

# Primjeri podzemnih građevina u Austriji

Andreas Leitner, Davorin Kolić

## Ključne riječi

podzemne građevine, Garaža Mönchsberg, gradska željeznica u Salzburgu, podzemna željeznica Beča, gradnja, troškovi

## Key words

underground structures, Mönchsberg car park, city railway in Salzburg, metro in Vienna, construction, costs

## Mots clés

ouvrages souterrains, parking de Mönchsberg, voie ferrée urbaine à Salzbourg, Métro à Vienne, construction, coûts

## Ключевые слова

подземные сооружения, гараж Mönchsberg, городская железная дорога в Зальцбурге, Венская подземная железная дорога, строительство, расходы

## Schlüsselworte

Untergrundbauwerke, Garage Mönchsberg, Stadtbahn in Salzburg, U-Bahn von Wien, Ausbau, Kosten

A. Leitner, D. Kolić

Stručni rad

## Primjeri podzemnih građevina u Austriji

Prikazani su primjeri izgradnje triju podzemnih građevina u Austriji: Garaže Mönchsberg i gradske željeznice u Salzburgu te podzemne željeznice u Beču. Za obadvije građevine u Salzburgu opisani su problemi projektiranja i izvedbe te održavanja. Dani su i podaci o fazama gradnje te troškovi izgradnje i održavanja. Opisana je i gradnja dionice U2/2 podzemne željeznice u Beču s posebnim osvrtom na rješavanje vlasničkih prava. Prikazana je tehnologija proboja tunela u dva smjera.

A. Leitner, D. Kolić

Professional paper

## Examples of underground structures in Austria

The following three Austrian underground structures are presented: Mönchsberg car park and city railway in Salzburg, and metro in Vienna. Challenges relating to the design, construction and maintenance of the two facilities situated in Salzburg are described. The construction phasing data, as well as the construction and maintenance costs, are given. The construction of the metro segment U2/2 in Vienna is described, and a special emphasis is placed on the method that was used to deal with ownership rights. The two-directional tunnelling technology is presented.

A. Leitner, D. Kolić

Ouvrage professionnel

## Exemples des ouvrages souterrains en Autriche

Trois ouvrages souterrains autrichiens sont présentés: le parking souterrain de Mönchsberg et la voie ferrée urbaine à Salzbourg, ainsi que le métro à Vienne. Les problèmes rencontrés pendant les études, la construction et l'entretien sont décrits pour les deux projets situés à Salzbourg. Les données sur les phases de construction, et sur les coûts de construction et d'entretien, sont présentées. La construction du segment U2/2 de métro viennois est décrite, et l'accent est mis sur la méthode utilisée pour résoudre les droits de propriété. La technologie de creusement bidirectionnel de tunnels est présentée.

A. Leitner, D. Kolić

Отраслевая работа

## Примеры строительства подземных сооружений в Австрии

Приведены примеры строительства трех подземных сооружений в Австрии: гаража Mönchsberg остоб и городской железной дороги в Зальцбурге и подземной железной дороги в Вене. Описаны проблемы проектирования, выполнения работ и обслуживания обоих подземных сооружений в Зальцбурге. Приведены данные по фазам строительства и расходы строительства и обслуживания. Описано строительство участка U2/2 подземной железной дороги в Вене, освещено решение вопросов, связанных с правом собственности. Приведена технология прокладки туннеля в двух направлениях.

A. Leitner, D. Kolić

Fachbericht

## Beispiele von Untergrundbauwerken in Österreich

Dargestellt sind Beispiele dreier Untergrundbauwerke in Österreich: die Garage Mönchsberg und die Stadtbahn in Salzburg, sowie die U-Bahn in Wien. Für beide Bauwerke in Salzburg sind die Probleme des Entwurfs, der Ausführung und der Wartung beschrieben. Dargestellt sind auch die Angaben über die Phasen des Ausbaus, sowie die Kosten der Ausführung und Wartung. Man beschreibt auch den Bau der Teilstrecke U2/2 der U-Bahn in Wien mit besonderem Hinblick auf die Lösung der Eigentümerrechte. Dargestellt ist die Technologie des Tunnel-Vortriebs in zwei Richtungen.

Autori: Dipl. -Ing. **Andreas Leitner**, IGT ZT GmbH, Salzburg, Mauracherstr. 9, Austrija; mr. sc. **Davorin Kolić**, dipl. ing. građ., NEURON Zagreb d.o.o., Trnjanska 140, Zagreb

## 1 Uvod

Za Austriju se, usprkos "ostarjelosti" društva zbog smanjenja rađanja predviđa porast ukupnog broja stanovništva od sadašnjih osam na nešto više od devet milijuna stanovnika. Ovaj će se porast dogoditi prije svega u urbanim centrima, dok za pokrajine treba računati sa smanjenjem stanovništva. Za pokrajinski glavni grad Salzburg to je osobito važno, jer je njegov rast mnogo veći od svih pokrajinskih glavnih gradova Austrije. Od 33.000 stanovnika 1911. godine taj je broj nakon 1945. narastao na današnjih 150.000, čime je postao četvrti po veličini grad u Austriji, poslije Beča, Graza i Linza. U prostoru gravitacijskog područja grada Salzburga sada živi oko 220 000 stanovnika. Gradska se infrastruktura mora dakle postupno prilagođavati rastućim potrebama. S tim u svezi raste i važnost unutargradske podzemne gradnje.

Kao najvažniju primjenu treba navesti tunele i kaverne. Tuneli se pojavljuju na sljedećim objektima: željeznica, podzemna željeznica, ceste, veliki transportni vodovi (kanali i toplovodi). Kaverne su na objektima: željeznica, garaže, rezervoari pitke vode i skloništa.

U ovom će se radu opisati tri primjera podzemne gradnje u Salzburgu i Beču. To su:

- garaža Mönchsberg (Salzburg)
- gradska željeznica (Salzburg)
- podzemna željeznica Beča

## 2 Garaža Mönchsberg

### 2.1 Preduvjeti

Stari dio grada Salzburga, ne samo kao točka privlačnosti turista, nego i kao područje intenzivne trgovine, ne bi smio izgubiti na atraktivnosti. Za to je stvaranje dovoljnih mogućnosti parkiranja u neposrednom susjedstvu pješačke zone nužno potrebno. Topografska situacija Starog grada okruženog brdima već je rano iznjedrila ideju progona parkiranih automobila u kaverne.

