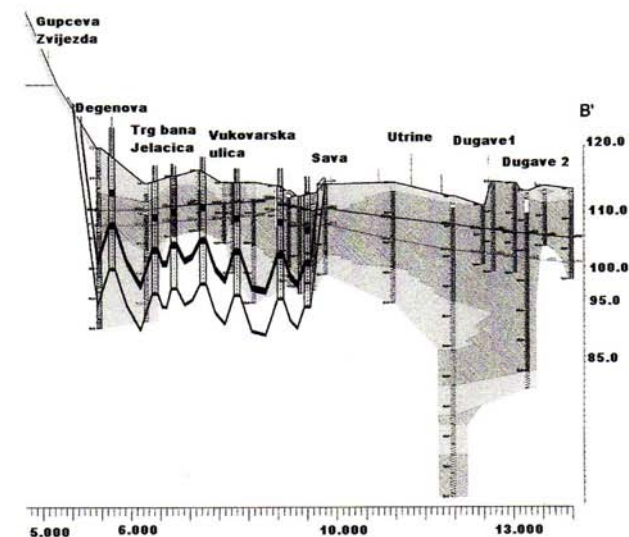


Abb. 5: Geologischer Längsschnitt der Nord-Süd Strecke des LRP (Variante 1)

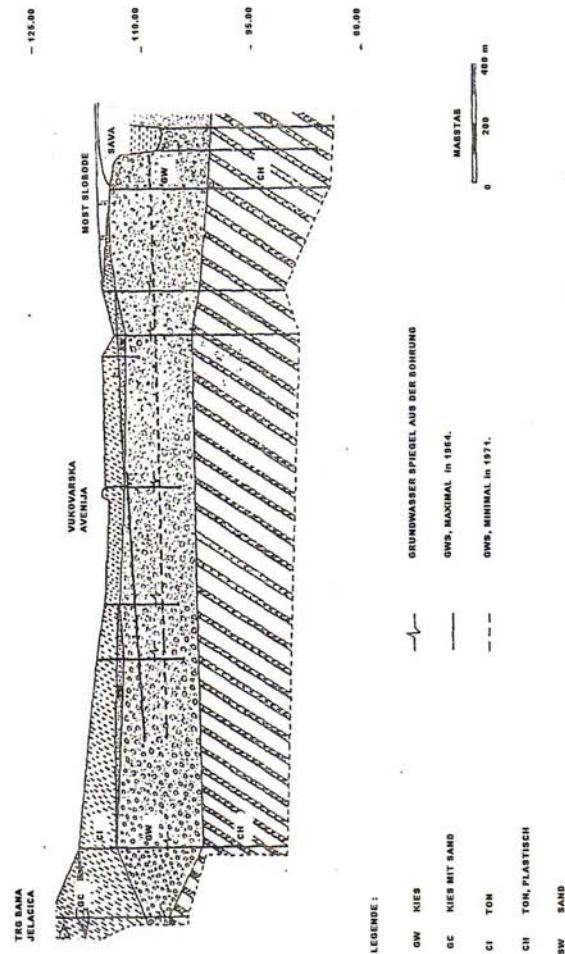


Abb. 6: Prognostiziertes geotechnisches Profil im Bereich der Stadtmitte in Nord-Süd Richtung aus dem Jahr 1974

Aus den geologischen Profildarstellungen ist ersichtlich, dass praktisch keine Kenntnis über die Baugrundsituation in Höhe der unterirdischen Trasse vorliegt. Informationen bis zu einer Tiefe der Tunnelachse sind im bestimmten Umfang für den Bereich Donji Grad bekannt, wo Baugruben mit größerer Tiefe ausgeführt wurden, während überhaupt keine Angaben über den Baugrund unterhalb einer Tiefe von 30 m vorliegen.

