

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Volk, B. 2016. Uporaba TBM tehnologije pri gradnje predorov in ocena vplivov na okolje. Magistrsko delo. = Application of TBM technology in Tunnel construction and Environmental impact assessment. Master Thesis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 259 str. (mentor: Logar, J., somentor: Jovičić, V.).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6155/>

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Jamova 2, p.p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



**UNIVERZITETNI PODIPLOMSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
VARSTVO OKOLJA**

MAGISTRSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

BOŠTJAN VOLK, univ. dipl. inž. grad.

**UPORABA TBM TEHNOLOGIJE PRI GRADNJI
PREDOROV IN OCENA VPLIVOV NA OKOLJE**

Magistrsko delo štev.: 266

**APPLICATION OF TBM TECHNOLOGY IN TUNNEL
CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL IMPACT
ASSESSMENT**

Master of Science Thesis No.: 266

Mentor:

izr. prof. dr. Janko Logar

Predsednik komisije:

prof. dr. Mitja Brillya

Somentor:

izr. prof. dr. Vojkan Jovičič

Člana komisije:

doc. dr. Goran Vižintin

prof. dr. Jana Šelih

Ljubljana, 7. september 2016

»Ta stran je namenoma prazna.«

STRAN ZA POPRAVKE – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

IZJAVE

Podpisani Boštjan Volk, univ. dipl. inž. grad. izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom »**Uporaba TBM tehnologije pri gradnji predorov in ocena vplivov na okolje**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, september 2016

Boštjan Volk

.....
(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.19 Ljubljana:656.2 Ljubljana: (043.3)
Avtor:	Boštjan Volk
Mentor:	izr. prof. dr. Janko Logar
Somentor:	izr. prof. dr. Vojkan Jovičič
Naslov:	Uporaba TBM tehnologije pri gradnji predorov in ocena vplivov na okolje
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	259 str., 44 pregl., 140 sl., 50 en., 3 pril.
Ključne besede:	TBM tehnologija, podzemna železnica, železniški predor, Ljubljana, izbira TBM naprave, posedki dvotirnega predora, posedki enotirnega predora, vplivi na okolje, ravnanje z gradbenimi odpadki, vibracije

Izvleček

Sestavni del razvoja mest je izgradnja infrastrukture, katero gradimo z namenom izboljšanja prometnih povezav in nadaljnjega razvoja mesta. V Ljubljani prometne povezave prevladujejo nad železniškimi, kar zahteva veliko uporabo površine. V ta namen je bilo pripravljenih več študij in analiz ureditve javnega in železniškega prometa v obliki podzemnih prometnic. Z nalogo smo se zadali preveriti ali obstaja možnost uporabe TBM tehnologije pri gradnji predorov in s tem razbremenitev urbanih površin. TBM tehnologija je v svetu, predvsem v urbanih jedrih, zelo razširjena. Uporabna je v tleh z različnimi naravnimi danostmi, pri čemer so mehanski vplivi na obstoječe objekte minimizirani. Kljub temu ima taka gradnja predorov vplive na podtalno vodo in okolico. Ljubljana z okolico leži na zelo raznoliki geološki podlagi. Sestavljajo jo prodni nanosi različnih starosti, različno debele plasti sedimentov, mestoma tudi lahkognetne do židke gline ter tudi kompaktna hribina permokarbonske starosti. Presoja o uporabi TBM naprave je bila narejena s poglobljenim pregledom obstoječe dokumentacije in že izvedenih projektov v tujini. Nadgrajena je bila s kriterijsko analizo izbire najprimernejše TBM naprave, na podlagi tujih smernic in strokovnih priporočil. Analiza pokaže, da sta za predvideno sestavo tal primerna dva tipa naprave in sicer EPB in naprava z izplako. Prva je primerna v fino zrnatih materialih, ki so zastopani na južnem delu, druga pa v grobo zrnatih, ki so pretežno v severnem delu mesta. Pričakovani vplivi TBM tehnologije na okolje so sicer manjši, kot pri drugih metodah gradnje predorov, kljub temu pa je potrebno zaradi gradnje na vodovarstvenem območju vplive omejiti v največji možni meri.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.19 Ljubljana:656.2 Ljubljana: (043.3)
Author: Boštjan Volk
Supervisor: Assoc. Prof. Janko Logar, Ph.D.
Cosupervisor: Assoc. Prof. Vojkan Jovičič, Ph.D.
Title: Application of TBM technology in Tunnel construction and Environmental impact assessment
Document type: M. Sc. Thesis
Notes: 259 p., 44 tab., 140 fig., 50 eq., 3 ann.
Key words:: TBM technology, metro, subway, railway tunnel, Ljubljana, TBM selection, double track settlement, single track settlement, environmental impact, spoil management, vibration

Abstract

An integral part of urban city development is construction of infrastructure, which provides better transport connections and allows city to grow and develop. In Ljubljana road connections prevail over the rail connections and as such requires more urban surface. For this purpose, many studies and analysis have been made, where tunnels have been considered as an alternative. Our main goal in this thesis was to check if tunnelling with a TBM technology is applicable. TBM tunnelling in urban areas is well known around the world. It can be applied in diverse geological conditions with a milder impact on surrounding building and environment. City of Ljubljana lies on a quite diverse geological substratum, consisting of gravel deposits of different age, layers of clay with a various thicknesses, with a presence of soft to viscous clay to clayey shale of a perm carbonic age. Evaluation of the TBM application was carried out with a review of existing documentation and completed projects abroad. It has been upgraded with a criteria analysis based on different guidelines and recommendations. Results are showing that for Ljubljana ground structure, two types of a TBM machines are suitable, namely an EPB and a Slurry machine. An EPB is appropriate for fine-grained soils, which are mainly present in the southern part of the city and a Slurry machine for course-grained soils, which are mainly present in the northern part. Expected environmental impacts with a TBM tunnelling are milder in comparison with other tunnelling methods, but due to construction in a water protected area, they should be reduced to a minimum level.

ZAHVALA

Mentorju izr.prof.dr.Janku Logarju se zahvaljujem za strokovno pomoč, vse nasvete in vzpodbudne besede pri izdelavi magistrske naloge. Zahvaljujem se tudi somentorju izr.prof.dr.Vojkanu Jovičiču.

Hvala tudi dr.Juretu Klopčiču za pravo idejo ob pravem času in vsakršen nasvet.

Zahvaljujem se vsem sodelavcem in drugim kolegom, ki so kakorkoli pripomogli k izdelavi magistrske naloge.

Človek se gradi celo življenje, zato zahvala tudi za vsak podarjen trenutek in nasvet staršema Dragici in Zvonetu ter babi Mileni.

Posebna zahvala za podporo, vzpodbudo, predvsem pa potrpežljivost gre ženi Moniki.

Jaku in Niki pa naslednje sporočilo:

Sanje brez ciljev ostanejo sanje in tako veliko razočaranje. Ciljev na poti do uspeha, ne moremo doseči brez poguma, vztrajnosti in discipline. Zavedati se je potrebno, da imamo vedno možnost slediti glavi ali srcu. Čemu dati prednost, odločita vidva. Na poti sicer delamo napake, vendar se le tako učimo. Naj vaju zato venomer spremlja radovednost in tista želja po nečem ...

Boštjan Volk

KAZALO VSEBINE:

ZAHVALA	V
KAZALO SLIK	IX
LIST OF FIGURES	XV
KAZALO PREGLEDNIC	XXI
LIST OF TABLES	XXIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XXV
1 UVOD	1
2 NAMEN IN CILJI NALOGE TER OSNOVNE HIPOTEZE	5
3 GRADNJA PREDOROV KOT DODANA VREDNOST	6
3.1 O gradnji predorov v splošnem	6
3.1.1 Klasična sekvenčna oz. ciklična izkopna metoda.....	7
3.1.2 Kontinuiran izkop s TBM napravo	8
3.1.3 Metoda pokritega vkopa	9
3.2 Umeščanje predora v prostor	9
3.2.1 Splošno	9
3.2.2 Primeri gradnje predorov v urbanem okolju	11
3.3 Uporaba TBM tehnologije na območju Ljubljane.....	13
3.3.1 Posodobitev in razvoj mestnega prometa	13
3.3.2 Posodobitev in modernizacija ljubljanskega železniškega vozlišča	14
3.4 Zakonodajne podlage za projektiranje predorov	16
4 IZVEDBA PREDOROV S TBM TEHNOLOGIJO	18
4.1 Kratka zgodovina razvoja tehnologije.....	18
4.2 Osnovni principi mehanizirane gradnje predorov	19
4.2.1 Splošno	19
4.2.2 Opis posameznih tipov naprav	23
4.2.2.1 Naprava za izkop v trši hribini (TBM)	23
4.2.2.2 Naprava z dvojnim ščitom (DSM).....	24
4.2.2.3 Naprava z enojnim ščitom (SM).....	24
4.2.2.4 Naprava s prilagodljivim ščitom (kombinirana naprava).....	26
4.2.3 TBM tehnologija in uporaba v kamninah in zemljinah	26
4.2.4 Podpiranje čela izkopa	28
4.2.5 Gradnja predorov manjših premerov (mikropredori)	32
4.2.6 Geotehnični izzivi pri uporabi TBM metode	33
4.3 Izbira primerne TBM naprave.....	34
4.3.1 Opis ključnih parametrov	35
4.3.2 Geomehanski parametri	38
4.3.3 Spremljanje obnašanja sistema	42
4.4 Pomembnejši elementi pri gradnji predorov s TBM.....	43

4.4.1	Štartni in sprejemni jašek	43
4.4.2	Menjava orodij in vstop v izkopno komoro	47
4.4.3	Osamelci ali skale samice	49
4.4.4	Zapolnjevanje praznine med ščitom in oblogo	51
4.4.5	Nadzorovanje posedkov na površini	52
4.4.6	Prečne povezave	54
4.4.7	Zagotavljanje logistične podpore TBM napravi	57
4.4.8	Primerjava parametrov pri TBM napravah	58
4.4.9	Tveganja povezana z uporabo TBM naprav	58
4.5	Najprimernejše naprave za izkop v zemljinah – Ljubljana in okolica	60
4.5.1	Podpiranje čela z izplako	60
4.5.2	Podpiranje čela z izkopanim materialom (EPB sistem).....	62
4.5.3	Alternativne rešitve.....	63
4.5.4	Primerjava EPB naprave in naprave z izplako	66
4.5.5	Dodatki za izboljševanje lastnosti hribine.....	68
4.5.6	Glavni parametri TBM naprav	74
5	NAČRTOVANJE PREDORA IN RAČUNSKÉ KONTROLE	76
5.1	Splošno	76
5.2	Pomembnejši verifikacijski izračuni	77
5.2.1	Stabilnost čela pri podpiranju z izplako in zemljino	77
5.2.2	Kontrola ravnotežja v navpični smeri	84
5.2.3	Določitev potisne sile naprave	85
5.2.4	Drugi kontrolni izračuni.....	88
5.2.5	Kontrola posedkov na površini – empirični postopek	89
5.3	Projektiranje notranje obloge	96
5.3.1	Splošno	96
5.3.2	Načrtovanje notranje obloge	99
5.3.3	Dimenzioniranje notranje obloge.....	103
6	RAVNANJE Z GRADBENIMI ODPADKI IN VPLIVI NA OKOLJE.....	111
6.1	Splošno	111
6.2	Možnosti uporabe gradbenih odpadkov	112
6.3	Ravnanje z gradbenimi odpadki pri uporabi TBM tehnologije.....	114
6.4	Vplivi na okolje pri gradnji predorov	120
6.4.1	Zakonodajna podlaga za izvedbo monitoringa vplivov na okolje	121
6.4.2	Meritve emisij prahu in mejne vrednosti.....	122
6.4.3	Meritve hrupa in mejne vrednosti	123
6.4.4	Meritve seizmičnih vibracij in mejne vrednosti	124
7	GEOLOŠKE IN HIDROGEOLOŠKE ZNAČILNOSTI OBMOČJA LJUBLJANE	127
7.1	Uvod.....	127
7.2	Geološka zgradba	127
7.3	Hidrogeološke značilnosti	132
7.4	Podtalnica prodnih vodonosnikov	132
7.5	Zakonodaja na vodovarstvenih območjih.....	135
7.6	Splošno o sestavi tal na Ljubljanskem polju in Ljubljanskem barju.....	137

7.7	Lastnosti tal na območju Ljubljane	138
8	NAČRTOVANJE PREDOROV NA OBMOČJU LJUBLJANE	142
8.1	Splošno	142
8.2	Določitev velikosti predora	142
8.3	Potencialne podzemne prometnice v Ljubljani	145
8.4	Naravne danosti na trasah potencialnih predorov	148
8.4.1	Sestava in lastnosti tal.....	152
8.4.1.1	Proga A	155
8.4.1.2	Proga B sever	155
8.4.1.3	Proga B jug	157
8.4.1.4	Proga C.....	158
8.4.1.5	Proga D vzhod	159
8.4.1.6	Proga D zahod	160
8.4.1.7	Proga E	161
8.4.1.8	Proga F	162
8.4.1.9	Proga F krak 1 in krak 2	163
8.4.2	Zrnavostna struktura tal.....	164
8.5	Izbira primerne TBM naprave.....	166
8.5.1	Splošno	166
8.5.2	Upoštevanje priporočil pri izbiri primerne TBM naprave.....	167
8.5.2.1	Smernice mednarodnega združenja za predorogradnjo (ITA)	167
8.5.2.2	Smernice združenja EFNARC.....	168
8.5.2.3	Smernice avstrijskega združenja za geomehaniko (OEGG).....	170
8.5.2.4	Smernice nemškega komiteja za podzemno gradnjo (DAUB)	170
8.5.2.5	Uporaba izsledkov strokovnih prispevkov	173
8.5.2.6	Primerjava uporabljene tehnologije pri že izvedenih projektih	177
8.5.3	Uporaba dodatkov pri gradnji predorov v Ljubljani	178
8.5.4	Izvedljivosti gradnje predorov in uporaba TBM naprav v Ljubljani	180
8.6	Ocena vplivov na okolje	182
8.6.1	Vpliv posedanja površine	182
8.6.2	Vpliv na podtalnico	194
8.6.3	Ravnanje z izkopanim materialom	195
8.6.4	Hrup in prah.....	198
8.6.5	Vibracije.....	199
8.6.6	Ravnanje z gradbenimi odpadki in vplivi na okolje pri gradnji predorov v Ljubljani ..	200
9	ZAKLJUČEK.....	202
10	POVZETEK	206
11	SUMMARY	209
VIRI	213
PRILOGA A:	Vrednosti posedkov s_{max} pri spremenljivi z_0	I
PRILOGA B:	Vrednosti posedkov s_{max} pri spremenljivem κ.....	III
PRILOGA C:	Vrednosti posedkov s_{max} pri spremenljivem prerezu za enocevni predor VI	

KAZALO SLIK

Slika 3-1: Prikaz izvedbe predora po novi avstrijski metodi (levo, sredina) in princip nosilnega obroča (desno) (Maidl et al., 2012).....	7
Slika 3-2: Primer naprave za izkop predora v celem profilu ali TBM za kamnino (prirejeno po Maidl et al., 2007).....	8
Slika 3-3: Primer izvedbe podzemnega objekta z metodo pokritega vkopa (prirejeno po www.railsystem.net).....	9
Slika 3-4: Sistem 4 (levo) in sistem 1 (desno) ureditve mestnega prometa (Strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji, 2009).....	14
Slika 3-5: Prikaz variante 4 (levo) in variante 1 (desno) posodobitve ljubljanskega železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010).....	16
Slika 4-1: Shematski prikaz ščita, ki je bil uporabljen pri gradnji predora pod reko Temzo (prirejeno po Maidl et al., 2012).....	18
Slika 4-2: Prva mehanizirana naprava s hidravličnim pogonom (Maidl et al., 2012).....	19
Slika 4-3: Tipi naprav za mehaniziran izkop predorov po nemških smernicah (prirejeno po Maidl et al., 2012).....	20
Slika 4-4: Načini zagotavljanja stabilnosti čela pri mehaniziranem izkopu (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	21
Slika 4-5: Možni načini odstranjevanja izkopnega materiala pri čelu (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	22
Slika 4-6: Najpogostejši možni mehanizmi razvoja deformacij (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	23
Slika 4-7: Princip drobljenja kamnine (levo) in ugodne smeri razpokanosti in plastovitosti (desno) (Vukmirovič, 2008).....	27
Slika 4-8: Obloga predora iz predizdelanih segmentov s prečnikom (www.crossrail.co.uk)..	28
Slika 4-9: Način podpiranja s pritiskom zraka (nadtlakom) (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	29
Slika 4-10: Način podpiranja s čela z izplako (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	30
Slika 4-11: Prikaz membranskega (levo) in penetracijskega (desno) tesnjenja izkopne komore (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	30
Slika 4-12: Način podpiranja čela z izkopano zemljino (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	31
Slika 4-13: Način izvedbe mikropredorov (levo – pilotni rov, desno zgoraj – povrtavanje in desno spodaj – mikropredorogradnja) (prirejeno po Maidl et al., 2013).....	32
Slika 4-14: Primer področja uporabe dodatkov glede na sestavo hribine (prirejeno po Thewes, 2007).....	36
Slika 4-15: Shematski prikaz primerjave med tveganji in obsegom podatkov iz raziskav (prirejeno po Spencer et al., 2009).....	38
Slika 4-16: Področja uporabe naprave z izplako in EPB naprave po priporočilih Herrenknechta (prirejeno po Herrenknecht, 2007).....	39
Slika 4-17: Področja uporabe naprave z izplako po priporočilih Maidla in sodelavcev (prirejeno po Maidl et al., 2012).....	39
Slika 4-18: Področja uporabe EPB naprave po priporočilih Maidla in sodelavcev (prirejeno po Maidl et al., 2012).....	40

Slika 4-19: Stopnje lepljenja izkopnega materiala v odvisnosti od indeksa plastičnosti lp in indeksa konsistence lc (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).	41
Slika 4-20: Jeklena oporna konstrukcija za start TBM naprave (Schmidt et al., 2014).	43
Slika 4-21: Detajl jeklene oporne konstrukcije in sidranja (Schmidt et al., 2014).	44
Slika 4-22: Koncept prenosa obtežbe potisne sile TBM naprave preko jeklene konstrukcije (prirejeno po Schmidt et al., 2014).	44
Slika 4-23: Izvedba odprtine v pilotni steni in zaščita z brizganim betonom (www.asiatunnelling.com).	45
Slika 4-24: Jeklena (levo) in betonska (desno) vodilna konstrukcija (Kumpfmüller, 2008). ...	46
Slika 4-25: Območje ekonomične uporabe diskov glede na obremenitev in prodor v hribino (prirejeno po Maidl et al., 2012).	47
Slika 4-26: Območje uporabe zračnega nadtlaka oziroma mešanic plina (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).	48
Slika 4-27: Prikaz čeljustnega drobilca in sita pri napravi z izplako (www.herrenknecht.com).	50
Slika 4-28: Različni načini seizmičnih raziskav hribine prirejeni za TBM naprave (prirejeno po Robert et al., 2014).	51
Slika 4-29: Tesnilo tip S1 iz umetne mase, ki je nameščen na koncu ščita (prirejeno pod Kumpfmüller, 2008).	52
Slika 4-30: Ščetkasto tesnilo nameščeno na koncu ščita (prirejeno pod Kumpfmüller, 2008).	52
Slika 4-31: Primer izvedbe kompenzacijskega injektiranja, tloris (levo), prerez (sredina) in situacija trase z lokacijami injektiranja (desno) (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).	53
Slika 4-32: Prečna povezava z območjem preventivnih ukrepov (prirejeno po Lawrence in Taylor, 2011).	54
Slika 4-33: Primerjava preventivnih ukrepov glede na zravnostno strukturo hribine (prirejeno po Lawrence in Taylor, 2011).	55
Slika 4-34: Priključek prečnika na glavno cev v izvedbi brizganega betona (levo) ali jeklenih segmentov (desno) (www.tunneltalk.com).	56
Slika 4-35: Prikaz izvedbe predora z zamrzovanjem okoliške hribine (Kumpfmüller, 2008)..	56
Slika 4-36: Shema izkopnih sekvenc pri izvedbi prečnika (prirejeno po Lawrence in Taylor, 2008).	57
Slika 4-37: Prikaz postrojenja za podporo TBM naprav, EPB naprava (levo), naprava z izplako (sredina) in izvedba mikropredora (desno) (www.herrenknecht.com).	58
Slika 4-38: Prikaz naprave s ščitom, ki za podpiranje čela uporablja izplako (podrobnejši opis naprave se nahaja v odstavku pod sliko) (www.herrenknecht.com).	61
Slika 4-39: Prikaz EPB naprave, ki za podpiranje čela uporablja zemljino (podrobnejši opis naprave se nahaja v odstavku pod sliko) (www.herrenknecht.com).	63
Slika 4-40: Prikaz kombinirane ali Mixshield naprave, ki za podpiranje čela uporablja izplako, zemljino ali zračni nadtlak (www.herrenknecht.com).	64
Slika 4-41: Običajne kombinacije Multimode naprave (www.herrenknecht.com).	65
Slika 4-42: Multimode naprava z EPB sistemom in izplako (www.herrenknecht.com).	65
Slika 4-43: Shema TBM naprave in sistema za uporabo dodatkov (prirejeno po Budach, 2011).	69
Slika 4-44: Shema nivojev pritiska v izkopni komori in iznosnem vijaku (prirejeno po Maidl et al., 2012).	71

Slika 4-45: Območja uporabe EPB naprave s priporočenimi dodatki in zrnavostnimi krivuljami nekaterih izvedenih projektov (prirejeno po Budach, 2011).....	73
Slika 4-46: Stranski stabilizatorji za uravnavanje osnega rotiranja naprave, horizontalni prerez (levo) in pozicija na TBM napravi (desno) (Kumpfmüller, 2008).....	75
Slika 5-1: Porušitveni model po Horn-u (levo) in sile v porušnem klinu pred čelom predora (desno) (prirejeno po Maidl et al., 2012).....	78
Slika 5-2: Dopolnjen porušitveni model po Horn-u (levo) in sile v porušnem klinu pred čelom predora (desno) (prirejeno po Budach, 2011).....	79
Slika 5-3: Obremenitev klina v horizontalni smeri zaradi pronicanja vode (prirejeno po Budach, 2011).	80
Slika 5-4: Diagrami za določitev koeficientov od F_0 , F_1 , F_2 in F_3 (prirejeno po Anagnostou in Kovari, 1996).	82
Slika 5-5: Prikaz pritiska izplake v izkopni komori z deležem Δp (prirejeno po Anagnostou in Kovari, 1996).	83
Slika 5-6: Shema pritiska na čelo delno z izplako in zrakom in izplako v celoti (prirejeno po Maidl et al., 2013).	85
Slika 5-7: Prikaz posedkov pri izvedbi predora z napravo z izplako in napravo z zračnim nadtlakom (prirejeno po Maidl et al., 2012).	89
Slika 5-8: Časovni razvoj posedkov pri uporabi EPB naprave v zameljenih peskih (prirejeno po Mair et al., 1996).....	90
Slika 5-9: Prikaz konture posedka po Gaussovi krivulji (prirejeno po Maidl et al., 2012).	90
Slika 5-10: Shema posedkov objekta z glavnimi parametri (prirejeno po Braja, 1999).	93
Slika 5-11: Deformacija objekta, deljena na območje pregibanja in povešanja (prirejeno po Burland, 2008).	93
Slika 5-12: Območja kategorij poškodovanosti objekta (razmerje $L/H=1$) za območje pregibanja (prirejeno po Burland, 2008).	95
Slika 5-13: Mejne vrednosti robnih deformacij po Bjerrumu (prirejeno po Maksimović, 2008).	96
Slika 5-14: Prikaz izvedbe predora v vodotesni (levo) in drenirani različici (desno) (prirejeno po Girmscheid, 2013).	97
Slika 5-15: Tipi vzdolžnih stikov (raven, konveksen in konveksno-konkaven) (prirejeno po Maidl et al., 2012).	98
Slika 5-16: Tipi prečnih stikov (raven, konveksno-konkaven in pero-utor) (prirejeno po Maidl et al., 2012).....	98
Slika 5-17: Shematski prikaz obtežb na predorsko cev (prirejeno po Koyama, 2003).	100
Slika 5-18: Shematski prikaz deformacij globokega predora pri $k_0 < 1$ (levo) in plitvega predora $k_0 > 1$ (desno) (Bakker in Blom, 2009).	102
Slika 5-19: Rezultati modela po Duddecku in Erdmannu za različna razmerja H/R pri $k_0=0,5$ (Bakker 2003).	104
Slika 5-20: Prikaz faznosti gradnje predora v modelu (Bakker, 2003).....	105
Slika 5-21: Porazdelitev momentov na dva vzajemno delujoča obroča (Blom, 2002).	105
Slika 5-22: Prikaz stikovanja in konstrukcijski model dveh povezanih obročev (Blom, 2002).	106
Slika 5-23: Radialna napetost v notranji oblogi (prirejeno po Blom, 2002).	106
Slika 5-24: Vrednosti u_{max} v odvisnosti od razlike napetosti pri spremembi oblike (Blom, 2002).....	107

Slika 5-25: Vrednosti M_{max} v odvisnosti od razlike napetosti pri spremembi oblike (% od σ_0) (Blom, 2002).	107
Slika 5-26: Prikaz računskih modelov (statični sistem konzole in prostoležečega nosilca) (Bakhshi in Nasri, 2014).	108
Slika 5-27: Shematski prikaz razporeditve osnih sil v segmentu zaradi potisne sile (Bakhshi in Nasri, 2014).	109
Slika 5-28: Prikaz torzijske obremenitve (levo) in neenakomerne potisne sile (desno) (Blom, 2002).	109
Slika 6-1: Možnosti ponovne uporabe gradbenih odpadnih materialov (TSC 06.800:2001).	114
Slika 6-2: Potek biološke razgradljivosti dodatka glede na čas (prirejeno po Budach, 2011).	120
Slika 7-1: Inženirska geološka karta Ljubljane z ljubljanskim barjem (Pavšič, 2008).	129
Slika 7-2: Geološki presek pri vodarni v Klečah (Žlebničnik, 1971).	130
Slika 7-3: Geološki presek Brod – Ježica (Žlebničnik, 1971).	130
Slika 7-4: Prečni profil čez vzhodni del Ljubljanskega barja (Mencej, 1989).	131
Slika 7-5: Vzdolžni profil čez južni del Ljubljanskega barja (Mencej, 1989).	131
Slika 7-6: Shematska hidrogeološka karta Ljubljane z okolico (www.gov.si/atlasokolja/).	134
Slika 7-7: Vrednosti koeficienta prepustnosti glede na zrnavostno strukturo (Budach, 2011).	135
Slika 7-8: Vodovarstvena območja in črpališča v Ljubljani (www.gov.si/atlasokolja/).	136
Slika 8-1: Svetli profil GC za železniške predore v Sloveniji (Uradni list RS št. 92/2010).	143
Slika 8-2: Karakteristični prečni profil dvotirnega predora za podzemno železnico.	144
Slika 8-3: Karakteristični prečni profil vzporednih enotirnih predorov za podzemno železnico.	144
Slika 8-4: Topografska karta Ljubljane s progami sistema 4 (prirejeno po Strokovnih podlagah ..., 2009).	146
Slika 8-5: Topografska karta Ljubljane s progami variante 1 (prirejeno po Žličar et al., 2010).	146
Slika 8-6: Topografska karta Ljubljane s potencialnimi novimi trasami predorov.	147
Slika 8-7: Osnovna geološka karta z označenimi različnimi geološkimi enotami na območju novih tras predorov (prirejeno po osnovni geološki karti).	148
Slika 8-8: Geološka karta s potencialnimi trasami predorov in reprezentativnimi lokacijami geoloških danosti (prirejeno po osnovni geološki karti).	150
Slika 8-9: Vodovarstvena območja na območju Ljubljane s trasami novih predorov (prirejeno po osnovni geološki karti).	151
Slika 8-10: Osnovna geološka karta z lokacijami podatkov o sestavi in lastnostih tal (prirejeno po osnovni geološki karti).	152
Slika 8-11: Osnovna geološka karta s trasami prog in geoloških enot (prirejena osnovna geološka karta).	153
Slika 8-12 : Legenda materialov uporabljenih v vzdolžnih profilih.	154
Slika 8-13: Vzdolžni prerez proge A, s podatki o sestavi tal.	155
Slika 8-14: Vzdolžni prerez proge B sever s podatki o sestavi tal.	156
Slika 8-15: Vzdolžni prerez proge B jug s podatki o sestavi tal.	157
Slika 8-16: Vzdolžni prerez proge C s podatki o sestavi tal.	158
Slika 8-17: Vzdolžni prerez proge D vzhod s podatki o sestavi tal.	159

Slika 8-18: Vzдолžni prereз proge D zahod s podatki o sestavi tal.	160
Slika 8-19: Vzдолžni prereз proge E s podatki o sestavi tal.	161
Slika 8-20: Vzдолžni prereз proge F s podatki o sestavi tal.	162
Slika 8-21: Vzдолžni prereз prog F1 in F2 s podatki o sestavi tal.	164
Slika 8-22: Granulometrične krivulje reprezentativnih geoloških plasti na območju Ljubljane (Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	165
Slika 8-23: Področja delovanja EPB naprave z uporabo dodatkov (prirejeno po EFNARC, 2005).....	169
Slika 8-24: Področja delovanja EPB naprave in skrajni granulometrični krivulji sestave tal v Ljubljani (prirejeno po EFNARC, 2005).	170
Slika 8-25: Področja delovanja naprave z izplako po Maidlu (2012) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.	173
Slika 8-26: Področja delovanja EPB naprave po Maidlu (2012) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.	174
Slika 8-27: Področja delovanja EPB naprave po Budachu (2011) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.	175
Slika 8-28: Področja delovanja EPB naprave po Langmaacku in Ibarri (2011) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.....	176
Slika 8-29: Področja delovanja EPB naprave in naprave z izplako po Thewesu (2007) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.	177
Slika 8-30: Krivulje zrnivosti za nekatere izvedene projekte v primerjavi z mejnima krivuljama zrnivosti za območje Ljubljane (prirejeno po Budachu, 2011).	178
Slika 8-31: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,35$	183
Slika 8-32: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,42$	183
Slika 8-33: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,50$	184
Slika 8-34: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,35$	184
Slika 8-35: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,42$	185
Slika 8-36: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,50$	185
Slika 8-37: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,35$	186
Slika 8-38: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,42$	186
Slika 8-39: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,50$	187
Slika 8-40: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,35$	187
Slika 8-41: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,42$	188
Slika 8-42: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,50$	188

Slika 8-43: Relativni zasuka glede na količnik k pri niveleti $Z_0=16$ m.....	190
Slika 8-44: Relativni zasuka glede na količnik k pri niveleti $Z_0=25$ m.....	191
Slika 8-45: Hitrosti širjenja valov EPB naprave glede na vrsto zemljine (prirejeno po Hiller, 2011).....	200
Slika A-1: Vrednosti maksimalnega pomika za dvotirni predor glede na globino predora pri vrednostih k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).....	I
Slika A-2: Vrednosti maksimalnega pomika za vzporedna enotirna predora glede na globino predora pri vrednostih k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).....	II
Slika B-1: Vrednosti maksimalnega pomika za dvotirni predor glede na koeficient k pri globinah Z_0 (15,0, 20,0 in 25,0 m) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).....	IV
Slika B-2: Vrednosti maksimalnega pomika za vzporedna enotirna predora glede na koeficient k pri globinah Z_0 (15,0, 20,0 in 25,0 m) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).....	V
Slika C-1: Vrednosti maksimalnega pomika za enocevni predor glede na izkopno površino pri globini $Z_0=16$ m in koeficientu k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).....	VI
Slika C-2: Vrednosti maksimalnega pomika za enocevni predor glede na izkopno površino pri globini $Z_0=25$ m in koeficientu k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).....	VII

LIST OF FIGURES

Figure 3-1: Application of NATM in tunnel construction (left and middle) and concept of carrying ring (right) (Maidl et al., 2012).....	7
Figure 3-2: Example of hard rock TBM machine for excavation in full section (adapted from Maidl et al., 2007).	8
Figure 3-3: Example of cut and cover technique (adapted from railsystem.net).	9
Figure 3-4: System 4 (left) and system 1 (right) of public traffic reorganization (Strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji, 2009).....	14
Figure 3-5: Schemes of option 4 (left) and option 1 (right) of Ljubljana railway junction upgrade (Žličar et al., 2010).....	16
Figure 4-1: Scheme of shield used for construction of Thames tunnel (adapted from Maidl et al., 2012).....	18
Figure 4-2: First mechanised shield machine with hydraulic drive (Maidl et al., 2012).....	19
Figure 4-3: Types of TBM and shield machines according to DAUB recommendations (adapted from Maidl et al., 2012).....	20
Figure 4-4: Face support principles at mechanised shield tunnelling (adapted from Maidl et al., 2013).....	21
Figure 4-5: Possible means of clearing muck from the shield (adapted from Maidl et al., 2013).....	22
Figure 4-6: Causes of settlement from a shield drive (adapted from Maidl et al., 2013).	23
Figure 4-7: Principle of rock crushing (left) and favourable orientation of joints and discontinuities (right) (Vukmirovič, 2008).....	27
Figure 4-8: Completed segmental lining with cross passage connection (www.crossrail.co.uk).....	28
Figure 4-9: Principle of supporting the face with compressed air (adapted from Maidl et al., 2013).....	29
Figure 4-10: Principle of supporting the face with slurry (adapted from Maidl et al., 2013)...	30
Figure 4-11: Principle of filter cake (left) and penetration (right) face sealing (adapted from Maidl et al., 2013).	30
Figure 4-12: Principle of supporting the face with excavated soil (adapted from Maidl et al., 2013).....	31
Figure 4-13: Principle of micro tunnelling (left – pilot tunnel, above right – guided auger tunnelling and below right – shield micro tunnelling) (adapted from Maidl et al., 2013).	32
Figure 4-14: Application of soil conditioning according to ground structure (adapted from Thewes, 2007).....	36
Figure 4-15: Schematic comparison of risks and available data from investigations (adapted from Spencer et al., 2009).	38
Figure 4-16: Area of application for Slurry machine and EPB machine according to Herrenknecht (adapted from Herrenknecht, 2007).	39
Figure 4-17: Area of application for Slurry machine according to Maidl et al. (adapted from Maidl et al., 2012).	39

Figure 4-18: Area of application for EPB machine according to Maidl et al. (adapted from Maidl et al., 2012).	40
Figure 4-19: Sticking potential of excavation material according to plasticity index I_p and liquidity index I_c (adapted from Kumpfmüller, 2008).	41
Figure 4-20: Steel support system for TBM machine start (Schmidt et al., 2014).	43
Figure 4-21: Detail of steel support structure and its anchoring (Schmidt et al., 2014).	44
Figure 4-22: Concept of load transfer of TBM thrust force through the steel structure (adapted from Schmidt et al., 2014).	44
Figure 4-23: Construction of opening in a pile wall and sealing with shotcrete (Soft-eye) (www.asiatunnelling.com).	45
Figure 4-24: Steel (left) and concrete (right) TBM cradle (Kumpfmüller, 2008).	46
Figure 4-25: Economic working area of TBM cutters according to cutter loading and penetration (adapted from Maidl et al., 2012).	47
Figure 4-26: Area of application of compressed air or mixed breathing gases (adapted from Kumpfmüller, 2008).	48
Figure 4-27: Scheme of jaw crusher and screen for slurry machine (www.herrenknecht.com).	50
Figure 4-28: Different principles of seismic investigation for TBM machines (adapted from Robert et al., 2014).	51
Figure 4-29: Rubber shield type S1 tail seal placed at the end of shield (adapted from Kumpfmüller, 2008).	52
Figure 4-30: Wire seal placed at the end of shield (adapted from Kumpfmüller, 2008).	52
Figure 4-31: Example of compensation grouting, plan (left), section (middle) and plan with tunnel alignment and grouting locations (right) (adapted from Kumpfmüller, 2008).	53
Figure 4-32: Cross passage with area of additional measures (adapted from Lawrence and Taylor, 2011).	54
Figure 4-33: Comparison of ground treatment methods according to ground structure (adapted from Lawrence and Taylor, 2011).	55
Figure 4-34: Connection of cross passage to running tunnel with shotcrete (left) or using iron segments (right) (www.tunneltalk.com).	56
Figure 4-35: Scheme of tunnel construction with ground freezing (Kumpfmüller, 2008).	56
Figure 4-36: Scheme of cross passage construction sequence (adapted from Lawrence and Taylor, 2008).	57
Figure 4-37: Schemes of support area for TBM construction, EPB (left), slurry machine (middle) and micro tunnel (right) (www.herrenknecht.com).	58
Figure 4-38: Scheme of shield machine with slurry face support system (detailed description of figure is in paragraph below) (www.herrenknecht.com).	61
Figure 4-39: Scheme of EPB shield machine (detailed description of figure is in paragraph below) (www.herrenknecht.com).	63
Figure 4-40: Scheme for combined or Mixshield machine (www.herrenknecht.com).	64
Figure 4-41: Usual combinations for Multimode machine (www.herrenknecht.com).	65
Figure 4-42: Multimode machine with EPB and slurry system (www.herrenknecht.com).	65
Figure 4-43: Scheme of TBM machine with system for soil conditioning (adapted from Budach, 2011).	69
Figure 4-44: Scheme of pressure lines in excavation chamber and screw conveyor (adapted from Maidl et al., 2012).	71

Figure 4-45: Areas of EPB machine application with recommended conditioners and granulometric curves of few completed projects (adapted from Budach, 2011).....	73
Figure 4-46: Side stabilizers for regulation of TBM axis rotation, horizontal section (left) and location of stabilizer on TBM machine (right) (Kumpfmüller, 2008).....	75
Figure 5-1: Sliding mechanism after Horn (left) and forces in sliding wedge in front of the tunnel face (right) (adapted from Maidl et al., 2012).....	78
Figure 5-2: Improved sliding mechanism after Horn (left) and forces in sliding wedge in front of the tunnel face (right) (adapted from Budach, 2011).....	79
Figure 5-3: Seepage loads on the wedge in a horizontal direction (adapted from Budach, 2011).....	80
Figure 5-4: Diagrams for the dimensionless coefficients F_0 , F_1 , F_2 in F_3 (adapted from Anagnostou in Kovari, 1996).....	82
Figure 5-5: Scheme of slurry pressure in excavation chamber with indication of excess pressure Δp (adapted from Anagnostou in Kovari, 1996).....	83
Figure 5-6: Scheme of support pressure distribution with half lowered suspension and full suspension support (adapted from Maidl et al., 2013).....	85
Figure 5-7: Scheme of ground settlements at tunnel construction with slurry machine and compressed air machine (adapted from Maidl et al., 2012).....	89
Figure 5-8: Development of settlement above EPB shield in silty sands (adapted from Mair et al., 1996).....	90
Figure 5-9: Definition of settlement profiles of Gaussian form (adapted from Maidl et al., 2012).....	90
Figure 5-10: Scheme of building settlements with parameters (adapted from Braja, 1999).....	93
Figure 5-11: Building deformation, partitioned to hogging zone and sagging zone (adapted from Burland, 2008).....	93
Figure 5-12: Areas of damage categories (for ratio $L/H=1$) for hogging mode (adapted from Burland, 2008).....	95
Figure 5-13: Limiting angular distortions according to Bjerrum (adapted from Maksimović, 2008).....	96
Figure 5-14: Scheme of tunnel in waterproof version (left) and in drained version (right) (adapted from Girmscheid, 2013).....	97
Figure 5-15: Types of longitudinal joints (flat, convex and convex-concave) (adapted from Maidl et al., 2012).....	98
Figure 5-16: Types of ring joints (flat, convex-concave and pin-socket) (adapted from Maidl et al., 2012).....	98
Figure 5-17: Schematic load conditions on tunnel tube (adapted from Koyama, 2003).....	100
Figure 5-18: Scheme of deformations for deep tunnel at $k_0 < 1$ (left) and shallow tunnel at $k_0 > 1$ (right) (Bakker in Blom, 2009).....	102
Figure 5-19 : Results from Duddeck and Erdmann model for different ratios of H/R at $k_0=0,5$ (Bakker, 2003).....	104
Figure 5-20: Scheme of phased analysis of tunnel construction (Bakker, 2003).....	105
Figure 5-21: Distribution of bending moments on two coupled rings (Blom, 2002).....	105
Figure 5-22 : Joint scheme of two coupled rings and structural model (Blom, 2002).....	106
Figure 5-23 : Radial stress in segmental lining (adapted from Blom, 2002).....	106
Figure 5-24: Deformations of u_{max} rings as function of ovalisation loading (Blom, 2002).....	107

Figure 5-25: Maximum tangential bending moments as function of ovalisation loading (% of σ_0) (Blom, 2002).....	107
Figure 5-26: Scheme of structural models (cantilever and supported beam) (Bakhshi and Nasri, 2014).	108
Figure 5-27: Scheme of normal forces distribution in segment due to thrust force (Bakhshi and Nasri, 2014).	109
Figure 5-28: Scheme of torsion mechanism (left) and inadequate support pressure (right) (Blom, 2002).	109
Figure 6-1: Options of construction waste reuse (TSC 06:800:2001).....	114
Figure 6-2: Soil conditioner biodegradability in time (adapted from Budach, 2011).....	120
Figure 7-1: Geological map of Ljubljana with Ljubljana moor (Pavšič, 2008).	129
Figure 7-2: Geological section at water supply facility Kleče (Žlebničnik, 1971).	130
Figure 7-3: Geological section Brod – Ježica (Žlebničnik, 1971).	130
Figure 7-4: Geological cross section through eastern part of Ljubljana moor (Mencej, 1989).	131
Figure 7-5: Geological long section through southern part of Ljubljana moor (Mencej, 1989).	131
Figure 7-6: Wider schematic hydrogeological map of Ljubljana (www.gov.si/atlasokolja/). ..	134
Figure 7-7 : Values of permeability coefficient according to grain distribution (Budach, 2011).	135
Figure 7-8: Water protection area with water facilities of Ljubljana (www.gov.si/atlasokolja/).	136
Figure 8-1: Clearance profile GC for railway tunnels in Slovenia (Uradni list RS št. 91/2010).	143
Figure 8-2: Characteristic cross section of double track metro railway tunnel.....	144
Figure 8-3: Characteristic cross section of two single track metro railway tunnel.....	144
Figure 8-4: Topographic map of Ljubljana with lines from system 4 (adapted from Strokovnih podlagah ..., 2009).	146
Figure 8-5: Topographic map of Ljubljana with lines from variant 1 (adapted from Žličar et al., 2010).....	146
Figure 8-6: Topographic map of Ljubljana with potential new tunnel lines.....	147
Figure 8-7: Main geological map with marks of different geological units on area of new tunnel lines (adapted from main geological map).	148
Figure 8-8: Geological map with potential new tunnels with areas of typical geological conditions (adapted from main geological map).	150
Figure 8-9: Water protection areas in Ljubljana with new tunnel lines (adapted from main geological map).....	151
Figure 8-10: Main geological map with locations of available data of structure and properties of the ground (adapted from main geological map).	152
Figure 8-11: Main geological map with new tunnel lines and geological units (adapted from main geological map).	153
Figure 8-12: Legend of materials used in longitudinal sections.	154
Figure 8-13: Long section of line A with ground structure data.....	155
Figure 8-14: Long section of line B north with ground structure data.	156
Figure 8-15 : Long section of line B south with ground structure data.	157
Figure 8-16: Long section of line C with ground structure data.	158

Figure 8-17: Long section of line D east with ground structure data.	159
Figure 8-18: Long section of line D west with ground structure data.....	160
Figure 8-19: Long section of line E with ground structure data.	161
Figure 8-20: Long section of line F with ground structure data.....	162
Figure 8-21: Long section of lines F1 in F2 with ground structure data.....	164
Figure 8-22: Granulometric curves of representative geological units for Ljubljana area (Institute for Mining, Geotechnology and Environment).....	165
Figure 8-23: Application area for EPB machine with soil conditioning (adapted from EFNARC, 2005).....	169
Figure 8-24 : Application area for EPB machine and extreme granulometric curves of ground in Ljubljana (adapted from EFNARC, 2005).	170
Figure 8-25: Application area for slurry machine according to Maidl (2012) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.....	173
Figure 8-26: Application area for EPB machine according to Maidl (2012) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.....	174
Figure 8-27: Application area for EPB machine according to Budach (2011) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.....	175
Figure 8-28: Application area for EPB machine according to Langmaack and Ibarra (2011) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.....	176
Figure 8-29: Application area for EPB machine and slurry machine according to Thewes (2007) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.	177
Figure 8-30: Granulometric curves of few completed projects in comparison with limit granulometric curves for Ljubljana area (adapted from Budach, 2007).....	178
Figure 8-31: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=16$ m and $k=0,35$	183
Figure 8-32: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=16$ m and $k=0,42$	183
Figure 8-33: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=16$ m and $k=0,50$	184
Figure 8-34: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=25$ m and $k=0,35$	184
Figure 8-35: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=25$ m and $k=0,42$	185
Figure 8-36: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=25$ m and $k=0,50$	185
Figure 8-37: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=16$ m and $k=0,35$	186
Figure 8-38: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=16$ m and $k=0,42$	186
Figure 8-39: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=16$ m and $k=0,50$	187
Figure 8-40: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=25$ m and $k=0,35$	187
Figure 8-41: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=25$ m and $k=0,42$	188

Figure 8-42: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=25$ m and $k=0,50$.	188
Figure 8-43: Relative rotation according to coefficient k at $Z_0=16$ m.	190
Figure 8-44: Relative rotation according to coefficient k at $Z_0=25$ m.	191
Figure 8-45: Vibration velocity of EPB machine according to soil (adapted from Hiller, 2011).	200
Figure A-1: Values of maximum settlement for one double track tunnel based on spring line depth at values k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).	I
Figure A-2: Values of maximum settlement for two single track tunnels based on spring line depth at values k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).	II
Figure B-1: Values of maximum settlement for one double track tunnel based on coefficient k at spring line depth Z_0 (15,0, 20,0 in 25,0 m) and V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).	IV
Figure B-2: Values of maximum settlement for two single track tunnels based on coefficient k at spring line depth Z_0 (15,0, 20,0 and 25,0 m) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).	V
Figure C-1: Values of maximum settlement for single tunnel tube on excavation area at depth $Z_0=16$ m, coefficient k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).	VI
Figure C-2: Values of maximum settlement for single tunnel tube on excavation area at depth $Z_0=25$ m, coefficient k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).	VII

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 4-1: Primerjava EPB naprave in naprave z izplako po posameznih področjih (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).	66
Preglednica 4-2: Priporočeni tipi penil in njihova količina (FIR) glede na vrsto zemljine (prirejeno po EFNARC, 2005).	70
Preglednica 6-1: Tipi izkopanega materiala glede na uporabljeno tehnologijo in vrsto hribine (prirejeno po Oggeri et al., 2014a).	116
Preglednica 6-2: Možnost uporabe izkopanega materiala (prirejeno po Oggeri et al., 2014a).	117
Preglednica 6-3: Mejne vrednosti emisijskih delcev PM ₁₀ (Uredba o kakovosti zunanjega zraka, 2011).	122
Preglednica 6-4: Mejne (zgoraj) in kritične (spodaj) vrednosti emisij hrupa (Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa, 2010).	123
Preglednica 6-5: Tipične hitrosti vibracij glede na izvor in oddaljenost (prirejeno po Kolymbasu, 2005).	124
Preglednica 6-6: Dopustne hitrosti vibracij po ÖNORM S 9020:1986.	125
Preglednica 6-7: Dopustne hitrosti vibracij po DIN 4150:2001.	125
Preglednica 8-1: Podrobnejši opis tras novih podzemnih prometnic.	147
Preglednica 8-2: Geološke enote z osnovnimi podatki na območju Ljubljane.	149
Preglednica 8-3: Dolžine odsekov geoloških enot za posamezno progo	153
Preglednica 8-4: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	155
Preglednica 8-5: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	156
Preglednica 8-6: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	157
Preglednica 8-7: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	158
Preglednica 8-8: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	159
Preglednica 8-9: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	160
Preglednica 8-10: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	162
Preglednica 8-11: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	163
Preglednica 8-12: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	164
Preglednica 8-13: Vrednosti parametrov oblike granulometrične krivulje (Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).	166
Preglednica 8-14: Primernost TBM naprav (označeno z rdečim okvirjem) za geološke pogoje v Ljubljani (prirejeno po ITA).	168

Preglednica 8-15: Ustreznost geomehanskih parametrov (označeno z rdečo) za napravo z izplako (SM-V4) (prirejeno po Maidl et al., 2010).....	171
Preglednica 8-16: Ustreznost geomehanskih parametrov (označeno z rdečo) za EPB napravo (SM-V5) (prirejeno po Maidl et al., 2010).....	172
Preglednica 8-17: Osnovni podatki o izvedenih projektih predorov (Budach, 2011; Maidl in Pierri, 2014; Langmaack in Ibarra, 2011).....	178
Preglednica 8-18: Količina (Q) potrebnega dodatka (penila) glede na vrsto zemljine	180
Preglednica 8-19: Dolžine odsekov proge predora glede na sestavo tal.....	181
Preglednica 8-20: Vrednosti maksimalnih posedkov glede na vrednosti vhodnih podatkov.	189
Preglednica 8-21: Vrednosti maksimalnih relativnih zasukov.....	190
Preglednica 8-22: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za dvotirni predor pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.	192
Preglednica 8-23: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.....	192
Preglednica 8-24: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za dvotirni predor pri različnih vrednostih k.....	192
Preglednica 8-25: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri različnih vrednostih k.	193
Preglednica 8-26: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za enocevni predor pri različnih površinah prečnega prereza A in globini (Z_0) 16 m.....	193
Preglednica 8-27: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za enocevni predor pri različnih površinah prečnega prereza A in globini (Z_0) 25 m.....	194
Preglednica 8-28: Količine izkopanega materiala za enotirna predora in dvotirni predor po posameznih progah.	195
Preglednica 8-29: Deleži gradbenih odpadkov pri gradnji predora z možnostmi predelave in odstranjevanja (prirejeno po Renghausen, 2014).....	198
Preglednica A-1: Rezultati posedkov s_{max} (mm) za dvotirni predor pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.	I
Preglednica A-2: Rezultati posedkov s_{max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.	II
Preglednica B-1: Rezultati posedkov s_{max} (mm) za dvotirni predor pri različnih vrednostih koeficienta k.	III
Preglednica B-2: Rezultati posedkov s_{max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri različnih vrednostih koeficienta k.	V
Preglednica C-1: Rezultati s_{max} (mm) pri globini $Z_0=16$ m za enocevni predor glede na površino prereza A.....	VI
Preglednica C-2: Rezultati s_{max} (mm) pri globini $Z_0=25$ m za enocevni predor glede na površino prereza A.....	VII

LIST OF TABLES

Table 4-1: Comparison of EPB and slurry shield machine based on specific areas (adapted from Kumpfmüller, 2008).	66
Table 4-2: Recommended types of foams and FIR ratio according to soil type (adapted from EFNARC, 2005).	70
Table 6-1: Spoil types according to machine system and ground structure (adapted from Oggeri et al., 2014a).	116
Table 6-2: Possible muck/spoil destinations (adapted from Oggeri et al., 2014a).	117
Table 6-3: Limit values for dust emissions PM ₁₀ (Uredba o kakovosti zunanjega zraka, 2011).	122
Table 6-4: Limit (above) and critical (below) values of noise emissions (Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa, 2010).	123
Table 6-5: Typical velocity values of vibrations according to source and distance (adapted from Kolymbas, 2005).	124
Table 6-6: Limit velocity values according to ÖNORM S 9020:1986.	125
Table 6-7: Limit velocity values according to DIN 4150:2001.	125
Table 8-1: Detail description of new tunnel lines.	147
Table 8-2: Geological units with main information on Ljubljana area.	149
Table 8-3: Length of section of geological unit for each tunnel line.	153
Table 8-4: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	155
Table 8-5: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	156
Table 8-6: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	157
Table 8-7: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	158
Table 8-8: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	159
Table 8-9: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	160
Table 8-10: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	162
Table 8-11: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	163
Table 8-12: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	164
Table 8-13: Values for parameters of granulometric curve shape (Institute for Mining, Geotechnology and Environment).	166
Table 8-14: Suitability of TBM type (marked with red frame) for geological conditions in Ljubljana (adapted from ITA).	168

Table 8-15: Suitability of geomechanic parameters (marked with red) for slurry machine (SM-V4) (adapted from Maidl et al., 2010).	171
Table 8-16: Suitability of geomechanic parameters (marked with red) for EPB machine (SM-V5) (adapted from Maidl et al., 2010).	172
Table 8-17: General information of completed tunnel projects (Budach, 2011; Maidl and Pierri, 2014; Langmaack and Ibarra, 2011).	178
Table 8-18: Quantity (Q) of additive (foam) according to soil classification.	180
Table 8-19: Length of tunnel line sections according to the ground structure.....	181
Table 8-20: Values of maximum settlements according to input data values.	189
Table 8-21: Values of maximum relative rotations.	190
Table 8-22: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.	192
Table 8-23: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for two single track tunnels at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.	192
Table 8-24: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at different values of k.	192
Table 8-25: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for two single track tunnels at different values of k.	193
Table 8-26: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at different cross sections and at depth (Z_0) 16 m.	193
Table 8-27: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at different cross sections and at depth (Z_0) 25 m.	194
Table 8-28: Quantities of excavated material for two single track and one double track tunnel for each railway line.	195
Table 8-29: Quantity of construction waste at tunnel construction with possibilities of recycling or disposal (adapted from Renghausen, 2014).	198
Table A-1: Results for settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.	I
Table A-2: Results for settlement s_{max} (mm) for two single track tunnels at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.	II
Table B-1: Results for settlement s_{max} (mm) for one double track tunnel at different values of coefficient k.	III
Table B-2: Results for settlement s_{max} (mm) for two single track tunnels at different values of coefficient k.	V
Table C-1: Results for s_{max} (mm) at depth $Z_0=16$ m single tube tunnel according to cross section A.	VI
Table C-2: Results for s_{max} (mm) at depth $Z_0=25$ m single tube tunnel according to cross section A.	VII

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

A	Površina izkopnega čela
A_B	Površina vertikalne ploskve klina
A_{orodja}	Površina izkopnega orodja ali rezalne glave
α	Kotna deformacija
b	Širina vplivnega območja nad predorom
b	Polovična širina betonskega segmenta obloga
β	Relativni zasuk
c	Kohezija
C_c	Koeficient ukrivljenosti
C_F	Koeficient zraka v vodi
c_i	Kohezija drsne ploskve
C_r	Togost vzmeti stika betonske obloge (rotacijska togost)
C_u	Koeficient enakomernosti
d'	Višina porušnega klina ali premer predora
d_{10}	Velikost zrna pri 10% presejku
d_{60}	Velikost zrna pri 60% presejku
DPN	Državni prostorski načrt
D_S	Premer rezalne glave
Δs	Diferenčni posedek med dvema točkama temelja objekta
E_a	Normalna (vodoravna) komponenta sila obtežbe porušnega klina
E_C	Elastični modul betonske obloge predora
e_{max}	Maksimalna globina penetracije izplake
ϵ_{crit}	Kritična vrednost horizontalne deformacije
ϵ_{lim}	Mejna vrednost horizontalne deformacije
ϵ_H	Računska horizontalna deformacija
EPB	Earth pressure balance
F	Koeficient varnosti
$F_0 - F_3$	Koeficienti za izračun podpornega pritiska po Anagnostou in Kovari
f_a	Koeficient sorazmernosti (odvisen od tipa TBM naprave)
F_{dviga}	Količnik varnosti pred nevarnostjo porušitve na površini
FER	Koeficient povečanja prostornine
FIR	Koeficient porabe penila
F_x	Vodoravna komponenta sile pronicanja
F_z	Vertikalna komponenta sile pronicanja
G	Teža klina
GRT	Gornji rob tira
G_s	Obtežba TBM naprave (ščita)
H	Višina med zgornjo ploskvijo klina in nivojem podzemne vode
H	Višina nadkritja nad predorom
h_0	Višina podzemne vode nad dnom predora
H_1, H_2	Nadkritje nad in pod gladino podzemne vode nad predorom
H_{ABCD}^*	Povprečna piezometrična višina na čelu predora
H_{ABEF}^*	Povprečna piezometrična višina na mestu drsne ploskve
H_w^*	Srednja piezometrična višina na mestu čela izkopa
i	Točka prevoja Gaussove krivulje oz. linije posedka površine

I_C	Indeks konsistence
I_L	Vztrajnostni modul obloge predora
I_P	Indeks plastičnosti
J_a	Stopnja spremembe vzdolž najšibkejše razpoke
J_n	Število razpok
J_r	Hrapavost najbolj neugodne razpoke ali diskontinuitete
J_w	Dotok vode
k	Količnik vrste zemljine
k	Koeficient prepustnosti vode
k_0	Mirni zemeljski pritisk
k_a	Aktivni zemeljski pritisk
k_p	Pasivni zemeljski pritisk
K_r	Togost vzmeti med oblogo in hribino (radialno)
L	Dolžina ščita
L_{dan}	Kazalec hrupa podnevi
L_{dvn}	Kazalec celodnevne hrupa
$L_{noč}$	Kazalec hrupa ponoči
L_s	Kazalec konične ravni hrupa
l_t	Srednja višina kontaktne ploskve v vzdolžnem stiku
$L_{večer}$	Kazalec hrupa zvečer
M	Moment
MDK	Mejna dovoljena koncentracija
M_{max}	Maksimalni upogibni moment
M_T	Računski navor TBM naprave
M_v	Modul stisljivosti
N	Reakcijska sila, ki jo prevzamejo tla zaradi obtežbe porušnega klina
N	Oсна sila
$NATM$	Nova avstrijska metoda gradnje predorov
OCR	Količnik prekonsolidiranosti
$p_{dodatna}$	Vertikalna napetost zaradi dodatne (vnešene) napetosti
p_h	Horizontalna napetost na predor
$p_{koristna}$	Vertikalna napetost zaradi koristne obtežbe nad površino
PM_{10}	Prisotnost trdnih delcev v zraku velikosti 10 mikrometrov
$PM_{2,5}$	Prisotnost trdnih delcev v zraku velikosti 2,5 mikrometra
p_P	Odpornost hribine na penetracijo izkopnega orodja
p_v	Vertikalna napetost zaradi lastne teže hribine
P_v	Računska potisna sila TBM naprave
p_{vrh}, p_{dno}	Podporni pritisk na vrhu in dnu izkopne komore
$p_{vskupna}$	Skupna vertikalna napetost zaradi obtežbe na predor
P_{Wvrh}, P_{Wdno}	Pritisk vode na vrhu in dnu izkopne komore
Q	Indeks kvalitete hribine za gradnjo predorov in izbiro primarne podgradnje
Q_F	Pretok penila skozi šobe (mešanica penila, vode in zraka)
Q_P	Količina penila po enačbi Obayashi
RQD	Rock quality designation
S	Skupni podporna sila
S'	Efektivni podporna sila
s'	Pritisk na čelu izkopa
$s(x)$	Posedek pri oddaljenosti x od osi predora
s_0	Podporni pritisk v kroni predora

SEM	Sequential excavation method
S_H	Horizontalni premik površine v smeri pravokotno na os predora
S_{max}	Maksimalni posedek površine
SRF	Faktor redukcije napetosti
t	Širina noža ali rezalnih zob
TBM	Tunnel boring machine
T_c	Sila upora drsne ploskve klina
T_{CP}	Upor zaradi kohezije na drsni ploskvi klina
t_{cr}	Kritični čas stabilnosti čela
T_{CS}	Upor zaradi kohezije na stranicah klina
T_ϕ	Sila upora stranskih ploskev klina
U	Obseg horizontalne ploskve klina
u_{max}	Deformacija obloge zaradi spremembe oblike predora
V'	Vertikalna sila obtežbe porušnega klina nad temenom predora
v_{cr}	Kritična hitrost napredovanja naprave za ohranjanje stabilnosti čela
V_L	Delež izgube prostornine predora
v_{max}	Maksimalna hitrost nihanja tal
W	Obtežba vode
w	Vlažnost zemljine
W_K	Sila upora zaradi krmiljenja TBM naprave
w_L	Meja židkosti
W_O	Sila upora rezalne glave
w_P	Meja plastičnosti
W_P	Sila upora pri prodiranju skozi hribino
w_S	Meja krčenja
W_T	Sila trenja po ščitu (plašču) TBM naprave
X	Presejek skozi sito 0,075 mm
Y	Presejek skozi sito 0,420 mm
Z	Presejek skozi sito 2,0 mm
Z_0	Globina nivelete predora
α	Korekcijski faktor glede na vrednost C_u
α	Višina znižanja vode zaradi pronicanja
Y_G	Prostorninska teža zemljine kvadra
Y_g	Prostorninska teža zemljine
Y_w	Prostorninska teža vode
δ	Naklon drsne ploskve klina
Δh	Razlika med piezometričnima višina na čelu izkopa in v porušnem klinu
Δp	Presežni podporni pritisk pri napravi z izplako
ΔW	Varnostna razlika pri določanju potisne sile
ν	Poissonov količnik
σ'	Efektivna normalna napetost
σ'_V	Reducirana vertikalna napetost med kvadrom in klinom
τ	Strižna nosilnost zemljine
τ_f	Mejna strižna napetost izplake
ϕ	Strižni kot zemljine

1 UVOD

Predori so objekti, ki jih pretežno gradimo z namenom izboljšanja prometnih povezav. Slovenija s svojim značilnim razgibanim reliefom praktično sama po sebi zahteva gradnjo predorov, ki imajo odločilno vlogo pri razvoju in povezovanju mest ter vplivajo na regionalni razvoj gospodarstva. Gradnja predorov v preteklosti bolj vezana na ruralna območja, se vse bolj uporablja tudi v urbanih območjih. Danes je sodobno mesto nekakšna visoko tehnološko razvita tvorba, ki je vpeta v regionalne in mednarodne tokove, ima svojo pomembno vlogo na globalnem trgu ter ponuja oz. zagotavlja storitve za svoje in okoliške prebivalce. Pomanjkanje prostora na površini in njegova družbena in ekonomska vrednost usmerjata možnost širitve javne infrastrukture v podzemni prostor, ki postaja praktično neomejen razvojni potencial prihodnjega razvoja mest.

Zgodovina predorov sega daleč nazaj, saj so že v antiki takratne civilizacije gradile predore za obrambne potrebe ali kot dele vodovodnih sistemov. Predori, kot jih poznamo danes, so se začeli graditi konec 17. stoletja v Veliki Britaniji, kjer so gradili kanale za vodni transport. V letu 1829 je bil nato zgrajen prvi železniški enotirni predor v dolžini 266 m za prevoz potnikov. Leta 1871 so pri gradnji predora Hoosac v Združenih državah prvič uporabili tudi eksploziv in vrtalne naprave na paro (Maidl et al., 2012). V letu 1964 je bila predstavljena nova avstrijska metoda gradnje predorov (NATM), ki je ponudila sodobni pristop gradnje predorov in se na širšem območju Slovenije uporablja še danes.

Poleg klasične izkopne metode so pionirji predorogradnje ves čas poskušali z razvojem mehanizirane naprave za rezanje celotnega profila predora (v nadaljevanju TBM – Tunnel Boring Machine). Eden izmed prvih poskusov sega v leto 1825, ko je arhitekt in izumitelj Sir Marc Isambard Brunel predlagal izvedbo predora z varovalnim ščitom pri gradnji prvega podvodnega predora pod reko Temzo (Thames Tunnel) v Londonu, kjer pa sta bila izkop in obloga predora še vedno izdelana ročno. Že v letu 1850 so se pojavili tudi prvi poskusi popolnoma mehanizirane naprave, katere se še niso obnesle. Tehnološko in ekonomsko opravičljive naprave so dosegle primerno stopnjo razvoja šele okoli leta 1950 za gradnjo predora v kompaktni hribini, v mehki hribini pa deset let kasneje (Maidl et al., 2012).

Gradnja podzemnih objektov ima več pozitivnih lastnosti, saj manj vpliva na okolico med gradnjo in bistveno zmanjša vpliv na okolje v času rabe objekta. Premeščanje glavne prometne infrastrukture pod površino, omogoča ohranjanje urbane dediščine in izboljšanje kakovosti javne površine za potrebe druženja in rekreacije, kar tudi zvišuje vrednost nepremičnin. Hkrati nudi tudi zanesljive in hitre prometne povezave ter kakovostno urejeno javno infrastrukturo.

Kaj nas torej odvrtača od gradnje podzemnih objektov? Eden od vzrokov je predvsem še vedno neustrezno napovedovanje stroškov in časa trajanja gradnje. Običajno je glavni razlog proti neposredna primerjava cene z objekti na površini, vendar se je potrebno zavedati, da ima gradnja podzemnih objektov neposredne in posredne ugodne vplive na okolico, ki niso merljivi le v direktnih stroških, ampak tudi v tako imenovanih mehkih stroških oz. v izboljšanju kakovosti življenja okolice ter širše družbe, ki uporablja podzemne objekte.

Pogosto se zgodi, da stroški gradnje presežejo prvotna predvidevanja. Razloge bi lahko iskali v preskopih geološko-geomehanskih preiskavah za potrebe razpisne dokumentacije, v

neustreznih projektantskih rešitvah, nepravičnih in enostranskih pogojih pogodbe, neučinkovitem nadzoru, neustreznem projektnem vodenju tako na strani naročnika kot izvajalca, pomanjkanju medsebojnega razumevanja in spoštovanja vseh vpletenih strank. Če pogledamo le s tehničnega vidika lahko najdemo še nekaj ključnih razlogov, kot so sodobnost razpoložljive tehnologije, alternativne tehnologije (pridobivanje energije z vetrom namesto s termoelektrarnami) in načrtovanje podzemnih objektov. To obdobje, ki vključuje strateško planiranje, izdelavo alternativnih rešitev, raziskovanje, projektiranje, razpisovanje del in izgradnjo, je zelo dolgo in je nato podvrženo nezanesljivemu zagotavljanju sredstev, še posebno če je projekt predmet političnih interesov.

Kako lahko k temu pripomore stroka? Tako da izboljšamo svoje izdelke, z boljšim in naprednim znanjem, z učinkovitostjo, z boljšim napovedovanjem stroškov in dejanskega časa gradnje, z analiziranjem domačih in tujih projektov ter ozaveščanjem storjenih napak, ponujanjem možnosti in spodbujanjem uporabe naprednih tehnologij.

V Sloveniji se predori večinoma uporabljajo za potrebe cestne in železniške infrastrukture ter tudi kot tlačni rovi hidroelektrarn. Za potrebe železniškega prometa je zgrajenih 93 predorov in galerij v skupni dolžini 37,4 km (https://sl.wikipedia.org/wiki/zeleznica_v_Sloveniji). Na cestnem omrežju je na avtocestah in hitrih cestah zgrajenih 45 predorov v skupni dolžini 42,15 km (www.dars.si, 2016). Predori so v večini zgrajeni po klasični sekvenčni izkopni metodi. V zadnjem času bolj poznana primera, kjer je bila uporabljena TBM tehnologija, sta predora za potrebe pridobivanja električne energije in sicer tlačna rova HE Plave II in Doblar II, premera 6,98 m in skupne dolžine 9,9 km (<http://www.seng.si/hidroelektrarne/>).

V nalogi smo se osredotočili na gradnjo predorov s TBM tehnologijo in preverili kakšne so možnosti uporabe metode v Ljubljani in okolici. V tujini je namreč omenjena tehnologija izredno razširjena predvsem pri gradnji predorov v urbanem okolju, gradnji daljših predorov z nizkim nadkritjem, pod nivojem talne vode ter v zelo raznolikih geoloških pogojih. TBM naprava je običajno sestavljena iz vrteče izkopne glave, enojnega ali dvojnega ščita ter potisnega mehanizma. Premer TBM naprav je lahko od enega metra pa vse do 20 m za zemljine in 15 m za kamnine. Gradnja predorov v urbanem okolju ima poleg zahtevnosti izkopa še dodaten izziv saj z izkopom ne smemo povzročati prekomernih vplivov na površini oz. na obstoječih objektih (ki so lahko tudi spomeniško zavarovani). Zmanjševanje teh vplivov dosežemo z ustreznim ohranjanjem pritiska na izkopno čelo med izkopom in segmentno oblogo po izkopu predora. To je izredno težko v primerih, ko niveleta predora poteka skozi različne geološke plasti (npr.: del predora v zemljini, del pa v kamnini).

Gradnjo predora s TBM napravo sestavlja še veliko spremljajočih aktivnosti, kot so izgradnja začetnih in sprejemnih jaškov, sestavljanje TBM naprave na mestu, izdelava predizdelanih betonskih elementov za oblogo predora, logistika odvoza izkopanega materiala, dovoz in vgradnja predizdelanih elementov, zapolnjevanje prostora med oblogo in izkopom s cementno maso ter na koncu demontaža in odstranitev naprave ter zapiranje jaškov. Gradnja predorov s TBM napravami je tako predvsem primerna za daljše predore ter tam, kjer se zahteva zmanjšan vpliv na površje. Primerna je za uporabo v urbanem okolju za potrebe podzemnih prometnih povezav, izgradnjo novih ali sanacijo starih vodovodnih, kanalizacijskih ali kabelskih omrežij, ki imajo sorazmerno veliko dolžino in potekajo plitvo pod površino. Pri tem je ključnega pomena ustrezna izbira naprave, raven znanja ter izkušnje operaterjev.

Možnost uporabe TBM tehnologije za gradnjo predorov v Ljubljani nakazujejo tudi izdelane strokovne podlage urejanja javnega prometa Ljubljanske urbane regije (v nadaljevanju LUR) (Bensa et al., 2009) in sicer pri varianti izgradnje podzemne železnice ter študije modernizacije ljubljanskega železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010). V Ljubljani in okolici predvsem prevladuje prevoz z osebnimi vozili, kar je do sedaj vplivalo le na razvoj in nadgradnjo cestne infrastrukture. Poročilo strokovnih podlag za urejanje javnega prometa LUR predlaga vzpostavitev sistema javnega prometa, kot način trajne mobilnosti. Za območje Ljubljane je bilo do sedaj pripravljenih več različnih študij javnega prometa, od katerih večina ne rešuje problema v celoti (Krivec, 2010; Koželj, 2005). Omenjene strokovne podlage upoštevajo tudi strateška in zakonska izhodišča na nivoju EU, nacionalnem, regijskem in lokalnem nivoju, kar predstavlja povečanje mobilnosti ob hkratnem zmanjšanju zastojev, onesnaževanja in nezgod.

Načrtovanje predora s TBM tehnologijo se nekoliko razlikuje od gradnje s klasično izkopno metodo. V primeru uporabe TBM tehnologije je namreč potrebno že v fazi načrtovanja pridobiti čim več podatkov o hribini v kateri se bo predor gradil (izvedba raziskav in napoved geoloških in hidrogeoloških pogojev), o lokacijah in stanju obstoječih objektov, določiti optimalno traso ter nato izbrati ustrezno TBM napravo. V kasnejših fazah načrtovanja se lahko izvede tudi optimizacija vitalnih delov naprave (čela izkopa ni mogoče deliti na manjše izkopne enote), dokaj natančno se določijo tudi vplivi na okolje. Izbira najprimernejše naprave je v prvi vrsti odvisna od stopnje posedkov na površini, velikosti zrn in prisotnosti večjih homogenih delov. Razumljivo je, da pri daljših predorih in kompleksni geološki sestavi ni mogoče pričakovati enakomernih plasti, zato je pri uporabi TBM tehnologije potrebno posebno pozornost nameniti naslednjim geološkim pojavom (Maidl et al., 2013):

- občutljiva zemljina z visokim deležem gline in možnostjo hitre porušitve,
- peščene in prodnate plasti z visoko vsebnostjo vode,
- plasti z večjo verjetnostjo pojava osamelcev,
- plasti z ostanki lesa ali depresije z zasipi iz ruševin in
- hribina, kjer se menjajo izrazito trdne in mehke plasti.

Čeprav je uporaba TBM tehnologije v Sloveniji prava redkost, menimo da je opisana tehnologija gradnje predorov dosegla ustrezno stopnjo razvoja, da jo je možno, kot preverjeno tehnologijo uporabiti tudi na ožjem ljubljanskem območju za potrebe izgradnje predorov v različne namene (podzemna železnica, podzemne vpadnice v mesto, rekonstrukcija kanalizacijskega omrežja in njenih glavnih vodov do centralne čistilne naprave, ipd.). Hkrati je mesto Ljubljana sestavljeno iz več središč z različnimi vsebinami, ki jih je smotno povezati z učinkovitim javnim omrežjem, ki pa ne obremenjuje urbanih površin.

Pri načrtovanju in uporabi sodobnih metod gradnje predorov, se lahko poslužimo besed pionirja mehanizirane gradnje Sira Marca Isambarda Brunela, ki pravi: *»A plan whatever it may be, must be made for the bad ground, it must be calculated to meet all exigencies, all disasters and to overcome them after they have occurred«*. S svojimi besedami nas opozarja in hkrati opogumlja, da uporaba novih pristopov ne sme biti ovira, vendar jih moramo uporabljati previdno in preiščeno.

V nalogi smo se zato osredotočili na temeljiti pregled literature in projektov o TBM tehnologiji, identificiranje uporabe tehnologije vključno z zaključki strokovnih podlag za širitev javnega potniškega prometa. Osredotočili smo se na izbiro naprave za dane geomehanske pogoje ter na podlagi izvedenih projektov poskušali opisati okoljski vpliv v času gradnje, tako da so ti čim manjši. Z zakonom o varstvu okolja je predpisana izdelava celovite presoje vplivov na okolje, kjer se ugotovi in oceni vplive na okolje, vključenost zahtev varstva okolja, ohranjanje narave, varstva človekovega zdravja in kulturne dediščine. Elemente, ki jih je potrebno obravnavati v sklopu presoje zajemajo dolgoročne, kratkoročne, posredne ali neposredne vplive nameravanega posega na človeka, tla, vodo, zrak, biotsko raznovrstnost, naravne vrednote, podnebje in krajino ter tudi na človekovo nepremično premoženje, kulturno dediščino ter njihova medsebojna razmerja. V nalogi smo se osredotočili le na ravnanje z gradbenimi odpadki, kjer smo preverili ali so vplivi na okolje manjši ali kvečjemu enaki, kot pri klasični izvedbi.

2 NAMEN IN CILJI NALOGE TER OSNOVNE HIPOTEZE

Namen magistrskega dela je podrobno predstaviti tehnologijo gradnje predora z napravami za izkop v celotnem profilu z opisom vseh pripadajočih objektov. Pregledali smo razpoložljive podatke o geoloških in hidrogeoloških pogojih v Ljubljani in okolici. Poiskali in predstavili smo podobne že izvedene projekte in izpostavili poglobitve točke gradnje predora na opisan način. V nadaljevanju smo se posvetili splošnemu predlogu izgradnje takega predora v Ljubljani, kjer smo poskušali izbrati najprimernejši tip naprave in analitično obdelali vzorčni primer.

Glavni cilj naloge je bil s pomočjo znanj pridobljenih iz strokovne literature in primerov že izvedenih predorov v urbanem območju, preveriti ali obstaja možnost izvedbe predora z enovito TBM tehnologijo v geološko raznoliki Ljubljani in oceniti vplive take gradnje na okolje.

Osnovne hipoteze, katere bodo potrjene ali ovržene v magistrski nalogi so:

- Gradnja predorov s TBM tehnologijo je izvedljiva na Ljubljanskem območju.
- Možno je izbrati enovito tehnologijo TBM naprave za izgradnjo predora.
- Vplivi na okolje so pri gradnji predorov s TBM tehnologijo manjši ali kvečjemu enaki kot pri gradnji predorov s klasično tehnologijo.

3 GRADNJA PREDOROV KOT DODANA VREDNOST

Sodobno mesto zagotavlja visoko raven kakovosti bivanja, ki jo neprekinjeno omogoča z izkoriščanjem omrežja gospodarske javne infrastrukture za kar neizbežno uporablja prostor na površini, ki je cenjen tako družbeno, kot ekonomsko. Podzemni prostor je za razliko manj cenjen, omogoča pa nemoteno dobavo pitne vode, energije, odvajanje odpadne vode ter omogoča kakovostnejše prometne povezave ob hkratni visoki ravni bivalnega okolja (Mazi, 2007).

Razvijanje mesta v omenjeni smeri je zahtevno, saj je prostor stabilna struktura, spremembe sodobnega oz. modernega časa pa so izrazito hitre. Ena takih sprememb je gotovo pospešena rast mesta s pripadajočo motorizacijo, ki duši mesta s povečanim številom motornih vozil. S tem se promet postopoma upočasni in ne zagotavlja več zelene pretočnosti, s tem pa se tudi kakovost bivalnega okolja na račun emisij plinov in hrupa hitro zmanjšuje. Kot že omenjeno uvodoma, se rešitev ponuja z gradnjo novih podzemnih prometnic. Predor kljub temu predstavlja antropogeni tujek, tako v okoljskem kot tudi v sociološkem smislu. Poleg ekonomske primerjave je potrebno predor predstaviti, kot alternativo prometnice na odprti trasi z vsemi vplivi na urbani prostor. Neposredni vplivi so običajno merljivi (emisije plinov, hrupa, itd.), posredni pa ne, saj vplivajo na izboljšanje kakovost bivanja, biotsko pestrost, zmanjšanje števila poškodovanih v prometnih nesrečah, prihranku potovalnega časa, itd.. Posredni vplivi hkrati niso le lokalne narave, ampak lahko vplivajo tudi regionalno oziroma med regionalno.

3.1 O gradnji predorov v splošnem

Uporaba tehnologije za kontinuirani izkop v celotnem profilu predora je ena izmed treh osnovnih metod izgradnje predora. Poznamo še klasično sekvenčno metodo in gradnjo v odprti gradbeni jami ali pokriti vkop.

Gradnja predora je proces, ki vključuje varen in učinkovit izkop in zagotavlja dolgoročno stabilnost predora. Hribino sestavljajo različne geološke plasti, ki so bolj ali manj poškodovane zaradi tektonskih con. Le te vplivajo na značilnost hribine in obnašanje med gradnjo predora, ki ruši vzpostavljeno ravnotežje. Gre za interakcijo med procesom gradnje in sodelujoče hribine. Obnašanje je odvisno od značilnosti hribine, podzemne vode, vplivov gradnje, geometrije in orientacije predora ter izbrane metode izkopa (Mazi, 2007).

Pri načrtovanju predora moramo izbrati ustrezno tehnologijo izkopa in podgradnje, njegova gradnja pa mora upoštevati ekonomiko, učinkovitost in varnost. Izbrana metoda mora zagotoviti izpolnitev vseh funkcionalnih zahtev objekta in njegovih pomožnih delov, predpisane stabilnostne razmere med gradnjo in obratovanjem objekta, ustrezno varnost podzemnega prostora v vseh fazah del, predpisano varnost in zdravje ljudi, ki izvajajo vse vrste del med gradnjo objekta, pravočasno in ustrezno ukrepanje ob povečanih deformacijah in dovolj majhne vplive gradnje predora na površino na poseljenih območjih in druge okoliške podzemne objekte (Uredba o tehničnih normativih..., 2006).

Izbira metode gradnje je odvisna predvsem od geometrijskih zahtev (dolžine in prečnega profila predora, višine nadkritja in oblike površja), geoloških in geotehničnih razmer na širšem območju načrtovane gradnje, načrtovane rabe prostora nad predorom ali že izrabljenega prostora, povezanega z občutljivostjo morebitnih objektov na deformacije, ki bi nastale med

gradnjo predora, rezultatov ekonomske presoje gradnje in presoje tveganja gradnje ter drugih okoliščin (Uredba o tehničnih normativih..., 2006).

Poznamo osnovne tri metode gradnje predorov (Mazi, 2007):

- klasična sekvenčna ali ciklična izkopna metoda (SEM – sequential excavation method),
- kontinuiran izkop z napravo v celotnem profilu predora (TBM – tunnel boring method ali Mechanised tunnelling) in
- gradnja podzemnih objektov v odprti gradbeni jami oz. metoda pokritega vkopa (cut and cover).

3.1.1 Klasična sekvenčna oz. ciklična izkopna metoda

Poznamo več metod sekvenčne gradnje predorov, vendar je na območju Slovenije in širše najbolj razširjena sekvenčna metoda izkopa z odprtim čelom, imenovana tudi Nova avstrijska metoda (NATM). Osnovni princip te metode je, da se pri izkopu v hribini tvori samonosilni obroč, ki v čim večji meri prevzame napetosti in deformacije v hribini, preostali del obremenitve pa prevzame podpiranje ali tako imenovana primarna podgradnja, ki zagotavlja pogoje varnega izkopa ter vzpostavljanja samonosilnost hribine preko dopustnih deformacij. Na ta način se doseže visoka učinkovitost izvedenih del. Primarno podgradnjo sestavljajo aktivni (sidra) in pasivni (brizgani beton, armaturna mreža, jekleni loki, idr.) podporni ukrepi, ki izboljšujejo stabilnost v neposredni okolici predora. Ustrezno podgradnjo določimo z upoštevanjem naslednjih vplivov:

- vpliv primarnega napetostnega stanja,
- vpliv površinske obtežbe,
- vpliv izkopa predora,
- vpliv podzemne vode in
- vpliv lastne teže podgradnje.



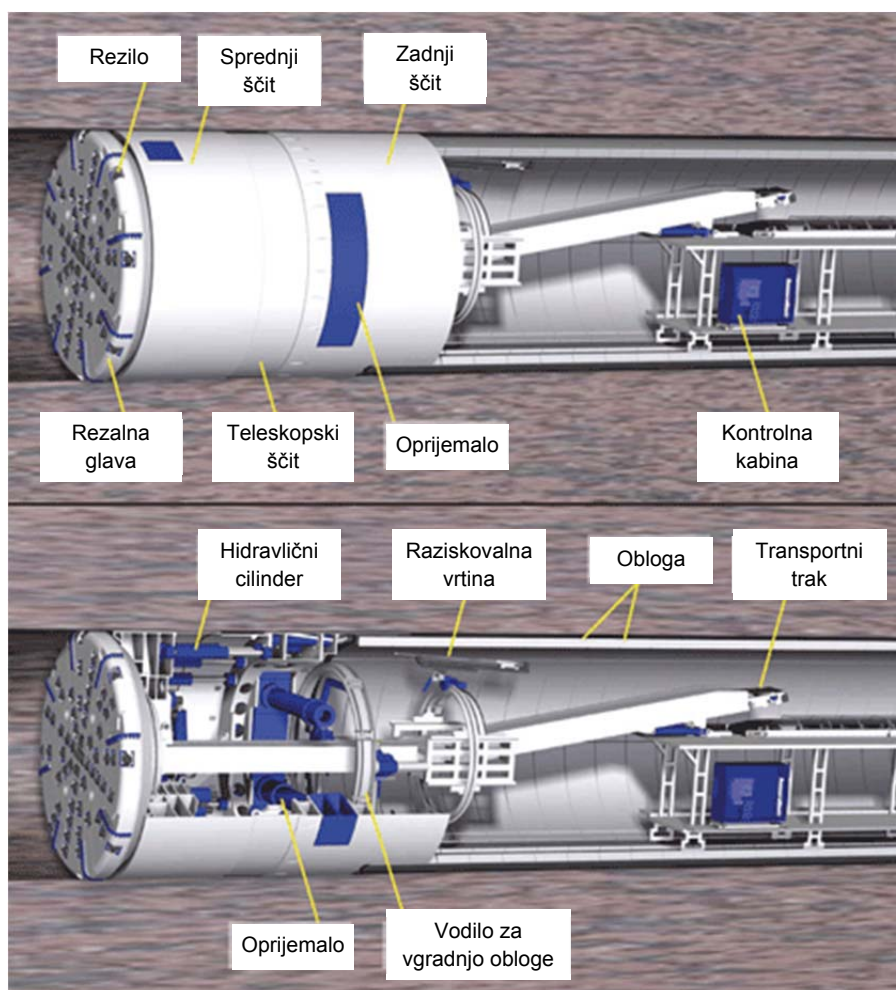
Slika 3-1: Prikaz izvedbe predora po novi avstrijski metodi (levo, sredina) in princip nosilnega obroča (desno) (Maidl et al., 2012).

Figure 3-1: Application of NATM in tunnel construction (left and middle) and concept of carrying ring (right) (Maidl et al., 2012).

Metodo imenujemo tudi »opazovalna metoda« (cit. po Peck, 1969), saj lahko s pomočjo spremljanja deformacij v izkopanem predoru, modificiramo izkopni korak in primarno podgradnjo že v času izkopa predora. Čeprav se metoda uporablja pretežno tam, kjer ni potrebe po krožnih prečnih profilih, je potrebno vseeno opozoriti, da je geometrija profila zelo pomembna.

3.1.2 Kontinuiran izkop s TBM napravo

Metoda za izkop predorov v celotnem profilu spada med mehanizirane ali kontinuirane načine izkopa z odprtim ali zaprtim čelom. Uporablja se za predore daljše od 4km pri različnih premerih in se uporabljajo v različne namene (komunalna infrastruktura, cestni ali železniški promet). Omogoča izkop pri nizkem nadkritju (tudi samo enkratni premer predora) ali visokem nadkritju ter izvedbo v dokaj heterogenih hribinah. Od klasične metode se v največji meri razlikuje v tem, da ni potrebno za potrebe napredovanja sproti vgrajevati primarnega podporja, ampak se za izkopom vgrajuje že končna obloga predora. Vpliv na okoliško hribino so predvidoma manjši, kot pri odprtem čelu. Tovrstni način gradnje predora je primeren predvsem za daljše predore ter bolj homogene hribine.



Slika 3-2: Primer naprave za izkop predora v celem profilu ali TBM za kamnino (prirejeno po Maidl et al., 2007).

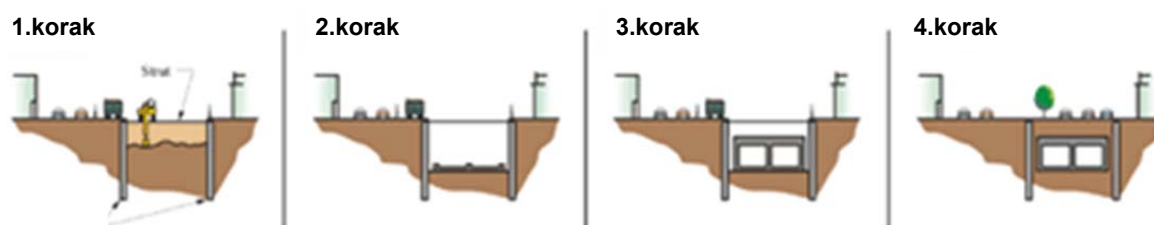
Figure 3-2: Example of hard rock TBM machine for excavation in full section (adapted from Maidl et al., 2007).

Osnovna razlika med mehaniziranim (kontinuiranim) izkopom in cikličnim (sekvenčnim) izkopom je v poškodovanju okoliške kamnine. Pri ciklični metodi je kamnina zaradi načina izkopa bolj poškodovana v kroni in talnem oboku, pri TBM-u pa v bokih zaradi opiranja (Vukmirović, 2008).

3.1.3 Metoda pokritega vkopa

Samo ime nakazuje gradnjo podzemnega objekta, ki je izveden tako, da se izkoplje odprti usek do temeljev objekta, postavi konstrukcija, ki se nato zapolni oz. prekrije. Metoda je primerna za krajše razdalje ter v primerih, ko je nad predvidenim predorom premalo nadkritja za gradnjo predora oziroma je izvedba trajnega useka nemogoča ali pa bi bil preširok. Uporablja se v urbanih območjih ter tudi na odprti trasi, vendar predvsem za izgradnjo pomožnih objektov.

Vse tri omenjene metode je težko neposredno primerjati, saj se uporabljajo za gradnjo predorov v različnih pogojih. Uporaba TBM metode zahteva čim bolj podobne lastnosti hribine ter je opravičljiva za večje dolžine predorov. Klasična ciklična metoda je prilagodljiva in zato uporabna v vseh vrstah hribine, vendar zaradi nekoliko počasnejšega napredovanja bolj primerna za krajše predore. Metoda pokritega vkopa je primerna za predore z nizkim nakritjem, kjer razmere v hribini ne dovoljujejo uporabe prvih dveh metod.



Slika 3-3: Primer izvedbe podzemnega objekta z metodo pokritega vkopa (prirejeno po www.railsystem.net).

Figure 3-3: Example of cut and cover technique (adapted from railsystem.net).

Vse tri metode se lahko uspešno kombinirajo na enem samem projektu, tako da na posameznih odsekih uporabimo tisto pri kateri lahko v največji meri izkoristimo njene prednosti.

3.2 Umeščanje predora v prostor

3.2.1 Splošno

Prometno omrežje sestavljajo različni infrastrukturni objekti. V Sloveniji so v največji meri zastopane ceste, kar lahko pripišemo razgibanemu terenu ter sociološkemu profilu. Ceste kot take zahtevajo veliko prostora (zemljiški pas), s svojo uporabo pa še dodatno obremenjujejo prostor. Istočasno je potrebno priznati, da cest v celoti ni mogoče zamenjati s predori.

Trajen prostorski razvoj zagotavljamo z ustreznim prostorskim načrtovanjem in njegovim urejanjem, z obravnavanjem in usklajevanjem različnih potreb in interesov ter z namenom varstva okolja, ohranjanja narave in kulturne dediščine, varstva naravnih virov, obrambe in varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami (3. čl. ZPNačrt, Ur.l. RS, št. 33/07). Hkrati je potrebno spodbujati in usmerjati takšen družbeni razvoj, ki omogoča dolgoročne pogoje za človekovo zdravje, počutje in kakovost življenja ter ohranjanje biotske raznovrstnosti (2. čl. ZVO-1, Ur.l. RS, št. 39/06). Sočasen prostorski in družbeni razvoj lahko zagotovimo s prepoznavanjem soodvisnosti med posameznimi področji, območji in dejavnostmi, ki jih nato

ovrednotimo glede na vplive na okolje ter načinom in magnitudo vplivanja na uporabnike v prostoru oziroma njihove interese.

Eden izmed glavnih ciljev pri načrtovanju mestnega prometa je čim večja raznolikost prometnih sistemov in hierarhičnost omrežij, povečanje deleža javnega prometa in njegove kakovosti, medsebojna ločitev vrst prometa, ustrezna razporeditev glede na rabo in aktivnost v mestu, razbremenjevanje mestnih središč, izboljšanje varnosti, povečevanje varnosti in hitrosti ter zmanjševanje negativnih učinkov (Mazi, 2007).

Železniški predori so objekti na trasi proge s katerimi se omogoča ohranjanje proge v mejah njenih geometrijskih in tehničnih elementov skozi reliefne pregrade (Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog, 2013). Predorski del je enako kot cestni predori dopolnjen s portalnimi območji in mora na interoperabilnih progah biti projektiran in izveden skladno z določbami, ki urejajo varnost v železniških predorih na vseevropskem železniškem sistemu za konvencionalne in visoke hitrosti. Poleg zahtev o zagotavljanju ustreznega svetlega profila so podobno kot za cestne predore natančno podane določbe o zagotavljanju reševalnih poti in zasilnih izhodov.

S hitro rastjo motorizacije in spuščanjem prometa v urbana središča povečujemo potrebo po sodobnih prometnicah. Količina prometa sama po sebi kliče k spremembi v prometnem omrežju, ki se lahko delno seli v podzemni prostor. S tem se razbremenjuje urbane površine in omogoča drugačno rabo. Osnovni namen predorov je oskrba prebivalstva v različne namene. Uporabljajo se za vse vrste transportnih sistemov (ceste, železnice, koridorji za pešce, itd.), komunalno infrastrukturo (kanalizacijski sistemi, daljinski vodovodi, ogrevanje, idr.), za izkoriščanje vodnih virov (hidroelektrarne) in druge namene. Umeščanje predora v prostor je odvisno od njegovega namena, tipologije predora in ostalih omejitvenih dejavnikov v urbanih območjih.

Iskanje ustreznih argumentov za prednosti in slabosti zakaj izrabljati podzemni prostor lahko iščemo v ekonomskih (omogočanje kompaktnejše urbanizacije, razpoložljivost zemljišč za neprometne rabe), tehničnih (nekateri predori so problematični zaradi gradnje v slabo nosilnih hribinah), funkcionalnih (varnost, prometnica ne »zareže« v območje), družbenih (premestitev prometa pod zemljo poveča kakovost bivanja) in okoljskih (zmanjšan hrup, emisije, varovanje urbanega in naravnega okolja) vidikih. Glavni razlogi za izrabo podzemnega prostora so (Sterling in Godard, 2000):

- lokacijski dejavniki in raba tal,
- izoliranost objekta (klimatski vplivi, zaščita pred naravnimi ujmami in potresi, zaščita in varnost),
- okoljska in ekološka zaščita (estetski vidik in ekologija),
- topografija in
- družbene koristi.