Nekoliko brojčanih podataka o Salzburgu:

	150.000 stanovnika,
turizam	2 milijuna noćenja godišnje
javne podzemne garaže	8 komada
ukupno parkiranih mjesta	3.400

Samo postojanje brda za uspješan projekt garažne kaverne nije dovoljno. Za to su potrebni sljedeći osnovni uvjeti:



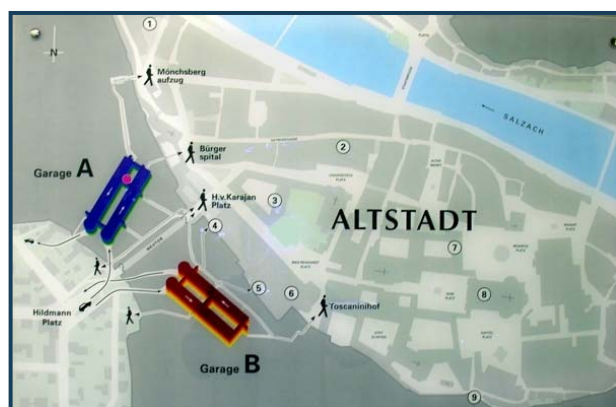
Slika 1. Situacija parkirnih garaža Salzburga

### Tehnički

- prirodno uzvišenje
- povoljni geološki rubni uvjeti
- priključak na cestovnu mrežu sposobnu za prilaz i odlaz

### Gospodarski

- neposredna blizina područja kojem treba parkiranje (pješačka zona i sl.)
- poticaj za korisnike trajnog parkiranja kao osnovu ekonomičnosti.

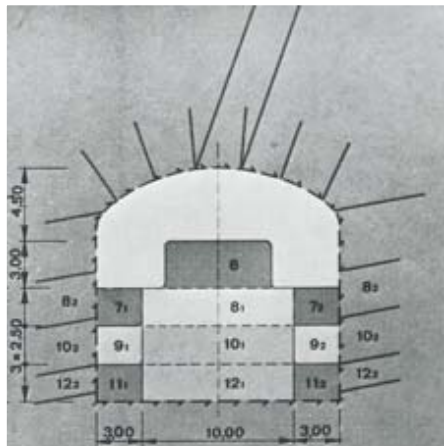


Slika 2. Položaj parkirnih kaverni s izlazima

### 2.2 Izgradnja garaže Mönchsberg

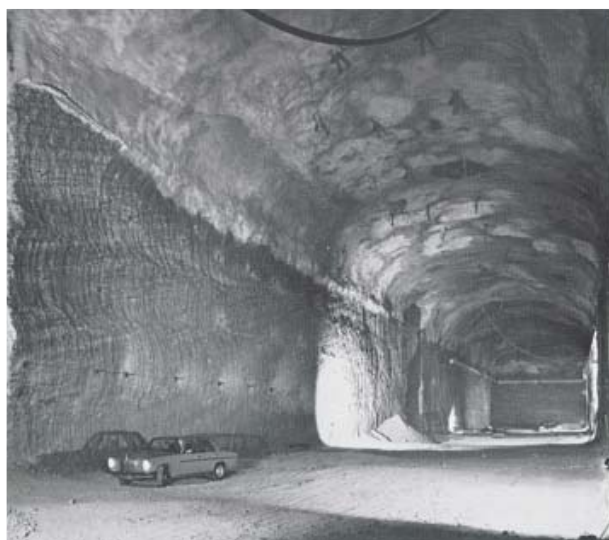
Podzemna je prostorija u tzv. Mönchsberg – konglomeratu. To je mlađe sedimentno stijenje nastalo kao posljedica povlačenja glečera na kraju posljednjega ledenog doba. Naknadno je povezivanje pri tome vrlo različito.

U osnovi je stijenje prikladno za iskop glodanjem, potreban je samo mali dio iskopa miniranjem. Problem za ispravnu lokaciju kaverni bila je činjenica da blok konglomerata leži plitko na građevno-tehnički nepovoljnom stijenju.



Slika 3. Redosljed iskopa

Iskop se obavljao po dijelovima presjeka. Za osiguranje u gornjem su dijelu svoda ugrađena prednapeta sidra, dok je po čitavom intradosu izveden sustav štapnih sidara uz mjestimičnu primjenu prskanog betona.



Slika 4. Kaverna u sirovom iskopu

Za iskop i osiguranje utrošeno je kako slijedi:

	sjever	sredina
iskop (m <sup>3</sup> )	65.000	75.000
prednapeta sidra (kom)	120	101
štapna sidra (kom)	2.784	1.616
prskani beton (m <sup>3</sup> )	1.500	1.100
beton (m <sup>3</sup> )	10.680	8.020

Unutrašnjost je izvedena obavljena je pomoću predgotovljenim armiranobetonskim elementima za parkirne platforme (proračunsko prometno opterećenje 3,5 kN/m<sup>2</sup>,

dodatni sloj betona 6 cm, širina 2,3 m), koji su na stupovima betonirani na licu mjesta usidreni u stijenje bokova kaverne. Tako su izbjegnute stupovi unutar gabarita parkirnih površina. Svijetla je visina između parkirnih platformi 2,2 m. Ukupna veličina parkirne površine iznosi za kavernu na sjeveru 16.000 m<sup>2</sup>, a za kavernu u sredini 16.900 m<sup>2</sup>.



Slika 5. Ugradnja predgotovljenih elemenata

Vrijeme izvedbe:

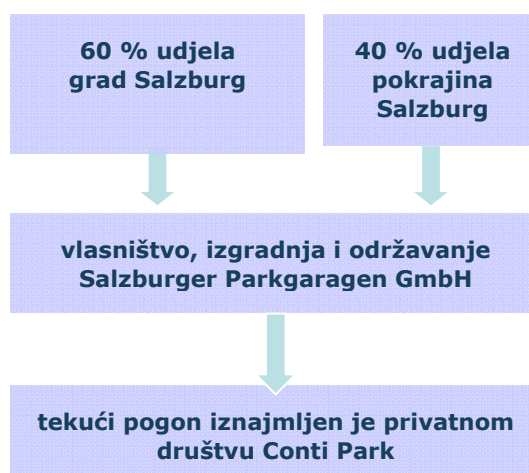
- početak građenja: siječanj 1974.
- dovršetak iskopa kaverne u sredini: kolovoz 1974.
- dovršetak iskopa kaverne na sjeveru: prosinac 1974.
- otvorenje: srpanj 1975.

Pregled troškova (baza cijena 1974.)

• građenje	15,26 milijuna eura	68 %
• oprema	6,54 milijuna eura	29 %
• primopredaja	0,74 milijuna eura	3 %
• ukupno:	22,54 milijuna eura	100 %

### 2.3 Organizacija, pogon i održavanje garaže

Na slici 6. prikazan je organigram s podacima o vlasništvu, izgradnji, održavanju i tekućem pogonu.



Slika 6. Organigram

Zbog veće veličine vozila koja sudjeluju u prometu trebalo je raspored parkiranja promijeniti tako da se širina parkirnog mjesta poveća sa 2,35 m na 2,5 m uz istodobno lagano zakošenje položaja parkiranja. Zbog toga je od planiranih 1.500 mjesta izgubljeno oko 100 mjesta.

Dvije su vrste parkirnih pristojbi: normalne cijene i posebne cijene.

Normalne su cijene:

- 0,40 eura na 10 minuta
- 14,00 eura na dan
- 120,00 eura mjesečno za stalne korisnike

Posebne su cijene pri kupovanju u Starom gradu ili pri posjeti svečanim igrama:

- 3,00 eura za 4 sata
- 5,00 eura za 8 sati

Razliku prema normalnim cijenama nadoknađuju:

- Društvo parkirnih garaža, jedna trećina
- Centralno-gradsko udruženje, dvije trećine

Ostali prihodi od reklamnih panoa, vitrina i sl. mogu se zanemariti.