Generell kann zwischen zwei charakteristischen geotechnischen Situationen unterschieden werden:

- **Gebirgsgebiet**

Nördlich von Zrinjevac quert die Trasse die Zone mit der „Ilicki“ Störung. Oberflächennah steht hier eine Wechsellagerung aus Kies-, Schluff- und Tonschichten an. In größerer Tiefe hat der Ton hochplastische Eigenschaften. Eventuell ist dieser Horizont mit einem der Grundwasserstockwerke verbunden. Zwei relativ hoch gelegene Grundwasserstockwerke konnten in den durchlässigen Kiesschichten festgestellt werden. Sie sind wahrscheinlich mit dem System der Hangquellen verbunden.

- **Ebene des Donji Grad und der Bereich südlich der Bahnstrecke**

In diesen Gebieten bestehen die typischen Bodenschichten oberflächennah aus Schluff und Ton. Darunter liegt alluvialer Grobkies, dessen Tiefenlage von Osten Richtung Süden bis auf 15 m zunimmt (im Stadtzentrum schwankt die Tiefe zwischen 10 und 12 m), der von einem hochplastischen vorkonsolidiertem Ton bis in größere Tiefen unterlagert wird. Das Grundwasser innerhalb der Kiesschicht steht in Verbindung mit dem Fluss Save. Die Grundwasseroberfläche fällt mit zunehmender Entfernung von der Save.

Im Gebiet südlich der Strecke wurden grundsätzlich die gleichen Bodenschichten angetroffen, allerdings ist die obere Schicht dünner, die Grobkieschichten sind dicker und die Schichtgrenze zum darunter liegenden Ton liegt tiefer.

Die geplante Anordnung der Tunneln und der Stationen haben auch eine Auswirkung auf den Grundwasserhaushalt. Das bezieht sich insbesondere auf Gebirgsbäche, die von dem Berg Medvednica kommen und heute unterhalb der städtischen Strassen kanalisiert verlaufen. Potenzielle Problemzonen sind die Kreuzungsbereiche der Kanäle mit der LRP Trasse.

Zusammenfassend ergeben sich für eine unterirdische Linienführung folgende räumliche und ökologische Zwangspunkte:

- Vorhandenes Kanalisationssystem sowie kanalisierte Bäche.

- Bauwerke in Donji Grad, die unter Denkmalschutz stehen und die eine besondere Überwachung bezüglich Verformungen und Erschütterungen erfordern.
- Vorhandene unterirdische Garagen, deren Schlitzwandumschließungen bis in Tiefen von über 20 m reichen.

Brunnen zur Grundwasserentnahme seitens der Stadt liegen überwiegend südlich der Save sowie flussabwärts der geplanten Trassen. Folglich bedarf es auch für die auf der Oberfläche verlaufenden südlichen Streckenabschnitte zusätzlicher Maßnahmen um eine Beeinträchtigung der Grundwasserqualität zu vermeiden.

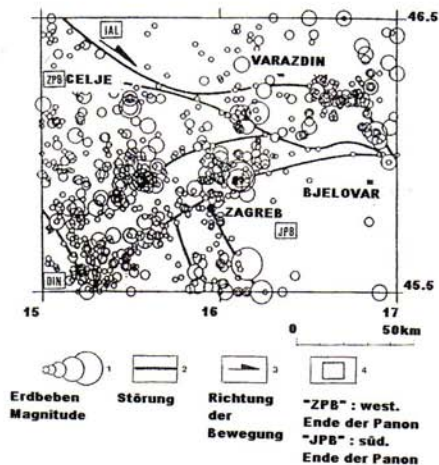


Abb. 7: Orientierungskarte (inoffiziell) seismologischer Zonen in Zagreb

Aus der Sicht der Geotechnik ergeben sich die wesentlichen Einwirkungen auf die geplanten untertägigen Bauwerke aus dem Erddruck und dem hohen Niveau des Grundwassers. Es ist vorgesehen die Bauwerke mittels Schlitzwänden (mit einer Einbindung in die Tonschicht), mit einer horizontalen Aussteifung durch die Deckenplatte und zusätzlichen Dauerankern für die Wände auszuführen. Bei geringeren Tiefen und nicht bindigen Böden ist als Alternative die Ausführung von Sondermaßnahmen mittels HDBV-Körpern vorgesehen (jet-grouting). Die gewählten Bautechnologien sollten Verformungen von Bauwerken und Setzungen der Geländeoberfläche minimieren.