Bistvene točke pri načrtovanju in prostorskem umeščanju podzemnih objektov lahko opišemo s pomočjo naslednjih točk (Sterling in Godard, 2000):

- psihološki in zdravstveni vidik (obstoj odpora oz. strahu do podzemnih prostorov),
- zaščita podzemnega okolja (vpliv na okolje je manjši, vendar je izkoriščanje podzemlja nepovraten proces, saj prostora ne moremo povrniti v prvotno stanje)

- odnosi med podzemnimi objekti in površjem (stične točke so neizogibne, zato se tem objektom nameni posebno pozornost pri načrtovanju),
- konstrukcijske metode izkopa in izgradnje (uporaba »state of the art« tehnologij),
- terenske raziskave (čim boljša napoved geoloških značilnosti je pomemben del načrtovanja),
- analiza tveganj (analizirati različne kategorije tveganj) in
- ekonomska ocena podzemne gradnje (osnovni strošek v primerjavi z nadzemnimi gradnjami je bistveno večji, zato je potrebno oceno izvesti za celotni življenjski cikel objekta).

Kriterij optimalne uporabe podzemnega prostora upošteva družbene potrebe, izkoristi vse prednosti umestitve objekta pod površino, okrepi pozitivne značilnosti uporabe razbremenjenih urbanih površin, kjer se da učinkovito izkoristi naravne danosti terena in zagotavlja trajnostno uporabo podzemnega prostora.

3.2.2 Primeri gradnje predorov v urbanem okolju

Gradnja predorov je bila v preteklosti vezana v večji meri na razvoj javne infrastrukture, ki je povezovala večja mesta in razvojna središča. Danes je takih »strateških« gradenj manj, obstoječa infrastruktura se bolj ali manj le vzdržuje. Pojavlja pa se vedno več urbane predorogradnje, ki sestavlja sistem »podporne« infrastrukture za razvoj mest. V nadaljevanju bomo omenili nekaj projektov, ki so bodisi že zaključeni oz. se še izvajajo, kot primer razvoja infrastrukture v mestih.

Prvi primer je večji projekt železniške infrastrukture v Londonu, imenovan Crossrail, kjer se gradi hitra podzemna železnica v dolžini 21 km, skupaj z izgradnjo devetih novih in nadgradnjo obstoječih postaj podzemne železnice. Predor povezuje vzhodni in zahodni del Londona in bo v celoti dvocevni, tako bo skupna dolžina predora kar 42 km. Zgrajen bo s pomočjo osmih TBM naprav, ki delujejo na petih odsekih. Zunanji premer predora je 7,1 m, niveleta pa poteka približno 40m pod površjem. Deli predora, kjer bodo locirane postaje (platforme, prečne povezave, povezave s tekočimi stopnicami in dvigala) bo uporabljena klasična ciklična metoda (www.crossrail.co.uk/route/).

Sodobni primer večjega projekta v urbanem okolju, kjer se posodablja kanalizacijsko omrežje, je Thames Tideway, ravno tako v Londonu. Gre za nadgradnjo obstoječega kanalizacijskega sistema. Obstoječi sistem je mešan sistem in je bil zgrajen v 19. stoletju. Za današnji čas je enostavno premajhen, saj se letno v reko prelije kar 39 milijonov kubičnih metrov odpadne vode. Ob reki je 57 razbremenilnikov, ki že ob najmanjših padavinah prelivajo odpadno vodo v reko. Projekt predvideva izgradnjo predora pod reko Temzo. Predor bo premera 7,2 m, povprečno v globini 67 m in dolžine 25 km. Trasa predora bo sledila reki. Glavna cev bo grajena z uporabo TBM tehnologije. Na mestih razbremenilnikov bodo izdelani novi jaški s premerom 24 m ter globine od 20 do 60 m, ki bodo obstoječi sistem priključevali na glavni predor. Jaški in priključni predori bodo zgrajeni z uporabo klasične metode (www.tideway.london).

V Ottawi (Kanada), ki ima približno 900.000 prebivalcev je v teku izgradnja nove železniške linije (Confederation Line), ki se gradi z namenom zmanjšanja vsakodnevne obremenitve

cestne infrastrukture. V zadnjih letih razvoja mesta je javni avtobusni prevoz postal neučinkovit in bi z uvedbo novih linij razmere na cestah le poslabšali. S tem izhodiščem so zasnovali prvo železniško povezavo v mestu, ki bo omogočala nadaljnjo ekonomsko rast mesta in trajno okoljsko prijaznost. Proga skupne dolžine 12,5 km bo v samem središču mesta potekala v predoru dolžine 2,5 km. Na delu predora bodo tri postaje, za katere bodo izkopane kaverne velikost 16x13 m in dolžine 120 m (www.ligneconfederationline.ca/the-plan/). Tako predor kot kaverne postaj bodo zgrajene s sekvenčno metodo. Za izkop se bo uporabljala naprava za rezkanje oz. delni mehaniziran izkop (roadheader). Ta način izkopa je bil izbran zaradi sorazmerno kratke dolžine predora, plitve nivelete predora (nizko nadkritje), izvedbe razširitev izkopnega profila in neposredne bližine kleti obstoječih objektov na lokacijah podzemnih postaj. Glavna predorska cev poteka pretežno v hribini iz apnenca s tanjšimi plastmi finoziarnatega skrilavca (do 20%). Del predorske cevi in zgornji del postaj povečini leži v finoziarnatih skrilavcih (50 do 90%) s tanjšimi plastmi apnenca (Geotechnical data report, 2011).

Nova linija 9 podzemne železnice v Barceloni v dolžini 50 km z dvainpetdesetimi postajami bo ena izmed daljših v Evropi. Glavni namen je razbremeniti obstoječ sistem podzemne železnice, saj bo njena kapaciteta 90 milijonov potnikov na leto. Izvedba predora je zahtevna zaradi topografije mesta, goste poselitve in velikega premera predora. Postaje so bile načrtovane cilindrično, nekatere tako da bo proga potekala ena nad drugo. Premer predorov je 12 m in 9,4 m, za dostope do postaj pa bodo izdelani le jaški za dvigala oz. poševni predori za stopnice (<http://www.railway-technology.com/projects/barcelona-metro-line-9/>).

V letih od 1995 do 2011 je Metro de Madrid zgradil več kot 264 km novih prog in 168 novih postaj. Pri tem so uporabili 31 TBM naprav. Večino del sta izvedli španski korporaciji Ferrovial Agroman in Dragados (https://en.wikipedia.org/wiki/Madrid_Metro). Večino predorov (>80%) je bilo zgrajenih s TBM tehnologijo, deli predorov in postaj z metodo pokritega vkopa (15%), preostali del predorov pa s sekvenčno metodo, kjer so uporabili belgijski pristop.

Praktično vzporedno je bil prenovljen notranji obroč hitre ceste M30 v Madridu. V letu 2004 so namreč sprejeli odločitev, da traso hitre ceste prenovijo (skupne dolžine 99 km), pri tem pa je več kot 56 km speljanih kot predor. Projekt je bil uspešno izveden do leta 2007. Bolj težavna dela predorov sta bila južni in severni predor na vozlišču s hitro cesto M40. Predora sta bila dolžine 8344 m, od katerega je bilo 632 m zgrajenih po metodi pokritega vkopa preostalo pa s TBM metodo. TBM naprave so bile tipa EPB s premerom 15 m, ki je bila za svoj tip največja tisti čas (Presa, 2008). V predor so umeščeni trije pasovi, kanali za prezračevanje in v spodnjem delu dostopne poti za vzdrževanje. Povprečni izmerjen napredek je bil 0,665 m/min. Obloga predora je iz armiranobetonskih segmentov debeline 70 cm (http://www.roadtraffic-technology.com/projects/m30_madrid/). Na celotni trasi je delovalo še 5 TBM naprav z omenjenim premerom, le ena z manjšim premerom 12 m, kjer poteka dvopasovni promet.

V teku je tudi prenova obstoječe železniške povezave v južnem delu Nemčije je del širšega projekta povezave Pariz – Strasbourg – Stuttgart – München – Dunaj – Budimpešta. Projekt »Stuttgart 21« posodablja in nadgrajuje prvotno progo iz leta 1850. Obsega izdelavo več kot

33 km predorov, kjer so bo zgradila povezava Stuttgarta z Ulmom, prenova glavne postaje v Stuttgartu in povezava z letališčem. Za izvedbo bodo uporabljene vse tri poznane metode gradnje. Zunanji premer predora grajen s TBM napravo bo 8,9 m, velikost predora grajenega s ciklično metodo bo 10x12,5 m, velikost pri uporabi pokritega vkopa pa bo približno 8x14 m (<http://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/aktuell/>).

Nekako lahko v primer urbane predorogradnje uvrstimo tudi projekt izgradnje predora za transport prtljage med terminaloma 3 in 5 londonskega letališča Heathrow. Projekt se je imenoval Heathrow Post T5 Transfer Baggage System in sicer gre za 2,1km dolg predor z avtomatskim upravljanjem transporta prtljage. Zgrajen je bil leta 2012 s pričetkom 2009. Letno bo s pomočjo predora prepeljanih 110 milijonov kosov prtljage. Zunanji premer predora je 5,6m in je bil v celoti zgrajen s TBM metodo. Zabeležen je bil povprečni dnevni napredek v dolžini 15 m (<http://www.teambfk.co.uk/projects/heathrow-baggage/>).

Iz navedenih projektov lahko vidimo, da gradnja predorov v urbanem okolju nikoli v celoti ne more biti izvedena samo z eno metodo, vendar jih je potrebno medsebojno kombinirati.

3.3 Uporaba TBM tehnologije na območju Ljubljane

V tem poglavju bomo predstavili možnosti uporabe TBM tehnologije za gradnjo predorov v Ljubljani. Pri tem smo se bolj osredotočili na javni promet, saj za to že obstajajo strokovne podlage in študije. Mehanizirani način izkopa predora v celotnem profilu je zelo razvit segment predorogradnje. Naprave se stalno razvijajo in so primerne za uporabo v različnih hribinah ter v različnih velikostih. Možnosti kjer lahko uporabljamo metodo TBM so:

- predori v sklopu prometnega omrežja,
- glavne kanalizacijske linije in
- morebiti poštni rovi (v svetu se opuščajo).

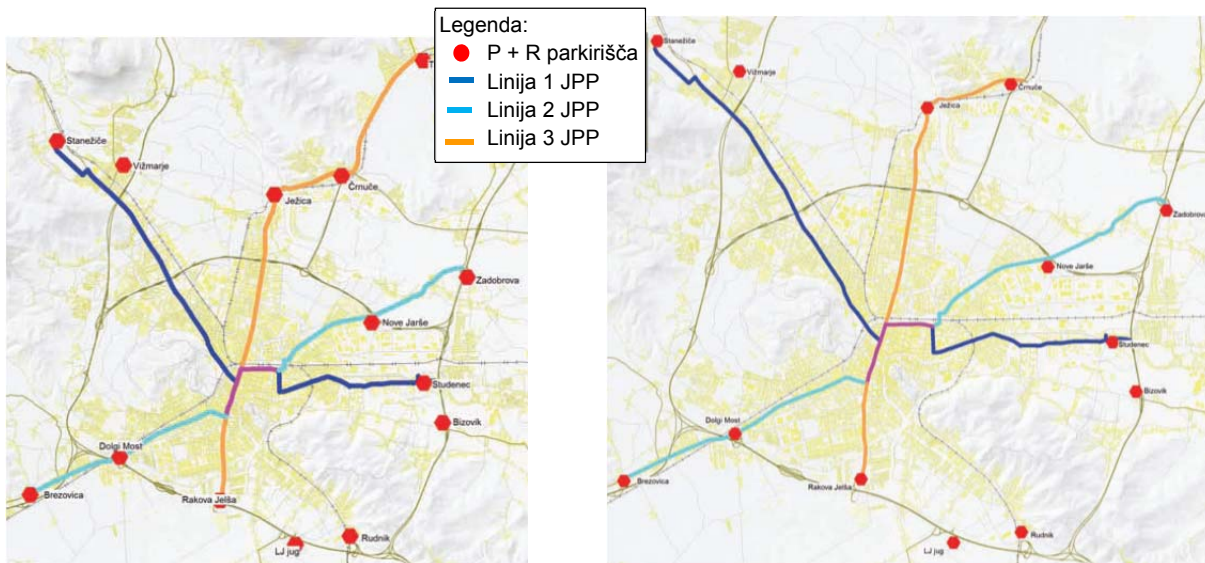
Gradnja predorov za potrebe odvajanja meteornih ali fekalnih vod se izvaja v mestih, kjer je možno izdelati centralni zbirni kanal in zbrano vodo nato odvajati na centralno čistilno napravo. Najpogosteje so to mesta, ki so grajena ob rekah in imajo že nekakšne naravne danosti za izdelavo takega omrežja. Poštni rovi so mogoče nekoliko nenavadni, saj se ne pojavljajo v Sloveniji, so pa zgrajeni v večjih mestih po svetu, kjer omogočajo transport pošte med sortirnimi enotami. V zadnjih desetletjih se opuščajo, saj je cestni transport veliko hitrejši, fleksibilnejši in učinkovitejši.

Najbolj običajna je gradnja predorov za potrebe razvoja prometnega omrežja, bodisi kot cestni ali železniški predori. Cestni predori so lahko zgrajeni v sklopu obroča okoli mesta oziroma kot zamenjava površinskih vpadnic. Železniški predori pa so lahko zgrajeni kot sestavni del širšega železniškega omrežja oz. kot ločen sistem omrežja javnega prevoza znotraj mesta.

3.3.1 Posodobitev in razvoj mestnega prometa

Izmed vseh treh omenjenih možnosti uporabe je za ljubljansko območje še najbolj natančno razvita slednja, ki bolj podrobno analizira in širše ugotavlja kako ustrezno preoblikovati javno potniško omrežje v celosten sistem. Primerjava, ki je bila izdelana v strokovnih podlagah urejanja javnega prometa Ljubljane (Strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji, 2009), z evropskimi mesti s podobnim številom prebivalstva pokaže, da je možno kombinirati

več različnih prevoznih sredstev (avtobus, tramvaj, podzemna železnica, lahka železnica, idr.). V sklopu študije je bilo preverjenih šest sistemskih rešitev, katere sestavljajo P+R parkirišča, tri glavne hitre linije in delno uporabo obstoječega sistema. Skupna dolžina glavnih hitrih linij je okvirno 35 km. Iz finančnega vrednotenja je sicer razvidno, da ureditev mestnega prometa s podzemno železnico, finančno sega iz planskega časovnega okvira (30 let), kljub temu pa je njena zmogljivost prevoza potnikov, brez lokalnih emisij in večjimi povprečnimi hitrostmi, daleč pred drugimi. Hkrati zagotavlja največji premik potnikov iz osebnih vozil na javni promet, kar pomeni da bi imela investicija pri enakih stroških dolgoročnejši učinek.



Slika 3-4: Sistem 4 (levo) in sistem 1 (desno) ureditve mestnega prometa (Strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji, 2009).

Figure 3-4: System 4 (left) and system 1 (right) of public traffic reorganization (Strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji, 2009).

V strokovnih podlagah (2009) je bilo obdelanih in vrednotenih šest sistemov, ki so pokrivali ožji del mesta in regionalne vpadnice. Sistemi so bili vrednoteni na sledeče načine: skupna dolžina hitrih prog in linij, učinkovitost sistema z vidika števila potnikov na enoto zgrajene prometne infrastrukture, uspešnost zmanjšanja prometnega dela in količina izpusta CO₂ in količina potnikov na sistemih hitrih linij in število vozil, ki uporabljajo »P+R« parkirišča. Na osnovi analize je bilo ugotovljeno, da je sistem 4 najboljši, sledi pa mu sistem 1 (Slika 3-4). V nadaljevanju smo sistem 4 uporabili, kot enega izmed izhodišč za potencialne trase prog v Ljubljani.

V svetu je sodobni sistem podzemne železnice bolj razširjen in pomeni uporaba lahkih metrojev s kratkimi vozili in posledično krajšimi postajami. Ti metroji imajo visoko pogostost voženj (od 1 do 3 minute), vse to naj bi pripomoglo k bistvenemu zmanjšanju stroškov gradnje. Sistem je primeren tudi kot sistem lahke železnice, ki v primestju poteka na površini, v centru mesta pa pod površjem. Takšne rešitve se uvajajo v manjših evropskih mestih (Granada, Porto, Lille, Brescia, Bologna, Lyon, Toulouse, Thessaloniki, Lille, ...).

3.3.2 Posodobitev in modernizacija ljubljanskega železniškega vozlišča

Poleg strokovnih podlag za urejanje javnega potniškega prometa v Ljubljani je bila leto kasneje izdelana tudi študija variant ljubljanskega železniškega vozlišča, ki obravnava

posodobitev obstoječe železniške infrastrukture v obliki ločevanja potniškega in tovornega prometa skozi mestno jedro ter možnost poglobitve železniške proge v samem mestnem jedru. Z operativnega vidika so bile zaznane naslednje pomanjkljivosti (Žličar et al., 2010):

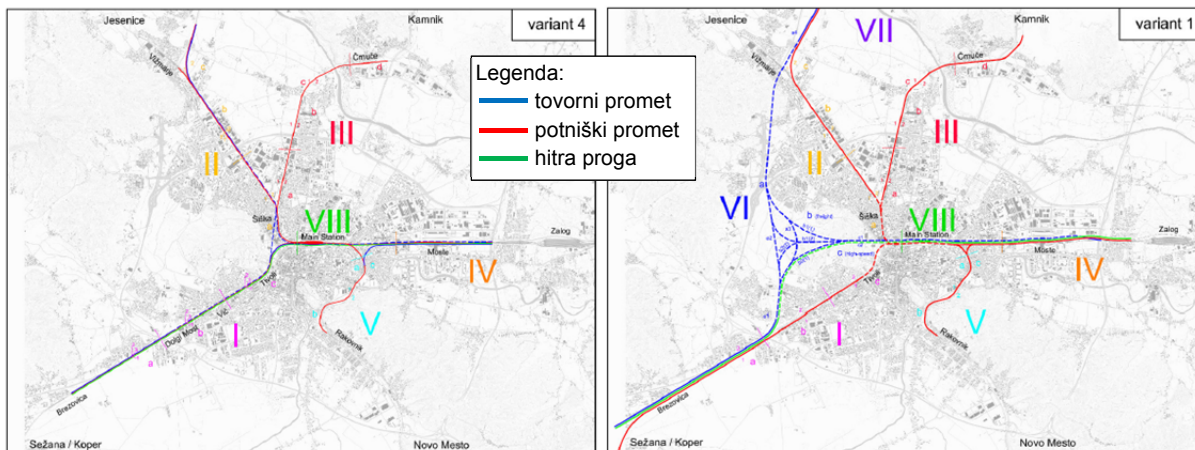
- klasičen vozni red namesto potniku prijaznega taktnega voznega reda,
- visok delež enotirnih prog,
- premiki tovornih vlakov na glavni postaji,
- manjša varnost zaradi isto nivojskih križanj voznih poti in
- počasna vožnja skozi glavno postajo.

Naštete pomanjkljivosti so glavne omejitve zmogljivosti železniškega vozlišča. Za zagotovitev modernega prometnega sistema je potrebno izvesti korenito posodobitev, kar pomeni upoštevati naslednje predpostavke:

- prestavitev tovornega prometa s tirov skozi mesto na novo obvozno progo, ki obide mesto oz. poteka pod mestom,
- razbremenitev obstoječih prog na mestnem območju in s tem uvedba dodatnih postajališč na mestnem območju,
- preureditev glavne železniške postaje v izključno potniško postajo,
- zagotovitev kapacitet in gradnja nove hitre proge in
- izboljšanje prometne varnosti in pretočnosti z uporabo sodobnih signalnih in varnostnih naprav ter zmanjšanjem križanj voznih poti in gradnjo izven nivojskih križanj s cestami.

V sklopu študije so bile izdelane štiri variante s končnim predlogom najprimernejše z objektivno in strokovno utemeljeno oceno. Vrednotenje se je izdelalo na več nivojih in je obsegalo: izračun zmogljivosti in analiza obratovanja, izvedljivost variante z minimalnimi ovirami v železniškem in cestnem prometu, analiza vplivov z okoljskega ter urbanističnega vidika in ocena investicijskih stroškov s finančno ter ekonomsko analizo. Z vidika vplivov na okolje so bile kot ustrezne opredeljene variante 1, 3 in 4. Z vidika urbanističnega načrtovanja je bila najprimernejša varianta 1 in kot primerna varianta 4 (Slika 3-5). Pri finančnem vrednotenju se kot najbolj ugodna pokaže varianta 4, sledijo ji variante 2, 3 in 1. Rezultat skupnega vrednotenja je pokazal, da je kot najprimernejša ocenjena varianta 4, sledijo pa ji variante 2, 1 in 3.

Varianta 4 predvideva ohranitev obstoječe železniške postaje in obstoječih železniških prog na nivoju terena. Tovorne proge se poglobijo na nivo -2 oziroma 16 m pod koto terena. Ločena visoko-hitrostna proga skozi Šišenski hrib se ne gradi. Skupna dolžina tirov znaša 132,3 km, od tega je 19 km predorov, 13,2 km na premostitvenih objektih ali nadvozih in 100,1 km odprte proge.



Slika 3-5: Prikaz variante 4 (levo) in variante 1 (desno) posodobitve ljubljanskega železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010).

Figure 3-5: Schemes of option 4 (left) and option 1 (right) of Ljubljana railway junction upgrade (Žličar et al., 2010).

Poleg variante 4 se je v pripravo državnega prostorskega načrta (DPN) vključila tudi varianta 1. Varianta 1 predvideva ureditev obstoječe železniške postaje na nivoju -1 oz. 8 m pod koto terena, izgradnjo tovornih prog na nivoju -2, izgradnjo visoko-hitrostne potniške proge skozi Šišenski hrib in ureditev železniških prog na nivo -1 na celotnem območju mesta Ljubljana (med Jadransko, Drenikovo in Kajuhovo). Skupna dolžina tirov znaša 163,1 km, od tega je 61,6 km predorov, 8,7 km na premostitvenih objektih ali nadvozih in 92,7 km odprte proge.

Načrtovanje predorov je odvisno od njihove postavitve, s tem je mišljena globina predora pod površino in urbanistična rešitev. Plitvi predori so cenejši, imajo prednost večjega števila postaj, njihova izvedba je otežena zaradi obstoječih objektov na površini. Globlji predori imajo krajšo traso, manjše je tveganje za varnost sosednjih objektov, kljub temu pa se izkažejo kot dražja rešitev. Mreža predorov je odvisna od obremenjenosti mesta s prometom in dnevnimi migracijskimi tokovi ter od prihodnjega razvoja mesta. Poznamo naslednje štiri zasnove (Žigman, 2000):

- linijske, kjer imamo ločene linije,
- zračne, kjer se linije med seboj križajo v pomembnejših delih mesta,
- krožne, kjer z eno ali več krožnimi linijami pokrivamo mesto in
- kombinirane, kjer je mreža linij sestavljena iz naštetih.

V sklepnem delu naloge bomo varianto 1 modernizacije železniške infrastrukture v Ljubljani uporabili za določitev potencialnih novih prog podzemnih povezav. Na podlagi predlaganih linij iz strokovnih podlag urejanja mestnega prometa (2009) in študije posodobitve železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010) bomo na predvidenih trasah predorov poiskali lokacije z reprezentativnimi geoloških danostmi.

3.4 Zakonodajne podlage za projektiranje predorov

Krovni zakon za gradnjo objektov v Sloveniji je Zakon o graditvi objektov (ZGO-1) (2015). S strani Evropskega parlamenta in Sveta 2004/54/ES je bila izdana direktiva o minimalnih varnostnih zahtevah za predore v vseevropskem cestnem omrežju. Varnost v predorih se dosega z vrsto ukrepov, ki se nanašajo na geometrijo predora, zasnovo trase, varnostno

opremo in druge elemente in objekte, ki pripomorejo k večji varnosti. Države članice morajo v nacionalni zakonodaji privzeti določila o izpolnjevanju minimalnih zahtev Direktive. Za železniške predore podobna Direktiva ne obstaja.

Tehnične zahteve in pogoje, ki jih je potrebno upoštevati pri projektiranju cestnih predorov s katerimi se zagotovi prometna varnost in ekonomičnost gradnje so podani v Uredbi o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji (Uradni list RS, št. 48/06 in 54/09). Uredba dokaj natančno podaja sestavne dele predora, zahteve glede na dolžino in potek trase predora, sestav elementov vozišča, določila za načrtovanja notranje obloge, odvodnjavanje predora in ostalo opremo ter podaja določila za strojno in elektro opremo predora.

Pravilnik o zgornjem ustroju železniških prog (Uradni list RS, št. 36/10) ne podaja natančnih določb o varnostnih elementih v predoru, temveč le določila za tirne grede. Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog (Uradni list RS, št. 56/13) v 6 poglavju podaja natančnejše določbe za načrtovanje predorov, galerij in pokritih vkopov. Zahteve, ki jih je potrebno izpostaviti so reševalna pot, ki mora biti na višini GRT (gornji rob tira), upoštevana pa morajo biti tudi določila TSI (tehnične specifikacije za interoperabilnost), ki urejajo varnost v železniških predorih v vseevropskem železniškem sistemu za konvencionalne in visoke hitrosti. Za določila, ki niso podana s tem pravilnikom se uporablja uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov (Uredba o tehničnih normativih ..., 2009).

Glede na to, da je slovenska uredba in pravilnika dokaj skopa z detajlno oz. operativno vsebino, se pri načrtovanju v Sloveniji uporabljajo avstrijske smernice (RVS in RSE) ali nemške smernice (RABT). RVS in RSE so smernice za gradnjo cestnega in tirnega prometa. Sestavljene so po sklopih in v celoti pokrivajo posamezno področje gradnje. RABT so nemške smernice, ki vsebujejo navodila in kriterije za načrtovanje opreme cestnih predorov in njihovo obratovanje. Prvi del smernic je v tekstualni obliki, drugi del smernic je v dodatkih. Dodatki vsebujejo komentarje, priporočila, primere računskih postopkov, ki prispevajo k boljšemu razumevanju tekstualnega dela opisanih pravil in navodil za načrtovanje. Z RABT smernicami so predpisani ukrepi, ki služijo predvsem varnemu vodenju prometa skozi predor, preprečevanju kritičnih dogodkov, zaščiti uporabnikov predora ter varovanju okolja. Nemške smernice predvsem veljajo za vse predore, ki so daljši od 80 m in so namenjeni cestnemu prometu (Stojanovski, 2009).

Poleg RVS in RSE smernic je avstrijsko geotehnično združenje podobno kot za sekvenčno gradnjo predorov, podalo tudi smernice za tako imenovan kontinuirani izkop predorov. Vsebinsko podaja navodila za geotehnično načrtovanje ukrepov.

Infrastrukturni projekti so projekti za zahtevne objekte za katere običajno v Sloveniji potrebno najprej pripraviti državni ali občinski prostorski načrt. V tej prvi fazi se objekt projektira do idejne faze, s postopki pa se zagotovi njegovo ustrezno umeščenost v prostoru in zagotavljanje varnosti objekta. V drugi fazi se nato izdelata projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja in projekt za izvedbo. V tej fazi se nato pri tehničnih rešitvah upošteva smernice in pogoje, ki predstavljajo zadnje stanje tehnike oz. »State of the art« ali »Stand der Technik«.

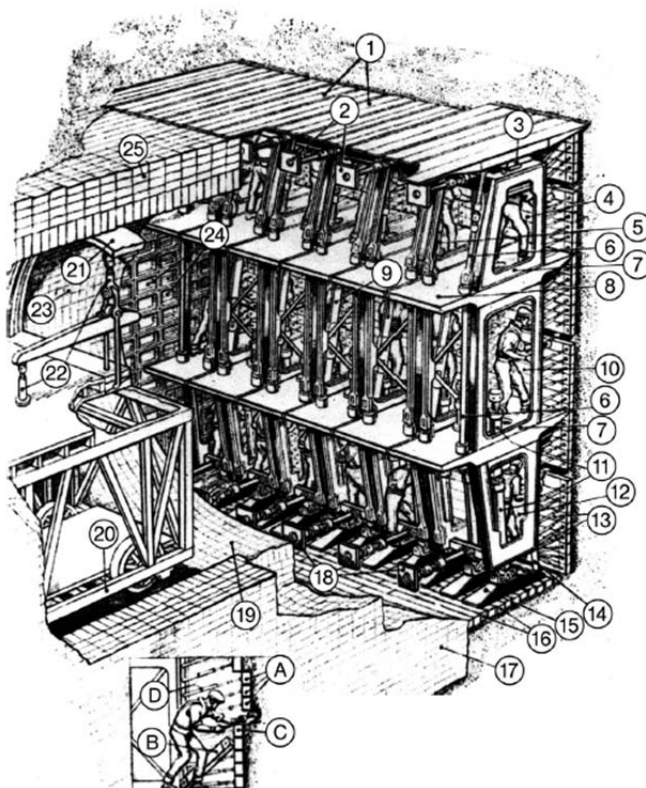
4 IZVEDBA PREDOROV S TBM TEHNOLOGIJO

4.1 Kratka zgodovina razvoja tehnologije

Človeštvo gradi podzemne objekte že 5000 let. Ti so se uporabljali za shranjevanje živeža, prehode, oskrbo z vodo in za skrajševanje transportnih poti. Vse do 19. stoletja se je v predorogradnji za podpiranje uporabljal les, obvladovalo se je tudi močnejše dotoke vode, vendar se predori niso izvajali pod nivojem podtalnice. V letu 1806, pa se je začelo tudi obdobje mehanizirane gradnje predorov in sicer, ko je v Franciji rojeni britanski inženir Sir Marc Isambard Brunel, razvil princip izvedbe predora s ščitom. Izum je bil v letu 1818 patentiran in uporabljen leta 1825 pri gradnji predora pod reko Temzo. Izkop je potekal ročno, za ščitom pa se je obloga izdelovala iz opeke. Gradnja je trajala vse do leta 1843, medtem pa so zabeležili tudi velike težave in pet velikih vdorov vode (Maidl et al., 2012).

Legenda:

- 1 jeklene deske
- 2 jeklenie podpore
- 3 opornik
- 4 zgornja komora
- 5 jekleni opornik
- 6 ojačitev
- 7 stranski okvir
- 8 pod zg. komore
- 9 podpoje
- 10 srednja komora
- 11 podpore
- 12 spodnja komora
- 13 leseni podpore
- 14 jekleni opornik
- 15 podložna plošča
- 16 leseni pod
- 17 opečna obloga
- 18 jekleni oporniki
- 19 talni obok
- 20 tirni voz
- 21 slepi opaž oboka
- 22 jekleni opornik
- 23 zahodna stena
- 24 ščit
- 25 opečna obloga v kroni



Legenda:

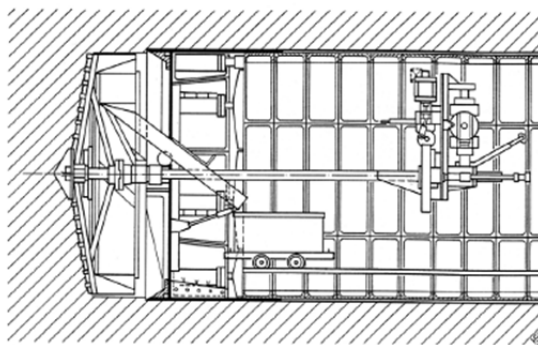
- A-podpiranje čela B-lesena deska C-podpora čela D-opornik

Slika 4-1: Shematski prikaz ščita, ki je bil uporabljen pri gradnji predora pod reko Temzo (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 4-1: Scheme of shield used for construction of Thames tunnel (adapted from Maidl et al., 2012).

Leta 1886 je inženir Greathead uporabil ščit in komprimiran zrak pri izgradnji predora za potrebe podzemne železnice v Londonu. To je bil način za izvedbo predorov v zemljinah s podzemno vodo in se je uporabljal v začetku 20. stoletja. Imenovan je Greathead-ov ščit.

Medtem so Brunelov patent vijaka razvijali naprej in poskušali vključiti hidravlično potiskanje ščita naprej. Leta 1896 je bil predstavljen Price-ov ščit (Slika 4-2).



Slika 4-2: Prva mehanizirana naprava s hidravličnim pogonom (Maidl et al., 2012).

Figure 4-2: First mechanised shield machine with hydraulic drive (Maidl et al., 2012).

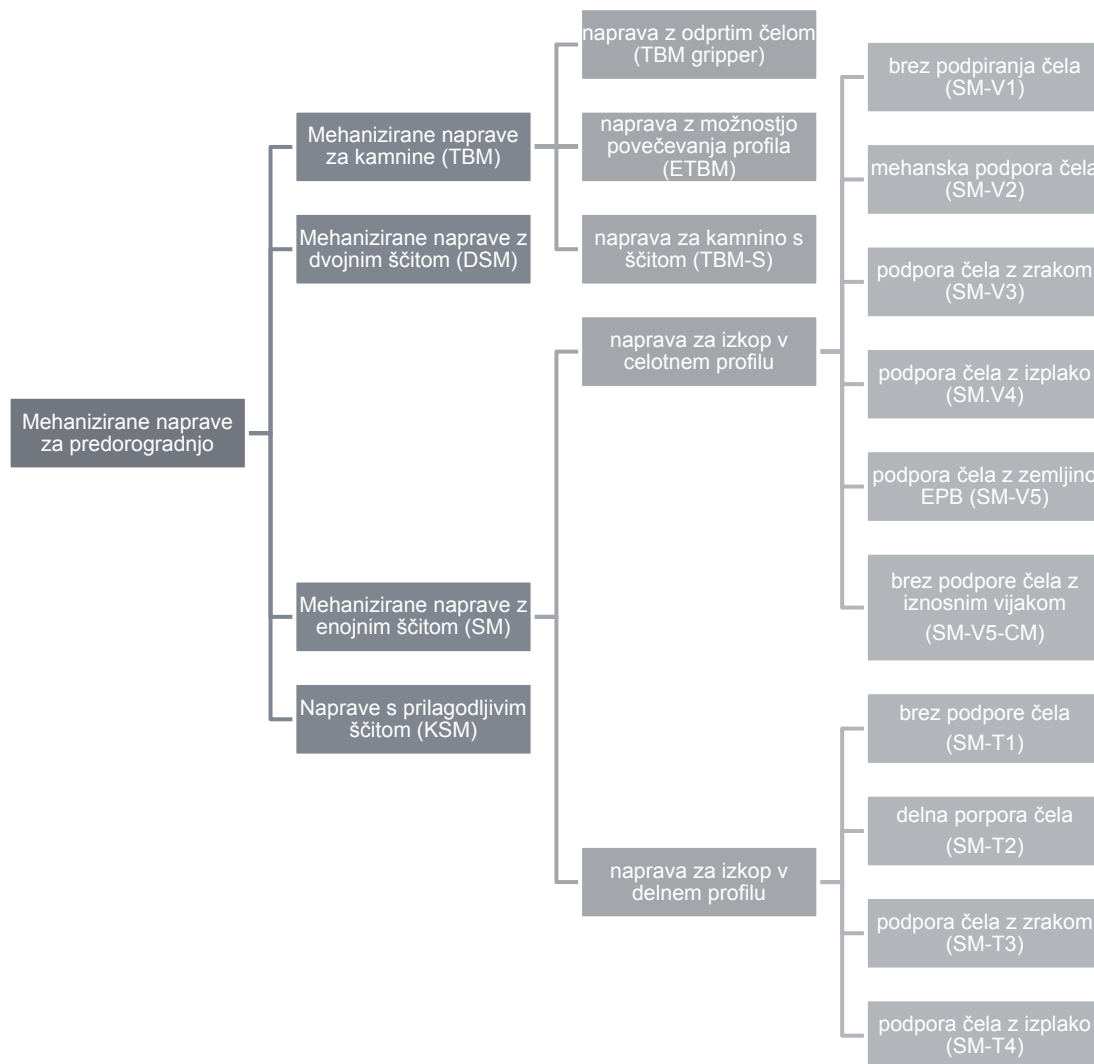
Do konca 19. stoletja so bile razvite mehanizirane naprave za izkop v celotnem profilu, za uporabo v zemljinah in brez prisotnosti vode. Kasneje je razvoj krenil v smer podpiranja izkopa z izplako. Leto 1960 lahko beležimo, kot prvi uspešen projekt uporabe bentonitne izplake za podpiranje čela. V letu 1963 je bil predstavljen še prvi poizkus metode podpiranja z zemeljskim pritiskom (EPB).

Čeprav se zdi, da ima razvoj mehaniziranega načina gradnje predorov že dolgo zgodovino, se vedno znova najdejo nove pomanjkljivosti in izzivi za nadgradnjo in nadaljnji razvoj naprav.

4.2 Osnovni principi mehanizirane gradnje predorov

4.2.1 Splošno

V osnovi naprave za mehanizirano gradnjo predorov delimo na tri kategorije. Ločimo naprave za izkop v celotnem profilu brez ščita, s ščitom ter naprave za delni izkop s ščitom. Naprave za izkop v celotnem profilu brez ščita in naprave za delni izkop s ščitom največkrat uporabljamo v kamninah. Naprave za izkop v celotnem profilu s ščitom, pa so najbolj primerne za uporabo v zemljinah. Razlike med napravami s ščitom ali brez so predvsem v orodjih za izkop hribine ter v načinu prevzemanja sil pri napredovanju naprave. Poznana je tudi osnovna delitev, ki jo uporabljajo v Nemčiji in je prikazana na spodnji sliki. Ločimo štiri osnovne tipe, kjer je prvi namenjen za izkop v kamnini, ostali trije pa za izkop v zemljini.



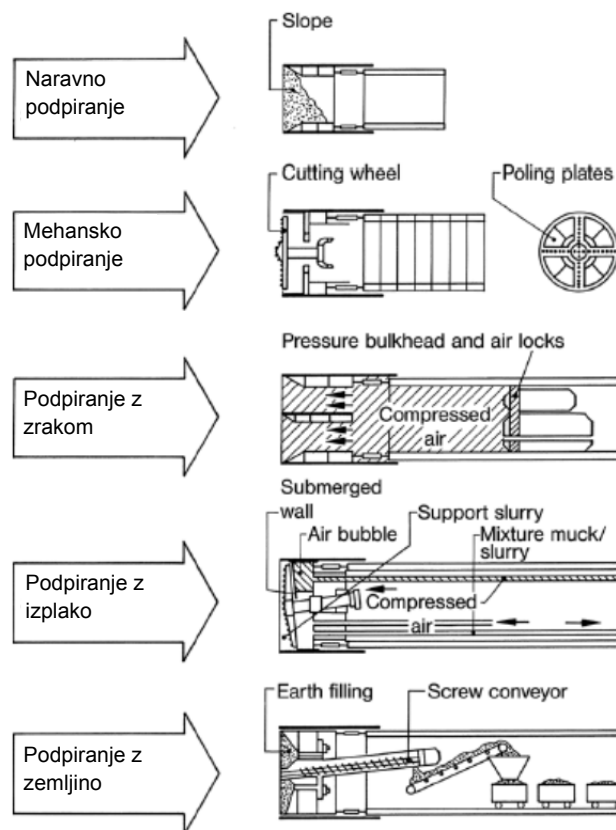
Slika 4-3: Tipi naprav za mehaniziran izkop predorov po nemških smernicah (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 4-3: Types of TBM and shield machines according to DAUB recommendations (adapted from Maidl et al., 2012).

Princip gradnje predora v celotnem profilu v zemljini, je izkop cilindrične oblike vzdolž osi predora, kjer začasno podpiranje izvajamo z jeklenim ščitom. Začasno podpiranje izkopa izvajamo, dokler se ne vgradi notranja obloga predora. Ščit tako prevzame obtežbo zemljine in preprečuje dotok podzemne vode. Pri izkopu je potrebno zagotavljati tudi stabilnost čela, ki se razlikuje glede na pogoje hribine in prisotnost podzemne vode. Zagotavljanje takojšnje stabilnosti čela, je v prednosti mehaniziranega izkopa v primerjavi z ostalimi metodami predorogradnje (Maidl et al., 2013).

Poznamo pet različnih načinov zagotavljanja stabilnosti čela (Maidl et al., 2013):

- prosto podpiranje z izkopanim materialom,
- mehansko podpiranje z izkopno glavo,
- podpiranje z zrakom,
- podpiranje z izplako in
- podpiranje z izkopanim materialom pod pritiskom ali EPB.



Slika 4-4: Načini zagotavljanja stabilnosti čela pri mehaniziranem izkopu (prirejeno po Maidl et al., 2013).

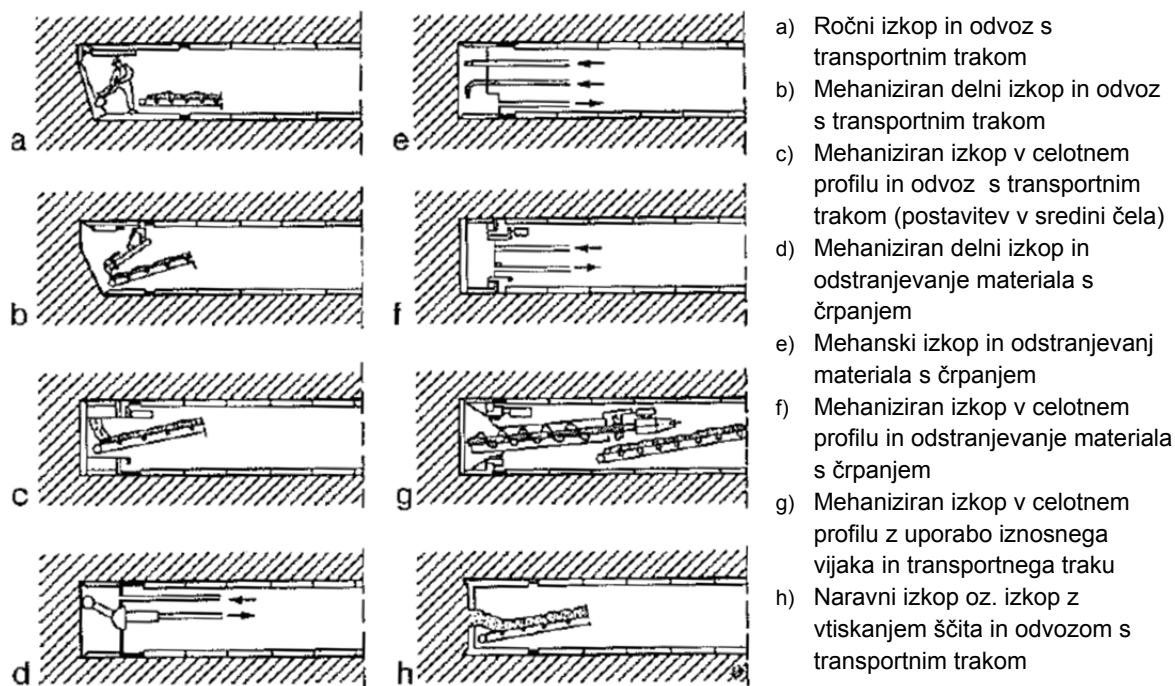
Figure 4-4: Face support principles at mechanised shield tunnelling (adapted from Maidl et al., 2013).

Pomemben del pri izkopu predora je tudi odstranjevanje ali transport materiala s samega čela. Način je odvisen od vrste hribine in metode podpiranja čela, saj to vpliva na obliko in velikost izkopanega materiala. V osnovi ločimo tri vrste transporta (Maidl et al., 2013):

- suhi transport (tekoči trakovi, demperji, vlakovni odvoz),
- tekoči transport (tlačni cevovodi) in
- črpanje trdih oz. večjih delcev.

Osnovna delitev je na spodnji sliki razdeljena še na preostale možne načine odstranjevanja materiala (Maidl et al., 2013):

- slika A prikazuje ročni izkop in suh transport s trakovi,
- slika B prikazuje mehaniziran delni izkop in suh transport s trakovi,
- slika C prikazuje mehanski izkop v celotnem profilu in suh transport s trakovi,
- slika D prikazuje mehanski delni izkop in transport s črpanjem,
- slika E prikazuje izkop s pritiskom zraka ali vode in transport s črpanjem,
- slika F prikazuje mehaniziran izkop v celotnem profilu in transport s črpanjem,
- slika G prikazuje mehaniziran izkop v celotnem profilu, odkop materiala z iznosnim vijakom in suh transport s trakovi ter
- slika H prikazuje izkop z vtiskanjem in transport materiala s trakovi.



Slika 4-5: Možni načini odstranjevanja izkopnega material pri čelu (prirejeno po Maidl et al., 2013).

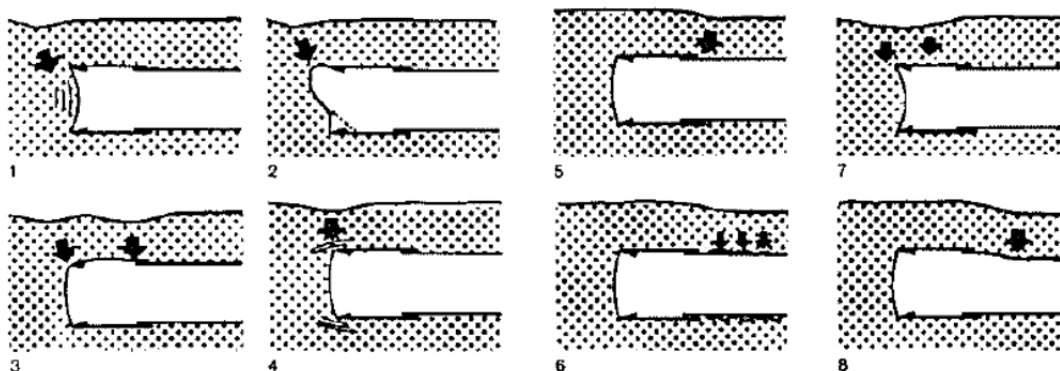
Figure 4-5: Possible means of clearing muck from the shield (adapted from Maidl et al., 2013).

Mehanizirana metoda izkopa v celotnem profilu deluje tako, da ščit potiskamo v smeri izkopa po projektirani osi predora. Potisna sila je proizvedena s pomočjo hidravličnih cilindrov, ki se običajno opirajo na že vgrajeno betonsko oblogo. Delovanje naprave in vgrajevanje obloge mora biti sinhronizirano in v največji meri med seboj združljivo. Obloga se vgrajuje znotraj ščita, kar pomeni, da se ščit in obloga prekrivata. Praznino med segmenti in izkopom zapolnimo z zasipom oziroma zainjektiramo, da se zmanjša možnost nadaljnjega posedanja. Končna obloga je običajno sestavljena iz segmentov, razviti pa so tudi drugi načini vgrajevanja obloge, kot npr.: pred izdelane cevi, in-situ betoniranje oziroma brizgani beton v funkciji končne obloge (Maidl, Herrenknecht et al., 2011).

Gradnja predora ne glede na izbrano metodo vpliva na okoliško hribino, saj jo prisili k spremembi osnovnega napetostnega stanja. Pri urbani predorogradnji je pričakovati pogrezanje oz. posedanje na površini, kar lahko vpliva na stabilnost obstoječih objektov. Ločimo tri glavne tipe posedkov in sicer posedki, ki nastanejo v območju rezalne glave oz. na mestu vgrajene in injektirane obloge, te so neizogibni. Posedki, ki nastanejo zaradi relaksacije hribine, prehitrega napredovanja, deformacije ščita oz. vibracij naprave pri napredovanju, te lahko zmanjšamo z vgradnjo dodatnih podpornih ukrepov v času gradnje. Posedki, ki nastanejo zaradi rušenja zemljine oz. nezadostnega injektiranja za vgrajeno oblogo, te lahko preprečimo z ustreznim injektiranjem praznega prostora med oblogo in hribino (Maidl, Thewes et al. 2013).

Nadalje lahko za deformacije, ki se razvijejo v okoliški hribini naštejemo nekatere možne mehanizme nastanka (Maidl et al., 2013):

- posedanje in deformacije pred čelom (1),
- deformacije zaradi prekomernega izkopa (2),
- deformacije ščita (3),
- deformacije zaradi vibracij rezalne glave (4),
- deformacije za ščitom zaradi posedanja površine za ščitom (5),
- deformacije za ščitom zaradi neustreznega injektiranja (6),
- deformacije zaradi nestabilnosti hribine (7) in
- deformacije zaradi neustrezne obloge (8).



Slika 4-6: Najpogostejši možni mehanizmi razvoja deformacij (prirejeno po Maidl et al., 2013).

Figure 4-6: Causes of settlement from a shield drive (adapted from Maidl et al., 2013).

Nekaterim deformacijam se lahko izognemo oz. jih vsaj delno kontroliramo, nekaterih pa ne moremo nadzorovati. Deformacije 1, 2, 3 in 4 so neizogibne, vendar jih lahko med gradnjo omejimo s predhodnimi ukrepi. Deformacije 5 in 6 so neizogibne in jih težko kontroliramo, deformacije 7 in 8 pričakujemo zaradi gradnje predorov in jih lahko omejimo s predhodnim kompenzacijskim injektiranjem ali spremembo nosilnosti predizdelanih segmentov.

4.2.2 Opis posameznih tipov naprav

Na začetku tega poglavja smo predstavili tipe mehaniziranih naprav za gradnjo predorov, kot jo razvršča nemško združenje za predorogradnjo (DAUB). V nadaljevanju bomo posamezne tipe bolj podrobno opisali. Iz opisanega je razvidno, da razen pri napravi za izkop v kamnini, kjer podpiranje čela praktično ni potrebno, lahko stabilnost čela zagotavljamo na več različnih načinov.

4.2.2.1 Naprava za izkop v trši hribini (TBM)

TBM napravo za izkop v kamnini imenujemo tudi »gripper« in jo lahko uporabljamo trši hribini, ki je lahko dalj časa nepodprta. Napredovanje si naprava zagotavlja z radialnim opiranjem na kamnino. Končna obloga se v omenjeni hribini vgrajuje od 10 do 15 m za čelom. V kamninah s krajšim stabilnostnim časom se vgrajuje primarno podporje (jekljeni loki, jeklene sulice, ipd.) čim bližje rezalni glavi. Brizgani beton se ponavadi nanaša za oprijemalnim mehanizmom. V primeru, da geološke napovedi predvidevajo heterogeno hribino, je priporočljivo opremiti napravo za izvedbo vrtnja pred čelom ter sistemom za izboljševanje stanja kamnine. Pomemben del naprave je tudi zmanjševanje količine prahu

(pršenje vode, tesnjenje za izkopno glavo oz. odsesavanje prahu), ki nastaja pri izkopu (Maidl et al., 2013).

V to kategorijo naprav uvrščamo tudi tiste, ki so zasnovane nekoliko drugače. Med te spada naprava za povrtavanje oz. povečevanje preiskovalnih rovdov. Napredovanje je zagotovljeno z bočnim opiranjem, preiskovalni rov pa služi kot smerno vodilo. Preiskovalni rov služi tudi za izboljšavo hribine v primeru slabo izdelane ocene geoloških razmer.

V kamninah, ki so zelo poškodovane in imajo zelo kratek čas stabilnosti, se uporablja naprava z enojnim ščitom. Tu je končna obloga izdelana iz segmentov, ki hkrati služijo za opiranje in napredovanje naprave.

Bistvo teh naprav je obvladovanje slabo nosilne kamnine ter težav zaradi prisotnosti podzemne vode. Razpon vrednosti enoosne tlačne trdnosti σ_D , ki omogoča uspešno napredovanje predora, je od 25 do 250 MN/m². V kamninah z višjo tlačno trdnostjo je vprašljiva ekonomska upravičenost uporabe TBM, pojavi se tudi problem zagotavljanja ustreznega opiranja. Primerna varnost uporabe je določena z vrednostjo po Deereju (*RQD*), ki znaša od 50 do 100% in razdaljo med razpokami več kot 0,6 m. Če je razpokanost večja, je potrebno možnost uporabe dodatno preveriti. Uporaba opisanega tipa naprave v zemljinah oz. kamninah, ki imajo geomehanske parametre podobne zemljini, ni možna.

4.2.2.2 Naprava z dvojnimi ščitom (DSM)

Napravo z dvojnimi ščitom sestavljata dva glavna dela. Prvi del je izkopna glava in primarni hidravlični sistem, drugi del pa pomožni hidravlični sistem in oprijemalni mehanizem. Primarni mehanizem lahko potisne izkopno glavo za celotno širino enega segmenta notranje obloge. V boljših geoloških pogojih oprijemalke služijo za odpor navoru in potisni sili. V slabših pogojih se potisna sila prenaša na vgrajene segmente zadnjega obroča. Pomični mehanizem pa služi kot potisna sila za napredovanje naprave (Maidl et al., 2013).

Uporabnost naprav je primerna za krajše predore v rahli in izredno krhki kamnini oz. kot nadgradnja naprave za izkop v kamnini, kjer so pričakovani zelo slabi geološki odseki (prelomnice).

4.2.2.3 Naprava z enojnim ščitom (SM)

Naprave z enojnim ščitom lahko uporabljamo za izkop v celotnem profilu (SM-V) oziroma z delnim izkopom čela (SM-T). Uporabljajo se za izkop v slabo nosilnih hribinah z nivojem podzemne vode nad in pod niveleto. Poznamo pet modelov za izkop v celotnem profilu. V nadaljevanju podajamo le osnovne značilnosti posameznih modelov, ki se razlikujejo v načinu podpiranja čela (Maidl et al., 2013).

Prvi je izkop brez podpiranja čela (SM-V1), saj v zelo kompaktni glini z visoko kohezijo oziroma v dobro nosilni kamnini ne potrebujemo podpiranja čela. Napredovanje naprave se zagotavlja s hidravličnim opiranjem na zadnji vgrajeni obroč AB obloge. Primeren je za zelo stabilne in neprepustne zemljine z velikim deležem finih delcev. Primeren je tudi za uporabo v slabše nosilnih (preperelih) kamninah s prisotnostjo podtalnice in razpoklinske vode. Sprejemljiva vrednost po Deereju je med 10 in 50%, z razdaljo med razpokami med 0,06 do 0,6 m. Enoosna tlačna trdnost je lahko tudi pod 5 MN/m².

V slabše nosilnih zemljinah je potrebno čelu zagotavljati podporo. To lahko zagotavljamo mehansko z jeklenimi ploščami (SM-V2). Ta način se je izkazal kot dokaj nepraktičen, saj ga ni možno uporabljati pri TBM-u z vrtljivo glavo. Sistem danes ni v uporabi, plošče pa se uporabljajo le kot dodatni podporni ukrep.

Podpiranje čela z zrakom (SM-V3) se lahko zagotavlja, kjer je gladina podtalnice nad predorom. Glavni problem sistema je uravnavanje pritiska, saj je v veliki meri odvisen od prepustnosti zemljine nad podtalnico. Možne so tudi prevelike izgube tlaka na čelu zaradi geoloških značilnosti. Pojavlja se tudi problem zagotavljanja ustrezne podpore zemljini. Z zračnim pritiskom pa je možno tudi zmanjšanje kohezije okoliške hribine.

Naprave, ki uporabljajo podpiranje z izplako (SM-V4), so ravno tako odvisne od prepustnosti hribine, kar pa uravnavamo z gostoto in viskoznostjo izplake. Izkopna glava je tako pod pritiskom in ločena s pregrado, od preostalega dela naprave. Bistveni del procesa, poleg izkopa je tudi naknadno usedanje in filtriranje izplake. V primeru zagotavljanja dostopa do izkopne glave (zaradi vzdrževanja) se izplako zamenja s zrakom. Napravo se lahko uporablja tudi v stabilni hribini, kjer namesto izplake uporabljamo vodo za iznos materiala. Primerne so za grobozrnate zemljine z mešano zrnastostjo. Nivo podtalnice mora biti nad predorom. Med izkopom, bentonitna izplaka podpira čelo. V primeru prevelike prepustnosti ($k > 5 \times 10^{-3}$ m/s) obstaja nevarnost nekontroliranega odtokanja izplake v hribino. Možno je delno izboljševanje reoloških lastnosti izkopanega materiala in sicer tako, da v izkopno komoro dodajamo fine delce ($< 0,063$ mm). S tem zagotavljamo stabilnost čela in pripomoremo k učinkovitosti napredovanja.

Podpiranje čela z izkopanim materialom (EPB) je najbolj pogost način (SM-V5). Izkopani material zadržujemo v komori, ki je ločena od preostalega dela naprave. Pritisk zemljine uravnavamo tako, da pregrado hidravlično nadzorujemo. Material odstranjujemo z vijačnim mehanizmom ali iznosnim vijakom. Pritisk zemljine lahko uravnavamo tudi s hitrostjo iznosa materiala z vijakom. Material, ki je potreben za zagotavljanje podpornega pritiska, mora imeti lastnosti plastične zemljine. To se zagotavlja v največji meri z dodajanjem finih zrn. Uporabljajo se lahko tudi drugi materiali (bentonit, penila, polimeri, ipd.), vendar je potrebno pri tem paziti, kam se izkopani material nato odlaga. Podobno, kot naprava z izplako, se tudi EPB lahko uporablja v stabilnih hribinah ter v hribinah z dotokom vode, kjer pa mora biti komora delno zapolnjena ter pod pritiskom zraka. Sistem je najprimernejši za zemljine s finimi delci ($< 0,063$ mm) in njihovo zastopanostjo nad 30%. V grobih in mešanih zemljinah s primesmi trdni delcev se izrazito poveča potisna sila in navor izkopne glave, vendar se lahko hidravlične lastnosti izkopane zemljine delno izboljšajo z uporabo dodatkov.

Poznamo tudi štiri modele naprav s ščitom za delni izkop. Uporaba le teh je izredno redka, zato jih bomo le omenili. Prvi je izkop v stabilni hribini (kompaktni kamnini) (SM-T1), kjer ne potrebujemo podpiranja. Primeren je za uporabo nad podtalnico, kjer so pričakovane homogene lastnosti hribine. Drugi je z mehanskim podpiranjem (SM-T2), kjer plošče služijo kot opora čelu. Model je uporaben nad gladino podtalnice, kjer se pričakuje peščene materiale z manjšo kohezijo. Sledi podpiranje z zrakom (SM-T3), ki ga uporabljamo pod nivojem podtalnice, namesto modelov SM-T1 in SM-T2. Zadnji je podpiranje z izplako (SM-T4), ki pa ni več v uporabi.

4.2.2.4 *Naprava s prilagodljivim ščitom (kombinirana naprava)*

V zadnjem času se pojavlja trend tako imenovanih »multimode« naprav, vendar so zaradi višje investicije bolj redke. Njihova prednost pa je uporaba v zelo raznolikih geoloških pogojih (od kamnine do slabo nosilne zemljine). Prednost naprave je v prilagodljivosti naprave v načinu delovanja. Razdelimo jih v naslednji dve glavni skupini, kjer so razdeljeni glede na najbolj običajne različice (Maidl et al., 2013):

- modeli brez predelovanja naprave (EPB in podpora z zrakom) in
- modeli kjer je potrebno predelovanje naprave (izplaka/ščit brez podpore; izplaka/EPB; EPB/ščit brez podpore).

Poznani so še drugi specialni tipi (možnost delnega izkopa, večmestni krožni izkop, zglobni ščit, ipd.) in se zaradi njihove nepraktičnosti redko oziroma ne uporabljajo. Stroški, ki nastanejo pri menjavi med različnimi načini delovanja, so zelo visoki in so opravičljivi le v izrednih primerih.

4.2.3 **TBM tehnologija in uporaba v kamninah in zemljinah**

Omenili smo, da je uporaba TBM tehnologije gradnje predorov možna tako v zemljinah, kot tudi v kamninah. Bistvena razlika je tip naprave, ki se uporablja pri izkopavanju hribine, način zagotavljanja stabilnosti izkopnega čela ter način odstranjevanja izkopanega materiala. Nemška literatura, pojem TBM ali »tunnel boring machines« povečini uporablja za naprave, ki se uporabljajo v kamnini, pri čemer pa v angleško govorečih državah pojem uporabljajo, kot splošen pojem za mehanizirano gradnjo predorov v celotnem profilu.

Gradnja predorov v kamninah z uporabo TBM omogoča zelo velike hitrosti napredovanja, kar pa je odvisno od dejanskih geoloških in hidrogeoloških pogojev. Hitrost oz. stopnja napredovanja (advance rate - AR) je tako lahko v istem predoru od 0,05 m/h do 2,5 m/h. V dobri in srednje dobri kamnini so časi samonosilnosti hribine dolgi, kar omogoča uporabo odprtih naprav, podpiranje z brizganim betonom in sidri se po potrebi izvaja lahko daleč za čelom. Za oceno napredovanja v kamninski masi je Barton nadgradil klasifikacijo Q v Q_{TBM} za potrebe mehaniziranega izkopa (Vukmirović, 2008), ki pa se ni izkazala kot zelo uporabna, saj se ocena prodiranja oziroma ocena napredovanja, zelo razlikuje od realiziranih podatkov.

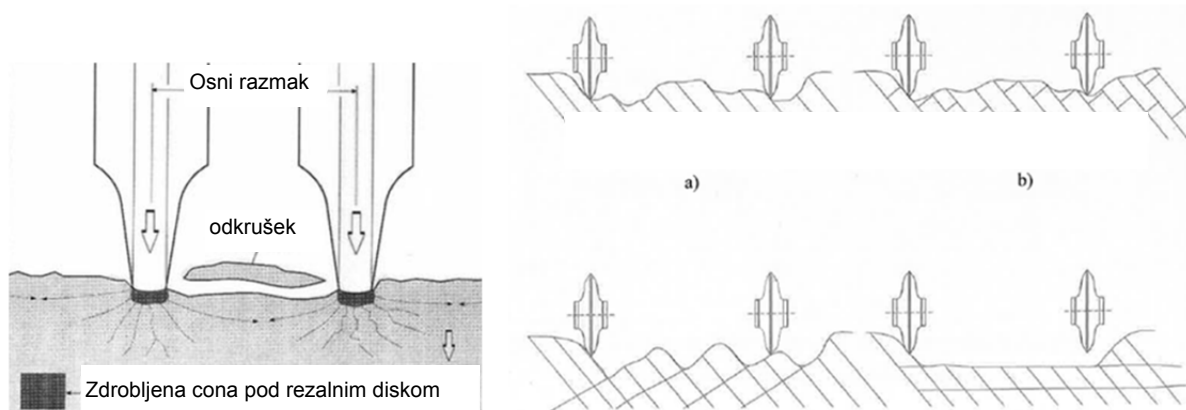
Q klasifikacija je namenjena klasifikaciji kamnine za potrebe klasične gradnje predorov in je izdelana na osnovi več kot 1000 predorov, ki jo je razvil Barton s sodelavci v letu 1974 (Palmstrom in Broch, 2006). Vrednost Q (Enačba 4-1) je glede na površino podzemnega izkopa, povezana z določanjem podpornih ukrepov. Je kvantitativna ocena za izbiro podpornih ukrepov, ki temelji na oceni kakovosti kamnine iz šestih parametrov:

- *RQD* (rock quality designation) ali ocena kakovosti kamnine,
- *J_n* število razpok,
- *J_r* hrapavost najbolj neugodne razpoke ali diskontinuitete,
- *J_a* stopnja spremembe vzdolž najšibkejše razpoke,
- *J_w* dotok vode in
- *SRF* faktor redukcije napetosti.

Enačba za določitev vrednosti Q se glasi:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad (4-1)$$

Naprave TBM za izkop v kamninah, uporabljajo rezalne nože, ki so razporejeni po rezalni glavi, glede na pričakovano kamnino. Za nastanek odkruškov sta potrebni širitev radialnih razpok (med noži) in natezna porušitev, ki pogosto vsebuje tudi strižne oblike porušitve. Optimalna razdalja med noži je spremenljiva zaradi prisotnosti razpok v kamnini. Ključni dejavniki za oceno optimalnega prodiranja so razdalja med razpokami, natezna trdnost in usmerjenost razpok. Drobljenje kamnine je odvisno od razmerja med enoosno tlačno trdnostjo in natezno trdnostjo. Vpliv nateznih napetosti znatno vpliva na hitrost prodiranja (večje kot so natezne napetosti, manjša je hitrost prodiranja). Usmerjenost razpok ali plastovitost določamo s kotom β . Kadar je kot enak 90° , so razpoke ali plasti pravokotne na čelo in delujejo neugodno na hitrost prodiranja. Slika 4-7 prikazuje ugodno orientacijo plastovitosti in razpokanosti. Meja uporabnosti naprave je definirana z enoosno tlačno trdnostjo kamnine. Zgornja meja znaša 300 MPa, kar predstavlja praktično vse vrste kamnin, ki so izredno trdne in homogene.



Slika 4-7: Princip drobljenja kamnine (levo) in ugodne smeri razpokanosti in plastovitosti (desno) (Vukmirovič, 2008).

Figure 4-7: Principle of rock crushing (left) and favourable orientation of joints and discontinuities (right) (Vukmirovič, 2008).

Pomembno vlogo predstavlja tudi hitrost vrtenja nožev, ki je odvisna od velikosti noža in položaja v vrtni glavi. Hitrost vrtenja nožev je direktno povezana s hitrostjo obračanja glave in znaša od 1 do 10 obratov na minuto (odvisno od premera naprave in hribine). Če so hitrosti prevelike, se pojavijo neugodni vplivi pri obrabi nožev in s tem manjša učinkovitost drobljenja kamnine (Spencer et al., 2009). Hitrost reguliramo s potisno silo, ki jo zagotavljamo s hidravličnimi cilindri. Pri napravah za izkop v kamnini, se cilindri opirajo (s pomočjo oprijemalnih plošč) neposredno na steno hribine.

Zelo neugoden primer v kamninah je, kjer TBM preide iz kompaktne v močno porušeno in nestabilno kamnino. Take pogoje bi bilo potrebno ugotoviti s sondažnim vrtnjem pred čelom in preprečiti morebitne težave z izvedbo podpornih ukrepov. Pojavi se lahko prekomeren izkop materiala, ki se ruši nad stropom izkopa, to pa lahko izrazito vpliva na posedanje površine.

Zaščita izkopnih sten v dobrih kamninah načeloma ni potrebna oz. se izvede v globljih predorih, kjer se pojavlja nabrekanje oz. obstaja možnost izpada večjih blokov. Zaščita se izvede sistematično z obrizgom iz betona oziroma po potrebi s sidri in drugimi podpornimi elementi.

V zemljinah se za razliko od kamnin, kjer za podpiranje hribine uporabljamo v večini le brizgani beton, uporablja segmentna obloga, ki je izdelana iz betonskih segmentov, stik med oblogo in hribino, pa zapolnjujemo s kamnitim materialom ali injektiranjem. Oblogo sestavljajo obroči, ti pa so sestavljeni iz armiranobetonskih segmentov. Stike med posameznimi obroči imenujemo bočni ali radialni stik, stik med segmenti v obroču, pa imenujemo vzdolžni ali tangencialni stik. Poznamo ravne in mozničene stike. Med segmenti se vgrajuje tesnilo, ki je izbrano glede na pogoje okolja. Segmenti so na mestih vzdolžnih stikov obdelani tako, da omogočajo relativni zasuk med segmenti in zagotavljajo vodotesnost stika. Sile, ki delujejo na obroč/segmente ločimo na osne, tangencialne in strižne sile. Osne sile izvirajo iz potisne sile TBM, tangencialne sile pa izhajajo iz zemljine. Potisna sila pri napravah za izkop v zemljinah izhaja iz hidravličnih cilindrov, ki se opirajo na rob obloge (Maidl et al., 2012).



Slika 4-8: Obloga predora iz predizdelanih segmentov s prečnikom (www.crossrail.co.uk).
Figure 4-8: Completed segmental lining with cross passage connection (www.crossrail.co.uk).

Segmenti so izdelani z veliko natančnostjo, ki jo zahtevamo zaradi lokalnih koncentracij napetosti ter odpornosti na vodo. Armatura v segmentih mora biti prekrita z najmanj 35 do 50 mm krovnega betona, zagotavlja pa upogibno trdnost segmentu in lokalno ojačitev na mestih stikov in med manipulacijo. Za ustrezno dimenzioniranje obloge je poznanih več inženirskih pristopov. Ločimo analitične, numerične, empirične in opazovalne metode (Vukmirović, 2008). Bolj pogoste so analitične metode, kjer so segmenti v obroču spojeni, pri tem se upošteva vzajemno delovanje bočnih stikov (vključeni so tudi vzdolžni stiki), ki so obdani s hribino, katerih karakteristike določa modul stisljivosti (M_V).

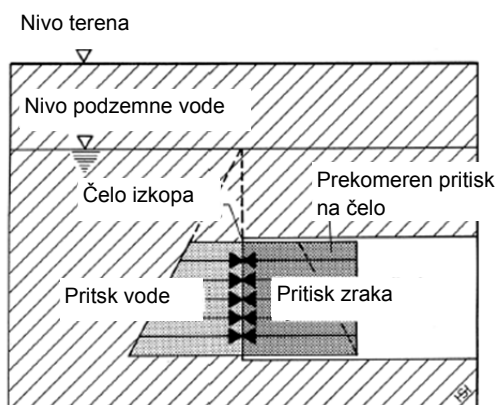
4.2.4 Podpiranje čela izkopa

V zgornjih poglavjih smo opisali vrste mehaniziranih naprav ter princip delovanja. Eden izmed kriterijev načina delovanja naprave je tudi zagotavljanje stabilnosti čela. Osnovni obtežbi, ki delujeta na čelo, sta obtežbi hribine in podzemne vode. V urbanih okoljih pa je potrebno nameniti še pozornost nizkemu nadkritju in povečanju obtežbe zaradi obstoječih objektov. V urbanem območju je pristop nekoliko drugačen, saj je poglobitnega pomena

omejevanje posedkov. Ti nastanejo zaradi prerazporeditve napetosti in spremembe pornih tlakov v zemljini. Posedanje omejujemo z aktivnim podpiranjem na čelu izkopa ter bočno s ščitom oz. končno oblogo predora.

Podpiranje čela je odvisno od vrste naprave. Izbira naprave in s tem načina podpiranja je odvisna od velikosti zagotavljanja pritiska, geomehanskih lastnosti hribine, zahteve omejevanja posedkov, uporabnosti naprave in finančnih omejitev. V prvem koraku načrtovanja, se s pomočjo analize določi kako visoke pritiske lahko pričakujemo. Kot smo že omenili, poznamo pet glavnih načinov podpiranja čela: odprto čelo ali brez podpiranja, mehansko podpiranje, s pritiskom zraka (nadtlakom), izplako ali zemljino.

Pri odprtem čelu ali naravnem zagotavljanju podpore, že sama beseda pove, da je izkopno čelo v ravnovesju brez zagotavljanja podpore in sicer na račun visokih strižnih parametrov hribine. Tovrstno podpiranje, kljub kakovostni kamnini ni sprejemljivo v vodonosnih hribinah. Pri mehanskem načinu podpiranja uporabljamo plošče, ki jih podpiramo bodisi z lesom ali s hidravliko z notranje strani ščita. Izkop se vrši z bagri ali ročno od zgoraj navzdol. Omenjeni način izkopa in podpiranja ni zelo razširjen, saj ima ta način nizko hitrost napredovanja in visoke stroške obratovanja. V primeru dotokov vode oziroma, če je podtalnica v višini izkopnega profila, je potrebno zagotavljati odvodnjavanje ali pa dodatno uporabljati pritisk zraka na izkopno čelo, da voda ne vdira v napravo. Opisani način podpiranje danes ni več v uporabi, saj ne izpolnjuje zahtev varstva pri delu.



Slika 4-9: Način podpiranja s pritiskom zraka (nadtlakom) (prirejeno po Maidl et al., 2013).

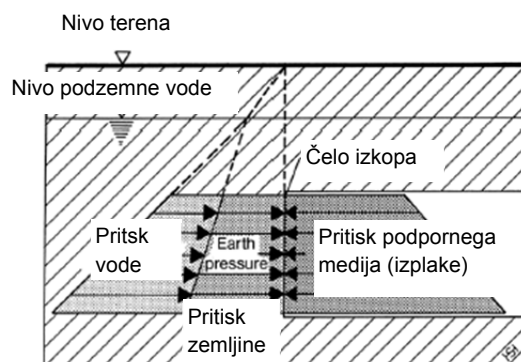
Figure 4-9: Principle of supporting the face with compressed air (adapted from Maidl et al., 2013).

Najbolj uporabljeni načini podpiranja čela so z zrakom (Slika 4-9), izplako ali izkopnim materialom. Na slikah je razvidno kako posamezni tipi zagotavljajo podporo. Velja omeniti, da je prvi bolj primeren v stabilnejših hribinah, kjer je potrebno preprečevati le dotoke vode. Predvsem pa se nadtlak uporablja kot dodatni podporni mehanizem tudi pri ostalih dveh sistemih. Osnovni princip je, da je izkopna komora naprave pod nadtlakom, ki je večji oziroma v ravnovesju s hidrostatskim tlakom podzemne vode. Izgube tlaka se pojavljajo zaradi različne poroznosti hribine. Mesta izgub so: na čelu izkopa, na koncu ščita in skozi stike segmentne obloge do mesta zapore. Nadtlak se ne uporablja za podpiranje zemljine, ki mora biti v času izkopa stabilna. Naprave so v območju kjer je nadtlak, načrtovane tako, da ne potrebujejo delovne sile, če pa že, pa je to samo v izrednih primerih. V primeru, da je tlak

nad 1 bar, je sestavni del komore tudi hiperbarična komora. Sistem se uporablja v naslednjih omejitvah:

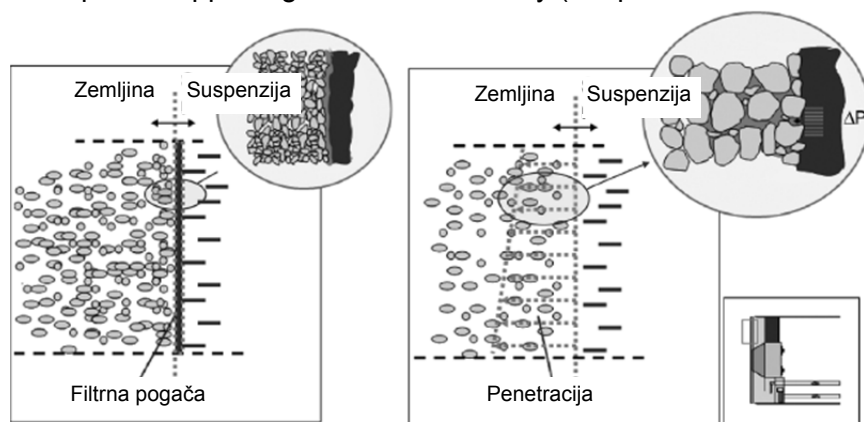
- največji pritisk je 3,6 bara,
- koeficient poroznosti (prepustnosti) hribine je do $k=10^{-4}$ m/s,
- min. nadkritje za zagotavljanje delovanja sistema je vsaj 2 kratni premer naprave,
- zmanjšana je učinkovitost zaradi nadtlachnega režima in
- zmanjšana je požarna varnost.

Podpiranje z izplako (Slika 4-10) je način podpiranja s tekočim medijem. Rezalna glava je pri napravi s tem sistemom bolj zaprta, kar že samo po sebi zagotavlja večje podpiranje čela, odprtine pa podpira izplaka. Bentonitna izplaka se izkazuje kot najprimernejša, saj ima dobro viskoznost (pri statičnih pogojih je gosta, pri dinamičnih pa bolj tekoča). Tem lastnostim pravimo tudi psevdo-plastične lastnosti ali tiksotropija. Z zagotavljanem prave viskoznosti nadzorujemo prodor suspenzije v hribino. Poznamo model membrane (neprepustna plast – filter cake) in penetracijski model (suspenzija penetrira v zemljino), kjer se najprej pore v hribini zapolnijo s suspenzijo, nato pa na čelu nastane neprepustna plast na katero se lahko »nanaša« pritisk za podpiranje čela. Pri bolj grobih zrnavostih se zaradi velike prepustnosti ne more tvoriti neprepustna plast, zato se podpora zagotavlja s prenosom strižnih napetosti v zemljino. Delež bentonita v suspenziji se določa za posamezni projekt oziroma odsek predora s pomočjo laboratorijskih preiskav. Poznamo še polimerne suspenzije s podobnimi lastnostmi.



Slika 4-10: Način podpiranja s čela z izplako (prirejeno po Maidl et al., 2013).

Figure 4-10: Principle of supporting the face with slurry (adapted from Maidl et al., 2013).



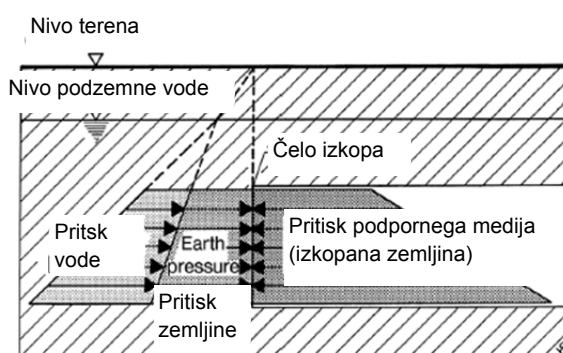
Slika 4-11: Prikaz membranskega (levo) in penetracijskega (desno) tesnjenja izkopne komore (prirejeno po Maidl et al., 2013).

Figure 4-11: Principle of filter cake (left) and penetration (right) face sealing (adapted from Maidl et al., 2013).

Izplako se pripravi skladno s tehničnimi specifikacijami proizvajalca naprave in izvajalca del. Lastnosti izplake morajo izpolnjevati ustrezno koncentracijo in viskoznost. Predpisani pa morajo biti vsi postopki za čiščenje in recikliranje izplake, kjer se optimizira ponovna uporaba in upošteva okoljske kriterije za ravnanje z odpadnim materialom. Ključni parametri izplake so: gostota, vsebnost trdnih delcev, pH vrednost, pretočnost, plastična viskoznost, meja tečenja in delež filtrirane vode (Maidl et al., 2012).

Pri napravah, ki uporabljajo izplako, poznamo več variacij naprav, ki omogočajo delni izkop, podpiranje delno z izplako in delno z nadtlakom ter kombinacijo s podpiranjem z zemljino.

Zadnji izmed bolj uporabljenih načinov podpiranja čela je z metoda izkopano zemljino, imenovan tudi EFB (Earth Pressure Balance) (Slika 4-12). Za razliko od ostalih sistemov, pri temu ni potrebno dovajati drugega podpornega medija, ampak je to kar izkopana zemljina. Pritisk na izkopno čelo se izvaja s pomično pregrado, ki je nameščena v izkopni komori in na podlagi pritiskov zemljine in podzemne vode, zagotavlja ravnovesje z uporabo izkopane zemljine. Ta način lahko uporabimo v plastičnih materialih, ki imajo lahko gnetno konsistenco, nizko notranje trenje, nizko prepustnost za vodo in dobro elastičnost v zgoščenem stanju. V večini primerov so to zemljine, kjer so zastopani tudi melji in gline. Delež finih delcev, ki je potreben za učinkovito zagotavljanje podpore čelu, je vsaj 30% (Maidl, 1995), v nasprotnem primeru je izkopnemu materialu potrebno dodajati materiale (dodatke) za izboljšanje lastnosti (polimerne suspenzije ali polimerne pene), ki pa ne smejo presežati 40 – 45% izkopane prostornine, saj se v nasprotnem primeru konsistenca približuje tekočemu stanju in material v izkopni komori, več ne zagotavlja ustrezne podpore čelu, hkrati pa je ravnanje z izkopanim materialom zelo zahtevno. Način je zelo podoben tistemu z izplako, le da je potrebno veliko več pozornosti nameniti kontroli tlaka v komori in opremi za odstranjevanje odkopanega materiala.



Slika 4-12: Način podpiranja čela z izkopano zemljino (prirejeno po Maidl et al., 2013).

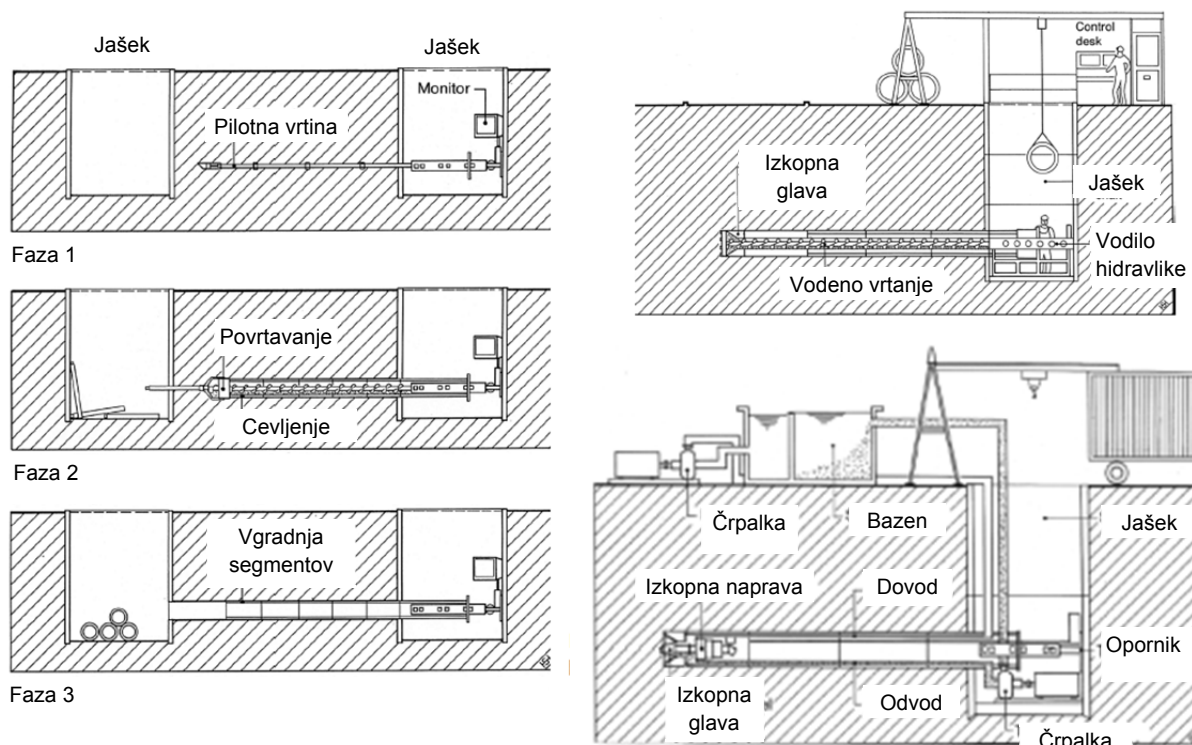
Figure 4-12: Principle of supporting the face with excavated soil (adapted from Maidl et al., 2013).

Učinkovita izvedba predora z EPB tehnologijo združuje znanja mehanike zemljin, ustreznega načrtovanja rezalne glave, potisnih sil in pravo izbiro dodatkov.

Tudi pri podpiranju čela z zemljino poznamo različne variacije, kjer recimo ščit predstavlja rezilo s pomočjo katerega zarežemo v zemljino in jo nato znotraj ščita odkopljemo. Rezilo predstavlja takojšnje podpiranje okoliške hribine.

4.2.5 Gradnja predorov manjših premerov (mikropredori)

Gradnja predorov manjših prečnih prerezov za potrebe javne infrastrukture brez kopanja jarkov, je danes zelo pomemben in tudi učinkovit način gradnje. V ta razred spadajo predori premera do 2 m. Pretežno so to sistemi mehanizirane gradnje ter brez neposredne prisotnosti delovne sile, gradnja pa je lahko usmerjena ali neusmerjena. Usmerjena gradnja ali vrtanje ponuja bistveno več možnosti in je zato tudi bolj uporabna. Poznane so tri metode usmerjenega vrtanja: vrtanje pilotnega rova, sistem povrtavanja in mikropredorogradnja (Maidl et al., 2012).



Slika 4-13: Način izvedbe mikropredorov (levo – pilotni rov, desno zgoraj – povrtavanje in desno spodaj – mikropredorogradnja) (prirejeno po Maidl et al., 2013).

Figure 4-13: Principle of micro tunnelling (left – pilot tunnel, above right – guided auger tunnelling and below right – shield micro tunnelling) (adapted from Maidl et al., 2013).

Metoda z vrtanjem pilotnega rova se izvaja tako, da v prvi fazi izvedemo pilotni rov velikosti med 150 in 800 mm. Cevljenje rova se izvaja s potiskanjem cevi za vrtalno glavo. V drugi fazi sledi povrtavanje rova in vgradnja končne obloge cevi. Druga metoda s povrtavanjem je ravno tako metoda z dvema ločenima fazama. V prvi fazi se izvede pilotna vrtina manjšega premera s postopkom izpiranja pod visokim pritiskom. Druga faza predstavlja povrtavanje vrtine na končno velikost. Ta metoda je primerna za manjše primere. Tretja metoda je pomanjšana oblika TBM naprave, kjer se izkop izvaja s pomočjo naprave, ki ščiti čelo in začetni del predora. Naprava se usmerja iz kontrolnega centra. Napredovanje se zagotavlja s potiskanjem cevi za vrtalno glavo, ki so hkrati tudi končna obloga predora. Podpiranje čela se zagotavlja z izplako oziroma z izkopanim materialom. Material se odstranjuje s transportnim trakom. Metoda je primerna za premere od 1 - 2 m.

Pri uporabi omenjenih metod ravno tako kot pri TBM napravah večjih premerov, potrebujemo pomožne objekte, kot so štartni oz. sprejemni jaški, potisna postaja in logistični center za

dobavo segmentov končne obloge oz. odstranjevanje izkopanega materiala. Več o tem je omenjeno v naslednjih poglavjih.

4.2.6 Geotehnični izzivi pri uporabi TBM metode

Vsaka metoda za gradnjo predorov ima svoje pomanjkljivosti, ravno tako metoda TBM, kjer pa je zaradi visokih stroškov opreme in zagotavljanja logistične podpore, potrebno težave v naprej predvideti, jih odpraviti oz. se na njih ustrezno pripraviti.

Značilne geotehnične težave pri izkopu s TBM so (Girmscheid, 2013):

- vgradnja podpornega sistema v mokrih in nestabilnih razmerah,
- poškodba rezalnih nožev in rezalne glave, zaradi izpadanja blokov iz čela izkopa ter ujetje rezalne glave,
- izpadli bloki iz izkopanega čela predstavljajo velike možnosti za nastanek večjih zruškov,
- težave pri nakladanju in prevažanju izkopanega materiala,
- odstranjevanje zruškov in erodiranega materiala iz talnega oboka,
- nestabilnost kamnine v območju boka predora ter zruški v boku predora, ki nastajajo zaradi delovanja oprijemalnih nog na ostenje predora,
- obtežbe, ki jih povzročata hribina na ščit TBM naprave, kar povzročata zmanjševanje potisnih ter rezalnih sil, težave pri upravljanju naprave, posledično zamude pri dostavi podporja v stabilnostno najbolj ogrožena območja,
- nestabilnost talnega oboka, kar povzročata težave pri upravljanju TBM ter včasih celo »potopitev« naprave in s tem potek izven projektirane nivelete,
- erozija poškodovane hribinske mase, zasutje ter poplavitve talnega oboka (vdori večjih količin vode v predor),
- v poškodovanih kamninah prihaja zaradi visokih dotokov vode, do porušitev v obliki dimnika in izpadanja blokov,
- poškodbe obloge predora zaradi porušitev praznin v bližini predora in
- visoka obraba rezalnih nožev zaradi vsebnosti abrazivnih kamnin.

Ukrepi podpiranja okoliške hribine, ki so skupni za vse predore v katerih se napreduje s pomočjo TBM, so:

- sidra,
- žične mreže,
- brizgani beton in
- ločno podporje.

Brizgani beton preprečuje porušitve izkopanih delov predora, hkrati zapolni in prekrije razpoke v kamninah, preprečuje izpadanje blokov ter zagotavlja samonosilni obroč okoli prečnega prereza. Jeklene žične mreže se uporabljajo za armiranje brizganega betona. Izboljša se sprijemljivost med plastmi betona, armiranje konstrukcijskih stikov, preprečuje izpadanje večjih zruškov ter zmanjšuje velikost razpok zaradi lezenja betona. Jekleno ločno podporje predstavlja trden konstrukcijski element, ki služi kot podporni element v bližini čela izkopa. Pomaga ohranjati želeno obliko predora in nudi oporo pri vgradnji jeklenih sulic. Hribinska sidra se uporabljajo za zagotavljanje lokalne stabilnosti delov predora. Vgrajujemo jih po potrebi ali sistematično. Služijo tudi kot element, ki preprečuje prekomerno (popuščanje) relaksacijo hribine.

TBM lahko med napredovanjem v kamnini naleti na zelo poškodovano hribino. Koristno je, če se lahko pomakne nazaj do neporušene hribine. V delu porušene hribine nato sledi vgradnja podpornih elementov in injektiranje. Poznamo konsolidacijsko injektiranje in kontaktno injektiranje. Konsolidacijsko injektiranje pomeni, da izboljšamo mehanske lastnosti hribine, ki so bile med gradnjo predorov poškodovane. Uporablja se v območju večjih napetosti in deformabilnosti hribine. Z injektiranjem izboljšamo lastnosti hribine, kjer prenesemo del obremenitve hidrostatičnega tlaka iz obloge neposredno na hribino, kar omogoča zmanjševanje dimenzij in količino armature obloge. Kontaktno injektiranje pa predstavlja zapolnjevanje prostora med oblogo predora in okoliško hribino. Uporabljajo se goste injekcijske mase, kjer moramo paziti na sestavo mase, da masa ne izgublja vode, da ne kristalizira med sušenjem in da ne prihaja do por, ki so zapolnjene samo z vodo.

V nadaljevanju naloge se bomo posvetili napravam za izkop v mehkejših materialih, kot so gline, melji, peski in prodi.

4.3 Izbira primerne TBM naprave

Pri izbiri ustrezne naprave za izkop v zemljini je potrebno podrobno pregledati vse prednosti in slabosti posamezne metode delovanja. Odločitev je v veliki meri odvisna od geoloških in hidrogeoloških pogojev, obvladovanja posedkov na površini, kontroliranje dotoka podzemne vode in v vsakem primeru zagotavljanje varnosti ekipe upraviteljev naprave.

V tem poglavju si bomo ogledali nekatere pomembnejše parametre, katere morata upoštevati naročnik in projektant v popolnoma začetnih fazah projekta, dobavitelj naprave v fazi razvoja ter izvajalec pri izvedbi predora. Parametri, ki si jih bomo pogledali natančneje, so:

- trasa, niveleta in naklon predora,
- nadkritje predora, posedki/dvižki,
- nosilnost zemljine in možnost izboljšave,
- zahtevano podpiranje čela,
- dreniranje podzemne vode,
- prepustnost zemljine,
- izboljšanje zemljine,
- odstranjevanje ovir,
- natančnost napredovanja in
- odstranjevanje/iznos izkopanega materiala.

Za izbiro naprave in izdelavo numeričnih izračunov so potrebni tudi geomehanski parametri hribine (Wangryul Jee, 2007), ki so odvisni od vrste hribine:

1. Kamnina in zemljina
 - Prostorninska teža/gostota
 - Poissonov količnik
 - Prepustnost
 - Togostni parametri (deformacijski modul, elastični modul)
 - Trdnostni parametri (strižni kot, kohezija, enoosna tlačna trdnost)
2. Kamnina
 - Vsebnost mineralov (kremena)

- Abrazivnost
- Trdnost
- 3. Zemljina
 - Zrnavostna sestava
 - Vlažnost
 - Plastičnost (meje po Atterbergu - w_S , w_L , w_P)
 - Gostota
- 4. Podzemna voda
 - Kemijska sestava
 - Smer toka in hitrost
- 5. Ostali parametri
 - konsistenca I_C
 - stanje podtalnice
 - koeficient mirnega zemeljskega pritiska k_0
 - stopnja prekonsolidiranosti OCR
 - prisotnost plinov

Na podlagi naštetih kriterijev je možno izbrati tisti tip naprave, ki je primeren za posamezni projekt ali del projekta. Nadalje se lahko načrtuje napravo, kjer se določi:

- obliko ščita in njegovo konstrukcijo,
- navor naprave,
- potrebno potisno silo,
- velikostni red pritiska za ustrezno podpiranje izkopnega čela in
- oceno obrabe orodij na rezalni glavi.