Iskorištenje garaža je kako slijedi:

- Uskrs i vrijeme od 1. 7. - 15. 9.; 15. 11. - 6. 1. - 100 %
- preostalo vrijeme, od toga - 60 %
- stalni korisnici - 45 %
- kratkotrajno parkiranje - 55 %

Troškovi pogona i održavanja, rentabilnost su:

- za čisti parkirni pogon 50 eura mjesečno po parkirnom mjestu što odgovara 70 000 eura mjesečno
- za održavanje građevine sada 600 000 eura godišnje, a prvih 20 godina manje
- rentabilnost.

Pri čistom financiranju izvana bilo bi potrebno razdoblje od 30 godina za pokriće svih troškova.

### 3 Gradska željeznica u Salzburgu

Do kraja 2. svjetskog rata postojalo je u Salzburgu nekoliko tramvajskih linija, ali su kasnije postupno ukidane i zamjenjivane autobusnim prometom. Preostala je samo pruga tzv. "Lokalne željeznice" koja je spajala Salzburg s naseljima nizvodno uz rijeku Salzach. O produženju lokalne željeznice u središte grada bilo je posljednjih 20-ak godina nekoliko inicijativa i studija, ali bez realnih izgleda za ostvarenje. U međuvremenu su se stvari dalje razvijale tako da je širi prostor Salzburga obogaćen sustavom brze željeznice, pri čemu je upotrijebljena i pos-

tojeća željeznička infrastruktura koja obuhvaća više od polovice grada. Centralno je čvorište sustava brze željeznice Salzburški glavni kolodvor, koji je izvan stvarnog centra grada. Znači da je potrebno učinkovito prijevozno sredstvo koje će putnike brzo dovesti s glavnog kolodvora u centar i dalje prema južnom dijelu grada.

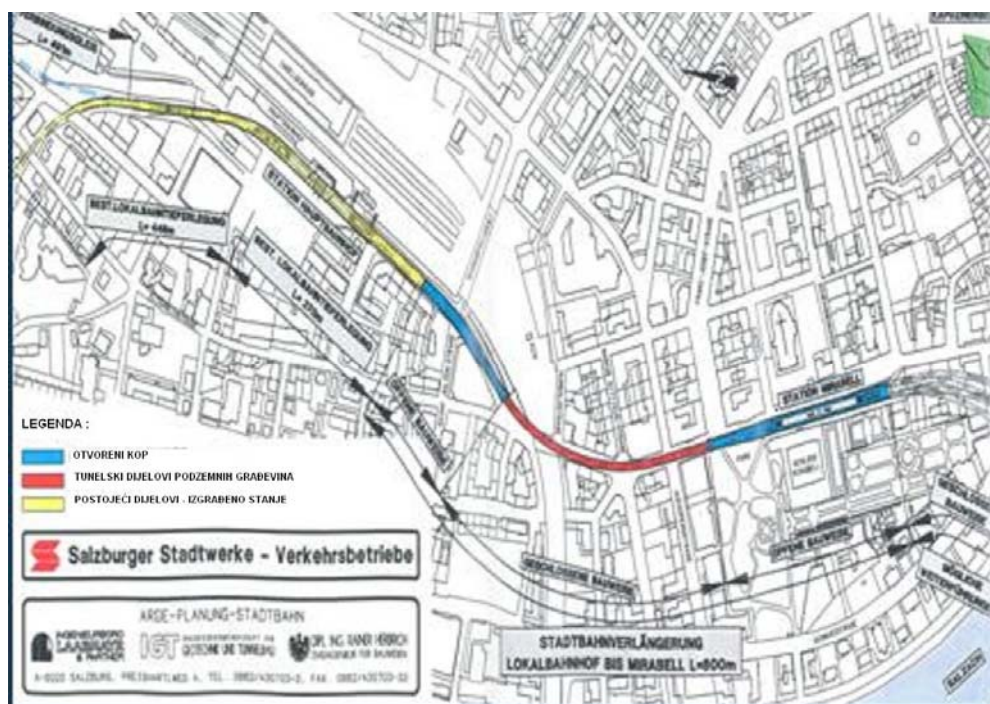
Kao rješenje nudi se lokalna željeznica koja ide podzemno kroz centar grada a na jugu dalje nadzemno usporedno s tamošnjom najvažnijom magistralnom cestom (Alpenstrasse). Ova je dionica duga oko 6.100 m. Prema prognozama na taj bi se način mogao povećati broj putnika oko 18 %, na 51. brze i gradske željeznice (prema modelu grada Karlsruhe) 000 putovanja dnevno. Kombinacijom može se očekivati porast broja putnika za 25 %. Prema današnjim spoznajama treba računati s troškovima od približno 400 milijuna eura.



Slika 7. Pregled linija brze i lokalne željeznice



Slika 8. Položajna skica gradske željeznice



Slika 9. Produljenje 1. faze: glavni kolodvor – Mirabell duljine oko 896 m

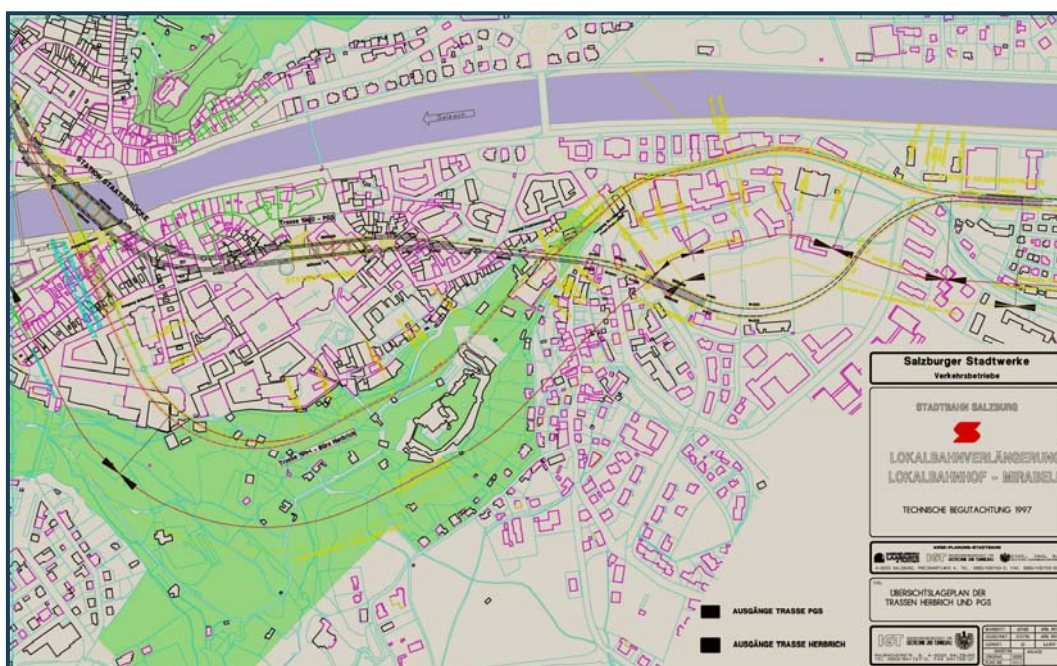
Realizacija se predviđa u nekoliko etapa:

1. glavni kolodvor – Mirabell 896 m
2. Mirabell – Nonntal duljine 1.715 m
3. Nonntal – Hellbrunner Brücke duljine 3.461 m.