4 Geplante Sondermaßnahmen

Für die in offener Bauweise herzustellenden Tunnelabschnitte sind für den Baugrubenverbau überwiegend Bohrpfahlwände und Schlitzwände vorgesehen. Bohrpfahlwände eignen sich insbesondere für tiefe Baugruben unmittelbar neben bestehenden Bauwerken. Hierbei wird der beim Ziehen der Verrohrung entstehende Ringspalt durch den eingebrachten Pfahlbeton kraftschlüssig und setzungsfrei ausgefüllt. Schlitzwände sind in Zagreb bereits sehr häufig ausgeführt worden. Auf Grund der aufwendigen Aufbereitung der Stützflüssigkeit ist diese Lösung wahrscheinlich gegenüber Bohrpfahlwänden unter Einbeziehung der Wirtschaftlichkeit nicht konkurrenzfähig.

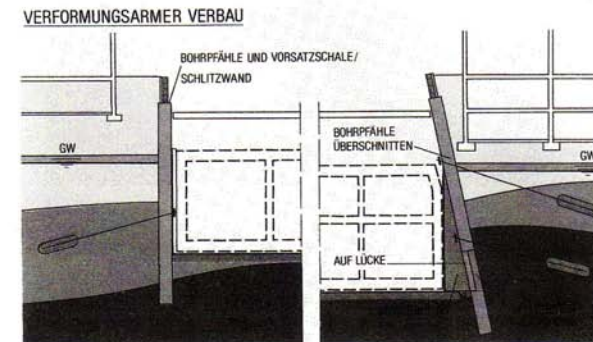


Abb. 8: Offene Bauweise: wasserdichte überschnittene Bohrpfähle oder Schlitzwände im Quartär, im Tertiär mit Spritzbetonausfächung

Der Anwendung der offenen Bauweise sind im dicht bebauten Innenstadtbereich, gerade in Städten wie Zagreb mit einem alten Stadtkern, Grenzen gesetzt. Deshalb müssen für Zagreb geeignete Methoden der geschlossenen Bauweise entwickelt oder bekannte Methoden angepasst werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die geschlossenen Bauweisen, wie z. B. Spritzbeton- oder Maschinenvortriebe, auf Grund der Vermeidung einer Beeinträchtigung der Anlieger, umfangreicher Verkehrsumleitungen und der Verlegung von Versorgungsleitungen zunehmend an Bedeutung erlangen. Durch die Anpassungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Tunnelbaumethoden in Kombination mit entsprechenden Sondermaßnahmen, wie z. B. Grundwasserabsenkung, Tunnelbau unter Druckluftbedingungen, Abdichtungsinjektionen, HDBV Pfähle und Bodenvereisung,

stellen diese untertägigen Bauweisen und in vielen Fällen auch auf Grund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen eine Alternative zur offenen Bauweise dar.