4.3.1 Opis ključnih parametrov

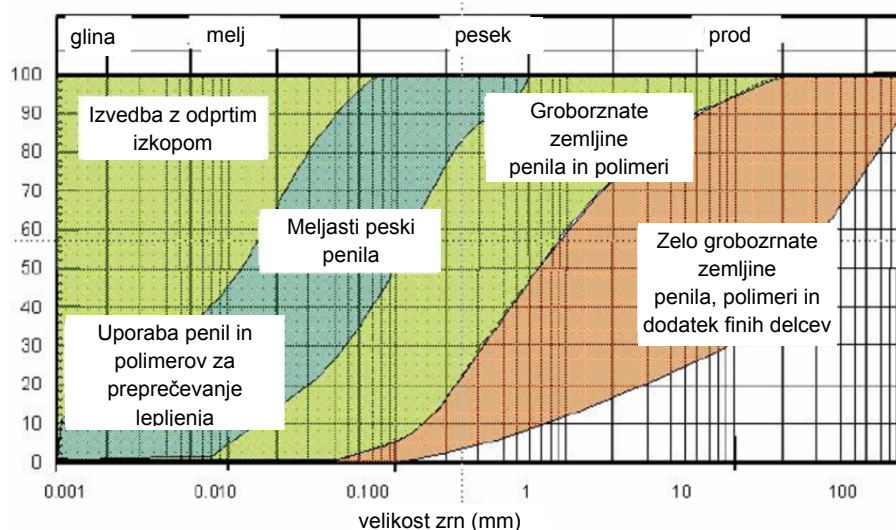
Podatki o trasi, niveletih in nagibih predora so zelo pomembni za dobavitelja naprave, zato morata naročnik in projektant že v fazi umeščanja predora v prostor med drugim upoštevati tudi tehnologijo in posebnosti primernih tipov TBM naprav. Zavedati se je potrebno, da že manjše spremembe lahko znatno vplivajo na izbiro naprave in njeno konfiguracijo. Vendar pa poleg najmanjših horizontalnih in vertikalnih radijev ter naklona predora, na konstruiranje naprave vpliva tudi dolžina predora. Z dolžino narašča frekvenca vzdrževanja in menjave orodij. Pri večjih dolžinah se za glavna vzdrževalna dela zgradijo jaški ali kaverne, ki zagotavljajo kontrolirano okolje za vzdrževalna dela. Če zaradi prevelike višine nadkritja to ni možno, je potrebno izdelati sprejemno kaverno v sklopu predora po klasični metodi.

Višina nadkritja vpliva na izbiro naprave v smislu nadzоровanja posevkov. To je posebno pomembno v urbanih predelih, kjer je vpliv na obstoječe zgradbe, infrastrukturo in ostale obstoječe podzemne objekte večji. S pravim načinom izkopa lahko posevke zmanjšamo in obvladujemo. Vendar le izbira naprave ni vedno dovolj, v ta namen se ponavadi uporablja metoda kompenzacijskega injektiranja, kjer nad predorom s pomočjo vbrizgane mase nadomestimo posevke in preprečimo nadaljnje posedanje.

Na izbiro tipa naprave vpliva tudi način zagotavljanja ustrezne podpore izkopnega čela glede na hribino, za kar je v fazi raziskav potrebno izdelati kakovostni geološki, geotehnični in hidrogeološki profil zemljine.

Izboljševanje zemljine pomeni uporabo različnih dodatkov (voda, penila, polimeri ali bentonit). Uporaba le teh je značilna predvsem za EPB naprave. Z dodatki se lažje kontrolira obnašanje zemljine, predvsem zagotavljanja zahtevane lastnosti za podporo čelu. Visoki dotoki podtalne vode pri uporabi EPB naprave so lahko izredno problematični, zato z dodatki nadzorujemo konsistenco izkopanega materiala v izkopni komori in tako zatesnimo odprtine pri vijaku za iznos materiala, hkrati pa kontrolirano podpiramo tudi čelo.

Polimerna pena je postala zelo uporaben in primeren dodatek pri izkopu z EPB v bolj prepustnih tleh. Bistvena lastnost penila je zmanjšanje strižnega kota zemljine in kratkoročno zviševanje kohezije, s tem se poveča plastičnost zemljine, ki vpliva na zmanjšanje prepustnosti. Hkrati se zmanjša obraba orodij, mašenje rezalne glave in velikost navora, potrebnega za izkop. Na spodnji sliki so prikazana področja uporabe dodatkov glede na zastopanost in velikost delcev pri sestavi hribine.



Slika 4-14: Primer področja uporabe dodatkov glede na sestavo hribine (prirejeno po Thewes, 2007).

Figure 4-14: Application of soil conditioning according to ground structure (adapted from Thewes, 2007).

TBM naprava, ki uporablja izplako, že s svojo tehnologijo uporablja dodatek v obliki bentonita. Primerna suspenzija se določi glede na lastnosti tal. Ne smemo pa pozabiti, da dodatki sicer ugodno delujejo pri fazi izkopa, hkrati pa ima izkopan material primešane dodatke, katerega je potrebno glede na njihovo poreklo in sestavo primerno obravnavati.

Za potrebe izgradnje predora se na načrtovani trasi in okolici ponavadi izdelajo izdatne preiskave, vendar se kljub temu lahko pojavijo nepričakovane ovire na površini in tudi pod površino. S preiskavami se identificira obstoječe objekte na površini, pripadajoče temelje in višino nadkritja nad predvidenim predorom. Vpliv na obstoječe objekte predstavljajo predvsem prekomerni posedki, ki jih je potrebno preprečiti ali omejiti. Bolj podrobno bomo to opisali v naslednjih poglavjih.

Ovire pod površino so veliko bolj neugodne, še posebej če o njih ne obstajajo podatki o izvedenih delih. Te lahko delimo na naravne in na umetne. Prve so geološke narave in predstavljajo bodisi kamnite samice ali konglomeratne osamelce. Umetne pa so človeškega

izvora, kot npr. starejši objekti ali deli le teh, obstoječa infrastruktura, ostanki cevi raziskovalnih vrtin, ipd.. Posamezni tipi naprav so že v osnovi opremljeni za premoščanje takih ovir, bolj pomembno je, da omogočajo dodatno izvedbo ukrepov, ki vplivajo samo na zmanjšano hitrost napredovanja in ne na njeno ustavitev. Gradnja predora lahko torej vpliva na objekte predora ali pa je ovirano delovanje naprave.

Hitrost napredovanja ne sme biti ključni faktor odločanja pri izbiri ustrezne TBM naprave. Jasno je da tako naročnik, kot tudi izvajalec želita čim hitrejšo izvedbo predora, vendar je potrebno biti pozoren na dejanske okoliščine v katerih bo predor potekal. Za bolj merodajno oceno, se lahko uporabi izkušnje s projektov, kjer je bil uporabljen enak tip naprave v podobnih geoloških pogojih tal. Izkušnje kažejo, da je strošek razvoja naprave in hitrost napredovanja natančneje ocenjena in tudi realizirana, če je bilo več časa in sredstev namenjenih za geološke preiskave projektiranja.

Odstranjevanje izkopanega materiala se mogoče sliši samoumevna faza, vendar pri gradnji predora izkopljemo velike količine materiala, zato je potrebno ravnanje s tem materialom skrbno načrtovati. Z njim lahko razpolagamo na drugih delih projekta (nasipi), ga ponovno uporabljamo za obsipavanje predizdelane segmentne obloge, ipd., kot zadnjo opcijo pa izrabljamo možnost deponiranja (odvisno od nacionalne zakonodaje). Material, kateremu so primešani dodatki, je potrebno pred nadaljnjo uporabo očistiti.

Suh izkop (EPB naprave) iznašamo s transportnimi trakovi, moker izkop (mešanica izplake in izkopanega materiala) črpamo po ceveh na napravo za filtriranje. Pomembno je omeniti, da količina izkopanega in iznesenega materiala, skupaj s še drugimi parametri nudi podatke, kaj se dogaja na čelu izkopa (stabilnost, posedki). Na primer, če iznašamo enako količino materiala pri manjšem napredovanju, potem to lahko pomeni prekomerne pomike ali celo zrušek na čelu izkopa. Količina iznesenega materiala iz izkopne komore se mora zato meriti, podatek pa je nato posredovan v kontrolno kabino.

Gradnja predorov s TBM tehnologijo, se še najbolj razlikuje s klasično metodo v tem, da je pri klasični metodi izkopno čelo vidno, pri TBM metodi pa v večini primerov ne. To pomeni, da je potrebno napravo upravljati oz. ukrepati na podlagi drugih podatkov, ki jih pridobimo med izkopom. Poudariti velja, da ni pomembna zgolj vrednost teh parametrov, ampak tudi njihovo spreminjanje med napredovanjem naprave. Ti parametri so:

- hitrost pomikanja ščita,
- navor rezalne glave,
- sile v hidravličnih cilindrih, ki se opirajo na vgrajeno oblogo in potiskajo napravo,
- parametri, ki opisujejo stabilnostne razmere v izkopni komori in
- količina in kakovost izkopanega materiala.

Hitrost pomikanja ščita je odvisna od pritiska na rezalno glavo in je povezana z razpoložljivo močjo s katero zagotavljamo navor. Hitrost je ravno tako odvisna od tlačne trdnosti hribine in njene razpokanosti. Hitrost je odvisna tudi od abrazivnosti in obrabe izkopnih orodij.

Navor je močno odvisen od hribine in njene sposobnosti nabrekanja. Primer so geološki pogoji močno poškodovane hribine, prisotnost osamelcev ali visoka kohezija pretežno glinenih tal, ki povzročijo večje trenje ščita.

Velikostni red potisnih sil v hidravličnih cilindrih je v povezavi s tlačno trdnostjo hribine. Če so za napredovanje potrebne manjše sile od pričakovanih, to pomeni, da naprava prehaja v mehkejša tla.

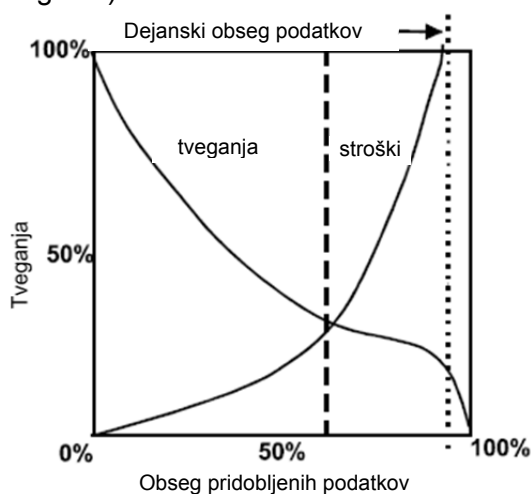
Med parametre, ki izkazujejo stabilnostne razmere, spada pritisk v izkopni komori, ki predstavlja ali zagotavlja ustrezno ravnovesje silam zemljine in podzemne vode na izkopnem čelu. V primeru naprave z izplako lahko upadanje tlaka pomeni, da gre za izgubo izplake in je zato za zagotavljanje stabilnosti čela potrebno povečati dotok izplake in ponovno oceniti reološke lastnosti izplake (viskoznost). Drugače je pri uporabi EFB naprave, kjer v primeru, da naprava naleti na peščeno lečo, ki je vodonosna, le-ta vpliva na viskoznost izkopanega materiala, posledično se zniža pritisk na izkopno čelo in nevarnost povečanja posevkov ali celo porušitev. Upad pritiska se zazna pri vijaku za iznos materiala, zato je potrebno količino iznosa omejiti, da preprečimo nestabilne razmere na čelu.

Količina in kakovost izkopanega materiala je zelo pomemben podatek. Količina izkopanega materiala se mora proporcionalno odražati z napredkom gradnje predora. Če se ta količina na hitro poveča, pomeni da se je najverjetneje pred čelom zgodila porušitev. Količina se pri obeh vrstah naprave zelo natančno meri. Kakovost izkopanega materiala se preverja vizualno, kjer se beleži sprememba v zrnivosti, barva materiala in vlažnosti.

Podatki se zbirajo med izkopom in upravitelju naprave nudijo vhodne podatke za vodenje. Pravilno odzivanje upravitelja je odvisno od različnih znanj povezanih s predorogradnjo in izkušenj ter od izobraževanj, kako odreagirati v primerih nepredvidenih situacij.

4.3.2 Geomehanski parametri

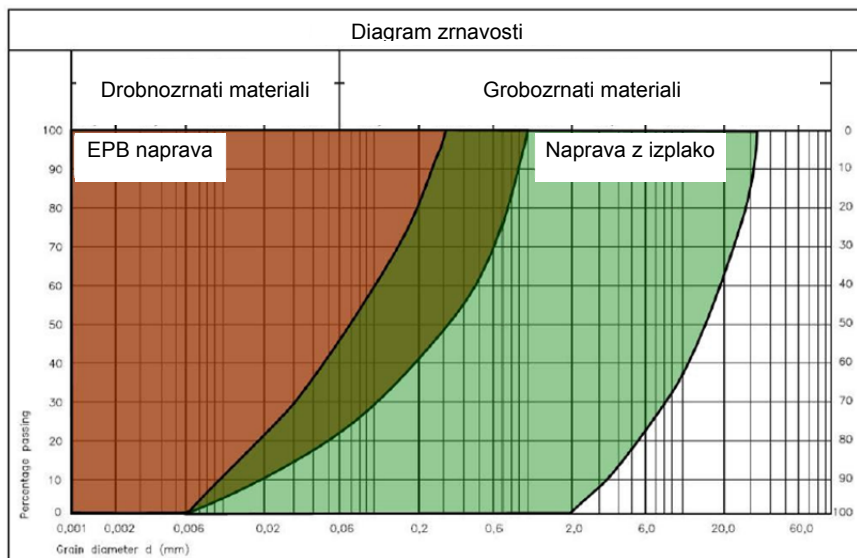
Čeprav TBM naprave dajejo občutek da so neuničljive, so hkrati izredno občutljive naprave. Projektirane so namreč za predvidene geološke lastnosti pri projektu, kar v primeru nepričakovanih situacij, lahko ogrozi celoten projekt. Natančne raziskave vzdolž trase so zato ključnega pomena in zmanjšujejo možnost zapletov (povečana obraba izkopnih orodij, poškodbe ali okvara rezalne glave).



Slika 4-15: Shematski prikaz primerjave med tveganji in obsegom podatkov iz raziskav (prirejeno po Spencer et al., 2009).

Figure 4-15: Schematic comparison of risks and available data from investigations (adapted from Spencer et al., 2009).

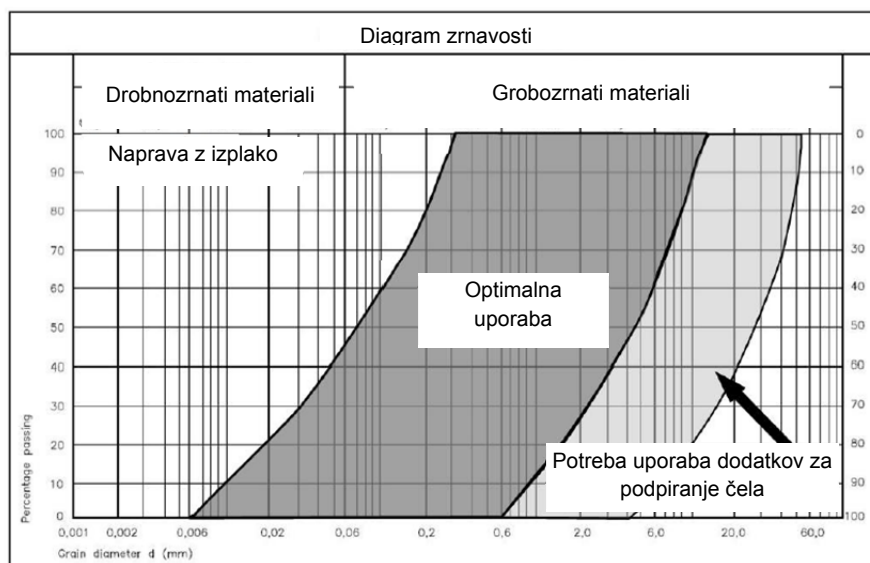
Eden izmed pomembnejših geomehanskih parametrov pri TBM napravah za zemljine je krivulja zrnivosti. Na podlagi raziskav, se izdelajo krivulje zrnivosti za odseke na trasi iz katerih se lahko vidi uporabnost naprave z izplako ali EPB naprave. Na spodnjih slikah je Herrenknecht (2007) pokazal priporočena območja za preliminarno izbiro TBM naprave.



Slika 4-16: Področja uporabe naprave z izplako in EPB naprave po priporočilih Herrenknechta (prirejeno po Herrenknecht, 2007).

Figure 4-16: Area of application for Slurry machine and EPB machine according to Herrenknecht (adapted from Herrenknecht, 2007).

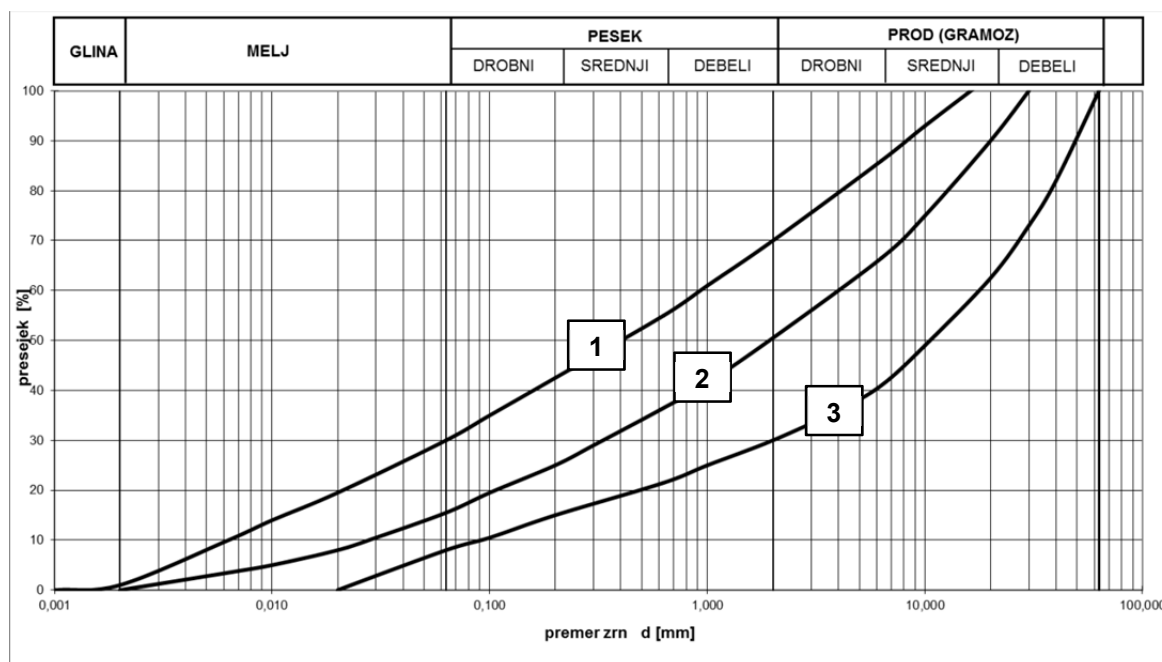
Nekoliko natančneje Maidl s sodelavci (2012) definira področje učinkovite uporabe naprave z izplako in območje, kjer se lahko pojavijo težave s podpiranjem čela oz. področje, kjer je potrebna uporaba dodatnih podpornih ukrepov oz. dodatkov.



Slika 4-17: Področja uporabe naprave z izplako po priporočilih Maidla in sodelavcev (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 4-17: Area of application for Slurry machine according to Maidl et al. (adapted from Maidl et al., 2012).

Podobno Maidl s sodelavci (2012) določa tudi območja za EPB napravo, kjer je namesto dodatnih podpornih ukrepov predvidena uporaba raznih dodatkov, kot so penila, polimerne suspenzije in drugi dodatki. Območja uporabe so prikazana in opisana spodaj.



Slika 4-18: Področja uporabe EPB naprave po priporočilih Maidla in sodelavcev (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 4-18: Area of application for EPB machine according to Maidl et al. (adapted from Maidl et al., 2012).

Za EPB naprave so definirane tri krivulje zrnivosti, ki definirajo naslednja štiri območja (Maidl et al., 2012):

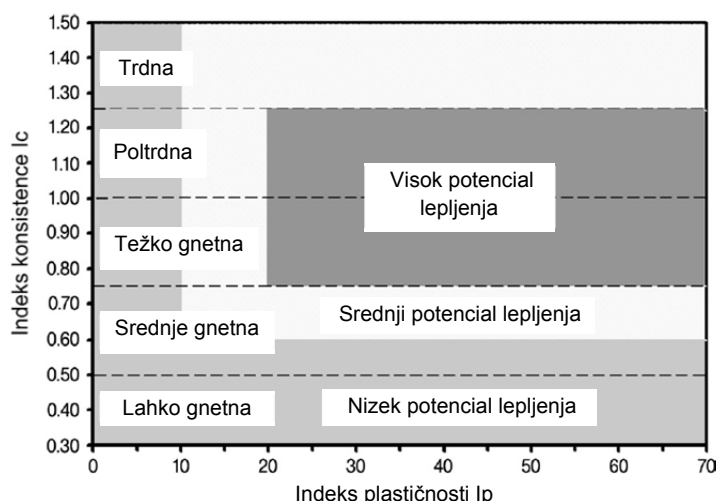
1. nad krivuljo 1, so pogoji za uporabo EPB naprave optimalni. Tu zemljina vsebuje najmanj 30% finih delcev, ki zagotavljajo nizko prepustnost. V tem primeru je lahko prisotna tudi podtalna voda. Prepustnost zemljine mora biti manjša od 10^{-5} m/s in konsistenca (I_c) mora biti med 0,4 in 0,75. Če je prepustnost zelo nizka in je vrednost konsistence dokaj konstanta, lahko naprava deluje celo brez zagotavljanja podpore čela,
2. med krivuljama 1 in 2 je še vedno mogoča praktična uporaba, ob predpostavki, da je prepustnost manjša od 10^{-5} m/s ter prisotnost delcev velikosti 0,03 mm ne presega več kot 10% celotne mase,
3. med krivuljama 2 in 3 je potrebno za podpiranje izkopnega čela uporabljati dodatke, kot so bentonitna suspenzija ali penila in
4. pod krivuljo 3 je prepustnost prevelika za uporabo dodatkov in tako ni mogoče zagotoviti ustrezne podpore čela pri EPB tehnologiji.

Poleg zrnavostne sestave zemljine sta pomembna tudi strižni kot in kohezija, ki s svojima vrednostima, vplivata na možnost zagotavljanja stabilnosti čela.

Podrobne preiskave tal morajo obsegati tudi hidrogeološki del, kjer se natančno določi prisotnost podtalne vode, njena višina, prepustnost slojev, ipd.. Ti podatki opišejo hidrostatske pogoje na čelu in vplivajo na stabilnost. Pri uporabi EPB naprave so ob

prisotnosti podtalne vode pritiski omejeni na približno 4,5 bara (omejitev izhaja iz zagotavljanja enakovredne podpore čelu). Grob izračun pokaže, da bi bil v primeru večjih tlakov, vijak za iznos materiala enostavno predolg, saj en navoj okvirno predstavlja 0,2 – 0,3 bara pritiska za podpiranje čela. Naprava z izplako omogoča delovanje v bolj neugodnih pogojih, kjer je pritisk na čelo tudi 13 barov, zopet pa je omejitev tehničnega značaja. Cevovod ima svoj upor, oziroma bolje rečeno pritisk na čelu povzroča pritisk v cevi, ki omogoča iznos materiala, zato se v skrajnem primeru pri zelo dolgih predorih lahko zgodi, da je pritisk na koncu cevovoda nič in je izplako potrebno ponovno prečrpavati v filtrirno napravo.

Bolj natančne karakteristike fino zrnatih zemljin opišemo z Atterbergovo klasifikacijo, kjer glede na vlažnost in lezne meje izračunamo konsistenco. Poznamo štiri vrste konsistence: trdna, poltrda, plastična in tekoča. Te štiri razrede določajo tri meje w_s (meja krčenja), w_p (meja plastičnosti) in w_L (meja židkosti). Meje se določijo z laboratorijskimi preiskavami, s katerimi lahko nato naprej določimo: indeks plastičnosti, indeks židkosti in indeks konsistence. Omenjeni parametri se uporabljajo v kasnejših fazah načrtovanja naprave. Indeks plastičnosti vpliva na iznos materiala z vijakom in zagotavljanje tesnjenja izkopne komore. Indeks konsistence in indeks plastičnosti vplivata na pojav mašenja. V spodnjem diagramu lahko vidimo soodvisnost vrednosti I_c in I_p , kjer so izraženi potenciali lepljenja.



Slika 4-19: Stopnje lepljenja izkopnega materiala v odvisnosti od indeksa plastičnosti I_p in indeksa konsistence I_c (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).

Figure 4-19: Sticking potential of excavation material according to plasticity index I_p and liquidity index I_c (adapted from Kumpfmüller, 2008).

Izkop predora lahko poteka tudi v stisljivih zemljinah, kar zmanjšuje odprtino med ščitom in hribino za rezalno glavo. To lahko povzroči blokiranje naprave, zato je priporočljivo uporabljati krajši ščit oz. ščit v konusni obliki, predizdelani segmenti pa se morajo vgrajevati čim bližje rezalni glavi. Ko je posamezni obroč zaprt, se obtežba prerazporeja na oblogo in ne več toliko na sam ščit. V stisljivih zemljinah je rezalna glava opremljena z dodatnimi orodji, ki služijo za izkop nadprofila.

Čeprav bi izkopu v zemljinah pripisali manjšo obrabo izkopnih orodij, pa je to v veliki meri odvisno od prisotnosti kremenca. V času izvajanja raziskav je potrebno ugotoviti prisotnost mineralov, ki pogojujejo določitev vrste orodij, izdelavo prognoze obrabe in pogostost

menjave orodij. Za razliko od kamnin, pri zemljinah ne poznamo laboratorijskih preizkusov, ki bi pomagali bolj natančno napovedati in izboljšati stanje.

Velja omeniti, da je pri TBM napravah večjega premera poleg naštetih parametrov, potrebno v obzir vzeti tudi tiste, ki so pogojeni z velikostjo naprave:

- rokovanje s segmenti,
- vgrajevanje segmentov,
- dimenzioniranje in zasnova vozov naprave,
- poraba energije,
- stroški opreme in
- velikost gradbišča

4.3.3 Spremljanje obnašanja sistema

Zavedati se je potrebno, da po fazi načrtovanja predora in naprave, izvedba ne sme biti prepuščena sama sebi. Zagotavljati je namreč potrebno spremljanje obnašanja sistema in če se le da, nepredvidene situacije odpravljati pred večjimi težavami ali okvarami.

Avstrijska smernica za kontinuirano predorogradnjo (ÖGG, 2013), ta del dokaj dobro pokriva. Za območja naprave (od I do IV), opisana v poglavju 4.1, smernica predpisuje splošne in dodatni dejavniki, ki lahko vplivajo na obnašanje sistema.

Splošne dejavnike delimo v:

- obnašanje tal,
- sprememba napetostnega stanja,
- prisotnost podzemne vode,
- časovna odvisnost lastnosti hribine glede na spremembo stanja podzemne vode,
- stanje nepodprtega čela oz. hribine,
- odziv hribine pri izvedbi s TBM napravo,
- potrebe za zaustavitev za vzdrževanje, rekonstrukcije in ostala dela,
- ukrepanje pri nepredvidenih ovirah,
- medsebojni vpliv predorov (gradnja druge cevi, ipd.) in
- podatki, ki jih pridobimo pri delovanju TBM naprave (krmiljenje naprave in iznos materiala).

Dodatni dejavniki oz. ukrepi so razdeljeni na posamezna območja naprave. V nadaljevanju bomo izpostavili le tiste, katere lahko pričakujemo tudi na območju Ljubljane.

1. I. območje:

- obnašanje čela izkopa in ustreznost zagotavljanja podpore čela,
- potreba po dodatnih podpornih ukrepih (ceveni ščit, sulice, steklo-vlaknena sidra, ...),
- prisotnost podzemne vode in
- uporaba ukrepov za izboljšanje hribine (injektiranje, suspenzije, ...).

2. II. območje:

- stanje in ustreznost nadprofila ščita naprave,
- možnost prekomernih deformacij nad ščitom,
- ustreznost izbire zapolnjevanja odprtine med ščitom in hribino,
- ustreznost razdalje od čela (vgradnja obloge in zapolnjevanje praznine) in
- uporaba ukrepov za izboljšanje hribine in stabilnosti.

3. III. območje:

- ustreznost obloge predora in tesnjenja med segmenti,
- možnost prekomernih deformacij nad oblogo in
- ustreznost materiala za zapolnitev praznine.

4. IV. območje:

- kontrola predvidenih deformacij po vgrajeni oblogi in morebitne spremembe po vzpostavitvi novega napetostnega stanja hribine in
- spremljanje stanja obloge, stikov med oblogo in okoliške hribine vključno s podzemno vodo.

Našteli smo le nekaj dejavnikov oz. ukrepov katerim je potrebno nameniti pozornost tudi med in po gradnji. S pomočjo rezultatov teh opazovanih parametrov lahko prilagoditve izvajamo v času gradnje, kar povečujejo varnost pri gradnji in predvsem trajnost objekta.

4.4 Pomembnejši elementi pri gradnji predorov s TBM

V zgornjih poglavjih smo opisali vrste naprav, njihove pomembnejše sestavne elemente in parametre, ki vplivajo na določitev vrste naprave in omogočajo njeno projektiranje in konstruiranje. Za samo izvedbo predora so enako pomembni tudi ostali začasni in pomožni objekti, ki jih bomo predstavili v nadaljevanju ter ukrepi za obvladovanje nepredvidenih situacij.

4.4.1 Štartni in sprejemni jašek

Začetek izkopa predora s TBM napravo je v primerjavi s klasično sekvenčno metodo nekoliko večji izziv. V prvih metrih si naprava še le vtira pot v zemljinu in vsi sestavni elementi še ne delujejo za kar so namenjeni (zagotavljanje podpore čela, tesnjenje in preprečevanje dotoka podzemne vode, ipd.). Poleg tega je za začetek obratovanja potrebno zagotoviti oporno konstrukcijo na katero se naprava opre in začne svojo pot. Poznamo dva načina zagona naprave:

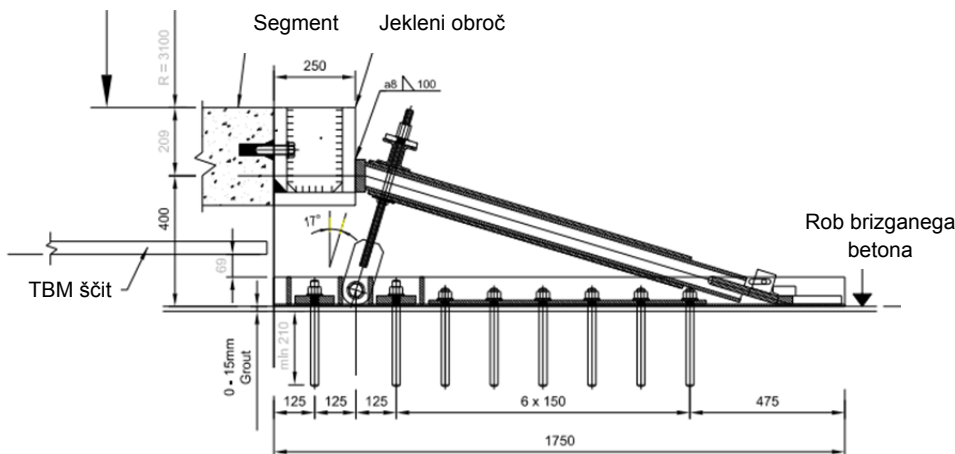
- začetek in konec izvedbe v predoru ter
- začetek in konec izvedbe v jašku.



Slika 4-20: Jeklena oporna konstrukcija za start TBM naprave (Schmidt et al., 2014).

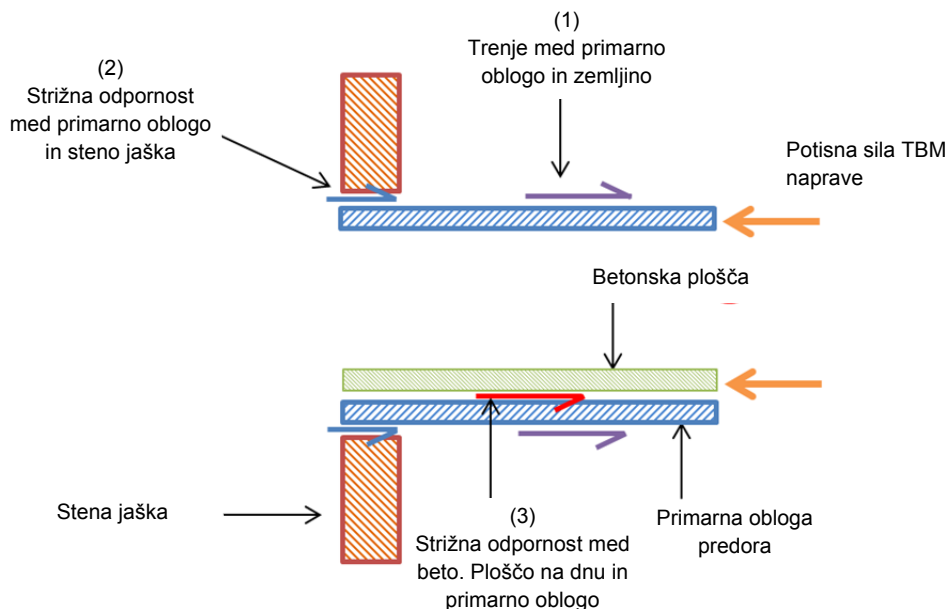
Figure 4-20: Steel support system for TBM machine start (Schmidt et al., 2014).

V prvem primeru, predor uporabimo za postavitev celotne oz. dela TBM naprave (odvisno od premera in pomožnega dela za ščitom. Za potrebe zagona se izdelata oporni obroč, ki je lahko izdelan iz armiranega betona ali iz jeklenega obroča, ki je z nosilci pritrjen na primarno oblogo iz brizganega betona. Na obroč se v vzdolžni smeri vgradi prvi obroč iz predizdelanih betonskih elementov.



Slika 4-21: Detajl jeklene oporne konstrukcije in sidranja (Schmidt et al., 2014).
 Figure 4-21: Detail of steel support structure and its anchoring (Schmidt et al., 2014).

Obtežba potisne sile naprave se prenaša na obroč in nato preko jeklenih nosilcev na primarno oblogo. Kot prikazuje slika (4-22), silo nato prevzame trenje med oblogo in zemljino (1), strižna odpornost med primarno oblogo in steno jaška (2), strižna odpornost med betonsko ploščo v dnu jaška in oblogo iz brizganega betona (3) ter eventualno drugo odpornostjo.



Slika 4-22: Koncept prenosa obtežbe potisne sile TBM naprave preko jeklene konstrukcije (prirejeno po Schmidt et al., 2014).
 Figure 4-22: Concept of load transfer of TBM thrust force through the steel structure (adapted from Schmidt et al., 2014).

V primeru dokaj dobre osne poravnosti trase in jaška je bolj običajna opcija izgradnja jaška s podporno konstrukcijo za ščitom. Zaradi manjše potrebe po prostoru in dvigalih, ta možnost omogoča lažjo pripravo dela in zagon naprave. Kljub temu je potrebno izvesti nekatere začasne ukrepe, preden začnemo z mehaniziranim izkopom. Ti ukrepi so namenjeni prevzemu obremenitve potisnih sil, ali pa preprečevanju dotoka vode. Poznamo naslednje ukrepe:

- nepropustni blok za steno jaška,
- vodilo za ščit,
- vodilni obroč,
- oporna konstrukcija,
- slepi obroč in
- injektiranje oz. cevni ščit.

Stik med štartnim/sprejemnim jaškom je lahko zaradi velikih pritiskov podzemne vode ena izmed najbolj ključnih faz izvedbe predora. Za učinkovito zagotavljanje neprepustnosti in vdora materiala med steno jaška in zemljino se kot najbolj običajen način izdelava neprepustni blok in tesnilni obroč. Ta zagotavlja pravo smer naprave in preprečuje vdor vode. Kakovost izvedbe se preveri pred izdelavo odprtine v pilotni steni jaška (Soft-eye), ki omogoča prehod TBM naprave skozi nearmirane dele betona. Blok se lahko pripravi na več načinov, ki so odvisni od lokalnih razmer v zemljini ter mesta kjer se jašek nahaja. Velikost bloka se določi glede na geomehanske parametre, pri čemer dolžina bloka ni krajša od dolžine ščita. Izdelava se lahko na naslednje načine:

- injektiranje peščeno-cementne mase nizke trdnosti v plasteh, ki tvori slabo prepusten in homogen blok,
- izdelava diafragme pravokotno na steno jaška. Zemljina se nato izboljša z injektiranjem in
- možna je uporaba tudi drugih metod, kot je jet-grouting, stabilizacija z mešanjem zemljine z vezivi, vendar je potrebno uporabiti metodo, ki zagotavlja tesnost in hkrati možnost preboja TBM naprave.



Slika 4-23: Izvedba odprtine v pilotni steni in zaščita z brizganim betonom (www.asiatunnelling.com).

Figure 4-23: Construction of opening in a pile wall and sealing with shotcrete (Soft-eye) (www.asiatunnelling.com).

Odprtino oz. oslabitev v steni jaška (piloti, diafragma, brizgan beton, ipd.), se izvede kot odstranitev betona in armature stene ter ponovni obrizg z brizganim betonom, ki preprečuje zruševanje zemljine.

Potrebno je torej uporabiti metodo, ki zagotavlja tesnost zemljine za steno jaška ter možnost preboja TBM naprave. Za vsako od uporabljenih metod je najbolj pomembno, da izbrana TBM naprava lahko prodre skozi blok (dovolj nizka trdnost, malo finih delcev za majhno obrabo orodij). Zavedati se je potrebno, da blok omogoča prehod naprave iz stanja brez obtežbe v stanje s polno obtežbo zemljine in podzemne vode na TBM napravo.

V štartnem oz. sprejemnem jašku ali predoru se pod TBM napravo izdelava vodilo iz jekla ali betona, po katerem TBM naprava drsi, medtem ko prehaja skozi neprepustni blok in za seboj vgrajuje predizdelane segmente. Ob straneh vodilne konstrukcije se ob možnosti obračanja naprave za preprečitev tega pojava vgradijo dodatne začasne podpore. Drsna konstrukcija za vodenje naprave je lahko izdelana iz betona ali jekla, kot to prikazuje spodnja slika.



Slika 4-24: Jeklena (levo) in betonska (desno) vodilna konstrukcija (Kumpfmüller, 2008).
Figure 4-24: Steel (left) and concrete (right) TBM cradle (Kumpfmüller, 2008).

Vodilni obroč zagotavlja pravo smer naprave, pri pomikanju naprej. Obroč namestimo v steno jaška oz. na skrajni konec štartnega predora, ta ima po celotnem obsegu nameščena tesnila. Tesnila zapirajo prostor za rezalno glavo in sicer med ščitom in zemljino. Enojna so primerna za premere večje od 11 m, za manjše premere pa uporabljamo dvojna tesnila.

Oporna konstrukcija, podobno kot oporni obroč, služi za prevzem potisnih sil in omogoča začetno polaganje segmentov. Obroče iz predizdelanih elementov, ki so vgrajeni v jašku ali štartnem predoru, imenujemo tudi slepi obroči in služijo le za prenos sile na oporno konstrukcijo ter bodo kasneje odstranjeni. Takoj ko so segmenti vgrajeni in so na svoji končni poziciji, se lahko začne tudi injektiranje praznine med betonskimi segmenti in zemljino, s tem pa se počasi zvišuje odpornost samih obročev za prevzem potisne sile (poveča se trenje po plašču).

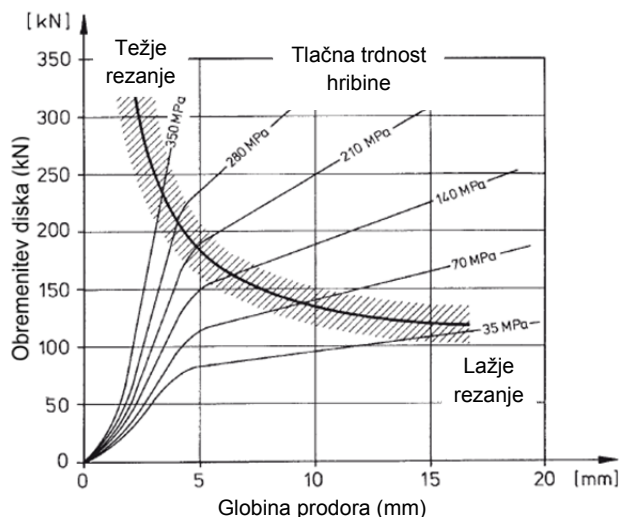
Začasni vmesni jaški in sprejemni/štartni predori se ponavadi zgradijo za temeljito obnovo naprave tekom izkopa predora oz. za potrebe demontaže ali odstranitve. Velikost jaška in dolžina začasnih predorov ne omogočata postavitve celotnega postrojenja naprave za čelom izkopa, zato se posamezne enote sestavljajo v času napredovanja naprave. Število potrebnih enot in celotne dolžine postrojenja je odvisna od potrebne opreme za izkop in načina ravnanja s predizdelanimi elementi obloge.

Sprejemni jaški/predori so zelo podobni štartnim konstrukcijam, paziti je potrebno le, da jih poskušamo na trasi umestiti na mesto z neproblematičnimi geološkimi ali hidrogeološkimi lastnostmi tal. Pri prodiranju TBM naprave v sprejemni objekt je izvedba kakovostnega bloka še toliko bolj pomembna, da ne pride do vdora podzemne vode.

4.4.2 Menjava orodij in vstop v izkopno komoro

Možnost menjave izkopnih orodij je eden izmed bolj pomembnih opravil pri mehaniziranem izkopu predora. Od stanja orodij je namreč odvisna hitrost napredovanja oziroma izkop predora nasploh. Menjava rezalnih nožev, trnov in diskov poteka v sami izkopni komori, ki hkrati služi za zagotavljanje podpore čelu, zato ni potrebno dvakrat omeniti, da gre za izredno občutljivo fazo izkopa predora s TBM napravo. Kljub številnim proizvajalcem TBM naprav in številnim izvedenim projektom, še vedno ni mogoče z veliko zanesljivostjo oceniti obrabo orodij, zato se vedno uporabljajo laboratorijske preiskave (Maidl et al., 2012).

Če je le mogoče, vzdrževalna dela opravljamo v vmesnih jaških ali sprejemnih kavernah, v večini primerov, pa nepredvidena obraba zahteva menjavo v nekontroliranih pogojih. Podpiranje čela tam zagotavljamo običajno z nadtlakom v izkopni komori. Takrat je vstop vzdrževalcev v to območje nujen. Z vidika projekta so to nepotrebni zastoji, ki imajo velik finančni vpliv na projekt. V praksi velja, da je potrebno v času izvedbe upoštevati vsaj eno nepredvideno menjavo orodij. Premer naprave ne vpliva bistveno na sam tehnološki pristop menjave. Na srečo se v tem segmentu predorogradnje praktično z vsakim projektom predstavi tudi kakšna novost, ki poenostavi delo.



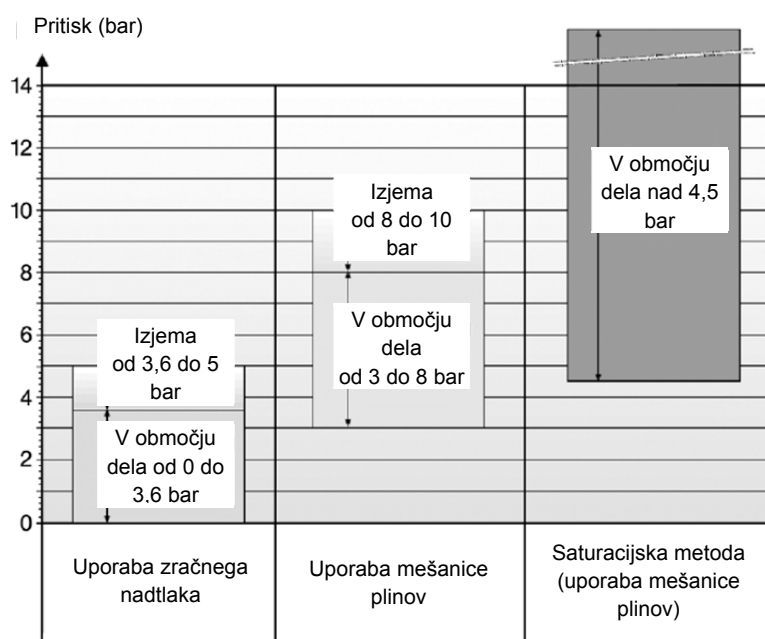
Slika 4-25: Območje ekonomične uporabe diskov glede na obremenitev in prodor v hribino (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 4-25: Economic working area of TBM cutters according to cutter loading and penetration (adapted from Maidl et al., 2012).

Ena izmed teh novosti je možnost menjave orodij z notranje strani izkopne komore. Ta predvsem zvišuje varnost vzdrževalcev pri tej operaciji, saj jim ni potrebno vstopati v popolnoma nevarovan prostor med izkopnim čelom in rezalno glavo. Omenili smo že, da je najbolj običajen način podpiranja čela z nadtlakom v izkopni komori, vendar to ni vedno zadostno. Poznamo še dva načina, ki sta bolj zahteva in nevarna.

Podpiranje se izvaja tako, da se iz izkopne komore izkopani material izprazni in se nadomesti z zračnim nadtlakom enakega velikostnega reda, kot so pričakovani pritiski na rezalno glavo. Ta možnost se uporablja, če pritiski zemljine in podzemne vode niso preveliki. Ko pritiski postanejo previsoki, je čas za izvedbo vzdrževalnih del mnogo krajši, kot je čas dekompresije delavcev, ki delajo v pogojih z zračnim nadtlakom. To lahko povzroči dekompresijsko bolezen poznano tudi kot potapljaška bolezen. Pritiski, ki jih lahko obvladujejo delavci brez posebnih ukrepov, so do 2 bara, pri višjih pa je potrebno uporabljati hiperbarično komoro (Maidl et al., 2012).

Projekt Barcelonske podzemne železnice, linije 9, je zahteval uporabo hiperbarične komore že pri tlakih 2 - 2,5 bara. Gre za tako imenovano saturacijsko metodo, kjer tkivo pod visokim pritiskom absorbira parcialni tlak kisika pri določeni globini in z dihanjem obogatene kisika. Zanimivo je, da ko je človeško telo enkrat zasičeno, je adaptirano in zasičenost ne raste več. Vzdrževalna dela trajajo od nekaj dni do nekaj tednov, čas izvedbe dekompresije pa je daljši. Zato so delavci v tem času nameščeni v hiperbarični komori. Ta način je primeren za tlake od 3 do 6 barov. Kot primer izvedbe predora pri izredno visokih tlakih lahko omenimo predor Westerschelde, kjer je bil uporabljen tlak do 8,5 bara. Pri takem tlaku postane kisik toksičen, zato ga je potrebno mešati z drugimi inertnimi plini (dušik ali helij) (Maidl et al., 2012).



Slika 4-26: Območje uporabe zračnega nadtlaka oziroma mešanic plina (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).

Figure 4-26: Area of application of compressed air or mixed breathing gases (adapted from Kumpfmüller, 2008).

Včasih se pri napravah z izplako zaradi zagotavljanja podpore čelu nivo izplake v času vzdrževalnih del ne more znižati, kar pomeni, da morajo v izkopni komoro vstopiti potapljači, ki praktično na slepo menjajo orodja. Če se izplaka lahko zniža le na nivo, da je možno opraviti pregled oziroma še nekoliko nižje za vzdrževalna dela, je potrebno preostanek izkopne komore zapolniti z zračnim nadtlakom. Za tak postopek je potrebno v izkopno komoro napeljati čisto vodo in rezervne dotoke kisika.

4.4.3 Osamelci ali skale samice

Na trasi se lahko pojavijo tudi samice ali gramozni osamelci (konglomerat), kateri so večji in bistveno trdnejši od ostalih plasti. Povzročijo lahko poškodbe naprave in velike zamude pri izvedbi projekta (DiPonio et al., 2007). Splošna definicija je, da so to zrna, večja od 300 mm, pri čemer je njihova tlačna trdnost bistveno večja od osnovne zemljine (Wangryul Lee, 2007).

Osamelci se lahko pojavijo v različnih geoloških slojih, s popolnoma nepredvidljivo razporejenostjo, velikostjo in trdnostjo. Sloji lahko zelo varirajo od ene do druge lokacije. Osamelci nastanejo kot ledeniški sedimenti, kot skalna preperina, s plazenjem in usedanjem ter s hudimi poplavami. Način nastanka vpliva na njihovo trdnost, obliko, velikost in razporeditev. Ledeniški sedimenti so lahko sestavljeni iz zelo trdne kamnine, kjer trdnost niha med 70 in 300 MPa. Za ugotavljanje njihove prisotnosti uporabljamo več metod geotehničnih raziskav: vrtanje z jedrovanjem, geološko kartiranje, georadar in druge geofizikalne metode. Klasično vrtanje z jedrovanjem ponavadi za osamelce ne da pravih rezultatov, lahko pa se na potencialnem območju izdelajo vrtine velikega premera (cca 1 m). S tem pristopom lahko dobimo boljšo sliko o zastopanosti večjih zrn.

Čeprav je verjetnost pojava osamelcev dokaj majhna, je vseeno potrebno napravo načrtovati tako, da ima nameščeno ustrezno opremo (diski, zobje, čeljustni drobilci, ipd.) za odstranjevanje ovri ter na pravem mestu (vijak za iznos materiala je nekoliko dvignjen z dna (tako je zagotovljena prava mešanica izkopanega materiala). To velja ne glede na vrsto izbrane TBM naprave (EPB ali izplaka). Ko je naprava soočena z izkopom trdnejšega dela čela, lahko to vpliva na povečane pomike na površju, povečano izgubo volumna, pogostejše mašenje vijaka ali črpalnih cevi ter okvare tekočih trakov (Maidl et al., 2013).

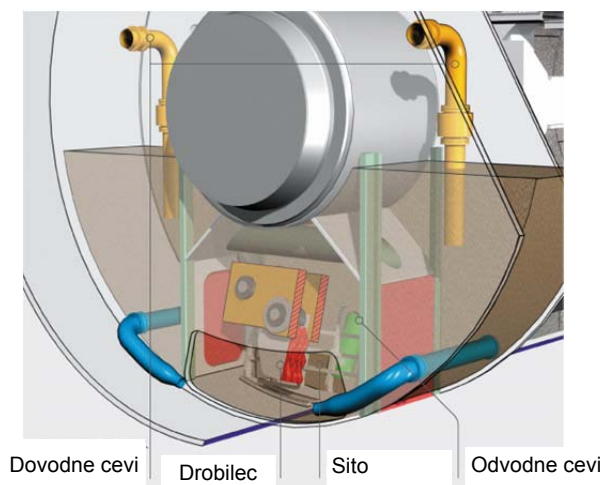
Izkop ali odstranitev osamelca lahko poteka na tri načine in sicer:

- če je velikost manjša, kot premer rezalne glave in ga ob napredovanju počasi odstranimo,
- če je velikost večja, kot premer rezalne glave, okoliška zemljina pa trdnejša, potem ga ob napredovanju izkopa odstranimo toliko, kolikor posega v profil rezalne glave ter
- če je velikost večja od rezalne glave, okoliška zemljina pa mehkejša, ga ob napredovanju delno odstranimo, delno pa ga naprava potisne v okoliško zemljino.

Orodja, primerna za izkop osamelcev, so odvisna od njihove trdnosti. Za mehkejše so lahko primerni že trni oz. zobje, čeprav to izredno poveča njihovo obrabo. Za trdnejše, kot tudi za nepredvidene osamelce, se ponavadi na rezalno glavo vgradijo rezalni diski. Za njihovo namestitev potrebujemo več prostora, zato jih vgrajujemo v parih ali skupinah, kar tudi povečuje njihovo učinkovitost. Razbiti osamelci morajo imeti pravo velikost, da se lahko odstranijo skozi odprtine v rezalni glavi. Težava se lahko pojavi, ko se preostali del osamelca v zemljini začne gibati z vrtenjem rezalne glave in je njegov izkop otežen, hkrati pa je še vedno prevelik za odprtine v rezalni glavi. Izvedeni projekti kažejo, da uporaba diskov pride v poštev pri EPB napravi le v primerih trdne osnovne hribine. V mehki hribini ali v zemljinah, učinkovitost diskov pri drobljenju samic ni velika, temveč so bolj primerni trni.

V primerjavi s TBM napravami za kamnine, so odprtine pri EPB in napravi z izplako manjše, saj moramo zagotavljati podporo čelu. Konstruktorji naprave morajo zato poiskati pravo

razmerje med velikostjo in številom diskov, velikostjo odprtin in načinom iznosa materiala. Poleg pravilnega odstranjevanja samic, moramo izkopen material odstranjevati tako, da ne poškodujemo transportnega mehanizma.



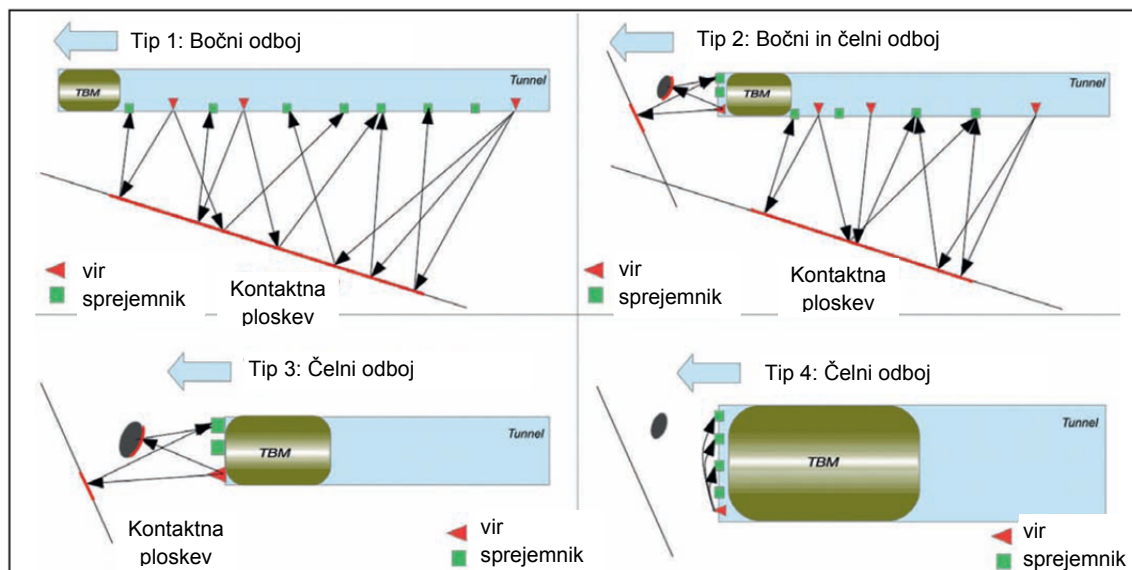
Slika 4-27: Prikaz čeljustnega drobilca in sita pri napravi z izplako (www.herrenknecht.com).
Figure 4-27: Scheme of jaw crusher and screen for slurry machine (www.herrenknecht.com).

Operaterji naprav zaznajo osamelec ali tršo plast po vibracijah naprave in hrupu, ravno tako začne nihati električni tok, ki poganja rezalno glavo, potrebni pa so tudi večji pritiski v hidravličnih cilindrih za potiskanje naprave. V izogib prekomerni obrabi orodij in poškodb rezalne glave, se hitrost napredovanja v času izkopa osamelca zniža. Velikost zrn, ki jih je mogoče odstraniti pri napravi z izplako, je odvisna od sita pred črpalno cevjo, ki mora zagotavljati prehod zrn velikosti največ 10% premera cevi, zato se pred sitom v ta namen vgradijo čeljustni drobilci, ki omogočajo drobljenje večjih zrn (samic), ki merijo v premeru od 50 cm in vse tja do 100 cm. Pri napravi EPB je velikost zrn v prvi vrsti odvisna od premera vijaka in nato še od zmogljivosti tekočega traku. Tu v delovni komori ni mogoče namestiti drobilcev iz dveh razlogov:

- izkopani material, ki ga uporabljamo za podpiranje čela, zapolnjuje tudi delovno komoro in
- zato, ker je tam nameščen začetni del iznosnega vijaka.

Zaradi večjih delcev, lahko pride do mašenja vijaka, kar upočasnjuje napredovanje. Ponavadi se to rešuje s še enim vijakom, ki je nameščen za iznos materiala z drugega dela izkopne komore. To omogoči odstranitev delcev iz prvega vijaka skozi dostopne odprtine v plašču, druga možnost je izdelava odprtin na ohišju vijaka s pomočjo katerih odstranjujemo material.

Sodobne naprave so ne nadgrajujejo zgolj na mehanskem področju delovanja naprave, ampak tudi na področju zaznavanja in predvidevanja nepričakovanih okoliščin s pomočjo geofizikalnih metod (Wangryul Jee, 2007). Zaznavanje osamelcev je mogoče s pomočjo naprave, ki z elektromagnetnimi valovi in njihovim odbojem prikaže sestavo tal pred rezalno glavo (seizmični odboj). Napoved sestave tal je mogoča tudi do 30 m pred čelom. Popolno delovanje sistema zaradi vrtenja rezalne glave še ni mogoče, saj povzroča motnjo pri oddajanju in sprejemanju valov. Velikostni red šuma pa je odvisen tudi od vlažnosti zemljine v izkopni komori, saj je pri bolj vlažnih oz. celo tekočih materialih izredno majhen in deluje ugodno (Robert et al., 2014).



Slika 4-28: Različni načini seizmičnih raziskav hribine prirejeni za TBM naprave (prirejeno po Robert et al., 2014).

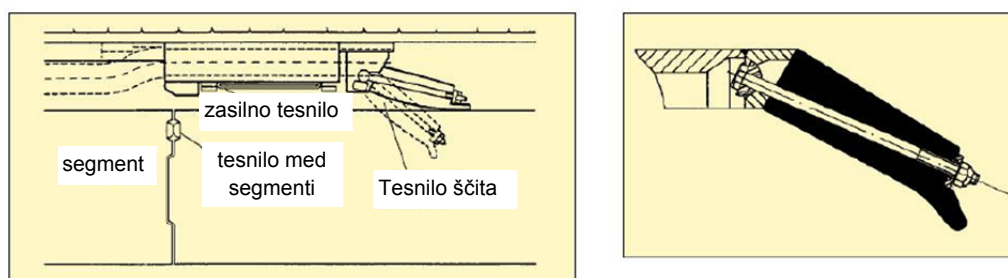
Figure 4-28: Different principles of seismic investigation for TBM machines (adapted from Robert et al., 2014).

Še vedno je mogoča tudi uporaba klasičnih ukrepov, kot so horizontalne vrtine pred čelom, (ki ne pokrivajo celotne površine), zato del rizika še vedno obstaja. Hkrati je to izreden primer, saj je takrat delovanje naprave ustavljeno.

4.4.4 Zapolnjevanje praznine med ščitom in oblogo

Med izkopom se znotraj ščita TBM naprave vgrajujejo predizdelani betonski segmenti. Ko se ti segmenti namestijo in med seboj povežejo z vijaki, lahko pričnemo z zapolnjevanjem praznine med oblogo in hribino. Praznina nastane zaradi nadprofila rezalne glave, konusne oblike ščita ali razlike med premerom ščita in končne obloge. Odvisno od premera TBM naprave je praznina velikostnega reda med 100 in 200 mm. Praznina ima pozitiven učinek na napravo in fazo izkopa predora ter negativen na okoliško hribino. Naloga praznine je zmanjševanje trenja hribine na ščit in posledično zmanjšanje sile za napredovanje naprave, tako je poraba energije za napredovanje manjša. Konusna oblika ščita je izdelana z namenom lažjega vodenja naprave pri bolj zaviti trasi predora oz. v primerih stisljive hribine.

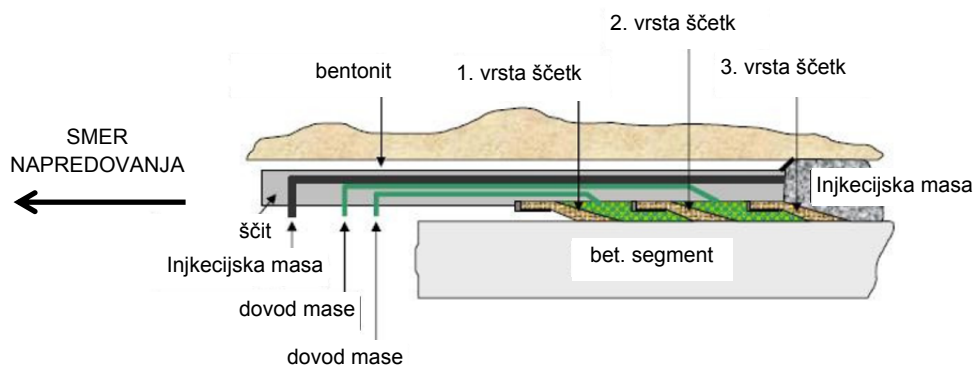
Zaradi negativnih učinkov praznine jo je potrebno čim prej zapolniti z injekcijsko maso ali z zasipom iz kamnitega materiala. Zapolnjevanje s kamnitim materialom (z dodatki cementa ali elektrofiltrskega pepela) se uporablja v kamninah, injektiranje pa v slabše nosilnih kamninah in zemljinah. Injektiranje se izvaja na koncu ščita (za tesnilom). Tesnilo na koncu ščita je izredno pomemben del naprave, saj zagotavlja suho delovno okolje. Poznamo dva tipa tesnil: ščetkasto tesnilo in plastično »jezično« tesnilo. Za izdelavo plastičnih tesnil so se uporabljali različni umetni materiali (neopren, poliuretanske pene, ipd.), vendar le en tip tesnila izpolnjuje svojo zahtevno funkcijo. Tega je razvilo podjetje Wayss & Freytag in se imenuje S1. Sestavljen je iz masivnega gumiranega profila, ki je s pomočjo vijaka pritrdjen po celotnem obodu ščita in ob napredovanju naprave drsi po vgrajeni segmentni oblogi (Kumpfmüller, 2008).



Slika 4-29: Tesnilo tip S1 iz umetne mase, ki je nameščen na koncu ščita (prirejeno pod Kumpfmüller, 2008).

Figure 4-29: Rubber shield type S1 tail seal placed at the end of shield (adapted from Kumpfmüller, 2008).

Drugi, v praksi bistveno bolj razširjen tip tesnila, je ščetkasto tesnilo. Sestavljen je iz dveh ali več vrst ščetkastih tesnil, nameščenih po celotnem notranjem obodu ščita. Ščetke so namreč vgrajene malenkost bolj proti rezalni glavi. Med dve vrsti tesnil se vbrizgava še mazivo, ki zapolni vse odprtine in hkrati služi kot mazivo za lažje napredovanje. Ščetke so iz jeklenih plošč in so zaradi manjše tesnosti postavljene v tri vrste.



Slika 4-30: Ščetkasto tesnilo nameščen na koncu ščita (prirejeno pod Kumpfmüller, 2008).

Figure 4-30: Wire seal placed at the end of shield (adapted from Kumpfmüller, 2008).

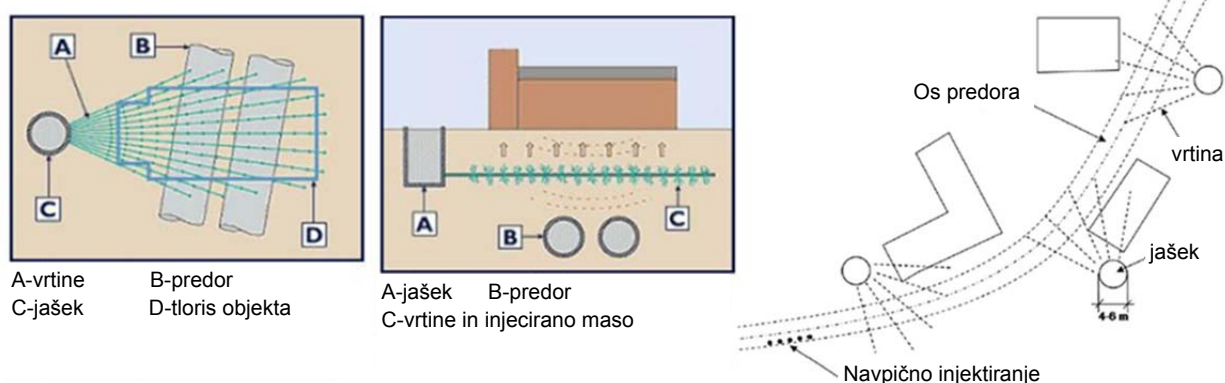
Injektiranje se izvaja v dveh fazah. Prva faza je injektiranje takoj za vgrajenimi segmenti. Injektirno maso vbrizgavamo preko cevi, ki so nameščene po obodu ščita ali pa skozi predhodno pripravljene luknje v segmentni oblogi. Pri tej fazi se kakovostno usidrajo betonski segmenti. Druga faza injektiranja se izvaja proti koncu celotne TBM kompozicije. Izvaja se vedno skozi luknje, narejene v segmentni oblogi. Namen injektiranja je zapolnjevanje preostalih praznih prostorov med oblogo in zemljino ter praznin v injekcijski masi prve faze. Za to injektiranje se uporabljajo večji pritiski (podobni kot pri jet-groutingu).

4.4.5 Nadzorovanje posedkov na površini

Vpliv gradnje predora na okoliško hribino in na posedanje površine je neizbežen in se razlikuje glede na uporabljeno metodo. Izkop predora z nizkim nadkritjem ima večji vpliv na površino, kar je lahko zelo neugodno oz. celo nesprejemljivo, če gradnja poteka v urbanem okolju. Za izvedbo predorov v urbanem okolju so vsekakor bolj primerne TBM naprave, kjer je izkop in podpiranje avtomatizirano in tako z manjšim nadprofilom povzročajo manjše spremembe v napetostnem stanju hribine, predvsem pa je čas med izkopom in podpiranjem

bistveno krajši. Kljub temu je treba izvesti določene podpirne ukrepe, ki so preventivni, lahko pa jih vgrajujemo po izvedbi predora.

Preventivne ukrepe za omejevanje posedanja lahko določijo projektanti predora na podlagi numeričnih analiz. Poznani preliminarni ukrepi so: kompenzacijsko injektiranje, injektiranje za izboljšavo tal ali zamrzovanje tal. Kompenzacijsko injektiranje se izvaja iz začasnih jaškov v obliki pahljače nekoliko višje od temena predora. Običajno se ta pristop uporablja v predelih, kjer se zaradi večjih premerov predora ali drugih podzemnih konstrukcij, pričakujejo večji posedki na površini. S to metodo na določenem območju z injektiranjem povzročamo dvižke tal. Uporabljajo se mase na cementni osnovi, ki niso problematične z vidika varovanja okolja. Kompenzacijsko injektiranje se izvede pred izvedbo predora. Vrtine pa lahko kasneje ponovno uporabimo, če so vplivi večji od pričakovanih.



Slika 4-31: Primer izvedbe kompenzacijskega injektiranja, tloris (levo), prerez (sredina) in situacija trase z lokacijami injektiranja (desno) (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).

Figure 4-31: Example of compensation grouting, plan (left), section (middle) and plan with tunnel alignment and grouting locations (right) (adapted from Kumpfmüller, 2008).

Ostala dva ukrepa sta koncept zamrzovanja tal, ki je opisan v naslednjem poglavju, in postopek injektiranja za izvedbo izboljšave tal v območju med projektiranim predorom in obstoječim objektom. Tu vzdolž trase predora na izpostavljenih mestih izvedemo vrtnice (v naklonu ali vertikalno) preko katerih z injekcijsko maso na cementni osnovi izboljšamo raščena temeljna tla.

Na velikost posedkov lahko vplivamo tudi v času izkopa. Kljub temu moramo med samim izkopom biti pozorni na naslednje pojave:

- nižanje gladine podtalne vode,
- razporeditev napetosti in zagotavljanje podpore čelu izkopa,
- večja izguba volumna izkopa kot je pričakovano (zaradi nepodprtega čela),
- deformacije zgradb pri izdelavi trase predora v krivini in
- nezadostno injektiranje praznine za oblogo.

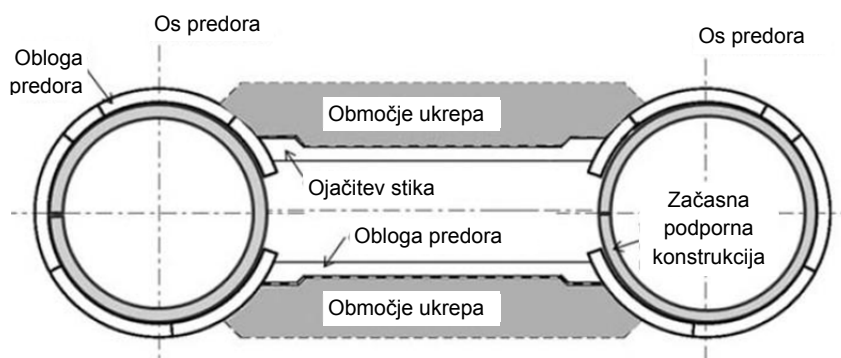
Nižanje talne vode lahko obvladujemo z ustreznim tesnjenjem čela in ščita. Zagotavljanje ustrezne podpore čelu je odvisno od upravljavca naprave, ki lahko na več načinov kontrolira pritisk na čelo. Hitrost izkopa obvladujemo s potisnimi silami in navorom pri rezalni glavi. Injektiranje za oblogo mora biti izvedeno čim prej. Sodobna TBM naprava beleži in v kontrolno sobo posreduje toliko informacij, da mora operater iz podatkov razbrati in ukrepati v največji možni meri ter vplivati na učinkovitost in varnost gradnje.

4.4.6 Prečne povezave

V zadnjih 15 letih je bilo zaradi požarov (predora Mont Blanc in St. Gotthard) namenjeno veliko več pozornosti zagotavljanju varnosti v predorih. V skladu z zakonodajo in smernicami za načrtovanje in varnost v predorih je zato potrebno glavne predorske cevi med seboj povezati s prečnimi povezavami (na razdalji od 100 do 500 m), kjer ena služi kot ubežna pot oz. je potrebno za enocevne predore na drugačen način zagotoviti predpisane ubežne poti.

Projektiranje in izvedba prečnih povezav je ena izmed zahtevnejših problematik pri predoru. Pri klasični izgradnji glavne cevi predora to ni tako velik problem (pogosto je celo ugodno z vidika dinamike del), pri predorih iz segmentne obloge, pa je potrebno poskrbeti za varen način izvedbe (predvsem v fazi odpiranja segmente obloge). V fazi projektiranja je potrebno upoštevati veljavne standarde in sicer s področja požarne varnosti, projektiranja predorov in njegove namembnosti in načrtovanja konstrukcije (beton in jeklo).

Zelo neugoden primer gradnje predora, je pod vodnim telesom (reka, jezero,...), kjer lahko nepravilna izgradnja prečnika oslabi hribino tako, da omogoči vdor vode in poplavitve predora. Kritično mesto je odpiranje segmentne obloge glavne cevi, zato je potrebno izvesti ukrepe, ki zmanjšajo tveganje. Pri izvedbi prečnika zato uporabljamo ukrepe, ki so odvisni od lastnosti tal in razpoložljivega prostora v glavni predorski cevi (Lawrence in Taylor, 2011). Na spodnji sliki je prikazano območje, kjer je potrebno izvesti preventivne ukrepe.



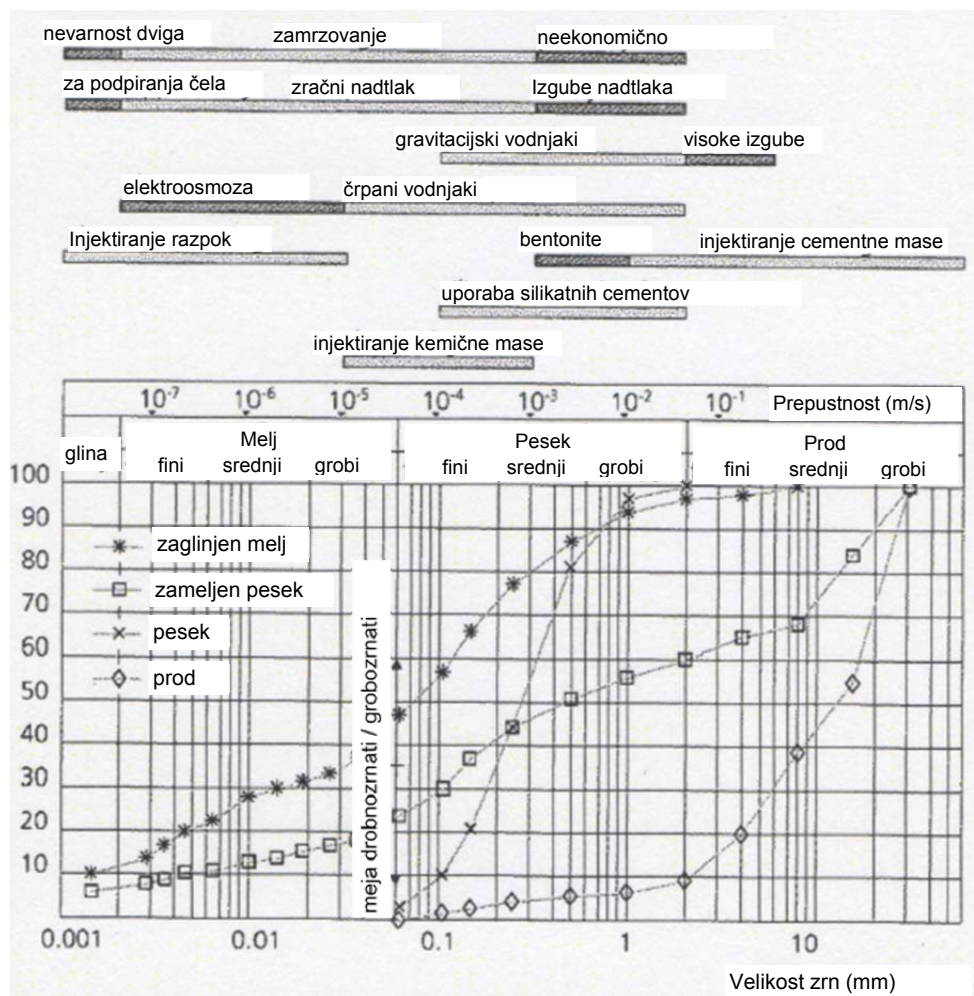
Slika 4-32: Prečna povezava z območjem preventivnih ukrepov (prirejeno po Lawrence in Taylor, 2011).

Figure 4-32: Cross passage with area of additional measures (adapted from Lawrence and Taylor, 2011).

Poznamo naslednje tri, ki so najbolj pogosti:

- injektiranje zemljinske mase izven obloge,
- podpiranje obloge in zemljine z zračnim nadtlakom ali
- zamrzovanje tal na celotni dolžini prečne povezave.

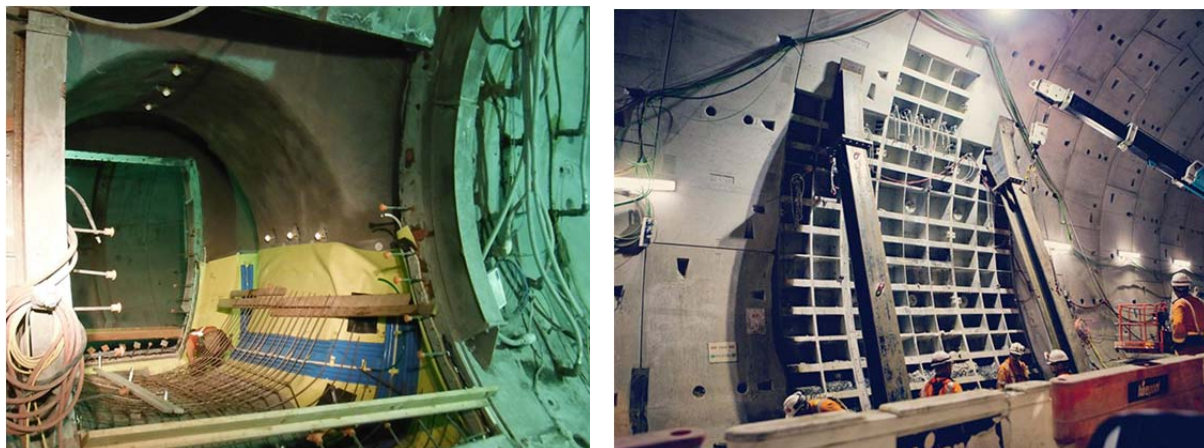
Vsi trije načini morajo biti izvedeni tako, da omogočajo kontrolirano delovno okolje, pri čemer je zmanjšana nevarnost pojava dotokov podzemne vode in zruškov nepodprte zemljine.



Slika 4-33: Primerjava preventivnih ukrepov glede na zravnostno strukturo hribine (prirejeno po (Lawrence in Taylor, 2011)).

Figure 4-33: Comparison of ground treatment methods according to ground structure (adapted from Lawrence and Taylor, 2011).

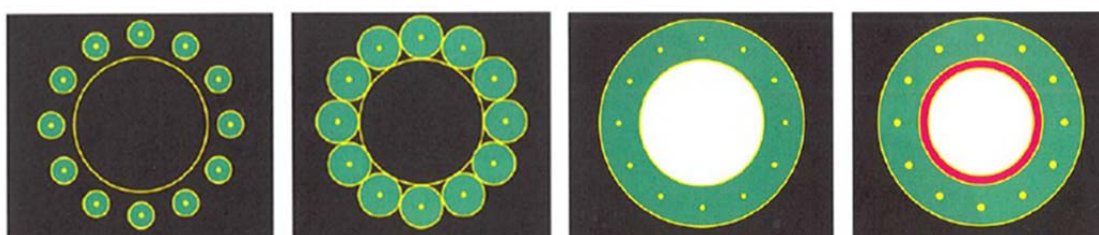
V vsakem primeru, pa je potrebno podpreti tudi segmentno oblogo v območju preboja. Običajen način podpiranja segmentov je z jekleno konstrukcijo znotraj obloge. Naloga jeklene konstrukcije je prevzeti deformacije in napetosti v območju preboja, saj segmenti ne morejo delovati kot monolitna konstrukcija. Na mestu preboja se segmenti nato zamenjajo z jeklenimi elementi, ki imajo vnaprej pripravljeno odprtino in zagotavljajo enako geometrijo glavne cevi (v prečni smeri). Možna je tudi klasična izvedba prečne povezave, kjer se stik izdelava z betonsko notranjo oblogo betonirano na mestu.



Slika 4-34: Priključek prečnika na glavno cev v izvedbi brizganega betona (levo) ali jeklenih segmentov (desno) (www.tunneltalk.com).

Figure 4-34: Connection of cross passage to running tunnel with shotcrete (left) or using iron segments (right) (www.tunneltalk.com).

Podpiranje obloge in zemljine z zračnim nadtlakom je sicer enostavna rešitev, ki pa je predvsem odvisna od lastnosti hribine (prepustnosti) in od velikosti TBM predora. Uporaba tega načina je izredno redka, saj morajo biti pogoji v hribini res optimalni. Injektiranje je klasični način izboljšave zemljine, katerega lahko izvedemo horizontalno ali vertikalno. Z maso izboljšamo lastnosti tal v območju preboja in izkopa. Problem se pojavi pri dolžini oz. globini injektiranja in pri velikosti segmentnega predora, saj ta omejuje dolžino vodila za vrtnje. Izkušnje uspešnosti vertikalnega injektiranja pri izdelavi prečnika na eni izmed linij podzemne železnice v Taipeiju, kažejo, da kljub obsežnemu injektiranju (celotno območje obeh glavnih predorskih cevi in celotna dolžina prečnika v širini cca 10 m), možno naleteti na precej poškodovano hribino, ko TBM naprava prečka injektirano cono (Fang et al., 2013), kar ne zagotavlja varne izvedbe del. Projektant je zato po testnem vrtnju predpisal dodatno injektiranje in pripravil večstopenjski načrt za zagotavljanje varnosti v fazi gradnje in sicer: ponovno injektiranje, izvedba testa vodoprepustnosti in kemijsko injektiranje, uporaba zračnega nadtlaka in uporaba varnostnih vrat.



Slika 4-35: Prikaz izvedbe predora z zamrzovanjem okoliške hribine (Kumpfmüller, 2008).

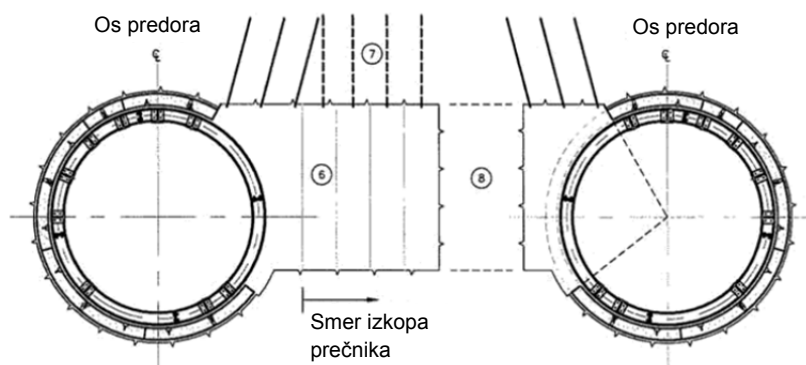
Figure 4-35: Scheme of tunnel construction with ground freezing (Kumpfmüller, 2008).

Tretja možnost je zamrzovanje zemljine, kjer predor poteka pod vodnim telesom oziroma je prisotna podzemna voda. Metoda deluje tako, da se izven izkopnega profila vgradijo cevi, ki jih nato napolnimo s hladilno tekočino. Ohlajanje zemljine povzroči zmrzovanje okoliške zemljine, ki tvori ledeni obok. Zamrzovanje poteka tako, da najprej zmrzne neposredna okolica cevi in vse do sklenitve obroča okoli predorske cevi. Takrat se lahko prične z

izkopom in vgradnjo obloge. V času zmrzovanja lahko beležimo tudi dvige merilnih točk, saj ima led večjo prostornino kot voda.

V dokaj dobri hribini se lahko uporabi še četrta metoda, kjer del betonskih segmentov zamenjamo z jeklenimi segmenti, ki imajo vnaprej pripravljeno odprtino in nato pričnemo z gradnjo prečnika. Pred pričetkom odstranjevanja segmentne obloge je potrebno izdelati predvrtavanje v smeri izvedbe prečnika. S pomočjo vrtin se ugotovi stanje hribine, kakovost izvedbe preventivnih ukrepov in prisotnost podzemne vode.

Po izvedbi preboja se stik izvede kot armiranobetonski okvir. Zagotoviti je potrebno tudi tesnost stika oz. kontrolirano odvajanje vode. Najbolj razširjena je izvedba dreniranih predorskih cevi in vgradnja hidroizolacijskih elementov na stiku. Ti elementi so membrane, trakovi, injekcijske cevi in tesnila.



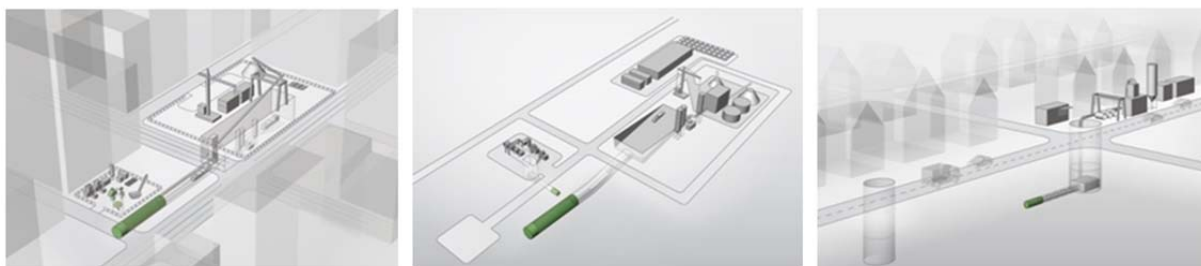
Slika 4-36: Shema izkopnih sekvenc pri izvedbi prečnika (prirejeno po Lawrence in Taylor, 2008).

Figure 4-36: Scheme of cross passage construction sequence (adapted from Lawrence and Taylor, 2008).

Pri načrtovanju tako imenovanih tranzitnih predorov (železniški promet ali podzemna železnica) je svetli profil zelo optimiziran, segmentna obloga pa ne omogoča enostavne izvedbe niš, zato se ponavadi vsa elektro in strojna oprema umešča v območje prečnika. Ker mora prečnik kljub temu zagotavljati svetli profil za evakuacijo, se lahko izkaže, da je bolj smotrno izdelati dva vzporedna prečnika z manjšim premerom, kot enega večjega, saj je načrtovanje in izvedba bistveno manj zahtevna. Pri načrtovanju stika se poskuša ujeti osi obeh predorov, pravokotnost med cevema in zmanjšati velikost prečnega prereza prečnika.

4.4.7 Zagotavljanje logistične podpore TBM napravi

Res je, da je gradnja predora odvisna od učinkovitosti izkopa predora (rezalne glave) in od vgrajevanja betonskih segmentov, vendar je vse to odvisno od kakovostnega delovanja podpornega sistema ureditve delovišča. Podporni sistem zagotavlja odstranjevanje izkopanega materiala v eno smer ter dobavo in vgrajevanje betonskih segmentov v drugo smer. Poleg tega se za vgrajenimi elementi izvaja injektiranje in ostala dela. Postrojenje na delovišču skrbi za obdelavo izkopanega materiala, izdelavo, skladiščenje in dobavo predizdelanih betonskih elementov. V primeru uporabe naprave z izplako je treba posebno mesto nameniti napravi za filtriranje mešanice izplake in izkopanega materiala. Na spodnjih slikah so shematsko prikazani načini postrojenja v primeru EPB naprave, naprave z izplako in v primeru izdelave mikropredora.



Slika 4-37: Prikaz postrojenja za podporo TBM naprav, EPB naprava (levo), naprava z izplako (sredina) in izvedba mikropredora (desno) (www.herrenknecht.com).

Figure 4-37: Schemes of support area for TBM construction, EPB (left), slurry machine (middle) and micro tunnel (right) (www.herrenknecht.com).

4.4.8 Primerjava parametrov pri TBM napravah

Področje razvoja TBM naprav je zelo hitro, zato je lažje parametre razumeti z medsebojno primerjavo. Ti ključni parametri so: teža naprave, moč motorja, ki poganja rezalno glavo, faktor napredka in cena naprave.

Težo in moč rezalne glave lahko medsebojno primerjamo, vendar ta primerjava ni najboljša. Dobimo sicer pričakovan rastoči trend, vendar pa je primerjava močno odvisna od posameznih elementov, ki dopolnjujejo napravo (specifičnost projekta, sistemi za iznos in transport materiala, vrsta in velikost vijakov, ipd.). Tudi pri napravi z izplako je primerjava odvisna od sistema za odstranjevanje materiala in lahko zelo varira. Opazimo lahko večje razlike med EPB napravo in napravo z izplako, kar lahko utemeljimo s trenjem med rezalno glavo in zemljino ter razliko v materialu, ki ga uporabljamo za podpiranje čela. Trenje pri EPB napravi je razumljivo bistveno večje.

Hitrost napredka je zelo pomemben podatek, ki pa ga ni smotno površno primerjati med projekti in napravami. Predstavlja dolžino izkopa in vgrajenih betonskih segmentov v časovni enoti. Običajno se uporablja enota meter/teden ali meter/dan. Povprečni pričakovani napredek je sicer odvisen od premera in geoloških pogojev, vendar lahko omenimo, da okvirno znaša 60 metrov/teden za EPB naprave in približno 50 metrov/teden za naprave z izplako. Pri posameznem projektu je nato smiselno izdelovati napovedi za nadaljnje napredovanje. Ne glede na okvirni faktor napredka, pa lahko glede na znane podatke podamo oceno o napredovanju na posameznem projektu. Poudariti je potrebno, da na hitrost napredovanja vplivajo tudi zastoji, katere je nemogoče v celoti predvideti.

Enostavna primerjava premera naprave in njene cene za razliko od prejšnjih primerjav, prikaže bolj razumljive vrednosti. Seveda je točna cena naprave določena glede na opremljenost in za vsak projekt posebej ter je odvisna od vseh pogojev in okoliščin izvedbe. Vrednost EPB naprave premera od 5 do 15 m znaša okvirno od 10 do 50 milijonov evrov, vrednost naprave z izplako je nekoliko višja za manjše premere in nižja za večje premere in sicer znaša okvirno od 15 do 40 milijonov evrov.

4.4.9 Tveganja povezana z uporabo TBM naprav

Uporaba TBM naprav pri gradnji predora daje občutek, da je na račun mehaniziranosti procesa izvedba enostavnejša in da tekom izgradnje pride do manj zapletov. Na nek način je

to res, vendar se je potrebno zavedati, da si zaradi višine stroškov naprave, ni mogoče privoščiti nepredvidljivih situacij. Kljub temu pride do neljubih situacij, predvsem na račun geoloških razmer.

Glavna tveganja nastanejo v obdobju, ko proizvajalec napravo prične projektirati in sestavljati v tovarni ter do končanja izkopnih del. Identificiramo lahko naslednje glavne štiri skupine tveganj (Spencer et al., 2009):

- izdelava TBM naprave in dostava na gradbišče,
- sestavljanje TBM naprave na gradbišču,
- izvedba izkopnih del in
- razstavitev naprave in odstranitev z gradbišča.

Prvo tveganje se nanaša na čas izvedbe naprave, preskušanje in dostavo na gradbišče. V tem času lahko pride do različnih zastojev, kot sta n.pr. požar in transport. To lahko vpliva na pričetek del in povzroči nepredvidene stroške projekta.

Drugo tveganje je pogojeno z izpostavljenostjo portalov, kjer se naprava sestavlja in pripravlja za izkop. Portali so lahko izpostavljeni poplavi, požaru, kraji ali plazovom, ni pa tudi izključena možnost, da je pripravljeno portalno območje premajhno, obstaja možnost, da se posamezni deli naprave pri sestavljanju poškodujejo. Sestavljanje naprave in preizkušanje pred izvedbo morajo izvajati usposobljeni delavci. Na sodobnih projektih ravno tako ni redkost, da proizvajalec poda tudi garancijo za napravo, ki velja za izvedbo prvih 50 do 100 m predora (Spencer et al., 2009).

Tretje in hkrati tudi največje tveganje predstavlja izvedba izkopnih del. Problemi, ki jih srečamo v tej fazi so:

- poplavitve naprave,
- požar in/ali eksplozija,
- težave zaradi nepredvidenih geotehničnih faktorjev,
- težave zaradi neprimerno izbrane tehnologije naprave,
- težave zaradi neizkušenosti upravitelja naprave,
- težave zaradi nepravilne izbire trase predora,
- težave zaradi strojeloma in
- težave pri preboju v sprejemni jašek.

Nevarnost poplavitve predora obstaja vedno, kadar se izkop izvaja pod nivojem podtalnice ali če se na trasi predora nahajajo vodni žepi. Izbrati je treba napravo zaprtega tipa in izpolnjevati protokol pri izvajanju vzdrževalnih del tako, da so dostopne odprtine ves čas zaprte. Za zmanjšanje verjetnosti nastanka požara mora biti naprava opremljena z gasilniki. Vgrajena oprema mora biti ognjevarna (Spencer et al., 2009).

Nepredvideni geotehnični faktorji izhajajo iz neustrezno ali pomanjkljivo izdelanih geološko geomehanskih podlag. Naročnik ponavadi v fazi raziskav premalo sredstev nameni v ta namen, kar vpliva na nižji strošek izvedbe raziskav, hkrati pa je tudi zanesljivost geološke napovedi in podatkov manjša. Tveganja iz tega naslova se lahko zmanjšajo, če izvajalec med gradnjo izvaja predvrtavanje in sproti korigira geološko sliko pred čelom, kar pa vpliva na višje stroške in manjši napredek naprave. Zaradi nepredvidenih geoloških situacij se lahko pojavijo naslednje težave: »potapljanje« glave TBM naprave, stiskanje predora pri

večjih premerih, poškodbe naprave zaradi vibracij, ki jih povzroča prehod naprave skozi trdnejše sloje hribine, prekomerna obraba orodij zaradi prehoda skozi bolj abrazivno hribino in poškodbe ali oviranje naprave pri naletu na nepredviden objekt (cevitev vrtine, ipd.).

Izbira naprave temelji na upoštevanju parametrov, ki opisujejo geotehnične karakteristike hribine, nivo podzemne vode, stopnja abrazivnosti in velikostni red največjih dovoljenih posedkov površine. Uspešnost naprave pri izkopu je odvisna od upravitelja, njegove usposobljenosti in izkušenj. Na tem temeljijo odločitve, ki jih mora sprejeti na podlagi podatkov, ki jih ima na razpolago v kontrolni sobi.