Geotehnički uvjeti mogu se opisati kao ekstremno nepovoljni. Gotovo su sve građevine koje treba izvesti kao

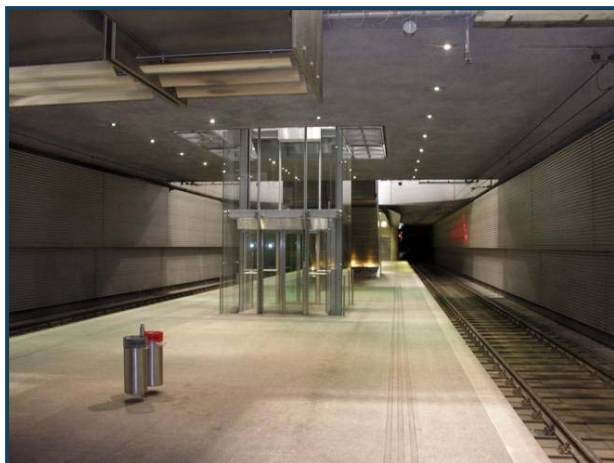
podzemne u vodom zasićenoj, nekonsolidiranoj prašinstoj glini ekstremno osjetljivoj na slijeganje.

Za sve je građevine koje treba izvesti u otvorenoj građevnoj jami (postaja, rampe i sl.) prema tome potrebna gradnja uz pomoć dijafragme. Kod tunelskih dionica moraju se, ovisno o duljini dionice, predvidjeti geotehnički postupci svladavanja podzemnih problema, kao što su primjena štita EPB (*Earth Pressure Balance*) pri čemu se sta-



Slika 10. Produljenje 2. faze: Mirabell – Nonntal, duljine 1.715 m

bilnost tla ispred glave stroja osigurava pritiskom već iskopanog materijala, ili u slučaju neizbježnog rudarskoga načina iskopa primjena pretlaka zraka s mjestimičnim injektiranjem radi brtvljenja ili zaleđivanjem.



Slika 11. Glavni kolodvor

Za atraktivnost neke gradske željeznice posebno je važno arhitektonsko oblikovanje građevina postaja. U tu se svrhu stvaraju otvoreni prostori perona uz primjenu staklenih pregrada, tako da putnik može vidjeti čitav prostor.

#### 4 Podzemna željeznica Beča - dionica U2/2

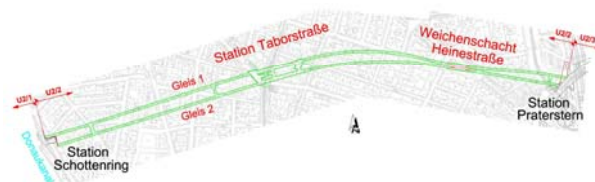
##### 4.1 Općenito

Podzemna željeznica grada Beča razvija se od 1975. U njezinom su sklopu podzemne linije označene slovom U s odgovarajućim brojem. Ukupno produženje pruge U2 je dulje od 10 km i realizirat će se u dvije faze. Prva faza počinje sa stanicom Schottenring, prolazi preko stanica Praterstern i Messe do stanice Stadion u duljini od oko 5 km. Dio te prve faze je otprilike 2 km dug spojni kolosijek do pogonskog kolodvora Erdberg. Kako ova nova linija podzemne željeznice predviđa izravnu vezu s bečkim stadionom Praterstadion pravodobnoje dovršena do europskog prvenstva u nogometu 2008. U drugoj će se fazi U2 produžiti preko Dunava do stanice Aspernstrasse.

Dionica U2/2 priključuje se na stanicu Schottenring koja leži ispod Dunavskog kanala. Obje podzemne cijevi za kolosijeke prolaze u duljini od oko 550 m gotovo u pravcu s osovinskim razmakom od približno 30 m do stanice Taborstrasse. Stanica Taborstrasse ima na oba kraja po jedno otvoreno okno (Taborstrasse i Novaragasse), kao i dvije rudarski izvedene stanične cijevi duljine oko 100 m. Stanica leži koso između križanja Taborstrasse, Obere Augartenstrasse i Novaragasse i nalazi se ispod gusto izgrađenog područja (dubina osi kolosijeka otprilike 18,5 m ispod terena). Bočni su putnički peroni opremljeni trima dizalima i pokretnim stu-

bama zbog brzog izlaska na površinu. Dalje od stanice Taborstrasse obje se kolosiječne cijevi nastavljaju u duljini od oko 400 m do ulice Heinestrasse gdje se gradi otvoreni skretnički šaht za dvostruki spoj kolosijeka. Šaht se ujedno koristi i kao izlaz za nuždu. Šaht Heinestrasse s duljinom od 55 m i širinom od 20 m služio je i kao centralna polazna točka za tunele u rudarskoj izvedbi. U priključku na šaht spuštaju se kolosiječni tuneli pod postojeću liniju U1 i nastavljaju se do stanice Praterstern. Završetak dionice U2/2 nalazi se na kontaktu s prvom dijafragmom postojeće U1 oko 250 m poslije šahta Heinestrasse.

Dionica U2/2 izvodila se uglavnom u zatvorenoj gradnji, pri čemu je za probijanje tunela primijenjena nova austrijska tunnelska metoda (NATM) uz snižavanje razine podzemne vode. U otvorenoj gradnji izvode se dijelovi stanice Taborstrasse i kolosiječni šaht u području Heinestrasse.



Slika 12. Pregledna skica dionice U2/2

Kako je produljenje linije podzemne željeznice od Schottenringa do Aspernstrasse veće od 10 km trebalo je prema zakonskim odredbama provesti analizu podnošljivosti za okoliš (APO). Osim načelnog odobrenja za cjelokupno produljenje pruge U2 trebalo je za predmetnu dionicu provesti još sedam detaljnih postupaka ishoda odobrenja. Rezultat je bio ukupno 241 službeni nalog u svezi s gradnjom i pogonom podzemne željeznice. Zbog tih je naloga i trajanja odgovarajućih postupaka fleksibilnost tijekom izvođenja osjetno ograničena, jer je i za minimalne izmjene trebalo obaviti dodatne postupke oko odobrenja u svezi s APO-om, sa svim pripadajućim stručnim mišljenjima, izvještajima i td. Tome treba dodati i opasnost od kašnjenja zbog eventualnih primjedbi.