4.1 Grundwasserabsenkung

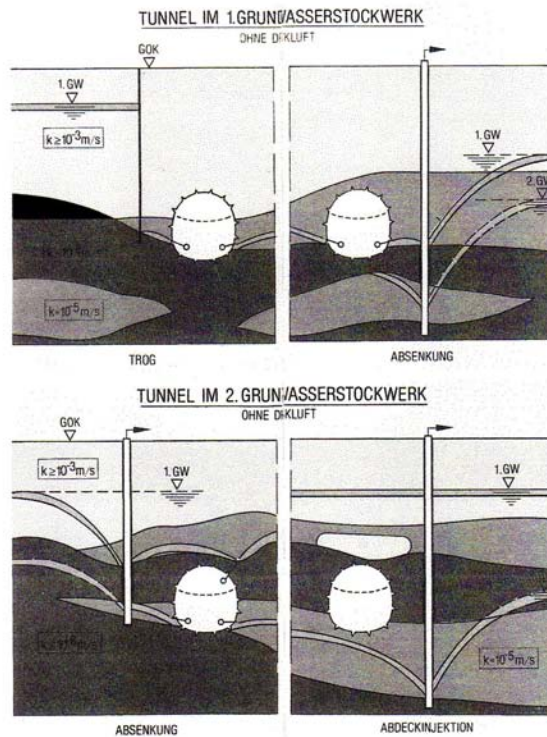


Abb. 9: Maßnahmen zur Grundwasserhaltung

Die Beherrschung des Grundwassers ist eine Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Spritzbetonvortrieben im Zagreber Untergrund. Für den Fall,

dass die Tunnelvortriebe im obersten quartären Grundwasserstockwerk liegen, ist eine Grundwasserabsenkung erforderlich. Unvermeidliche Restwasserzonen im Bereich der Tunnelfirste können durch den Einsatz von schräg nach vorne gerichteten Vakuumlanzen während des Vortriebs entwässert werden. Bei Tunnelvortrieben im Tertiär, bei denen eine ausreichend dicke und dichte Tonüberdeckung über der Tunnelfirste liegt, bleibt das oberste Grundwasserstockwerk unbeeinflusst. Die Wasserhaltungsmaßnahmen beschränken sich folglich in diesem Fall auf die vom Tunnel angeschnittenen Sandschichten. Allerdings muss die Dicke und die Dichtigkeit der Überdeckung laufend von einem gesicherten Vortriebsbereich aus durch schräg nach vorne und nach oben gerichtete Spionbohrungen überprüft werden.

Die geplanten Tunnel der Zagreber Light Rail bedingen vielfach eine Einschnürung bzw. Absperrung des Grundwasserstroms in vertikaler Richtung. Um die damit verbundene Erhöhung des Grundwasserspiegels zu vermeiden und um das natürliche Grundwasserregime weitestgehend zu erhalten, werden sehr wahrscheinlich auch Dükerkonstruktionen notwendig werden. Entsprechende Maßnahmen müssen bereits während der Bauzeit berücksichtigt werden. Bei längeren Baugruben sollten die Baugruben in einzelne, zeitlich aufeinander folgende Abschnitte unterteilt werden, um in den dazwischen liegenden Bereichen den Grundwasserstrom zu ermöglichen. Heute wird allerdings oft auch eine Lösung verfolgt, bei der das Grundwasser zwischen den vorweg hergestellten Dükerschächten gepumpt wird, um so die gesamte Baugrube ohne eine Beeinträchtigung des Grundwasserstroms in einem Zug herzustellen zu können. Damit lassen sich baubetriebliche Behinderungen und Bauzeitverlängerungen, die durch die zeitlich aufeinander folgende Bauausführung von Teilbaugruben entstehen würden, vermeiden.

4.2 Tunnelbau mit Druckluft

Eine bedeutende Neuerung im Katalog der Bauhilfsmassnahmen für Spritzbetonvortriebe war vor ca. 3 Jahrzehnten der Einsatz von Druckluft. Diese Methode wurde in München erstmals 1979 eingesetzt. Anschließend wurden mehrere Baulose mit dieser Technologie ausgeführt. Bei einer Lage des Tunnels im obersten Grundwasserstock kann bei dieser Bauweise auf eine Grundwasserabsenkung verzichtet werden, weil das Wasser durch den Luftüberdruck vom Tunnel ferngehalten wird. Wenn die Tunnelfirste allerdings in quartären Kiesen zu liegen kommt, muss auf Grund der größeren Luftdurchlässigkeit mit erheblichen Luftverlusten gerechnet werden. In diesem Fall erfordern wirtschaftliche Gründe eine Verringerung der Luftdurchlässigkeit, die durch eine dem Druckluftvortrieb vorausseilende Zement-Bentonit Injektion erreicht werden kann. Weist der Tunnel eine geringe Ton/Mergelüberdeckung auf, sollte der erforderliche Luftüberdruck dennoch nach dem obersten Grundwasserstockwerk bemessen werden. Damit