Določen del tveganj se pojavi tudi glede na izbrano traso predora. Med izvajanjem se trase ne sme spreminjati, lahko pa se s hitrostjo prodiranja obvladuje težave, ki izhajajo iz napačne izbire nivelete. Tveganja lahko povzroči tudi okvara naprave. Predvsem so to prekomerna obraba orodij, poškodba glavnega ležaja in druge okvare med daljšim postankom za vzdrževalna dela. Pri zaključevanju izkopnih del, se lahko pojavijo težave zaradi napačno lociranega portala oziroma slabe priprave tesnilne obloge in jaška.

Četrto tveganje se nanaša na izvedbo demontaže. Pri tem lahko podobno kot pri sestavljanju, pride do neustreznih delovnih operacij. Zato mora razstavljanje in odvoz opravljati izkušena in usposobljena delovna sila.

4.5 Najprimernejše naprave za izkop v zemljinah – Ljubljana in okolica

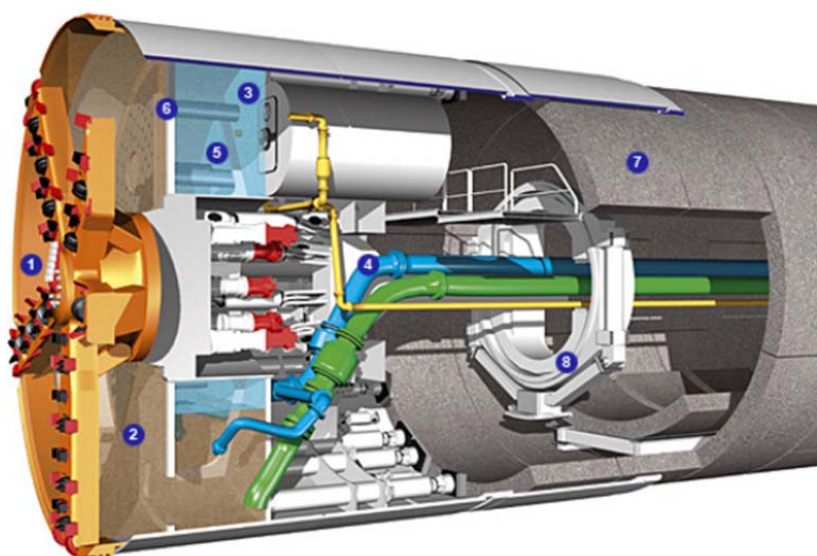
V prejšnjem poglavju smo predstavili večinoma spekter vseh TBM naprav za izkop predorov v celotnem profilu. Nekatere izmed teh, so bile razvite zaradi specifičnosti geologije izkopa pri posameznem projektu. V tej kratki zgodovini naprednejših naprav, pa sta se nadalje razvijali praktično le dve, ki sta tudi najprimernejši za izkop v zemljinah in sicer: naprava z uporabo izplake (slurry shield) in naprava, ki podpira čelo z izkopanim materialom (EPB shield). Osnovni princip delovanja naprav smo že razložili, vendar ker naloga obravnava območje Ljubljane, bomo v nadaljevanju bolj podrobno obravnavali omenjeni dve tehnologiji in pripadajoče aplikacije.

4.5.1 Podpiranje čela z izplako

Naprave, kjer čelo podpiramo z izplako delujejo kot zaprt sistem, ki je razvit predvsem za uporabo v zemljinah, ki nimajo kohezije oziroma je le ta zelo nizka. Geološko to pomeni fino do grobo zrnate peske in prode, brez primesi melja ali gline. Naprava je primerna tudi za področja, kjer predor poteka v bolj zahtevnih geoloških pogojih (mešane plasti) z večjimi dotoki vode, ki zmanjšujejo stabilnost čela. Omenili smo, da je za učinkovito podpiranje čela, potreben neprepustni sloj izplake na stiku z zemljino. Možnost izvedbe neprepustnega sloja, pa ni vedno samoumevna, saj je odvisna od prepustnosti zemljine, prisotnosti podtalne vode in hitrosti njenega toka. Možen je tudi pojav spiranja izplake, kar rezultira v padanju pritiska na čelo. To se ne zgodi v trenutku, je pa pokazatelj, da je potrebno lastnosti zemljine izboljšati s polimernimi dodatki, ki zapirajo pore v zemljini.

Izkop se izvaja z vrtečo rezalno glavo, ki je opremljena z izkopnimi zobmi ali strgali in ostalimi orodji primerni za zemljino. Opremljenost rezalne glave s primernimi orodji se določa za vsak posamezen projekt (predor) glede na pričakovane geološke pogoje. Rezalna glava je v vsakem primeru opremljena tudi z diski, ki pomagajo premagovati nepričakovane

trdnejše ovire, kot so osamelci (skalnati, prodnati, konglomeratni, ipd.). Izkopani material se nato zmeša z izplako in se s črpanjem odstrani iz izkopne komore. Pred črpalko so ponavadi nameščena sita in drobilci, ki preprečujejo okvare in mašenje. Izplaka se poleg iznosa materiala uporablja tudi za podpiranje čela med izkopom. Kot omenjeno se v največjih primerih uporablja bentonitna izplaka, ki ima tiksotropne lastnosti (suspenzija v statičnih pogojih zagotavlja visoko viskoznost in s tem stabilne pogoje pri dinamičnih pogojih pa z nizko viskoznostjo omogoča tekoče pogoje za iznos materiala). Suspenzija ali izplaka ima prostorninsko težo $10,5 \text{ kN/m}^3$ s katero zagotavlja želene lastnosti za splakovanje. Prostorninska teža se lahko dvigne do 12 kN/m^3 , kar zvišuje verjetnost zapletov pri iznosu izkopanega materiala. Lastnosti suspenzije se tekom izkopa redno laboratorijsko preverjajo. V primeru, če suspenzija ne zagotavlja zahtevanih lastnosti, jo je potrebno izboljšati oz. se mora zamenjati z novo.



Slika 4-38: Prikaz naprave s ščitom, ki za podpiranje čela uporablja izplako (podrobnejši opis naprave se nahaja v odstavku pod sliko) (www.herrenknecht.com).

Figure 4-38: Scheme of shield machine with slurry face support system (detailed description of figure is in paragraph below) (www.herrenknecht.com).

Izkopna komora (2) je med izkopom zapolnjena z izplako (4) (Slika 4-38). Pritisk na čelo izkopa odraža pritisk izplake v komori, katerega kontroliramo z merjenjem na dovodni cevi. Na ta način se zagotavlja izredno majhna nihanja na čelo izkopa. Eden od proizvajalcev TBM naprav, podjetje Herrenknecht je klasično napravo z izplako nadgradil tako, da je omogočeno obvladovanje primerov z nepredvidenim nihanjem (zmanjšanje) pritiska na čelo. Napravo so poimenovali Hydroshield (vodni ščit) in daje možnost uporabe večjega čelnega pritiska, celo do 15 barov. Deluje po principu zračne blazine, ki se nahaja v delovni komori (5). Delovna komora je z izkopno pregrajena s pomično steno (6) in služi za črpanje mešanice suspenzije in izkopanega materiala (4) in je do višine osi naprave napolnjena z mešanico suspenzije in izkopa, zgornji del pa je zapolnjen z zrakom. S pomočjo opisanega uravnavanja pritiska na čelu se v urbanih območjih učinkovito nadzoruje posedke ali dvizke na površini (Maidl et al., 2012).

Za varno uporabo naprave pri visokih tlakih je nujna njena tesnost. Na čelu je tesnost zagotovljena z izplako in zračno blazino, prostor med ščitom in zemljino ter segmentno oblogo, pa tesnijo žične ščetke, ki preprečujejo dotok vode in zemljine.

V času izkopa je potrebno omogočiti dostop v izkopno komoro, bodisi za potrebe menjave izkopnih orodij ali v primeru okvare. Prvotnega pomena je vsekakor varno delovno okolje, zato se izplako zamenja z zrakom, ki je pod nadtlakom. Pritisk se nanaša na neprepustno plast suspenzije, ki se je naredila pred izčrpanjem izplake. Kljub temu je treba pričakovati, da bo zrak postopoma uhajal skozi pore v zemljini in v najslabšem možnem primeru ne bo več zmožen zagotavljati podpore, kar lahko rezultira v poružitvi čela.

Največje prednosti omenjene naprave so v zelo natančnem uravnavanju pritiska na zemljino in vodo, preprečuje dotoke vode v predor, zagotovljeno je varno in čisto delovno okolje ter zelo natančno nadzorovanje deformacij površine.

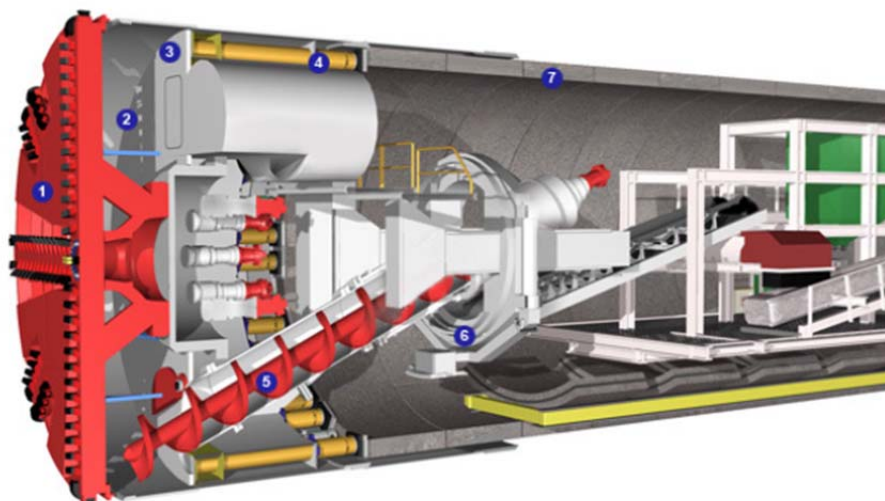
4.5.2 Podpiranje čela z izkopanim materialom (EPB sistem)

V mehkih zemljinah, kjer sta prisotna melj in glina, torej v kohezivnih materialih z nizko prepustnostjo, običajno uporabljamo naprave, kjer čelo podpiramo z izkopanim materialom, s katerim tudi zagotavljamo potreben pritisk na čelo. Zahtevana je tudi zadostna prisotnost drobnih delcev. Ker izkopen material uporabljamo za podpiranje čela, mora le ta imeti naslednje lastnosti (Maidl et al., 2012):

- dobre plastične lastnosti,
- židka do lahko gnetna konsistenca,
- nizko lastno trenje in
- nizko prepustnost.

V naravi je težko najti zastopanost vseh lastnosti, zato se uporabljajo organsko razgradljivi dodatki, kot so voda ter bentonitne, glinene ali polimerne suspenzije. Pogosto so uporabljene tudi polimerne pene, ki delujejo kot mazivo med delci izkopanega materiala. Ti dodatki zmanjšujejo medsebojno lepljenje delcev ter lepljenje materiala na rezalno glavo ali na stene izkopne komore in povečujejo razpon uporabnosti naprave, tudi na zemljine s prisotnostjo peskov in prodov ter prisotnostjo vode.

Naprava podobno kot predhodo predstavljena, uporablja za izkop rezalno glavo, ki je opremljena z diskastimi noži in ostalimi orodji za mehko zemljino. Diskasti noži ravno tako služijo za prodiranje skozi trdnejše plasti oziroma osamelce ter za drobljenje trdnejših zrn do velikosti, ki je primerna za odstranjevanje z vijakom. Običajno je tudi ta naprava zaprtega tipa, saj je izkopna komora ločena s pregrado. Pregrada je nujna za uravnavanje pritiska na čelu (zaprt sistem), hkrati pa nudi delavcem varno in čisto delovno okolje.



Slika 4-39: Prikaz EPB naprave, ki za podpiranje čela uporablja zemljino (podrobnejši opis naprave se nahaja v odstavku pod sliko) (www.herrenknecht.com).

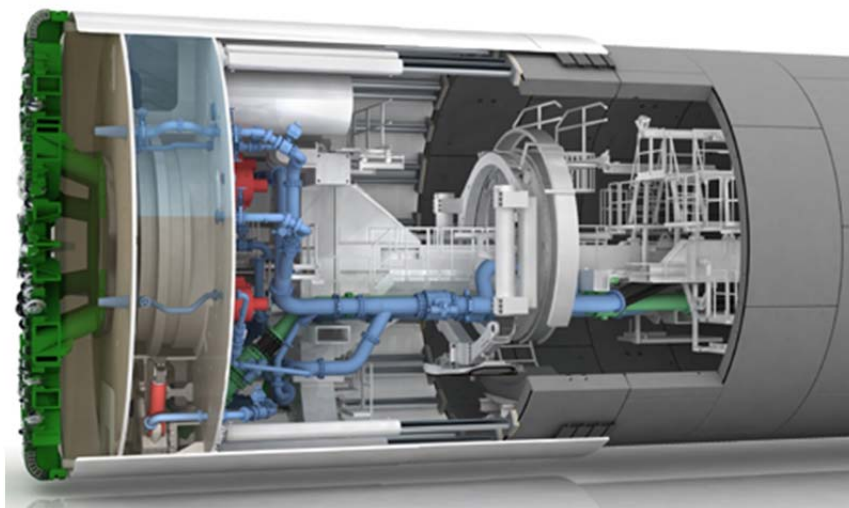
Figure 4-39: Scheme of EPB shield machine (detailed description of figure is in paragraph below) (www.herrenknecht.com).

Izkopanemu materialu se v izkopni komori (2) primeša aditive za izboljševanje lastnosti materiala (za učinkovito podpiranje potrebujemo plastično-viskozno stanje). Mešanje se izvede s pomočjo mešalnih rok, ki so nameščene na zadnji strani rezalne glave. Omenjena lastnost materiala je izrednega pomena za podpiranje čela, ki hkrati omogoča nizek navor rezalne glave in nizko hitrost vijaka, kar povečuje tudi ekonomično uporabo naprave. Iznos materiala se izvaja z vijakom (5), ki je lahko pritrjen na ojnico oziroma je trakast. Uporaba prvega tipa je bolj učinkovito iznašanje materiala in je primerna tam, kjer pričakujemo večje pritiske zemljine. Drugi tip vijaka je primeren za iznos večjih delcev in v primerih nižjih pritiskov. Velikost delcev, ki jih lahko izkopavamo in iznašamo, je določena glede na uporabo vijaka (groba ocena je približno tretjina premera vijaka z ojnico).

Uravnavanje pritiska je v primerjavi s predhodno opisano napravo bistveno bolj grobo in ima slabši odzivni čas. Kakorkoli, pritisk lahko uravnavamo na dva načina. Prvi je s povečevanjem potisne sile preko hidravličnih cilindrov (4) celotne naprave na čelo, kar preprečuje vsipanje zemljine v izkopno komoro, drugi način, pa je reguliranje pritiska s hitrostjo iznosnega vijaka, ki vpliva na količino iznosa materiala. V primeru obrabe nožev ali izkopnih trnjev, se uporablja prvi način, ki stabilizira čelo v kombinaciji z zračnim nadtlakom v izkopni komori. Pred tem je potrebno izkopani material v celoti odstraniti.

4.5.3 Alternativne rešitve

Kot smo že omenili, obstaja tudi kombinirani sistem naprave, ki ga je razvilo podjetje Herrenknecht in ga je poimenovalo Mixshield ali mešani ščit. V osnovi je to naprava, ki deluje z uporabo izplake in jo je možno spremeniti v sistem podpiranja z zemljino (EPB) ali z zračnim nadtlakom. Naprava je zato primerna za heterogene geološke pogoje v hribini.



Slika 4-40: Prikaz kombinirane ali Mixshield naprave, ki za podpiranje čela uporablja izplako, zemljino ali zračni nadtlak (www.herrenknecht.com).

Figure 4-40: Scheme for combined or Mixshield machine (www.herrenknecht.com).

Pritisk na čelo se natančno uravnava z zračno blazino v delovni komori, kar pomeni obvladovanje visokih pritiskov na izkopnem čelu (tudi do 15 barov), kar je po podatkih proizvajalca možno tudi pri večjih premerih predora. Podobno kot pri napravi na izplako, je izkopna komora zapolnjena z izplako in ločena s pregrado. Za pregrado je delovna komora, katera je do osi napolnjena z izplako, zgornji del pa nadzorujemo z zračnim tlakom. Ker je naprava namenjena za heterogene pogoje, kjer lahko pričakujemo tudi večje trdnejše dele (osamelce), je potrebno nad talnim obokom ter pred sitom namestiti drobilce.

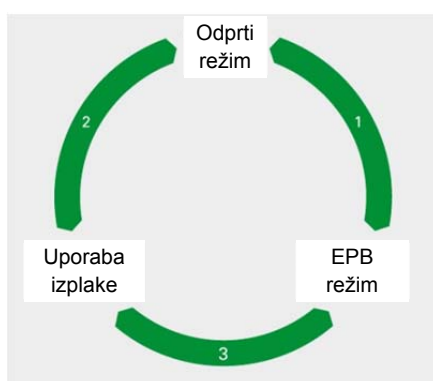
Za preprečevanje mašenja in lepljenja so vgrajeni trije ločeni sistemi in sicer:

- rezalna glava ima večje odprtine v centralnem delu, s tem omogoča zastajanje materiala na sredini glave,
- povečan je dotok izplake na mestih, kjer lahko pričakujemo zastajanje izkopanega materiala in
- vgradnja ločenih krogotokov izplake z dodatno vgrajenimi šobami za vbrizgavanje na vrhu izkopne komore in v bližini rezalne glave.

Smiselno je omeniti, da je področje mehanizirane gradnje predorov zelo hitro razvijajoče, zato se praktično na vsakem projektu v naprave vgradi kakšna novost, ki pripomore k optimizirani gradnji predora. S tem namenom je podjetje Herrenknecht razvilo tudi večnamensko napravo imenovano Multimode, ki je namenjena za uporabo v izredno heterogenih pogojih (od kamnine do zelo slabo nosilnih zemljin). Sestavljajo jo vsi trije koncepti: delovanje naprave brez podpiranja čela, s podpiranjem z izkopano zemljino ter podpiranje z izplako. Vsaka ima svoje prednosti v ozkem področju delovanja. Spremembo načina delovanja je možno doseči na dva načina:

- s postankom v za to namenjenem jašku ali kaverni, kjer se nepotrebni deli odmontirajo in namestijo novi (za drugačen način delovanja) ali
- z vgraditvijo vseh potrebnih komponent in nato spreminjanje načina delovanja znotraj predora. Te naprave so z vidika konstrukcije, mnogo bolj zahtevne in običajno tudi dražje, vendar v eni napravi združujejo dva načina metode izkopa.

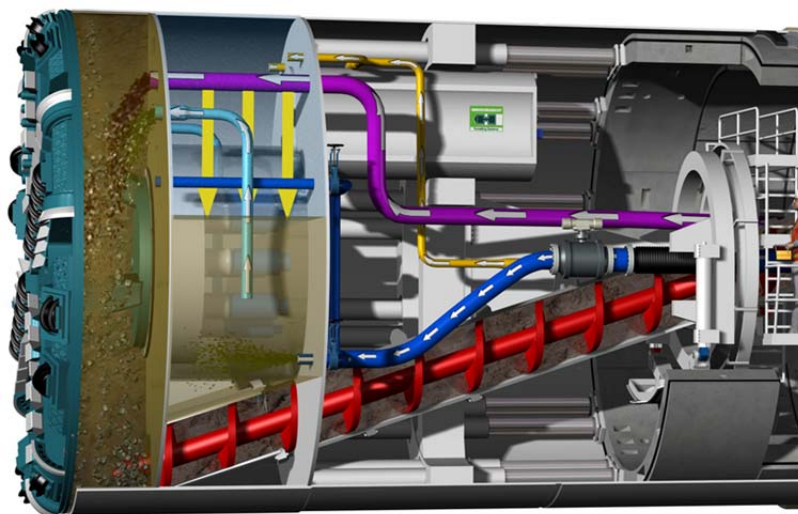
Kombinacija naprave brez podpiranja čela in EPB naprave je opremljena z iznosnim vijakom in transportnim trakom za iznos materiala. Uporablja se kot zaprt EPB sistem oziroma kot odprt sistem. Pri odprtem sistemu je izkopna komora zapolnjena le delno. Kombinacija z odprtim čelom in podpiranje z izplako je dokaj raznolika, vendar je bila že uspešno uporabljena. V tem primeru je izziv v ustreznem načinu odstranjevanja materiala in hkrati tesnjenja izkopne komore. Pri odprtem čelu uporabljamo centralno nameščen transportni trak, pri izplaki pa potrebujemo celoten črpalni sistem. Tretja možnost je kombinacija naprave EPB in naprave z izplako. Oba imata podoben osnovni (zaprt) sistem delovanja in zagotavljata aktivno podporo izkopnemu čelu. Premeri, večji od 9 m imajo lahko vgrajena tudi oba sistema za iznos materiala, kar pa ni mogoče pri manjših premerih, ki zahtevajo zamenjavo opreme. Večji mehanični (tehnični) poseg je le vgradnja čeljustnega drobilca, ki je potreben pri delovnem režimu z izplako.



Slika 4-41: Običajne kombinacije Multimode naprave (www.herrenknecht.com).

Figure 4-41: Usual combinations for Multimode machine (www.herrenknecht.com).

Najbolj kompleksna kombinacija je torej naprava z izplako in EPB načinom izkopa. Vendarle je s tem načinom omogočeno obvladovanje nepredvidenih geoloških in hidrogeoloških pogojev. Izkopan material se iznaša s pomočjo vijaka pri obeh načinih delovanja. Na koncu vijaka je nameščen rezervoar, ki omogoča zatesnitev vijaka in zagotavljanje pritiska na čelu z izplako. Uporablja se suspenzija z visoko gostoto ali bentonitna suspenzija. To omogoča obratovanje z različnimi gostotami suspenzije v raznolikih slabo nosilnih zemljinah.



Slika 4-42: Multimode naprava z EPB sistemom in izplako (www.herrenknecht.com).

Figure 4-42: Multimode machine with EPB and slurry system (www.herrenknecht.com).

Projektanti in izdelovalci TBM naprav vsekakor stremijo k izpopolnjevanju in nadgrajevanju naprav z namenom vse večje fleksibilnosti naprav, ob tem pa se pojavljajo nove tehnične in finančne omejitve.

Poleg Herrenknechta, je tudi podjetje Robbins razvilo svojo različico TBM naprave s kombiniranim sistemom in ga poimenovalo Crossover XSM. Različica XRE je v osnovi EPB naprava in je primerna za uporabo v mešanih zemljinah in kamninah. Različica XSE, pa je v osnovi naprava z izplako in je primerna za uporabo v mešanih oz. mehkih zemljinah ter pod nivojem podtalnice.

4.5.4 Primerjava EPB naprave in naprave z izplako

V tem poglavju podajamo primerjavo obeh tipov TBM naprav glede na področje.

Preglednica 4-1: Primerjava EPB naprave in naprave z izplako po posameznih področjih (prirejeno po Kumpfmüller, 2008).

Table 4-1: Comparison of EPB and slurry shield machine based on specific areas (adapted from Kumpfmüller, 2008).

Področje	Naprava EPB	Naprava z izplako
Geološke razmere/pogoji	<ul style="list-style-type: none"> - Zemljine s kohezijo - Visoka prisotnost gline in melja - Glina z meljem do melj s peščenimi primesmi 	<ul style="list-style-type: none"> - Zemljine z nizko kohezijo ali brez kohezije - Malo oz. nič meljev ali gline - Drobnozrnati pesek do grobnozrnati prod
Podpiranje čela	<ul style="list-style-type: none"> - Zagotavljanje podpore z izkopanim materialom v izkopni komori - Zaprti sistem omogoča natančno uravnavanje pritiska na čelo s popolnoma zapolnjeno izkopno komoro - Odprti sistem je primeren le v stabilnih pogojih in omogoča zelo visoke napredke - Uravnavanje pritiska s pomočjo vijaka pri čemer mora imeti zemljina plastično konsistenco in nizko prepustnost (povečana je nevarnost zagotavljanja pritiska v primeru prisotnosti bolj prepustnih plasti) - Možnost izboljševanja uravnavanja pritiska z uporabo kemičnih dodatkov - Klasična izvedba EPB naprave do maksimalno 4 barov, v primeru večjih pritiskov je potreben zaprt sistem vijaka (poveča se tudi nevarnost neuravnavanja pritiska na čelu) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zagotavljanje pritiska na čelu z uravnavanjem pretoka izplake in zračne blazine za izkopno komoro - Zelo natančno uravnavanje pritiska na čelo zaradi sistema z dvojno komoro - Hitro kompenziranje nepričakovanih sprememb na čelu, kar ugodno vpliva na stanje površine nad predorom - Stabilnost čela je odvisna od kvalitete izplake in možnosti tvorjenja neprepustne plasti na stiku z zemljino - Pritisk na čelu je odvisen od prilagodljivosti izplake na prepustnost zemljine (prisotnost podzemne vode) - Povečana nevarnost uhajanja izplake in nenadnega zmanjšanja pritiska pod rekami z nizkim nadkritjem

se nadaljuje ...

nadaljevanje preglednice 4-1

<p>Poraba energije</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Povečana poraba energije zaradi z materialom napolnjene izkopne komore in trenja med zemljino in stenami naprave - Poraba energije se lahko zmanjša z dodatki, ki zmanjšujejo trenje 	<ul style="list-style-type: none"> - Manjša poraba energije zaradi dokaj majhnega upora med materialom in izkopno komoro (izplaka deluje kot mazivo) - Dodatno se energija porablja za transport izplake in materiala ter za potrebe ločevanja/filtriranja
<p>Iznos materiala</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Material se odstranjuje z vijakom in transportnim trakom (možno je uvesti dodatne ukrepe v primeru pritiskov večjih od 4 bare) - V primeru izkopa onesnažene zemljine je izpostavljena delovna sila v predoru (odprt transport materiala) - Dokaj visoka možnost mašenja zemljine zaradi kohezivno plastičnih lastnosti zemljine (manjše možnosti mašenja se pričakujejo v meljih in peskih) 	<ul style="list-style-type: none"> - Odstranjevanje materiala poteka čisto s pomočjo črpalnega sistema, kar pomeni tudi varnejše delovno okolje - Klasifikacija materiala poteka šele na separacijski napravi (otežen postopek filtriranja za drobno zrnate zemljine) - Možnost mašenja sistema je odvisna od priprave zemljine z izplako
<p>Obdelava izkopanega materiala</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Obdelava ni nujno potrebna, material se lahko transportira ali ponovno uporablja neposredno - V primeru uporabe dodatkov in njihovih lastnosti (kemični) je potrebno za obdelavo več časa in sredstev 	<ul style="list-style-type: none"> - Separacijski oz. filtracijski postopki so nujno potrebni (kvaliteta izkopa za odlaganje je odvisna od kvalitete omenjenih postopkov in višine vloženih sredstev) - Suspenzija se lahko uporablja za izboljševanje tal v zelo prepustnih zemljinah (suspenzija z visoko gostoto) - V slanih tleh je potrebno uporabljati posebne vrste izplake, ki so odporne na soli, da se izognemo kosmičenju
<p>Čelo je delno v slabi kamnini</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Za izkop se uporabljajo diskasti noži, ki so nameščeni na rezalni glavi - Odprtine v rezalni glavi določajo velikost delcev kamnine, ki so nato odstranjeni z vijakom - V takih primerih je potrebno več pozornosti nameniti vodenju naprave (s tem se izognemo pretirani obrabi izkopnih orodij) - Kompleksni pogoji na čelu se praviloma obvladujejo z zaprtim sistemom in primernim izboljševanjem lastnosti izkopnega materiala 	<ul style="list-style-type: none"> - Kamniti deli se zdrobijo bodisi z diskastimi noži na rezalni glavi oziroma drobilniki nameščenimi v talnem oboku - Sito pred črpalko pogojuje velikost delcev, ki se lahko izčrpavajo (črpalni krog mora biti ustrezno dimenzioniran za največja dovoljena zrna) - Vodenje naprave mora biti previdno v izogib povečani obrabi izkopnih orodij - Povečana je možnost izgube izplake v močno razpokani kamnini

se nadaljuje ...

nadaljevanje preglednice 4-1

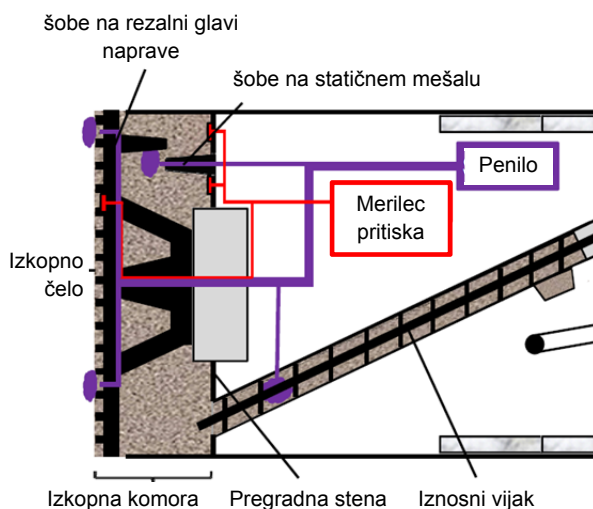
Obraba	<ul style="list-style-type: none"> - Obraba izkopnih orodij zaradi obračanja rezalne glave je običajno manjša kot obraba transportnih elementov - Bistveno povečana obraba izkopnih orodij v primeru mešanih plasti na čelu - Menjava obrabljenih diskov ali zob običajno zahteva večje in dolgotrajne postopke 	<ul style="list-style-type: none"> - Obraba izkopnih orodij zaradi obračanja rezalne glave je običajno manjša kot obraba transportnih elementov - Obraba je odvisna v veliki meri od gostote izplake, separacijske enote in črpalnega sistema - Menjava obrabljenih diskov in zob je hitrejša zaradi krajšega čiščenja
Dostop v izkopno komoro	<ul style="list-style-type: none"> - Praznjenje izkopne komore je počasnejše zaradi bolj gostega in težkega materiala (z dodajanjem bentonita se izboljšajo lastnosti materiala) - Potrebna je dodatna mehanska zaščita pri rezalni glavi, ki omogoča varno delovno okolje - Potrebno je več izkušenj za ponovni zagon naprave, saj je izkopna komora prazna in ne zagotavlja podpore čelu - Vzdrževalna dela na dnu izkopne ali delovne komore so možna le v primeru popolne odstranitve izkopenega materiala 	<ul style="list-style-type: none"> - Zniževanje nivoja izplake poteka dokaj hitro in učinkovito - Ni potrebno zagotavljati dodatnih mehanskih podpornih ukrepov v primeru dostopa delavcev v izkopno komoro, saj je rezalna glava običajno zelo zaprta - Vzdrževalna dela na dnu komor zahtevajo popolno izpraznjenje materiala in izplake
Menjava orodja in redni pregledi	<ul style="list-style-type: none"> - Naj bodo izvedeni v zemljinah z boljšimi lastnostmi tal - Obe napravi sta projektirani tako, da je menjava možna ob uporabi zračnega tlaka za podpiranje čela - Izkopna orodja so praviloma dostopna z zadnje strani rezalne glave - Intervali pregledov naj bodo definirani glede na geološke razmere in način delovanja 	
Dodatni ukrepi v posebnih primerih	<ul style="list-style-type: none"> - Obe napravi sta projektirani tako, da je možna izvedba cevnega ščita, dodatnih raziskovalnih vrtin. Ukrepi se lahko izvedejo direktno iz naprave skozi ščit ali v posebnih primerih skozi odprtine v rezalni glavi 	

4.5.5 Dodatki za izboljševanje lastnosti hribine

V zadnjem času se področje uporabe naprav z izplako in EPB naprave zelo prekriva, vendar se na podlagi geoloških napovedi izbere tista TBM naprava, katera lahko s svojimi karakteristikami pokrije čim širše področje predvidenih variacij sestave tal. Kot ponavadi pa pri gradnji predora ne moremo pričakovati, da bo geološka sestava tal vzdolž cele trase predora enaka, zato poskušamo spremeniti lastnosti izkopenega materiala in tako, da zagotavljamo stabilnost čela in ustrezne lastnosti za rokovanje izkopenega materiala. To zagotavljamo z uporabo dodatkov, katere izberemo glede na geološko geotehnične lastnosti hribine. Dodatki so lahko v tekoči ali trdni obliki. Poznamo razne suspenzije, penila, prah ali uporabo samo vode. Sestava ter lastnosti in koncentracija dodatkov, se določa na podlagi laboratorijskih preiskav in na podlagi izkušenj. Dodajanje dodatkov poteka med samim izkopom, kjer koncentracijo in sestavo prilagajamo glede na dejanske geotehniške lastnosti hribine in obnašanje materiala.

Pred uporabo dodatkov je potrebno odgovoriti na nekatera ključna vprašanja (EFNARC, 2005):

- Katere komponente dodati in v kakšnih razmerjih?
- Kakšen bo učinek dodatkov pri lastnostih zemljine, pronicanju v zemljino in generalna kakovost izvedbe?
- Kako lahko pričakovane učinke predhodno preskušamo in ocenimo njihovo uspešnost?
- Kako dodatki vplivajo na okolje?



Slika 4-43: Shema TBM naprave in sistema za uporabo dodatkov (prirejeno po Budach, 2011).

Figure 4-43: Scheme of TBM machine with system for soil conditioning (adapted from Budach, 2011).

Pričakovani učinki uporabe dodatkov (po EFNARC, 2005) so pri:

- Penilu: vzdrževanje pritiska, povečuje pretočnost zemljine, homogeniziranje zemeljske mešanice, zmanjševanje prepustnosti, zniževanje potrebnega navora, razpršitev gline, zmanjšanje obrabe orodij.
- Polimernih dodatkih: mehčanje zelo trdne gline, dvig kohezije nevezanim zemljinam, stabiliziranje pen ali zemljine, zadrževanje vode, reguliranje viskoznosti.
- Dodatkih za zmanjševanje obrabe: dodani v primeru zelo abrazivnih zemljin ali kamnin, zmanjševanje obrabe rezalne glave, izkopskih orodij in iznosnega vijaka.
- Bentonitih in drugih finih delcih: dodajanje finih delcev grobim materialom, zagotavljanje podpore čelu skupaj s polimernimi dodatki ali penami, za opravljanje vzdrževalnih del in popravil.

Glavni parametri, s katerimi izražamo vsebnost dodatkov, so:

- c_F (%) koncentracija dodatka v vodi,
- FER (%) koeficient povečanja prostornine (Foam expansion ratio),
- FIR (%) koeficient porabe penila (Foam injection ratio) izražen glede na hitrost napredovanja in površine izkopskega čela in
- Q_F (l/s) pretok penila skozi šobe (spremenljiv glede na hitrost napredovanja naprave).

Smernice EFNARC (2005) podajajo priporočila za uporabo penil in polimernih suspenzij. Izbira je odvisna od vrste zemljine in potrebe po doseganju specifičnega učinka. Natančneje so prikazani v spodnji preglednici.

Preglednica 4-2: Priporočeni tipi penil in njihova količina (FIR) glede na vrsto zemljine (prirejeno po EFNARC, 2005).

Table 4-2: Recommended types of foams and FIR ratio according to soil type (adapted from EFNARC, 2005).

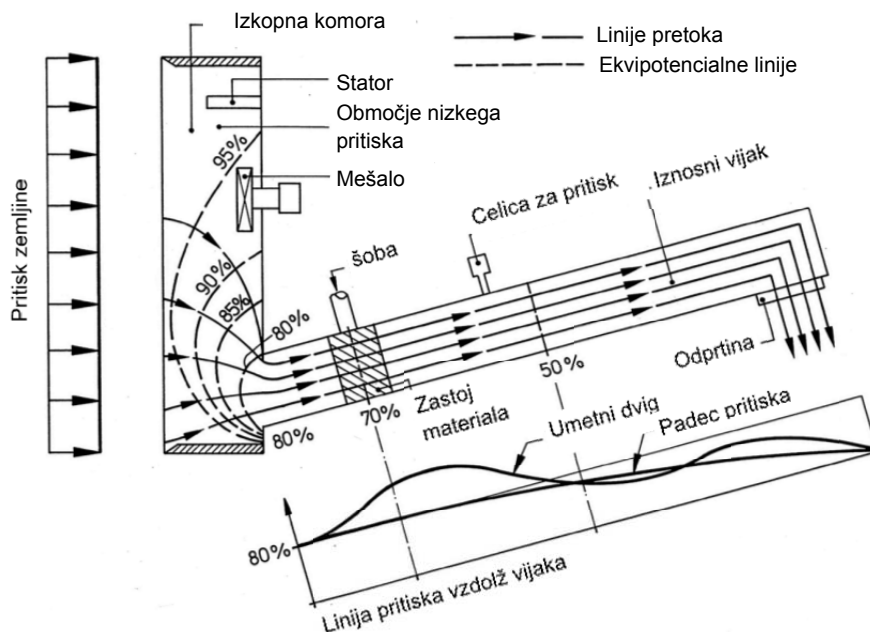
Vrsta zemljine	Tip penila			FIR (foam injection ratio)	Souporaba polimernih suspenzij
	A	B	C		
gline	↑			30 - 80	proti lepljenju in mašenju
peščene gline do melji	↓	↑		40 - 60	proti lepljenju in mašenju
zaglinjen melj do pesek		↑↓		20 - 40	izboljševanje konsistence in obdelovalnosti
pesek		↓	↑	30 - 40	izboljševanje kohezije in konsistence
zaglinjen prod			↑↓	25 - 50	izboljševanje kohezije in konsistence
peščen prod			↓	30 - 60	izboljševanje kohezije in konsistence
penilo tip A	visoka kapaciteta razprševanja (razgrajevanje glinenih vezi) in/ali dobre lastnosti premazovanja (ovijanja) delcev (zmanjševanje potenciala nabrekanja)				
penilo tip B	vsestranska uporaba in ugoden učinek na izboljševanje stabilnosti				
penilo tip C	visok vpliv na izboljševanje stabilnosti in preprečevanje usedanja z namenom razvoja in vzdrževanja homogene mase in zagotavljanja kohezije ter zmanjšanje vodoprepustnosti				

Učinkovanje dodatkov lahko razdelimo tudi po posameznih delih oz. elementih TBM naprave (Psomas, 2011). Dodatki lahko izboljšujejo lastnosti materiala na naslednjih mestih:

- čelo izkopa – zmanjševanje trenja med čelom in izkopnim orodjem (daljša življenjska doba orodij, manjši stroški in manjši potrebni navor), tesnjenje čela (pri izplaki) oz. zmanjševanje prepustnosti (EPB), kar omogoča varno izvedbo izkopa,
- izkopna komora – izkopani material v izkopni komori mora pridobiti homogene lastnosti, kar zagotavlja enakomernjšo razporeditev pritiska na čelo in preprečuje mašenje. Ravno tako zmanjšuje porabo moči za vrtenje rezalne glave in
- ravnanje z izkopanim materialom – dodatki močno vplivajo na lastnosti izkopanega materiala. Pri tehnologiji z izplako težimo k pravim lastnostim za črpanje, kar pa negativno vpliva na reciklažo izplake in povečane okoljske vplive. Pri EPB napravi je iznos materiala povezan z vzdrževanjem pritiska na čelo in hitrostjo napredovanja. Vzdrževanje prave »mešanice« v izkopni komori je zelo zahtevno, še posebej če je potrebno uporabljati več različnih dodatkov.

V hribini brez kohezije oz. z nizko kohezijo običajno uporabljamo penila z dodatkom polimerov ali bentonitne suspenzije, ki povečajo kohezijo in omogočijo homogeno strukturo materiala v izkopni komori brez lepljenja ter učinkovit odvod materiala (Maidl et al., 2012). Uporaba bentonitne suspenzije je možna v grobozrnatih materialih, ki imajo prepustnost za vodo manjšo od 1×10^{-3} m/s (Fritz et al., 2002). V primeru, da je prepustnost večja, se lahko delovno območje razširi z modificiranjem bentonitne izplake oz. z dodajanjem finih delcev in polimernih dodatkov za zmanjšanje prepustnosti in izboljšanje reoloških lastnosti materiala. Modificirana bentonitna suspenzija ima spremenjene fizikalne in geometrijske lastnosti. Zrna, ki jih dodajamo so lahko velikosti od 1 do 2 mm. Fina zrna lahko zagotovimo tudi z uporabo vermikulita (ekspandiran silikatni mineral) (Fritz et al., 2002).

V bolj fino zrnati hribini s kohezijo, se običajno uporabljajo polimeri, bentonit, glinena suspenzija ali voda. Material ne sme biti pretekoč, saj za iznos materiala uporabljamo transportne trakove. Spodnja slika (4-44) shematsko prikazuje kako zagotavljamo enakomeren pritisk na izkopno čelo. Maidl (1995) ugotavlja tudi, da je pri izbiri dodatkov pomemben naboj zemljine, ker je od tega močno odvisno delovanje polimerov in penil. Vrsti zemljine in njeni kemijski sestavi se nato določi primerno kemijsko sestavo dodatkov.



Slika 4-44: Shema nivojev pritiska v izkopni komori in iznosnem vijaku (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 4-44: Scheme of pressure lines in excavation chamber and screw conveyor (adapted from Maidl et al., 2012).

Izbira primernih dodatkov je predlagana tudi v smernicah združenja EFNARC (2005) in sicer glede na lastnosti, ki jih morajo dodatki zagotoviti, vendar je kljub temu, da je v uporabi vedno več TBM naprav, ponavadi izbira prepuščena izkušnjam izvajalca. To lahko pripišemo nestandardiziranim metodam, s pomočjo katerih lahko določimo lastnosti in preverimo učinkovitost dodatkov. Najpogosteje uporabljene metode izhajajo iz geotehničnih postopkov ali metod za betone. To so: pronicanje medija v zemljino, statični konusni penetrometer, določanje prepustnosti, določanje stisljivosti, oprijem, strižni preizkus, metoda s posedom, metoda z razlezom, določanje segregacije in druge. V raziskovalne namene so bili izdelani tudi modeli TBM naprav v merilu 1:10 s pomočjo katerih so optimizirali iznos materiala (Vinai et al., 2008).

Preizkušanje ločimo na dva dela in sicer je prvi namenjen določanju lastnosti dodatkov in drugi določanju lastnosti modificirane zemljine. Smernice EFNARC (2005) prikazujejo načine preizkušanja dodatkov (predvsem penilo) s katerimi določimo gostoto penila, stabilnost ali obstojnost penila, stabilnost mešanice penila in standardiziranega peska oz. zemljine z mesta projekta ter oceno učinka plastificiranja zemljine s penilom. Nadalje, kot že omenjeno se v drugi fazi izvede preizkuse zemljine s dodatki, čeprav tako ni mogoče realno opisati pravih razmer v izkopni komori. Standardizirani preizkusi zemljine izhajajo iz geotehnike ali preizkušanja betonskih mešanic in omogočijo boljšo predstavbo kako bo dodatek vplival na

lastnosti zemljine na čelu in izkopni komori. Priporoča se izvedbo preiskav za različne sestave zemljine na trasi predora s čimer določimo okvirni razpon osnovnih parametrov in vrste dodatkov.

Za uporabo penila, je Quebaud s soavtorji (1998) predlagal izvedbo enostavnih nestandardiziranih preizkusnih metod za določitev lastnosti dodatka:

- določitev potrebnega pritiska zraka (pretoka) in količine dodatka v tekočem stanju, pri katerem dobimo ustrezno penilo,
- določitev velikosti mehurčkov,
- merjenje časa, ko penilo izgubi (zdrenira) polovico svoje prostornine. Lahko se meri tudi čas, ko se zdrenira le četrtnina penila in
- stisljivost oz. obstojnost, s katero ugotovimo obnašanje penila ter mešanice penila in zemljine v zaprtem prostoru pod podobnim pritiskom, kot ga pričakujemo v izkopni komori.

Kljub temu pa Quebaud ugotavlja, da je bolj primerno penila preizkušati skupaj z zemljino, saj le tako lahko ugotovimo kako se bo dejansko penilo obnašalo. Optimalno razmerje med penilom v tekočem stanju in zrakom naj bi bilo 1:9. Sorazmerno majhen delež penila v tekoči obliki lahko pomeni, da bo po že nekaj dneh izkopan material imel praktično prvotne lastnosti, vendar pa je to odvisno od obstojnosti penila in njegove kemične sestave (Maidl et al., 2012).

Japonsko podjetje, ki proizvaja TBM naprave predlaga enačbo s katero lahko ocenimo potrebno količino penila (Q_p) za izboljšanje geomehanskih lastnosti zemljine (Maidl et al. 2012). Enačba sicer ne upošteva deleža por, vlažnosti, vodoprepustnosti, konsistence materiala in zahtevanega pritiska na čelu izkopa. Enačba (4-2) se glasi:

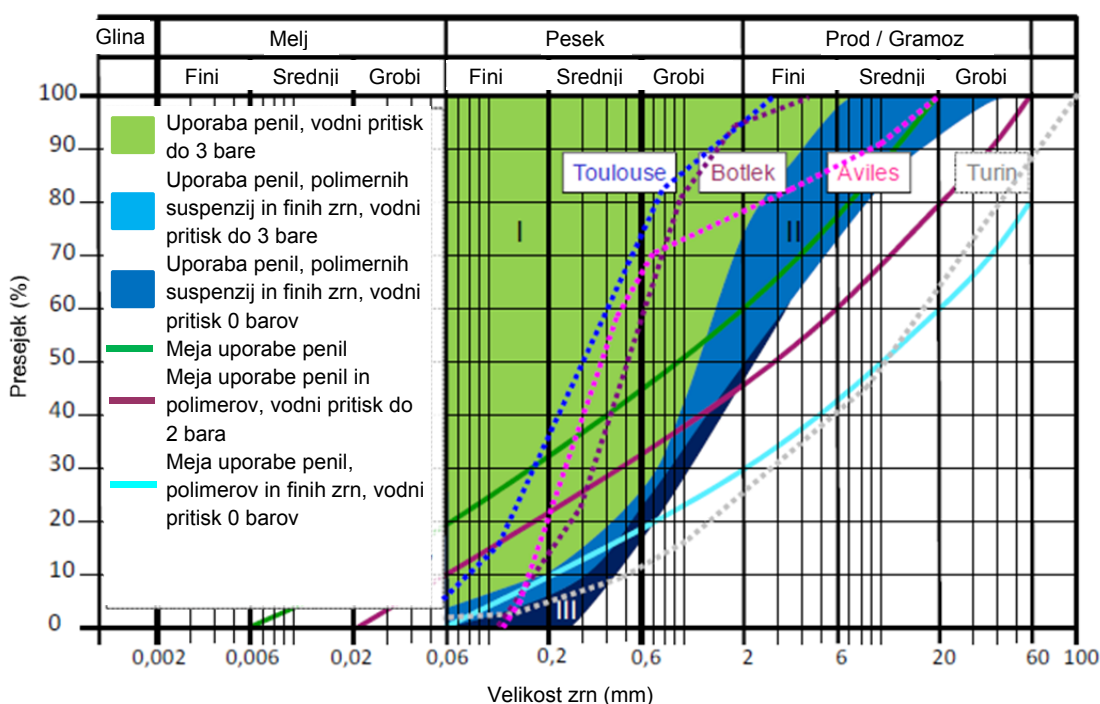
$$Q_p = \frac{\alpha}{2} [(60 - 4 \cdot X^{0,8}) + (80 - 3,3 \cdot Y^{0,8}) + (90 - 2,7 \cdot Z^{0,8})], \quad (4-2)$$

kjer so:

- X presejek skozi sito 0,075 mm,
- Y presejek skozi sito 0,420 mm,
- Z presejek skozi sito 2,0 mm in
- α korekcijski faktor, ki je odvisen od koeficienta enakomernosti (C_U).

Oblikovanje izkopske komore in pozicija vijaka sta pomembna pri zagotavljanju učinkovitega podpiranja čela. Ključno pa je zagotavljanje in ohranjanje ustrezne mešanice v izkopni komori, kar pomeni, da morajo biti vgrajena orodja, ki zemljino in dodatke pripravijo v zahtevano »mešanico«. Orodja, ki jih uporabljamo so naslednja:

- vrtljivi noži na zaledni strani rezalne glave,
- vrtljivi noži na pregradni steni ali
- mešalni sistem na pregradni steni.



Slika 4-45: Območja uporabe EPB naprave s priporočenimi dodatki in zrnavnostnimi krivuljami nekaterih izvedenih projektov (prirejeno po Budach, 2011).

Figure 4-45: Areas of EPB machine application with recommended conditioners and granulometric curves of few completed projects (adapted from Budach, 2011).

V svoji disertaciji se je Budach (2011) ukvarjal s problemom uporabe EPB naprave v grobozrnatih zemljinah. To je področje od srednje zrnatih peskov do srednje zrnatih prodov (od 0,2 mm do 30 mm). Spoznanja, ki so pomembna za praktično uporabo v tem območju, so ustrezna zastopanost finih delcev, višina podzemne vode, količnik enakomernosti C_u (d_{60}/d_{10}) in gostota zemljine. Določil je tri območja, v katerih je mogoče uporabljati EPB napravo, kot je to prikazano v spodnjem diagramu. V območju I se lahko uporabljajo penila, pritisk vode je lahko do 3 bare in minimalni delež finih zrn mora biti vsaj 5%. Območje II zahteva uporabo penil, polimerov in suspenzije s finimi delci. Pritisk vode je lahko do 3 bare. Območje III je območje, kjer se zaradi pomanjkanja delcev premera do 0,25 mm prepustnost močno poveča in je zato potrebno uporabiti penila, polimere in suspenzije s finimi delci, da se zagotovi stabilnost in ustrezne lastnosti materiala za odkop in transport. V tem območju so lahko le predori nad nivojem podzemne vode. Na diagramu so prikazane še tri linije, ki definirajo območja uporabe posameznih dodatkov. Zelena linija definira uporabo penil, vendar mora biti zastopanost finih delcev vsaj 20%. Vijolična linija definira uporabo penil in polimerov, vodni pritisk pa mora biti pod 2 bara. Modra linija pa definira ekstremno zahtevne pogoje, kjer je potrebna uporaba tako finih delcev, penil in polimerov. Predor mora biti nad nivojem podzemne vode.

Lastnosti modificirane zemljine morajo izpolnjevati naslednje robne pogoje: obdelovalnost materiala, stisljivost in prepustnost (Budach, 2011). Obdelovalnost materiala preverimo s testom poseda, kjer morajo rezultati biti znotraj razpona 10 in 20 cm. Stisljivost materiala v izkopni celici omogoča enakomerno razporejanje pritiskov v komori. Priporočena vrednost je vsaj 1,9%. Prepustnost je pomembna pri predorih pod nivojem podtalnice. Za EPB naprave naj bi znašala manj kot $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Bolj ohlapno definirani in nekoliko manj pomembni so še

trije pogoji in sicer: gostota (od 1 do 2 kg/l), strižne lastnosti modificirane zemljine morajo biti boljše kot pri osnovni zemljini in stabilnost.

Kljub temu, da so ustavitveni časi naprave pri uporabi dodatkov bistveno krajši, to ne predstavlja večje stabilnosti čela, ta se celo zmanjšuje zaradi visoke prepustnosti zemljine. Zaradi tega, se povečajo možnosti porušitve na čelu, vzdrževalna dela so omejena ali celo onemogočena (ena izmed možnosti je uporaba nadtlaka v izkopni komori) (Fritz et al., 2002).

4.5.6 Glavni parametri TBM naprav

V tem poglavju na kratko povzemamo glavne parametre, ki jih je potrebno obravnavati v fazi projektiranja. Omenjeni elementi ali njihove zahteve so bile razvite za posamezne projekte in premere naprav, kar pa ne pomeni, da jih je možno ali potrebno uporabljati pri vseh napravah. Med te elemente prištevamo, hitrost obračanja rezalne glave, navor, deljeno rezalno glavo, plošče za preprečitev obračanja naprave, mehanska zaščita odprtin v rezalni glavi in podobno.

Hitrost obračanja rezalne glave se pri izkopu v zemljini ali v kamnini razlikuje. Zaradi lažjega izkopa zemljine je rotacija počasnejša, saj vijak in transportni trakovi ne zmorejo dovolj hitro odstranjevati materiala. Razumljivo je tudi, da se zunanji del glave vrti hitreje, kot notranji, kar povzroča večjo obrabo orodij na zunanji strani rezalne glave. Povprečna hitrost je od 1 do 2 obrata na minuto, pri čemer je potrebno omejiti hitrost potisnih cilindrov (na cca 100 mm/minuto).

Dokaj pogosto se v osrednjem predelu rezalne glave lahko pojavlja mašenje, ki je sicer odvisna od tipa naprave in konfiguracije rezalne glave in orodij. Problem se rešuje s primerno razporeditvijo orodij, ki omogoča boljše izpodrivanje materiala proti robu glave oziroma delu z večjimi odprtinami v centralnem delu glave (Kumpfmüller, 2007).

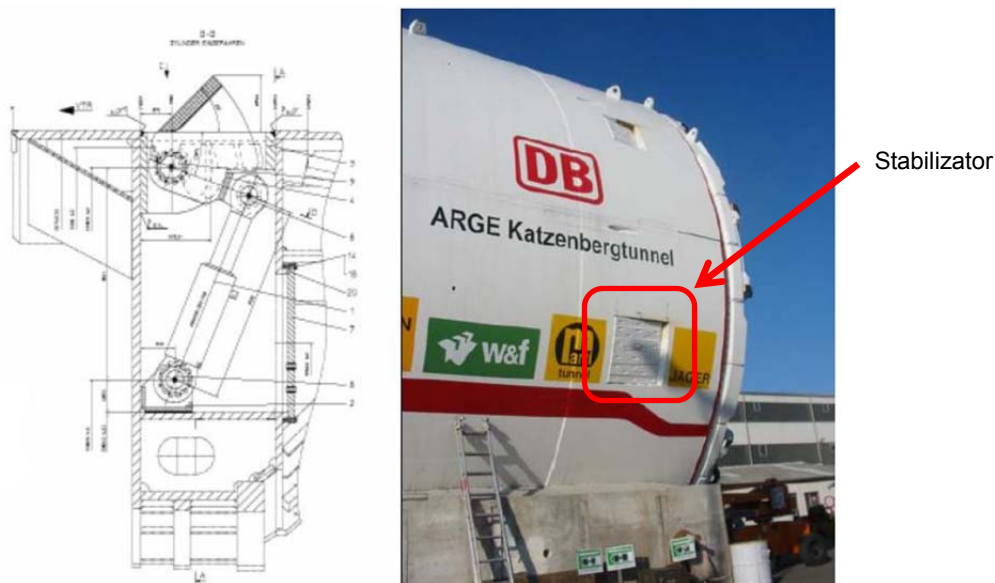
S premerom rezalne glave se povečuje tudi potreben navor, to pa pogojuje tudi moč motorja naprave. Na navor vplivajo naslednji dejavniki:

- trenje površine rezalne glave,
- prodor orodij v zemljino,
- pritisk potreben za podpiranje čela,
- trenje med ležaji in tesnili,
- geomehanski parametri zemljine in
- koeficienti trenja.

Naprave z izplako načeloma potrebujejo manjšo moč oz. navor, kot naprave z zemljino (EPB). Okvirno oceno potrebnega navora lahko naredimo z enostavnim izračunom, kjer upoštevamo premer rezalne glave (D_S) in sorazmernostni koeficient (f_a), odvisen od vrste naprave in pričakovanih lastnosti zemljine. Koeficient α za EPB varira med 15 in 25, za naprave z izplako pa med 10 in 20. Enačba za določitev potrebnega navora (M_T) se glasi:

$$M_T = f_a \cdot D_S^2. \quad (4-3)$$

Dimenzioniranje naprav pokaže, da zagotavljanje navora ni tako velik problem, kot je prenos potisne sile na betonsko segmentno oblogo in s tem povezano dimenzioniranje AB obloge.



Slika 4-46: Stranski stabilizatorji za uravnavanje osnega rotiranja naprave, horizontalni prerez (levo) in pozicija na TBM napravi (desno) (Kumpfmüller, 2008).

Figure 4-46: Side stabilizers for regulation of TBM axis rotation, horizontal section (left) and location of stabilizer on TBM machine (right) (Kumpfmüller, 2008).

TBM naprave z večjimi premeri se soočajo tudi s problemom vrtenja ščita okoli svoje osi. To lahko povzroči vrtenje rezalne glave, kjer se določen del navora prenese na ščit, ta pa povzroči njegovo rotacijo. Sam ščit namreč nima odpora na trenje. Pri manjših napravah se rotacijo ščita lahko uravnava s potisnimi cilindri, pri večjih napravah pa včasih to ni dovolj. Rešitev so stabilizatorji, ki so nameščeni na obeh straneh naprave. Sestavljeni so iz jeklenih plošč, katere odpiramo s pomočjo hidravlike, kot je to prikazano na sliki 4-46.

5 NAČRTOVANJE PREDORA IN RAČUNSKE KONTROLE

5.1 Splošno

Načrtovanje predorov je širok pojem, ki zajema določevanje poteka trase, izbira velikosti profila oz. prostorskih zahtev (predora, postajališč, reševalnih poti), izpolnjevanje varnostnih zahtev (prometna, požarna, ipd.), načrtovanje prezračevalnega sistema, izdelava kontrolnih izračunov, ki so vezani na tehnologijo gradnje in konstrukcijsko načrtovanje elementov predora (Kolymbas, 2005). V nadaljevanju se bomo posvetili le zadnjima dvema segmentoma načrtovanja.

Avstrijsko združenje za geomehaniko je vzporedno s standardom za kontinuirano gradnjo predorov (ÖNORM B 2203-2, 2. del) izdalo smernico za geotehnično projektiranje podzemnih gradenj s kontinuiranim sistemom (Atzl et al., 2013). Smernica ja zasnovana na predhodno izdani smernici za sekvenčno gradnjo predorov (Nova avstrijska metoda - NATM). Glavne razlike, ki jih je smiselno omeniti pri uporabi TBM metode, so (Tentschert et al., 2003):

- med gradnjo je prostora za prilagajanje in spreminjanje pristopa malo,
- izvedba dodatnega varovanja je izredno draga,
- napredek gradnje je omejen na izbiro TBM naprave in
- ugotavljanje stanja na čelu izkopa je omejeno in običajno znano šele po iznosu materiala in pojavijo se lahko posebne situacije, kot so nestabilno čelo, lepljenje in mašenje, idr.

Smernica v svoji vsebini obravnava geotehnične vidike gradnje predora in ne prinaša postopka za izbor ustrezne TBM naprave. V tem poglavju želimo opozoriti na postopek projektiranja, ki je verjetno uporaben tudi za področje Slovenije, glede na to, da pri sekvenčni metodi ravno tako upoštevamo avstrijske standarde in smernice.

Sestavljena je iz treh glavnih faz: načrtovanje predora, načrtovanje naprave in izvedba. Mi se bomo omejili le na prvo fazo, ki vključuje opredelitev lastnosti hribine, razvrstitev v hribinske kategorije, določitev pričakovanega obnašanja hribine, določitev tipa naprave, prognoza obnašanja sistema in določitev razredov/kategorij delovanja naprave. Prva faza obsega sedem korakov, kjer so koraki od 3 do 5 specifični zaradi uporabe TBM naprave. V koraku 5 so geotehnični ukrepi oz. ukrepi na napravi razdeljeni na različna območja naprave. Ukrepi so določeni glede na izbran tip naprave in definiran koncept vožnje. Območja naprave razdelimo na:

- I območje rezalne glave,
- II območje ščita,
- III območje vgradnje obloge predora,
- IV območje vgradnje injekcijske mase in končne oblike predora in
- V preostalo območje predora (od konca postrojenja naprave vzdolž celotnega zgrajenega predora)

Pri uporabi TBM naprave izdelamo tudi enostavnejše kontrolne izračune s katerimi preverjamo vplive na čelu naprave, vplive vzdolž plašča naprave, vplive tik za ščitom naprave in velikostni red posedkov vzdolž trase predora. Verifikacijski izračuni so pomembni v fazi izvajanja izkopa, saj z njimi dokazujemo ustrezno začasno podpiranje hribine. Kontrola posedkov je pomembna predvsem v urbanih območjih, saj tako dokazujemo vplive na

obstoječe objekte. Načrtovanje konstrukcijskih elementov predora se nanaša predvsem na projektiranje obloge iz betonskih elementov.

Gradnja predora, vpliva na porušitev napetostnega stanja v hribini. Ločimo primarno napetostno stanje in sekundarno napetostno stanje. Primarno napetostno stanje predstavlja odziv hribine takoj za čelom predora. Odvisno je od globine predora, višine nadkritja, geomehanskih parametrov hribine, tektonike in drugih preteklih obremenitev tal. Sekundarno napetostno stanje, pa izkazuje odziv hribine na gradnjo predora. Vplivov ni mogoče enostavno določiti, zato se v modelih upoštevajo konceptualni modeli in izkušnje (Maidl et al., 2012).

Pri določanju obtežbe za analitično modeliranje v osnovi ločimo predore v kamnini ali zemljini, nadalje jih delimo še na plitve in globoke. Plitvi predori so tisti, katerih nadkritje je manjše od dvakratnika premera predora ($h < 2d$), ostale razvrščamo med globoke.

Pri načrtovanju predorov je potrebno upoštevati veljavne zakone, pravilnike, standarde, smernice in druge dokumente. Seznam vseh je dolg, dokumenti pa se stalno osvežujejo in nadgrajujejo. V Sloveniji so za projektiranje v uporabi Evrokodi.

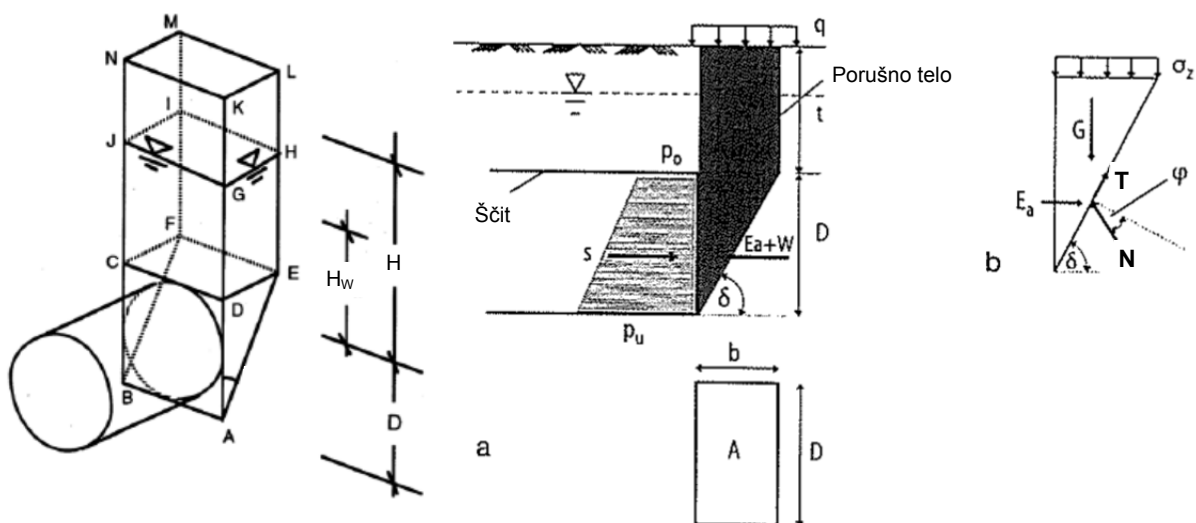
5.2 Pomembnejši verifikacijski izračuni

S pomočjo verifikacijskih računov lahko določimo osnovne parametre, ki se nanašajo na izbiro TBM naprave. Poleg enostavnih verifikacijskih izračunov običajno uporabljamo še 2D in 3D numerično modeliranje. Predstavili bomo naslednje kontrole:

- stabilnosti izkopnega čela,
- kontrola stabilnosti v navpični smeri,
- določitev potrebne potisne sile naprave in
- kontrola posedkov na površini.

5.2.1 Stabilnost čela pri podpiranju z izplako in zemljino

Pri zagotavljanju stabilnosti čela moramo zagotoviti ravnovesje med obtežbo zemljine in podzemne vode ter odporom, ki ga nudi material pri podpiranju čela. Za izračun je razvitih več dvodimenzionalnih ali tridimenzionalnih modelov. Že v letu 1961 je Horn razvil model porušitve, ki je sestavljen iz porušnega klina pred čelom predora in kvadra nad klinom, kot to prikazuje spodnja slika. V modelu je upoštevana Janssenova teorija, ki je bila razvita že leta 1895, in deluje po principu silosa (Maidl et al., 2012). V Hornovem modelu se material smatra kot homogen in izotropen. Porušnica je privzeta kot ravna ploskev. Ne glede na krožno obliko čela ima klin privzeto kvadratno obliko, pri tem se obtežba porušnega bloka ne reducira. Naklon porušnice se določi s pomočjo aktivnega zemeljskega pritiska (upoštevata se kriterij porušitve po Mohr-Coloumbu), tako da se poišče rezultanta največjega pritiska zemljine (E_a). V izračunu upoštevamo tudi obtežbo podtalne vode (W). Model upošteva predpostavko zaprte naprave, kar pomeni, da se v izračunu upošteva razlika v višini podzemne vode med hribino in čelom izkopa.



Slika 5-1: Porušitveni model po Horn-u (levo) in sile v porušnem klinu pred čelom predora (desno) (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 5-1: Sliding mechanism after Horn (left) and forces in sliding wedge in front of the tunnel face (right) (adapted from Maidl et al., 2012).

Sila, ki jo moramo zagotavljati na čelu (S) določimo tako, da upoštevamo najbolj neugodno porušnico klina (E_a) in obtežbo vode W .

V letu 1996 sta Anagnostou in Kovari model dopolnila, kjer sta upoštevala upor drsne ploskve klina (BAEF) in upor stranskih ploskev klina (ADE in BCF). Model upošteva drenirano stanje in je prilagojen za peske z deležem drobnozrnatih zemljin. Zaradi dreniranega stanja je potrebno opozoriti, da upoštevamo efektivne napetosti na čelo, saj podpiranje čela zagotavljamo le z izkopanim materialom. Model upošteva tudi razliko v hidrostatskih tlakih pred čelom (h_0) in v izkopni komori (h_f). Ugotovila sta, da če je tlak v komori manjši od tlaka v hribini, potem voda pronica skozi čelo in povečuje pritiske na čelo zaradi principa izenačevanja (Anagnostou in Kovari, 1996). Pri upoštevanju dreniranega stanja se mobilizira tudi strižna nosilnost zemljine, ki jo za katerokoli točko določimo z enačbo:

$$\tau = \frac{c}{F} + \frac{\sigma' \tan \varphi}{F}, \quad (5-1)$$

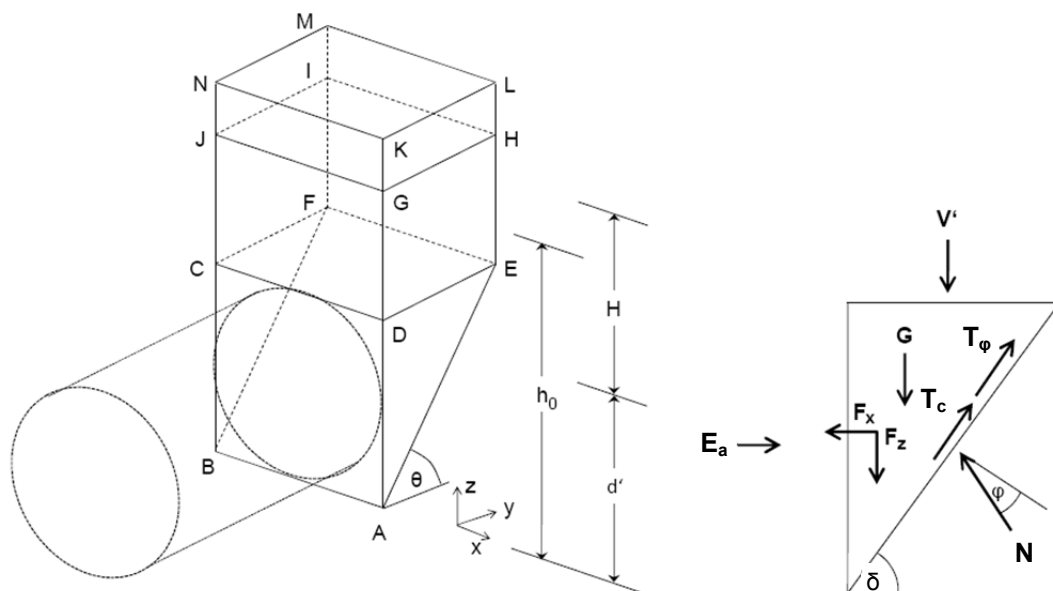
kjer so:

- c kohezija za drenirano stanje,
- φ strižni kot za drenirano stanje,
- σ' efektivna normalna napetost in
- F varnostni faktor (Eurocode 7 priporoča vrednost za obe strižni karakteristiki 1,25).

Slika 5-2 prikazuje dopolnjen porušni model klina in komponente sil, ki nastopajo v njem:

- G teža klina,
- V' vertikalna sila, ki izhaja iz efektivne napetosti σ'_v ,
- F_x, F_z sili, ki nastaneta zaradi pronicanja vode (strujni sili),

- E_a normalna sila, ki izhaja iz efektivnega podpornega pritiska S' in jo zagotavlja izkopana zemljina v izkopni komori oz. izplaka,
 N sila reakcije na raščeno stanje zemljine,
 T_φ sila upora stranskih ploskev klina in
 T_c sila upora drsne ploskve klina



Slika 5-2: Dopolnjen porušitveni model po Horn-u (levo) in sile v porušnem klinu pred čelom predora (desno) (prirejeno po Budach, 2011).

Figure 5-2: Improved sliding mechanism after Horn (left) and forces in sliding wedge in front of the tunnel face (right) (adapted from Budach, 2011).

Vertikalna sila V' je obtežba, ki izhaja iz efektivne normalne napetosti na stiku kvadra in klina. Določimo jo z enačbo:

$$V' = \sigma'_v \cdot d' \cdot \frac{d'}{\tan \delta}, \quad (5-2)$$

kjer so:

- d' višina porušnega klina oziroma premer predora,
 V' vertikalna sila, ki upošteva tudi pronicanje vode,
 σ'_v reducirana vertikalna napetost med kvadrom in klinom glede na velikostni razred pronicanja in
 δ naklon drsne ploskve klina.

Efektivno normalno napetost določimo glede na razliko v piezometrični višini pred čelom in v izkopni komori. Najprej določimo površino (A_B) in obseg (U) ploskve kvadra (CDEF).

$$A_B = d' \cdot \frac{d'}{\tan \delta} = d'^2 \cdot \cot \delta, \quad (5-3)$$

$$U = 2 \cdot \left(d' + \frac{d'}{\tan \delta} \right) = 2 \cdot d' \cdot (1 + \cot \delta). \quad (5-4)$$

Efektivno normalno napetost določimo po enačbi:

$$\sigma'_v = \frac{\gamma'_i - c_{i \cdot AB} \cdot \frac{U}{k_{i \cdot AB} \cdot \tan \varphi}}{\frac{U}{k_{i \cdot AB} \cdot \tan \varphi}} \cdot \left(1 - e^{-k_{i \cdot AB} \cdot \frac{U}{\tan \varphi} \cdot H}\right) + \gamma_W \cdot \alpha, \quad (5-5)$$

kjer so:

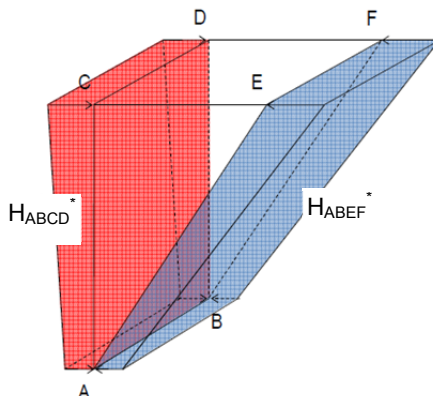
- α višina znižanja vode zaradi strujnih sil (m),
- k_i koeficient zemeljskega pritiska (priporočena vrednost po Janssen-u je 0,40 za klin),
- φ strižni kot zemljine,
- γ_W gostota vode in
- H višina med zgornjo ploskvijo klina in nivojem podzemne vode (GHIJ).

Določimo tudi horizontalno komponento F_x na klin zaradi razlike v piezometričnih višinah. To komponento določimo tako, da upoštevamo razliko med površinama na samem čelu predora (ABCD) in na površini drsnega klina (ABEF). Enačba se glasi:

$$F_x = \gamma_W \cdot (H_{ABEF}^* - H_{ABCD}^*) \cdot d' \cdot d', \quad (5-6)$$

kjer so:

- d' širina oziroma višina klina = premer predora,
- γ_W prostorninska teža vode,
- φ kot odklona drsne ploskve klina glede na horizontalo,
- H_{ABCD}^* povprečna piezometrična višina na mestu čela predora in
- H_{ABEF}^* povprečna piezometrična višina na mestu drsne ploskve.



Slika 5-3: Obremenitev klina v horizontalni smeri zaradi pronicanja vode (prirejeno po Budach, 2011).

Figure 5-3: Seepage loads on the wedge in a horizontal direction (adapted from Budach, 2011).

Vertikalno komponento F_z zaradi razlike v piezometrični višini določimo s pomočjo naslednje enačbe:

$$F_z = \gamma_W \cdot (H_{ABEF}^* - H_{CDEF}^*) \cdot d' \cdot \frac{d'}{\tan \delta}. \quad (5-7)$$

Težo klina G določimo s pomočjo preproste enačbe:

$$G = \gamma_G \cdot d' \cdot d' \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d'}{\tan \delta}, \quad (5-8)$$

kjer je :

γ_G prostorninska teža zemljine klina in

d' širina oziroma višina klina,

H_{ABCD}^* povprečna piezometrična višina na mestu čela tunela in

H_{ABEF}^* povprečna piezometrična višina na mestu drsne ploskve.

Določiti moramo še odpornost na stranskih ploskvah ter odpornost drsne ploskve porušnega klina. Enačbo razdelimo na del, ki odpade na strižni kot in na del, ki odpade na kohezijo. Kot prvo določimo upor zaradi strižnega kota T_φ . Enačba se glasi:

$$T_\varphi = k_i \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \gamma_G \cdot d' + \frac{2}{3} \cdot \sigma'_v \right) \cdot \frac{\tan \varphi}{F} \cdot d' \cdot \frac{d'}{\tan \delta}, \quad (5-9)$$

kjer so:

k_i koeficient zemeljskega pritiska (priporočena vrednost po Janssen-u je 0,40 za klin) in

φ strižni kot zemljine.

Odpornost drsne ploskve zaradi kohezije izračunamo ločeno za stranice (T_{CS}) in za porušno ploskev (T_{CP}):

$$T_{CS} = 0,5 \cdot d' \cdot \frac{d'}{\tan \delta} \cdot c_i \quad \text{in} \quad (5-10)$$

$$T_{CP} = d' \cdot \frac{d'}{\sin \delta} \cdot c_i, \quad (5-11)$$

kjer so:

c_i kohezija porušne ploskve,

T_{CS} upor zaradi kohezije na stranicah in

T_{CP} upor zaradi kohezije na drsni ploskvi klina.

Obtežbo vode določimo preprosto in sicer:

$$W = \gamma_W \cdot H_W^* \cdot d' \cdot d', \quad (5-12)$$

kjer je:

H_W^* srednja piezometrična višina na mestu čela izkopa.

Sila N je reakcijska sila, ki predstavlja komponento obtežbe porušnega mehanizma, ki jo prevzamejo tla, razliko pa mora prevzeti naprava izražena kot efektivna sila S' . Določimo jo kot:

$$N = \frac{1}{\cos(\delta - \varphi)} \cdot \left(V' + F_Z + G - \sin \delta \cdot (T_\varphi + 2 \cdot T_{CS} + T_{CP}) \right). \quad (5-13)$$

Ne nazadnje nas zanima efektivna sila S' , katero moramo zagotavljati z napravo oziroma »podpornim« materialom v izkopni komori. Ta reaktivna sila mora zagotavljati ravnotežje pravkar izračunanim aktivnim silam v zemljini pred čelom izkopa. Enačbo sestavljajo del, ki odpade na reakcijo tal in del, ki ga povzročajo razlike v hidrostatskih višinah ter del, ki odpade na upor drsnega klina.

Določimo jo s pomočjo enačbe:

$$S' = \sin(\delta - \varphi) \cdot N + F_X - \cos \delta \cdot (T_\varphi + 2 \cdot T_{CS} + T_{CP}), \quad (5-14)$$

Podporna sila S je določena tako, da efektivni podporni sili S' prištejemo še rezultanto tlakov vode W , kar mora biti v ravnotežju.

$$S = S' + W \quad (5-15)$$

Anagnostou in Kovari (1996) sta nato v svojem članku prikazala izpeljavo še enačbo za efektivni podporni pritisk s' , ki ga potrebujemo na čelu izkopa. V izpeljavi sta predpostavila linearno obnašanje medsebojnih parametrov, kot so pritisk na čelo s' , kohezija c in razlika piezometričnih višin $\Delta h = h_o - h_f$. Koeficienti F_0 do F_3 so odvisni od strižnega kota φ , parametra geometrije predora določenega kot H/D in $(h_o - D)/D$ ter glede na razmerje suhe in zasičene prostorninske teže γ_d/γ' . Enačba se glasi:

$$s' = F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D}, \quad (5-16)$$

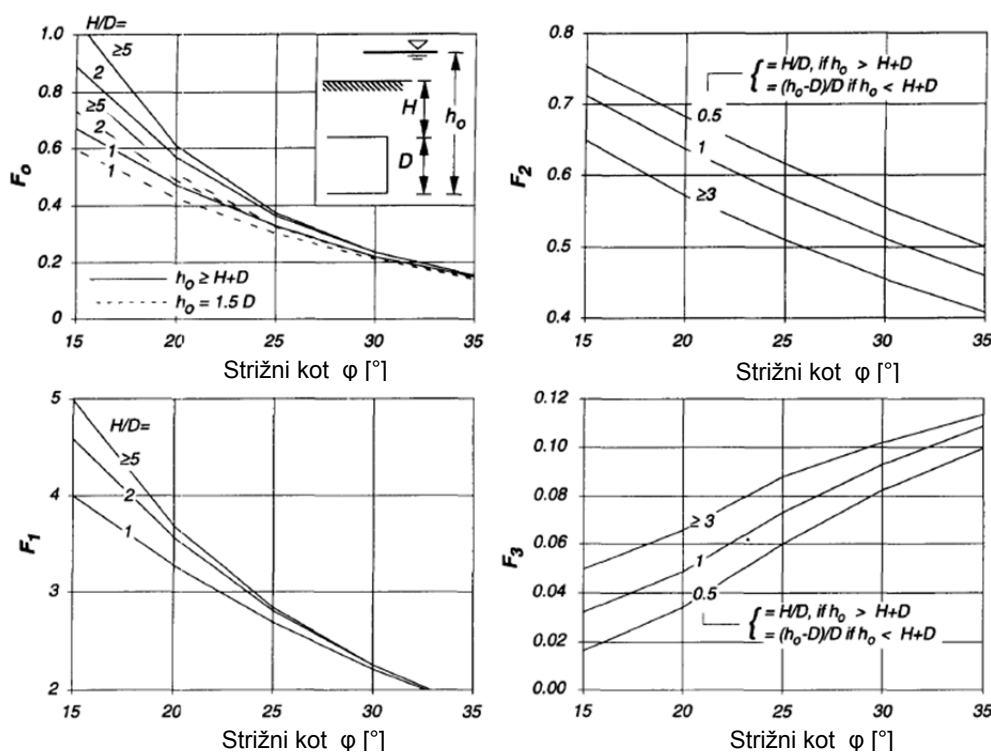
kjer so:

$F_0 - F_3$

brezdimenzijski koeficienti po Anagnostou, Kovari (1996) in

Δh

razlika med piezometričnima višinama na čelu izkopa in v klinu.

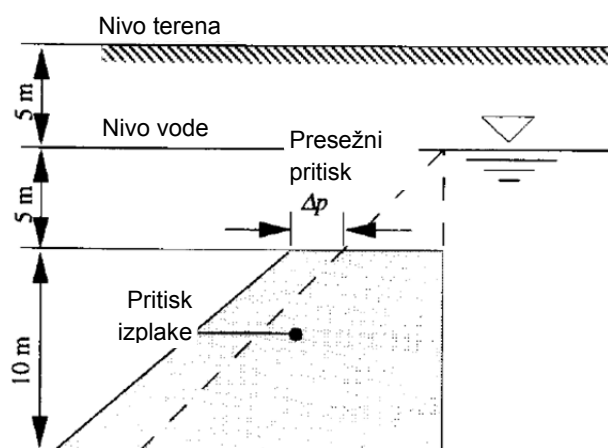


Slika 5-4: Diagrami za določitev koeficientov od F_0 , F_1 , F_2 in F_3 (prirejeno po Anagnostou in Kovari, 1996).

Figure 5-4: Diagrams for the dimensionless coefficients F_0 , F_1 , F_2 in F_3 (adapted from Anagnostou in Kovari, 1996).

V praksi je vzdrževanje ustreznega efektivnega podpornega pritiska s' dokaj zahtevna naloga, saj se v primeru nepravilne razporeditve pritiska na čelo lahko pojavijo lokalni zruški. Do tega privede nepravilna razlika med vodnim stolpcem v hribini (h_0) in vodnim stolpcem v izkopni komori (h_f). Če je h_f visok oz. blizu vrednosti h_0 , to pomeni, da je tudi s' visok. To se odraža v lastnostih izkopanega materiala v komori, ki zagotavljajo pritisk na čelo, saj material nima ustrezne viskoznosti (pregost). Slednje se odraža tudi pri povečani obrabi izkopnih orodij, povečani potrebi po navoru rezalne glave in preveliki zbitosti materiala, katerega je težko učinkovito odstranjevati iz izkopne komore. Gostota materiala v izkopni komori pa vpliva tudi na obvladovanje pritiskov podzemne vode. Razmerje prepustnosti za vodo v hribini k_0 in prepustnosti v vijaku k_A , je odvisno od okolja, ki ga je potrebno obvladovati. V primeru visokih dotokov vode moramo zagotavljati suho delovno okolje (kar pomeni nizko prepustnost v vijaku) in hkrati imeti pravo viskoznost izkopanega materiala v komori. Take pogoje ponavadi dosegamo z uporabo dodatkov (bentonit, penila, idr.) (Anagnostou, Kovari, 1996).

Pristop kontrole stabilnosti čela je pri napravah z izplako nekoliko drugačen. Zaradi grobozrnate zemljine lahko pričakujemo pronicanje oz. strujne sile v smeri proti čelu (in ne obratno kot je to veljalo pri EPB napravi). Da zagotavljamo ustrezno ravnotežje na čelu mora biti pritisk s' večji, kot je vsota zemeljskega pritiska in vode. Razliko označimo z Δp (Slika 5-5) in zagotavlja penetracijo izplake v hribino in tvorjenje sloja membrane.



Slika 5-5: Prikaz pritiska izplake v izkopni komori z deležem Δp (prirejeno po Anagnostou in Kovari, 1996).

Figure 5-5: Scheme of slurry pressure in excavation chamber with indication of excess pressure Δp (adapted from Anagnostou in Kovari, 1996).

Velja, da je sila potrebna za stabilizacijo čela, odvisna od globine penetracije v hribino oz., če je globina penetracije (e) manjša, potrebujemo večjo potisno silo. Potisna sila je izražena z razliko med hidrostatskim pritiskom izplake in pritiskom podzemne vode ter je odvisna od hitrosti napredovanja naprave (Anagnostou, Kovari, 1996). Globina penetracije je večja pri bolj prepustnih zemljinah. Maksimalno globino (e_{max}) določimo z enačbo:

$$e_{max} = \frac{\Delta p \cdot d_{10}}{2 \cdot \tau_f}, \quad (5-17)$$

kjer so:

- Δp presežni pritisk,
 d_{10} premer zrna pri 10% presejku in
 τ_f mejna strižna napetost izplake.

Velikost presežnega pritiska ni določena, vendar skupaj z mejno strižno napetostjo izplake izraža stabilnost v izkopni komori. Mejna strižna napetost je namreč odvisna od deleža bentonita v izplaki, presežni pritisk pa zagotavlja ustrezno penetracijo v zemljino. Pri gradnji predora se morata tako Δp , kot τ_f , prilagajati geotehničnim pogojem zemljine.

Čeprav se z napredovanjem izkopa odstranjuje del membrane v čelu, je stabilnost pri napravah z izplako povezana tudi z neprekinjenim izvajanjem izkopa, kar je bolj ugodno, kot zastoji. V primeru zastoja in morebitnega znižanja nivoja izplake v izkopni komori, je stabilnost čela zagotovljena le krajši čas (t_{cr}), kar zagotavlja obstoječa membrana. Potrebna globina penetracije je odvisna tudi od razmerja med hitrostjo napredovanja in koeficienta prepustnosti (v/k). Če je hitrost prevelika, naprava ne uspe zagotavljati zadostne globine penetracije in mora stabilnost zagotavljati s potisno silo, zato hitrost v ne sme biti večja od kritične vrednosti hitrosti (v_{cr}).

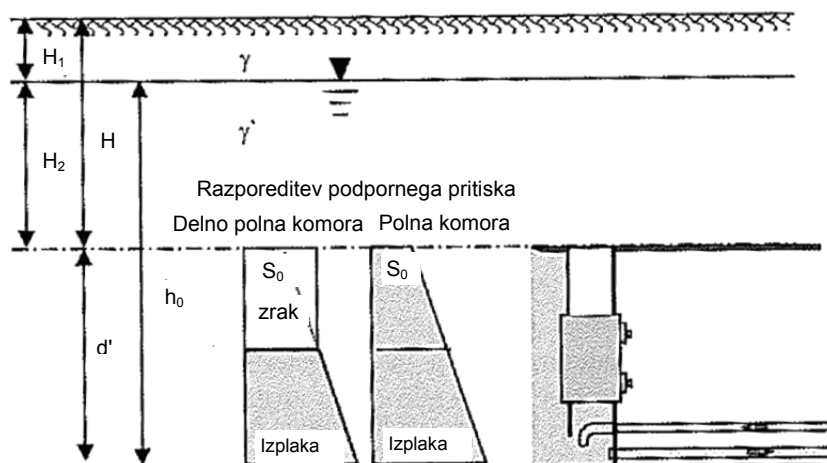
Poznani so tudi še drugi modeli za kontrolo stabilnosti čela, kot je recimo postopek, ki je predpisan z nemškim standardom DIN 4085 in je izpeljan iz 3D modela porušitve. Razvila sta ga Piaskowski in Kowalewski (Budach, 2011). Model je bil razvit z namenom ugotavljanja stabilnosti sten diafragme. Obravnava porušno telo, ki je horizontalno razdeljeno na več manjših teles, katerim nato določimo komponento aktivnega zemeljskega pritiska E_a (Maidl et al., 2012).

5.2.2 Kontrola ravnotežja v navpični smeri

V prejšnjem poglavju smo govorili o zagotavljanju ravnotežja v horizontalni smeri, v tem poglavju pa bomo predstavili še kontrolo v vertikalni smeri, ki je pomembna predvsem pri nizkem nadkritju predorov in visokem vodostaju podzemne vode. Glede na podporni medij, ločimo možen vpliv na okoliško hribino (posedanje ali dviganje). Okoliška hribina oz. tla se lahko namreč celo dvignejo zaradi prekomernega zračnega nadtlaka oz. prekomernega pritiska suspenzije na čelo izkopa (Maidl et al., 2014).

Zahtevana varnost (ravnotežje) je zagotovljena takrat, ko je obtežba nadkritja z upoštevano koristno obtežbo, večja od pritiska na čelo izkopa. V primerih, ko čelo v celoti podpiramo z zrakom, nadtlak določimo v najnižji točki profila predora. V primeru, ko pa moramo znižati nivo izplake, lahko izgubimo ravnotežje zaradi zanemarljive obtežbe zračnega nadtlaka v primerjavi z obtežbo izplake v kroni izkopa. Ker imamo v kroni vseeno pozitiven pritisk zraka, ki pa v tem primeru presega izračunano vrednost pritiska s suspenzijo, lahko privede do dveh kritičnih primerov:

- če je čelo netesnjeno, lahko zrak potuje neovirano na površje, kar pomeni izgubo pritiska, sušenje zemljine in s tem spreminjanje napetostnega stanja okoliške hribine.
- če je krona tesnjena z membrano (filter cake) in nadkritje ni zadostno, lahko zaradi hipne izgube (uhajanja) ali izgube pritiska zraka pripelje do porušitve na površini.



Slika 5-6: Shema pritiska na čelo delno z izplako in zrakom in izplako v celoti (prirejeno po Maidl et al., 2013).

Figure 5-6: Scheme of support pressure distribution with half lowered suspension and full suspension support (adapted from Maidl et al., 2013).

V izogib nastanku opisanih dveh scenarijev, pritisk suspenzije oziroma nadtlaka v kroni predora ne sme biti večji, kot je obtežba nadkritja. Pri kontroli težimo k temu, da je varnost na strani obtežbe hribine. Varnost mora znašati vsaj 1,1 in jo izračunamo s pomočjo naslednje enačbe:

$$F_{dviga} = \frac{\gamma \cdot H_1 + \gamma' \cdot H_2 + \gamma_w \cdot (h_0 - d')}{s_0} \geq 1,1, \quad (5-18)$$

kjer so (glej sliko 5-6):

- d' premer predora,
- H_1, H_2 nadkritje nad in pod gladino podzemne vode,
- h_0 višina podzemne vode nad dnom predora,
- s_0 podporni pritisk v kroni predora in
- $\gamma, \gamma', \gamma_w$ so prostorninska teža zemljine, efektivna prostorninska teža zasičene zemljine in prostorninska teža vode.

5.2.3 Določitev potisne sile naprave

Določitev ustrezne potisne sile je eden od pomembnejših izračunov, predvsem pri načrtovanju TBM naprav s plaščem. Gre namreč za določitev tiste sile, ki mora biti zadostna, da se izognemo nepredvidenim uporom po plašču ter dragim podzemnim nadgraditvam sistema. Upor, ki ga mora premagovati naprava, lahko razdelimo na pet ločenih elementov in sicer:

- trenje po plašču/ščitju,
- upor zaradi prodiranja skozi hribino,
- upor izkopnega orodja,
- upor zaradi načina podpiranja zemljine in
- upor zaradi krmiljenja naprave.

Sila trenja po plašču (W_T) nastane zaradi radialnih in horizontalnih napetosti, ki izvirajo iz nadkritja predora (p_V), koristne obremenitve nad površino terena ($p_{koristna}$) in lastne teže naprave ($p_{naprave}$). Nastane med jeklenim ščitom naprave in zemljino. Te sile morajo premagovati hidravlični cilindri, ki se opirajo na sekundarno oblogo predora. V primeru, da so pričakovane sile prevelike, jih lahko ublažimo s koničasto obliko plašča, nadizkopom rezalne glave ali uporabo bentonitne paste, kot lubirkanta.

Trenje med ščitom in zemljino (μ) je odvisno od zemljine v kateri se izkop vrši in znaša od 0,2 za gline do 0,55 za prode. V meljih in glinah lahko z uporabo lubrikanta, zmanjšamo koeficient trenja za od 0,1 do 0,2.

Silo trenja določimo tako, da najprej določimo skupne vertikalne (radialne) napetosti, ki delujejo na plašč naprave (enačba 5-19). V izračunu upoštevamo spodnji rob naprave, saj so tam napetosti največje. Na podlagi vertikalnih napetosti, določimo nato še horizontalno komponento (enačba 5-20).

$$p_V \text{ skupna} = p_V + p_{koristna} + p_{dodatna} \quad (5-19)$$

$$p_H = k_0 \cdot p_V \text{ skupna} \quad (5-20)$$

Obe komponenti napetosti delujeta po celotnem obodu plašča, prištejemo tudi še lastno težo naprave. Silo trenja ocenimo z enačbo (Maidl et al., 2012):

$$W_T = \mu \cdot [2\pi \cdot r \cdot L \cdot (p_V \text{ skupna} + p_H) \cdot 0,5 + G_s], \quad (5-21)$$

kjer so:

G_s teža naprave,

k_0 koeficient mirnega zemeljskega pritiska,

L dolžina ščita (plašča),

p_V vertikalna napetost zaradi lastne teže hribine,

$p_{koristna}$ vertikalna napetost, ki izhaja iz obremenitve nad terenom (objekti, ...) in

$p_{dodatna}$ vertikalna napetost zaradi dodatne obtežbe.