##### 4.2 Rješavanje vlasničkih prava

Zbog skučenih prostornih uvjeta i urbane izgrađenosti, kako je već spomenuto, skretnički šaht Heinestrasse predviđen je kao ishodište svih radova na probijanju tunela. Nepovoljna je pritom činjenica da se šaht nalazi gotovo na samom kraju dionice, pa su se oba kolosiječna tunela i stanični tuneli među njima mogli „napasti“ samo s jedne strane. Na dionici U2/2 trebalo je proći ispod približno 100 objekata. Za prolaz ispod svake kuće trebalo je ishoditi tzv. *servitut* (pravo služnosti) jer prema austrijskom pravu vlasništva kuće ne pripadaju samo zemljište na kojem je izgrađena, nego i tlo ispod

parcele, teoretski do središta zemlje. Prema tome za svaki je zahvat ispod zgrade i pripadajuće parcele potreban pristanak vlasnika i kad na površini nema građevinskih zahvata. Taj se pristanak vlasnika unosi u javnu zemljišnu knjigu i označava kao *servitut*. U praksi rasprave s vlasnicima zemljišta u nekim slučajevima mogu biti vrlo dugotrajne, što u Beču ima najčešće sljedeće uzroke: nejasni vlasnički odnosi, veći broj suvlasnika, nerealna očekivanja glede visine odštete, osobni razlozi, špekulacije oko visine odštete zbog vremenske stiske investitora.

Mjere prisile u obliku eksproprijacije su doduše moguće, ali zahtijevaju mnogo vremena.

Ta je okolnost bitno utjecala na izbor metode probijanja tunela. Prije izrade studije utjecaja na okoliš trebalo je donijeti odluku treba li primijeniti NATM ili metodu štita. Razna ispitivanja varijanata nisu dala jednoznačan odgovor o prednosti jedne ili druge metode s tehničkog i ekonomskog stajališta. Na kraju je prihvaćeno probijanje po NATM-u sa snižavanjem razine podzemne vode zbog veće fleksibilnosti pri smetnjama i u odvijanju radova, kao na pr. zbog nedostajućeg *servituta*. Ta se prednost kasnije tijekom izvedbe pokazala vrlo značajnom.

Na početku građevinskih radova na dionici U2/2 Taborstrasse veći je dio *servituta* bio osiguran. Nakon desetljetnih iskustava u građenju bečke podzemne željeznice bio je postotak dobivenih *servituta* u uobičajenim granicama. Redoslijed prioriteta glede važnosti ishoda *servitutnog* sporazuma određen je prema trima kategorijama:

- parcele koje su iznad obje tunelske cijevi,
- parcele koje su iznad samo jedne tunelske cijevi,
- parcele za koje je potreban samo privremeni *servitut* za građevinske radove.

S izuzetkom dvaju objekta (Nickelgasse 5 i Herminen-

gasse 2) pribavljeni su svi još nedostajući *servituti* na vrijeme tako da nisu nastale smetnje za početak građevinskih radova. Za dobivanje posljednja dva *servituta* nadležna je vlast pravodobno pokrenula postupak eksproprijacije, ali su se pojavili problemi s visinom iznosa odštete, što prema vrijedećim zakonima treba biti određeno prije početka radova. Kućevlasnici su primjenjivali sve vrste trikova, a osim toga je u nadležnom okružnom sudu tijekom postupka došlo do personalnih promjena. Zbog toga se obustava radova na probijanju nije mogla izbjeći, usprkos pokušajima iznalaženja rješenja (izmjena faza građenja i sl.).

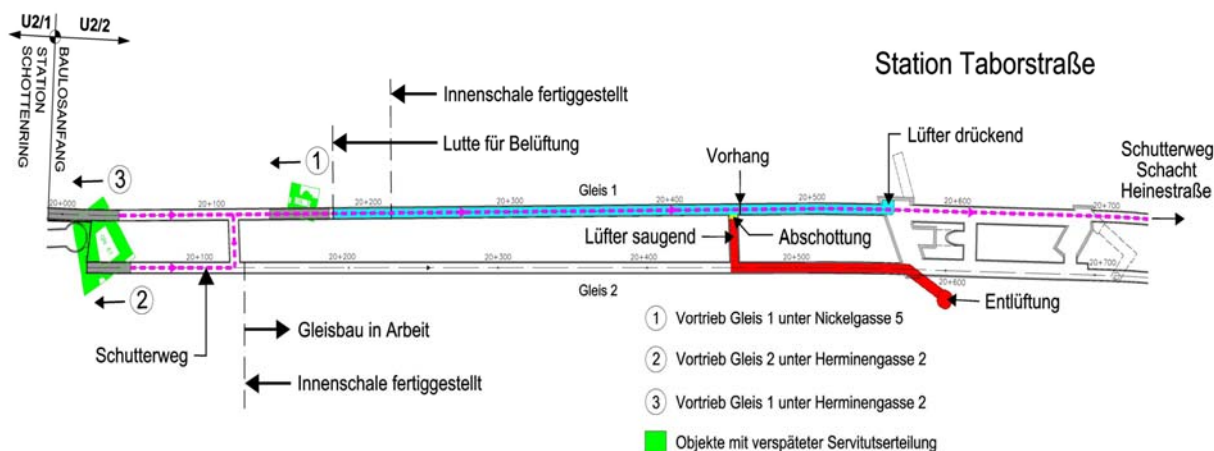
Ipak su građevinski radovi nastavljani i završeni do Europskoga nogometnog prvenstva 2008. godine. Na slici 14. prikazano je stanje radova na početku nastavka preostalih probija, nakon stanke od gotovo godine dana, ispod zgrada Nickelgasse 5 i Herminengasse 2, kao i građevinska logistika potrebna za obavljanje tih radova usporedno s radovima na unutrašnjem uređenju.

Poučeni ovim događajima Wiener Linien (bečka podzemna željeznica) će za buduće građevinske zahvate zahtjeve u svezi s izvlaštenjima uručivati nadležnima znatno prije nego što je do sada prakticirano, a s druge će se strane intenzivnije pokušavati voditi trase podzemne željeznice ispod javnog dobra.

### 4.3 Radovi na probijanju

#### 4.3.1 Proboj u smjeru Taborstrasse

Radovi na probijanju započeti su u ožujku 2004. za kolosijek 1, duljine oko 1.100 m od šahta Heinestrasse u smjeru Taborstrasse. Probijanje za kolosijek 2 započelo je dva tjedna kasnije. Pri tome se naišlo na sljedeće hidrogeološke okolnosti: pokrov tjemena tunela je sloj pjeskovite gline, dok se preostali dio kalote nalazi u debelom sloju pijeska. U području bokova i peta izmjenjuju se



Slika 13. Stanje gradnje prije početka preostalih tunelskih iskopa: 1) – probijanje za kolosijek 1 ispod Nickelgasse 5, 2) – probijanje za kolosijek 2 ispod Herminengasse 2, 3) – probijanje za kolosijek 1 ispod Herminengasse 2

slojevi pijeska i pjeskovite gline s pojedinačnim očvrslim zonama. Zbog dobre odvodnje pijeska i sniženja razine podzemne vode smanjila se prividna kohezija, pa su slojevi pijeska težili naknadnim školjkastim lomovima. O tom se geotehničkom problemu vodilo računa razmještanjem sidara na čelu iskopa i otvaranjem kalote ukupne površine 15 m<sup>2</sup> koja je iskopavana u do deset dijelova. Kod stacionaže 281,3 ipak je došlo do nepredviđenoga naknadnog sloma u tjemenu s naglim istjecanjem vode i pijeska. Brzom reakcijom osoblja na proboju uspješno je stabiliziranje čela iskopa i spriječen je nastavak unošenja materijala tla.