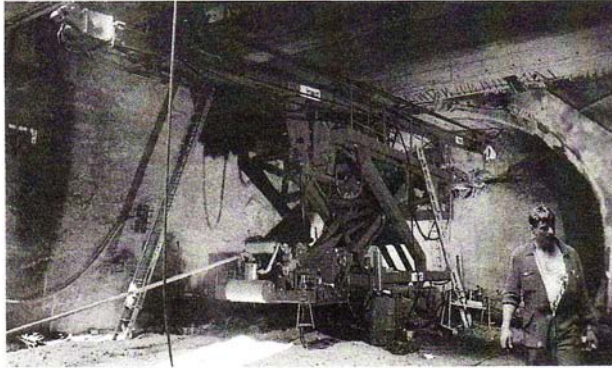


Abb. 12: Großgerät im Einsatz

4.5 Bodenvereisung

Als Ersatz für eine chemische Injektion wird die Bodenvereisung erwähnt, bei der das im Porenraum des Bodens gefrorene Wasser vorübergehend die Funktion der Abdichtung und Verfestigung übernimmt. Erfahrungen aus München haben gezeigt, dass diese Funktionen von mit flüssigem Stickstoff hergestellten Vereisungskörpern erfolgreich übernommen werden können. Bei diesem Verfahren werden Lanzen vertikal von obertage oder aus Kavernen heraus schräg nach oben gebohrt. Die Ausbildung des Frostkörpers ist dabei durch Temperaturfühler sorgfältig zu überwachen. Darüber hinaus wird eine Vermessung der Gefrierbohrungen erforderlich, um durch verlaufende Lanzen im Gefrierkörper entstandene Lücken mittels Zusatzbohrungen schließen zu können.

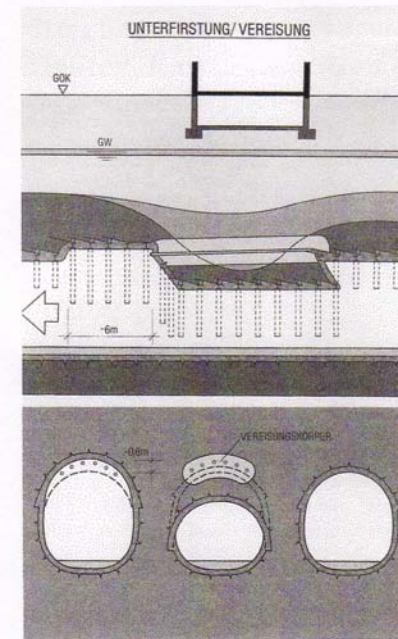


Abb. 13: Unterfirstung im Schutz einer Vereisung

5 Literaturverzeichnis

- Basch, O. (1980)
OGK i tumač, list Ivanić grad., Geološki zavod, Zagreb, 33-81.
- Hinkel W. et al.(1991):
Die U-Bahn Linie U3. MA-38 U-Bahn-Bau, Wien.
- Hochmuth W. et al. (1993)
25 Jahre U-Bahn-Bau in München. U-Bahn Referat der Landeshauptstadt München.

Šikić, K.; Basch, O.; Šimunić, A. (1972)

OGK i tumač, list Zagreb, L 33-80, Institut za geološka istraživanja, Zagreb

Špigelski, M. (1974):

Geotehnički i hidrogeološki podaci za centar Zagreba. Građevinar br 10-11, 319-325.