Sila upora pri prodiranju skozi hribino (W_P) predstavlja upor hribine pri prodiranju rezalnega orodja skozi hribino. Odpornost hribine na penetracijo (p_P) je odvisna od vrste hribine in znaša od 400 kN/m² za melje in gline do 12000 kN/m² za slabo nosilne kamnine. Odpornost je neodvisna od višine nadkritja oziroma druge koristne obtežbe na površini. Odpornost naprave določimo z enačbo:

$$W_P = \pi \cdot d' \cdot p_P \cdot t \text{ pri čemer velja, da je} \quad (5-22)$$

$$p_P > k_p \cdot p_V \text{ skupna} \text{ in} \quad (5-23)$$

kjer so:

d' premer plašča ali TBM naprave,

k_p koeficient pasivnega zemeljskega pritiska,

p_P odpornost hribine na penetracijo in

t širina noža ali rezalnih zob.

Z napredovanjem naprave, rezila presežejo odpornost hribine, pri čemer pride do lokalne porušitve hribine in skozi hribino v smeri izkopa.

Pri uporabi naprave, kjer so vgrajeni začasni podesti in uporabljen sistem izkopavanja materiala, se ravno tako pojavi **sila upora pri prodiranju skozi hribino zaradi podestov in izkopnega orodja (W_O)** ali rezalne glave. Sile na izkopna orodja, ki imajo nalogo rahljanja hribine, so odvisne od tipa hribine. Ocenjeno silo upora določimo na podlagi skupne vertikalne napetosti, ki se na orodje prenaša kot horizontalna sila zemeljskega pritiska. Silo določimo z enačbo:

$$W_O = A_{orodja} \cdot k \cdot p_{V\text{ skupna}}, \quad (5-24)$$

kjer so:

A_{orodja} površina izkopnega orodja (rezalne glave),
 k koeficient zemeljskega pritiska ($k_a < k < k_p$) in
 $p_{V\text{ skupna}}$ celotna vertikalna napetost.

Silo upora ali potrebno potisno silo (S) smo predstavili v enačbi 5-15. To je sila, ki jo zagotavljajo hidravlični cilindri z opiranjem na vgrajeno segmentno oblogo. Kot smo pokazali v poglavju 5.2.1 je sila odvisna od vrste medija, ki ga uporabljamo za podpiranje čela izkopa (izplaka, zemljina ali zrak nadtlak). Sila je ena izmed komponent, ki jih potrebujemo za določitev celotne potisne sile naprave. Silo določimo z enačbo:

$$S \geq E_A + W. \quad (5-25)$$

kjer sta rezultanti zemeljskega pritiska in tlakov podzemne vode določeni kot:

$$W = \frac{A \cdot (p_{W\text{ vrh}} + p_{W\text{ dno}})}{2}, \quad (5-26)$$

$$E_A = \frac{A \cdot (p_{\text{vrh}} + p_{\text{dno}})}{2}, \quad (5-27)$$

kjer so:

A površina čela,
 $p_{\text{vrh}}, p_{\text{dno}}$ podporni pritisk na vrhu in dnu izkopne komore,
 $p_{w\text{ vrh}}, p_{w\text{ dno}}$ pritisk vode na vrhu in dnu izkopne komore,
 E_A rezultanta zemeljskega pritiska,
 W rezultanta tlakov podzemne vode in
 S potrebna potisna sila.

Sila upora po plašču se pojavlja tudi pri **krmiljenju naprave (W_K)** pri manjšem radiju trase in uporabi daljših ščitov. Usmerjenost naprave se nadzoruje s hidravličnimi cilindri. Upor se lahko zmanjša v primeru uporabe koničaste oblike ščita, izvajanja nadizkopa oziroma uporabe bentonita kot lubrikanta. Možna je tudi uporaba zgloba na ščitu. Upor se določi oz. ovrednoti izkustveno (Maidl et al., 2012).

Na podlagi vseh ovrednotenih uporov (W_P , W_T , W_O , S in W_K), ki jih pričakujemo pri izkopu naprave, lahko določimo potrebno potisno silo (P_V) naprave. Silo zagotavljajo hidravlični

cilindri in se določi, kot vsota vseh predvidenih uporov naprave. Pri izračunu upoštevamo še varnostno razliko (ΔW) s katero zajamemo sile, katere ne moremo računsko ovrednotiti. Med te sile uvrščamo naslednje neznanke (Maidl et al., 2012):

- sila za vleko podpornega sistema naprave,
- sila trenja tesnila med ščitom in oblogo,
- povečana odpornost hribine na prodiranje zaradi boljših geoloških lastnosti ali nepredvidenih ovir,
- povečano trenje ščita in rezalnih orodij pri prehodu skozi injektirano območje,
- povečano trenje pri prehodu skozi območje hribine z nabrekalnim potencialom in
- povečano trenje pri prehodu skozi manjše radije na trasi.

Celotno potisno silo določimo z enačbo:

$$P_V = \sum W + \Delta W = (W_T + W_P + W_O + S + W_K) + \Delta W. \quad (5-28)$$

Odločujoča je tista vrednost potisne sile P_V , ki velja za najbolj neugodno kombinacijo vzdolž trase predora.

5.2.4 Drugi kontrolni izračuni

Poleg opisanih kontrolnih izračunov se v fazi načrtovanja naprave izdelajo tudi tisti, ki se nanašajo na konstrukcijo TBM naprave. To so kontrole:

- konstrukcijskih elementov ščita,
- obremenitve ščita,
- določitev potrebnega zračnega tlaka (za napravo s sistemom zračnega nadtlaka) in
- kontrole vseh drugih elementov naprave.

Napravo s ščitom razdelimo na tri glavne dele: sprednji ščit, srednji ščit in zadnji del ščita. Najpomembnejši je sprednji ščit, saj so na njem vgrajena izkopna orodja, predelna stena izkopne komore, v centralnem delu so nameščeni motorji, ki poganjajo rezalno glavo. Debelina sprednjega ščita je 50 do 100 mm, tanjša stena se uporablja pri zadnjih dveh in znaša cca 40 do 60 mm. Znotraj teh treh »sektorjev« so nameščeni konstrukcijski elementi naprave, kot so: izkopna orodja, predelna stena v izkopni komori, filtri, drobilci, vijak ali odvodni cevovod, dovodni cevovod za izplako, varnostna komora za delavce, hidravlični cilindri, naprava za vgrajevanje segmentov in druge (Maidl et al., 2012).

Obremenitve na ščit določajo zunanje obtežbe in operativne obtežbe. V računu upoštevamo kombinacijo najbolj neugodnih obtežb, ki istočasno delujejo na ščit. Ostale nepredvidene vplive zajamemo s povišanjem računsko določene varnosti. Obtežbe, ki jih upoštevamo v izračunu, so:

- lastna teža,
- zunanja obtežba zemljine, vode, reakcijske sile zaradi zavijanja naprave,
- osne obremenitve izhajajo iz podporne sile, reakcijske sile izkopnih orodij, sile hidravličnih cilindrov, obtežba logistične podpore,
- ostale obremenitve so: trenje ščita, reakcijske sile obodnega noža, reakcijske sile naprave za vgrajevanje segmentov, trenje tesnila, idr.

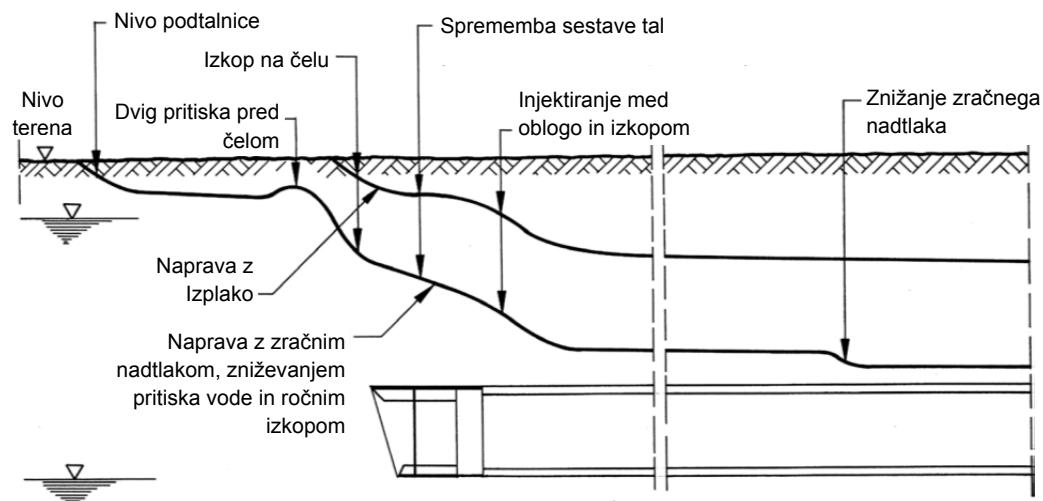
V premeru podpiranja čela z zračnim nadtlakom je potrebno izdelati kontrolo koliko zraka potrebujemo, kjer upoštevamo kakšne bodo izgube zraka. Izračun temelji na koeficientu prepustnosti zemljine in na osnovni predpostavki, da je material homogen. Izgube zraka se lahko pojavljajo skozi čelo, tik za ščitom in skozi injektirano oblogo.

Druge kontrole so še empirične določitve velikosti potisne sile za hidravlične cilindre, računsko opredeljevanje sile zaradi zavijanja naprave in druge, ki so vezane na izbrano tehnologijo naprave in strojnega dimenzioniranje konstrukcije naprave.

5.2.5 Kontrola posedkov na površini – empirični postopek

Kljub aktivnemu podpiranju v času gradnje se spremeni primarno napetostno stanje v okolici predora, kar vodi do deformacij in spremembe pornih tlakov in zato do posedanja na površini. Velikostni red posedkov je odvisen od vrste TBM tehnologije in natančnosti vgradnje segmentne obloge. Pri gradnji predorov v urbanem okolju z nizkim nadkritjem, stremimo k temu, da so posedki na površini čim manjši. Posedki se izvršijo zaradi naslednjih dejavnikov (Maidl et al., 2012):

- znižanje podtalne vode,
- spremembe napetosti pred čelom zaradi spremembe primarnega napetostnega stanja,
- spremembe pornih tlakov v hribini,
- nastanek manjših zruškov med izkopom,
- nezadostno podpiranje čela,
- sprememba zrnavostne strukture in povzročanje vibracij pri izkopu v radiju,
- nezadostno zasipavanje ali injektiranje praznine za izkopom med ščitom in hribino in
- nepričakovan upad pritiska pri podpiranju z zračnim nadtlakom.

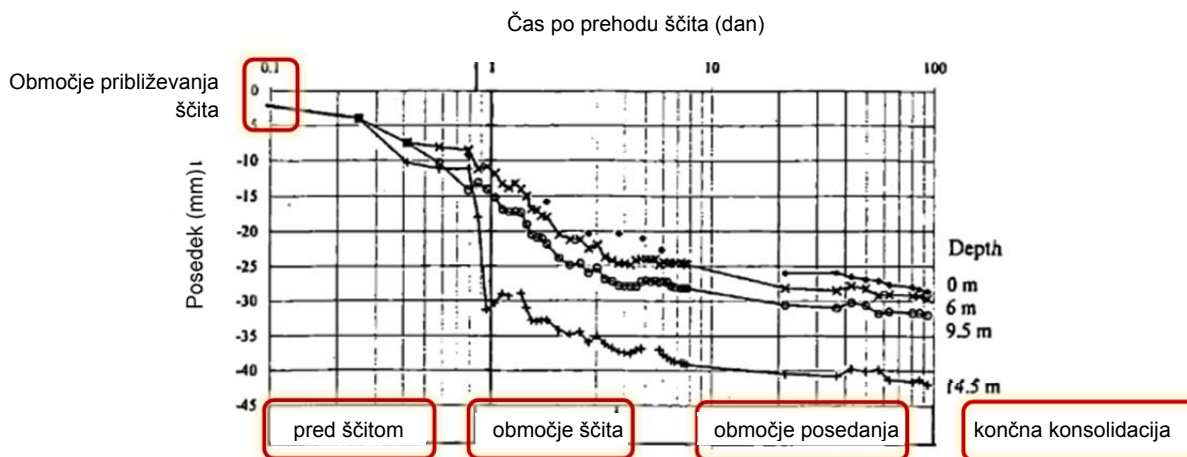


Slika 5-7: Prikaz posedkov pri izvedbi predora z napravo z izplako in napravo z zračnim nadtlakom (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 5-7: Scheme of ground settlements at tunnel construction with slurry machine and compressed air machine (adapted from Maidl et al., 2012).

Na sliki 5-7 je prikazana primerjava posedkov, ki se izvršijo v primeru podpiranja z zračnim nadtlakom oz. z izplako v peščenih tleh pod nivojem podtalne vode. Glede na to, lahko v osnovi identificiramo štiri (Mair, 1996) oz. pet (Mair et al., 1996) komponent pomikov:

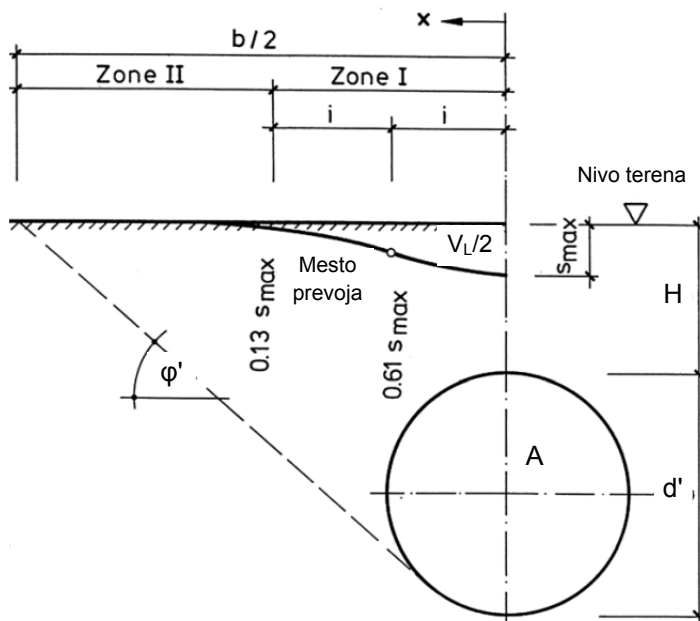
- območje približevanja ščita,
- območje tik pred rezalno glavo,
- območje ščita,
- območje za ščitom in
- končna konsolidacija.



Slika 5-8: Časovni razvoj posedkov pri uporabi EPB naprave v zameljenih peskih (prirejeno po Mair et al., 1996).

Figure 5-8: Development of settlement above EPB shield in silty sands (adapted from Mair et al., 1996).

Za oceno posedkov pri predorih, grajenih z mehaniziranimi napravami, uporabljamo empirične metode. Natančneje z numeričnimi izračuni naredimo kontrole za kritična območja. Ena izmed empiričnih metod, temelji na izkušnjah in podatkih o izvedenih projektih. Izračun je razvil Peck v letu 1969 in kot vhodni podatek uporablja globino predora (H), premer predora (d'), površino čela izkopa (A) in koeficient vrste zemljine (k).



Slika 5-9: Prikaz konture posedka po Gaussovi krivulji (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 5-9: Definition of settlement profiles of Gaussian form (adapted from Maidl et al., 2012).

Mesto prevoja (i) je odvisno od globine nivelete predora in lastnosti hribine, ki ga definira koeficient (k). Vrednost za materiale brez kohezije znaša 0,3, za glin 0,5 in za prekonsolidirane glin med 0,6 in 0,7. Določimo ga z enačbo 5-33.

Maksimalni posedek določimo z enačbo 5-30 in je odvisen od izgube prostornine (V_L), ki je definirana kot površina med linijo terena in linijo krivulje posedka. Ocena izgube prostornine znaša od 0,5% do 1,5% za naprave z izplako in od 0,8% do 2,0% za EPB naprave (Mair, 1996). Med načrtovanjem predora in TBM naprave ocena posedanja temelji na geomehanskih parametrih. Le te med gradnjo poskušamo korigirati z oceno dejanske izgube prostornine. To naredimo z analizo gostote izkopanega materiala, ki je izmerjena čim bližje izkopnemu čelu in analizo količine predvidene ter dejansko porabljene injekcijske mase za segmentno oblogo (Seeley, 2004).

Linija posedkov ima potek Gaussove krivulje. Posedek na oddaljenosti x od osi predora določimo z enačbo (5-29). Območje vpliva definiramo v širini b in ga določimo z enačbo 5-31.

$$s(x) = s_{max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (5-29)$$

$$V_S = s_{max} \cdot i \cdot \sqrt{2 \cdot \pi} = V_L \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad (5-30)$$

$$\frac{b}{2} = H \cdot \cot \varphi' + \frac{1}{2} \cdot d' \cdot \cot \frac{\varphi'}{2} \quad (5-31)$$

$$V_L = k \cdot A \quad (5-32)$$

$$i = k \cdot \left(H + \frac{d'}{2} \right) \quad (5-33)$$

$$i = 0,43 \cdot \left(H + \frac{d'}{2} \right) + 1,1 \quad (5-34)$$

O'Reilly in New (1982) sta nadgradila Peckov postopek in v izračunu upoštevala tudi spremembo napetosti v hribini. Metoda je preverjena le za drobnozrnate zemljine in ni uporabna za grobnazrnate zemljine. Predlagala sta nekoliko drugačen izračun mesta prevoja, ki se ga za drobnozrnate materiale določi z enačbo 5-34. Poznane so še druge analitične metode, ki so prilagojene specifičnim pogojem vrste hribine, kot jih obravnava Ercelebi s sodelavci (2011).

Pri posedanju površine, torej vertikalnih pomikih se spremeni tudi lega točke v horizontalni smeri (s_H). V izračunu to vrednost določimo pravokotno na os predora (smer x) in je odvisna od vertikalnega pomika. Za določitev uporabimo enačbo 5-35, pri čemer vektor pomika kaže v center izkopa. Vrednost horizontalnega pomika lahko uporabimo za določitev natezne in tlačne cone vplivnega območja, ki nastane zaradi posedanja površine. To določimo z odvodom horizontalnega pomika, ki predstavlja spremembo horizontalnega pomika (horizontalna deformacija) v smeri x (ε_H) oz. pravokotno na os predora (enačba 5-36) (Potts in Addenbrooke, 1996).

$$s_H(x) = \frac{x}{z_0} \cdot s(x) = \frac{x}{z_0} \cdot s_{max} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2 \cdot i^2}\right)} \quad (5-35)$$

$$\varepsilon_H = \frac{s_H(x)}{z_0} \cdot \left\{1 - \left(\frac{x}{i}\right)^2\right\} \quad (5-36)$$

Ocene posedkov z empiričnimi metodami so skorajda v celoti zamenjali napredni numerični izračuni. Ti omogočajo simuliranje korakov gradnje in opisovanje obnašanja hribine s pomočjo različnih nelinearnih konstitutivnih zakonov. Običajno se uporablja linearno elasto-plastični model po Mohr-Coulombu oziroma drugi modeli, ki bolje opišejo specifično obnašanje hribine (hardening soil, ipd.). Poleg tega lahko v model vključujemo tudi preventivne ukrepe, kot recimo kompenzacijsko injektiranje, izdelava jet grouting zaves, ipd.. 2D analize so dokaj natančne in hitro izvedljive ter nudijo dobre izhodiščne podatke, 3D analize so bistveno bolj natančne, sama priprava modela in izvedba izračuna, pa potrebuje več časa. Slaba stran numeričnih analiz je kalibracija modelov, kar lahko vpliva na točnost rezultatov.

Mancinelli (2005) je izdelal primerjavo različnih metod izračuna posedkov za predore grajene s TBM metodo in nizkim nadkritjem. V članku obravnava tri metode:

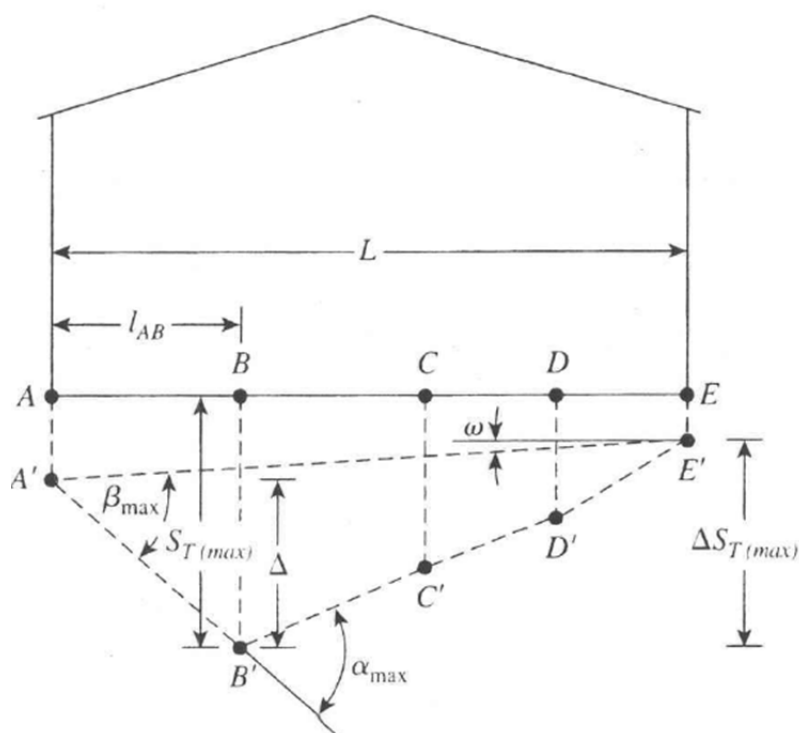
- analiza po MKE s konstitutivnim modelom po Drucker-ju in Prager-ju,
- elastični pristop po Verruijt-u in
- empirični izračun po O'Reilly-ju in New-ju.

Z numerično analizo po MKE za izbrano hribino je najprej določil izgubo prostornine (V_L) iz katere je nato izhajal še pri ostalih izračunih. Ugotovil je, da je ujemanje v velikostnem redu posedka pri MKE in empiričnem izračunu zelo dobro, pri elastičnem pristopu pa je maksimalni pomik manjši. Večje razlike so opazne pri vplivnem območju, saj empirični izračun pokaže bistveno manjše vplivno območje, boljše pa je ujemanje pri MKE in elastičnim pristopom. Članek pokaže, da so že pri enostavni primerjavi velikostnega reda posedkov in obliki posedkov, razlike med različnimi računskimi pristopi lahko zelo velike.

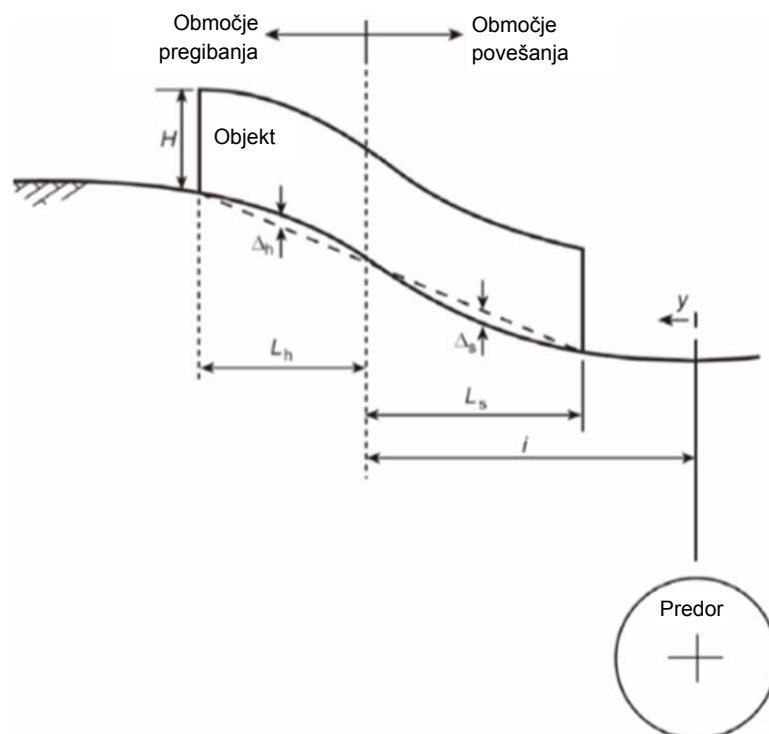
Izdelava ocene posedkov, ki nastanejo pri gradnji predora temeljijo na predpostavki o predvideni izgubi prostornine (V_L). Čeprav je baza izvedenih projektov razmeroma velika, je hkrati tudi razpon zabeleženih vrednosti velik. Uporaba empiričnih pristopov tako omogoča začetno oceno posedkov površine pri gradnji predorov, v kasnejših fazah projektiranja pa uporaba numeričnih analiz omogoči bolj natančno obravnavo.

Vrednosti vertikalnih posedkov in horizontalnih pomikov, lahko nato v nadaljevanju uporabimo za vrednotenje potencialnih poškodb obstoječih zgradb, infrastrukture in obstoječih predorov. Za vrednotenje poškodb objektov je bilo izdelanih več metodologij, ki temeljijo na posedkih površine, premikih temeljev in razpokanosti objekta. Burland in Worth (1974) sta v svojem članku podala nabor parametrov in njihovih definicij, ki opisujejo diferencialne posedke objekta, kot prikazuje Slika 5-10. Posedanje objekta lahko opišemo z:

- β_{max} je relativni zasuk ali rotacija objekta, izražena s količnikom upogiba $\Delta s/L$,
- α_{max} je kotna deformacija med sosednjima poljema temelja objekta (npr. AB in BC),
- s_{max} je absolutni posedek objekta,
- Δs je diferenčni posedek med dvema točkama temelja in
- ω je nagib objekta med krajnjima točkama objekta.



Slika 5-10: Shema posedkov objekta z glavnimi parametri (prirejeno po Braja, 1999).
Figure 5-10: Scheme of building settlements with parameters (adapted from Braja, 1999).



Slika 5-11: Deformacija objekta, deljena na območje pregibanja in povešanja (prirejeno po Burland, 2008).
Figure 5-11: Building deformation, partitioned to hogging zone and sagging zone (adapted from Burland, 2008).

Konturo posedka opišemo z Gaussovo krivuljo, kar velja za neovirano posedanje. V primeru upoštevanja togosti objekta in interakcije med temelji in objektov, je interpretacija posedkov drugačna. Točka prevoja krivulje (i) definira dve območji, ki opredeljujejo kakšnim obremenitvam bo objekt izpostavljen. Opredelimo območje pregibanja in povešanja. V območju pregibanja bodo prevladovale natezne napetosti, v območju povešanja pa tlačne napetosti, ki se kažejo kot strižne porušitve.

Vrednotenje poškodb na objektih, je lahko zelo subjektivno, zato je bilo v ta namen razvitih več pristopov, ki temeljijo na računskih vrednostih posedkov. Ločimo lahko tri glavne kategorije poškodb objekta in sicer: vizualne oz. estetske, omejitve uporabnosti in ogrožanje stabilnosti.

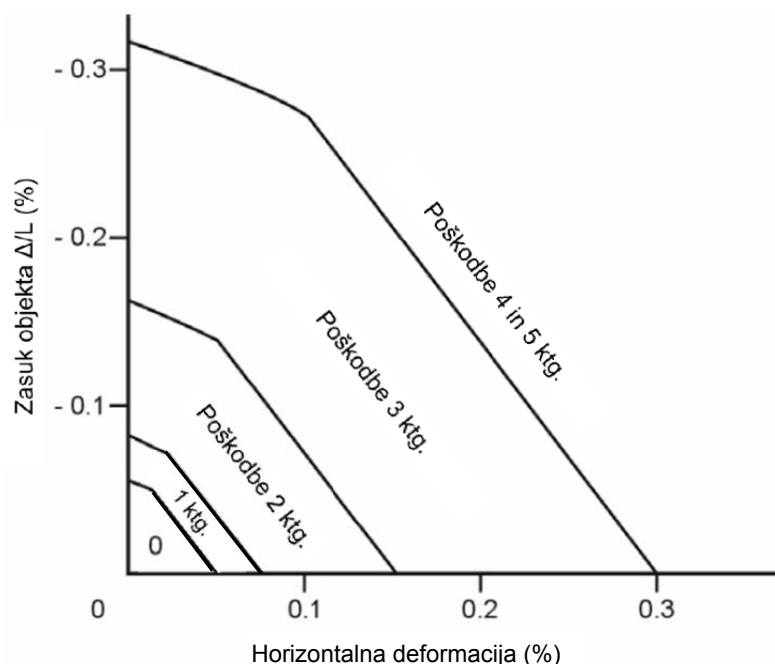
Za opečnate zgradbe je Burland s sodelavci (2008) razvil šest kategorij poškodb. Sistem klasifikacije temelji na predpostavki potrebnega obsega popravila. Kategorije 0, 1 in 2 spadajo med vizualne poškodbe in so velikostnega reda od 0,1 do 5 mm. Popraviti jih je možno z manjšimi posegi. Kategorije 3 in 4 spadajo med poškodbe, ki zmanjšujejo uporabnost objekta in so velikostnega reda od 5 do 25 mm. Zahtevajo obsežnejša popravila zidov in stavbnega pohištva. Poškodbe kategorije 5 ogrožajo stabilnost objekta. Razpoke so večje od 25 mm, zato zahtevajo obsežna sanacijska dela, ki lokalno lahko zahtevajo rekonstrukcijo objekta. Klasifikacija je veljavna za opečnate ali zidane stavbe in ni uporabna za armiranobetonske objekte (Burland, 2008).

Nastanek razpok pri opečnatih zgradbah izvira največkrat, vendar ne vedno, zaradi nateznih napetosti. Burland in Wroth (1974) sta na podlagi raziskav določila kritične vrednosti deformacij (ϵ_{crit}). Vrednosti veljajo za območja daljša od 1 m in ne predstavljajo lokalnih vrednosti. Povprečne vrednosti deformacij, ko razpoke postanejo vidne, so pri opečnatih konstrukcijah od 0,05 do 0,1 % in pri armiranobetonskih konstrukcijah od 0,03 do 0,05 %. Podane vrednosti ne predstavljajo vedno meje pri kateri je omejena sama uporabnost objekta. V ta namen so bile predhodno predstavljenim kategorijam poškodb (od 0 do 5) dodane še mejne vrednosti deformacij (ϵ_{lim}). Boscardin in Cording (1989) podajata naslednje vrednosti za posamezne kategorije:

- 0 – od 0 do 0,05 %,
- 1 – od 0,05 do 0,075 %,
- 2 – od 0,075 do 0,15 %,
- 3 – od 0,15 do 0,3 % in
- 4 in 5 – večje od 0,3 %.

V nadaljevanju so koncept mejnih nateznih deformacij, uporabljali za preučevanje mehanizma razpok enostavnega elastičnega nosilca, ki leži v območju pregibanja ali povešanja oz. v obeh (Burland, 2008), kot to prikazuje Slika 5-11. Za nadaljno oceno poškodb objekta je zato potrebno poznati dimenzije objekta, to je dolžina L in višina H ter lokacija objekta nad predorom. Iz Slika 5-11 je razviden realen primer, kjer objekt delno stoji v območju nateznih napetosti in delno v območju tlačnih napetosti. Poškodbe, ki jih lahko pričakujemo so natezne deformacije oz. razpoke na temenu nosilca in tlačne oz. strižne deformacije, ki se odražajo kot diagonalne razpoke na krajiščih nosilca v smeri 45° .

Za potrebe poenostavljene ocene poškodb objekta je bil izdelan graf za primer objekta $L/H=1$ (Boscardin in Cording, 1989), ki v oceni upošteva rotacijo objekta β oz. razmerje $\Delta s/L$ in horizontalno deformacijo ε_H in velja za območje nateznih napetosti.



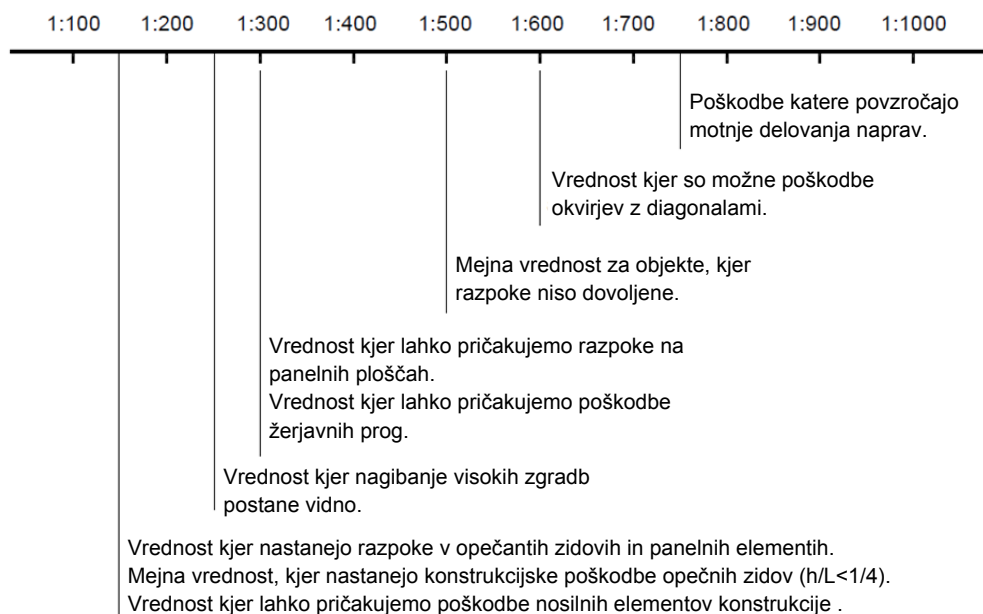
Slika 5-12: Območja kategorij poškodovanosti objekta (razmerje $L/H=1$) za območje pregibanja (prirejeno po Burland, 2008).

Figure 5-12: Areas of damage categories (for ratio $L/H=1$) for hogging mode (adapted from Burland, 2008).

Burland (2008) predlaga tri stopenjsko oceno tveganj za nastanek poškodb na objektih. V prvem koraku preverimo kateri objekti so znotraj območja zasuka večjega od 1:500 in posedka večjega od 10 mm. V drugem koraku nato objekte znotraj omenjenega območja najprej obravnavamo s predpostavko, da je objekt popolnoma elastičen. S predpostavko izračunamo največje zasuke (Δ/L) in horizontalne deformacije (ε_H), katere morajo biti v največ drugi kategoriji poškodovanosti objekta. V primeru, da so poškodbe večje, izračun ponovimo in upoštevamo še upogibno in osno togost objekta in pripadajoče korekcijske faktorje (Burland, 2008). V primeru, da se pri določenih objektih še vedno kažejo poškodbe višje kategorije (> 2 ktg.) izvedemo še tretji korak kontrole. V tem detajlno upoštevamo vse razpoložljive podatke o objektu (konstrukcijska zasnova, vrsta temeljenja, orientacija objekta glede na os predora, interakcija zemljine in objekta, predhodno izvedeni posedki ali posegi v objekt) in način gradnje predora (metoda, korak izkopa, ukrepi pred čelom izkopa). Tretji korak ocene vsebuje tudi obširno izdelavo numeričnih analiz.

V Sloveniji je v uporabi Eurocode 7, ki v dodatku pravi, da je v izogib preprečevanja stanja neuporabnosti objekta, potrebno za vsak objekt določiti mejne vrednosti celotnih posedkov, relativnih ali diferenčnih posedkov ter zasukov. Celotni ali absolutni posedek lahko znaša do 50 mm. Sprejemljivi so tudi večji, če relativni zasuki ostanejo znotraj sprejemljivih meja in če celotni posedki ne povzročajo težav pri inštalacijah in vodih, ki vstopajo v konstrukcijo. Relativni posedek med dvema sosednjima podporama je lahko do 20 mm. Največji dopustni relativni zasuki so od 1:2000 do 1:300, kar še ne vpliva na uporabnost objekta, kjer je 1:500 dovoljena vrednost za običajne objekte. Relativni zasuk, ki vpliva na mejno stanje

uporabnosti znaša okoli 1:150. To vrednost Bjerrum navaja kot mejo pri kateri poškodbe vplivajo na stabilnost konstrukcije (Maksimović, 2008).



Slika 5-13: Mejne vrednosti robnih deformacij po Bjerrumu (prirejeno po Maksimović, 2008).

Figure 5-13: Limiting angular distortions according to Bjerrum (adapted from Maksimović, 2008).

Nekoliko drugačne vrednosti navaja Maidl (2012), ki pravi: »Sprejemljive vrednosti rotacij, zaradi diferenčnih posedkov so 1:500 za zgradbe, ki se lahko deformirajo in 1:1000 za toge in krhke zgradbe« (cit. po Maidl, U. et al., 2012). Maksimović (2008) v svoji knjigi povzema priporočila po Bjerrumu (1963), ki podaja več različnih vrednosti rotacije, s primeri do katerih poškodb ali motenj lahko ob tem pride na objektih (Slika 5-13).

V nadaljevanju bomo v sklopu empiričnega izračuna absolutnih posedkov, naredili še kontrolo diferencialnih posedkov in zasukov za hipotetični objekt na območju potencialnih predorov. Dobljeni rezultati bodo uporabno izhodišče za nadaljnje analiziranje in načrtovanje.

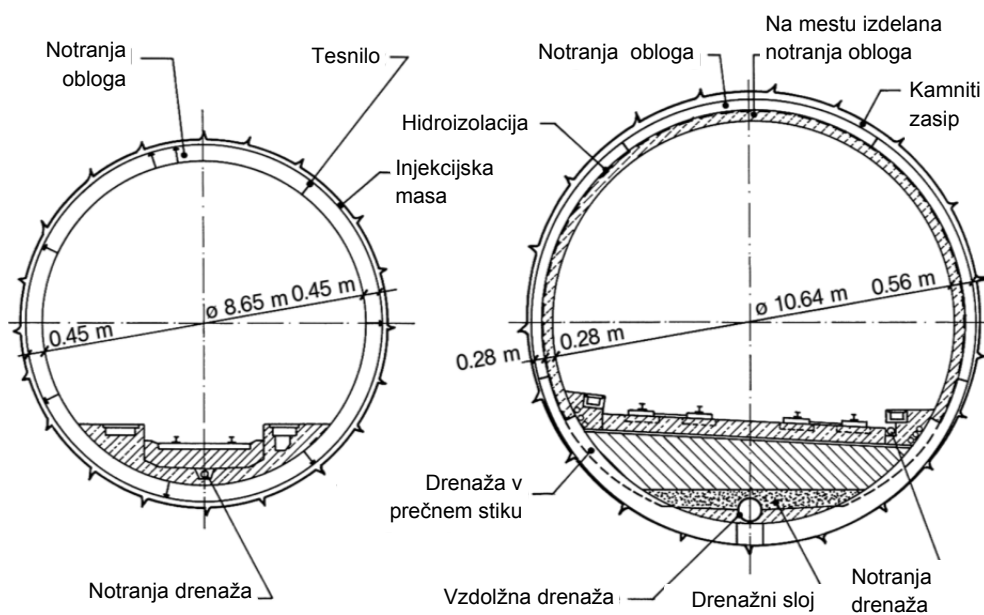
5.3 Projektiranje notranje obloge

5.3.1 Splošno

Projektiranje notranje obloge temelji na ciljih in robnih pogojih, katere mora izpolnjevati predor kot celotna konstrukcija. Za oblikovanje obloge moramo upoštevati naslednje vhodne podatke: namembnost predora, geometrijski kriteriji (svetli profil, gradbena toleranca, ipd.), kriterij vodotesnosti, požarne varnosti, geološke in hidrogeološke lastnosti hribine, stopnja urbaniziranosti območja predora in veljavno zakonodajo, standarde in smernice.

Predorska obloga ima funkcijo trajnega zagotavljanja varnosti in uporabnosti konstrukcije predora. Notranja obloga zagotavlja podporo hribini, preprečuje prodiranje vode in nudi nosilno konstrukcijo za instalacije v predoru. Med gradnjo pa poleg tega zagotavlja tudi oporo hidravličnim cilindrom. Vhodni podatki za dimenzioniranje so ponavadi določeni z vplivi hribine in podzemne vode. Ob prisotnosti podzemne vode, se je potrebno opredeliti ali bo obloga prevzela obtežbo vode oz. bo predorski profil zasnovan kot dreniran, kar pomeni, da

se vodo zbira in odvaja. Odločitev ali bo prerez dreniran ali ne, ni vedno zgolj gradbeno tehnične narave. Drenirana rešitev ima namreč vpliv na režim (n.pr. nivo) podtalnice, kar ni vedno ekološko sprejemljivo (Maidl et al., 2012).



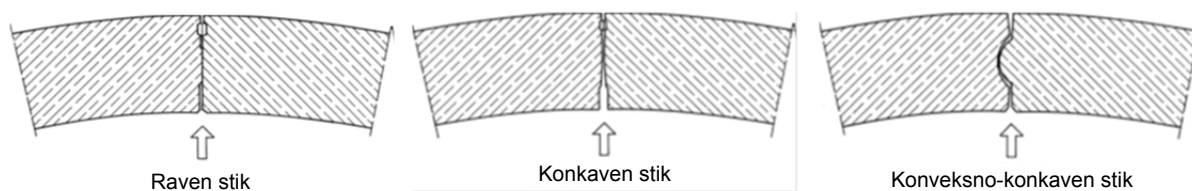
Slika 5-14: Prikaz izvedbe predora v vodotesni (levo) in drenirani različici (desno) (prirejeno po Girmscheid, 2013).

Figure 5-14: Scheme of tunnel in waterproof version (left) and in drained version (right) (adapted from Girmscheid, 2013).

Kot je prikazano na spodnji sliki, se segmentna obloga uporablja tako pri vodotesni (enojni sloj), kot pri drenirani (dvojni sloj) različici. Odvisno od namembnosti so elementi lahko izdelani iz armiranega betona ali mikroarmiranega betona. Nearmiran beton se uporabi le v primeru izvedbe notranje obloge na mestu vgradnje. Debelina segmentov je odvisna od premera in vplivov hribine. Običajna debelina je med 20 in 50 cm, širina pa med 1 in 2 m.

Obstaja več konstrukcijskih variant izvedbe obloge. Običajno se v enem obroču vgradi od 5 do 8 osnovnih elementov in zaključni element. Elementi so različno oblikovani, najbolj običajna je trapezna oblika. Po celotnem obodu je vgrajeno tudi tesnilo. Stiki med elementi so lahko zapolnjeni tudi z deformacijskimi elementi, saj za doseganje trajnosti konstrukcije elementi ne smejo biti togo stikovani.

Stike med elementi ločimo na vzdolžne in prečne. Vzdolžni stiki so stiki med elementi, ki skupaj tvorijo posamezen obroč. Ti stiki so lahko popolnoma ravni, obojestransko konveksni oz. konveksno-konkavni, kot prikazuje spodnja slika. Ravni stiki omogočajo poleg prenosa osne in strižne sile, tudi prenos momentov, kar vpliva ugodno na segmente zaradi prerazporeditve momentov. V primeru rotacije obstaja nevarnost prepuščanja vode. Obojestransko konveksni stik, je z vidika kontrolirane rotacije boljši, vendar pa obstaja nevarnost koncentracije napetosti na robovih segmenta, kar lahko privede do luščenja betona. Slabost je tudi nestabilnost elementov pri vgradnji, zato jih je potrebno dodatno podpirati dokler obroč ni zaključen. Konveksno-konkavni stik je tipičen za členkast obroč in dopušča velike rotacije. Uporaba te vrste elementov je najbolj primerna za predore z dvojnimi slojem obloge.

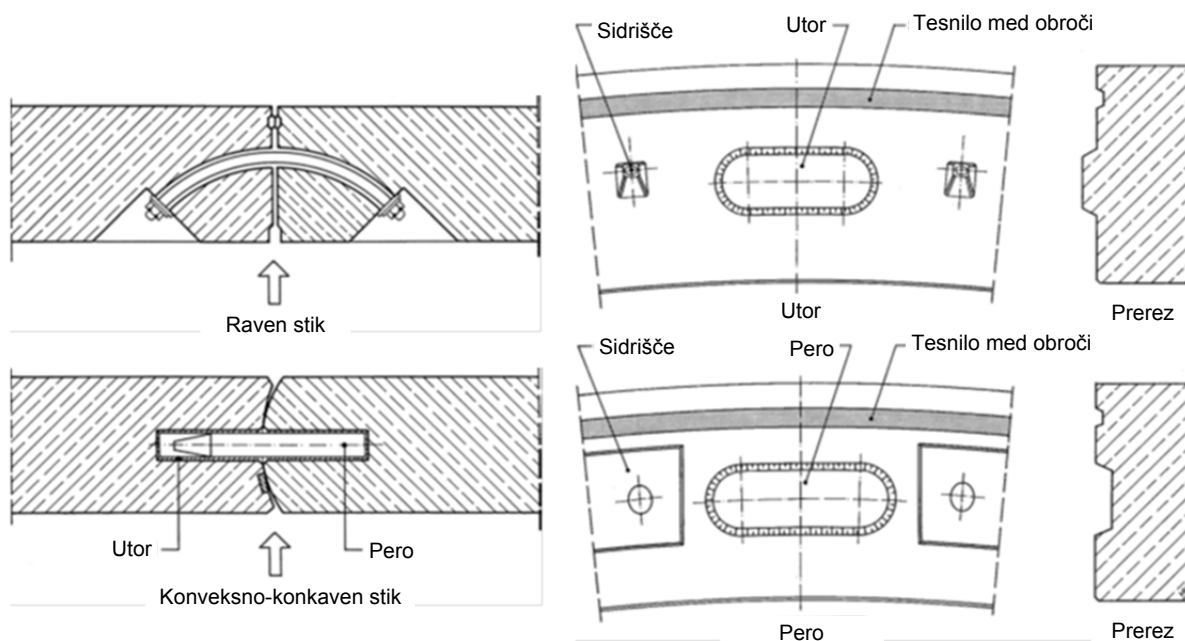


Slika 5-15: Tipi vzdolžnih stikov (raven, konveksen in konveksno-konkaven) (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 5-15: Types of longitudinal joints (flat, convex and convex-concave) (adapted from Maidl et al., 2012).

Prečni stiki so stiki med obroči oz. stiki, ki so pravokotni na os predora. Prevezajo predvsem obtežbo hidravličnih cilindrov. Poznamo tri oblike stikov: raven stik, konveksno-konkavni stik in stik na pero-utor. Raven stik je dober za prenos potisne obtežbe, ne omogoča pa prenosa strižne obremenitve. V času gradnje ga je potrebno začasno podpirati z mozniki. Konveksno-konkavni stik je oblikovan tako, da ga ni potrebno začasno podpirati. Slabost te oblike stika pa je občutljivost robov na poškodbe v fazi transporta in vgrajevanja. Sorazmerno dobra oblika stika je tudi na pero in utor, saj zagotavlja dobro začasno stabilnost. Slabost se kaže pri visokih koncentracijah sil pri točkovnem naleganju in prostoru za vgradnjo potrebne armature.

Poleg konstrukcijskih zahtev pri predizdelanih elementih obloge so pomembni tudi tisti, ki zagotavljajo trajnost in namembnost konstrukcije. Omenili smo že zapolnjevanje praznine med oblogo in ščitom, potrebna je tudi vgradnja ustreznih tesnil, ki zagotavljajo prevzem visokih sil in neprepustnost visokih pritiskov podzemne vode. Tesnil med življenjsko dobo predora ni mogoče menjati, zato je njihova doba ravno tako vsaj 100 let. Materiali primerni za izdelavo tesnil so neopren oz. tesnila iz sintetičnih mas in nabrekajoča tesnila.



Slika 5-16: Tipi prečnih stikov (raven, konveksno-konkaven in pero-utor) (prirejeno po Maidl et al., 2012).

Figure 5-16: Types of ring joints (flat, convex-concave and pin-socket) (adapted from Maidl et al., 2012).

5.3.2 Načrtovanje notranje obloge

Za dimenzioniranje segmentov notranje obloge lahko uporabimo različne metode. Priporočila mednarodnega združenja za predorogradnjo podajajo neodvisna navodila, kako pravilno načrtovati notranjo oblogo (ITA, 2000). Predlagajo upoštevanje naslednjih korakov:

- 1.) izbor in upoštevanje veljavnih standardov, smernic in priporočil,
- 2.) določitev potrebnega svetlega profila predora,
- 3.) določitev posameznih obtežb na predor in njihovih kombinacij,
- 4.) določitev oblike, debeline in materiala za segmente,
- 5.) zasnova računskega modela in izračun,
- 6.) kontrola konstrukcijskih elementov glede na vplive,
- 7.) pregled in popravki vhodnih podatkov, če izračun ni ustrezen in
- 8.) potrditev izbrane rešitve za notranjo oblogo.

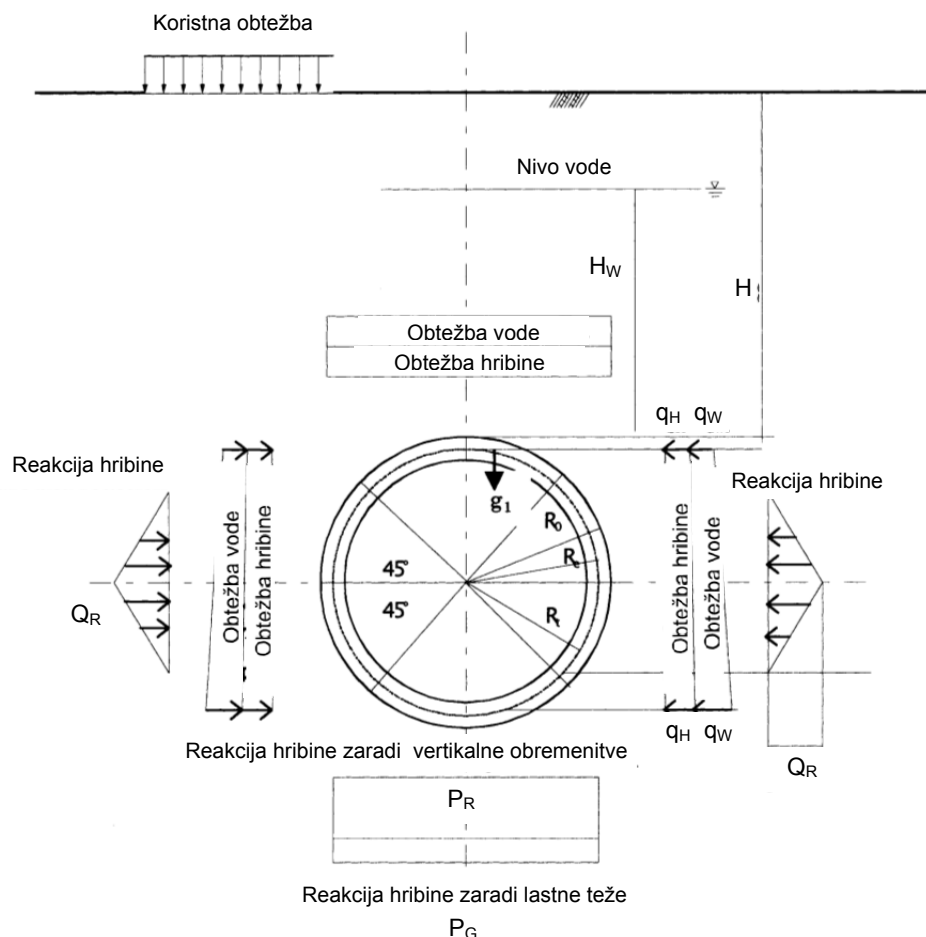
V tem poglavju bomo nadaljevali s točko 3, saj smo na prvi dve točki opozorili že v predhodnih poglavjih. Obtežba, ki jo upoštevamo v izračunu, je:

- 1.) Obtežba, ki jo upoštevamo vedno:
 - obtežba hribine (p_o),
 - obtežba podzemne vode (p_w),
 - stalna in lastna obtežba (p_g),
 - koristna obtežba (p_q) in
 - interakcija med oblogo in hribino.
- 2.) Obtežba, ki jo upoštevamo, če je njen vpliv izdaten:
 - obtežba v notranjosti predora,
 - obtežba, ki nastane zaradi izvedbenih sekvenc (potisne sile hidravličnih cilindrov, sile primarnega in sekundarnega injektiranja) in
 - obtežba potresa.
- 3.) Specifična obtežba:
 - obtežba zaradi drugih predorov v bližini,
 - obtežba zaradi posedkov in
 - druge obtežbe.

Obtežba hribine deluje na oblogo po celotnem obodu predora. Vertikalno komponento obtežbe določimo z enačbo $p_{o,v}=\gamma*H$, pri horizontalni komponenti moramo upoštevati še koeficient zemeljskega pritiska (k_o). k_o določimo z enačbo $k_o=1-\sin\varphi$, če pa so tla prekonsolidirana, moramo upoštevati še koeficient prekonsolidacije (OCR). Obtežba vode deluje na predor kot hidrostatski tlak in jo določimo z enačbo $p_w=\gamma_w*H_w$. Če je nivo podzemne vode nad temenom predora, moramo za γ_w reducirati obtežbo hribine. Lastno in stalno obtežbo (p_g) določimo kot linearno obtežbo na oblogo, ki deluje v navpični smeri. Koristna obtežba (p_q) izhaja iz obtežbe na površini (promet, objekti, ipd.). Reakcijo vpliva zemljine določimo na podlagi pomika hribine zaradi deformacije obloge. Pomiki so odvisni od togosti obloge, števila, tipa in pomikov vozlišč.

Med obtežbe, ki so poleg zunanjih vplivov pomembne pri dimenzioniranju obloge, spada obtežba v notranjosti predora v obliki obremenitve s stropa ali pa obtežbe vode v predoru. Zelo pomembne, pri dimenzioniranju segmentov so obremenitve, ki izhajajo iz faz gradnje predora. Med te štejemo: potisno silo hidravličnih cilindrov, obremenitve pri rokovanju s

segmenti (transport in prestavljanje), pritisk zaradi zapolnjevanja praznine (injektiranje), obremenitve mehanizma za postavljanje segmentov in druge. Obtežba potresa, vpliv sosednjih predorov in drugi vplivi so pri projektiranju predorov zelo specifični in jih ne obravnavamo v tej nalogi. Pri določanju kombinacije obtežb moramo upoštevati Evrokod 1: Vpliv na konstrukcije in veljavni nacionalni dodatek. Za dimenzioniranje notranje obloge uporabljamo Evrokod 2, za določitev vplivov predorski oblogi pa Evrokod 7: Geotehnično projektiranje ter smernice za mikroarmiran beton.



Slika 5-17: Shematski prikaz obtežb na predorsko cev (prirejeno po Koyama, 2003).

Figure 5-17: Schematic load conditions on tunnel tube (adapted from Koyama, 2003).

Izbira oblike, velikosti in debeline segmentov je odvisna od premera predora. Kot smo že uvodoma omenili, je material segmentov odvisen od konstrukcije predora in od velikostnega reda notranjih statičnih količin, ki jih določimo z izračunom.

Za izračun notranjih statičnih količin v oblogi uporabljamo empirične postopke ali pa numerična orodja. Segmentna obloga je modelirana kot nosilec na elastični podlagi. Prisotnost vozlišč v modelu je velikega pomena, ravno tako tudi njihova oblika, saj obloga ne deluje kot tog obroč (predpostavimo namreč dopustno rotacijo stikov oz. deformacijo obroča). Prednost izračuna s takim modelom je, da:

- obnašanje hribine določimo glede na spremembo primarnega napetostnega stanja zaradi gradnje predora,

- obnašanje obloge je odvisno od števila segmentov in kakovosti zapolnitve praznine za oblogo ter obremenitve hribine in
- stopnjo relaksacije, ki je odvisna od metode gradnje in velikosti praznine za ščitom.

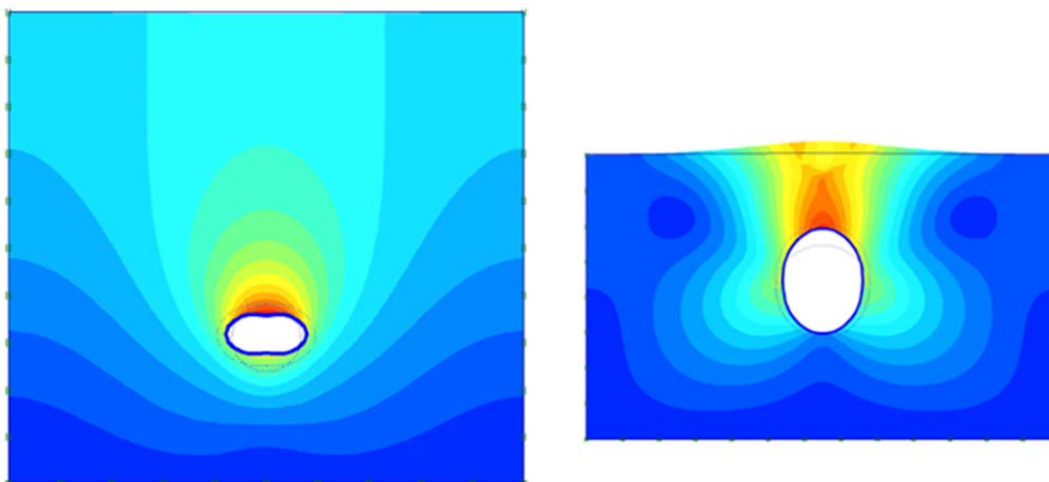
Osnovna zahteva numeričnih analiz je določitev konstrukcije, ki izpolnjuje pogoje zahtevane trdnosti in trajnosti glede na predvideno obtežbo in okoljske pogoje ter je cenovno upravičena. Kakovostne analize opravimo z upoštevanjem predpisanih standardov, smernic in priporočil, ki izhajajo iz izvedenih projektov.

Po ITA (2000) kontrolo betonske obloge predora izdelamo tako, da najprej preverimo najbolj kritične prereze glede na maksimalne notranje statične količine (M in N). Prerez preverimo na maksimalni pozitivni moment, maksimalni negativni moment in maksimalno osno silo. Preveri se tudi kombinacija osne sile in momenta, pri čemer upoštevamo neugodne vplive. Vpliv morajo biti znotraj krivulje v interakcijskem diagramu za posamezen konstrukcijski element. V izračunu upoštevamo tudi podajnost členkov, ki jo lahko določimo na podlagi različnih priporočil (n.pr. po Duddecku in Erdmannu). Običajna vrednost podajnosti vozlišč je podana kot rotacija v velikostnem redu 1 % premera predora.

Po Eurocodu 7 se v Sloveniji uporablja projektni pristop 2, kjer se izračuni preverijo za mejno stanje napetosti in mejno stanje uporabnosti. Projektne vrednosti vplivov se preveri glede na odpor konstrukcije, kjer upoštevamo predpisane parcialne varnostne faktorje glede na projektni pristop in učinek vpliva. Pri določanju vplivov je potrebno posebno pozornost nameniti tlakom talne oz. hribinske vode, saj pri preverjanju mejnega stanja nosilnosti konstrukcije lahko predstavljajo resne posledice na dolgoročno stabilnost predora (Likar, 2010). Pri preverjanju mejnega stanja uporabnosti moramo upoštevati najbolj neugodne projektne vrednosti, ki se lahko pojavijo v normalnih razmerah obratovanja. V računu upoštevamo delne faktorje za vplive (γ_F) ali učinke vplivov (γ_E), delne faktorje za parametre zemljin (γ_M). Poleg naštetih imamo še varnostni faktor za material in sicer beton ($\gamma_{Mb}=1,5$) in jeklo ($\gamma_{Ms}=1,15$).

Izpostaviti velja tudi pomembnost konstrukcijskih detajlov, ki predvsem pridejo do izraza pri predorih z enojnim slojem obloge. Velikost in oblika segmentov vpliva na rokovanje, način zapolnjevanja za oblogo in doseganje kakovosti vgradnje. Potrebno je ustrezno konstrukcijsko oblikovanje stikov, da zagotavljamo kvalitetno vgradnjo tesnila in funkcije tesnjenja. Enojno tesnilo ponavadi ni dovolj, zato se ponavadi na notranji strani oblikuje utor za naknadno tesnjenje. Eden izmed bolj pomembnih detajlov je oblika in način vgradnje zaključnega segmenta. Ta element lahko vgrajujemo v vzdolžni ali prečni smeri. Velikost mora biti prilagojena napravi za rokovanje s segmenti, oblika stikov pa ne sme dopuščati prevelikih rotacij, saj moramo zagotavljati prenos osne obremenitve v obroču (ITA, 2000).

Na dimenzioniranje notranje obloge vpliva tudi globina predora. To običajno določamo glede na naravne danosti in namembnost infrastrukture. Globina predora vpliva na deformacijo predorske cevi in s tem na velikostni red notranjih statičnih količin. V empiričnih izračunih sta Duddeck in Erdmann (1982) določitev maksimalnega momenta in osne sile »vezala« na razmerje H/d' , kjer je H globina predora do njegove osi in d' premer predora. V osnovi velja, če je $H/d' > 3$ je predor globok oz. če je $H/d' < 3$ je predor plitev. Na sliki 5-18 Bakker in Blom (2009) prikazujeta deformirano obliko predora pri različnih vrednostih k_0 .



Slika 5-18: Shematski prikaz deformacij globokega predora pri $k_0 < 1$ (levo) in plitvega predora $k_0 > 1$ (desno) (Bakker in Blom, 2009).

Figure 5-18: Scheme of deformations for deep tunnel at $k_0 < 1$ (left) and shallow tunnel at $k_0 > 1$ (right) (Bakker in Blom, 2009).

V pregledani literaturi je večkrat izpostavljeno, da se debelina obloge izbira izkustveno oz. se upošteva priporočilo razmerja $d/D=1/20$, kar pomeni, da naj bo obloga predora s premerom $D=7$ m, debeline $d=35$ cm. Tak princip izračuna, upošteva za določitev napetosti obremenitev hribine, na podlagi katerih so dimenzionirani konstrukcijski elementi. To je konservativni pristop. Pri dimenzioniranju se tako upošteva predpostavko, da obroč »deluje« le v primeru, ko se členki in obroč obnašajo elastično (Bakker in Blom, 2009). Ob povečevanju deformacije segmentne obloge se pojavi prvi plastični členek. Na tem mestu se nato prenašajo le tlačne osne sile, vendar obloga še vedno zagotavlja določeno stopnjo varnosti. Glede na to, da pri mehaniziranem načinu gradnje predorov stroški obloge lahko znašajo do 40% cene celotnega predora, je optimizacija debeline obloge vsekakor upravičena in ne sme biti le predmet konservativne ocene. Po drugi strani se je potrebno zavedati dodatnih obremenitev na oblogo v času gradnje, saj lahko izvajalec zaradi kontroliranja posedkov na površju, injektiranje praznine za oblogo izvaja z večjimi pritiski (kateri niso bili upoštevani v izračunu). Pri dimenzioniranju segmentne obloge moramo zato upoštevati vsaj naslednje tri obremenitve: tlačna obremenitev betona zaradi potisne sile cilindrov, upogibni momenti zaradi neustreznega zapolnjevanja praznine in upogibni momenti, ki nastanejo zaradi končne konsolidacije hribine (Bakker et al., 2009), ki pokrivajo obtežbe v času gradnje in tudi v času uporabe objekta.

Projektiranje obloge predora v zemljinah zahteva upoštevanje takojšnjega podpiranja hribine, zato v izračunu upoštevamo naslednje predpostavke (Chong et al., 2004):

- določitev vplivov v predorski oblogi lahko izdelamo z ravninskim modelom,
- ker se predor nahaja v zemljini lahko privzamemo, da je obremenitev na oblogo enaka napetostnim primarnega napetostnega stanja oz. se upošteva le zmanjšanje vplivov zaradi deformacije obloge,
- upoštevamo, da med oblogo in zemljino obstaja interakcija zaradi radialnih ali tangencialnih deformacij in
- pri izračunu upoštevamo elastično obnašanje hribine in obloge.

5.3.3 Dimenzioniranje notranje obloge

V tem poglavju bomo opisali postopek dimenzioniranja notranje obloge. Vplive lahko določimo z uporabo empiričnih metod oz. numeričnih analiz. Poleg obtežb, ki smo jih določili na predor je potrebno upoštevati tudi interakcijo med hribino in notranjo oblogo predora. Najbolj razširjena empirična metoda je model nosilca na elastični podlagi, ki sta ga predlagala Duddeck in Erdmann (1982). Sodelovanje obloge in hribine, metoda opiše z vzmetmi, ki imajo togost k_V ki je konstantna. Kontakt z vzmetmi je v modelu predviden v spodnjih 270° oboda predorske cevi. Togost vzmeti določimo z enačbo (Duddeck in Erdmann, 1982):

$$k_V = \frac{M_V}{R}, \quad (5-37)$$

kjer sta M_V modul stisljivosti hribine in R polmer predora.

Modul stisljivosti hribine določimo s poznano enačbo:

$$M_V = E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}, \quad (5-38)$$

kjer je E elastični modul (Young-ov modul) in ν Poissonov količnik.

Maksimalne vplive (moment, osna sila in deformacija) določimo z naslednjimi enačbami:

$$M_{max} = \frac{\sigma_V(1-k_0)R^2}{\left[\frac{4+\{(3-2\nu)(E \cdot R^3)\}}{\{3(1+\nu)(3-4\nu)(E_C I_L)\}} \right]}, \quad (5-39)$$

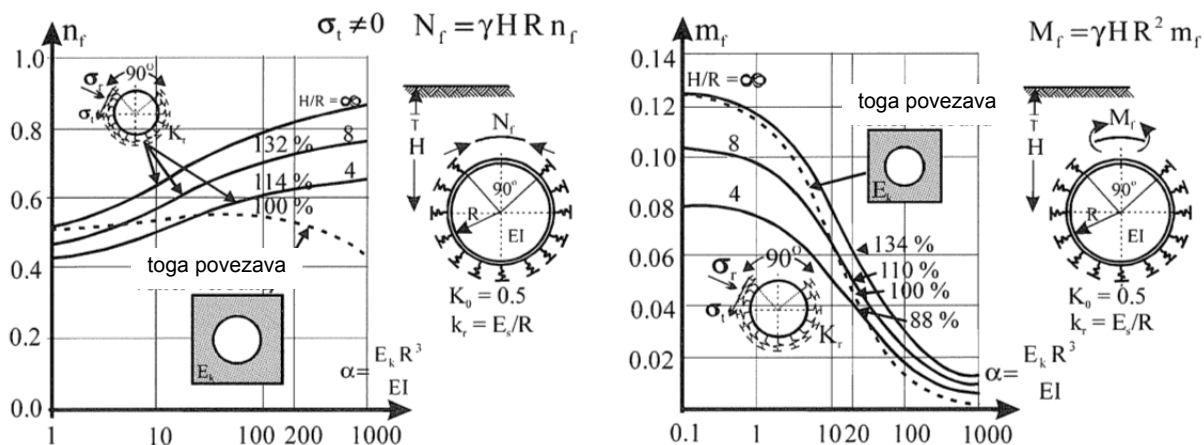
$$N_{max} = \frac{\sigma_V(1-k_0)R}{\left[\frac{2+\left\{\frac{(4\nu \cdot E \cdot R^3)}{E_C I_L}\right\}}{\left\{(3-4\nu)12(1+\nu)+\frac{(E \cdot R^3)}{(E_C I_L)}\right\}} \right]}, \quad (5-40)$$

$$u_{max} = \frac{\sigma_V(1-k_0)\left(\frac{R^4}{E_C I_L}\right)}{\left[\frac{12+\{(3-2\nu)(E \cdot R^3)\}}{\{(1+\nu)(3-4\nu)(E_C I_L)\}} \right]}, \quad (5-41)$$

kjer so:

- σ_V vertikalna napetost hribine,
- k_0 koeficient mirnega zemeljskega pritiska,
- ν Poissonov količnik,
- E_C elastični modul AB obloge in
- I_L vztrajnostni moment obloge.

Na spodnji sliki sta prikazana normirana osna sila in moment pri predpostavki, da je k_0 enak 0,5, razmerje H/R pa odraža globino predora.



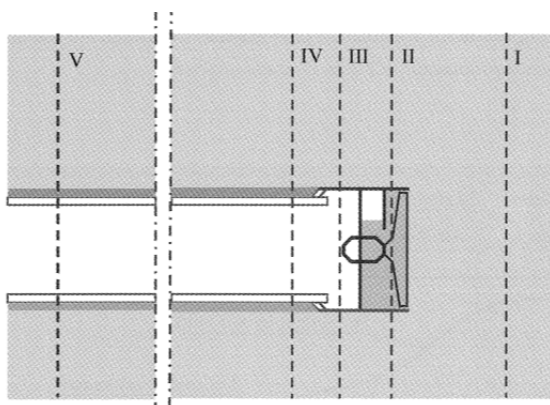
Slika 5-19: Rezultati modela po Duddecku in Erdmannu za različna razmerja H/R pri $k_0=0,5$ (Bakker 2003).

Figure 5-19 : Results from Duddeck and Erdmann model for different ratios of H/R at $k_0=0,5$ (Bakker, 2003).

Opisana metoda vključuje medsebojno interakcijo obloge in hribine in se lahko uporabi v idejni fazi projektov kot dokaj zanesljiva ocena. Pomanjkljivost metode se kaže v neupoštevanju raznolike geološke sestave tal, faznosti gradnje predora in deformacij hribine. Slednje v veliki meri vpliva na povečanje osne sile in momentov. Za bolj natančne in tudi hitrejše izračune uporabljamo numerična programska orodja.

Na podlagi vplivov hribine na konstrukcijo, predizdelane betonske elemente dimenzioniramo po veljavnem Evrocodu 2 za dimenzioniranje betonskih konstrukcij. Dimenzioniranje izvedemo za mejno stanje napetosti in mejno stanje uporabnosti, kjer upoštevamo tudi vpliv obtežbe potiska hidravličnih cilindrov naprave, kot tudi obtežbe v času rokovanja z elementi (skladiščenje, vgradnja, itd.). Elemente preverimo tudi glede požarne odpornosti. Numerične metode omogočajo izračune z upoštevanjem medsebojne interakcije elementov, hribine in TBM naprave. Ravno tako omogoča upoštevanje vozlišč v oblogi, katerim dodelimo togost (Chong et al., 2004). Bakker (2003) predlaga naslednje korake v 2D numeričnem modelu:

- faza 1 – izračun primarnega napetostnega stanja s pravim k_0 ,
- faza 2 – predorska obloga je vključena, zemljina znotraj predora je izključena in teža vode je vključena,
- faza 3 – teža podzemne vode je izključena (faza spremembe teže z bentonitom je zanemarjena),
- faza 4 – upoštevana je izguba prostornine pri izkopu in upošteva se obtežbo zaradi primarnega injektiranja (upoštevano kot linearna obtežba po obodu),
- faza 5 – oceni se učinke konsolidacije,
- faza 6 – če se gradi druga cev, se faze od 2 do 5 ponovi in
- faza 7 – upoštevanje učinkov lezenja.



Slika 5-20: Prikaz faznosti gradnje predora v modelu (Bakker, 2003).

Figure 5-20: Scheme of phased analysis of tunnel construction (Bakker, 2003).

Fazi 5 in 7 se običajno izvajata v primeru priprave izvedbenega načrta in izdelave naprednega 3D modela. Upoštevanje lezenja v izračunu je odvisno od vrste zemljine in koeficienta prekonsolidiranosti. Bakker (2003) z meritvami v treh točkah predora (krona, bok in talni obok) ugotavlja, da se lahko upogibni momenti glede na začetno izračunano vrednost povečajo za faktor 2, osna sila pa za 10%. V zemljinah, ki imajo potencial lezenja je lahko velikostni red momenta bistveno večji. Zato Bakker (2003) predlaga, da se namesto reduciranih vrednosti momentov v oblogi, zaradi sodelovanja obloge in hribine, uporabi kar celotne vrednosti obtežbe zemljine. S tem se pri dimenzioniranju obloge upošteva vpliv lezenja.

Razlike med rezultati, izračunanimi po analitičnem oz. numeričnem pristopu, so lahko dokaj velike, vendar so odvisne od posameznega računskega primera. Pripisemo jih lahko upoštevanju faznosti gradnje v modelu, upoštevanju interakcije po obodu predora, prerazporejanju napetosti v zemljini in s tem tvorjenju samonosilnega obroča in upoštevanju stikov obloge z zmanjšano togostjo.

V izdelavi numeričnega modela lahko uporabimo različne konstrukcijske modele, s pomočjo katerih čim boljše opišemo obnašanje segmentov v interakciji s hribino. Običajno se uporablja model obroča z enako togostjo po celotnem obodu. Togost enotnega obroča je jasno večja, kot togost obroča z upoštevanimi stiki. Če upoštevamo še prečni stik med dvema obročema, ki omogoča vzajemno delovanje, lahko momente razdelimo, kot prikazuje spodnja slika (Koyama, 2003). To opišemo kot model nosilca z vzmetmi, kjer segmente opisujemo z nosilci, stike pa z vzmetmi.

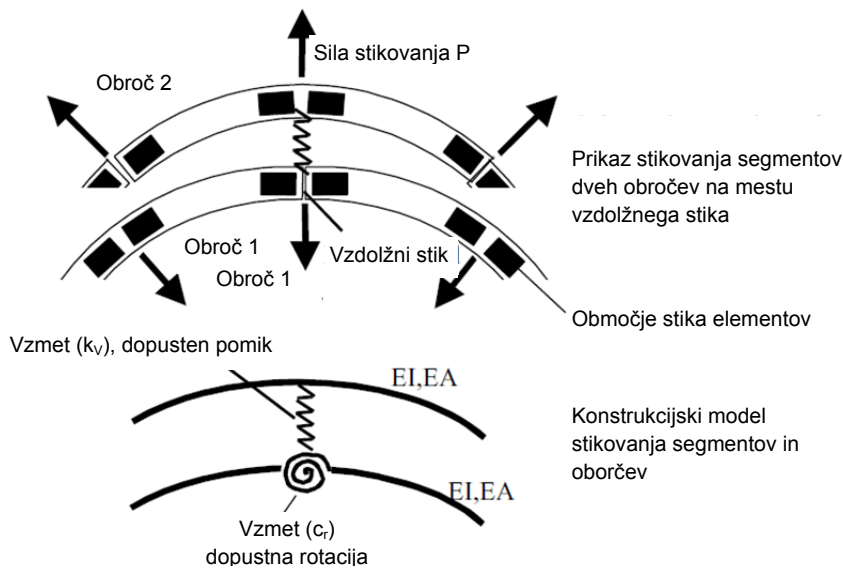


Slika 5-21: Porazdelitev momentov na dva vzajemno delujoča obroča (Blom, 2002).

Figure 5-21: Distribution of bending moments on two coupled rings (Blom, 2002).

Stikom med vzmetmi lahko pripisemo enakomerno obnašanje oz. obnašanje dveh sosednjih obročev opredelimo z vzmetmi, katerih togost opisuje strižne lastnosti stika in dovoljuje

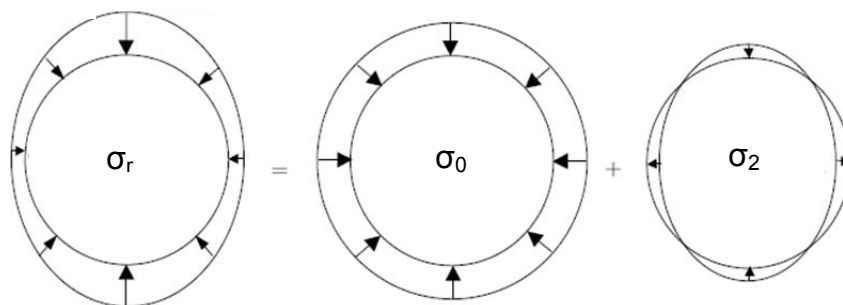
različne deformacije. Ta postopek je razvil Blom (2002). Rezultati se dobro ujemajo z rezultati meritev.



Slika 5-22: Prikaz stikovanja in konstrukcijski model dveh povezanih obročev (Blom, 2002).
 Figure 5-22 : Joint scheme of two coupled rings and structural model (Blom, 2002).

Deformacijo obroča lahko razdelimo na tri komponente:

- enotni pomik u_0 zaradi enotne napetosti σ_0 ,
- sprememba oblike u_{2EI} zaradi upogiba segmentov, ki ga povzročajo napetosti spremembe oblike σ_2 in
- sprememba oblike u_{2ij} zaradi zasuka v vzdolžnih stikih, ki ga povzročajo napetosti spremembe oblike σ_2 .



Slika 5-23: Radialna napetost v notranji oblogi (prirejeno po Blom, 2002).
 Figure 5-23 : Radial stress in segmental lining (adapted from Blom, 2002).

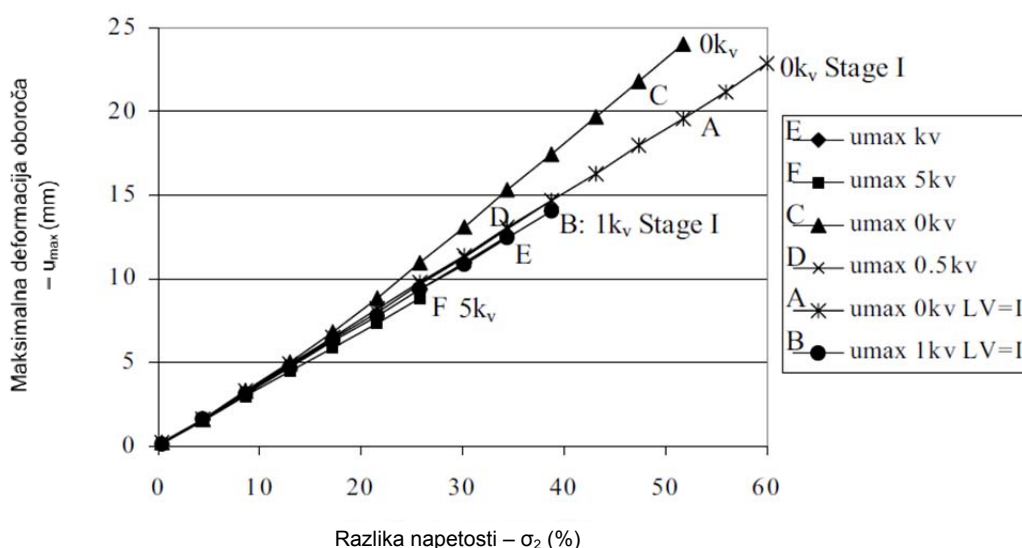
Celotno radialno deformacijo tako lahko zapišemo kot $u = u_0(\sigma_0) + u_{2EI}(\sigma_2) + u_{2ij}(\sigma_2, \Delta u_i)$, kjer je σ_r celotna radialna napetost v oblogi, σ_0 komponenta enakomerne radialne tlačne napetosti, σ_2 komponenta spremenljive radialne napetosti in Δu_i deformacijska razlika na vzdolžnem stiku. Ta je odvisna od sile med dvema segmentoma P_i in trenjske togosti stika (k_v), za katerega velja linearen potek. Rotacijsko togost (c_r) pa Blom (2002) določi kot konstantno vrednost v linearnem območju z enačbo:

$$c_r = \frac{bl_t^2 E_c}{12} , \tag{5-42}$$

kjer so:

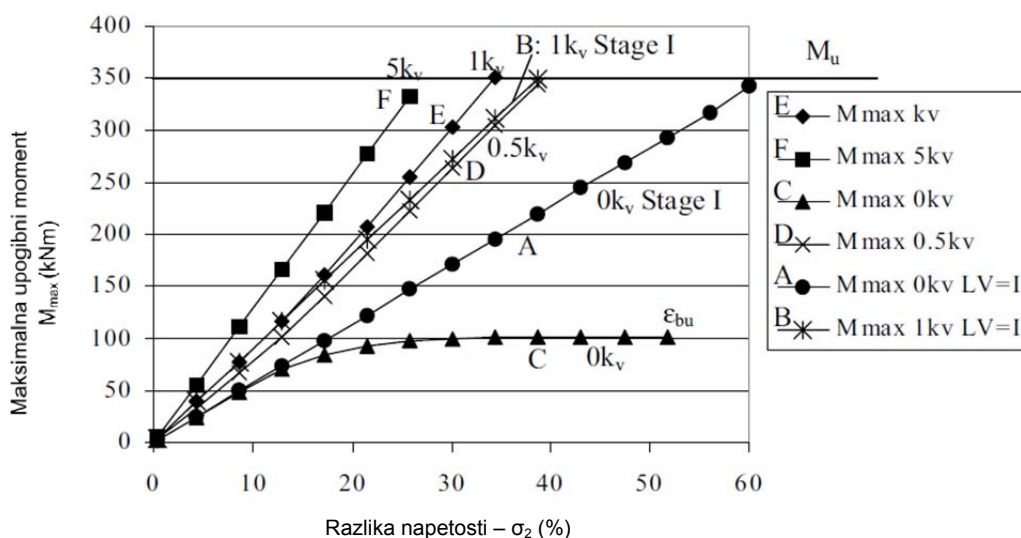
- b polovična širina segmenta obloge,
- l_t srednja višina kontaktne ploskve v vzdolžnem stiku in
- E_c elastični modul betona.

Blom (2002) je izpeljal tudi enačbe za nelinearno področje, kjer je rotacijska togost vzdolžnega stika reducirana. V spodnji sliki za hipotetičen primer (Blom, 2002), prikazujemo vrednosti M_{max} in u_{max} pri različnih vrednostih trenjske togosti stika (k_v) in rotacijske togosti stika (c_r) v odvisnosti od razlike med horizontalnimi in vertikalnimi napetostmi (imenuje σ_2). Na sliki primera A in B upoštevata linearno obnašanje vzmeti v stiku.



Slika 5-24: Vrednosti u_{max} v odvisnosti od razlike napetosti pri spremembi oblike (Blom, 2002).

Figure 5-24: Deformations of u_{max} rings as function of ovalisation loading (Blom, 2002).



Slika 5-25: Vrednosti M_{max} v odvisnosti od razlike napetosti pri spremembi oblike (% od σ_0) (Blom, 2002).

Figure 5-25: Maximum tangential bending moments as function of ovalisation loading (% of σ_0) (Blom, 2002).

Do sedaj smo obravnavali obremenitev obloge le v prečni smeri glede na os predora, vendar je potrebno pri TBM tehnologiji, tako kot pri drugih predizdelanih elementih, preveriti tudi obremenitve, ki nastanejo zaradi proizvodnje segmentov in faznosti gradnje predora, kot prikazuje slika 5-26.

Prvi obtežni primer je dvigovanje segmenta po razopaženju. V tem primeru segment modeliramo kot dve konzoli, kjer moment določimo z enačbo 5-43, kjer je g lastna teža in S dolžina konzole. Pri kontroli upoštevamo projektno natezno trdnost mikroarmiranega betona pri starosti 4 ure.

$$M_{max} = \frac{g \cdot S^2}{2} \quad (5-43)$$

Drugi obtežni primer je skladiščenje segmentov, kjer uporabimo model prostoležečega nosilca na dveh podporah. Maksimalni moment določimo z enačbama 5-44 in 5-54, kjer je L dolžina med podporama, e zamik med podporo in silo F_1 in F_1 sila, ki prihaja iz segmentov zloženih eden na drugega. Tudi tu pri kontroli upoštevamo projektno natezno trdnost mikroarmiranega betona pri starosti 4 ure.

$$M_{max} = g \cdot \left(\frac{L^2}{8} - \frac{S^2}{2} \right) + F_1 \cdot e \quad (5-44)$$

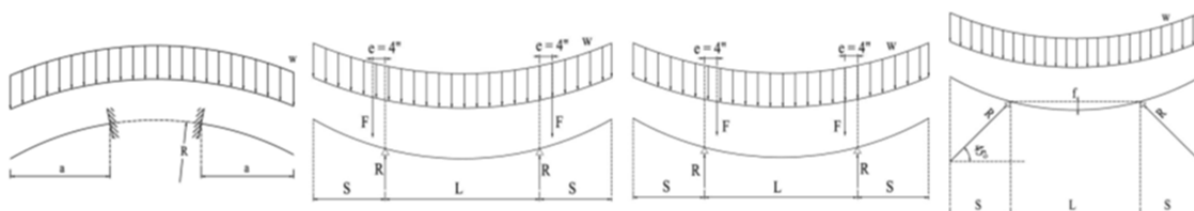
$$M_{max} = g \cdot \left(\frac{S^2}{2} \right) + F_1 \cdot e \quad (5-45)$$

Tretji obtežni primer je transport segmentov. Pri tem primeru upoštevamo iste enačbe kot v primeru skladiščenja, pri čemer je dinamični faktor 2 in starost betona 28 dni.

Podoben slednjima je tudi **četrti obtežni primer**, kjer segmente dvigujemo, prestavljamo ali vgrajujemo. Maksimalni moment določimo z enačbo 5-46 oz. 5-47. Starost betona je 28 dni, dinamični faktor pa 2 (Bakhshi in Nasri, 2015).

$$M_{max} = g \cdot \left(\frac{L^2}{8} - \frac{S^2}{2} \right) + g \cdot \left(\frac{L}{2} + S \right) \quad (5-46)$$

$$M_{max} = \frac{g \cdot S^2}{2} \quad (5-47)$$

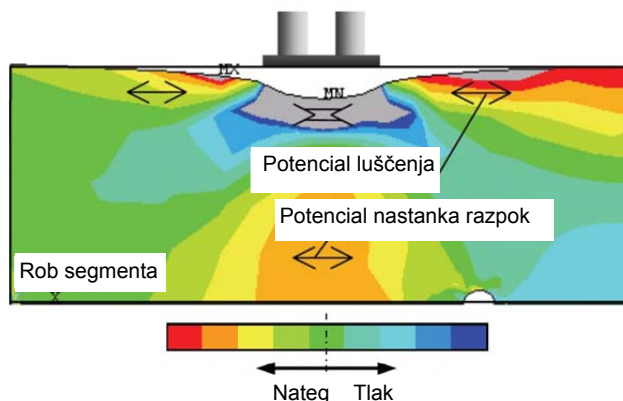


Slika 5-26: Prikaz računskih modelov (statični sistem konzole in prostoležečega nosilca) (Bakhshi in Nasri, 2014).

Figure 5-26: Scheme of structural models (cantilever and supported beam) (Bakhshi and Nasri, 2014).

Za napredovanje naprave uporabljamo hidravlične cilindre, ki potrebno potisno silo prenašajo na vgrajene segmente. Ta obtežni primer je eden od najbolj kritičnih, ki izvirajo iz operativnih

korakov naprave. Izdelamo lahko kontrole tlačne in natezne trdnosti ter kontrolo cepljenja betona. Vplive lahko določimo z analitičnimi ali numeričnimi izračuni oz. uporabimo priporočene enačbe iz smernic (DAUB, ACI, ipd.).

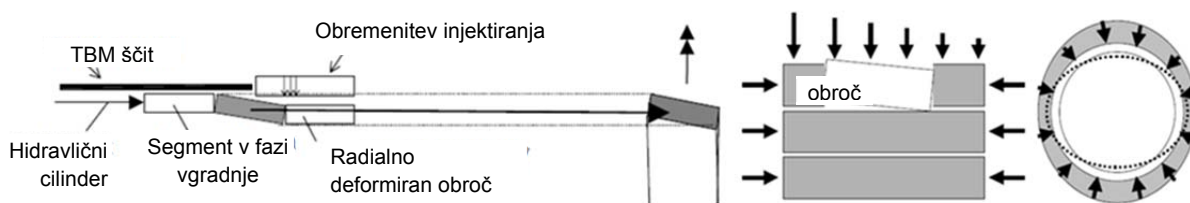


Slika 5-27: Shematski prikaz razporeditve osnih sil v segmentu zaradi potisne sile (Bakhshi in Nasri, 2014).

Figure 5-27: Scheme of normal forces distribution in segment due to thrust force (Bakhshi and Nasri, 2014).

Iz primerov prakse lahko zaključimo, da pri vgradnji segmentov pride še do mnogih drugih obteženih primerov segmenta ali obroča, ki rezultirajo v poškodbah. Dva porušna mehanizma sta bolj izrazita, saj zaradi opiranja cilindrov nastaneta takšna porušna mehanizma, ki povzročata napetosti, katere lahko presegajo trdnostne lastnosti betona. To sta:

- torzijska obremenitev segmentov in
- neenakomeren prenos potisne sile na segmente in vzdolžne stike.



Slika 5-28: Prikaz torzijske obremenitve (levo) in neenakomerne potisne sile (desno) (Blom, 2002).

Figure 5-28: Scheme of torsion mechanism (left) and inadequate support pressure (right) (Blom, 2002).

Torzijska obremenitev segmenta je tipičen obtežni primer. Do take obremenitve pride, ko je obroč na vmesni točki med ščitom in končno pozicijo, kjer je prostor med segmenti in zemljino že zapolnjen, obroč pa prevzame tudi obtežbo zemljine. Pri tem pride do velikih strižnih napetosti v segmentu pravokotno na segment.

Drugi primer je izrazito praktične narave. V računskih kontrolah namreč upoštevamo, da so potisne sile enakomerno razporejene na segment, ki simetrično nalega na podporah, kar v fazi izvedbe to praktično nikoli ni doseženo. Neravno podpiranje in neenakomerno obremenjevanje segmentov predstavlja ekscentrično obremenitev. Če se obremenitev zgodi

v ravnini, se v segmentu tako pojavijo strižne napetosti, če pa se ekscentričnost pojavi še v vzdolžni smeri, to pomeni torzijsko obremenitev segmenta. Pri tem se pojavi možnost nastanka razpok na površini segmenta.

Kontrole betonskega elementa (kontrola napetosti, kontrola razpok, ipd.) nato izdelamo kot to predpisuje Eurocode 2, pri čemer moramo upoštevati ekscentričnost obremenitve. Blom (2002) v zaključku svoje naloge izpostavi stično točko med projektanti naprave in projektanti obloge, kjer se pojavi zmanjšanje kakovosti. Optimizacija predora zato ni odvisna le od optimiziranja posameznih elementov, vendar celotnega procesa načrtovanja.

6 RAVNANJE Z GRADBENIMI ODPADKI IN VPLIVI NA OKOLJE

6.1 Splošno

Zmotno je mišljenje, da se mora izkop smatrati kot odpadek, saj mu s tem pripišemo oznako neuporabnega, celo potencialno nevarnega materiala. V ta namen je del naloge namenjen ravno ravnanju z izkopanim materialom in oceni vplivov na okolje, sicer le s področja ravnanja z gradbenimi odpadki. Namreč med izvedbo predorskih del, bo ustvarjena velika količina gradbenih odpadkov, med katere uvrščamo izkopni material, ruševine, odpadni konstrukcijski material in podobne odpadke. Del gradbenega odpadka ima tudi visoko uporabno vrednost, kar je smiselno vključiti v postopke ravnanja z odpadki, že v samem začetku projektiranja. Čeprav je predor samostojen (neodvisen) objekt, pa se pri projektiranju poskuša uravnotežiti masno bilanco. Nekoliko težje je to dosežati pri projektih, kot so podzemna železnica ali podobni objekti.

V Sloveniji področje gradbenih odpadkov ureja naslednja zakonodaja:

- Zakon o varstvu okolja (Uradni list RS št. 39/06 UPB-1, 70/08, 108/09, 48/12, 57/12, 92/13, 56/15, 102/15, 30/16) – krovni zakon,
- Uredba o vrstah posegov v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje (Uradni list RS št. 51/14, 57/15),
- Uredba o odpadkih (Uradni list RS št. 37/15 in 69/15),
- Uredba o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih – področna uredba (Uradni list št. 34/08),
- Uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov (Uradni list št. 34/08, 61/11) in
- Uredba o obdelavi odpadkov v premičnih napravah (Uradni list št. 34/08).

V zakonu o varstvu okolja je podana osnovna definicija, kaj odpadek je in sicer to je snov ali predmet, ki ga njegov povzročitelj ali druga oseba, ki ima snov ali predmet v posesti, zavrže, namerava ali mora zavreči. Ravnanje z odpadki pa pomeni zbiranje, prevažanje, predelovanje in odstranjevanje odpadkov, vključno z nadzorom teh ravnanj in ukrepi po prenehanju delovanja naprave za ravnanje z odpadki. Nadalje uredba o odpadkih opredeli še druge pojme, kot npr.: povzročitelj odpadkov, imetnik odpadkov, obdelava odpadkov, idr.. V svojem 9. členu postavi hierarhijo ravnanja z odpadki, ki jo sestavlja pet korakov: preprečevanje nastajanja odpadkov, priprava za ponovno uporabo, recikliranje, drugi postopki predelave in odstranjevanje. Obdelavo odpadkov lahko povzročitelj izvede sam, jo odda ali prepusti zbiralcu odpadkov, oziroma jo odda izvajalcu obdelave.

Uredba o odpadkih zahteva tudi izdelavo načrta ravnanja z odpadki, kar pomeni, da je potrebno za predvidene količine odpadkov podati količine odpadkov, opis predvidenih tehničnih in organizacijskih ukrepov za ravnanje z odpadki in opis ukrepov za preprečevanje in zmanjševanje škodljivih vplivov na okolje in človeka ter navedbo rokov izvedbe. Ta zahteva velja, če na enem mestu nastane več kot 150 ton odpadkov oz. 200 kilogramov nevarnih odpadkov. Za izvajanje obdelave je potrebno okoljevarstveno dovoljenje.