Usprkos velikom broju bušotina za odvodnju - sa vakuumom ili bez njega - potpuna odvodnja tla ispred čela iskopa nije se mogla postići, tako da nastavak probijanja u dotadašnjem obliku više nije bio izvediv. Sustavnim razmještanjem istraženih bušotina trebalo je u svezi s dotokom vode na bušotine za odvodnju ustanoviti da se sloj pjeskovite gline u području tjemena iskopa isključuje i da se iza njega pojavljuju pjeskovita tla. Tako je nedostajao uspor između kvartara i tercijsara i pijesak je stalno dohranjivan preostalim kvartarnom vodom. Razina kvartarne podzemne vode je doduše na ukupnoj površini dionice snižena i kontrolirana piezometrima, ali su očito mjestimično u tlu zaostale manje količine vode, koje su bile dovoljne da slojevi pijeska i gline bogate pijeskom izgube stabilnost. U tom se vremenu proboj nalazio ispod guste izgradnje pa razmještanje dodatnih bunara nije bio moguć. Dva tjedna kasnije proboj kolosijeka 2 kod stacionaže 263,2 zbog istog je događaja (unos vode i pijeska) doživio istu sudbinu i također morao biti obustavljen.

Za osiguranje nastavka radova na probijanju razmatrane su dvije varijante:

- varijanta 1: izrada *jet-grouting* (JG) štitova s poprečnim pregradama



Slika 14. *Jet-grouting* pribor u normalnoj kolosiječnoj cijevi

- varijanta 2: bušenje vakuumskih štitova.

Za prvu varijantu trebalo je najprije sa specijaliziranom tvrtkom za podzemne gradnje razjasniti pod kojim je uvjetima moguća izvedba horizontalnih JG pilota pri hidrostatskom tlaku od 1,5 m stupca vode. Na temelju pretprojekta mogla je jedna od tvrtki uvjerljivo pokazati da je to moguće samo uz ispravan izbor razmaka između bušače krune i bušače garniture. Kasnije pri izvedbi to se pokazalo ispravnim.

Zbog guste izgrađenosti nisu bile moguće daljnje istražne bušotine da bi se ustanovile granice između kvartara i tercijsara, pa je prihvaćena prva varijanta kao manje rizična.



Slika 15. Hvatišta *jet-grouting* horizontalnih pilota

Nakon prekida više od preko tri mjeseca i nakon izrade prvih JG štitova nastavljeni su radovi na probijanju. U kaloti je bilo 27 preklapljenih 15 m dugih horizontalnih ili blago nagnutih pilota za zaštitu iskopa profila 60 cm. Iz rezultata bušenja pojedinih štitova (brzina bušenja, gubitak suspenzije itd.) mogli su se izvući zaključci o očekivanim hidrogeološkim okolnostima i tako odrediti potreban broj pilota za 3 m dugu poprečnu pregradu (do 72 komada) na kraju štita. Nakon prvih pozitivnih iskustava tada se moglo i odustati od poprečnih pregrada izvedba kojih je najčešće zahtijevala vrlo mnogo vremena.

S jednim JG uređajem i jednom ekipom za proboj mogla su alternacijom biti uspješno izvedena oba probija u smjeru Taborstrasse.

#### 4.3.2 Proboj tunela u smjeru Pratersterna

Početak travnja 2004. započeo je proboj kolosijeka 1 od šahta Heinestrasse u smjeru Praterstern. Od dionice ukupne duljine 255 m, prvih 37 m izvedeno je prošireno zbog skretanja, a daljnjih 18 m s proširenom kolosiječnom cijevi i ostatak s normalnim profilom. Već su od početka radovi bili vrlo komplicirani zbog teških hidrogeoloških prilika. U području čela iskopa kvartarni su



sezali šljunci do gornjeg dijela kalote, dok su ostali dio kalote, bokovi i peta bili u pjeskovitoj glini, glinovitom pijesku i finom pijesku. Zbog uspora koji se najčešće nalazio neposredno ispod pete odvodnja s pomoću bunara izvedenih s površine nije bila u cijelosti moguća. Posebno su zahtjevni bili radovi u donjem dijelu bokova i pete zbog vodom zasićenog pijeska. Presjek pete od oko 6 m<sup>2</sup> pritom je otvaran do u 17 dijelova čitave površine. Da bi se spriječilo istjecanje pijeska poduzete su sljedeće dodatne mjere:

- izvedba vertikalne pregrade okomito na os tunela ispred čela iskopa
- izrada vertikalne pregrade uzduž osi za izvedbu drenaže pete
- vakuum sisaljke na čelu iskopa
- probijanje bušotine za vakuumsko crpenje vode
- smanjenje razmaka šahtova za drenažu pete temelja na 10 m.

Oko 65 % duljine proboja kolosijeka 1 izvedeno je kombinacijom pojedinih ili uz pomoć svih navedenih dodatnih mjera.



Slika 16. Vakuumske sisaljke, uzdužne i poprečne drvene pregrade

U skladu s terminskim planom građenja bilo je predviđeno da se proboj kolosijeka 2 u smjeru Praterstern u priključku na kolosijek 1 također započne od šahta Heinestrasse. Pri izvedbi istražnih bušotina kroz pregradni zid u pretpolju za izradu štita pred početak radova došlo je do istjecanja vode od oko 10 l/s. iz kvartarnih šljunaka. Radi smanjenja količine vode na gornjoj i donjoj razini izvedeni su:

- dodatni kvartarni bunari s površine
- kose drenažne bušotine s područja proširenja susjednog kolosijeka 1
- drenažne bušotine duljine 30 m sa strane profila iskopa s početkom uz čelo iskopa.

Izvedba ovih mjera dovela je samo do premještanja količina vode, pri čemu se pokazalo da je ukupna količina

pritoka stacionarna. Da bi se osigurao iskop na početku razmatrane su sljedeće mjere:

- ubacivanje pijeska radi smanjenja koeficijenta propusnosti s gornje razine
- izrada pregrade od platica
- izvedba dijafragme
- injektiranje
- izvedba JG štita u podlozi.

Prve četiri od navedenih mjera nisu bile izvedive zbog situacije ugradnje, zbog male udaljenosti od građevina na površini, kao i zbog održavanja uvjeta u svezi zaštitom okoliša. Izvedba JG štita ispred čela iskopa također nije bila moguća zbog geometrijskih uvjeta.

Da bi se izbjegao prekid radova na probijanju u priključku na kolosijek 1 dogovoreno je da se poprečni čisti prostor koji se nalazi na kraju dionice poveća tako da se omogući izvedba kolosijeka 2 u usponu iz suprotnog smjera. Tako je dobiveno vrijeme za provedbu mjera za savladavanje dotoka podzemne vode na prvobitno predviđenom početku radova. Probijanje kolosijeka 2 sa strane kraja dionice bilo je vrlo uspješno jer se s te strane peta svoda izbijala u suhom pa nisu bile potrebne dodatne vremenski zahtjevne mjere oko kolosijeka 1.

U međuvremenu su s gornje razine izvedene istražne bušotine koje su pokazale da je odvodnja kvartara u području tjemena uspješno provedena, ali da su terciarni pijesci u području bokova i pete još zasićeni vodom. Istražne su bušotine zbog toga dijelom pretvorene u bunare i opremljene vakuumskim uređajem. Iz kombinacije vertikalnih bušotina s gornje razine i horizontalnih bušotina s čela iskopa i opsežnih dodatnih mjera kao što su:

- djelomično ručno uklanjanje naknadnih lomova kvartarnih šljunaka (do 12 dijelova površine kalote proširene cijevi)
- injektiranje šljunaka
- sukcesivno skraćivanje i prihvaćanje voda već ranije izvedenih drenažnih bušotina kod približavanja zidu šahta
- izvedba vakuumskih bušotina u terciarnim pijescima
- izvedba uzdužne i poprečne pregrade od platica u peti.

Konačno je uspio proboj kolosijeka 2 u šaht Heinestrasse u prosincu 2004.

#### 4.3.3 Proboji tunela u smjeru Schottenring

Za oba proboja u smjeru Schottenring bilo je karakteristično:

- promijenjeni presjek tunela zbog mjestimičnih proširenja
- područja hidrogeoloških rizika
- nedostajući *servituti*.

Poprečni presjek kolosijeka 2 u području izlaza iz šahta Taborstrasse morao je biti povišen za 1,50 m zbog potrebe postavljanja dodatnoga ventilatorskog kompleta za konačno stanje, pa planirane dimenzije početnog iskopa nisu bile moguće zbog već izvedenog ukrućenja šahta. Zbog toga je ispod obližnje ulice (javno dobro) izveden dodatni poprečni rov i iz njega proboj kolosijeka 2 u suprotnom smjeru, slično kao proboj kolosijeka 2 u smjeru Praterstern.

U pretpolju ispitivala su se potencijalna rizična područja sa zasićenim pijescima u području kalote. Dodatne informacije stečene istražnim bušotinama pokazale su nužnost izvođenja triju daljnjih područja pod zaštitom JG kišobrana, pri čemu su dva odsječka bila uz kolosijek 2 i jedan uz kolosijek 1.

Nakon provjere položaja kolosijeka u tom području zbog nedostajućih su se *servituta* sredinom listopada 2005. morali obustaviti radovi na probouju, i to kolosijeka 1 na stacionaži 370 i kolosijeka 2 na stacionaži 518. Objekt Nickelgasse 5 nalazi se na drugoj trećini kolosijeka 1, a objekt Herminengasse 2 na kraju dionice preko oba kolosijeka. Da bi se preostali dijelovi probouja kolosijeka 1 koliko je moguće skratili investitor je naredio izvedbu još jednog poprečnog rova. Tako je za oba kolosijeka preostalo još približno 120 m.

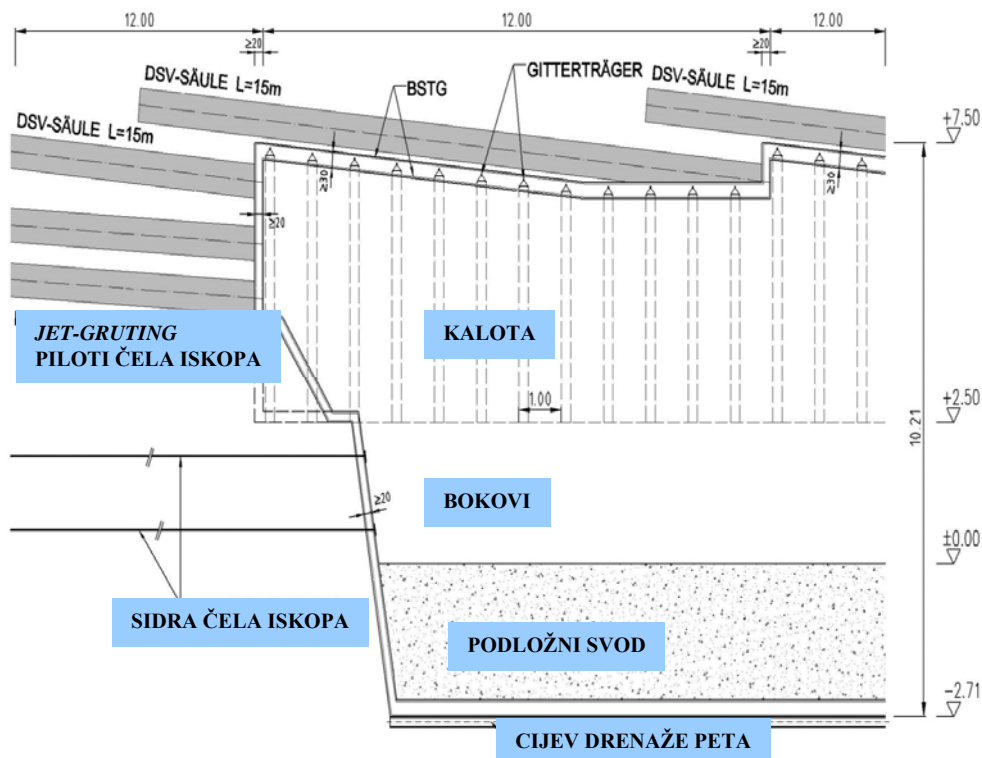
Kako vrijeme odobrenja *servituta* nije bilo sigurno istraženo je više varijanti promjene terminskog plana radova.

Donesena je odluka da se započnu radovi na unutarnjoj oblozi dovršenih probouja i da se preostali probouji izvedu kroz do tada dovršenu oblogu. Nakon prekida radova na probouju od gotovo godine dana radovi su nastavljeni i konačno dovršeni 10.10.2006.

#### 4.4 Promijenjeni koncept probouja cijevi postaje Taborstrasse

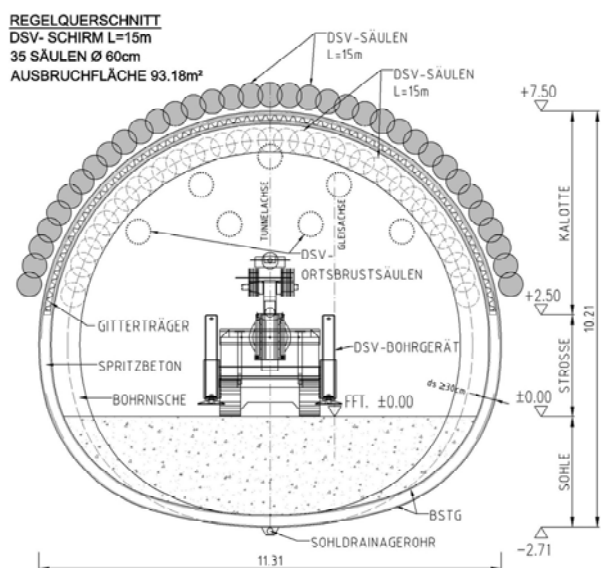
Obje cijevi postaje Taborstrasse duge su oko 100 m, s presjekom od približno 75 m<sup>2</sup>. Nešto povećan presjek u usporedbi s do tada izvedenim staničnim cijevima bečke podzemne željeznice proizlazi iz zahtjeva da se izvede međuploča u svezi sa sigurnosnim uvjetima za slučaj požara.