Specifičnost odpadkov, ki nastanejo pri gradbenih delih, ureja uredba o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih in uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov. Prva uredba še nekoliko natančneje definira posamezne izraze, kot npr.: priprava gradbenih odpadkov za ponovno uporabo in recikliranje gradbenih odpadkov v reciklirane gradbene materiale. V 3. členu uredba opredeli tudi, za katere odpadke določila ne veljajo, kjer v 2.

točki vidimo, da je to zemeljski izkop, ki ni onesnažen z nevarnimi snovmi, kar pa ureja uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov. Slednja zemeljski izkop ali umetno pripravljeno zemljino opredeljuje z namenom izboljšanja ekološkega stanja tal. V prilogah določa tudi največje vrednosti anorganskih parametrov in fizikalno-kemijske lastnosti, katere mora izpolnjevati izkop oz. pripravljena zemljina za ponovno uporabo.

Gradbeni odpadki, ki nastanejo pri gradnji predora, izpolnjujejo pogoje za resno obravnavo, saj dosegajo tako količinske kriterije, kot tudi postopkovne kriterije, s pomočjo katerih zagotavljamo primernost za ponovno uporabo. Ponovna uporaba izkopnega materiala zmanjša potrebe po prostoru za odlaganje in zmanjša potrebe po primarnih surovinah, kar ima lahko ugodne finančne učinke.

6.2 Možnosti uporabe gradbenih odpadkov

Vsak proizvodni proces naj bi bil načrtovan tako, da poskuša izpolnjevati čim več načel trajnosti, kar pomeni ekonomsko razumnost, kakovost izdelka, varnost pri delu in ustrezno varovanje okolja. Za doseganje slednjega lahko uporabimo načela ponovne uporabe ali recikliranja. Gradbeni odpadki lahko v izvorni obliki ali predelan, uporabljamo kot agregat za betone, asfalte, cestne nasipe oz. v industriji (Bellopede et al., 2011). Najpogostejši načini uporabe so kot nasipni materiali v cestogradnji ali za krajinsko ureditev, zgornji ustroj cest in betone, zelo redka pa je industrijska uporaba surovine v izvorni obliki.

Predori in podzemni objekti v mestih oziroma gorskih predelih, predstavljajo ključno vlogo pri transportu, zagotavljanju vode in odvajanju odpadnih vod. Pri izvedbi teh objektov, nastaja velika količina izkopanega materiala. Investitorji se v večini sklicujejo na minimaliziranje ali optimiziranje gradbenega odpadka, vendar praksa kaže, da temu ni tako. To verjetno izhaja iz pomanjkanja znanja glede stroškov, možnosti uporabe, ocene kakovosti in količine ter trajnosti teh materialov (Kwan, Jardine, 1999). Danes se sicer počasi, vendar kljub temu pojavljajo projekti, ki obravnavajo možnosti ponovne uporabe. Kot primere lahko omenimo projekt SARMA, ki je obravnaval trajnostno proizvodnjo in reciklažo materiala za pripravo agregata, še trajajoč projekt DRAGON, ki analizira možnosti uporabe izkopanega materiala pri gradnji predorov v različnih industrijskih panogah in projekt REMUCK, ki obravnava inovativne možnosti reciklaže gradbenih odpadkov iz izkopa.

Uporaba izkopnega materiala je predvsem odvisna od pogojev:

- nacionalne zakonodaje, ki naj bi s svojimi smernicami upoštevala zahteve direktive evropskega parlamenta in sveta o odpadkih in razveljavitvi nekaterih direktiv 2008/98/ES,
- tehničnih in okoljskih lastnosti neobdelanega izkopanega materiala,
- ocene stroškov obdelave izkopanega materiala in primerjava s tradicionalnimi alternativnimi viri osnovnih surovin in
- ocene dejanske uporabe na aktualnem projektu (razpoložljive/potrebne količine, alternative trga surovin) oz. kot priprava za druge projekte (obdelan ali neobdelan material na zalogo).

Zakonodaja pokriva definicijo posameznega materiala, njegove kemijske in fizikalne lastnosti ter možnost njegove uporabe (certificirani gradbeni proizvodi). Tehnične lastnosti materiala podajajo njegove značilnosti in izpostavljajo možnosti predelave v drugo uporabno gradivo.

Ekonomske in okoljske zahteve pokrivajo dodano vrednost materiala, katero lahko dobimo z možnostjo ponovne uporabe, pri čemer morajo biti vplivi na okolje znotraj dovoljenih vrednosti (Oggeri et al., 2014b).

Nemške smernice (LAGA 20) za ravnanje z izkopanim materialom pri gradnji predorov postavljajo 6 razredov, v katere razvrščamo material. Materiale, katere lahko ponovno uporabimo, razvršča v razrede od Z0 do Z2, materiale, ki so primerni za odlaganje kot trajni viški, pa v razrede od Z3 do Z5 (Maidl et al., 2012). Uporabno vrednost odpadkov nato določimo z analizami sestave materiala, s pomočjo katere jih primerno razvrstimo po namenu ponovne uporabe. V Sloveniji trajno odlaganje odpadkov ureja zakonodaja o nenevarnih odpadkih.

Uporabnost materiala lahko določimo s posameznimi preizkusi, ki so predpisani s standardiziranimi postopki. V Sloveniji so veljavni standardi, izdani pri slovenskem inštitutu za standardizacijo (SIST) oz. drugi standardi, izdani v okviru Evropskega komiteja za standardizacijo (CEN) in nacionalni standardi drugi članic Evropske unije, če ni izdanega slovenskega standarda. Primer standarda, ki podaja zahteve za material, ki je primeren za določeno uporabo, je standard SIST EN 13242:2003+ A1:2008 (Nacionalni dodatek): Agregati za nevezane in hidravlično vezane materiale za uporabo v inženirskih objektih in za gradnjo cest. Vsebina podaja zahteve za:

- zrnavost,
- obliko grobega agregata,
- delež zdrobljenih delcev,
- vsebnost finih delcev,
- kakovost finih delcev,
- odpornost proti drobljenju,
- odpornost proti obrabi,
- gostoto,
- vpojnost vode,
- odpornost na zmrzovanje in tajanje,
- nevarne snovi in
- delež organskih delcev (humus).

Ponovno uporabo materialov v cestogradnji, obravnava tehnična smernica TSC 06.800 (2001), ki podaja možnosti ponovne uporabe materialov, kot je prikazano v sliki 6-1.

Poleg naštetih možnosti se material lahko uporabi tudi za: nasipni material, zasipe jarkov, zasipe med temelji, drenaže, za sanacije (odlagališč, posledic rudarjenja, drugih posegov v okolje), rekultiviranje okolice in gradnjo športnih igrišč, vendar moramo pri tem upoštevati uredbo o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov (2008).

Skupine materialov	Področje ponovne uporabe materiala										
	A	B	C1	C2	D1	D2	E	F	G1	G2	H
	Proti-hrupni nasipi	Nevezane vozne površine in poti	Nasipi	Zasipi in prekritja	Zasipi jarkov	Utrditve in izboljšanje tal	Nevezane nosilne plasti	Vežane nosilne plasti s hidravličnimi vezivi	Vežane nosilne plasti z bitumenskimi vezivi	Asfaltne obrabne plasti	Cementno - betonske krovne plasti
Voziščna konstrukcija											
1 asfaltne zmesi	x	x	0	0	0	0	0	0	x	x	0*
2 cementni beton	x	x	x	x	x	x	x	x	0		x
3 ostali hidravlično vezani materiali	x	x	x	x	x	x	x	x	0		x
4 naravni kamen, drobljenec	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5 prodec, pesek	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	x
6 ostali kamniti materiali	x	0	x	0	0	0					
7 opeka, zidaki	x	x	x	0	x	x	0	0	0		0

Slika 6-1: Možnosti ponovne uporabe gradbenih odpadnih materialov (TSC 06.800:2001).

Figure 6-1: Options of construction waste reuse (TSC 06:800:2001).

6.3 Ravnanje z gradbeni odpadki pri uporabi TBM tehnologije

Smiselno je najprej poudariti, da so določene sekvence del pri gradnji predorov ne glede na izbrano metodo ali tehnologijo gradnje enake. S tem mislimo na portalna območja, ventilacijske jaške in druge podobne objekte. V tem poglavju, pa se bomo posvetili le izkopanemu materialu, ki ima lahko zaradi uporabe TBM tehnologije določene primesi.

Izkopani material razlikujemo glede na vrsto hribine. V kamnini je izkop bolj homogen, delci so podobne velikosti (velikost je odvisna od razmika med diski in orientacije plasti materiala), prisoten je tudi sorazmerno velik del zelo finih delcev. Izkop v mehki kamnini oz. trdni zemljini običajno daje material, ki je podoben blatu, kjer so večji delci podobni grobememu produ z visoko trdnostjo oz. zemljastim grudam in veliko prisotnostjo fine frakcije. Pri tovrstnih hribinah se uporabljajo dodatki, ki zagotavljajo potrebne lastnosti materiala v izkopni komori. Material iz izkopa v zrnatih zemljinah ima lastnost rahle, nekoherentne zemljine, kar je odvisno od vrste uporabljenih dodatkov (Oggeri et al., 2014b).

Običajno v zemljinah ali mehkih kamninah uporabljamo napravo z izplako ali EPB tehnologijo. Naprava z izplako ponavadi uporablja bentonit oz. druge dodatke. Zaradi optimizacije gradnje želimo izkopni material reciklirati tako, da lahko ponovno uporabimo bentonit. Izvirni izkopani material bo glede na plastovitost v območju premera naprave povsem mešan. Najbolj optimalno bi bilo ves izkopan material ponovno uporabiti pri gradnji predora, vendar to ni mogoče, zato je potrebno poiskati alternativne možnosti. Odločitev, kateri so najbolj primerni načini uporabe izkopnega materiala, ni enaka za vse predore in je odvisna od okoljskih, tehničnih, ekonomskih, geoloških in drugih parametrov. Pri uporabi TBM metode se izkaže, da so geometrijske karakteristike izkopnega materiala drugačne kot pri klasični metodi z miniranjem. Zrna so namreč bolj podolgovata, kar pomeni plastovito sestavo betona in s tem neugodno in nehomogeno strukturo (Bellopede et al., 2011a).

Podolgovata zrna lahko tvorijo plastovito sestavo betona, ravno tako se v primeru vodoravne orientacije takih zrn poveča možnost nastanka vodnih žepkov med betoniranjem (Gertsch et al., 2000).

Naprava z izplako, uporablja kot medij polimerno ali bentonitno suspenzijo. Slednja je najbolj običajna. V stiku z vodo nabreka in lahko poveča prostornino tudi deset krat. Za nemoten izkop se postavi oprema za pripravo bentonita ter separacijska in filtrirna naprava za reciklažo bentonita (Maidl et al., 2012). V separacijski napravi ločimo večje delce, v filtrirni napravi pa manjše delce. Večje delce sestavljajo prod, pesek, delci gline, manjši delci pa so glina in bentonitna usedlina. Z vidika varstva okolja je pomembno ali lahko materiali in procesi vplivajo na okolje. Bentonit je naravni material, ki ne vsebuje onesnaževal, polimerne suspenzije pa so kemijske sestavine, ki imajo lahko vpliv na okolje. Ponovna uporaba izkopenega materiala je v veliki meri odvisna od količine vsebnosti bentonita, saj le-ta vpliva na obnašanje materiala (prepustnost, vlažnost, vgradljivost,...). Prisotnost manjše količine bentonita, ne vpliva na strižni kot, kohezijo in stisljivost izkopenega materiala (Ketelaars, Saathof, 2000).

Poleg dodatkov, ki jih uporabljamo za stabilizacijo hribine, se uporabljajo tudi sredstva za izboljševanje lastnosti izkopenega materiala, masti za tesnjenje štita, kemijska sredstva za zmanjšanje obrabe izkopnih orodij in druge dodatke. V primeru že biološko degradiranega dodatka, lahko prode in peske obdelamo zgolj z grobim filtriranjem in sejanjem, fina frakcija, ki je pomešana s suspenzijo, pa nadaljuje pot na sekundarno filtracijsko napravo, katero sestavljajo centrifuge in hidrocikloni (Renghausen et al., 2014).

EPB naprava običajno ne potrebuje dodatkov, če pa, so to penila ali druge polimerne suspenzije. Z njimi namreč izkopenemu materialu izboljšamo viskoznost in dvignemo kohezijo. Z vidika varovanja okolja je potrebno preveriti ali je izkopani material nevaren. Izvajalec in proizvajalci suspenzij ponavadi ne želijo zaupati sestavin dodatkov, zato je potrebno izvesti laboratorijske analize, s katerimi dokažemo dopustne vplive na okolje. Sestava odpadkov omogoča naravno razgradnjo v stiku z zrakom in UV svetlobo. Ketelaars in Saathof (2000) navajata primer popolne razgradnje dodatkov v 15 dneh pri stiku z zrakom in v 100 dneh v anaerobnem okolju (brez prisotnosti zraka). Čas razgradnje je sicer odvisen od vrste uporabljenih dodatkov, vendar lahko znotraj gradbišča zagotovimo začasno deponijo, kjer material odleži toliko časa, da postane primeren za nadaljnjo obdelavo.

Oggeri in sodelavci (2014a) so predstavili tipe izkopenega materiala, ki so odvisni od uporabljene metode izkopa ter od hribine, v kateri se predor nahaja. Za TBM metode so ti tipi razvrščeni v razrede MT7 do MT13. Tipi ločijo TBM izkop na material brez uporabe dodatkov in izkopni material, kjer so bili uporabljeni dodatki. Predstavljeni so v spodnji preglednici.

Preglednica 6-1: Tipi izkopenega materiala glede na uporabljeno tehnologijo in vrsto hribine (prirejeno po Oggeri et al., 2014a).

Table 6-1: Spoil types according to machine system and ground structure (adapted from Oggeri et al., 2014a).

Tip izkopenega materiala	Vrsta hribine	TBM izkop
MT7	Kamnina	Pretežno enoznat material, možna prisotnost večjih blokov, zmi v obliki ploščatih odkruškov, visok delež finih zrn
MT8	Mehka kamnina / trdna zemljina	Nepravilno oblikovana zrna, širok razpon velikosti zrn, petrografska heterogenost, ob prisotnosti vode židka konsistenca in zelo nizka prepustnost
MT9	Grobozrnata zemljina	Dobro stopnjevana zrnava, v večini enakomerna oblika zrn, dobra prepustnost, možnost prisotnosti večjih zrn
MT10	Drobozrnata zemljina	Pretežno enoznat material v velikosti melja in gline, homogena sestava, plastične lastnosti pri naravni vlažnosti, tehnologija ni primerna za veliko vlažnost
Tip izkopenega materiala	Vrsta hribine	TBM izkop z uporabo dodatkov
/	Kamnina	Tehnologija ni uporabna
MT11	Mehka kamnina / trdna zemljina	Slabo stopnjevana zrnava, židka konsistenca, nizka kohezija, možne lastnosti sprijemanja/lepljenja, slaba prepustnost, material še vsebuje dodatek, prisotne tudi masti v sledih
MT12	Grobozrnata zemljina	Dobro stopnjevana zrnava, v večini enakomerna oblika zrn, možnost prisotnosti večjih zrn, bolj židka konsistenca, slabša prepustnost, ki je odvisna od časa in razgradnje dodatkov, prisotnost dodatkov in masti v sledih
MT13	Drobozrnata zemljina	Pretežno enoznat material v velikosti melja in gline, homogena sestava, plastične lastnosti pri naravni vlažnosti s povečano sposobnostjo lepljenja, prisotnost dodatkov in masti v sledih, nizka prepustnost

Uporaba izkopenega materiala je odvisna od njegove kakovosti. Kakovost materiala določa njegova mineralna in kemijska sestava. Visoko kakovostnega lahko uporabljamo kot agregat za betone ali asfalte, srednje kakovostnega za izdelavo spodnjega ali zgornjega ustroja cest in nasipe, tistega slabše kakovosti pa za pridobivanje zemljišč oz. za umetne nasipe (Oggeri et al., 2014a). Obdelavo trdnega dela izkopenega materiala lahko razdelimo na: drobljenje, sejanje in razvrščanje. Pri tem dobimo različne produkte: uporaben material, trden odpadek, mulj in odpadno vodo. Odpadno vodo je potrebno pred izpustom v okolje očistiti (Bellopede et al., 2011a). Obdelavo trdnega odpadka lahko razdelimo tudi na več stopenj: agregat z visoko tlačno trdnostjo, drugorazredni agregat, tretjerazredni agregat za zasipavanje, negradljiv material in onesnažen ali nevaren material. Sejalna krivulja pokaže veliko razliko v sestavi izkopenega materiala glede na metodo izvedbe predora. Pri TBM metodi je bistveno večja zastopanost fine frakcije, kar pomeni tudi višji koeficient raztrosa pri (izkopu z

miniranjem 1,5 in izkopu s TBM 1,7). To predstavlja večje potrebne kapacitete deponij viškov materiala (Bellopede et al., 2011a). Material, ki ga uporabljamo kot agregat, mora izpolnjevati fizikalne, mehanske in kemične lastnosti, podane z direktivo evropskega sveta 89/206/CE. Kljub izpolnjevanju vseh parametrov, se je potrebno izogibati glini, mavcu in drugim mehkim materialom ter delcem, ki so vlaknasti ali podolgovate oblike (Oggeri et al., 2014a). V spodnji preglednici podajamo možnosti uporabe izkopanega materiala.

Preglednica 6-2: Možnost uporabe izkopanega materiala (prirejeno po Oggeri et al., 2014a).
Table 6-2: Possible muck/spoil destinations (adapted from Oggeri et al., 2014a).

Tip izkopa	Agregat za izdelavo betonov	Nasipi sp. in zg. ustrojov cest	Pridobivanje zemljišč	Umetni nasipi
MT7	DA ^{a,b,d}	DA ^{a,b,d}	Možno	Možno
MT8	NE	DA ^{a,b,c,d,f}	DA ^a	DA ^a
MT9	Možno ^{a,b,d}	DA ^{a,b}	DA ^a	DA ^a
MT10	NE	Možno ^{a,b,d,f}	DA ^{a,f}	DA ^{a,f}
MT11	NE	Možno ^{a,b,c,d,e,f} , **	DA ^{a,f} , **	DA ^{a,f} , **
MT12	Možno ^{a,b,d} , **	Možno ^{a,b,c,f} , **	DA ^{a,f} , **	DA ^{a,f} , **
MT13	NE	NE	Možno ^{a,f} , **	Možno ^{a,f} , **

Legenda: * potrebna je predhodna obdelava, ** zahtevana potrditev, da je material okoljsko neoporečen, a – pranje in dreniranje, b – sejanje, c – usedanje in ločevanje finih delcev, d – drobljenje, e – pH kemična stabilizacija, f – dodajanje veziva (apno ali cement), g – drugi ukrepi

Girmscheid (2013) predlaga poenostavljen proces dnevnega preverjanja uporabnosti izkopanega materiala. Postopek poteka tako, da izkopni material takoj na mestu izkopa ocenimo vizualno, opravimo sejnalno analizo, preverimo mineraloško sestavo in določimo trdnost. Iz teh podatkov ocenimo ali je material primeren kot gradbeni material ali ne. Če ni, potem preverimo prisotnost nevarnih snovi, kar pokaže ali moramo material odložiti na odlagališčih trajnih viškov oz. ga lahko uporabimo za zasipavanje. Če je primeren kot gradbeni material, ga mehansko obdelamo (drobljenje, sejanje, pranje, itd.) in ga uporabimo, kot agregat za betone (brizgani beton pri gradnji predora) oziroma, kot agregat za pripravo nasipnih mešanic.

Določitev lastnosti izkopanega materiala pokaže primer, ki je bil izdelan za predor zgrajen z EPB napravo. V času napredovanja del so bili odvzeti trije različni vzorci izkopa in sicer:

- F1 – mehke kamnine podobne skrilavcu,
- F2 – glinavec oz. zaglinjen peščenjak in
- F3 – skrilavec s prisotnostjo večjih trdnih delcev.

Zaradi raznolikosti izkopanega materiala je bil le ta v primeru izkopa v F1 in F2 na koncu transportnega traku posut z apnom. S pomočjo apna je bilo možno stabilizirati kemijsko aktiven material in omogočiti normalen proces nakladanja in prevoza na gradbišču. Prvotna ocena je bila, da je material z dodatkom apna slabe kakovosti in zato primeren samo za zasipavanje oz. pridobivanje zemljišč (Oggeri et al., 2014b). Potencialna uporabnost materiala, obdelanega z apnom, je omejena, saj zaradi visoke bazične vrednosti ni primerna za uporabo v kmetijske namene.

Stabilizacija z apnom se uporablja za glinene ali meljaste zemljine, kjer se z dodajanjem apna sproži reakcija. V začetnem delu reakcije se izvede ionska izmenjava, s pomočjo katere se minerali v glini sprimejo (flokulacija), zmanjša pa se tudi plastičnost, potencial nabrekanja in vsebnost vlage. Drugi del reakcije se imenuje pucolanska reakcija, kjer steče postopek cementizacije in s tem dvig trdnosti in je zato material bolj primeren za vgrajevanje.

Vzorci so bili nato preiskani v laboratoriju in določili njihove parametre (Oggeri et al., 2014b). Fizikalni parametri vzorcev F1 in F2 kažejo, da lahko material opišemo kot drobno zrnate zemljine ali zaglinjenega peska oz. gline (SC/CL). Struktura materiala je bila zaradi apna nekoliko heterogena (grudice drobnih delcev). Ugotovljeno je bilo, da material že z manjšo spremembo vlažnosti, zelo hitro spremeni meje plastičnosti ali konsistenco. Fizikalni parametri vzorca F3 kažejo, da lahko material opišemo kot zaglinjen pesek (SC). Material je bolj homogen kot vzorca F1 in F2. Raziskava pokaže, da slabši izkopni materiali, kjer so bili uporabljeni tudi dodatki, zahtevajo bistveno bolj obsežno obdelavo materiala z namenom doseganja zadovoljivih zahtev za ponovno uporabo. Materiala F1 in F2, ki sta obdelana z apnom, dosežata ustrezno konsistenco in plastičnost, da jih lahko uporabljamo za zasipe depresij (izravnave) oz. jih je potrebno odložiti kot viške materialov. Hkrati je potrebno zaradi spreminjajočega stanja izkopenega materiala izvajati tekoče laboratorijske raziskave, kar lahko ob konkretni spremembi sestave izkopenega materiala, rezultira tudi v neustreznosti predelovalne naprave. Material F3, ki ima lastnosti zaglinjenega peska, ustreza zahtevam za gradnjo nasipov (Oggeri et al., 2014b).

Za ustrezno obdelavo izkopenega materiala, pridobljenega pri TBM metodi v trdnih zemljinah ali kamninah, so primerne fiksne naprave, ki imajo vgrajen dvostopenjski rotacijski drobilnik in sekundarni čeljustni drobilec. To zagotovi bolj enakomerno obliko agregata in je zato bolj primeren za izdelavo betonskih mešanic (Bellopepe et al., 2011b). Kakorkoli, izkušnje kažejo, da morajo naprave za predelavo izkopenega materiala omogočati fleksibilnost obdelave, kar omogoča obdelavo raznolikega materiala (Kwan and Jardine, 1999). Stopnje mehanske obdelave izkopenega materiala se med seboj močno razlikujejo tudi v učinkovitosti in vloženi energiji. Kemijska stabilizacija z apnom, elektrofitrskim pepelom, cementom ali bitumnom je z vidika stroškov učinkovita in najbolj primerna. Podatke o omenjenih načinih fizikalne obdelave nato vključimo v vrednotenje, s katerim preverimo ekonomsko upravičenost.

Najbolj pogosta uporaba materialov je v nasipih cestnih teles. V spodnjem ustroju se uporabljajo materiali, ki imajo nizko kohezijo in nizko trdnost. V zgornjem ustroju, pa se lahko uporabljajo materiali brez kohezije in z visoko trdnostjo. Materiali za obrabne plasti (asfalt) morajo izpolnjevati tudi pogoje nosilnosti in trajnosti, kar mora biti preverjeno z laboratorijskimi analizami. Pomembnost posameznih parametrov je odvisna od načina uporabe izkopenega materiala. Pogost način uporabe izkopenega materiala je tudi pridobivanje prostora oziroma uporaba za zasipanje depresij. To izhaja iz zelo nizkih pogojev za izpolnjevanje tehničnih in okoljevarstvenih zahtev. Zelo redka pa je uporaba materialov kot primarne surovine v industriji. Glineni izkop, bi se lahko uporabljal v opekarnah, apnec in dolomit pa bi se lahko uporabljala v procesih kemične, papirne, steklarske ali jeklarske industrije (Oggeri et al., 2014a).

Poleg ocene tipa izkopenega materiala je odločitev o najprimernejšem načinu odvisna še od nekaterih že omenjenih pogojev:

- specifičnih zahtev gradbišča,
- tipov izkopa in količine,
- kemijskih, fizikalnih in mehanskih karakteristik materiala,
- razpoložljivost in cene alternativnih virov primarnih surovin in
- zakonskih in ekonomskih pogojev za recikliranje.

Presoja ponovne uporabe izkopanega materiala je v veliki meri odvisna tudi od okoljskih vidikov. Izvedba kemijskih analiz je obvezna, saj je potrebno potrditi skladnost z okoljem, kamor material vgrajujemo. V izkopanem materialu so lahko prisotna onesnaževala, ki izvirajo iz raščenege terena oz. se pojavijo zaradi uporabe dodatkov pri izkopu. Vsebnosti onesnaževal v izkopanem materialu mora biti nižja od mejnih dovoljenih koncentracij (MDK), kot jih predpisuje zakonodaja. Omenili smo že, da se lahko dodatki biološko razgradijo, kar pospešimo s postopki pranja in sušenja. Vsebnost dejanske koncentracije snovi v materialu je treba redno meriti in jo primerjati z MDK. Od vrste in sestave dodatka je odvisen tudi njihov čas razgradnje. Ta lahko traja od 2-4 mesece (polimeri), nekateri materiali pa se lahko razgradijo le delno (masti). Okoljske vplive imajo tudi izkopani materiali, ki so stabilizirani z apnom (uporaba na območjih kmetijske pridelave ni dovoljena) (Oggeri et al., 2014b).

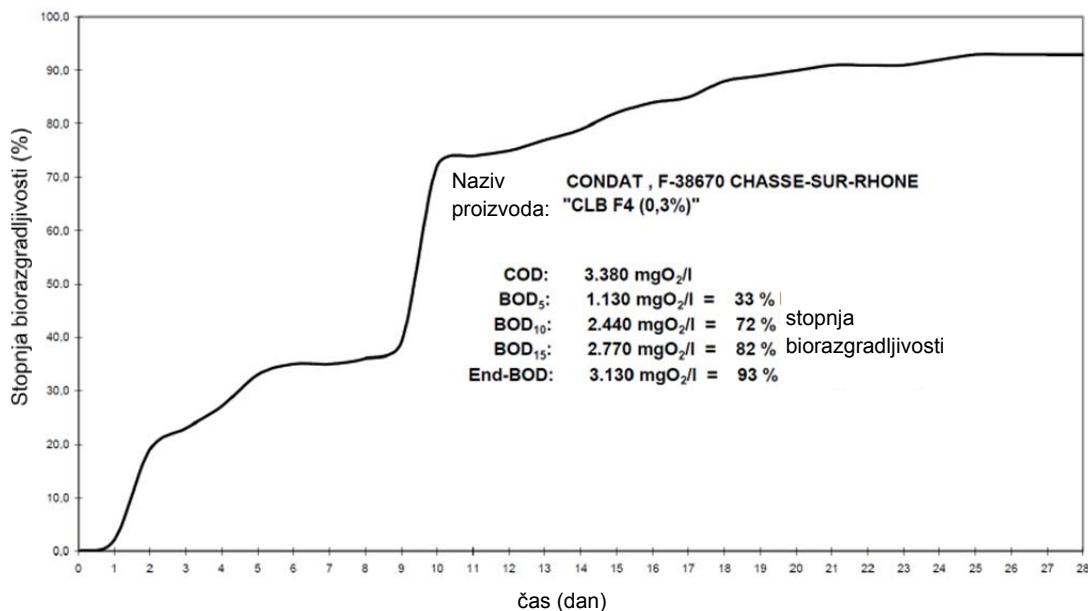
Glede na uporabljeno TBM tehnologijo lahko opredelimo, kje bo v izkopu ostal največji delež dodatkov. Pri napravi z izplako bo večji del dodatkov ostal v odpadnem materialu po obdelavi na separaciji, manjši del pa bo ostal po uporabi v okoliški hribini. Pri napravi EPB ocenjujemo, da bo praktično vsa količina uporabljenih dodatkov ostala v izkopanem materialu (Milligan, 2000).

Dodatki, ki jih uporabljamo pri gradnji predora, imajo glede na svojo sestavo lahko različne vplive na okolje. Razdelimo jih lahko na osnovne štiri skupine:

- dodatek za zmanjševanje upora medija (surfakant-izhaja iz angleščine površinsko aktivno sredstvo): sem spadajo pene, ki spreminjajo lastnosti obnašanja (viskoznost) in sestave izkopanega materiala (zmanjšajo notranje trenje za lažji transport in preprečujejo emisije prahu). Pene imajo dobro naravno razgradljivost (2 – 4 mesece),
- polimeri se uporabljajo za učinkovitejše delovanje naprave. Uporabljajo se samostojno ali pa se dodajajo penam za izboljševanje njihovega delovanja. Običajno se uporabljajo tam, kjer so večji dotoki vode,
- bentonitna izplaka z vidika kemijske sestave ni sporna. Zaradi velike sposobnosti spremembe reoloških lastnosti materiala delno ostane tudi po filtriranju v izkopanem materialu in
- drugi dodatki, kot so kemikalije za zmanjševanje obrabe izkopnih orodij, masti za tesnjenje ščita, malte za zapolnjevanje, dodatki proti lepljenju in mašenju, apno, dodatki za odstranjevanje primesi pen v fazi obdelave izkopanega materiala in drugi.

Z okoljskega vidika ni problematična le sestava dodatkov (omejene informacije za ohranjanje tržne vrednosti), ampak tudi njihova razgradnja (sposobnost biološke razgradnje). Proces razgradnje je odvisen od časa, stopnje oksidacije, izpostavljenosti UV svetlobi, bakterioloških procesov in porabe kisika. Dodatek lahko tako spreminja kemijsko sestavo od alkalnih vezi, sulfonatov do benzena (Oggeri et al., 2014b). V ta namen je bil izdelan laboratorijski preizkus, katerega namen je bila kemijska karakterizacija in določanje ekološke onesnaženosti treh aditivov v obliki pene (Baderna et al., 2015). Vsi trije so bili v osnovi anionsko površinsko aktivno sredstvo, pri čemer sta bila druga dva biološko razgradljiva.

Rezultati so pokazali dobro naravno razgradnjo, saj so se popolnoma razgradili v 4 do 6 dni. Preizkusi ekološke onesnaženosti so bili izdelani tako, da so v mešanico zemljine in dodatka posadili različna semena rastlin višjega reda oz. so preverili strupenost z živimi organizmi. Rezultati pokažejo, da ni mogoče zaznati večjih učinkov na preživetje ali rast. Nesprejemljive rezultate dobimo v primeru, ko so dodatki v takojšnjem stiku z vodo. Do tega lahko pride, če se uporabi prevelika in nepreverjena koncentracija ali pa je izkopan material takoj izpostavljen dežju, ki nato s spiranjem generira izcedno vodo s povišano koncentracijo (Baderna et al., 2015).



Slika 6-2: Potek biološke razgradljivosti dodatka glede na čas (prirejeno po Budach, 2011).
Figure 6-2: Soil conditioner biodegradability in time (adapted from Budach, 2011).

Dodatki v obliki penil so enaki ali podobni tistim, ki jih uporabljajo gasilci in so popolnoma razgradljivi, nekoliko bolj problematični so polimerni dodatki, ki potrebujejo dalj časa za razgradnjo. V uporabi pa so tudi že polimeri na osnovi naravnih mineralov, ki so popolnoma biološko razgradljivi. Nevarnost, ki se lahko pojavi, je tudi prekomerna prisotnost kisika v podzemni vodi v fazi razgradnje (Psomas, 2001).

6.4 Vplivi na okolje pri gradnji predorov

Gradnja predorov lahko vpliva na okolje, kateremu s svojo izvedbo poruši ravnotežje. Razumljivo je, da vplivov ne moremo preprečiti, lahko pa jih znižamo oz. ohranjamo znotraj dovoljenih mej. Predori so infrastrukturni objekti, za katere se sprejme državni ali občinski prostorski načrt, za katerega je potrebna izdelava presoje vplivov na okolje. To je interdisciplinarni dokument, ki obravnava celoten spekter vplivov gradnje posameznega objekta na hrup, geosfero (tla), hidrosfero (podzemno vodo in površinsko vodo), morfologijo (ravnanje z gradbenimi odpadki) in socialni vidik (transport). Poleg ravnanja z gradbenimi odpadki (poglavje 6.3) smo v nalogi obravnavali še vplive prahu, hrupa in vibracij. V obseg osnovnega monitoringa spada tudi geodetska spremljava posebkov oz. drugih vplivov na površini in objektov v okolici predora. V smernici združenja EFNARC (2005) izpostavljajo naslednje pomembne vplive na okolje:

- posedki v urbaniziranem območju,

- konstrukcijske deformacije objektov zaradi vibracij,
- sprememba hidrogeološkega stanja, ki lahko vpliva na dodatne posedke,
- onesnaževanje podzemne vode in
- emisije hrupa in prahu, katere moramo vzdrževati pod mejnimi koncentracijami.

Izvedba monitoringa najprej zahteva opredelitev obsega parametrov, ki se bodo spremljali. Obseg je odvisen od pomembnosti objekta, pričakovanih vplivov, zahtev naročnika in drugih strank v postopku ter drugih dejavnikov. Pred pričetkom del je najprej potrebno izdelati pregled ničelnega stanja, na podlagi katerega lahko spremljamo spremembe zaradi posegov med gradnjo.

6.4.1 Zakonodajna podlaga za izvedbo monitoringa vplivov na okolje

Krovni zakon, ki obravnava vplive na okolje, je Zakon o varstvu okolja (ZVO-1-UPB1), (Uradni list RS, št. 39/06, s spremembami in dopolnili do 56/15) in pokriva področje prahu, hrupa in vibracij. Za področje prahu in hrupa obstaja slovenska zakonodaja ter standardi za opravljanje meritev, za vibracije pa je potrebno upoštevati priporočila tujih referenčnih standardov. Pri izvajanju meritev se mora upoštevati naslednje zakonske podlage in standarde:

1. Prah

- Uredbo o kakovosti zunanjega zraka (Uradni list RS, št. 9/11 in 8/15)
- Uredba o preprečevanju in zmanjševanju emisije delcev iz gradbišč (Uradni list RS, št. 21/11)
- Uredba o nacionalnih zgornjih mejah emisij onesnaževal zunanjega zraka (Uradni list RS, št. 24/05, 92/07 in 10/14)
- Uredba o emisiji snovi v zrak iz nepremičnih virov onesnaževanja (Uradni list RS, št. 31/07, 70/08, 61/09 in 50/13)
- Pravilnik o ocenjevanju kakovosti zunanjega zraka (Uradni list RS, št. 55/11 in 6/15)
- Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu emisije snovi v zrak iz nepremičnih virov onesnaževanja ter o pogojih za njegovo izvajanje (Uradni list RS, št. 70/96, 71/00, 99/01, 17/03, 41/04 – ZVO-1 in 105/08)
- Odredba o določitvi območja in razvrstitvi območij, aglomeracij in podobmočij glede na onesnaženost zunanjega zraka (Uradni list RS, št. 50/11)
- Sklep o določitvi podobmočij zaradi upravljanja s kakovostjo zunanjega zraka (Uradni list RS, št. 58/11)
- Uredba o arzeniu, kadmiju, živem srebru, niklju in policikličnih aromatskih ogljikovodikih v zunanjem zraku (Uradni list RS, št. 56/06)
- Evropska direktiva 2008/50/ES o kakovosti zunanjega zraka

2. Hrup

- Pravilnik o prvem ocenjevanju in obratovalnem monitoringu za vire hrupa ter o pogojih za njegovo izvajanje (Uradni list RS, št. 105/08)
- Pravilnik o emisiji hrupa strojev, ki se uporabljajo na prostem (Uradni list RS, št. 106/02, 50/05, 49/06 in 17/11 – ZTZPUS-1)
- Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Uradni list RS, št. 105/05, 34/08, 109/09 in 62/10)
- Uredba o ocenjevanju in urejanju hrupa v okolju (Uradni list RS, št. 121/04)
- Uredba o kakovosti zunanjega zraka (Uradni list RS, št. 9/11 in 8/15)

- Direktiva EU parlamenta in Sveta 2002/49/EC o ocenjevanju in upravljanju okoljskega hrupa,
- Standard SIST ISO 1996 - 1:2006 (Opis in merjenje hrupa v okolju - 2. del: Osnovne količine in postopki),
- Standard SIST ISO 1996 - 2:2007 (Opis in merjenje hrupa v okolju-3. del: Zbiranje podatkov za prost. plan) in
- Evropska direktiva 2003/10/EC o hrupu.

3. Vibracije

- Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja pri delu in o tehničnih ukrepih za dela pri razstreljevanju, kadar gre za raziskovanje in izkoriščanje mineralnih surovin, izvajanje drugih rudarskih del in izvajanje razstreljevalnih del v drugih dejavnostih (Uradni list RS, št. 111/03 in 61/10 ZRud-1),
- Referenčni nemški standard DIN-4150 1-3,
- Referenčni avstrijski standard ÖNORM S 9020,
- Evropska direktiva 2002/44/EC o vibracijah.

6.4.2 Meritve emisij prahu in mejne vrednosti

Merjenje obremenjenosti okolja z emisijami prašnih delcev pokaže prisotnost trdnih delcev (PM) v zraku v določenem obdobju. Najpogosteje se izvajajo meritve delcev premera 10 μm (PM_{10}) ali 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$), ki so zdravju najbolj škodljivi. Velikost delcev lahko ponazorimo tako, da večji ostanejo v zraku več ur, manjši pa lahko tudi več tednov in jih običajno odstranijo padavine.

Običajno se izvajajo meritve emisijskih koncentracij PM_{10} v skladu z Uredbo o kakovosti zunanjega zraka (2011). Merska mesta se določijo na podlagi predvidene tehnologije, intenzitete del in predvidenega vplivnega območja. Za meritve se uporablja tehnična merilna oprema, ki ustreza zahtevanim predpisom in standardom. Normativi za vrednotenje stanja onesnaženosti zraka spodnjih plasti zunanje atmosfere so prikazani v spodnji preglednici, ki izhaja iz uredbe.

Preglednica 6-3: Mejne vrednosti emisijskih delcev PM_{10} (Uredba o kakovosti zunanjega zraka, 2011).

Table 6-3: Limit values for dust emissions PM_{10} (Uredba o kakovosti zunanjega zraka, 2011).

Časovni interval merjenja (PM_{10})	Mejne vrednosti ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sprejemljivo preseganje ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1 dan	50 (je lahko presežena največ 35x v koledarskem letu)	25
Koledarsko leto	40	10

V primeru preseganja mejnih vrednosti, se najprej preveri ali se upošteva vse smernice in ukrepe, ki so bili predvideni v presoji vplivov na okolje (PVO) in okoljevarstvenem soglasju (OVS). V naslednji fazi se izvajalcu del naloži ukrepe za omejevanje in blaženje emisij prašnih delcev, ki morajo biti preventivni (filtriranje zraka, pršenje vode, omejevanje prometa, itd.), katerih opravljanje se nato spremlja.

6.4.3 Meritve hrupa in mejne vrednosti

Hrup v okolju lahko definiramo, kot vsak nezaželen ali škodljiv zunanji zvok, ki ga običajno povzročajo človekove dejavnosti ali naprave. Merilo za obremenitev okolja s hrupom so mejne vrednosti kazalcev hrupa, izražene v dB(A). Osnovni kazalci hrupa so omejeni na območja varstva pred hrupom. Ločimo štiri območja (I - IV) in so odvisna dovoljene ravni hrupa. Kazalce hrupa delimo glede na obdobje dneva in sicer dnevni (L_{dan}), večerni ($L_{večer}$), nočni ($L_{noč}$) in celodnevni hrup (L_{dvn}). Podane so mejne in kritične vrednosti hrupa za zunanji vir hrupa in vrednosti, ki jih povzročajo bližina ceste, železnice ali obratovanje letališča. Podane so tudi konične ravni hrupa (L_1), v primeru obratovanja letališča, pretovor blaga in podobne dejavnosti.

Meritve hrupa, povzročenega na delovnem mestu oziroma tistemu, kateremu je človek izpostavljen ureja Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Uradni list RS, št. 105/05, 34/08, 109/09, 62/10). Potrebno je omeniti še pojma mejne vrednosti kazalcev hrupa in kritične vrednosti kazalcev hrupa. Z Uredbo (2010) so predpisane mejne vrednosti kazalcev hrupa, ki jih vir sme povzročati v okolju. Če so mejne ravni presežene, mora izvajalec zagotoviti ukrepe za zmanjševanje emisij hrupa ali ukrepe za preprečevanje širjenja hrupa v okolje. Kadar pa so dosežene kritične vrednosti za kazalca $L_{noč}$ in L_{dvn} za celotno obremenitev okolja s hrupom, takrat so ta območja skladno z zakonom o varstvu okolja degradirana in je vlada s pristojno občino dolžna izdelati in izvesti sanacijski program.

Preglednica 6-4: Mejne (zgoraj) in kritične (spodaj) vrednosti emisij hrupa (Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa, 2010).

Table 6-4: Limit (above) and critical (below) values of noise emissions (Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa, 2010).

Območje varstva pred hrupom	Mejne vrednosti	
	$L_{noč}$ (dBA)	L_{dvn} (dBA)
IV. območje	65	75
III. območje	50	60
II. območje	45	55
I. območje	40	50
Območje varstva pred hrupom	Kritične vrednosti	
	$L_{noč}$ (dBA)	L_{dvn} (dBA)
IV. območje	80	80
III. območje	59	69
II. območje	53	63
I. območje	47	57

V preglednici so prikazane mejne in kritične vrednosti za $L_{noč}$ in L_{dvn} , katere je potrebno upoštevati pri gradnji predorov, kar smatramo kot zunanji vir hrupa.

Mejne ravni hrupa so odvisne tudi od občutljivosti območja, na katerem je mesto ocenjevanja. Občutljivost je določena z namensko rabo površin na posameznem območju. Zakonodaja loči naslednja štiri območja varstva pred hrupom:

- I. območje varstva pred hrupom za površine, ki so varovane po zakonu o varstvu narave,

- II. območje varstva pred hrupom za čiste stanovanjske in turistične površine, površine v okolici bolnišnic in zdravilišč ter mirne površine v naseljih, varovane s posebnimi občinskimi predpisi,
- III. območje varstva pred hrupom za splošne stanovanjske, šolske, športne in druge površine, na katerih so stavbe z varovanimi prostori,
- IV. območje varstva pred hrupom za površine brez stanovanj in drugih stavb z varovanimi prostori kot so površine za proizvodno dejavnost, transport, kmetijstvo, gozdarstvo in obrambo.

Hrup v okolju se ocenjuje iz rezultatov meritev ali modelnih izračunov na podlagi začasnih metod ocenjevanja kazalcev hrupa. Pri izvedbi del se izvajajo meritve skladno s standardom SIST ISO 1996-2. Mesto ocenjevanja emisije hrupa se določi z upoštevanjem določil Uredbe o ocenjevanju in urejanju hrupa v okolju (Uradni list RS, št. 121/04), kjer upoštevamo strateške karte hrupa in predvidena najbolj obremenjena mesta.

6.4.4 Meritve seizmičnih vibracij in mejne vrednosti

Vibracije, povzročene pri gradnji predora, se z valovanjem prenašajo po zemljini in objektih in lahko vplivajo na stanje konstrukcije in počutje ljudi. Običajno se merijo motnje v obliki najvišje hitrosti valov pri frekvenci višji od 10 Hz (vrednosti okoli 20 Hz). Nekatere tipične vrednosti maksimalnih hitrosti so podane v spodnji preglednici (Kolymbas, 2005). Vibracije so opazne pri hitrostih 0,5 mm/s in so moteče pri hitrostih nad 5 mm/s. Izkaže se, da vplivi TBM naprave niso več opazni pri oddaljenostih nad 45 m.

Preglednica 6-5: Tipične hitrosti vibracij glede na izvor in oddaljenost (prirejeno po Kolymbasu, 2005).

Table 6-5: Typical velocity values of vibrations according to source and distance (adapted from Kolymbas, 2005).

Vir	Vrednosti V_{max} (mm/s)		
	Oddaljenost (m)		
	5	10	25
Hidraulično kladivo	1,7	0,6	0,1
Tovornjak	3	1,1	0,3
Buldožer	3,9	1,4	0,3
TBM naprava (v kamnini)	5,5	2,2	0,6
Vtiskanje zagatnice/pilota	30	12	2,8

Z merjenjem vibracij tal se ugotavlja širjenje valov in njihova intenzivnost v odvisnosti od gradbenih aktivnosti (razstreljevanje, napredovanje TBM naprave, izkop in zasipavanje, ipd.) ter glede na oddaljenost ogroženih objektov in smeri nihanja tal. Monitoring obsega merjenje hitrosti valovanja tal v treh smer in sicer: x, y in z. Slovenskih standardov za področje seizmičnih vibracij ni, zato uporabljamo referenčne avstrijske (ÖNORM S 9020:1986) oz. nemške standarde (DIN 4150:2001).

Avstrijski standard (ÖNORM S 9020:1986) deli objekte (stavbe) v štiri razrede, predvideva štiri stopnje presoje, podaja preglednico varnih oddaljenosti v odvisnosti od detonacijskih hitrosti in velikosti razstrelilne polnitve ter dopustne dinamične obremenitve (hitrost nihanja tal) za različne kategorije stavb. Nemški standard (DIN 4150:2001), pa objekte deli v tri

razrede in jim opredeli dovoljene hitrosti vibracij, ki se merijo na različnih mestih objekta (temelj in strop).

Hitrosti nihanja tal se določijo, kot najvišje izmerjene hitrosti katerekoli komponente v opazovani točki. Poznamo naslednje štiri hitrosti:

- v_x maksimalna vrednost hitrosti nihanja tal v x smeri [mm/s],
- v_y maksimalna vrednost hitrosti nihanja tal v y smeri [mm/s],
- v_z maksimalna vrednost hitrosti nihanja tal v z smeri [mm/s] in
- v_{Rmax} maksimalna vrednost rezultante nihanja tal [mm/s]

V spodnji preglednici je po ÖNORM S 9020:1986 povzeta razdelitev na razrede stavb z opisom in vrednosti dovoljenih hitrosti vibracije.

Preglednica 6-6: Dopustne hitrosti vibracij po ÖNORM S 9020:1986.

Table 6-6: Limit velocity values according to ÖNORM S 9020:1986.

Razred stavb	Vrste stavb (opis)	Dovoljena hitrost vibracije V_{Rmax} (mm/s)
I	Industrijske stavbe in stavbe za obrt	30 – 39
II	Stanovanjske stavbe	20 – 26
III	Stavbe z manjšo trdnostjo skeleta kakor pri I in II	10 – 13
IV	Stavbe, ki so glede na način gradnje in tehnično stanje še posebej občutljive (npr.: spomeniško zaščitene stavbe)	5 – 7

Preglednica 6-7: Dopustne hitrosti vibracij po DIN 4150:2001.

Table 6-7: Limit velocity values according to DIN 4150:2001.

Razred stavb	Vrste stavb (opis)	Dovoljene hitrosti vibracij V_{Rmax} (mm/s)				Meritev na stropu v najvišjem nadstropju
		Meritev na temelju stavbe				
		Območje frekvence f [Hz]				
		< 10	10 - 50	50 – 100*		
L ₁	Industrijske stavbe Obrtne in industrijske stavbe, kakor tudi stavbe podobnih konstrukcij	20	20 - 40	40 - 50	40	
L ₂	Stanovanjske stavbe Stanovanjske stavbe in stavbe podobnih konstrukcij	5	5 - 15	15 - 20	15	
L ₃	Spomeniško zaščitene stavbe Stavbe, ki glede na občutljivost na vibracije ne spadajo v razred L1 in L2, kakor tudi stavbe pod spomeniškim varstvom	3	3 - 8	8 - 10	8	

*Za frekvence prek 100 Hz se lahko uporabijo vrednosti za območje 100 Hz.

V zgornji preglednici pa je po DIN 4150:2001 povzeta razdelitev na razrede stavb in dovoljena hitrost vibracij, glede na območje vibracij in lokacijo merilnega mesta.

Običajno se vrednotenje meritev izvede po obeh standardih, saj je s tem tolmačenje bolj merodajno. Mesta merjenja so izbrana glede na lokacijo gradbenih aktivnosti, ogroženost posameznih objektov in njihovo občutljivost glede na pričakovane aktivnosti. Dolžino merjenja vibracij se izvaja neprekinjeno določeno obdobje (običajno 24 ur za klasičen izkop predora oz. nekaj dni za kontinuiran izkop predora). Obdobje mora biti izbrano za tipične in povišane obremenitve ter mora zajemati celoten cikel aktivnosti na gradbišču.

7 GEOLOŠKE IN HIDROGEOLOŠKE ZNAČILNOSTI OBMOČJA LJUBLJANE

7.1 Uvod

Geološka sestava tal je osnovni podatek pri načrtovanju predorov in izbiri primerne tehnologije gradnje. Izkop predora zaradi deformacij povzroči spremembe napetostnega stanja v zemljini ali kamnini. Reakcija ali vpliv je odvisen od geoloških, hidrogeoloških in geomehanskih značilnosti ter vpliva na izkop in primarno podgradnjo. Prava izbira TBM naprave in ustrezno dimenzioniranje segmentov pripomore k zmanjšanju tveganja nestabilnosti predora in vplivov na okolico. Ljubljana leži v sedimentnem bazenu zapolnjenem s kvartarnimi sedimenti. Podlago sestavljajo karbonski in permski peščenjaki, konglomerati in laporji, delno pa tudi triasni in jurski apnenci in dolomiti. Te kamnine izdajajo v gričevju, ki obdaja omenjeni sedimentni bazen. Severni del je zapolnjen z ledeniško-rečnimi nanosi reke Save, ki so debeli do 100 m (lokalno tudi več). Sestavlja jih predvsem karbonatni prod s plastmi ali ležami konglomerata in ima zato dokaj dobre geomehanske lastnosti. Južni del je zapolnjen z jezerskimi in rečnimi nanosi, ki so precej heterogeni. Sestavljeni so iz gline, proda, peskov, meljev, jezerske krede in šote. Na tem delu se skalna podlaga nahaja v globini od 0 do 200 m.

Geološki in hidrogeološki pogoji so eden izmed večih kriterijev za določitev ustrezne TBM naprave. Pri izbiri le-te, se namreč odločamo za ustrezen tip naprave ter način podpiranja čela med izkopom. Preostali obvezni podatki pri izbiri so: trasa predora, omejitve delovišča, razpoložljivost aditivov, izkušnje in znanje izvajalca, pomembni objekti, časovni in finančni okvir, vrsta oziroma namembnost predora in varovanje okolja. Z namenom pravilne izbire TBM naprave se preverijo vsi možni scenariji glede na razpoložljive podatke, saj se lahko nepomembna odločitev v procesu izbire, izkaže kot zelo pomembna v času gradnje. V zadnjem času pogosta uporaba tehnologije TBM ponuja veliko bazo podatkov že izvedenih projektov, kateri so analitično obdelani in ponujajo osnovne vrednosti parametrov kot začetna izhodišča, vendar je kljub temu potrebno posvetiti dovolj pozornosti vsakemu projektu posebej.

7.2 Geološka zgradba

Mesto Ljubljana leži na prehodu med Ljubljanskim barjem na jugozahodu in Ljubljanskim poljem na severovzhodu. Ljubljansko polje in barje prištevamo k ljubljanski kotlini, ki sta mladi tektonski udorini med Julijskimi in Savinjskimi Alpami ter dolenskim krasom. Udorini se sta se pogrezali ob prelomih, ki potekajo v neposredni bližini. Ljubljansko polje in severni del barja pripadata k alpskemu delu, to je k posavskim gubam, južni del barja pa spada k dinarskemu ozemlju, to je dolenskemu in notranjskemu krasu. Da se je ljubljansko polje in barje močno pogrezalo, dokazujejo tudi velike količine naplavin, ki so zapolnile udorino. Po barju so raztreseni tudi osamelci, kar priča o velikem številu prelomov v skalni podlagi.

Pretežni del naplavin, ki prekrivajo skalno osnovo na Ljubljanskem barju in polju, je bil odložen v pleistocenski in holocenski dobi. Naplavine iz te dobe na ljubljanskem polju segajo do površine, medtem ko so na Ljubljanskem barju precej globoko. Pleistocenske usedline sestavlja pretežno savski prod, ki je v različnih globinah in v različnih debelinah sprijet v konglomerat (Drobne, 1961). Zaradi relativno velikih višinskih razlik so imeli vodotoki veliko moč naplavljanja sedimentov, kar je pomenilo hitro zasipavanje udorine, vendar so odtok voda z ljubljanskega barja proti severu zapirala območja med Polhograjskimi dolomiti,

Rožnik, Grajski hrib in Golovec, zato se je hitra sedimentacija vršajskih (rečnih) sedimentov izmenjevala s počasnejšo jezersko sedimentacijo in sedimentacijo v počasi tekočih rekah.

Prod in pesek v savski strugi na Ljubljanskem polju pripadata holocenu. Na barju pa spadata v holocensko dobo, površinska plast šote ter pod njo ležeča glina polžarica. Gričevja, ki obdajajo ljubljansko kotlino, so sestavljena v glavnem iz karbonskih temno in svetlo sivih, v glavnem drobno zrnatih kremenovih peščenjakov. Manj so zastopane glinasto peščene permske plasti in apnenci, dolomiti ter glinasto peščene usedline mezozoika.

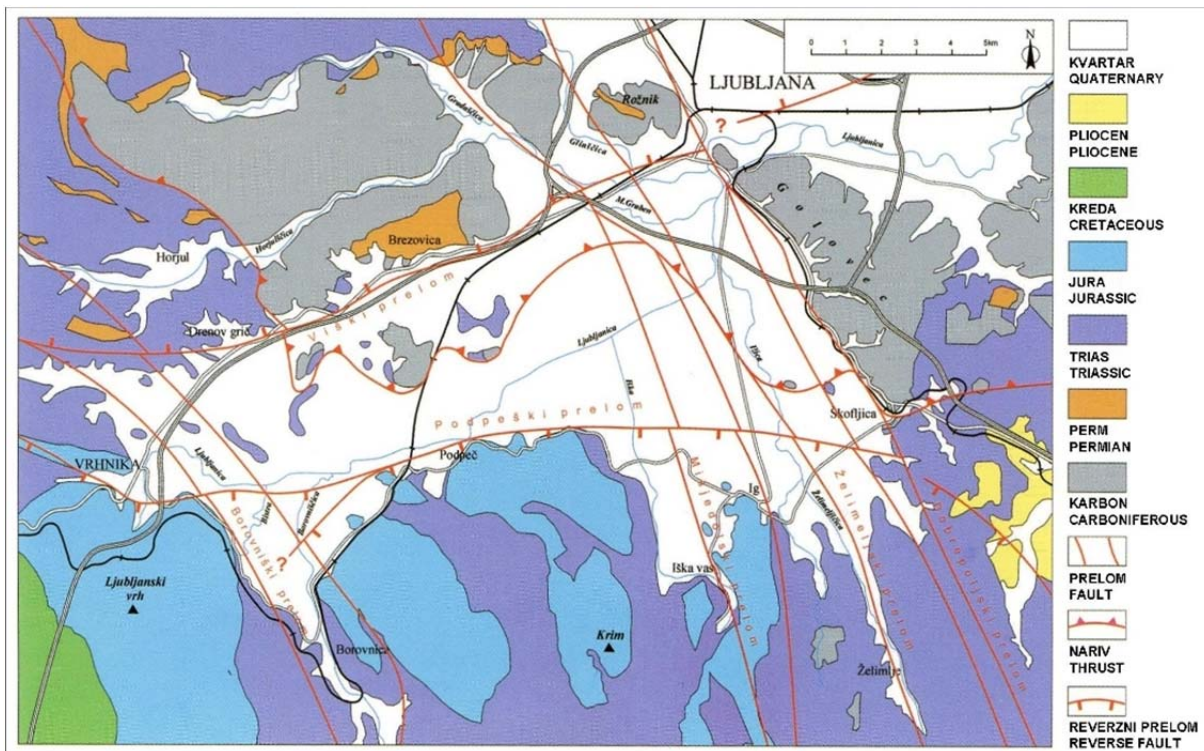
Žlebnik (1971) tudi ugotavlja, da starejši prodni zasip ni enoten, ampak sestoji iz treh samostojnih zasipov, ki so nastali v fazi akumulacije v ledenih dobah. Povečini so zasipi sprijeti v konglomerat, ki jih lahko poimenujemo starejši, srednji in mlajši konglomeratni zasip, katerim sledi še prodni zasip. Gre za zaporedje štirih pleistocenskih zasipov, ki ustrezajo gūnški, mindelski, riški in wūrmski ledeni dobi. Pod prodnim zasipom leži plast rjave glinice in glinice s preperelimi prodniki, ki predstavlja preperelo vrhno plast mlajšega konglomeratnega zasipa. Glinica se pod prodnim zasipom razprostira na zahodnem in jugozahodnem obrobju polja med vznožjem Šentviškega hriba, Zapužami, Kosezami ter vznožjem Rožnika in Gradu do Ljubljanice na jugu ter na severozahodni strani približno do navidezne črte: železniška proga od Šentvida do razcepa s kamniško progo, pivovarna Union, podvoz na Slovenski cesti in štajerske proge do toplarne. Glinice na desnem bregu Ljubljanice povečini ni. V osrednjem delu polja se glinica ponekod pojavlja v obliki leč. Med Zapužami in Kosezami prehaja proti zahodu rjava preperinska glinica v jezersko glinico. Še dalje proti zahodu izgine tudi vrhna prodna plast, kar kaže, da Sava v najmlajši ledeni dobi ni več prodrla skozi ožino med Šentviškim hribom in Rožnikom proti Barju.

Območje prehoda med Ljubljanskim poljem in barjem, ki se nahaja na liniji med Rožnikom in Gradom sestavljajo na vrhu predvsem barski sedimenti, spodnja plast pa je savski prod. Globel se nadaljuje čez Vič v barjansko udorino, kjer skalno podlago po rezultatih geoelektričnih preiskav najdemo na globini 200 m ali več. Podobne geološke razmere se pričakujejo med Rožnikom in Šentviškim hribom, k čemer pritrjuje tudi v vrtinah najden savski prod, katerega je Sava nanesevala v dobi, ko je tekla med ožino med Šišenskim hribom in Rožnikom vzporedno z Glinščico skozi Vič ter skozi ožino med Rožnikom in Gradom nazaj v Ljubljansko polje.

Skalna osnova je v zahodnem in južnem delu iz triadnega in jurskega dolomita ali apnenca, v severnem in vzhodnem delu pa sestavljajo skalno podlago delno triadni dolomiti in apnenci, povečini pa triadni in permokarbonski skrilavi glinavci in peščenjaki. Podlaga na barju izdanja pri posameznih osamelcih (Mencej, 1988/1989). Z vrtinami in geofizikalnimi raziskavami je bilo dokazano, da je skalna podlaga precej razgibana in razdeljena v številne kotanje in globeli. Potrjeno je tudi, da je podlaga na vzhodnem delu barja pogreznjena globlje kot na zahodnem delu. Prelomi v skalnati podlagi so usmerjeni v smeri severozahod – jugovzhod. Prelomi, ki so ugotovljeni na obrobju barja, se nadaljujejo tudi pod plastmi mlajših naplavin. Podlaga Ljubljanskega polja pa se sestoji izključno iz permokarbonskega skrilavca in peščenjaka (Žlebnik, 1971).

Dobrepoljski prelom loči vzhodni del barjanske kotline od južnega dela posavskih gub in poteka od Škofljice proti Šentvidu. Vrtine so pokazale, da je kameninska podlaga zahodno od preloma v globini okrog 40 m in jo sestavljata peščenjak in skrilavi glinavec

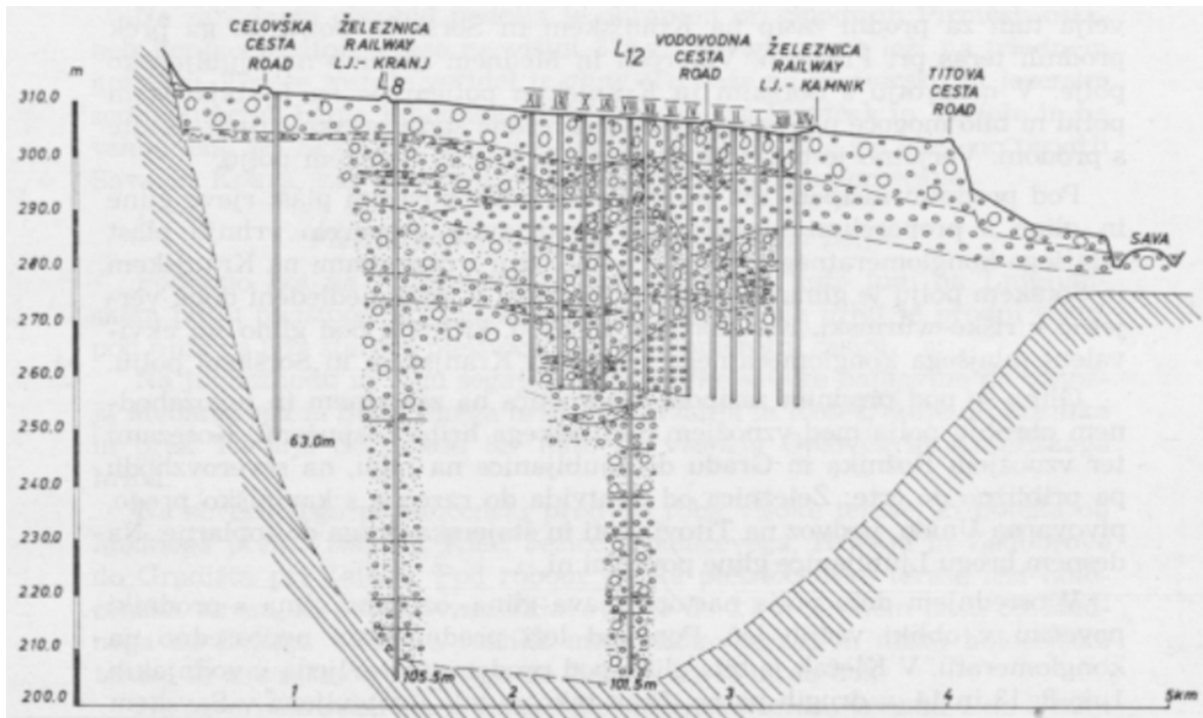
permokarbonske starosti. Vrtine v bližini Celovške ceste in Šišenskega hriba so pokazale, da je podlaga na 9 oziroma 20 m, med železniško progo in vodarno v Klečah pa na kar 100 m in jo sestavlja permokarbonski peščenjak.



Slika 7-1: Inženirska geološka karta Ljubljane z ljubljanskim barjem (Pavšič, 2008).

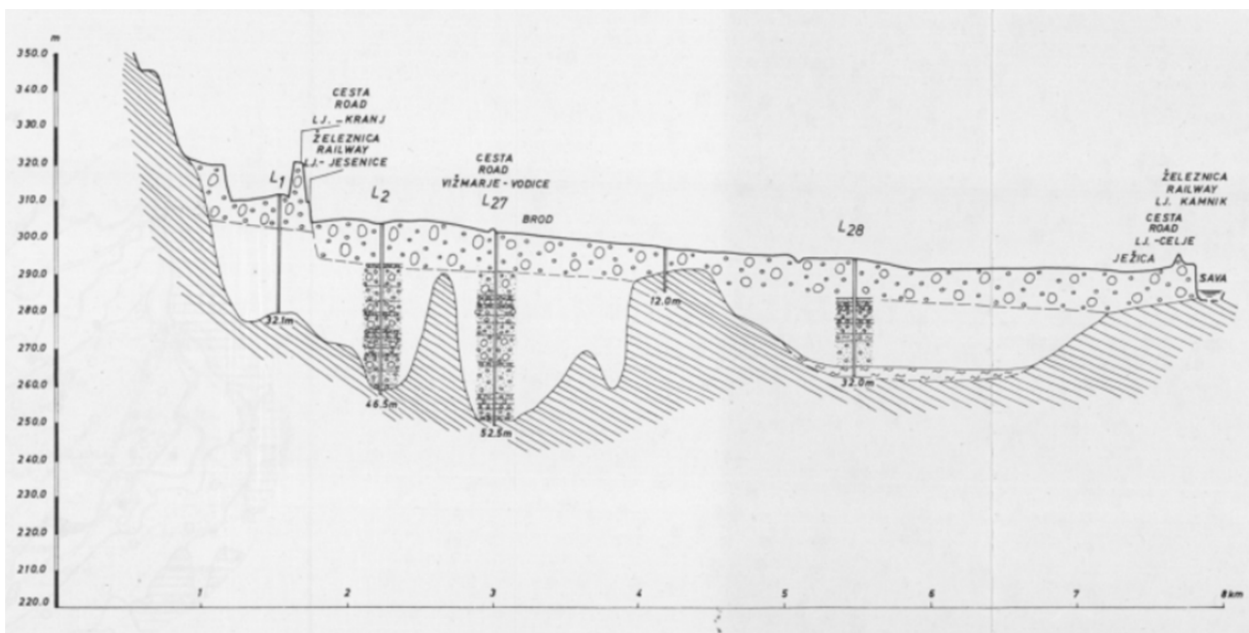
Figure 7-1: Geological map of Ljubljana with Ljubljana moor (Pavšič, 2008).

Mišjedolski prelom poteka mimo Iške vasi in Črne vasi proti Vrhovcem. Vzhodno od preloma najdemo kameninsko podlago na globini med 20 in 30 m. Na območju Mestnega loga je podlaga ravno tako permokarbonska in je na globini 170 m. Severno od Tržaške ceste je podlaga dvignjena, kjer je vrtina zadela podlago (permokarbonski skrjavci in peščenjak) na globini 50 m. Med Murgdami, Trnovim in centrom Ljubljane so bile izvrtane vrtine do globine 57 m, kjer pa nobena ni dosegla kamnite podlage. Tudi globina permokarbonske podlage v ožini med Šišenskim in Grajskim hribom ni točno znana, predvidena globina pa znaša 50 m (Žlebnik, 1971).



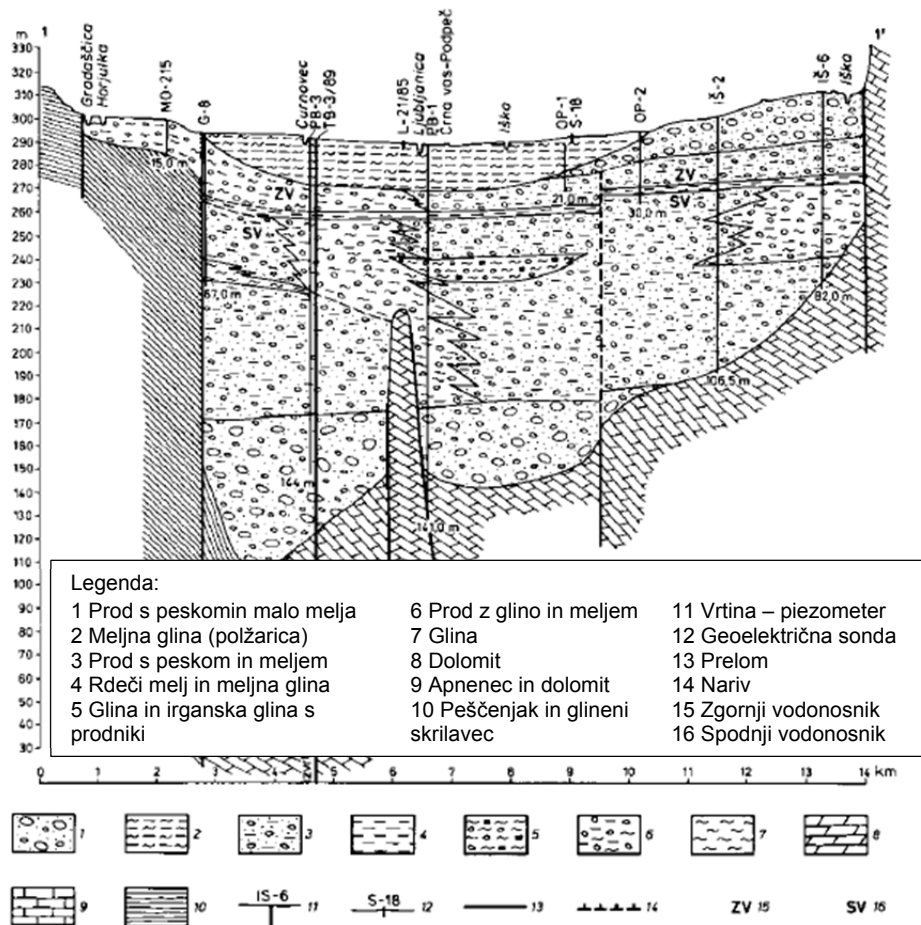
Slika 7-2: Geološki presek pri vodarni v Klečah (Žlebnik, 1971).

Figure 7-2: Geological section at water supply facility Kleče (Žlebnik, 1971).



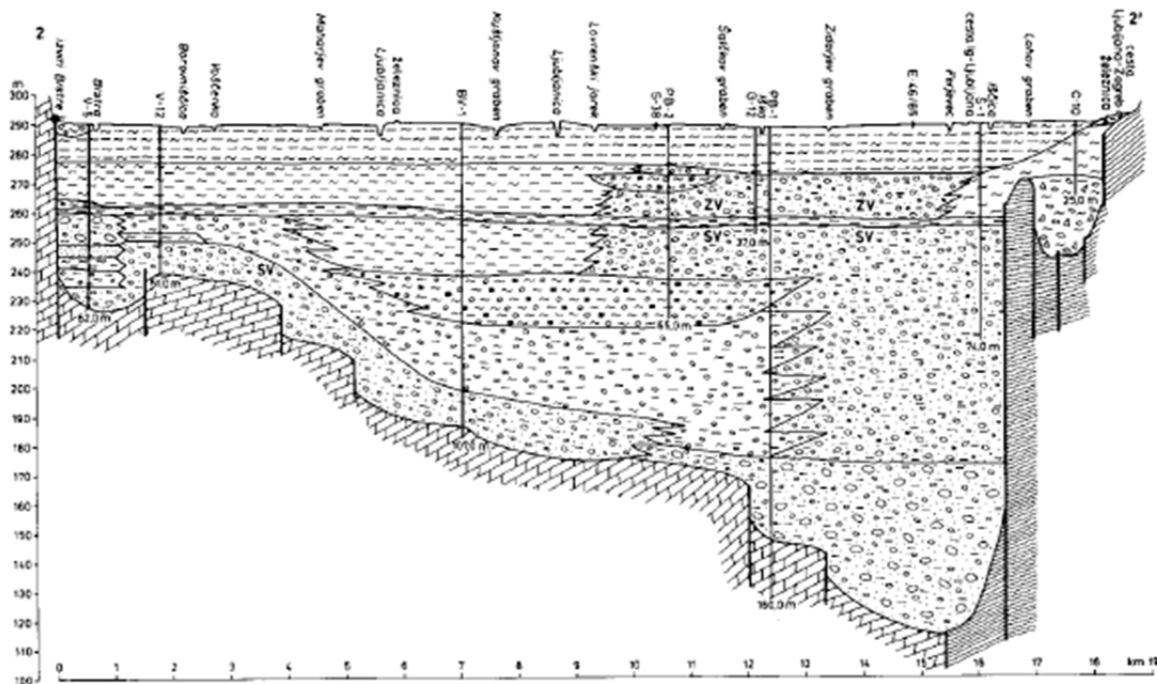
Slika 7-3: Geološki presek Brod – Ježica (Žlebnik, 1971).

Figure 7-3: Geological section Brod – Ježica (Žlebnik, 1971).



Slika 7-4: Prečni profil čez vzhodni del Ljubljanskega barja (Mencej, 1989).

Figure 7-4: Geological cross section through eastern part of Ljubljana moor (Mencej, 1989).



Slika 7-5: Vzдолžni profil čez južni del Ljubljanskega barja (Mencej, 1989).

Figure 7-5: Geological long section through southern part of Ljubljana moor (Mencej, 1989).

7.3 Hidrogeološke značilnosti

Barjanska kotlina pripada povodju Ljubljane. Celotno padavinsko zaledje kraških izvirov na zahodnem in južnem obrobju barja obsega okoli 1300 km² ozemlja (Mencej, 1988/1989). Na severnem obrobju barja je zaradi sorazmerno majhnega padavinskega zaledja dotok površinske vode in podtalne vode veliko manjši. Na vzhodnem obrobju barja poteka meja padavinskega zaledja sorazmerno blizu barjanskega roba. Padavinsko zaledje je majhno. Sorazmerno veliki povodji in velika pretoka imata Iška in Želimeljščiča, ki tečeta v Ljubljano prek jugovzhodnega dela Barja.

Na obrobju severnega dela Ljubljane, kjer se hitro menjavajo plasti proda in gline, se pojavlja več nivojev podtalne vode. Ti zgornji horizonti podtalne vode se približno ob Celovski cesti prelivajo na spodnji, savski horizont podtalne vode, ki se nahaja na približno 24 m (lokacija pivovarne Union).

Na osrednjem delu se ravno tako hitro menjavajo prepustne in manj prepustne usedline, zato lahko zaznamo več horizontov podtalne vode. Na splošno se kažeta dva osrednja horizonta. Plast mešanih peščeno prodnih oziroma glinasto meljnih naplavin, tvori neprepustno podlago zgornjemu horizontu podtalne vode. Gladina zgornjega horizonta se nahaja nekje skoraj na površini, sicer pa v globini od 2 do 4 m. Zgornja plast se napaja z rožniške strani in se preko robov preliva proti spodnjemu horizontu podtalne vode, ki se nahaja v globini približno 15 m. Gladina podtalnice se spreminja zaradi lokalnega menjavanja bolj ali manj prepustnih plasti.

Južni del je hidrološko bolj enoten, saj je podtalna voda prisotna v zgornjem in spodnjem vodonosniku in jo najdemo na globini 0,7 do 2,5 m.

Na severnem delu Ljubljane se nahaja vodonosnik Ljubljanskega polja, ki je eden izmed največjih in najpomembnejših vodonosnikov v Sloveniji. Območje vodonosnika se nahaja v severnem delu Ljubljane. S severa ga omejuje Šmarna gora, Soteški hrib in Videmski hrib. Na zahodu območje meji na Polhograjsko hribovje, ki se južno nadaljuje v Šišenski hrib ter Grajski hrib. Na jugu in jugovzhodu je omejeno z reko Ljubljano ter začetkom Posavskega hribovja. Vodonosnik je v večini odprt, na jugozahodnem delu pa se pojavljajo slabše prepustne plasti, kar omogoča nastanek visečih vodonosnikov.

Količinsko stanje podzemne vode na Ljubljanskem polju je močno odvisno od stanja reke Save in stanja njene struge. Na Ljubljanskem barju se za oskrbo s pitno vodo izkorišča zaprte vodonosnike. Del podzemne vode iz teh vodonosnikov odteka skozi vodonosne plasti proti Ljubljanskemu polju.

7.4 Podtalnica prodnih vodonosnikov

Naplavine Ljubljanskega barja vključujejo tri glavne prodne vodonosnike, ki med seboj niso nujno povezani. Opis smo povzeli po Menceju (1989), ki je podan po posameznih vršajih. Osnovna hidravlična lastnost je koeficient prepustnosti k [m/s].

Zgornji vodonosnik vršaja Borovniščice se prične v območju 12 do 15 m pod površino. Piezometrična gladina vode je na koti 290 do 291 m in rahlo pada v smeri proti severu (gradient in znaša 1 ‰). Zgornji prodni vodonosnik je na vzhodu v stiku z izdatnim vodonosnikom v dolomitu in apnencu. Spodnji in zgornji vodonosnik ločuje le 1,5 do 3 m

debela plast rjavega melja, zato se spodnji vodonosnik lahko napaja iz zgornjega le v primeru prekinitve te plasti. Koeficient prepustnosti k znaša $5,8 \times 10^{-4}$ m/s.

Spodnji vodonosnik sega od globine 30 do 69 m. Zgornji del spodnjega vodonosnika je slabo prepusten, vodonosnik pa leži neposredno na kameninski osnovi. Piezometrična gladina spodnjega vodonosnika je 290,5 do 291,5 m in pada ravno tako proti severu ($i=1$ ‰). Koeficient prepustnosti znaša $1,15 \times 10^{-3}$ m/s.

Drugi je vršaj lške, kjer je postavljena tudi vodarna Brest. Tudi na območju vodarne Brest sta identificirana dva vodonosnika, ki sta med seboj ločena z 10 m debelo plastjo neprepustnih glin. Zgornji vodonosnik sega do globine približno 27 m pod površjem, piezometrična višina pa je na višini 292 do 297 m. Hidravlični gradient je 1 ‰ v smeri severozahod. Koeficient prepustnosti znaša 1×10^{-3} do $1,1 \times 10^{-4}$ m/s.

Spodnji vodonosnik pri vršaju lške se prične v globini približno 40 m in sega do kameninske podlage, ki jo najdemo v globini približno 105 m. Piezometrična višina je nižja, kot pri zgornjem vodonosniku in je na višini 290 do 291 m. Spodnji vodonosnik sega daleč proti severu. Zmogljivost spodnjega vodonosnika je težko določiti, saj podtalnica vršaja lške odteka v smeri proti Ljubljani in se severno od Ljubljanice združi s podtalnico prodnega vodonosnika Ljubljanskega polja. Iz piezometričnih gladin je razvidno, da precejšen del podtalnice odteče skozi ožino med Rožnikom in grajskim hribom. Hidravlični gradient je nekoliko večji in znaša 2 ‰. Koeficient prepustnosti znaša $1,1 \times 10^{-3}$ m/s.

Na skrajnem jugovzhodnem robu Barja priteče Želimeljščica, ki je nanese prodni zasip v pleistocenu in holocenu še daleč proti severu (Mencej, 1989). Tu je ugotovljena zelo raznolika sestava tal, saj je plast barjanskih sedimentov, jugozahodno od Pijave Gorice debela okoli 5 m, na območju vodarne Brezova noga, pa je plast barjanskih sedimentov debela med 30 in 40 m. Pod plastjo barjanskih sedimentov se nahaja plast proda v debelini okoli 50 do 70 m in sega do podlage.

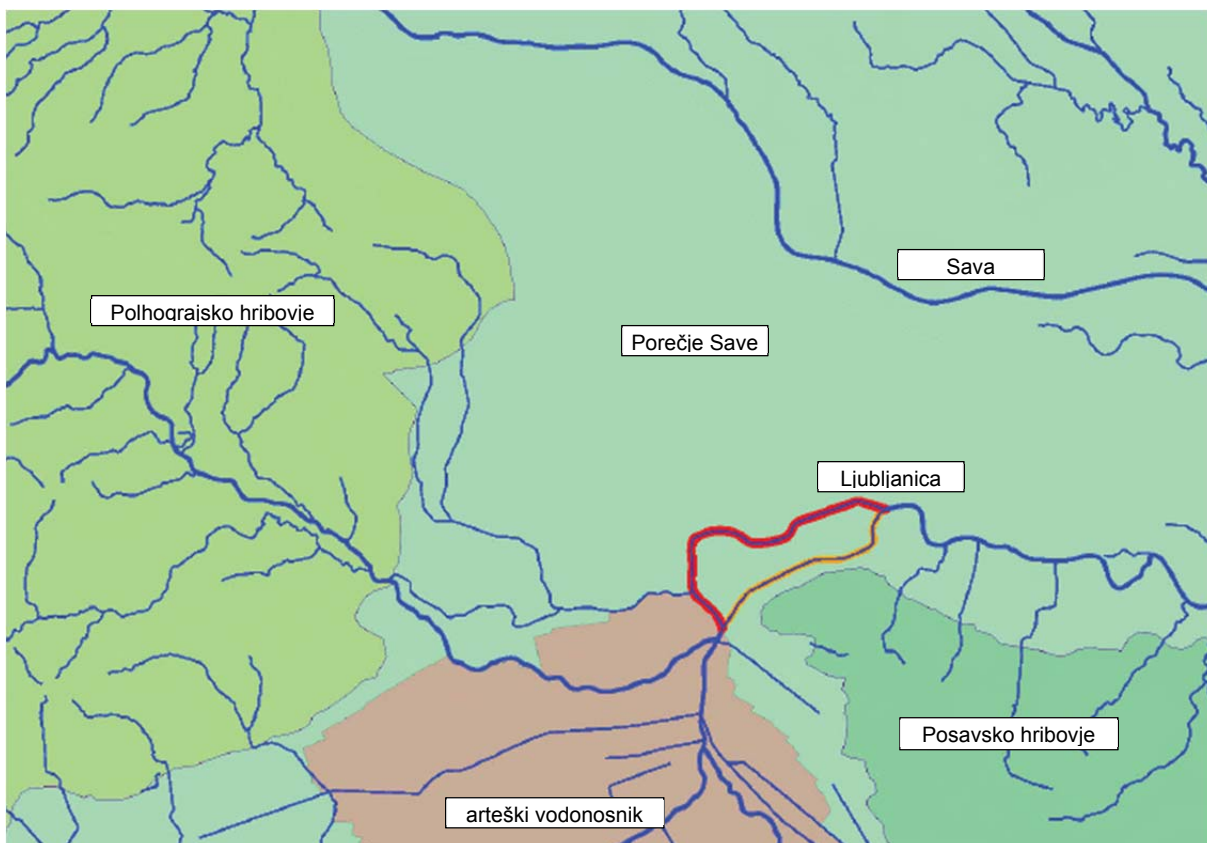
Na območju Ljubljane se pod površino Ljubljanskega barja nahaja še vršaj Gradaščice. Pod površinsko plastjo gline, meljne gline in peska, debeline 2-3 m se nahaja plast proda iz karbonatnih kamnin. Kameninska podlaga iz permokarbonskega peščenjaka je v globini 9-11 m. Gladina podtalnice je približno 2 m pod površjem in je vezana na gladino podtalnice. Koeficient prepustnosti znaša $4,8 \times 10^{-4}$ m/s.

Zgornji pleistocenski prodni vodonosnik ima največjo debelino na območju južnega in zahodnega dela Barja, sega pa tudi v dolino Gradaščice ter na območje med Rožnikom in Ljubljanskim gradom, kjer preide v vodonosnik Ljubljanskega polja. Iz modelnih izračunov znaša količina odtekanja skoraj $0,35$ m³/s (Brenčič, 2008). Za območje med Podutikom in Rožnikom obstaja več različnih trditev v katero smer se pretaka podzemna voda.

Južno od Ljubljane (Murgle) se nahaja prodni zasip Save, ki ima piezometrično višino vode na 285 m, podtalnica pa odteka v smeri proti Ljubljani. Na tem območju ni velike verjetnosti, da bi imeli dva ločena vodonosnika. Hidravlični gradient je okoli 5 ‰ v smeri proti severu. Koeficient prepustnosti znaša 1×10^{-3} m/s.

Severno od Ljubljane se nahaja Ljubljansko polje, ki ima višino podtalnice bistveno nižje kot Ljubljansko barje, kar potrjuje domnevo, da se delno napaja tudi z južne strani. Višina podtalnice je približno 15 m pod površjem za Bežigradom in 10 m pod površjem v Mostah. Piezometrična višina znaša okoli 270 do 275 m.

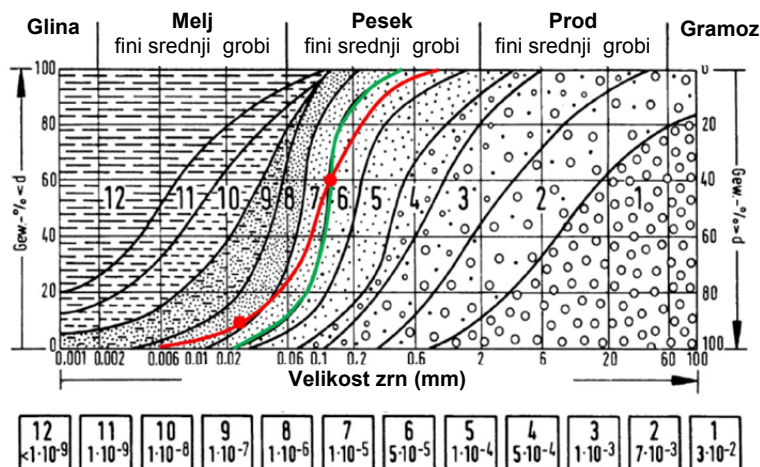
Glavno napajalno območje podtalnice je mlada prodna terasa pri Brodu, drugo napajalno območje pa je manj aktivno in se nahaja na območju Ježice in Tomačevega. Koeficient prepustnosti znaša med 2×10^{-4} m/s in $1,8 \times 10^{-3}$ m/s (povprečna vrednosti je ocenjena na 3×10^{-3} m/s). Podobno niha tudi hidravlični gradient med 1,08 ‰ in 2,25 ‰ v smeri proti severu. Piezometrična višina znaša okoli 275 do 280 m.



Slika 7-6: Shematska hidrogeološka karta Ljubljane z okolico (www.gov.si/atlasokolja/).

Figure 7-6: Wider schematic hydrogeological map of Ljubljana (www.gov.si/atlasokolja/).

Podtalnico v območju Ljubljane lahko opredelimo, kot visečo podtalnico v peščenih in prodnatih plasteh. V poplavno zajezitvenih in hudourniških nanosih ima začetne močne dotoke, nato pa njena izdatnost zelo pade. Podtalnica vrodu na območju Gradašnice ima zaradi bolj debelozrnate prodnate plasti nekoliko večjo izdatnost. Na sliki predstavljamo okvirne vrednosti koeficienta prepustnosti zemljine glede na zrnavostno strukturo.



Slika 7-7: Vrednosti koeficienta prepustnosti glede na zrnastostno strukturo (Budach, 2011).
Figure 7-7 : Values of permeability coefficient according to grain distribution (Budach, 2011).

Čeprav globina predorov ni določena, opredeljuje jo namreč le študija variant ljubljanskega železniškega vozlišča in sicer na globini do 16 m pod površjem pomeni, da bodo imeli predori le do 10 m nadkritja. Taka globina ima pozitivno plat, saj bi to praktično pomenilo, da so vsi predori nad nivojem podtalnice, vendar pa je predor pri tem nadkritju težko izvedljiv.

7.5 Zakonodaja na vodovarstvenih območjih

Krovni zakon, ki ureja tudi upravljanje s podzemnimi vodami, je Zakon o vodah (Uradni list Republike Slovenije, št. 67/02, 2/04 – ZZdl-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14 in 56/15), ki je zelo splošen. Na začetku zakon poda osnovne definicije o podzemni vodi, nato pa v 116. členu natančneje opiše obveznosti pri izvajanju rudarskih del pri katerih se naleti na podzemne vode, ki niso evidentirane. Za že opredeljene vodne vire, je bolj pomembno poglavje 7 (Zakon o vodah, 2012), ki podaja določila za posege v prostor, ki lahko vplivajo na vodni režim. V 150. členu za vsak poseg, ki bi lahko trajno ali začasno vplival na vodni režim ali stanje voda, zahteva pridobitev vodnega soglasja oz. predhodno pridobitev projektnih pogojev, ki jih je potrebno upoštevati v projektnih rešitvah in k temu pridobiti vodno soglasje.

Mesto Ljubljana s širšo okolico leži na vodovarstvenem območju in sicer dveh vodonosnikov. Vodonosnik ljubljanskega barja in okolice in vodonosnik ljubljanskega polja. Vodovarstveni režim urejata naslednji uredbi:

- Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnikov ljubljanskega barja in okolice ljubljane (Uradni list Republike Slovenije, št. 115/07, 09/08 – poprav., 65/12 in 93/13) in
- Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika ljubljanskega polja (Uradni list Republike Slovenije, št. 43/15).

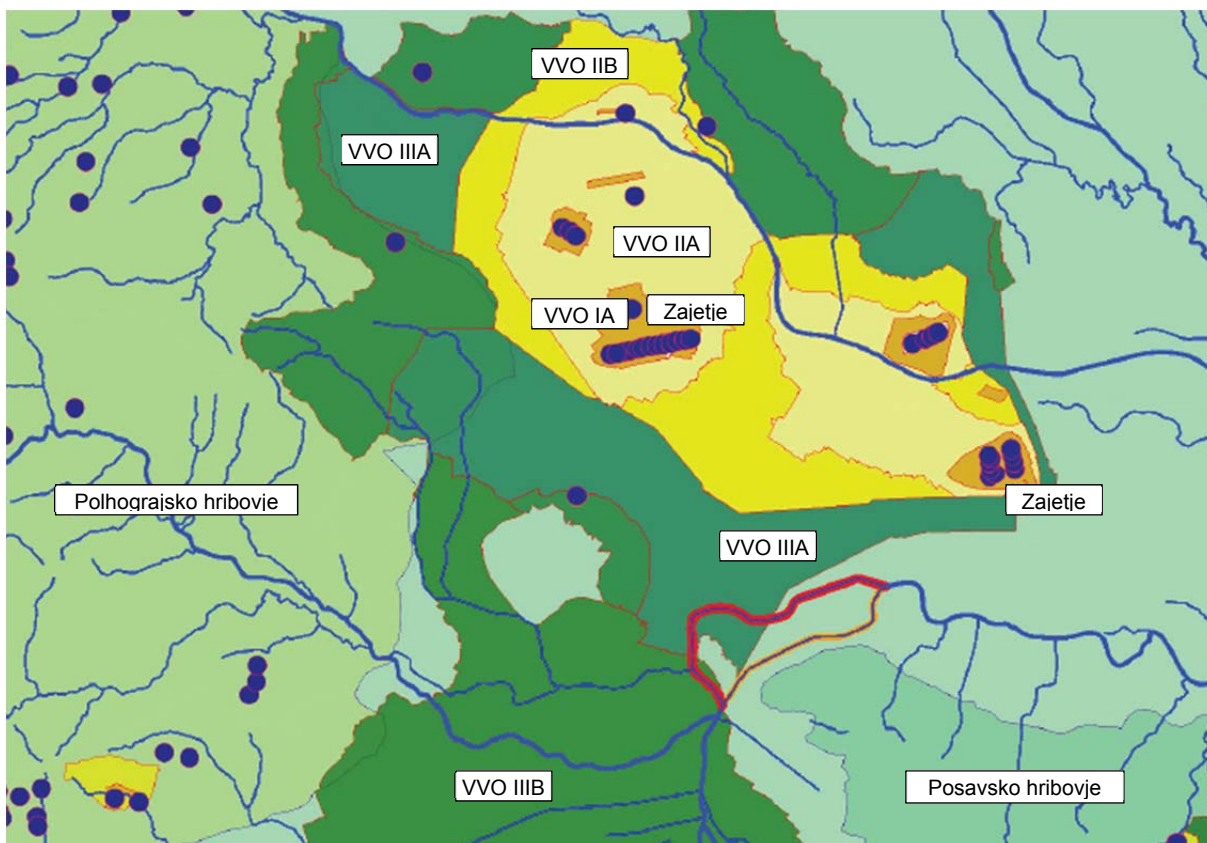
Uredba za vodonosnik na ljubljanskem barju določa, da se lahko predori in podhodi izjemoma gradijo v ožjem in širšem vodovarstvenem območju (VVO II in VVO III) na območju najožjega območja (VVO I) in območja zajetja pa taki posegi niso dovoljeni. Pogoji za izjemo pri gradnji so v uredbi zapisani kot: »gre za izjemoma dovoljeno gradnjo objektov ter izvajanje gradbenih del in se zanje izda vodno soglasje, če je k projektnim rešitvam iz projekta za pridobitev gradbenega dovoljenja v postopku pridobitve vodnega soglasja izvedena analiza tveganja za onesnaženje in je iz rezultatov te analize razvidno, da je

tveganje za onesnaženje zaradi tega posega sprejemljivo in če se zaradi njegovega vpliva na vodni režim in stanje vodnega telesa izvedejo zaščitni ukrepi, za katere iz rezultatov analize tveganja za onesnaženje izhaja, da je tveganje za onesnaženje zaradi tega posega sprejemljivo».

Dodatno sta podana še dva pogoja in sicer:

- izkopi na najožjih in ožjih vodovarstvenih območjih niso dovoljeni, razen če niso izdelani več kakor dva metra nad najvišjo gladino podzemne vode in
- izkopi na širšem vodovarstvenem območju so dovoljeni nad srednjo gladino podzemne vode, razen v primerih, kadar je izjemoma dovoljena gradnja in pravi, da se lahko koplje tudi globlje, če se transmisivnost vodonosnika ne zmanjša za več kot 10%. Potrebno je tudi preveriti količinsko in kakovostno stanje podzemne vode.

Srednja gladina ali nivo podzemne vode je definirana kot srednja vrednost v nizu meritev med najvišjo in najnižjo izmerjeno gladino ali nivojem podzemne vode. Za meritve se upoštevajo podatki monitoringa podzemne vode na vodovarstvenem območju, ki ga vodi Agencija RS za okolje ali meritve gladine podzemne vode, ki jih izvaja upravljavec vodnega vira. Meritve morajo biti izvedene za obdobje najmanj dveh hidroloških ciklusov (torej dve leti opazovanj) na območjih predvidenega posega.



Slika 7-8: Vodovarstvena območja in črpališča v Ljubljani (www.gov.si/atlasokolja/).

Figure 7-8: Water protection area with water facilities of Ljubljana (www.gov.si/atlasokolja/).

Uredba za vodonosnik na Ljubljanskem polju pa določa, da se lahko predori in podhodi izjemoma gradijo v ožjem in širšem vodovarstvenem območju (VVO II A, VVO II B in VVO III A), dovoljena pa je gradnja omenjenih objektov brez izjem na širšem vodovarstvenem

območju (VVO III B), kjer velja blažji režim varovanja. Na območju najožjega območja (VVO I) in območja zajetja pa taki posegi niso dovoljeni. Pogoji za izjemo pri gradnji na VVO II A in B so v uredbi zapisani enako kot pogoji pri vodonosniku na Ljubljanskem barju. Nekoliko drugačen je pogoj na VVO III A, ki pravi, da se objekt lahko gradi, če so v postopku izdaje vodnega soglasja za gradnjo preverjeni vplivi na vodni režim in stanje vodnega telesa ter je izdano vodno soglasje.

Enaka pa sta tudi dva dodatna pogoja glede gradnje 2 m nad gladino podzemne vode in maksimalne zmanjšane transmisivnosti. V 16. Členu je zahtevana tudi ocena na območju maksimalnih depresijskih lijakov črpališč. Maksimalni depresijski lijak se določi s pomočjo numeričnega modela toka podzemne vode in ob maksimalni izdatnosti celotnega črpališča.

7.6 Splošno o sestavi tal na Ljubljanskem polju in Ljubljanskem barju

V tem poglavju bomo na splošno povzeli sestavo tal na Ljubljanskem polju in Ljubljanskem barju. Drobne in Tovornik sta svojem članku (1961) obravnavala geotehnične pogoje za gradnjo na območju mesta Ljubljane, vendar podatki ne zajemajo večjih globin na katerih se nahajajo predori. Vseeno pa jih je mogoče uporabljati za načrtovanje in umeščanje postaj, umeščanje portalov predorov, štartnih oz. sprejemnih jaškov, logistično podporo in druge objekte.

V severnem delu Ljubljane sega savski prod v neposredno bližino šišenskega hriba in Golovca. Površinsko plast sestavlja humus in umetni nasipi, ki dosežejo do 3 m debeline. Sledi plast čistega peščenega proda, ki ima debelino od 5 do 6 m, nekje tudi do 15 m. Debelina narašča proti Savi in Ljubljanici. Pod prodom leži ilovnata plast, povprečne debeline od 1 do 2 m, ponekod do 3,5 m. Pod ilovnato plastjo se nahaja meljast peščen prod, ki je ponekod debeline 5 m. Pod plastjo meljastega proda se nahaja debelejša plast konglomerata. Najbolj pogosto se nahaja na globini 8 m. Na območju Kodeljevega, pri mostu na odseku med dolenjsko in štajersko železniško progo ter ob Bohoričevi ulici se prične že na globini 2,5 do 4 m, medtem ko je na območju Mikošičeve, Slovenske in Dalmatinove ulice na nekaterih mestih šele pri globini 20 m (Drobne in Tovornik, 1961).

Na severnem robu šišenskega hriba je med savske naplavine vrinjena plast nanosa z obrobnega gričevja. Debelina te plasti doseže tudi 4,5 m in jo pretežno sestavlja glina, kateri je primešano vedno več preperelega grušča, proda in glinastih skrilavcev, katerih delež narašča z globino. Pod plastjo savskega proda se nahaja plast šote, kar kaže, da je bilo na območju med Dravljami in Kosezami jezero. Šota prehaja navzdol v sivo organsko glino. Karbonski glinasti skrilavci in kremenovi peščenjaki Šišenskega hriba v začetku počasi tonejo v globino, ob Celovski cesti se nahajajo na 22 m, medtem pa jih na območju Kleč ne najdemo niti v globini 100 m. To kaže na stopničasto prelomljeno podlago Ljubljanskega polja.

Osrednji del mesta, kjer Ljubljansko polje prehaja v Barje, debelina prodne plasti počasi pojema. Pod vrhno plastjo je na območju Slomškove ulice 15 m debela prodna plast, na Dalmatinovi ulici le še 6 do 7 m, medtem ko na Erjavčevi cesti skoraj popolnoma izklini. Prevladovati začnejo glinasto meljaste naplavine z vložki glinastega proda in drobnega peska. V bližini Rožnika in grajskega hriba se nahajajo pod savskim prodom v globini 10 m pod površino 3 do 6 m debele malo prepustne meljaste in glinaste naplavine, preperine

karbonskih skrilavcev in peščenjakov. Ta plast se izrazito prične ob Cankarjevi cesti ter se vleče dalje proti jugu in jugozahodu. Na območju Kersnikove, Dalmatinove, Miklošičeve in Trubarjeve ulice leži pod prodom ponekod svetlo siv karbonatni melj, ki doseže tudi 12 m debeline. Na območju Kersnikove ulice se pojavi na 10 m globine od 2 do 4 m debela plast sive glin (polžarice). V globini 16 m se prične plast savskega proda, ki se vleče čez Mirje, Gradaščico in mimo večne poti. Debelina te plasti je ob Erjavčevi cesti debela vsaj 27 m. V Veselovi ulici se prične konglomerat, ki se menjava z vmesnimi plastmi slabo vezanega proda.

Na Mirju in naprej proti Gradaščici sestavljajo glavni del vrhnjih plasti sive glin in pretežno karbonatni melj z vmesnimi lečami drobnega peska ter gradaškega proda. Ob večni poti nastopa do globine približno 7 m droben peščen prod oziroma prodnat pesek. Ta plast je ponekod prekinjena s karbonatnim meljem ali meljnim peskom. V globini 16 m se začne spodnja prodnata plast.

Južni del mesta sestavljajo predvsem usedline, ki so zelo raznovrstne. V dolgih obdobjih so jih prinašale Ljubljana, Iška, Gradaščica, Želimeljščica z okoliških hribov, včasih tudi Sava. Debelejši prod se je usedal na robovih, medtem ko so sredino udorine zapolnile drobno zrnate naplavine. Vrhno plast tvorita povečini šota oziroma židka glina. V globini približno 14 m se pojavi do 5 m debela plast dobro vezanega gradaškega proda z meljem (10% melja, 50% peska in 40% proda), ki prehaja v droben pesek. Na Dolgem mostu na Viču leži pod gradaškimi peščenimi prodnatimi usedlinami ter barjanskimi šotnimi in glinastimi plastmi savski prod. Plast proda se v zgornjih 36 m plasteh večkrat menjava z vložki gradaškega proda, od globine 36 m naprej in vsaj do globine 50 m pa najdemo čisto plast savskega proda. Barjanske usedline so med Dolenjsko cesto in Ižansko cesto pomešane z gruščem karbonskih glinastih skrilavcev in peščenjakov.

Sestavo in lastnosti tal bomo na podlagi analize podatkov iz razpoložljivih geološko geomehanskih poročil prikazali v poglavju 8.4 in sicer ločeno za posamezne potencialne nove podzemne prometnice.

7.7 Lastnosti tal na območju Ljubljane

Poleg natančne geološke in hidrogeološke napovedi je zelo pomemben korak v fazi projektiranja tudi določitev geotehničnih parametrov. S širšim naborom parametrov izdelamo stabilnostne analize, predvsem pa omogočimo načrtovalcu in proizvajalcu TBM naprave ustrezno zasnovo, ki je prilagojena specifičnosti projekta. Zopet lahko uporabimo priporočila iz avstrijske smernice za kontinuirano gradnjo predorov (OEGG, 2013), kjer nabor parametrov ločijo za kamnine in zemljine. Podobno obsežen nabor določanja geotehničnih karakteristik priporočajo tudi nemške smernice (DAUB, 2010).

Metoda določanja parametrov je odvisna od faze načrtovanja. V zgodnjih fazah običajno nimamo na voljo natančnih podatkov oz. je njihova količina lahko dokaj skopa, zato se uporabijo vrednosti parametrov iz literature ali primerljivih projektov, ki veljajo za posamezen tip hribine. V kasnejših fazah, pa se poleg dodatnih geološko-geotehničnih izsledkov uporabljajo še empirični pristopi in numerične metode. Smernica priporoča določitev geomehanskih lastnosti za kamnine in zemljine. Lastnosti so podane ločeno za naslednje glavne sklope (OEGG, 2013):

- **kamnine:** trdnost, gostota, abrazivnost, obstojnost in sprememba prostornine, potencial lepljenja in
- **zemljine:** petrografska sestava, granulometrična sestava, geometrija zrn, konsistenca, trdnost, deformabilnost, gostota, abrazivnost, potencial lepljenja, nabrekalni potencial, prepustnost za vodo in prepustnost za zrak.

Znotraj glavnih sklopov so specificirane posamezne značilne lastnosti, ki najbolj opisujejo posamezne iskane geomehanske karakteristike in so ključne za ustrezno načrtovanje. Smernica nato podaja posamezne korake načrtovanja. Najprej iz zbranih geotehničnih parametrov določimo tipe obnašanje hribine za posamezne odseke predora. Tipi obnašanja hribine so enaki kot pri ciklični gradnji predorov. Na podlagi tipov obnašanja hribine se določi sistem izvedbe predora (ciklični ali kontinuirani), ki pa v tej fazi projektiranja še ni dokončen. Nadalje ocenimo obnašanje čela predora (če so potrebni predhodni ukrepi podpiranja oz. podpiranje sploh ni potrebno). S pomočjo vseh zbranih podatkov nato izberemo primeren tip TBM naprave.

V predhodnih poglavjih smo opredelili geološko zgradbo in hidrogeološke pogoje na območju Ljubljane, tu pa predstavljamo še osnovne geotehnične parametre za posamezne plasti (Žigman, 2000). Nabor podatkov je dokaj skop v primerjavi z zgornjo preglednico, saj so podane le osnovne geomehanske karakteristike, katere podajamo po geološki starosti posameznih inženirsko-geoloških enot:

1. **Permokarbonski sedimenti (C,P)** se pojavljajo v območju Šišenskega hriba, grajskega hriba in Golovca. Lastnosti hribine so zadovoljive, vendar predstavljajo hribino s slabšimi geomehanskimi karakteristikami za gradnjo predorov. Po kategorizaciji izkopa spada skrilavec in meljevec v 4. kategorijo, peščenjak in kremenov konglomerat pa v 5. kategorijo izkopa.

Podane so naslednje geomehanske karakteristike:

prostorninska teža	$\gamma_g = 21 - 24 \text{ kN/m}^3$
strižni kot	$\varphi = 30^\circ - 32^\circ$
kohezija	$c = 0 - 20 \text{ kPa}$
modul stisljivosti	$M_v = 200 - 350 \text{ MN/m}^2$

2. **Savski konglomeratni zasip (Q₁)** je slabo do dobro vezan konglomerat s tanjšimi vložki peščenega do meljasto peščenega karbonatnega proda skupne debeline okoli 50 m. Je plastovit s horizontalno lego plasti. Konglomerat je slabo do dobro vezan. Na površini konglomeratnega zasipa se pojavljajo vrtače premera 2 – 20 m in globine 3 – 10 m, ki so zapolnjene s peščeno glino in glinasto peščenim prodrom. Savski konglomeratni zasip predstavlja dobro nosilna in stabilna tla, pozornost je potrebno nameniti le kraškemu pojavom (kaverne in vrtače). Po kategorizaciji izkopa uvrščamo slabo vezan apnen konglomerat v 4. kategorijo, dobro vezan pa v 5. kategorijo.

Podane so naslednje geomehanske karakteristike:

AC klasifikacija	konglomerat, GP, GM
prostorninska teža	$\gamma_g = 22 - 24 \text{ kN/m}^3$
strižni kot	$\varphi = 37^\circ - 41^\circ$
kohezija	$c = 0 \text{ kPa}$
modul stisljivosti	$M_v = 25 - 100 \text{ MN/m}^2$

3. **Starejši savski prodni nanos (Q_1)** je podoben savskemu zasipu, le delež proda prevladuje nad konglomeratom. Sestavlja ga peščen do meljasto – peščen karbonatni prod z redkimi vložki apnenega konglomerata debeline do 50 m. Ima horizontalno plastovitost. Prod je srednje gost do gost, konglomerat pa je slabo do srednje vezan. Predstavlja dobro nosilna in stabilna tla. Po kategorizaciji izkopa savski prodni nanos uvrščamo v 3. kategorijo, če je delež apnenega konglomerata večji, pa v 4. kategorijo izkopa.

Podane so naslednje geomehanske karakteristike:

AC klasifikacija	konglomerat, GP, GM
prostorninska teža	$\gamma_g = 22 \text{ kN/m}^3$
strižni kot	$\varphi = 35^\circ - 39^\circ$
kohezija	$c = 0 \text{ kPa}$
modul stisljivosti	$M_v = 25 - 50 \text{ MN/m}^2$

4. **Mlajši savski prodni nanos (Q_1)** predstavlja peščen karbonatni prod, ki je srednje gost do gost. Debelina plasti znaša od 5 do 10 m. Prekriva konglomeratni zasip in starejši prodni nanos na območju Centra, Viča in dela Šiške. Predstavlja dobro nosilna in stabilna tla. Po kategorizaciji ga uvrščamo v 3. kategorijo izkopa.

Podane so naslednje geomehanske karakteristike:

AC klasifikacija	GP
prostorninska teža	$\gamma_g = 22 \text{ kN/m}^3$
strižni kot	$\varphi = 35^\circ - 39^\circ$
kohezija	$c = 0 \text{ kPa}$
modul stisljivosti	$M_v = 25 - 50 \text{ MN/m}^2$

5. **Poplavno – zaježitveni in hudourniški nanosi ($Q_{1,2}$)** predstavljajo nanose Ljublanice in njenih pritokov. Sestavlja jih menjavanje plasti meljne gline, melja, meljastega do enozrnatega peska ter glinasto – meljastega proda in grušča nekarbonatnih kamnin. Pojavljajo se tudi vložki organske gline in šote. Debelina znaša od 0,1 m do nekaj metrov. Posamezne plasti gline in melja so v lahko gnetnem do težko gnetnem stanju, peski in prodi pa so rahli do srednje gosti. Po plasteh peska in proda med glino se pojavlja talna voda, njena izdatnost pa je majhna. Debelina nanosov znaša od 10 do 20 m. Nanosi predstavljajo slabo nosilna tla. Po kategorizaciji spadajo v 3. kategorijo izkopa.

Podane so naslednje geomehanske karakteristike:

AC klasifikacija	CL, ML, SM, SU, GC, GM, OL, Pt
------------------	--------------------------------

za glino, glinast melj:

prostorninska teža	$\gamma_g = 18 - 20 \text{ kN/m}^3$
Indeks konsistence	$I_c = 0,25 - 1,0$
strižni kot	$\varphi = 18^\circ - 23^\circ$ ($c = 0 \text{ kPa}$)
kohezija	$c = 10 - 60 \text{ kN/m}^2$ ($\varphi = 0^\circ$)
modul stisljivosti	$M_v = 0,5 - 5 \text{ MN/m}^2$
koeficient prepustnosti	$k = 1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$

za glinasto – meljast prod, pesek:

prostorninska teža	$\gamma_g = 20 - 21 \text{ kN/m}^3$
strižni kot	$\varphi = 25^\circ - 30^\circ$
kohezija	$c = 0 \text{ kPa}$
modul stisljivosti	$M_v = 7,5 - 15 \text{ MN/m}^2$

Iz opisov lahko izdvojimo **gradaški prod (nanos Gradaščice – Q_{1,2})**, kjer nastopa srednje gost peščen droben prod peščenjaka in skrilavca. Debelina nanosa je od 5 do 10 m. Predstavlja dobro nosilna tla. Gradaški prod uvrščamo v 3. kategorijo izkopa.

AC klasifikacija	GP, GM
prostorninska teža	$\gamma_g = 20 - 21 \text{ kN/m}^3$
strižni kot	$\varphi = 31^\circ - 35^\circ$
kohezija	$c = 0 \text{ kPa}$
modul stisljivosti	$M_v = 15 - 30 \text{ MN/m}^2$

6. **Spraline s pobočij (Q₂)** imajo podobne geomehanske karakteristike kot poplavno – zaježitveni in hudourniški nanosi.

V naslednjem poglavju so obdelani hipotetični primeri novih tras podzemnih prometnic oz. predorov na območju Ljubljane z uporabo TBM tehnologije. Za potencialne trase novih podzemnih prometnic bomo na podlagi obstoječih podatkov o inženirsko-geoloških danostih, določili reprezentativne vzdolžne geološke profile za posamezne proge in njihove geomehanske karakteristike.

8 NAČRTOVANJE PREDOROV NA OBMOČJU LJUBLJANE

8.1 Splošno

V tem sklopu naloge bomo strnili znanja pridobljena v začetnih poglavjih tako, da bomo glede na študije razvoja prometne infrastrukture določili potencialne nove trase predorov. Le te bomo povzeli iz strokovnih podlagah za razvoj javnega mestnega prometa Ljubljane (2009) in iz študije o modernizaciji ljubljanskega železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010). Nove potencialne trase bodo združevale usmeritve o razvoju infrastrukture iz obeh dokumentov, saj je namen naloge preveriti uporabo TBM tehnologije v vseh možnih naravnih danostih na območju Ljubljane.

Glede na to, da oba dokumenta obravnavata železniško infrastrukturo, smo se odločili, da kot izhodišče v računskem delu, nadaljujemo z idejo o izvedbi podzemne železnice v mestu Ljubljana in okolici. V ta namen smo v poglavju 8.2 opisali od česa je odvisna velikost predora in ga v nadaljevanju tudi definirali.

Nato bomo v nadaljevanju izdelali analizo potencialnih tras novih podzemnih prometnic. Za trase predorov bomo opisali reprezentativna območja, ki bodo odvisna od geoloških danosti in kjer lahko pričakujemo drugačne geotehnične lastnosti hribine. Geotehnične lastnosti hribine vplivajo na načrtovanje predora in izbiro ustrezne TBM naprave. Preverili bomo tudi ali predlagane trase predorov posegajo v vodovarstvena območja in katere vrste ter kakšne omejitve veljajo pri gradnji predorov.

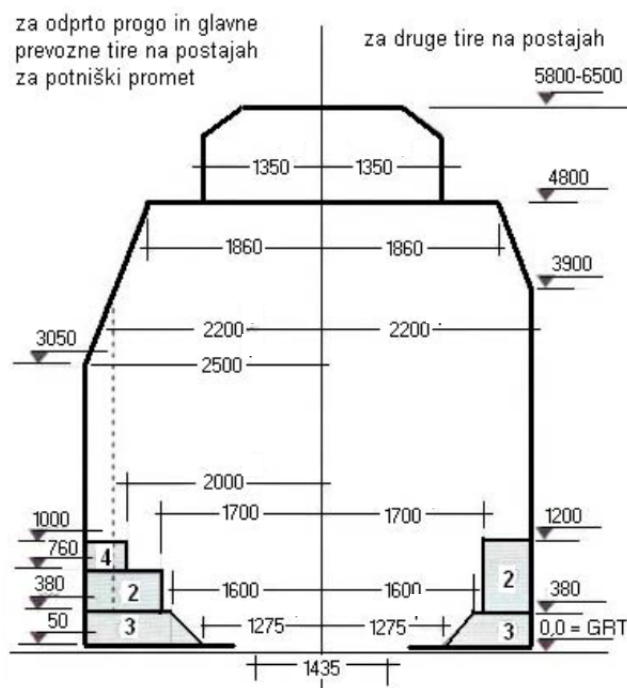
Znotraj reprezentativnih območij bomo za trase izdelali vzdolžne geološke profile in jim na podlagi razpoložljivih podatkov opredelili pričakovano sestavo tal in geomehanske parametre. V nadaljevanju bomo v globini med 16 in 25 m, predvideli niveleto predora in izbrali tiste tipične vrste hribine oz. materiale, ki služijo za izbiro TBM naprave. Prikazali bomo tudi reprezentativne granulometrične krivulje. Zbrani podatki bodo hkrati eni izmed vhodnih podatkov za izbiro TBM naprave, ki jo bomo nato opravili na podlagi smernic raznih geotehničnih združenj in priporočil novejših strokovnih prispevkov.

V drugem delu poglavja, bomo obravnavali vplive na okolje, kjer bomo določili stopnjo posedanja površine in relativnih zasukov, obseg ravnanja z gradbenimi odpadki in ocenili vplive hrupa, prahu in vibracij na okolje. Posedanje površine bomo izračunali s pomočjo empirične metode po Pecku, ki temelji na izgubi prostornine izkopa (V_L). Pri okoljskem vidiku, je ravnanje z odpadki v veliki meri odvisno od izbire tehnologije naprave in možnosti, ki jih dopušča zakonodaja. Za širšo sliko vplivov na okolje, ki nastanejo pri gradnji predorov, bomo poskušali na podlagi vzorčnih primerov podati oceno, ki bi jo uporaba TBM tehnologije lahko imela na okolje. Obravnavali bomo emisije prahu, hrupa in vibracij ter preverili vpliv na podtalnico.

8.2 Določitev velikosti predora

Določitev velikosti profila predora je odvisna od potreb za katere je predor predviden. Če pogledamo modernizacijo železniškega vozlišča je potrebno pri načrtovanju upoštevati določila pravilnika o zgornjem ustroju železniških prog (UL RS št. 92/2010), ki pravi da je potrebno za novogradnje in nadgradnje upoštevati svetli profil GC. V primeru gradnje podzemne železnice, ki služi zgolj za potniški promet, pa bi bil lahko profil precej manjši. V slovenski zakonodaji ni predpisa, ki bi pokrival ta določila in bi verjetno pri projektiranju

privzeti izhodišča že izvedenih projektov oz. priporočila tujih smernic. Premer izkopnega profila enotirnega predora zato lahko varira glede na vrsto tirnega vozila in sicer med 5 in 9,6 m, kar pomeni notranji premer predora med 4,5 in 9 m. V nalogi smo nato za primerjavo posedkov površine in določitev količine odpadkov uporabili svetli profil tirnega vozila, kot je bil uporabljen pri projektu za podzemno železnico v Dohi (Kretschmer in Jäntsche, 2012).



Slika 8-1: Svetli profil GC za železniške predore v Sloveniji (Uradni list RS št. 92/2010).

Figure 8-1: Clearance profile GC for railway tunnels in Slovenia (Uradni list RS št. 91/2010).

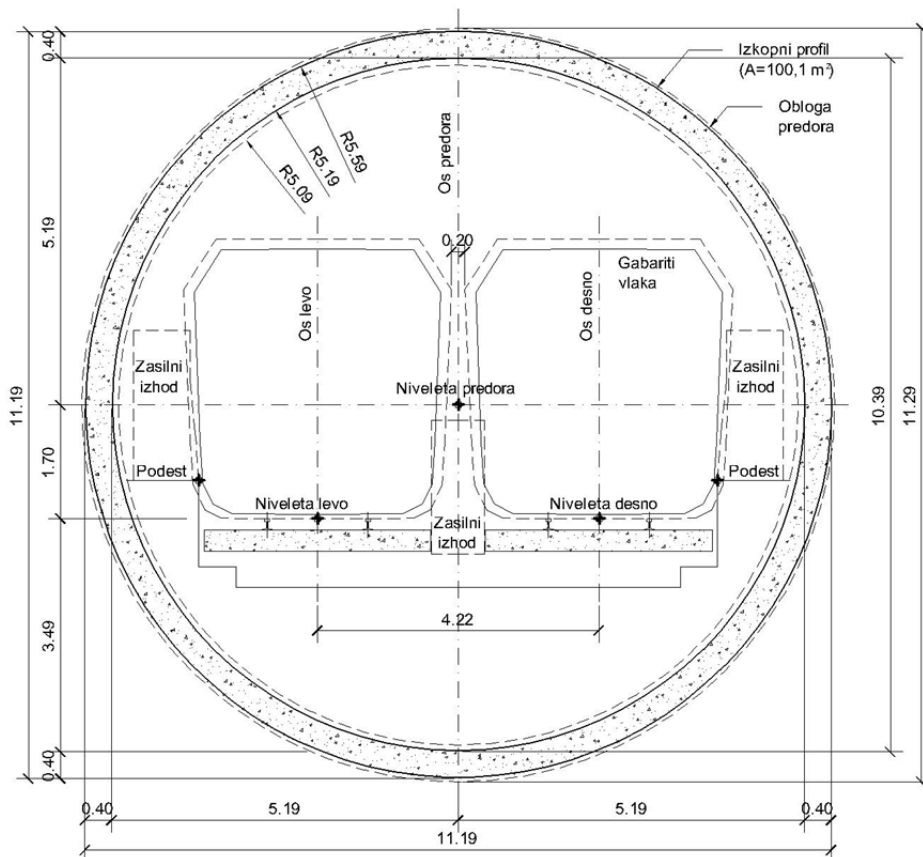
Poleg izbire vrste železniškega prometa je pomembna tudi zasnova predorov, kjer vzporedno potekata dva enotirna predora oz. v enem predoru potekata dva tira (v nadaljevanju dvotirni). Zasnova je odvisna od konstrukcijskih in varnostnih omejitev. Konstrukcijske omejitve izhajajo iz naravnih danosti terena, tehnologije gradnje predora, itd. Drug zelo pomemben vidik je zagotavljanje varnosti v predoru, ki je odvisna od zasnove predorov. Andresen in Paaske (2002) v svojem prispevku podajata naslednje izhodišča:

- dvotirni predor z vzporednima tiroma v isti cevi zagotavlja ubežne poti skozi portale in ubežne rove ali v same ubežne prostore ter
- dva vzporedna enotirna predora, sta med seboj povezana s prečnimi povezavami, ki so na koncih zaprti s proti požarnimi vrati in proti dimnimi loputami.

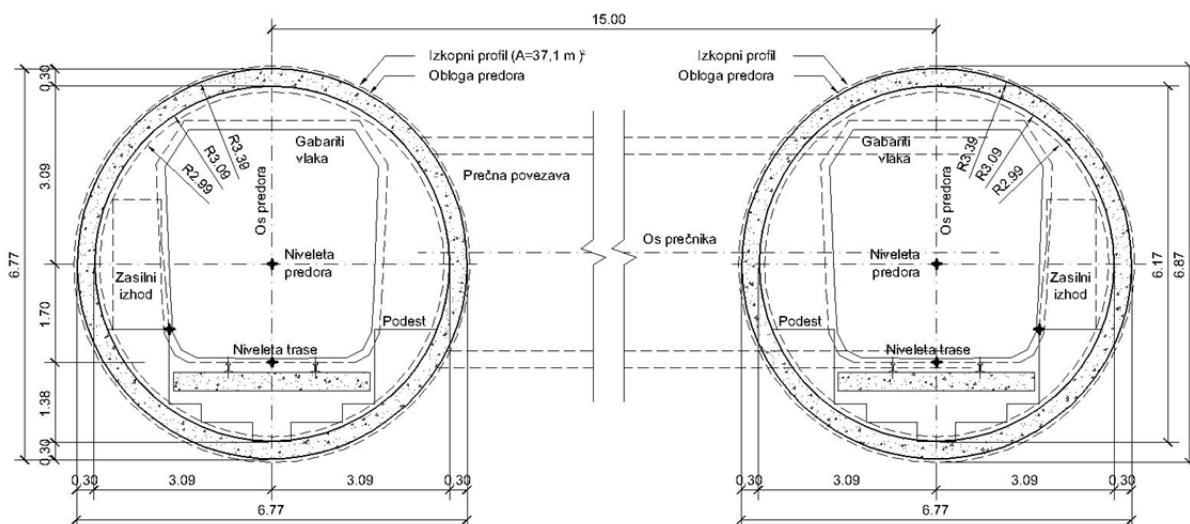
Z vidika evakuacije in požarne varnosti je zasnova z dvema vzporednima enotirnima predoroma varnejša, kar je tudi pogosta praksa pri gradnji sodobnih predorov. Pomanjkljivost vzporednih enotirnih predorov je dodatna gradnja prečnih povezav, ki podaljšajo čas gradnje in jo tudi podražijo (Andersen in Paaske, 2002).

Zasnova podzemnih prometnic in velikost predorov ne vpliva na izbiro TBM tehnologije, saj so naprave premera do 15 m učinkoviti tako za EPB napravo, kot za napravo z izplako. Večji vpliv ima zasnova predorov na okolje, kjer lahko pričakujemo različne stopnje posedkov površine, količine gradbenih odpadkov in ostale vplive na okolje. V nalogi smo za računsko

primerjavo posejnikov površine in določitev količine odpadkov uporabili svetli profil tirnega vozila, kot je bil uporabljen pri projektu za podzemno železnico v Dohi.



Slika 8-2: Karakteristični prečni profil dvotirnega predora za podzemno železnico.
Figure 8-2: Characteristic cross section of double track metro railway tunnel.



Slika 8-3: Karakteristični prečni profil vzporednih enotirnih predorov za podzemno železnico.
Figure 8-3: Characteristic cross section of two single track metro railway tunnel.

Dvotirni predor prikazan s karakterističnim profilom na sliki 8-2 ima osno razdaljo med tiroma 4,22 m, kar predstavlja razmik med svetlima profiloma tirnih vozil 0,20 m. Na vsaki strani je predviden podest, ki se uporablja za vzdrževanje in zasilni izhod. Debelina obloge predizdelanih betonskih segmentov je predvidoma 0,40 m. Notranji premer predora tako

znaša 10,39 m, zunanji pa 11,19 m. Izkopni profil je povečan še za 0,05 m in ima premer 11,29 m, kar prestavlja izkopno površino 100,1 m².

Enotirni predor prikazan s karakterističnim profilom na sliki 8-3, je sestavljen iz svetlega profila tirnega vozila in dveh evakuacijskih profilov na vsaki strani. Debelina obloge predizdelanih betonskih segmentov je predvidoma 0,30 m. Notranji premer predora tako znaša 6,17 m, zunanji pa 6,77 m. Izkopni profil je povečan še za 0,05 m in ima premer 6,87 m, kar prestavlja izkopno površino 37,1 m² za eno cevi oz. 74,2 m².

Oblikovanje profila predora glavne cevi in prečnih povezav je v veliki meri odvisno od namembnosti podzemne prometnice in študije zagotavljanja varnosti v predoru. Hipotetični primer uporabljen v tej nalogi služi za bolj plastično opredelitev vplivov na okolje.

8.3 Potencialne podzemne prometnice v Ljubljani

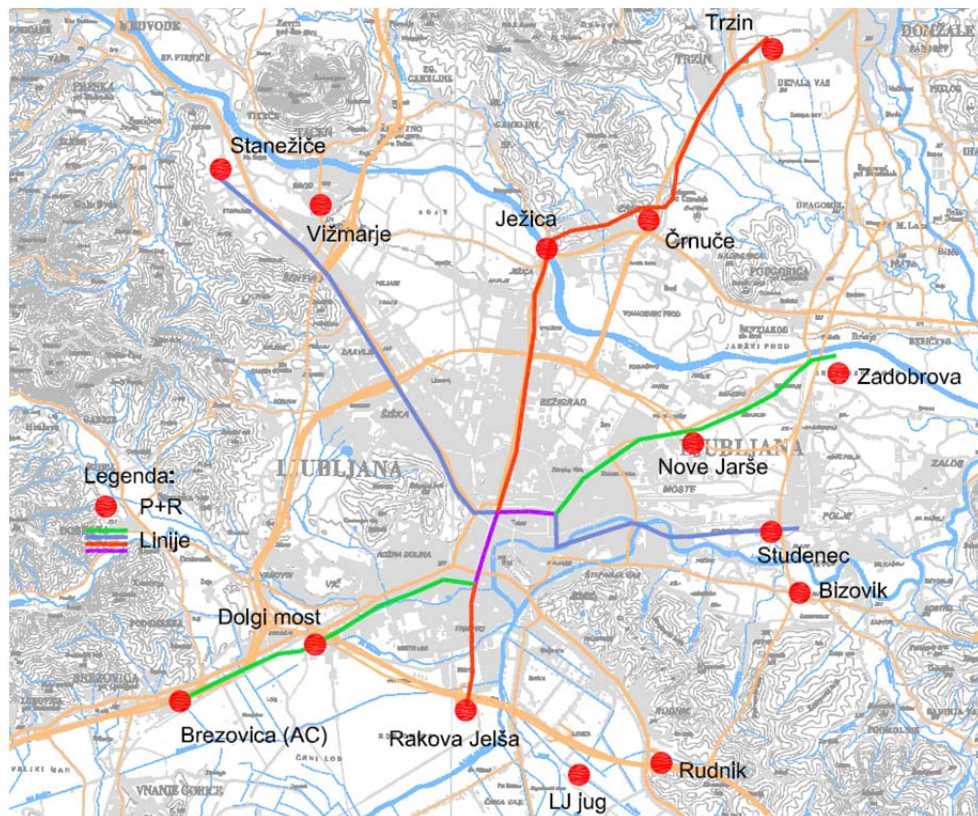
Potencialne trase podzemnih prometnic v Ljubljani in okolici smo privzeli na podlagi izdelanih strokovnih podlag o razvoju mestnega prometa v ljubljanski urbani regiji (Strokovne podlage urejanja javnega prometa ..., 2009) in v študiji variant ljubljanskega železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010). Omenjena dokumenta podrobno obravnavata potniški promet in modernizacijo železnice v mestu in okolici in sta dobri podlagi za potrebe te naloge.

Pri podrobnem pregledu teh dveh dokumentov, smo za naše nadaljnje delo privzeli iz vsakega po eno varianto ureditve javnega prometa in sicer tisto, ki je bila opredeljena kot najprimernejša. V strokovnih podlagah (2009) je bila to varianta oz. sistem št. 4. Sistem 4 ima skupno dolžino prog 42,4 km. Proge povezujejo 9 glavnih »P+R« parkirišč in jih v primeru podzemne železnice v celotni dolžini izdelamo kot predor. Skupno dolžino sistema 4 lahko razdelimo na 3 glavne proge in sicer (Slika 8-4):

- proga A: Stanežiče – Studenec,
- proga B: Trzin – Rakova Jelša in
- proga C: Zadobrova – Brezovica.

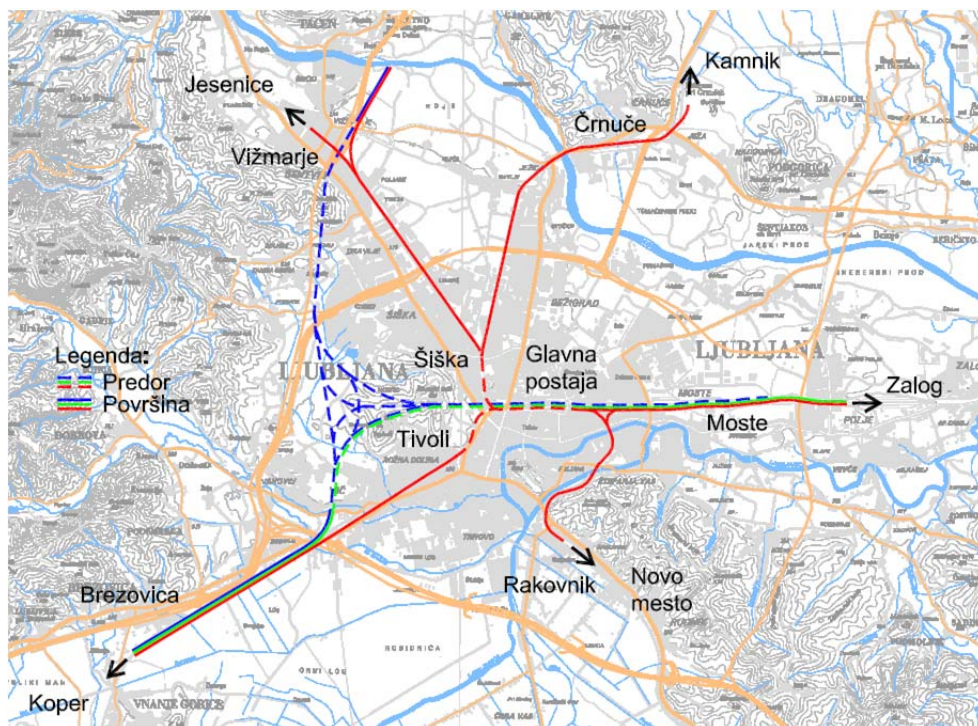
V študiji ljubljanskega železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010) je sicer najbolj primerna varianta 1, vendar smo mi uporabili varianto 4, ki predvideva predor pod Rožnikom. Skupna dolžina vseh obravnavanih prog je 77,0 km od tega 33,64 km v predoru. Proge v osnovi potekajo po obstoječih koridorjih, nove linije so predvidene v obliki predora pod Rožnikom za namen tovornih in hitrih prog. Na sliki so proge prikazane v treh barvah, kjer rdeča pomeni potniške proge, modra predstavljatovorne proge in zelena predstavlja visokohitrostno progo (Slika 8-5).

Iz zgoraj opisanih vhodnih podatkov smo nato privzeli tiste trase, katere lahko smatramo, kot nove potencialne podzemne prometnice ali predore. V nalogi smo obravnavali širši nabor prog, saj smo želeli preveriti izvedljivost in uporabnost TBM naprave na geološko raznolikem območju.



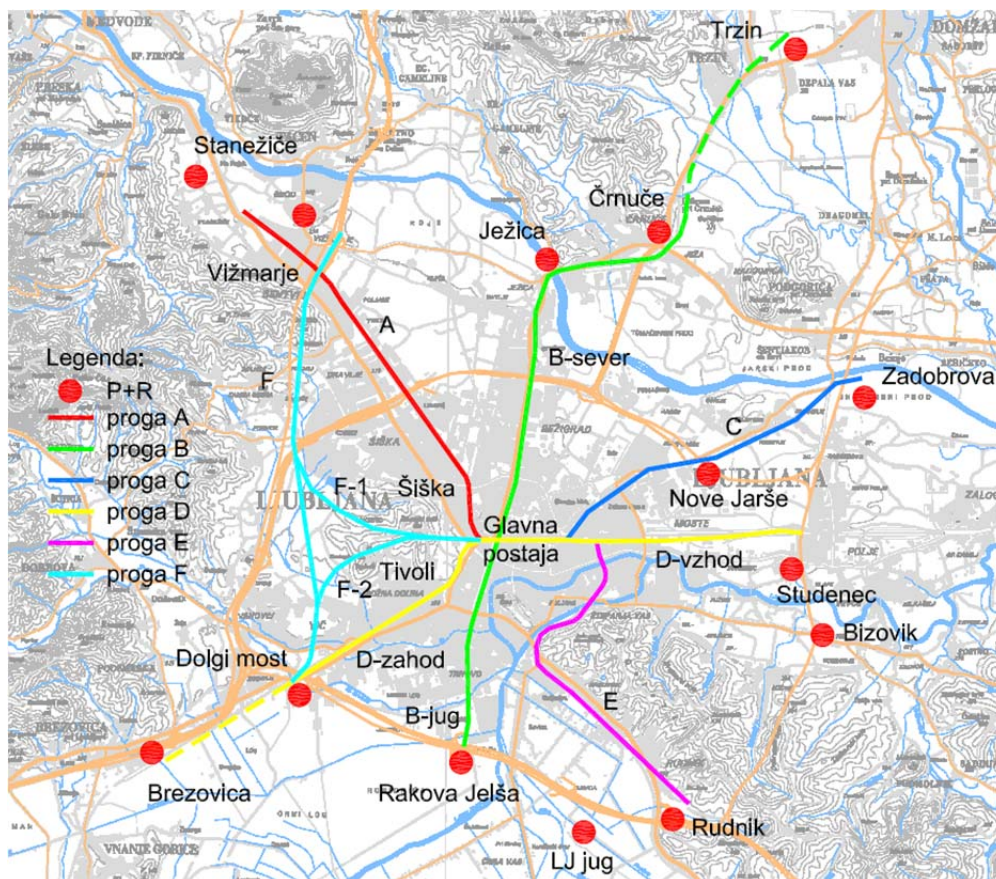
Slika 8-4: Topografska karta Ljubljane s progami sistema 4 (prirejeno po Strokovnih podlagah ..., 2009).

Figure 8-4: Topographic map of Ljubljana with lines from system 4 (adapted from Strokovnih podlagah ..., 2009).



Slika 8-5: Topografska karta Ljubljane s progami variante 1 (prirejeno po Žličar et al., 2010).

Figure 8-5: Topographic map of Ljubljana with lines from variant 1 (adapted from Žličar et al., 2010).



Slika 8-6: Topografska karta Ljubljane s potencialnimi novimi trasami predorov.
Figure 8-6: Topographic map of Ljubljana with potential new tunnel lines.

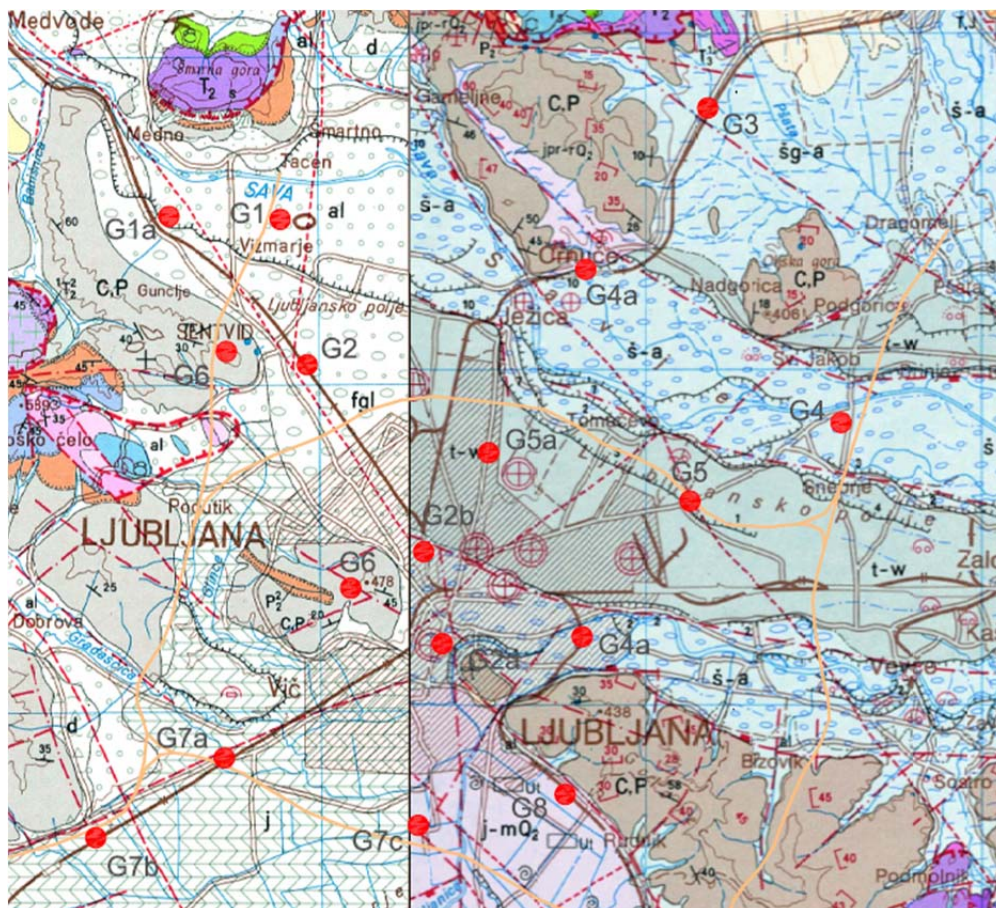
Na sliki 8-6 so prikazane vse potencialne trase predorov. V grobem so razdeljene na šest prog, katere smo poimenovali s simboli od A do F. Vse proge so vezane na centralno postajo, saj jih združuje ideja o nadgradnji obstoječega sistema javnega prevoza. Železniške proge potekajo po obstoječih koridorjih, kar je sicer tudi eden izmed pogojev v vodovarstvenih območjih, le proga F poteka po novi trasi. Linije podzemnih železnic so speljane po linijah glavnih cestnih vpadnic in povezujejo »P+R« parkirišča. Skupna dolžina potencialnih predorov je 62,49 km.

Preglednica 8-1: Podrobnejši opis tras novih podzemnih prometnic.
Table 8-1: Detail description of new tunnel lines.

Ime proge	Namen	Relacija	Dolžina (m)	Globina (m)
A	železnica/podzemna žel.	center - Stanežiče	7365	16 - 25
B - sever	železnica/podzemna žel.	center - Črnuče/Trzin	7622/11485	16 - 25
B - jug	podzemna železnica	center - Rakova Jelša	3743	16 - 25
C	podzemna železnica	center - Zadobrova	6143	16 - 25
D - vzhod	železnica/podzemna žel.	center - Studenec	5684	16 - 25
D - zahod	železnica/podzemna žel.	center - Vič/Brezovica	4344/6915	16 - 25
E	železnica/podzemna žel.	center - Rudnik	6426	16 - 25
F	železnica	Vižmarje - Vič	8281	16 - 25
F - krak 1	železnica	center - Vižmarje	3046	16 - 25
F - krak 2	železnica	center - Vič	3403	16 - 25

8.4 Naravne danosti na trasah potencialnih predorov

Naravne danosti na območju Ljubljane lahko povzamemo po osnovni geološki karti iz katere je razvidno, da na območju Ljubljane lahko najdemo več različnih geoloških enot. V tem poglavju se bomo osredotočili le na tiste, znotraj katerih potekajo potencialne trase predorov. Oprelimo lahko osem glavnih geoloških enot, katere imajo različne geološke starosti in sestave materiala. Znotraj glavnih geoloških enot, nato najdemo posamezne variacije v sestavi materiala in globini podlage.



Slika 8-7: Osnovna geološka karta z označenimi različnimi geološkimi enotami na območju novih tras predorov (prirejeno po osnovni geološki karti).

Figure 8-7: Main geological map with marks of different geological units on area of new tunnel lines (adapted from main geological map).

Na sliki 8-7 vidimo, da območje sestavljajo prodno peščene plasti (fgl), nanosih rek in potokov (al), jezerskih in barskih sedimentov (j) na zahodnem delu, pretežno glinasto meljaste plasti s plastmi šote (j-mQ₂) in glineno meljastih ter prodno peščenih plasti na vzhodu mesta (šg-a in š-a). V severnem delu mesta se pojavljajo tudi konglomerati (t-w). Geološke enote starejših starosti se izražajo kot hriboviti del Ljubljane in okolice, katere večinoma sestavljajo glinasti skrilavci, sljudasti peščenjak in kremenov konglomerat (C,P). Lokalno se na Šišenskem hribu pojavlja pas rdečkastega peščenjaka (P₂²) in na območju Podutika plastoviti dolomit (T₃²⁺³). V preglednici 8-2 smo pripravili splošni opis osmih glavnih geoloških enot z dodatnimi sedmimi variacijami, ki lokalno natančneje opišejo sestavo tal.

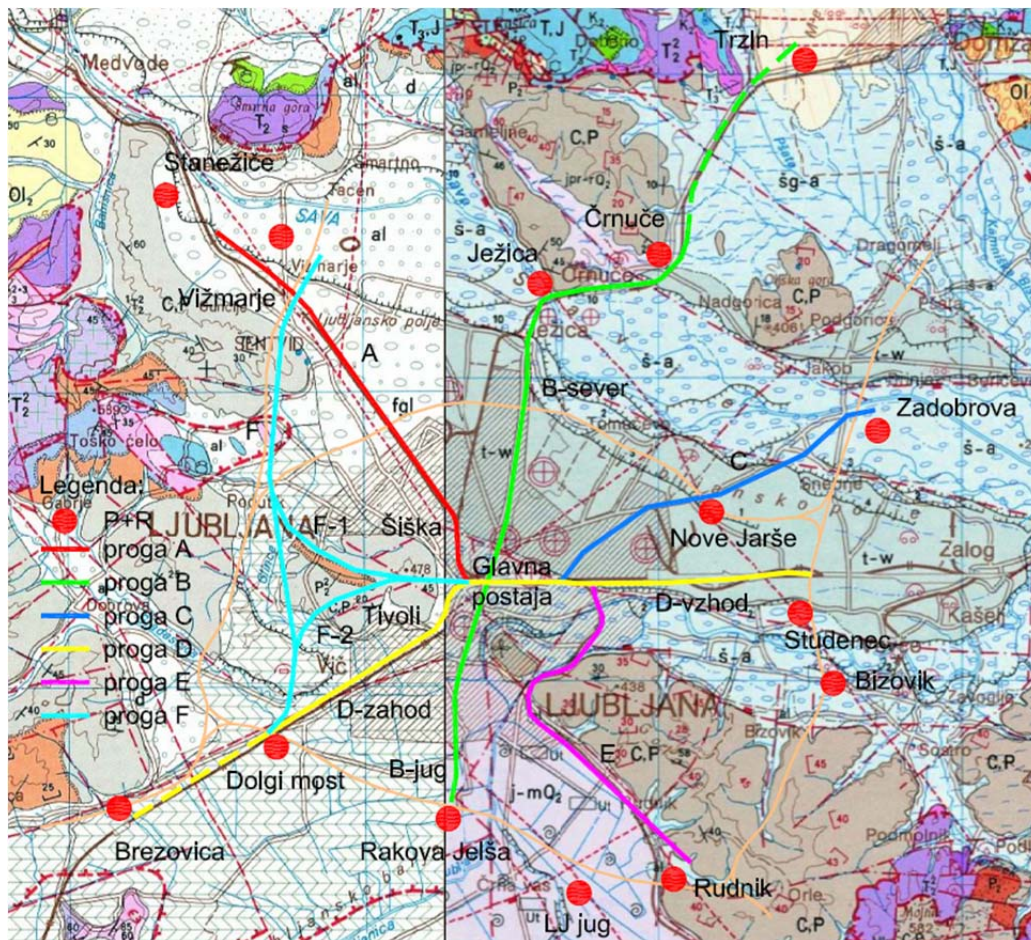
Med osnovnima geološkima kartama za Kranj in Ljubljano je možno opaziti odstopanja v poimenovanju in posledično tudi v sestavi posameznih plasti, zato najbrž lahko poenotimo naslednje geološke enote: G1 in G4 (al in š-a) ter G2 in G5 (fgl in t-w).

Preglednica 8-2: Geološke enote z osnovnimi podatki na območju Ljubljane.

Table 8-2: Geological units with main information on Ljubljana area.

Območja (geološke enote)	Oznaka	Starost	Globina podlage	Material
G1 (Vižmarje)	al	Holocen (Q ₂)	od 20 m do površine	nanosi rek in potokov
G1a (Stanežiče)	al	Holocen (Q ₂)	od 15 m do površine	nanosi rek in potokov
G2 (Dravlje)	fgl	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 50 m do površine	prod, pesek, prodni zasip, konglomerat
G2a (Rožnik/Grad)	š-a	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 25 m do površine	glinast prod, peščena glina in glina
G2b (Union)	š-a	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 30 m do površine	prod, pesek, prodni zasip, konglomerat
G3 (Trzin)	šg-a	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 50 m do površine	glinast prod, peščena glina in glina
G4 (Zadobrova)	š-a	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 50 m do površine	prod
G4a (Črnuče)	š-a	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 20 m do površine	zaglinjen prod, peščeni prod
G5 (BTC)	t-w	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 50 m do 15 m	mlajši prodni zasip
G5a (Tomačevo)	t-w	mlajši Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 50 m do 15 m	mlajši prodni zasip
G6 (Šentvid /Rožnik)	C,P	Karbon, Perm (C,P)	od 500 m do površine	temno siv glinast skrilavec, sljudast peščenjak
G7a (Kozarje/Brod)	j	Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 50 m do 10 m	jezerski in barski sedimenti
G7b (Brezovica)	j	Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 100 m do 50 m	jezerski in barski sedimenti
G7c (Rakova Jelša)	j	Pleistocen, Holocen (Q _{1,2})	od 200 m do 150 m	jezerski in barski sedimenti
G8 (Rakovnik)	j-mQ ₂	Plesitocen (Q ₁)	od 50 m do 10 m	glina, melj, pesek, prod, šota in grušč

Potencialne trase novih podzemnih prog, ki smo jih definirali v poglavju 8.3, smo nato prenesli na osnovno geološko karto. Iz slike 8-8 je razvidno, da proge potekajo v različnih geoloških enotah, katerih dolžine geoloških odsekov so za posamezne proge prikazane v preglednici 8-3.

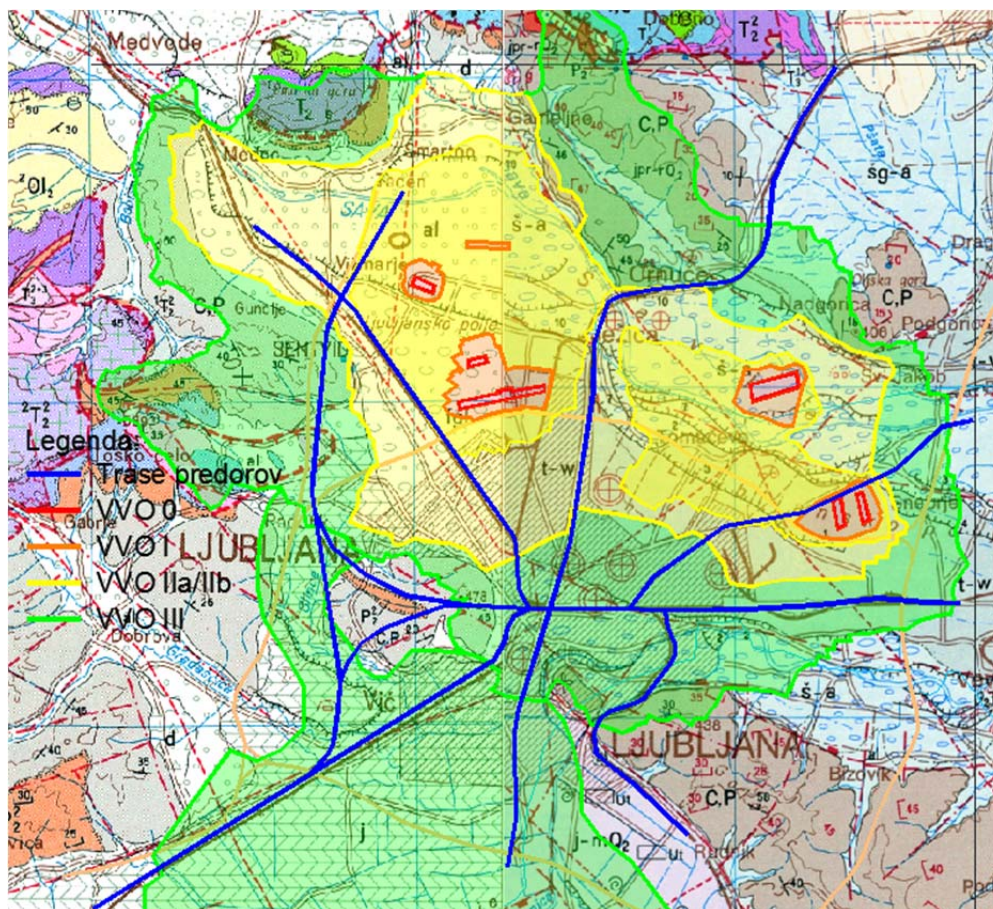


Slika 8-8: Geološka karta s potencialnimi trasami predorov in reprezentativnimi lokacijami geoloških danosti (prirejeno po osnovni geološki karti).

Figure 8-8: Geological map with potential new tunnels with areas of typical geological conditions (adapted from main geological map).

Potencialne trase novih podzemnih prometnic, smo preverili še z vidika poseganja v vodovarstvena območja Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. Ugotovimo lahko, da je pretežni del Ljubljanskega polja opredeljen vsaj z enim od razredov vodovarstvenega območja, vendar pa predvidene trase ne posegajo na območja zajetja oz. najožja območja, kot jih definirati uredbi.

Uredbi o vodovarstvenih območjih (v nadaljevanju VVO) v svoji vsebini prepovedujeta gradnjo predorov na območju zajetja in na najožjem delu vodovarstvenega območja (VVO-0 in VVO-I), na ožjem (VVO-II) in širšem območju (VVO-III), pa je gradnja pogojno dovoljena. Na strožje območje ožjega VVO (VVO-IIa) trasa posega le na območju Novih Jarš proti Sneberjam in sicer na meji območja, ki poteka po obstoječi železniški progi v Stegnah. Na manj strogo območje ožjega VVO (VVO-IIb), posegajo preostale trase na severnem delu Ljubljane, preostale trase v centru in južnem delu mesta pa na širše VVO (VVO-III) (Slika 8-9).



Slika 8-9: Vodovarstvena območja na območju Ljubljane s trasami novih predorov (prirejeno po osnovni geološki karti).

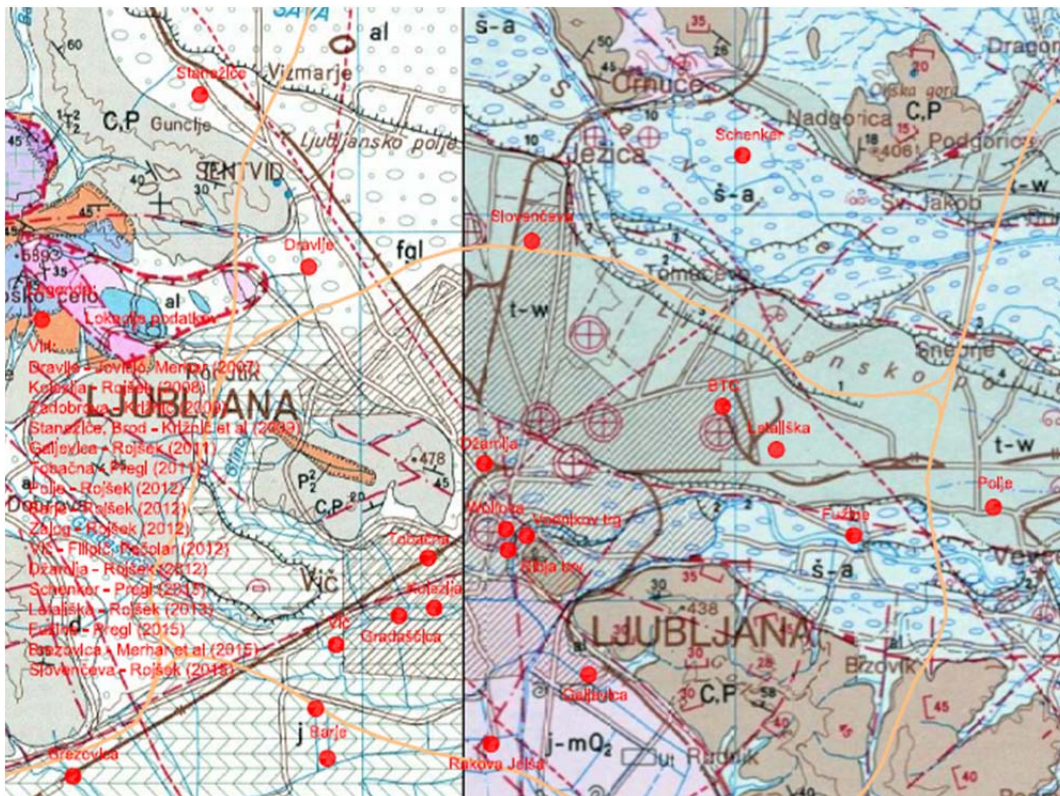
Figure 8-9: Water protection areas in Ljubljana with new tunnel lines (adapted from main geological map).

Omejitve in posebni pogoji gradnje so odvisni od globine predora in od vpliva predora na podtalnico. Trase železniške proge naj bi potekale do globine 16 m pod terenom, kar je pretežno nad koto podtalnice (Žigman, 2000). Trase podzemne železnice pa niso natančno določene, vendar lahko globino ocenimo na podlagi podobnih objektov. Ocenjena globina znaša med 16 in 25 m, zato predorska cev ponekod delno posega v podtalnico. Izvedba analize vpliva predora na podtalnico presega vsebino te naloge (v poglavju 8.6.2 je podanih le nekaj osnovnih izhodišč), opozoriti pa velja, da je končne trase potrebno izbrati tako, da sta izpolnjena naslednja pogoja:

- na najožjih in ožjih vodovarstvenih območjih izkopi niso dovoljeni razen, če niso izdelani več kakor dva metra nad najvišjo gladino podzemne vode in
- izkopi na širšem vodovarstvenem območju so dovoljeni nad srednjo gladino podzemne vode, razen v primerih, kadar je gradnja izjemoma dovoljena. Takrat se lahko koplje tudi globlje, če se pri tem transmisivnost (prepustnost) vodonosnika ne zmanjša za več kot 10%. Pri tem je potrebno preveriti tudi količinsko in kakovostno stanje podzemne vode.

8.4.1 Sestava in lastnosti tal

Posameznim geološkim enotam, ki smo jih definirali v prejšnjem poglavju, smo na podlagi razpoložljivih podatkov pripisali ocenjene vrednosti geomehanskih karakteristik in njihovo zrnastostno sestavo. Podatke o sestavi in lastnostih tal smo pridobili na Inštitutu za rudarstvo, geotehnologijo in okolje in sicer iz izdelanih geološko-geomehanskih poročil in elaboratov. Na sliki 8-10 so prikazane lokacije, kjer smo razpolagali s podatki.

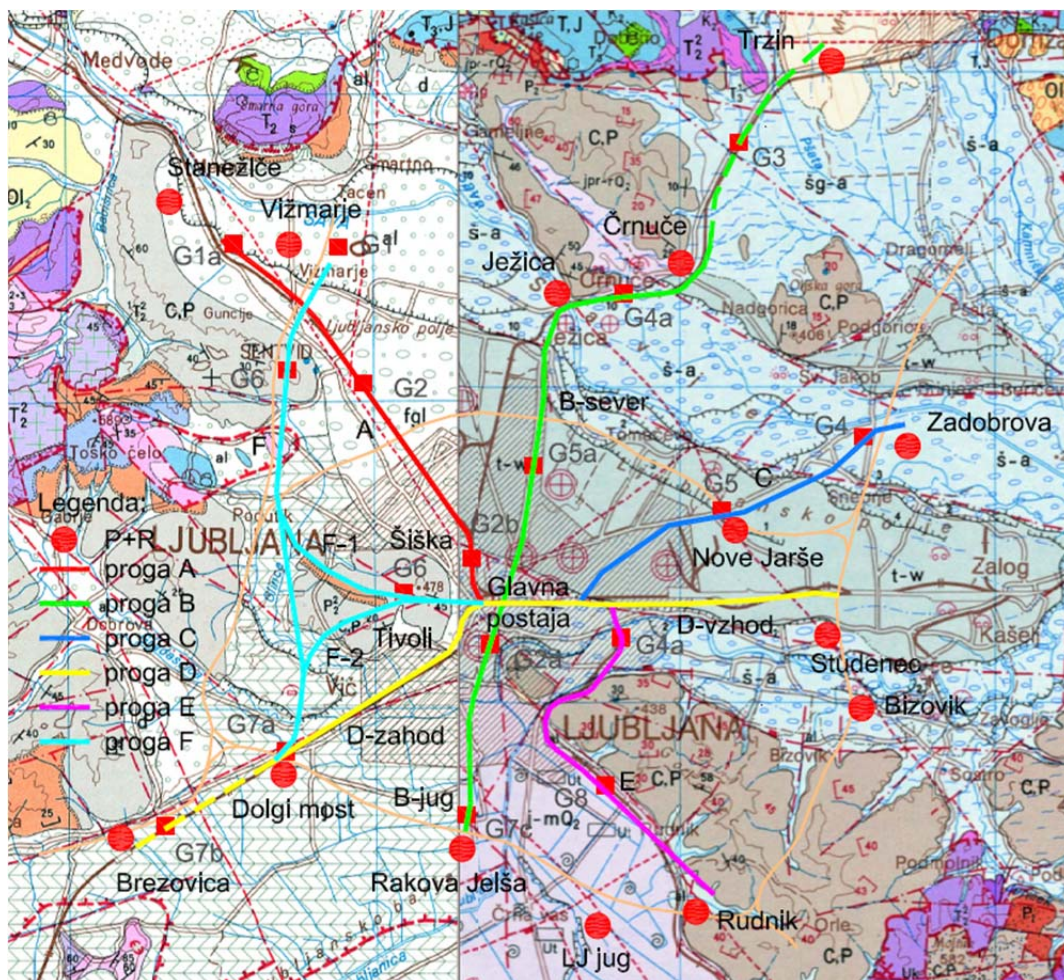


Slika 8-10: Osnovna geološka karta z lokacijami podatkov o sestavi in lastnostih tal (prirejeno po osnovni geološki karti).

Figure 8-10: Main geological map with locations of available data of structure and properties of the ground (adapted from main geological map).

Iz razpoložljivih podatkov, smo privzeli ocenjene vrednosti geomehanskih parametrov za posamezne geološke enote. Za vsako geološko enoto smo opisali sestavo tal v globini do 35 m in povzeli naslednje parametre: opis zemljine, AC klasifikacija, višina podtalnice, prostorninska teža (kN/m^3), kohezija (kPa), strižni kot ($^\circ$), elastični modul (MPa), modul stisljivosti (MPa) in koeficient vodoprepustnosti (m/s). Lastnosti tal podajamo za vsako progo ločeno v poglavju 8.4.1.

Kljub temu, da smo poskušali čim boljše opisati geološke pogoje na obravnavanem območju, se je potrebno zavedati, da so geološko-geotehnične raziskave nujno potrebne in se morajo v primeru realizacije projekta, ažurirati in nadgraditi obstoječe geološko-geomehanske podatke.



Slika 8-11: Osnovna geološka karta s trasami prog in geoloških enot (prirejena osnovna geološka karta).

Figure 8-11: Main geological map with new tunnel lines and geological units (adapted from main geological map).

Na sliki 8-11 prikazujemo posamezne podzemne proge (v različnih barvah) in lokacije »P+R« parkirišč (rdeči krogi) ter območja geoloških enot (rdeči kvadrati). Proge s celotno dolžino in dolžino po posameznih geoloških enotah, smo prikazali v preglednici 8-3.

Preglednica 8-3: Dolžine odsekov geoloških enot za posamezno progno

Table 8-3: Length of section of geological unit for each tunnel line.

Ime proge	Skupna dolžina (m)	Enota 1		Enota 2		Enota 3		Enota 4	
		Opis	Dolžina (m)	Opis	Dolžina (m)	Opis	Dolžina (m)	Opis	Dolžina (m)
A	7365	G1 (fgl)	6278,0	G2b (š-a)	1087,0	/	/	/	/
B - sever	7622/11485	G2b (š-a)	650,0	G3 (šg-a)	4813,0	G4a (š-a)	3270,0	G5a (t-w)	2752,0
B - jug	3743	G2a (š-a)	1338,0	G7c (j-mQ2)	2405,0	/	/	/	/
C	6143	G4 (š-a)	1822,0	G5 (t-w)	4321,0	/	/	/	/
D - vzhod	5684	G4a (š-a)	1886,0	G5 (t-w)	3798,0	/	/	/	/
D - zahod	4344/6915	G2b (š-a)	1070,0	G7a (j)	3274,0	G7b (j)	2571,0	/	/
E	6426	G4a (š-a)	2450,0	G8 (j-mQ2)	3976,0	/	/	/	/
F	8281	G1a (al)	1371,0	G2 (fgl)	1004,0	G6 (C,P)	1715,0	G7a (j)	4191,0
F - krak 1	3046	G6 (C,P)	2220,0	G7a (j)	825,0	/	/	/	/
F - krak 2	3403	G2b (š-a)	540,0	G6 (C,P)	2197,0	G7a (j)	666,0	/	/

Skupna dolžina predorov je 62,49 km, od tega se jih 17,91 km nahaja v pretežno zaglinjenih plasteh, kjer je nivo podzemne vode nad predorom. Predorov v prodnatih oz. peščenih plasteh je 38,45 km in se v večini nahajajo v višini podtalnice ali nad njo. Del predorov pa se nahaja v starejših plasteh in sicer glinenem skrivilcu v dolžini 6,13 km, kjer višina podtalnice ni poznana.

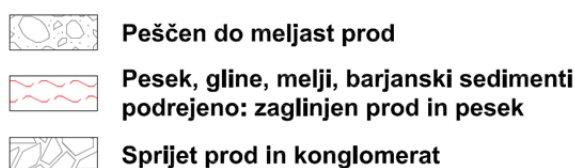
Iz situacije, ki prikazuje vse trase potencialnih prog in območja geoloških enot (Slika 8-11) in opisov sestave tal (poglavje 8.4), je razvidno, da v severnem delu Ljubljane (območja G1, G1a, G4, G4a, G5 in G5a) prevladujejo peščeni in meljasti prodi, mestoma se pojavljajo vložki konglomerata. V vzhodnem delu (območja G4 in G5) je konglomerat bolj izrazit, saj se pojavlja v debelejših slojih in že na globini okoli 20 m. Podlaga je globlja v zahodnem delu (območje G2) in se približuje površini proti vzhodu. Čistejše plasti imajo tudi večjo vodoprepustnost, vendar je globina podtalnice v severnem delu (območja G1, G1a, G2, G2b, G4, G4a, G5 in G5a) dokaj globoko (okoli 20 m).

Osrednji del Ljubljane (območja G2a in G4a) je geološko nekoliko bolj heterogen, saj so zaradi Rožnika in Grajskega hriba, plasti nekoliko tanjše in manj čiste. Na prehodu med Šentvidom in Rožnikom (območje G7a) se pojavlja debel in srednji peščen prod, ki je zameljen in vsebuje leče gline. V prehodu med Rožnikom in Grajskim hribom (območje G2a) se še bolj izdatneje pojavi plast gline s prodom oz. močno zaglinjen prod z lečami glinastega peska. Globina podtalnice je nekoliko bližje površini (od 12 do 10 m). Na tem mestu vodonosnik Ljubljanskega barja prehaja v vodonosnik Ljubljanskega polja, zato se gladina podzemne vode hitro spreminja.

Sestava tal južnega dela Ljubljane (območje G7a) kaže, da je v zgornjih plasteh pretežno zastopana glina s prodom ali peskom, v globini okoli 15 do 20 m, pa nastopajo čistejše plasti. To so pretežno zameljen prod, oz. pesek, drobnozrnati meljasti pesek in glinasti meljasti grušč. Na jugovzhodnem delu Ljubljane (območje G8) se v zgornjih plasteh pojavlja glina z meljem, v globini pa glina z gruščem in slabo zaobljenimi prodniki. Tu je podtalnice okoli 5 m pod površjem.

Velja opozoriti, da imajo glinene plasti zelo visok potencial lepljenja in posledično mašenja pri iznosu materiala, enakomerno zastopani meljasti peski izrazito povečujejo obrabo izkopnih orodij, peščeno prodnati materiali pa omejujejo gradnjo z večjo vrednostjo vodoprepustnosti.

V nadaljevanju predstavljamo sestavo in lastnosti tal posamezne proge. Vzдолžni profili so obdelani tako, da prikazujejo dejansko sestavo tal le na mestu razpoložljivih podatkov. Kljub sorazmerno velikemu številu podatkov menimo, da bolj natančna geološka interpretacija ni mogoča in bi lahko napačno prikazovala lokalne razmere na trasi. Materiale smo v profilih označili skladno z legendo, ki je prikazana na spodnji sliki.

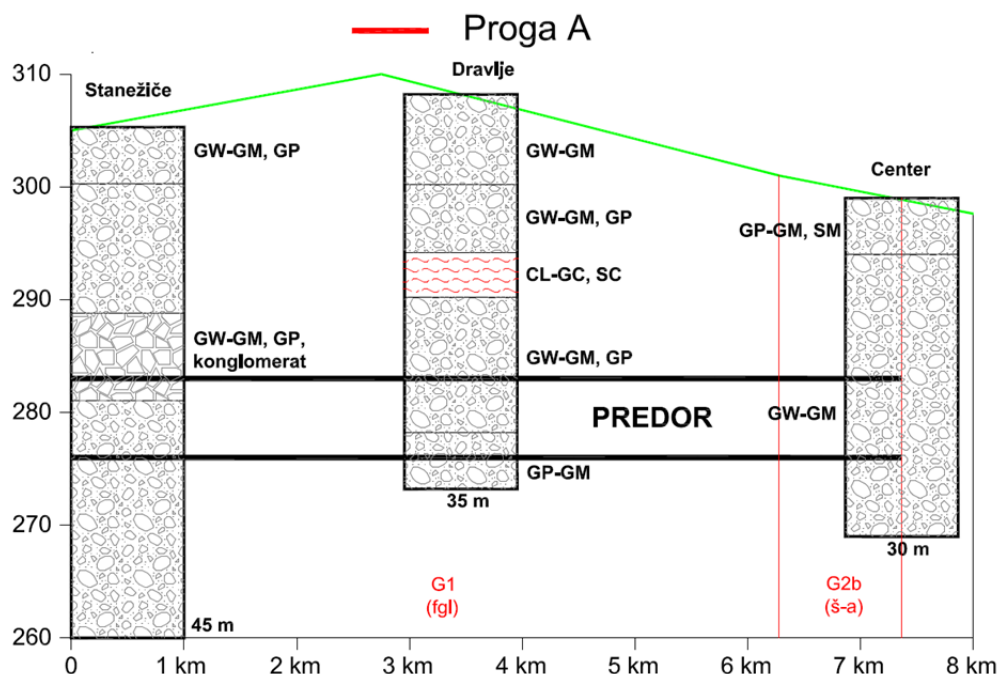


Slika 8-12 : Legenda materialov uporabljenih v vzdolžnih profilih.

Figure 8-12: Legend of materials used in longitudinal sections.

8.4.1.1 Proga A

Relacija proge A poteka od Stanežič do centra mesta, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 7365 m. Poteka skozi dve geološki območji in sicer G1 in G2b. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-13), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-4.



Slika 8-13: Vzdolžni prerez proge A, s podatki o sestavi tal.

Figure 8-13: Long section of line A with ground structure data.

Preglednica 8-4: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

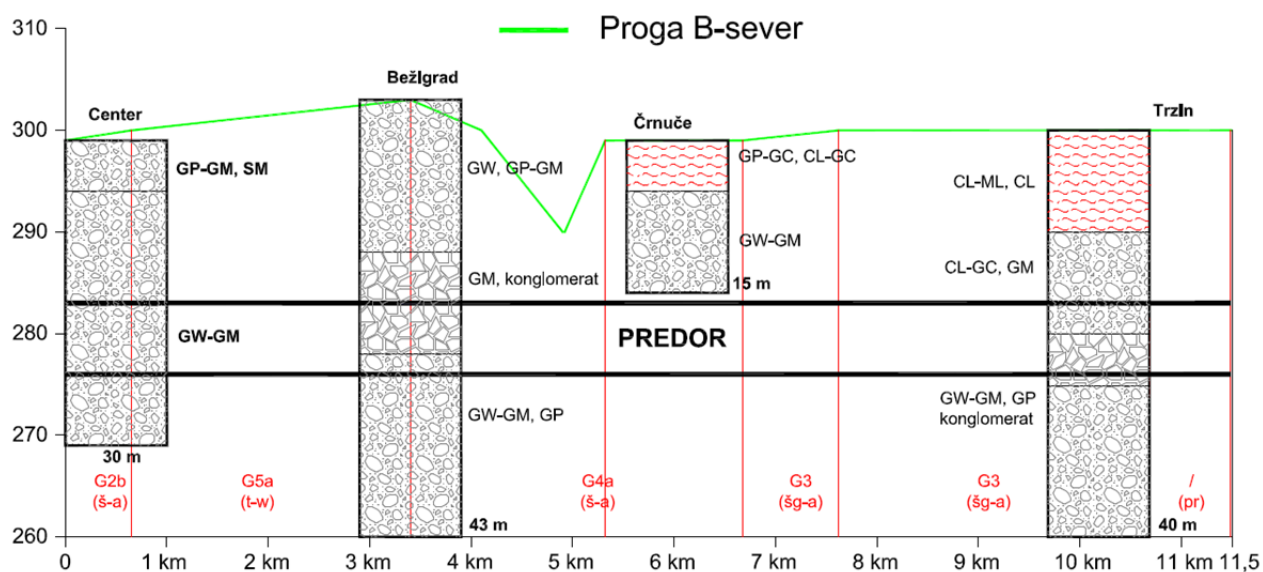
Table 8-4: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	ϕ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	Mv (MPa)	k [m/s]
G1 (Vižmarje)	0 - 10 m	peščen in meljast prod, leče konglomerata	GW-GM, GP	20 m	20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
	10 - 13 m	meljast in zaglinjen prod	GP-GC		20-21	0-10	25-30	20-40	3,5-10	$10^{-6} - 10^{-5}$
	13 m do podlage	peščen in meljast prod, leče konglomerata	GW-GM		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G1a (Stanežiče)	0 m do podlage	peščen in meljast prod, leče konglomerata	GW-GM, GP	15 m	20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G2b (Union)	od 0 do 5 m	slabo graduiran prod z meljem in peskom	GP-GM, SM	15 m	20-21	0	28-33	20-40	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 5 do 25 m	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 25 do podlage	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$

8.4.1.2 Proga B sever

Relacija proge B sever poteka od centra mesta do Črnuč oz. Trzina, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 7622 m (do Črnuč) oz. 11485 m (do Trzina). Poteka skozi štiri

geološka območja in sicer G2b, G5a, G4a in G3. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-14), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-5.



Slika 8-14: Vzdolžni prerez proge B sever s podatki o sestavi tal.

Figure 8-14: Long section of line B north with ground structure data.

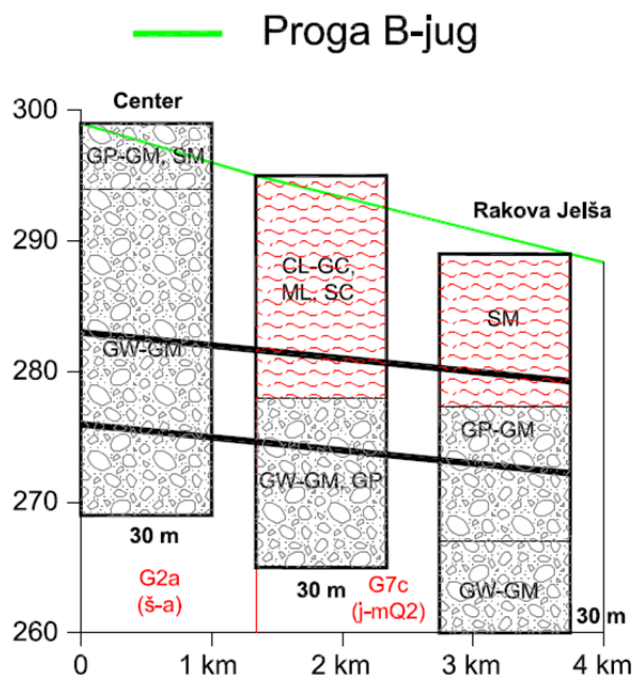
Preglednica 8-5: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-5: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	ϕ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	M_v (MPa)	k [m/s]
G2b (Union)	od 0 do 5 m	slabo graduiran prod z meljem in peskom	GP-GM, SM	15 m	20-21	0	28-33	20-40	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 5 do 25 m	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 25 do podlage	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
G3 (Trzin)	0 - 10 m	glina, glina z meljem, meljna glina	CL-ML, CL	15 m	19	6-9	20-25	5-10	2,5-5	$10^{-9} - 10^{-8}$
	10 - 20 m	glina s preperelimi prodniki	CL-GC, GM		20,5	0	28-33	5-8	10-20	$10^{-6} - 10^{-5}$
	20 m do podlage	prod s peskom in vložki konglomerata, podlaga - siv pesek z vložki glin	GW-GM, GP		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G4a (Črnuče)	0 - 5 m	prod z glino in meljem, glina s prodniki	GP-GC, CL-GC	15 m	20-21	0-10	25-30	20-40	3,5-10	$10^{-6} - 10^{-5}$
	5 m - 15 m (podlaga)	peščeni prod ponekod sprijet v konglomerat	GW-GM		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G5a (Tomačevo)	0 do 15 m	prod in pesek	GW, GP-GM	20 m	21	0	33-36	50-200	25-40	$10^{-3} - 10^{-2}$
	15 do 25 m	konglomerat	konglomerat, GM		22-24	0	41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
	25 m do podlage	debel in srednji peščen prod z vložki konglomerata, peščen prod z meljem in vložki konglomerata, prod s peskom	GW-GM, GP		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$

8.4.1.3 Proga B jug

Relacija proge B jug poteka od centra mesta do Rakove Jelše, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 3743 m. Poteka skozi dve geološki območji in sicer G2a in G7c. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-15), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-6.



Slika 8-15: Vzdolžni presek proge B jug s podatki o sestavi tal.

Figure 8-15 : Long section of line B south with ground structure data.

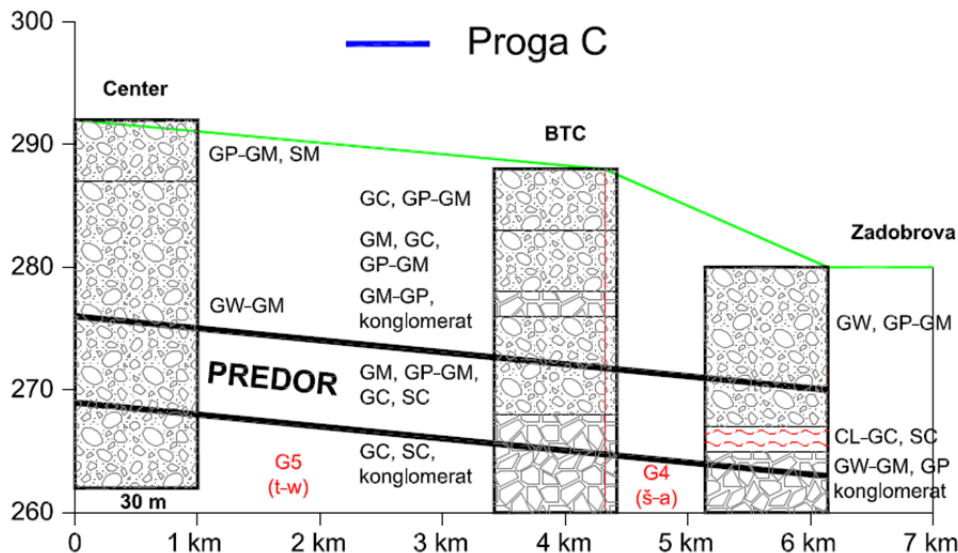
Preglednica 8-6: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-6: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	φ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	Mv (MPa)	k [m/s]
G2a (Rožnik/Grad)	0 do 17 m	glina s prodrom in močno zaglinjen prod, glinast pesek	CL-GC, ML, SC	12 m	20	7-10	26-28	5-8	3,5-10	$10^{-9} - 10^{-8}$
	17 m do podlage	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM, GP		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G7c (Rakova Jelša)	0 - 5	meljast pesek	SM	4,5 m	19	0-5	30-33	10-30	10-12	$10^{-7} - 10^{-5}$
	5 - 22 m	slabo graduiran prod z meljem in peskom	GP-GM		20,5	0	28-33	30-70	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	22-35 m	dobro graduiran prod s peskom	GW-GM		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-4} - 10^{-3}$

8.4.1.4 Proga C

Relacija proge C poteka od centra mesta do Zadobrove, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 6143 m. Poteka skozi dve geološki območji in sicer G4 in G5. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (slika 8-16), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-7.



Slika 8-16: Vzdolžni prerez proge C s podatki o sestavi tal.
Figure 8-16: Long section of line C with ground structure data.

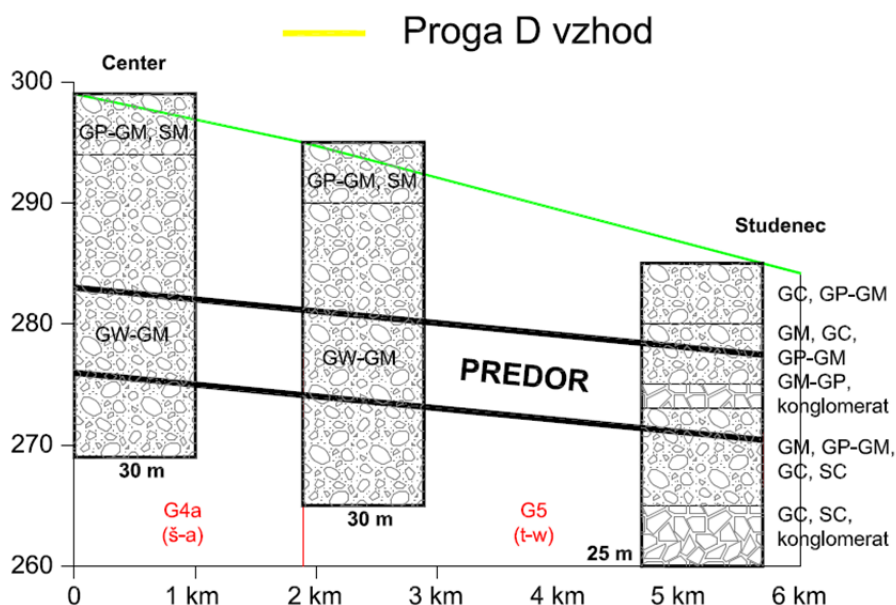
Preglednica 8-7: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-7: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnolgy and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²]- [kPa]	ϕ [°]	E [MN/m ²]- [MPa]	Mv (MPa)	k [m/s]
G4 (Zadobrova)	0 - 13 m	prod in pesek	GW, GP-GM	10 m	21	0	33-36	50-200	25-40	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³
	13 - 15 m	glina, glina s preperelimi prodniki	CL-GC, SC		20,5	0	28-33	5-8	10-20	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵
	15 m do podlage	konglomerat, peščen prod s tankimi vložki konglomerata, mlajši konglomeratni zasip, tudi plasti gline vmes	GW-GM, GP		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴
G5 (BTC)	0 - 5 m	zaglinjen prod s peskom, slabo graduiran prod z meljem in peskom	GC, GP-GM	20 m	20	0-10	33-36	20-40	25-40	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³
	5 - 10 m	pretežno zameljen prod s peskom, zaglinjen prod s peskom, slabo graduiran prod z meljem in peskom	GM, GC, GP-GM		20,5	0	28-33	15-30	10-20	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴
	10 - 12 m	konglomerat, debelina varira, ponekod ga ni oziroma se pojavlja, zameljen prod s peskom	konglomerat, GM-GP		22-24	0	41	50-200	25-100	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴
	12 - 20 m	zameljen prod, slabo graduiran prod z meljem, zaglinjen prod s peskom,	GM, GP-GM, GC, SC		20-21	0	28-33	20-40	10-20	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴
	20 - 35 m	konglomerat, zaglinjen prod s peskom	konglomerat, GC, SC		22-24	0	37-41	50-200	25-100	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴

8.4.1.5 Proga D vzhod

Relacija proge D vzhod poteka od centra mesta do Studenca (smer Zalog), kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 5684 m. Poteka skozi dve geološki območji in sicer G4a in G5. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-17), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-8.



Slika 8-17: Vzdolžni prerez proge D vzhod s podatki o sestavi tal.

Figure 8-17: Long section of line D east with ground structure data.

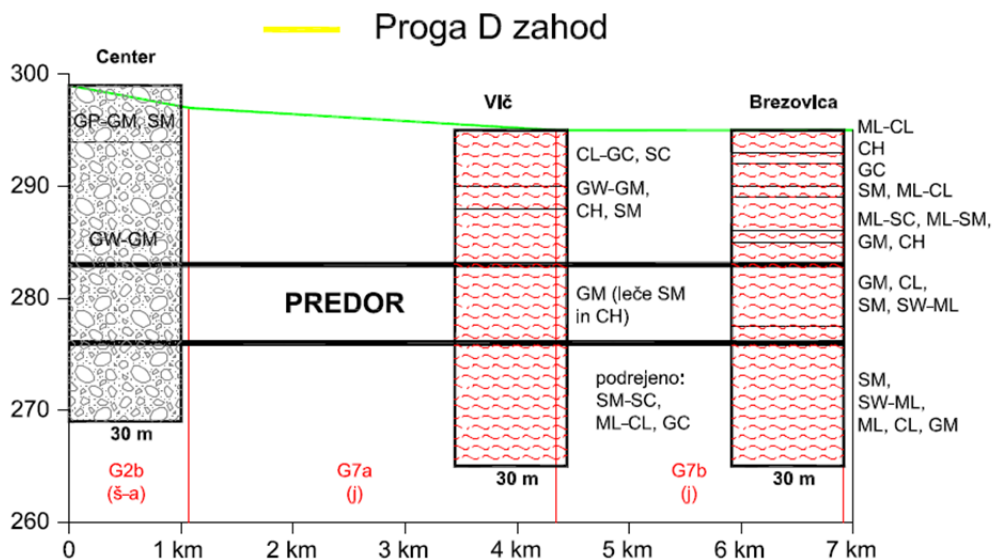
Preglednica 8-8: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-8: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	ϕ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	Mv (MPa)	k [m/s]
G4a (Črnuče)	0 - 5 m	prod z glino in meljem, glina s prodniki	GP-GC, CL-GC	15 m	20-21	0-10	25-30	20-40	3,5-10	$10^{-6} - 10^{-5}$
	5 m - 15 m (podlaga)	peščeni prod ponekod sprijet v konglomerat	GW-GM		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G5 (BTC)	0 - 5 m	zaglinjen prod s peskom, slabo graduiran prod z meljem in peskom	GC, GP-GM	20 m	20	0-10	33-36	20-40	25-40	$10^{-4} - 10^{-3}$
	5 - 10 m	pretežno zameljen prod s peskom, zaglinjen prod s peskom, slabo graduiran prod z meljem in peskom	GM, GC, GP-GM		20,5	0	28-33	15-30	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	10 - 12 m	konglomerat, debelina varira, ponekod ga ni oziroma se pojavlja, zameljen prod s peskom	konglomerat, GM-GP		22-24	0	41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
	12 - 20 m	zameljen prod, slabo graduiran prod z meljem, zaglinjen prod s peskom,	GM, GP-GM, GC, SC		20-21	0	28-33	20-40	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	20 - 35 m	konglomerat, zaglinjen prod s peskom	konglomerat, GC, SC		22-24	0	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$

8.4.1.6 Proga D zahod

Relacija proge D zahod poteka od centra mesta do Viča oz. Brezovice, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 4344 m do Viča oz. 6915 m do Brezovice. Poteka skozi tri geološke območje in sicer G2b, G7a in G7b. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-18), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-9.



Slika 8-18: Vzdolžni prerez proge D zahod s podatki o sestavi tal.
Figure 8-18: Long section of line D west with ground structure data.