Prvobitnim je konceptom predviđena izvedba jednostranog proširenja rova, a iskop preostalog dijela presjeka naknadno. Kako je već opisano, iskustva s međustaničnim cijevima pokazala su da se ne može računati s potpunom odvodnjom tercijara, te da se ne mogu isključiti ni pojave zaostale vode u kvartaru zbog neravnina kontaktne plohe kvartara i tercijara. Na temelju povišenja tjemena kalote cijevi postaje i dodatnih podataka o gornjem rubu tercijara dobivenih iz bunara trebalo je računati na mogućnost da će kalota u nekim područjima začiti u kvartarni šljunak. Prema iskustvima s izvedbom cijevi uz pomoć JG štitova, bilo je logično i u području ove postaje primijeniti isti sustav, s poprečnim pregradama prema potrebi. Nakon opsežnih ispitivanja i iskustva sa cijevima sa štitom i bez štita, a uzevši u obzir i proces slijeganja, odlučeno je izvoditi cijev s JG štitom u punom profilu i s kratkim zaštitnim prstenom. JG štit za osiguranje presjeka kalote sastojao se u normalnim okolnostima od 35 JG pilota duljine 15 m i promjera 60 cm. Poprečne pregrade izvedene su samo na dva mjesta. Za poboljšanje stabilnosti čela iskopa dodatno je izvedeno po 9 JG pilota oko presjeka izboja kalote. Za obje je cijevi izvedeno po 9 štitova. Vrlo se složenim pokazao početak probijanja za kolosijek 1 iz šahta Novaragasse. Kako je šaht postavljen vrlo koso prema osi kolosijeka, a



Slika 17. Uzdunji presjek probijanja kod postaje

osim toga i nedovoljno širok, trebalo je JG opremu više puta prilagođavati skućenim prilikama.



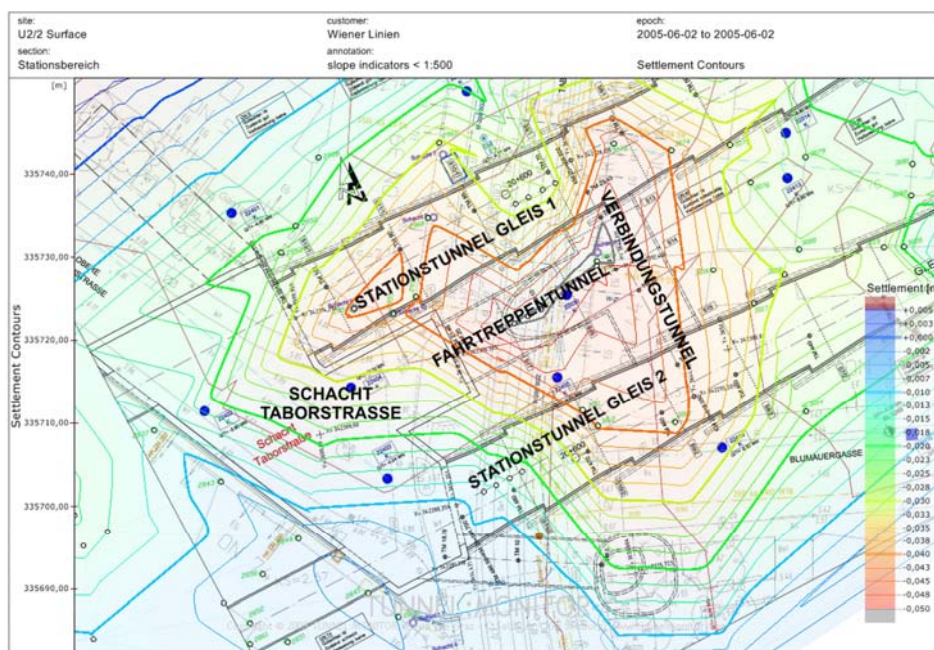
Slika 18. Normalni profil probijanja kod postaje JG štit L = 15 m, 35 profila 60 cm, površina iskopa 93,18 m<sup>2</sup>

Izvedba staničnih cijevi uslijedila je nakon toga naizmjeničnom izgradnjom JG štitova i iskopa pod njihovom zaštitom, pri čemu je za cjelokupni radni ciklus trebalo šest dana (tri dana za JG štit i tri dana za proboj). Na temelju dobre uigranosti bilo je moguće 200 m staničnih cijevi izvesti za manje od tri mjeseca.

Maksimalna slijeganja, uključivši utjecaj sniženja podzemne vode i slijeganje zbog utjecaja poprečnih šahtova iznosila su 46 mm neposredno iznad spojnog tunela, a izvan utjecaja šahta oko 20 mm. Maksimalni dopušteni nagib zgrada od 1:500 nije nigdje dosegnut.

## 5 Zaključak

U prvobitnom terminskom planu bilo je za izvedbu dionice U 2/2 predviđeno ukupno vrijeme građenja od 40 mjeseci, uz dodatak tri rezervna mjeseca za nepredviđene teškoće. U opisanim okolnostima objekti su dovršeni u roku od 46 mjeseci, pa s građevinske strane nije bilo zapreke da se stave u pogon za vrijeme održavanja Europskog prvenstva u nogometu 2008. godine. Ovo je bilo moguće samo zahvaljujući zajedničkim naporima svih subjekata uključenih u projekt.



Slika 19. Slijeganje površina u područje postaje

## LITERATURA

- [1] Scheidl, R.; Leitner, A.; Voringner, R.: *Vortriebe bei U-Bahn Wien – Bahnlos 2/2*, Felsbau 2/2007, S. 123-131
- [2] Leitner, A.: *Transportinfrastrukturobjekte in staedtischen Bereich*, Seminar HKAIG, Zagreb, 2007
- [3] Bartak, J.; Ordina, I.; Romancov, G.; Zlamal, J.: *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*, Proceedings ITA WTC Prague May 5-10, 2007, Taylor & Francis / Balkema, London 2007
- [4] Guglielmetti, V.; Grasso, P.; Mahtab, A.; Xu, S.: *Mechanized Tunnelling in Urban Areas – Design Methodology and Construction Control*, Taylor & Francis, London 2008
- [5] Kocsonya, P.: *Safe Tunnelling for the City and for the Environment*, Proceedings ITA WTC 2009, Budapest, May 23-28, 2009
- [6] Kolić, D. et al.: *Spuštanje željezničke pruge u središtu grada – korištenje iskustva metroa Pariza u Zagrebu: EOLE R.E.R. Line "E"*, Konferencija "Razvitak Zagreba", Zagreb, 2. veljače 2008, str. 461-469
- [7] Kolić, D.; Ivsic, T.: *Sondermassnahmen beim light rail Zagreb projekt*, 23. Christian Veder Kolloquium Sondermaßnahmen bei der Erstellung innerstädtischer Infrastrukturbauten, Graz 27.-28. März 2008, TU Graz, S. 189-206