Preglednica 8-9: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-9: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	ϕ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	M_v (MPa)	k [m/s]
G2b (Union)	od 0 do 5 m	slabo građuiran prod z meljem in peskom	GP-GM, SM	15 m	20-21	0	28-33	20-40	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 5 do 25 m	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 25 do podlage	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
G7a (Kozarje AC /Brdo)	0 - 5 m	glina s prodrom in močno zaglinjen prod, glinast pesek	CL-GC, SC	5 m	20,5	0	28-33	5-8	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	5 - 7 m	zemeljen oz. zaglinjen prod z lečami peska, mastna glina, meljast pesek	GW-GM, CH, SM		21	0	33-38	20-80	25-30	$10^{-5} - 10^{-4}$
	7 - 15 m	zameljen prod, zameljen pesek in leče mastne gline	GM (leče SM in CH)		20	0	33-36	20-40	25-40	$10^{-7} - 10^{-6}$

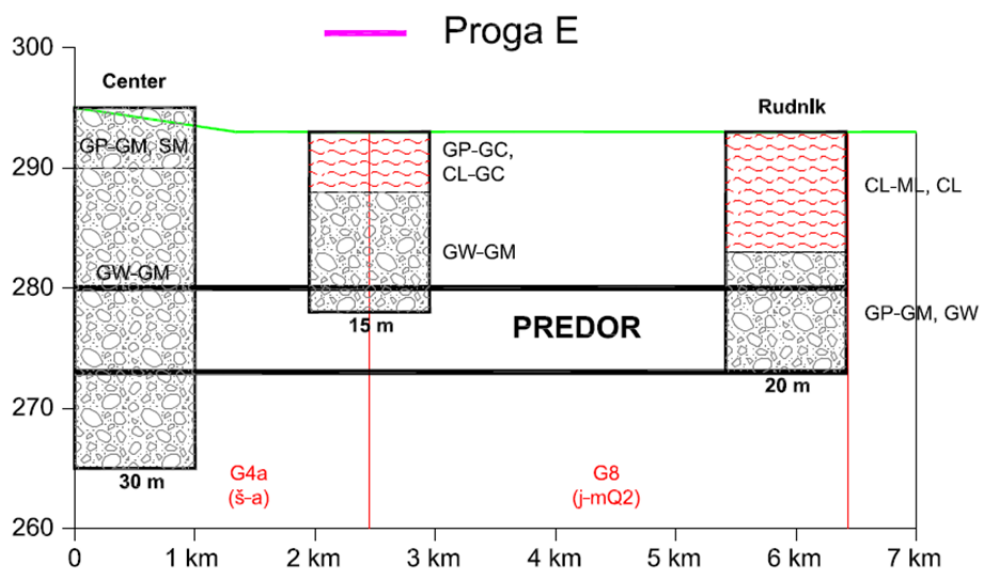
se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice 8-9

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	φ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	M_v (MPa)	k [m/s]
G7b (Brezovica AC)	0 - 2 m	srednjegneten zaglinjen melj, težkognetna meljasta glina	ML-CL	4,5m	20	7-10	25-28	5-10	1,5-6,5	$10^9 - 10^8$
	2 - 3 m	Srednje do lahkognetna mestoma židka glina (polžarica)	CH		18,5	1,5-10	28-32	2-8	1-5	$10^8 - 10^7$
	3 - 5 m	glinast prod, slabo zaobljeni prodniki	GC		20	7-10	25-28	20-40	3,5-10	$10^9 - 10^8$
	5 - 6 m	drobnozrnat meljast pesek s prodniki, primesi srednjegnetne gline z delčki grušč in srednjegnetnega glinastega melja	SM, ML-CL		20	7-10	23-26	5-10	1,5-7,5	$10^9 - 10^8$
	6 - 9 m	peščen melj do glinast pesek, meljast pesek, glinasto meljast prod in grušč	ML-SC, ML-SM, GM		20	0,10	24-32	5-20	2,5-10	$10^9 - 10^8$
	9 - 10 m	lahko do srednjegnetna mastna glina	CH		18,5	1,5-10	28-32	2-8	1-5	$10^8 - 10^7$
	10 - 17,5 m	glinasto meljast grušč s posameznimi prodniki, meljast pesek, drobnozrnat meljast pesek, srednjegnetna meljna glina z redkimi koščki grušča	GM, CL, SM, SW-ML		21	0	33-38	20-40	25-50	$10^7 - 10^6$
	17,5 - 26 m	drobnozrnat meljasti pesek, peščeni melj, srednjegneten peščen melj, peščeno meljast grušč s slabo zaobljenimi prodniki	SM, SW-ML, ML, CL, GM		20	0,10	24-32	5-20	2,5-10	$10^9 - 10^8$

8.4.1.7 Proga E

Relacija proge E poteka od centra mesta do Rudnika, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 6426 m. Poteka skozi dve geološki območji in sicer G4a in G8. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-19), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-10.



Slika 8-19: Vzdolžni prerez proge E s podatki o sestavi tal.

Figure 8-19: Long section of line E with ground structure data.

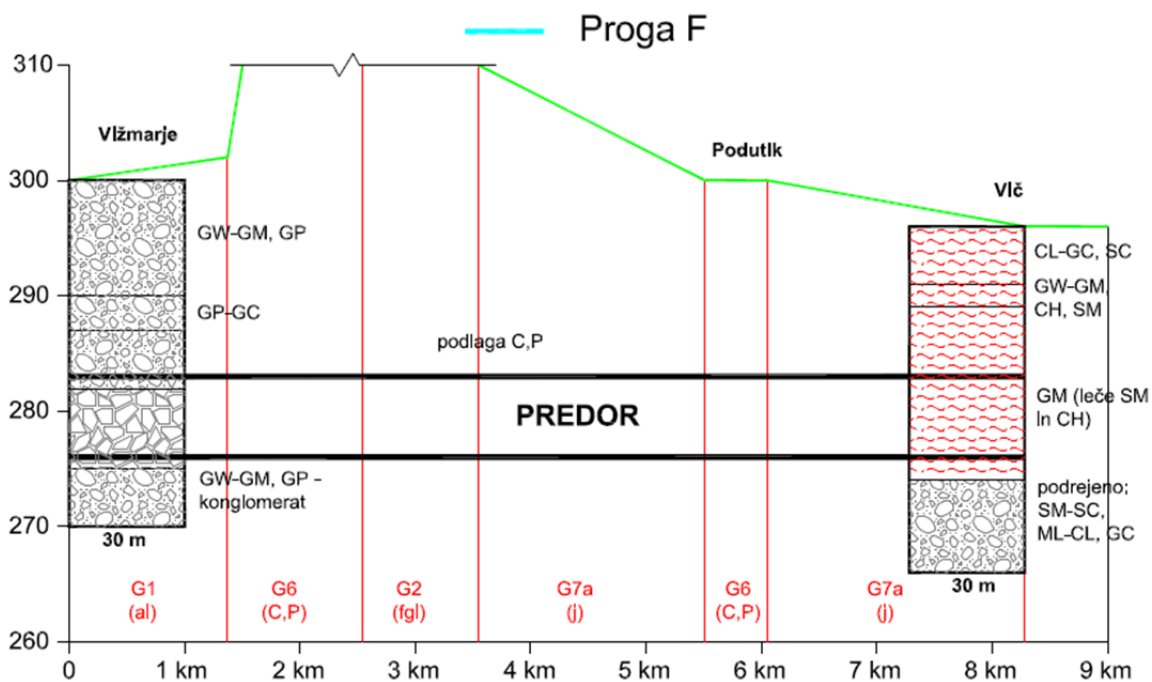
Preglednica 8-10: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-10: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	ϕ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	Mv (MPa)	k [m/s]
G4a (Črnuče)	0 - 5m	prod z glino in meljem, glina s prodniki	GP-GC, CL-GC	15 m	20-21	0-10	25-30	20-40	3,5-10	$10^{-6} - 10^{-5}$
	5 m - 15 m (podlaga)	peščeni prod ponekod sprjet v konglomerat	GW-GM		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G8	od 0 do 10 (15) m	glina, glina z meljem, meljna glina	CL-ML, CL	5 m	19	6-9	20-25	5-10	2,5-5	$10^{-8} - 10^{-7}$
	od 10 (15) m do podlage	glina z gruščem in slabo zaobljenimi prodniki, prod z meljem in peskom, prod s peskom in nekaj melja	GP-GM, GW		20,5	0	28-33	40-100	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$

8.4.1.8 Proga F

Relacija proge F poteka od Vižmarje do Viča, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge je 8281 m. Poteka skozi štiri geološka območja in sicer G1, G2, G6 in G7a. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-20), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-11.



Slika 8-20: Vzdolžni prerez proge F s podatki o sestavi tal.

Figure 8-20: Long section of line F with ground structure data.

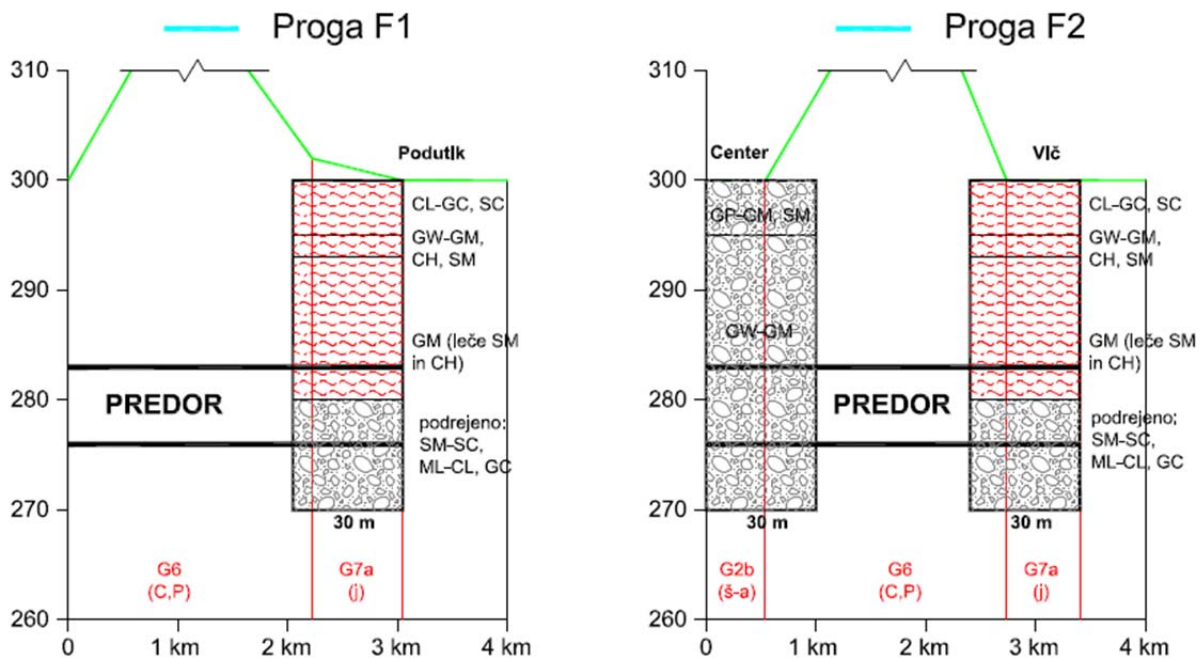
Preglednica 8-11: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-11: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	ϕ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	M_v (MPa)	k [m/s]
G1 (Vižmarje)	0 - 10 m	peščen in meljast prod, leče konglomerata	GW-GM, GP	20 m	20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
	10 - 13 m	meljast in zaglinjen prod	GP-GC		20-21	0-10	25-30	20-40	3,5-10	$10^{-6} - 10^{-5}$
	13 m do podlage	peščen in meljast prod, leče konglomerata	GW-GM		20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G1a (Stanežiče)	0 m do podlage	peščen in meljast prod, leče konglomerata	GW-GM, GP	15 m	20-22	0-20	37-41	50-200	25-100	$10^{-5} - 10^{-4}$
G2 (Dravljje)	0 do 8 m	peščen in meljast prod	GW-GM	15 m	20-22	0	37-41	50-200	25-100	$10^{-4} - 10^{-3}$
	od 8 do 14 m	debel in srednji peščen prod z meljem in vložki konglomerata	GW-GM, GP		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 14 do 18 m	peščena glina s preperelimi prodniki	CL-GC, SC		20,5	0	28-33	5-8	10-20	$10^{-6} - 10^{-5}$
	od 18 do 30 m	debel in srednji peščen prod z vložki konglomerata	GW-GM, GP		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 30 do 35 m	srednji in droben prod s peskom	GP-GM		21	0	33-36	20-40	25-40	$10^{-4} - 10^{-3}$
G6 (Šetnvid /Rožnik)	od 0 do 100m	glinasti skrilavec, sljudasti peščenjak	podlaga C,P	/	25	120	19	160	150-400	$10^{-9} - 10^{-8}$
G7a (Kozarje AC /Brdo)	0 - 5 m	glina s prodom in močno zaglinjen prod, glinast pesek	CL-GC, SC		20,5	0	28-33	5-8	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	5 - 7 m	zemeljen oz. zaglinjen prod z lečami peska, mastna glina, meljast pesek	GW-GM, CH, SM		21	0	33-38	20-80	25-30	$10^{-5} - 10^{-4}$
	7 - 15 m	zameljen prod, zameljen pesek in leče mastne gline	GM (leče SM in CH)		20	0	33-36	20-40	25-40	$10^{-7} - 10^{-6}$

8.4.1.9 Proga F krak 1 in krak 2

Proga F ima tudi priključna kraka F1 in F2. Krak F1 poteka z vzhoda (centra) proti severu, krak F2 pa poteka z vzhoda (centra) proti jugu, kot je razvidno iz slike 8-11. Skupna dolžina proge F1 je 3046 m, dolžina proge F2 pa 3403 m. Krak F1 poteka skozi dve geološki območji in sicer G6 in G7a, krak F2 pa poteka skozi tri geološka območja in sicer skozi G2b, G6 in G7a. Sestava tal je prikazana na vzdolžnem profilu (Slika 8-21), lastnosti tal pa prikazujemo v preglednici 8-12.



Slika 8-21: Vzdolžni prerez prog F1 in F2 s podatki o sestavi tal.

Figure 8-21: Long section of lines F1 in F2 with ground structure data.

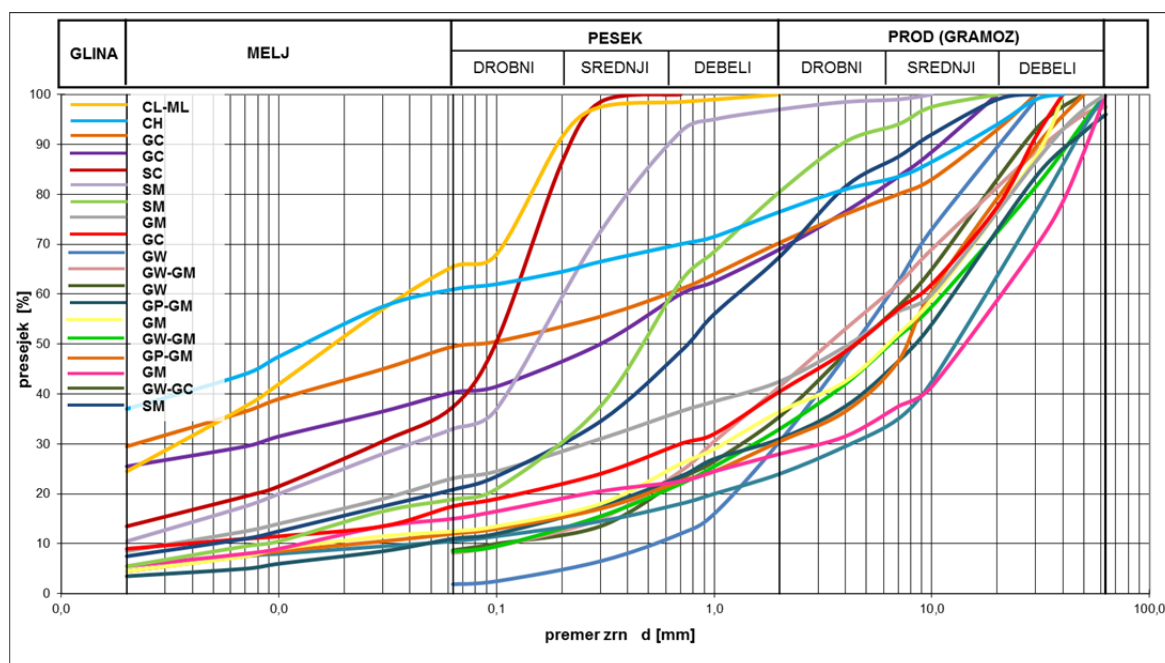
Preglednica 8-12: Sestava in lastnosti tal geoloških enot (prirejeno po podatkih IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-12: Structure and ground properties of geological units (adapted from data of IRGO – Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Geološka enota	Globina	Opis	AC klasifikacija	Višina podtalnice	Prostorninska teža	Kohezija	Strižni kot	Elastični modul	Modul stisljivosti	Koeficient prepustnosti
(GE)	[m]			[m]	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²] - [kPa]	φ [°]	E [MN/m ²] - [MPa]	Mv (MPa)	k [m/s]
G2b (Union)	od 0 do 5 m	slabo graduiran prod z meljem in peskom	GP-GM, SM	15 m	20-21	0	28-33	20-40	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 5 do 25 m	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
	od 25 do podlage	starejši prodni nasip, savski prod	GW-GM		20-22	0-20	33-38	20-40	3,5-10	$10^{-5} - 10^{-4}$
G6 (Šetnvid /Rožnik)	od 0 do 100m	glinasti skrilavec, sljudasti peščenjak	podlaga C,P	/	25	120	19	160	150-400	$10^{-9} - 10^{-8}$
G7a (Kozarje AC /Brdo)	0 - 5 m	glina s prodrom in močno zaglinjen prod, glinast pesek	CL-GC, SC	5 m	20,5	0	28-33	5-8	10-20	$10^{-5} - 10^{-4}$
	5 - 7 m	zemeljen oz. zaglinjen prod z lečami peska, mastna glina, meljast pesek	GW-GM, CH, SM		21	0	33-38	20-80	25-30	$10^{-5} - 10^{-4}$
	7 - 15 m	zameljen prod, zameljen pesek in leče mastne glin	GM (leče SM in CH)		20	0	33-36	20-40	25-40	$10^{-7} - 10^{-6}$

8.4.2 Zrnavostna struktura tal

Poleg geomehanskih lastnosti, ki smo jih prikazali, je pri izbiri naprave pomembna tudi njihova zrnavost. Od zastopanosti posameznih frakcij je odvisno obnašanje materiala v izkopni komori, učinkovitosti zagotavljanja podpore čelu izkopa, iznosa materiala, uporabe dodatkov, nadaljnje obdelave izkopnega materiala in drugo. Na spodnji sliki prikazujemo reprezentativne krivulje zrnivosti za materiale na območju Ljubljane in okolice, kateri se nahajajo v globini od 10 do 25 m.



Slika 8-22: Granulometrične krivulje reprezentativnih geoloških plasti na območju Ljubljane (Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Figure 8-22: Granulometric curves of representative geological units for Ljubljana area (Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Iz prejšnjega poglavja je razvidno, da bi se predori pretežno gradili v debelo zrnatih materialih, ki jih sestavljajo prodi in peski. Dokaj dobro stopnjevano zrnastost prodov in peskov lahko vidimo iz zgornje slike 8-22. V večini primerov je delež finih (< 0,063 mm) zrn le med 2 in 10%, kar je sorazmerno nizka vrednost. V južnem delu Ljubljane (območja G2a, G7a, G7b, G7c in G8) pa so plasti glin, peščenih glin in močno zaglinjenih prodov, kjer je delež finih zrn zelo visok (40% in več).

Granulometričnim krivuljam smo določili tudi koeficient enakomernosti (C_u) in koeficient ukrivljenosti (C_c). Vrednosti za dobro graduirane prode znašajo za C_u med 10 in 100, za C_c pa med 1,1 in 2. Slabše graduirani prodi s primesmi meljev in gline imajo vrednost C_u med 260 in 3000 ter vrednost C_c med 5 in 24. Zaglinjeni prodi imajo delež zrn manjših od 0,063mm med 20 in 50%.

Predori, ki se nahajajo v osrednjem in južnem delu Ljubljane (območja G2, G2a, G2b, G5a, G4a, G7a, G7b, G7c in G8), bi bili grajeni bolj v peščenih tleh, kjer je delež finih zrn (pod 0,063 mm) bistveno višji in znaša med 20 in 60%. Materiali, ki se pojavljajo na tem območju, so bolj drobno zrnati. To so: zameljeni peski s prodom, meljasti peski, peščeni glinasti melji ter pusta glina oziroma prodnata mastna glina s peskom. Vrednosti koeficienta enakomernosti (C_u) znašajo med 75 in 225, vrednosti koeficienta ukrivljenosti (C_c) pa med 5,5 in 9,5. Zaglinjeni materiali imajo delež gline oz. meljev nekoliko višji kot prodi in znaša med 37 in 66%. Vrednosti posamezne krivulje so prikazane v spodnji preglednici 8-13.

Preglednica 8-13: Vrednosti parametrov oblike granulometrične krivulje (Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje).

Table 8-13: Values for parameters of granulometric curve shape (Institute for Mining, Geotechnology and Environment).

Material (AC klasifikacija)	Koeficient enakomernosti	Koeficient ukrivljenosti	Delež zrn pod 0,063 mm
ime krivulje na sliki	Cu	Cc	(%)
GW	11	1	1,9
GW-GM1	43	1	8,2
GW-GM2	103	2	8,5
GW-GC	67	2	8,7
GP-GM1	387	20	10,5
GP-GM2	266	5	10,9
GP-GM3	549	15	11,9
GM1	541	6	12,2
GM2	1354	23	16,0
GM3	2640	2	23,1
GC1			40,3
GC2			49,3
GC3			17,5
SM1	224	5	20,9
SM2	71	9	18,9
SM3	149	6	33,0
SC			37,4
CL-ML			65,5
CH			60,9

Skupna dolžina potencialnih tras predorov, ki so prikazane v poglavju 8.3, je 62,49 km, od tega se jih 17,91 km nahaja v pretežno zaglinjenih plasteh, kjer je nivo podzemne vode nad predorom. Predorov v prodnatih oz. peščenih plasteh je 38,45 km in se v večini nahajajo v višini podtalnice ali nad njo. Del predorov pa se nahaja v starejših plasteh in sicer glinenem skrilavcu v dolžini 6,13 km.

Pri izbiri najbolj ustrezne TBM naprave je granulometrična sestava pomembna, vendar je potrebno upoštevati še pritiske podzemne vode. Reprezentativne zrnastostne krivulje in vrednosti parametrov bomo v nadaljevanju primerjali s tistimi, ki jih podajajo smernice, in na podlagi kriterija sestave tal izbrali primerno tehnologijo.

8.5 Izbira primerne TBM naprave

8.5.1 Splošno

Najbolj primeren tip TBM naprave smo določili tako, da smo na podlagi izbranih tras potencialnih podzemnih prometnic določili naravne danosti, katere smo opisali z zgradbo in lastnostmi tal. Nato smo opredelili geološko-geomehanske karakteristike za posamezna geološka območja in izbrali reprezentativne granulometrijske krivulje in preverili uporabnost posameznega tipa TBM naprave po različnih tujih smernicah in priporočilih.

8.5.2 Upoštevanje priporočil pri izbiri primerne TBM naprave

Za ustrezno izbiro naprave imamo na voljo različne smernice, ki so izdane predvsem v državah, kjer je gradnja predorov s TBM tehnologijo bolj razširjena. Izbiro naprave obravnavajo različne smernice. V nadaljevanju poglavja, bomo poskušali določiti optimalno tehnologijo TBM naprave po priporočilih naslednjih smernic oz. strokovnih prispevkov:

- smernice mednarodnega združenja za predorogradnjo (ITA),
- smernice združenja strokovnjakov za specializirano gradnjo in betonske sisteme (EFNARC),
- smernice avstrijskega združenja za geomehaniko (OEGG),
- smernice nemškega komiteja za podzemno gradnjo (DAUB) in
- priporočila raznih strokovnih prispevkov za že izvedene projekte.

V poglavju 8.4 smo opisali geotehnične pogoje v katerih bodo grajeni predori. Pričakovana raznolikost geotehničnih pogojev zato narašča z dolžino predorov. Pogoji v Ljubljani in okolici ne omogočajo izkopa z nepodprtim čelom, zato lahko uporabljamo le EPB napravo in napravo z izplako. Tip TBM naprave, ki uporablja za podpiranje zračni tlak ni primeren zaradi izredno prepustne zemljine in nizkega nadkritja.

8.5.2.1 Smernice mednarodnega združenja za predorogradnjo (ITA)

Smernice mednarodnega združenja ITA (Mechanised Tunnelling Recommendations..., 2000) povzemamo v spodnji preglednici. Z rdečim okvirjem so označena območja primernosti posameznega tipa TBM naprave, glede na tla. Razvidno je, da je za drobno zrnate materiale bolj primerna EPB naprava, za grobozrnate pa naprava z izplako. Pogojno pa sta obe napravi primerni za grobozrnate plasti, kjer so prisotni konglomerati (označeno z črtkano rdečo črto).

Statistični podatki v smernici podajajo naslednje rezultate pri gradnji predorov:

- v glini, meljih, peskih in prodih je delež uporabe EPB naprave 30% in 70% naprave z izplako,
- v podzemni vodi (tlak < 2 bar) je delež uporabe EPB naprave 35% in naprave z izplako 65% in
- pretežno v prodih je delež uporabe EPB naprave 16% in naprave z izplako 84%.

Izbira enovite naprave za izvedbo predorov v Ljubljani po smernicah ITA zato ni mogoča. Prednost pri izbiri lahko pripišemo napravi z izplako, saj je bolj zanesljiva v danih geoloških pogojih in povzroča manjše motnje na okoliško hribino. Pogojno sta obe napravi uporabni v trdnejših plasteh, kot so konglomerati in glineni skrilavci, vendar pa ima EPB naprava možnost nadgradnje izkopnih orodij in dodatnih ukrepov za prehod skozi omenjene plasti.

Preglednica 8-14: Primernost TBM naprav (označeno z rdečim okvirjem) za geološke pogoje v Ljubljani (prirejeno po ITA).

Table 8-14: Suitability of TBM type (marked with red frame) for geological conditions in Ljubljana (adapted from ITA).

Pogoji tal	Število udarcev (N)	Vlažnost (%) oz. prepustnost (k)	tip TBM naprave	Zaprti tip naprave	
				EPB	Sistem z izplako
aluvijalne gline	0-5	300%-50%	1	- problematično v židki glini - kontrola izkopa pri iznosu materiala	p - problematično zaradi lepljivosti materiala - potreba po napredni filtracijski napravi
deluvijalne gline	7-20	W<50%	1	- ustrezna konsistenca zemljine - kontrola izkopa pri iznosu materiala	1 - potreba po napredni filtracijski napravi
rahle peščene plasti	5-30	10 ⁻³ - 10 ⁻²	p	- pomanjkanje vsebnosti finih delcev	1 - učinkovito napredovanje - dobro kontrola kvalitete izplake
goste peščene plasti	>30	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³	p	- pomanjkanje vsebnosti finih delcev	1 - dobro kontrola kvalitete izplake
peščeno prodnate plasti	>30	10 ⁻² - 10 ⁻¹	p	- pomanjkanje vsebnosti finih delcev	1 - izguba izplake - drobilec proda večjih dimenzij - učinkovit sistem transporta materiala
peščeno prodnate plasti z vložki konglomerata	>50	10 ⁻² - 10 ⁻¹	p	- pomanjkanje finih delcev - potreba po drobilcu - večji premer vijaka zaradi velikih delcev - večja obraba nožev	p - izguba izplake - drobilec proda večjih dimenzij - učinkovit sistem transporta materiala - večja obraba nožev
Ukrepi za obvladovanje sprememb na čelu izkopa				V primeru pričakovanih kompleksnih geoloških pogojev se vgradi sistem za injektiranje dodatkov v izkopno komoro.	Sistem je primeren za zelo raznolike geološke pogoje. Sistemi za uporabo dodatkov so običajno že vgrajeni.

Legenda: 1 primerno p pogojno primerno

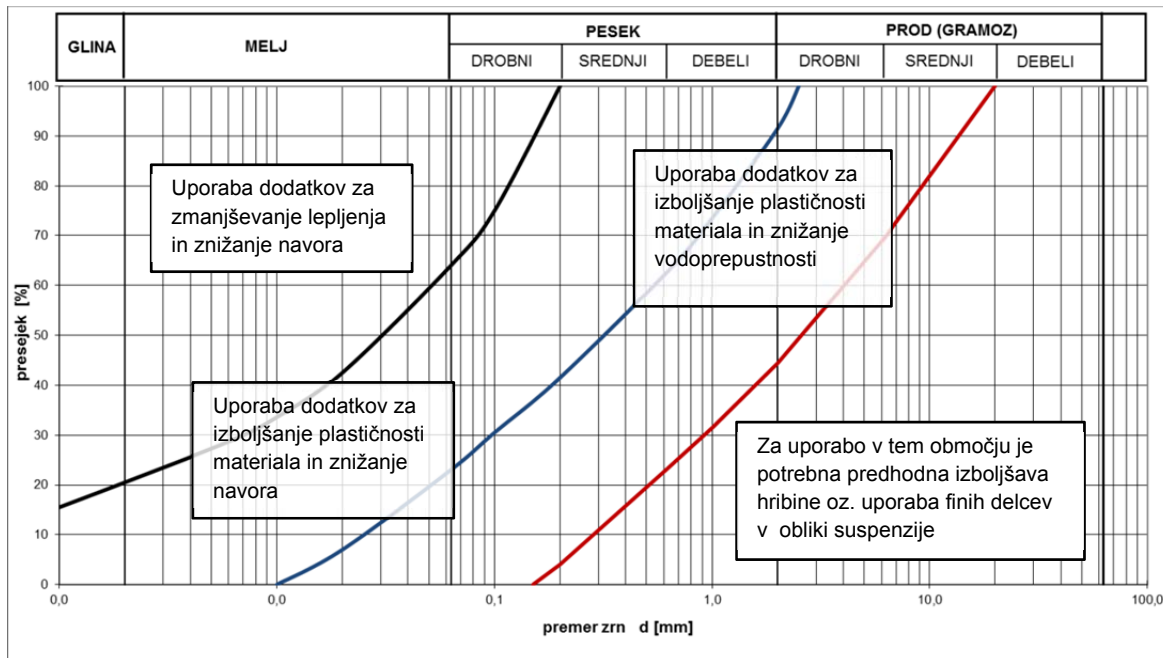
8.5.2.2 Smernice združenja EFNARC

EFNARC združenje v svojih smernici (2005) pokriva področje TBM gradnje v zemljinah in kamninah ter uporabo posebnih dodatkov pri procesu izvedbe predorov. Podobno kot druge smernice opozarja na to, da je potrebno v zgodnjih fazah projekta zbrati čim več informacij za načrtovanje geometrije in trase predora ter izbiro najučinkovitejše TBM naprave, kot npr.:

- naravo in strukturo zemljine na trasi predora (morfologijo, mehanske karakteristike, deformabilnost, itd.),
- pozicijo posameznih plasti ali stratigrafija,
- pogostost in orientacijo glavnih diskontinuitet (tektonske in strukturne karakteristike),
- prisotnost vode (hidrogeologija),
- višino in sestavo nadkritja,
- vpliv izkopa na okolico (napetosti v okoliški hribini, sprememba hidrogeoloških pogojev, posedanje, itd.) in
- prisotnost in morebiten vpliv na sosednje objekte, transportno infrastrukturo, komunalno infrastrukturo.

Smernice za gradnjo predorov v zemljini predvidevajo uporabo le EPB naprave in naprave z izplako. V nadaljevanju nato ne podajajo algoritma za izbiro prave, ampak jima le opredelijo področje delovanja. Področje, kjer je naprava z izplako najbolj učinkovita, je od drobno zrnatih (peski) do grobo zrnatih materialov (prodi). Hidravlična prepustnost je lahko med 10⁻⁸ m/s do 10⁻² m/s. Velik delež meljev ali gline lahko povzroči problematično obdelovanje izkopanega materiala na separacijsko-filtracijski napravi in s tem učinkovitost recikliranja izplake.

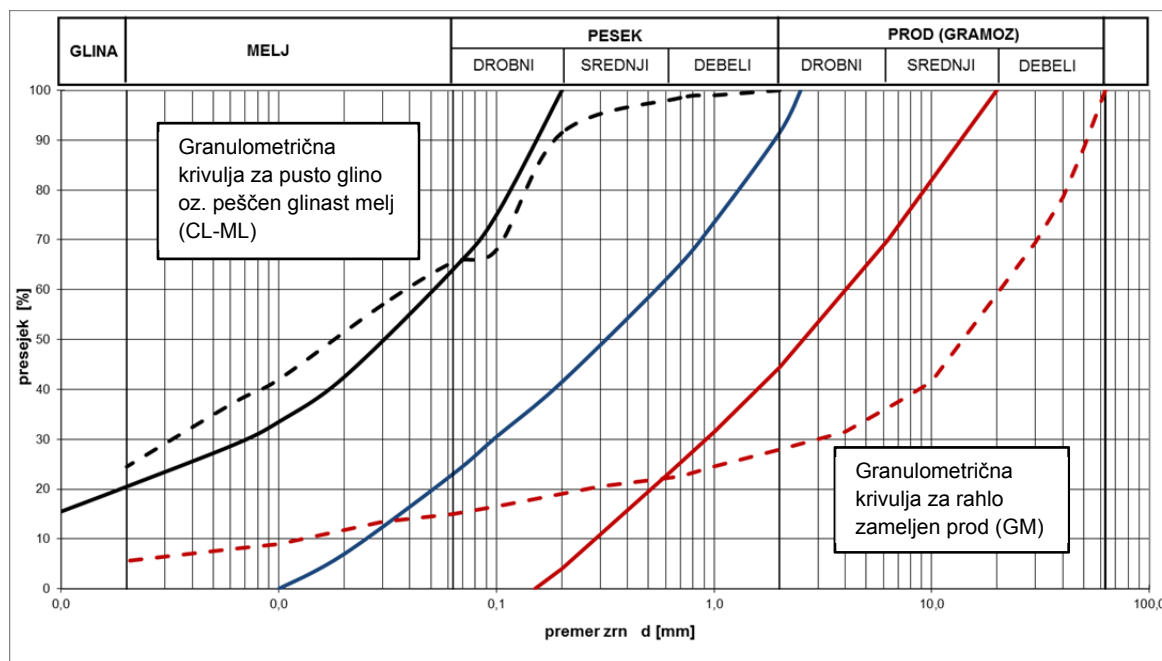
Natančneje smernica podaja ustrezno območje delovanja EPB naprave. Področje delovanja je definirano na spodnji sliki, kjer so določene posamezne meje z granulometričnimi krivuljami ter morebitni dodatnimi ukrepi za učinkovito izvedbo. Uporaba dodatkov je opisana v poglavju 8.5.3.



Slika 8-23: Področja delovanja EPB naprave z uporabo dodatkov (prirejeno po EFNARC, 2005).

Figure 8-23: Application area for EPB machine with soil conditioning (adapted from EFNARC, 2005).

Tudi po smernicah EFNARC, enoznačna izbira naprave ni možna. Uporabnost EPB naprave je opisana kot zelo prilagodljiva tehnologija, vendar kot prikazuje spodnja slika, je sestava tal na območju Ljubljane zelo raznolika in zato uporaba samo EPB naprave ni ustrezna. Kontrola uporabe naprave z izplako je v smernicah EFNARC podana le opisno in ne omogoča kontrole glede na razpoložljive podatke.



Slika 8-24: Področja delovanja EPB naprave in skrajni granulometrični krivulji sestave tal v Ljubljani (prirejeno po EFNARC, 2005).

Figure 8-24 : Application area for EPB machine and extreme granulometric curves of ground in Ljubljana (adapted from EFNARC, 2005).

8.5.2.3 Smernice avstrijskega združenja za geomehaniko (OEGG)

Avstrijska smernica ne daje natančnih navodil za izbiro naprave, ampak podaja le nabor podatkov, ki so za to potrebni. V osnovi odločitev temelji na nemških smernicah, kot bo prikazano v nadaljevanju. Poleg podatkov, ki jih s pomočjo smernice moramo določiti, npr.: geološko in hidrogeološke razmere, vrste hribine (geološke enote - GE), obnašanje hribine (BT), obnašanje čela predora, je potrebno opredeliti tudi:

- lastnosti tal, ki določajo vrtno sposobnost in obrabo orodja,
- omejitve zaradi preobremenitev tal oz. stavb nad traso,
- namen uporabe predora,
- omejitve pri izvedbi in logistiki,
- ravnanje z izkopanim materialom in gradbenimi odpadki in
- transport izkopanega materiala.

Izbira najprimernejše naprave je odvisna od geotehničnega načrtovanja v sklopu katerega določimo zahtevane parametre za posamezno območje naprave (od I do IV). Določiti moramo tudi podatke, vezane na samo napravo: nominalni premer izkopa, velikost nadprofila, potreben navor, minimalni radiji trase, potrebe po modifikaciji naprave in druge parametre.

8.5.2.4 Smernice nemškega komiteja za podzemno gradnjo (DAUB)

Nemške smernice (Maidl et al., 2010) podajajo najbolj natančna navodila za izbor najprimernejše TBM naprave, katere sestavlja sedem korakov. Koraki obsegajo najprej predhodni izbor TBM naprav glede na geološko-geotehnične pogoje. Izbor naprav nato zožujemo preko analiz učinkovitosti sistema izkopa, načina podpiranja čela, obnašanja hribine, napovedi obrabe izkopnih orodij, analize in uporabnosti izkopanega materiala in drugih kriterijev na predvidenem območju gradnje. Za izbrane tipe naprav se določijo izkopni

razredi, napoved hitrosti odkopa, ovrednoti se tehnična in ekonomska opravičenost. Vsi ti zaključki so nato podlaga za natančno določitev trase predora, ki je hkrati vezana na izbiro naprave, saj želimo zagotoviti čim bolj homogene pogoje gradnje. V fazi izdelave nato proizvajalec skupaj s projektantom natančneje definira vse potrebne karakteristike TBM naprave.

Smernice za geološke pogoje v Ljubljani predvidevajo uporabo naprav za zemljine in sicer s ščitom (SM), katere delujejo z izkopom celotnega profila (V). Za pogoje obravnavanega območja sta priporočeni naprava z izplako ali SM-V4 in EPB naprava ali SM-V5. Naprava z izplako je primerna za zemljine brez kohezije in podtalno vodo oz. brez. Prva naprava podpora čelu zagotavlja s suspenzijo, ki se prilagaja lastnostim hribine. Delež drobnozrnatih delcev manjših od 0,02 mm mora biti pod 10%, saj je v nasprotnem primeru reciklaža izplake otežena. Druga naprava je EPB in je najbolj primerna za zemljine, ki imajo lastno kohezijo. To pomeni, da mora biti delež drobnozrnate frakcije < 0,063 mm vsaj 30% ali več, kar omogoča ob kombiniranju z vodo ali dodatki, ustrezne lastnosti materiala v izkopni komori. Zrnavostna struktura in velikost delcev je bistveno merilo za določitev stabilnosti hribine. Vpliva tudi na vodoprepustnost in strižno trdnost hribine. Izbiro naprave prikazujemo v spodnjih preglednicah (Maidl et al., 2012). Z rdečim okvirjem so označena območja geomehanskih parametrov v Ljubljani, kar odraža primernost uporabe posameznega tipa TBM naprave.

Preglednica 8-15: Ustreznost geomehanskih parametrov (označeno z rdečo) za napravo z izplako (SM-V4) (prirejeno po Maidl et al., 2010).

Table 8-15: Suitability of geomechanic parameters (marked with red) for slurry machine (SM-V4) (adapted from Maidl et al., 2010).

Geomehanski parametri	TBM naprava s ščitom ki deluje z izplako (SM-V4)				
Delež zrn < 0,06 mm	< 5 %	5 - 15 %	15 - 40 %	> 40 %	
	+	+	+	o	
Vodoprepustnost k [m/s]	zelo visoka > 10 ⁻²	visoka 10 ⁻² - 10 ⁻⁴	srednja 10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	nizka < 10 ⁻⁶	
	-	o	+	o	
Indeks konsistence I _c	židka 0 - 0,5	mehka 0,5 - 0,75	srednja 0,75 - 1,00	trda 1,00 - 1,25	zelo trda 1,25 - 1,50
	- / o	o	o	o	o
Gostota zemljine	velika	srednja	nizka		
	+	+	o		
Pritisk podpiranja [bar]	0	0-1	1-2	2-3	3-4
	o	+	+	+	+
Potencial nabrekanja	ni	majhen	srednji	visok	
	+	+	o	-	
Indeks obrabe ABR [g/t] <i>Ni podatka</i>	zelo nizek 0 - 500	nizek 500 - 1000	srednji 1000 - 1500	visok 1500 - 2000	zelo visok > 2000
	+	+	+	o	o
Indeks lomljivosti BR [%] <i>Ni podatka</i>	zelo nizek 0 - 25	nizek 25 - 50	srednji 50 - 75	visok 75 - 100	zelo visok > 100
	o	+	+	+	o

Preglednica 8-16: Ustreznost geomehanskih parametrov (označeno z rdečo) za EPB napravo (SM-V5) (prirejeno po Maidl et al., 2010).

Table 8-16: Suitability of geomechanic parameters (marked with red) for EPB machine (SM-V5) (adapted from Maidl et al., 2010).

Geomehanski parametri	TBM naprava s ščitom - EPB (SM-V5)				
Delež zrn < 0,06 mm	< 5 %	5 - 15 %	15 - 40 %	> 40 %	
	-	o	o / +	+	
Vodoprepustnost k [m/s]	zelo visoka > 10 ⁻²	visoka 10 ⁻² - 10 ⁻⁴	srednja 10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	nizka < 10 ⁻⁶	
	-	-	o	+	
Indeks konsistence I _c	židka 0 - 0,5	mehka 0,5 - 0,75	srednja 0,75 - 1,00	trda 1,00 - 1,25	zelo trda 1,25 - 1,50
	o	+	+	o	o
Gostota zemljine	velika	srednja	nizka		
	+	+	+		
Pritisk podpiranja [bar]	0	0-1	1-2	2-3	3-4
	+	+	+	o	-
Potencial nabrekanja	ni	majhen	srednji	visok	
	+	+	o	-	
Indeks obrabe ABR [g/t] <i>Ni podatka</i>	zelo nizek 0 - 500	nizek 500 - 1000	srednji 1000 - 1500	visok 1500 - 2000	zelo visok > 2000
	+	+	o	o	-
Indeks lomljivosti BR [%] <i>Ni podatka</i>	zelo nizek 0 - 25	nizek 25 - 50	srednji 50 - 75	visok 75 - 100	zelo visok > 100
	+	+	o	o	-

V preglednicah so za razpoložljive podatke o geomehanskih parametrih, označena območja uporabe za posamezne kriterije obeh tipov naprav, ki veljajo za območje Ljubljane (označeno z rdečo črto). Pomen kriterijev je opredeljen z naslednjimi razredi:

- »+« najbolj učinkovito področje naprave, minimalna potreba dodatnih ukrepov,
- »o« možno področje delovanja naprave, uporaba dodatnih ukrepov je potrebna in
- »-« kritično področje uporabe naprave, stalna je uporaba dodatnih ukrepov tako v območju naprave, kot predhodnih ukrepov izboljšanja hribine, zahtevana je izdelava študije izvedljivosti, potrebna je analiza uporabe druge vrste TBM naprave.

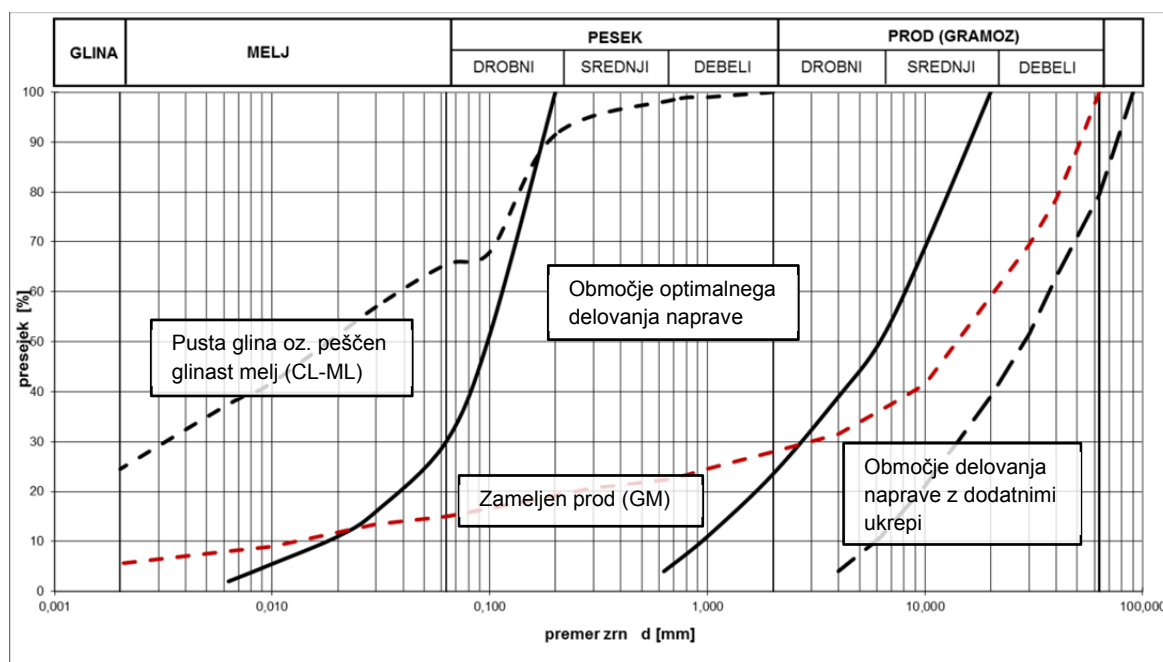
Iz obeh preglednic je razvidno, da ena sama vrsta naprave ne pokriva celotnega območja geomehanskih lastnosti v Ljubljani. Še najbolj ustrezna se pokaže naprava z izplako, ki bi z uporabo dodatnih ukrepov morebiti bila v celoti primerna. Vseeno je potrebno opozoriti na hitro spreminjajoče geomehanske lastnosti in s tem v analizi materialov ne zajete pojave, ki bi območje pričakovanih geomehanskih parametrov še razširile. Razvidno je, da EPB naprava ni primerna za čistejše prodno peščene plasti, kjer je finih delcev manj kot 5% in imajo veliko vodoprepustnost. V tem območju bi morali uporabljati zelo obsežne dodatne ukrepe (dodajanje finih zrn in penil), da bi lahko ustrezno podpirali čelo. Za odsek predora v glinenih skrilavcih in peščenjakih (Šentviški hrib, Rožnik, Grajski hrib in Golovec), bi bili primerni obe napravi ob predpostavki, da delujeta v odprtem sistemu.

Izkaže se, da kriterijska analiza po nemških smernicah priporoča uporabo dveh naprav, ki sta učinkoviti vsaka na svojem področju uporabe.

8.5.2.5 Uporaba izsledkov strokovnih prispevkov

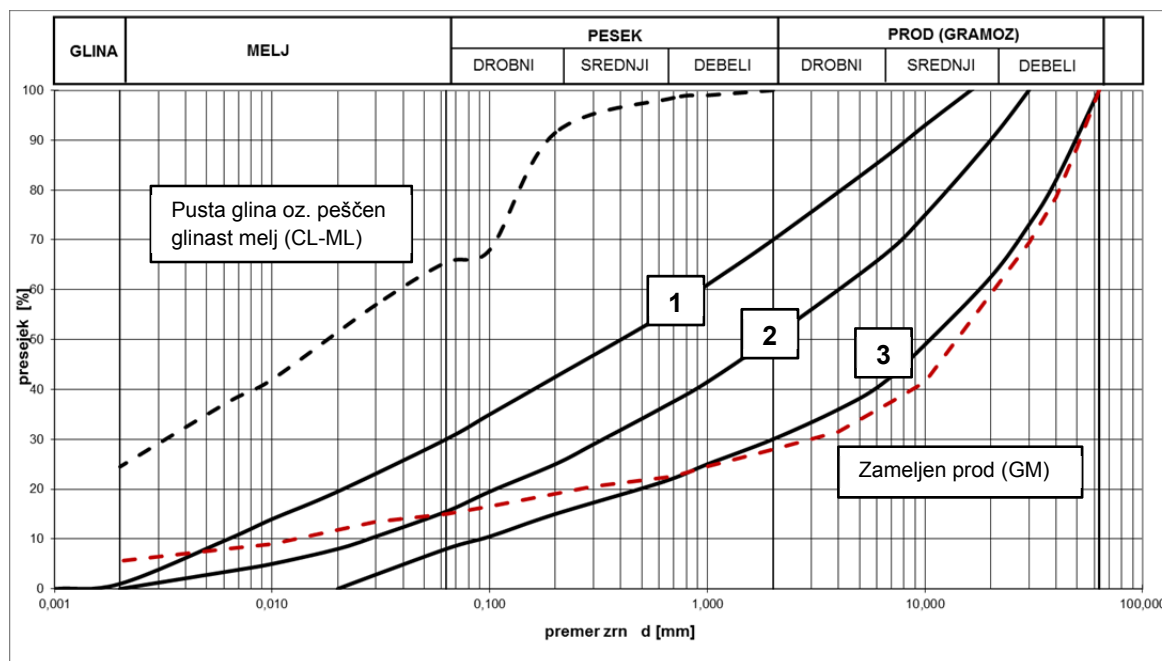
V tem poglavju bomo izbor ustrezne naprave naredili še na podlagi strokovnih prispevkov, ki predstavljajo že izvedene projekte oz. podajajo novejša priporočila glede na razvoj tehnologije za izboljšanje pogojev delovanja TBM naprave.

Maidl s sodelavci (2012) podaja območja delovanja naprave z izplako in EPB naprave glede na granulometrično sestavo zemljine. Njihove meje območja delovanja naprave z izplako in EPB naprave prikazujemo v spodnjih preglednicah z dodanima krivuljama zrnivosti za Ljubljano.



Slika 8-25: Področja delovanja naprave z izplako po Maidlu (2012) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.

Figure 8-25: Application area for slurry machine according to Maidl (2012) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.



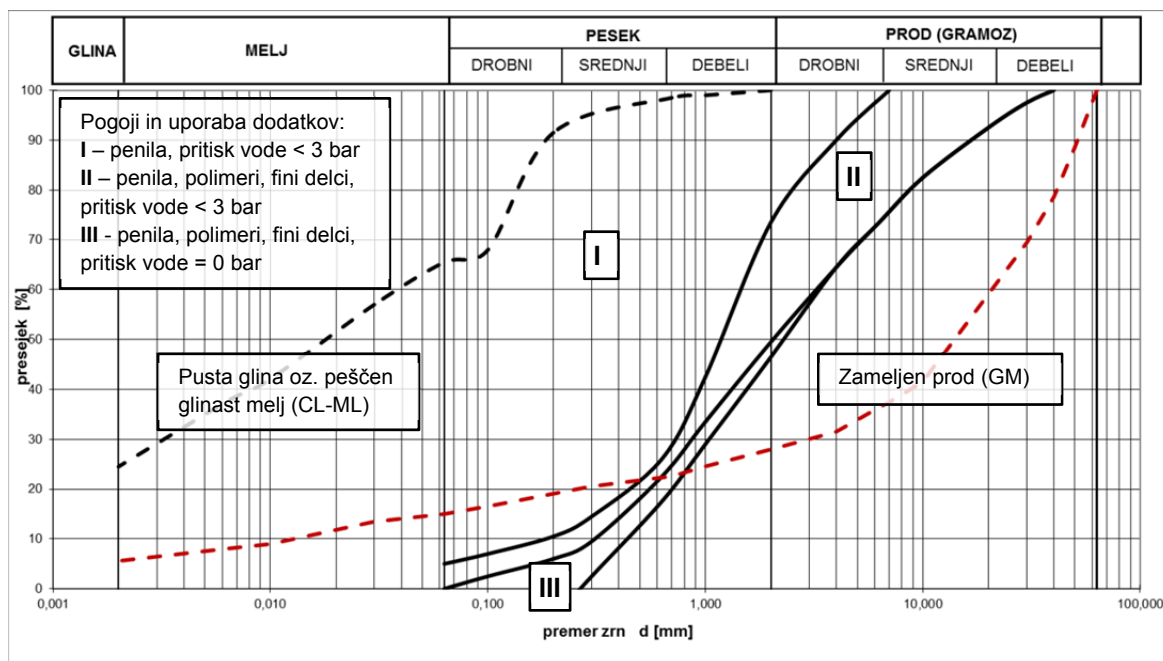
Slika 8-26: Področja delovanja EPB naprave po Maidlu (2012) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.

Figure 8-26: Application area for EPB machine according to Maidl (2012) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.

Ugotovimo lahko, da obe krivulji, ki opisujeta območje zrnivosti v Ljubljani in okolici, delno padeta izven priporočenih področij optimalnega delovanja naprav. Glineni materiali z visoko stopnjo finih zrn imajo tudi visok potencial lepljenja in mašenja ter je zato kot smo že večkrat omenili, reciklaža suspenzije tehnično neizvedljiva. Primerjava krivulj je na prvi pogled bistveno bolj ugodna za EPB napravo, saj je razvidno minimalno odstopanje le pri srednjezrnatih prodih. Ob upoštevanju kriterijev za mejne krivulje EPB naprave je učinkovito delovanje možno le nad krivuljo 2. V območju pod to mejo, mora biti predor nad podtalnico in prepustnost manjša od 10^{-4} m/s, kar pa ne velja za območje Ljubljane.

Alternativa uporaba dveh različnih sistemov je uporaba kombiniranega ali hibridnega sistema, ki združuje EPB in napravo z izplako (Maidl in Pierri, 2014). Sistem ima nekoliko prirejeno rezalno glavo in izkopna orodja, bistvena sprememba pa je sistem za iznos izkopanega materiala. Uporablja zaprt sistem vijaka, ki ga lahko uporabljamo tako v primeru klasičnega EPB delovanja, kot tudi v režimu obratovanja z izplako. V režimu z izplako se na koncu vijaka vgradi separacijski sistem, ki na mestu izkopa ločuje trdni in tekoči del. Trdni del se nato odstranjuje s transportnimi trakovi, tekoči del pa se lahko uporabi ponovno kot izplaka oz. se odvaja po tlačnem vodu na dodatno filtriranje in reciklažo izplake.

Budach je s svojimi raziskavami (2011) preverjal ustreznost delovanja EPB naprave v peščeno prodnatih materialih z deležem finih zrn pod 5%. Ugotovil je, da se kljub uporabi raznih dodatkov (penila, polimerne suspenzije in dodajanje fine frakcije) območja delovanja ne razširijo prav veliko. Dokazal pa je uporabnost EPB naprave v območju pod nivojem podtalnice (< 3 bar) ob deležu finih zrn pod 20% in nizki vrednosti C_u (< 10). Na spodnji sliki prikazujemo priporočena območja za EPB napravo (Budach, 2011) in obe reprezentativni zrnavostni krivulji za Ljubljano.

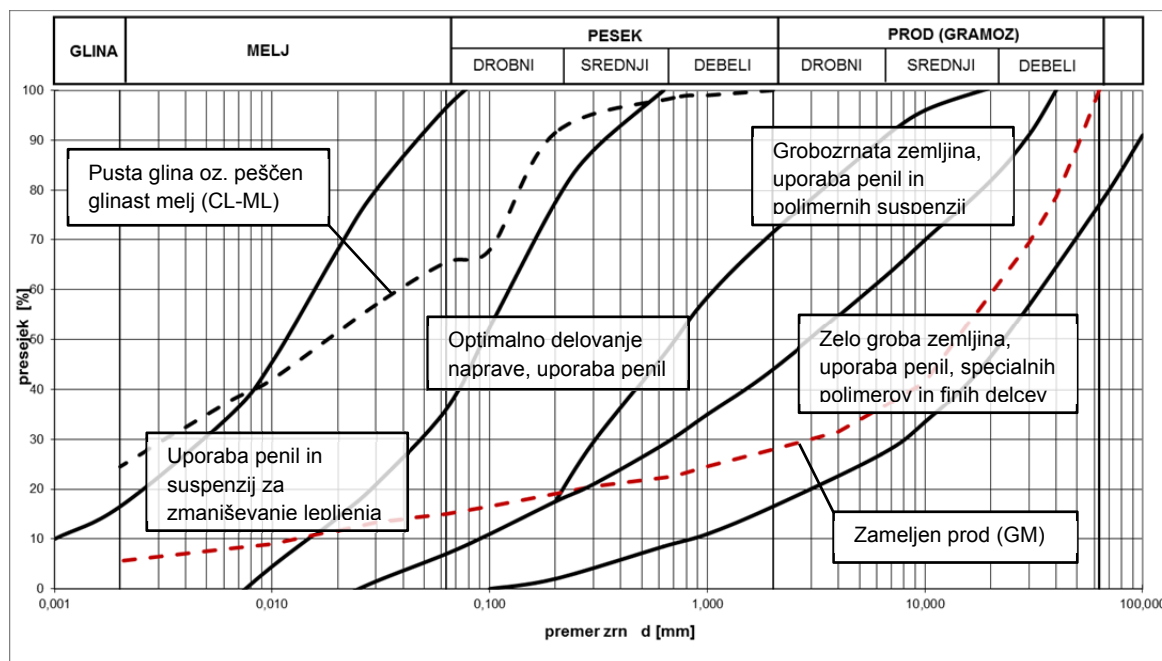


Slika 8-27: Področja delovanja EPB naprave po Budachu (2011) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.

Figure 8-27: Application area for EPB machine according to Budach (2011) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.

Neposredne korelacije za potrebe kontrole ustreznosti EPB naprave iz zgornje slike ne vidimo, saj je razlika med zrnavostnimi krivuljami prevelika. Spodnja meja zrnavostnih krivulj za Ljubljano kaže da je v primeru peščeno prodnatih tal vsaj 15% delcev manjših od 0,063 mm in je faktor C_u večji od 23. Iz primerjave referenčnih granulometričnih krivulj in priporočil, ki jih podaja Budach lahko sklepamo, da EPB naprava ni primerna za uporabo v vseh geoloških danostih, ki se pojavljajo v Ljubljani.

Bistveno drugačna priporočila sta podala Langmaack in Ibarra (2011), ki sta v svojem delu obravnavala dodatke proizvajalca Basf. Uporaba penil, specialnih polimernih suspenzij in dodatek finih delcev omogočata uporabo EPB naprave v grobozrnatih peskih in prodih z zelo majhno vsebnostjo finih zrn. Območje v zelo grobih prodih brez finih delcev je zelo podobno območju, ki ga je definiral Maidl (2012), vendar Langmaack in Ibarra dopuščata tudi gradnjo pod gladino podzemne vode, kot primer navajata projekta v Lyonu in Barceloni.



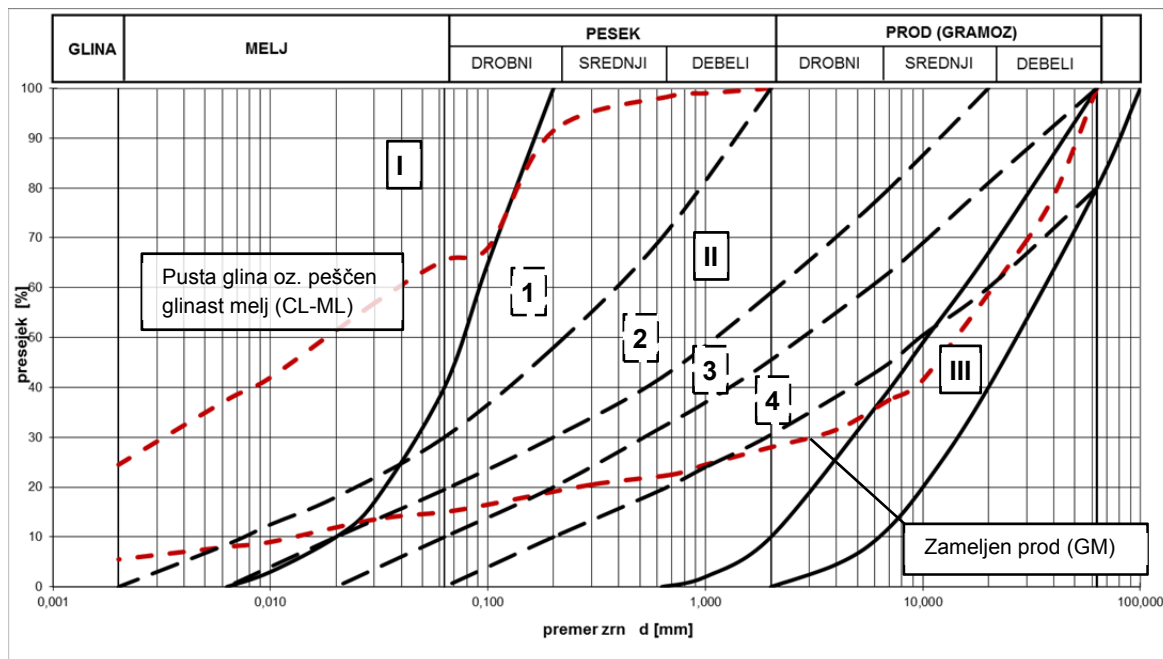
Slika 8-28: Področja delovanja EPB naprave po Langmaacku in Ibarri (2011) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.

Figure 8-28: Application area for EPB machine according to Langmaack and Ibarra (2011) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.

V tem primeru lahko potrdimo ustreznost EPB naprave kot enovite tehnologije za gradnjo predorov v Ljubljani in okolici. Kljub temu bi bilo potrebno izdelati natančno študijo izvedljivosti, kjer bi ugotovili dejansko uporabo in ustreznost specialnih dodatkov, obdelavo izkopanega materiala in preverili možnost ponovne uporabe gradbenih odpadkov.

Še eno izmed priporočil je podal Thewes (2007), ki podaja podobna območja za napravo z izplako kot Maidl (2012), nekoliko drugače pa definira štiri območja za EPB napravo. Območja uporabe naprave z izplako so označena s simboli I, II in III, območja za EPB napravo pa z 1,2,3 in 4. Njihov pomen je naslednji:

- *Naprava z izplako*: I – uporaba dodatkov proti mašenju, otežena je separacija suspenzije, II – optimalno področje uporabe, separacija poteka brez težav, III – uporaba dodatkov in finih delcev za učinkovito podpiranje čela,
- *EPB naprava*: 1 – uporaba vode za konsistenco in penila za zmanjševanje lepljenja, 2 – optimalno delovanje naprave, uporaba penil za podpiranje čela, 3 – uporaba penil in polimernih suspenzij, pritisk vode < 2 bara, 4 – uporaba penil, polimernih suspenzij, finih delcev, pritisk vode = 0 barov.



Slika 8-29: Področja delovanja EPB naprave in naprave z izplako po Thewesu (2007) in mejne krivulje zrnivosti referenčnih materialov v Ljubljani.

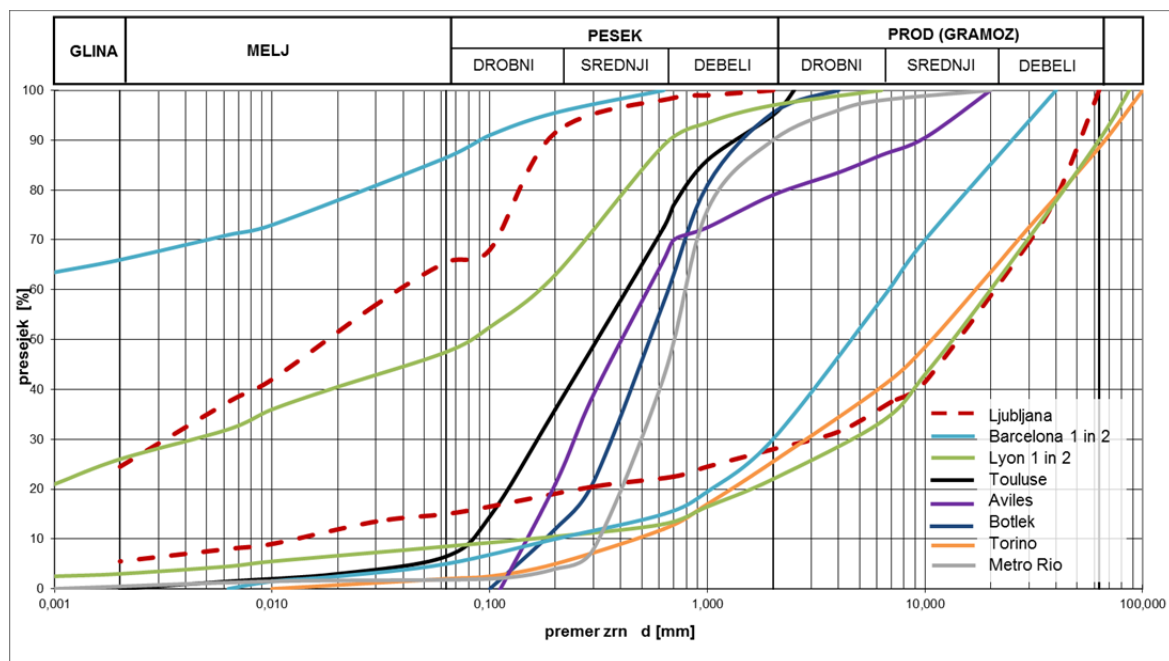
Figure 8-29: Application area for EPB machine and slurry machine according to Thewes (2007) with limit granulometric curves for ground material from Ljubljana.

S slike je razvidno, da razpon zrnavostnih krivulj sega izven obeh območij, iz česar lahko sklepamo, da uporaba le ene TBM naprave ni možna.

8.5.2.6 Primerjava uporabljene tehnologije pri že izvedenih projektih

V nadaljevanju prikazujemo nekaj izvedenih projektov z opisi pogojev gradnje, navajamo tudi katera naprava je bila na posameznem projektu uporabljena in te pogoje primerjamo z mejnima zrnavostnima krivuljama za obravnavano območje Ljubljane. Podatke smo pridobili za naslednje izvedene projekte predorov:

- Barcelona (Langmaack in Ibarra, 2011),
- Lyon (Langmaack in Ibarra, 2011),
- Toulouse (Budach, 2011),
- Aviles (Budach, 2011),
- Botlek (Budach, 2011),
- Torino (Budach, 2011) in
- Metro Rio (Maidl in Pierri, 2014).



Slika 8-30: Krivulje zrnivosti za nekatere izvedene projekte v primerjavi z mejnima krivuljama zrnivosti za območje Ljubljane (prirejeno po Budachu, 2011).

Figure 8-30: Granulometric curves of few completed projects in comparison with limit granulometric curves for Ljubljana area (adapted from Budach, 2007).

Spodnja Preglednica 8-17, dopolnjuje sliko 8-30 z ostalimi osnovnimi podatki o izvedenih projektih.

Preglednica 8-17: Osnovni podatki o izvedenih projektih predorov (Budach, 2011; Maidl in Pierri, 2014; Langmaack in Ibarra, 2011).

Table 8-17: General information of completed tunnel projects (Budach, 2011; Maidl and Pierri, 2014; Langmaack and Ibarra, 2011).

Projekt	Vrsta uporabljene naprave	Delež zrn < 0,063 mm	Dodatki	Pritisk vode
Barcelona	EPB	0 - 63 %	penila, polimeri, fini delci	< 2 bara
Lyon	Multimode	3 - 22 %	penila, polimeri, bentonitna suspenzija	1,5 - 3 bara
Toulouse	EPB	< 5 %	penila, dodatki za preprečevanje lepljenja	< 1 bara
Aviles	EPB	0 %	penila, polimeri	2,5 bara
Botlek	EPB	0 %	penila, polimeri	3,6 bara
Metro Rio	hybrid EPB	2 - 12 %	penila	< 3 bare
Torino	EPB	< 3 %	penila, polimeri	nad gladino

Sestavo tal Ljubljane lahko še najbolje primerjamo s projektom v Lyonu, kjer so si zgornja in spodnja meja zrnivosti dokaj podobni. Spodnja meja zrnivosti, ki je hkrati tudi najbolj problematična, je podobna spodnji meji projekta v Barceloni in zrnavostni sestavi pri projektu v Torinu.

8.5.3 Uporaba dodatkov pri gradnji predorov v Ljubljani

Uporaba dodatkov je za obe doslej najpogosteje obravnavani TBM napravi običajna. Uporabljamo jih za spreminjanje lastnosti izkopenega materiala z namenom doseganja učinkovitega podpiranja čela (regulacija notranjega trenja izkopenega materiala), dobrih mehanskih lastnosti za iznos materiala, preprečevanje mašenja vijaka, zmanjševanje

prepustnosti hribine, zmanjševanje navora naprave in boljše drsenje ščita. Izbira primernih dodatkov je odvisna od laboratorijskih preiskav, katere se izvajajo za posamezni projekt in z uporabo zemljine z območja predvidene gradnje. Preiskave se običajno izvajajo le za penila ter v dveh fazah. V prvi fazi se preizkuša kakovost in obstojnost samega penila (EFNARC, 2005), v drugi fazi pa mešanica penila in zemljine s pomočjo katere določimo delež penila ali *FIR* (%) in razpon vlažnosti w (%). Standardiziranih preiskav za dodatke ni, zato se običajno uporabljajo preiskave za sveže betone (preizkus s posedom, ipd.). Preiskav v tej nalogi nismo opravili, zato podajamo zgolj teoretična priporočila.

Smernice EFNARC podajajo izhodišča kateri dodatki so primerni za doseganje posameznega učinka v hribini. Za področje Ljubljane in izredno heterogene geološke pogoje veljajo priporočila za zmanjševanje vodoprepustnosti, izboljševanje obdelovalnih lastnosti materiala v izkopni komori in zagotavljanje pritiska na čelo, zmanjševanje navora, zmanjševanje lepljenja in zmanjševanje obrabe izkopnih orodij. Naštete parametre lahko izboljšamo s penami in polimernimi suspenzijami. Delež pene *FIR* (Foam injection ratio) je za dane geološke pogoje med 30 in 60%, kar predstavlja delež dodatka v izkopni komori. Ravno tako, pa je delež penila odvisen od lastnosti nabrekanja ali *FER* (Foam expansion ratio). Polimerni dodatki so v obliki tekočine in zmanjšujejo lepljenje, izboljšujejo konsistenco in v bolj peščenih materialih zvišujejo kohezijo. Kontrole uporabljenih dodatkov in njihove koncentracije se vršijo ves čas gradnje.

Uporaba dodatkov pri gradnji predora v zemljinah mora upoštevati vsaj naslednje kriterije (DAUB, 2010):

- enostavno doziranje in kontroliranje dodatka,
- učinkovito dovajanje dodatkov v izkopno komoro in učinkovit iznos izboljšane materiala,
- hitro in učinkovito delovanje dodatka pri spreminjanju geoloških pogojev in
- uporaba dodatkov s čim manjšim vplivom na okolje.

Dodatki primerni za uporabo v Ljubljani in okolici morajo imeti čim manjši vpliv na podzemno vodo. Za uporabo so po nemški smernici primerni vsi tisti dodatki, ki imajo opredeljen razred onesnaženja za podzemno vodo, minimalno 80% biološko razgradljivost in stopnjo strupenosti LD_{50} (smrtna koncentracija) za sesalce in EC_{50} (efektivna koncentracija) za vodne organizme. Slovenska zakonodaja ne predpisuje natančnih kriterijev, ki jih mora posamezen dodatek izpolnjevati pri uporabi, določa le mejne dovoljene koncentracije za odpadne vode, katere izpuščamo v okolico, zato bi bilo najverjetneje potrebno upoštevati tuja priporočila in smernice. Mejne dovoljene koncentracije, določajo vrednosti splošnih parametrov, bioloških parametrov in anorganskih parametrov, ki jih odpadna voda ne sme presegati pri izpustu v okolje. Gradnjo predorov in uporabo dodatkov v Ljubljani omejujeta tudi uredbi o vodovarstvenem območju na Ljubljanskem polju in barju. Pogoji so predstavljeni v poglavju 8.6.2.

Pregledana literatura v grobozrnatih materialih navaja tudi uporabo fine frakcije, s katero omogočamo učinkovito delovanje dodatkov. Pestri geološki pogoji v Ljubljani tako zahtevajo uporabo praktično celotnega spektra penil, polimernih suspenzij, bentonitne suspenzije in dodatnih finih delcev. Vrsto, količino, razmerja mešanja in območja uporabe je potrebno določiti s pomočjo laboratorijskih preiskav v fazi geoloških raziskav in v fazi načrtovanja in izvedbe TBM naprave.

V uvodnem poglavju (4.5.5) o dodatkih smo predstavili enačbo (4-2) s pomočjo katere lahko ocenimo količino dodatkov. Količina penila je odvisna presejka skozi posamezna sita (X, Y, in Z) in od količnika enakomernosti C_u . Faktor α je odvisen od vrednosti C_u . V izračunu upoštevamo le granulometrično sestavo zemljine, ne pa tudi ostalih pomembnih parametrov, kot so delež por, vlažnost, koeficient prepustnosti, indeks konsistence in računski vrednost pritiska na čelo izkopa. Izračun pokaže, da je delež penila, ki bi ga morali uporabiti pri izvedbi v peskih, okoli 20%, v zaglinjenih in zameljenih prodih okoli 60% ter v dobro graduiranih prodih z izredno malo finih delcev celo 98%. Izračunane vrednosti so podobne tistim, ki jih podajajo tudi smernice EFNARC, le pri prodih je odstopanje večje in stabilnosti ne moremo zagotavljati zgolj z dodajanjem penil.

Preglednica 8-18: Količina (Q) potrebnega dodatka (penila) glede na vrsto zemljine

Table 8-18: Quantity (Q) of additive (foam) according to soil classification.

Vrsta zemljine	C_u	α	X ($< 0,075$ mm)	Y ($< 0,42$ mm)	Z ($< 2,0$ mm)	Q (%)
GW	10,9	1,2	2,1	8,2	30,5	98,1
GW-GM	42,6	1,0	8,6	17,9	41,5	60,7
GW-GC	66,6	1,0	9,1	16,4	35,5	64,4
GP-GM	266,0	1,0	11,3	19,3	31,0	62,4
GM	1353,9	1,0	12,8	20,4	36,5	57,2
SM	223,8	1,0	21,7	38,7	67,5	21,6

Natančnejša določitev vrste in količine dodatkov, ki bi ustrezali za Ljubljano, pa je odvisna od trase in nivelete predora, kjer nato s pomočjo raziskav lahko določimo dejansko sestavo tal in ostale geomehanske karakteristike.

8.5.4 Izvedljivosti gradnje predorov in uporaba TBM naprav v Ljubljani

V sklopu naloge smo želeli preveriti ali je gradnja predorov s TBM tehnologijo izvedljiva na območju Ljubljane in okolice. Stopnja razvitosti TBM tehnologije, ki smo jo predstavili v začetnih poglavjih naloge dokazuje, da je uporaba možna praktično v vseh geološko geotehničnih pogojih. Ti so sicer na območju Ljubljane sorazmerno neugodni za izvedbo predorov, poleg tega je velikost posega omejena tudi z ostrimi pogoji na vodovarstvenem območju. Na podlagi predstavljenih analiz lahko zaključimo, da je gradnja predorov s TBM tehnologijo na področju Ljubljane možna. Do drugačnega zaključka bi mogoče lahko privedle podrobnejše študije vpliva mehanizirane gradnje predora ob uporabi dodatkov na podtalnico.

Še ena izmed hipotez, ki smo si jih zadali preveriti in je bistvena tema predmetne naloge, je možnost uporabe enovite TBM tehnologije za gradnjo predorov v Ljubljani in okolici. V ta namen je bilo izdelanih več primerov izbire naprave v skladu s smernicami in priporočili, ki so podane s strokovnimi prispevki. Za potrebe izdelave kriterijske analize smo izdelali tudi poglobljeno analizo geološko geomehanskih pogojev iz razpoložljivih podatkov.

Vidimo lahko, da nekatere smernice ne določajo natančnih kriterijev za izbor naprave in le priporočajo na podlagi katerih podatkov se izbira opravi. Smernica nemškega združenja za podzemno gradnjo, pa zelo natančno predpisuje nabor podatkov, ki jih je potrebno za odločitev pridobiti, natančno definira korake odločanja in poda osnovno kriterijsko analizo za določitev primernosti naprave. Dokaj natančno so podana tudi priporočila s strani Maidla in

Thewesa, ki obravnavata tako EPB napravo, kot tudi napravo z izplako, ki se izkažeta kot najbolj primerni za zemljine.

Na podlagi zbranih podatkov in opravljenih kriterijskih analiz oz. primerjav lahko ugotovimo, da se področje uporabe EPB tehnologije zelo hitro razvija in širi tudi v območju peskov in prodov, predvsem na račun sodobnih dodatkov v obliki penil in polimernih suspenzij. Kljub temu posamezni sloji v Ljubljani in okolici segajo iz območja uporabe, kjer bi z dokaj konservativnim pristopom lahko gradili predore. Uporaba EPB naprave je problematična tudi pri zagotavljanju stabilnosti čela v bolj prepustnih zemljinah (v primeru mirovanja naprave, pojavljanje okvar, vzdrževanja, ipd.). Po drugi strani, je uporaba naprave z izplako problematična v plasteh, ki imajo veliko zastopanost finih delcev, saj je obdelava izkopanega materiala in suspenzije tehnično zelo zahtevna ali celo neizvedljiva. Menimo, da kljub nekaterim vzpodbudnim rezultatom že izvedenih projektov z EPB tehnologijo, ne moremo sprejeti sklepa, da bi bila samo EPB tehnologija primerna za izvedbo vseh tras potencialnih predorov, temveč je potrebno uporabiti tudi tip naprave, ki uporablja izplako.

Skupna dolžina tras potencialnih predorov je bila podana v poglavju 8.3 in znaša 62,49 km. V spodnji preglednici podajamo dolžine odsekov posamezne proge, ki se nahaja v peščeno prodnatih plasteh, zaglinjenih plasteh oz. v glinenem skrilavcu.

Preglednica 8-19: Dolžine odsekov proge predora glede na sestavo tal.

Table 8-19: Length of tunnel line sections according to the ground structure.

Ime proge	Skupna dolžina (m)	Dolžina v peščeno prodnatih plasteh - izvedba z izplako (m)	Dolžina v zaglinjenih plasteh - izvedba z EPB (m)	Dolžina v glinastih skrilavcih (C,P) - izvedba z EPB ali izplako (m)
A	7365	7365	0	0
B - sever	7622/11485	11485	0	0
B - jug	3743	1338	2405	0
C	6143	6143	0	0
D - vzhod	5684	5684	0	0
D - zahod	4344/6915	1070	5845	0
E	6426	2450	3976	0
F	8281	2375	4191	1715
F - krak 1	3046	0	825	2220
F - krak 2	3403	540	666	2197

V poglavju 8.5 smo preverili uporabnost dveh tipov TBM naprav, na podlagi katerih smo razčlenili odseke predvidenih podzemnih prometnic. Na odsekih, kjer prevladujejo peščeno prodnati materiali (proge: A, B-sever, C in D-vzhod), se naj uporabi napravo z izplako, v primeru prisotnosti podzemne vode in visoke prepustnosti vodonosnika, pa je možna uporaba EPB naprave.

V zaglinjenih plasteh (proge: B-jug, D-zahod, E in del proge F s krakoma), se naj uporablja EPB naprava, nivo podzemne vode ne vpliva na izbiro. Za materiale višjih trdnosti (proga F) so sicer primerne TBM naprave za kamnino, vendar z vidika izvedljivosti celotne proge, ne

pridejo v poštev. Na teh odsekih se lahko uporabi EPB naprava oz. naprava z izplako in sicer v režimu odprtega obratovanja (pri izkopu ni potrebno zagotavljati podpore izkopnemu čelu).

8.6 Ocena vplivov na okolje

Pri izbiri ustrezne naprave ime veliko težo tudi okoljska komponenta načrtovanja predora. V primeru dveh tehnično enakovrednih variant, je lahko okoljski vidik namreč odločilni kriterij (stopnja vpliva posedanja površine, vrsta dodatkov, ponovna uporaba materiala, idr.). Za primer gradnje predorov v Ljubljani, ki ga obravnavamo v tej nalogi, okoljski kriteriji ne vplivajo na izbiro naprave, saj smo v prejšnjem poglavju ugotovili, da ne moremo določiti enovite tehnologije gradnje, vendar smo kljub temu, v tem poglavju obravnavali vplive na okolje obeh tipov naprav. Za v tej nalogi obravnavane potencialne trase predorov smo preverili naslednje vplive na okolico:

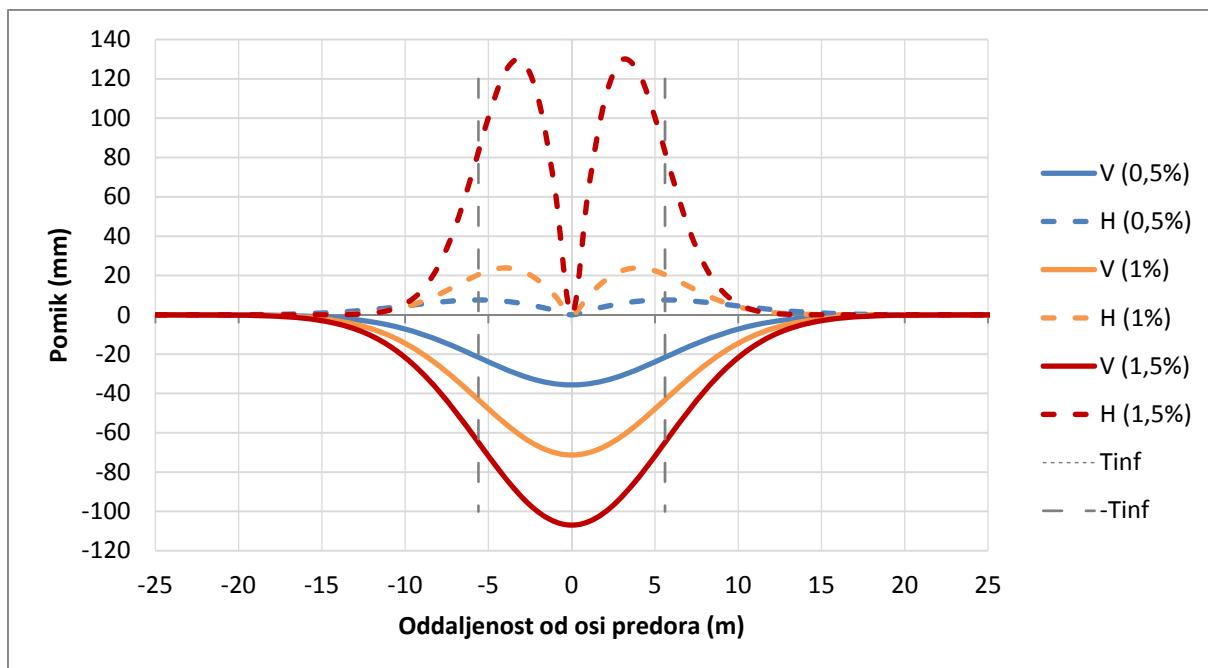
- vpliv izkopa na posedanje površine in možnost poškodb objektov,
- vpliv na podtalnico,
- ravnanje z izkopanim materialom in
- hrup, prah ter vibracije.

Vsakršen gradbeni poseg ima v Ljubljani in okolici velik vpliv na podtalnico, saj sta na tem območju dva velika vodonosnika, območje pa je gosto poseljeno. Izvedba tako velikih projektov, kot bi bila podzemna železnica v Ljubljani, zahteva vključevanje in redno obveščanje zainteresirane javnosti o napredovanju projekta ter še bolj pomembno o vplivih na okolje. V ta namen se predvidi tudi prostor, kjer so na voljo informacije javnega značaja.

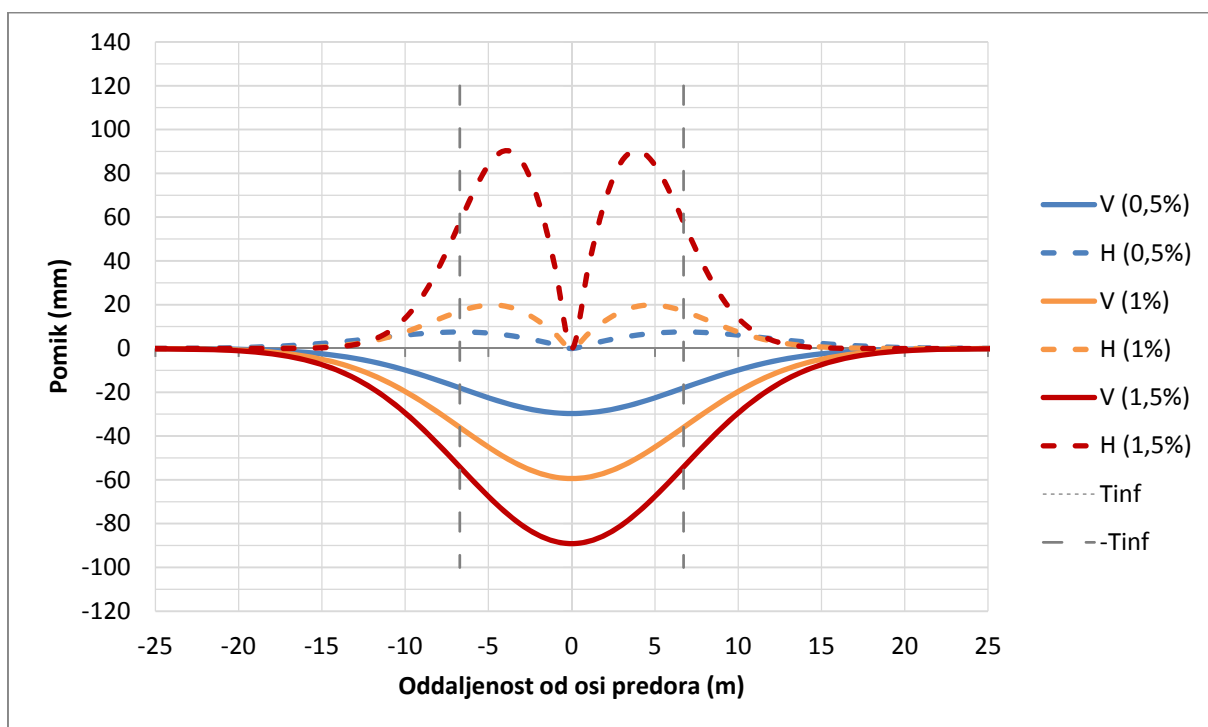
8.6.1 Vpliv posedanja površine

Vpliv gradnje predora, ki se vsakokrat pojavi pri gradnji, ne glede na izbrano tehnologijo gradnje predora ali vrste TBM naprave, je posedanje površine. To je osnovni mehanski vpliv in se izvrši v vsakem primeru. Razlika je le v velikostnem redu in predhodnih ukrepih, ki jih lahko izvedemo z namenom omejitve posevkov. V nalogi smo zato izdelali izračun s pomočjo empiričnega pristopa po Pecku, ki smo ga predstavili v poglavju 5.2.5.

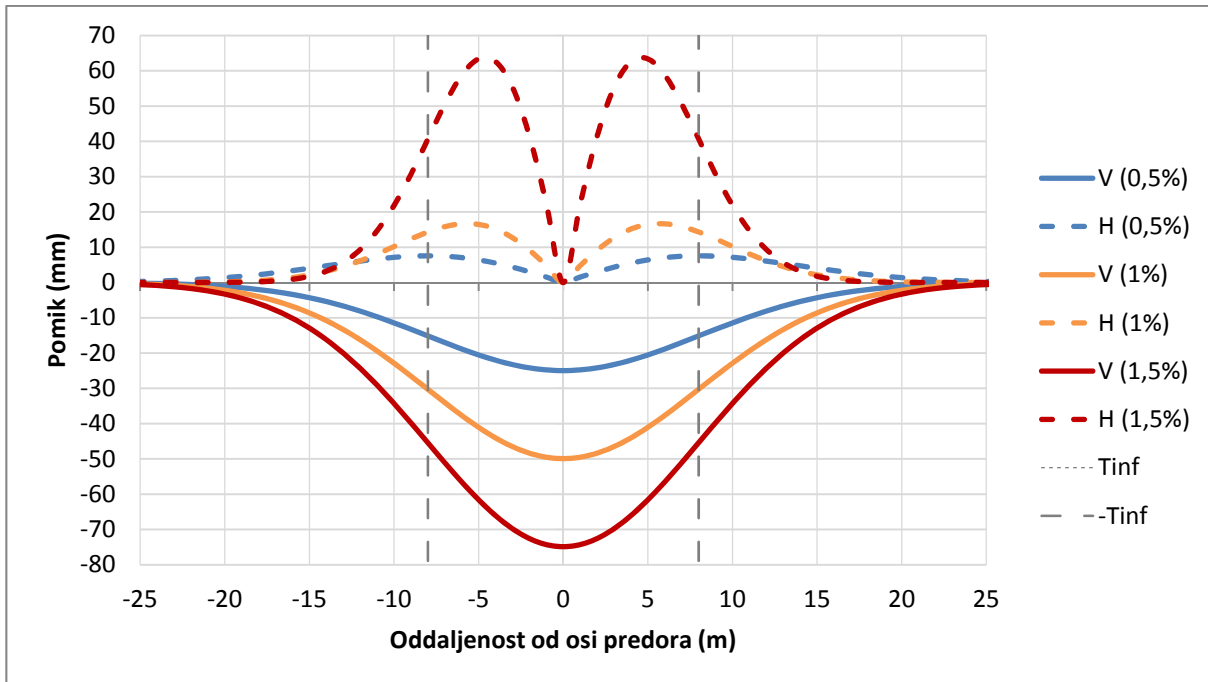
Kot je predstavljeno v poglavju 8.2, smo v izračunu upoštevali zasnovo v obliki dveh enotirnih predorov s premerom izkopa 6,87 m in medosno razdaljo 15 m ter enim dvotirnim predorom s premerom izkopa 11,29 m. Izdelali smo parametrično analizo, kjer smo pri izračunu upoštevali tri vrednosti izgube prostornine (V_L) in sicer: 0,5%, 1,0% in 1,5%. Predpostavili smo tudi dve vrednosti za globino nivelete predora in sicer 16 m in 25 m. Prva vrednost izhaja iz študije modernizacije ljubljanskega železniškega vozlišča (Žličar et al., 2010), druga pa je običajna globina podzemne železnice. Vrsto zemljine, empirični izračun v svojih enačbah opiše s koeficientom k , ki znaša 0,35 za materiale brez kohezije in 0,5 za normalno konsolidirane glin (Sugiyama et al., 1999). Mi smo v nalogi pomike določili za vrednosti $k=0,35$, 0,42 in 0,50. Z izračunom smo določili vertikalne (enačba 5-29) in horizontalne pomike (enačba 5-35). Najprej prikazujemo rezultate v grafični za dvotirni predor. Polna črta predstavlja potek vertikalnih pomikov, črtkana črta pa horizontalne pomike pravokotno na os predora.



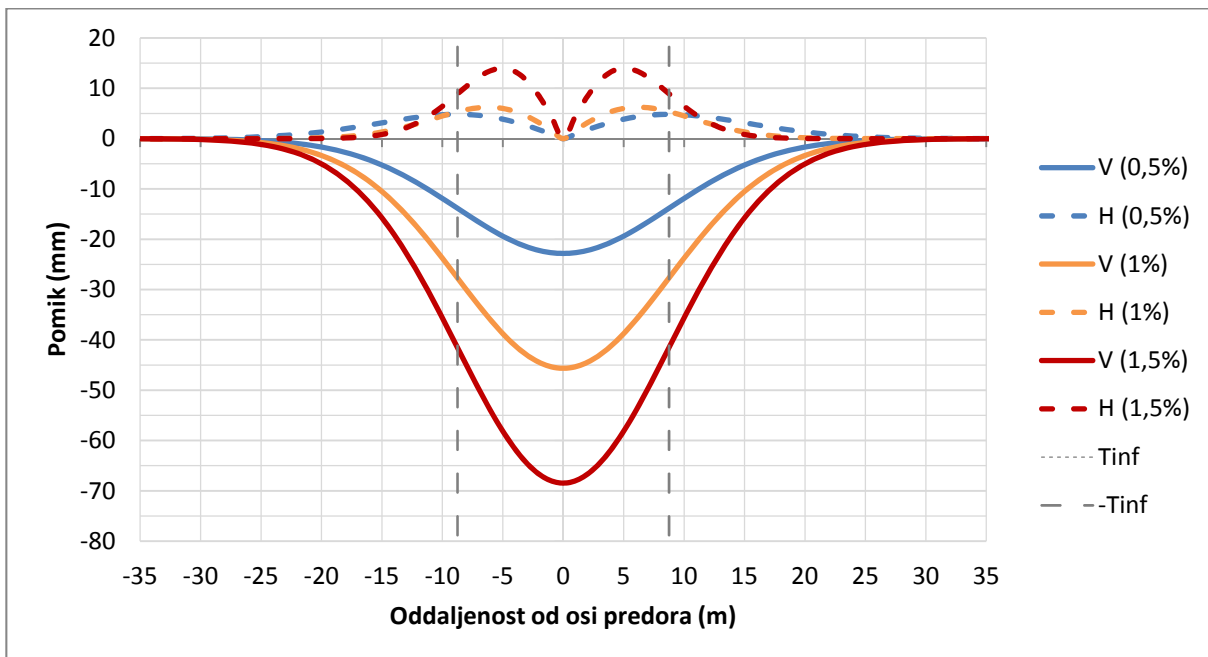
Slika 8-31: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,35$.
Figure 8-31: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=16$ m and $k=0,35$.



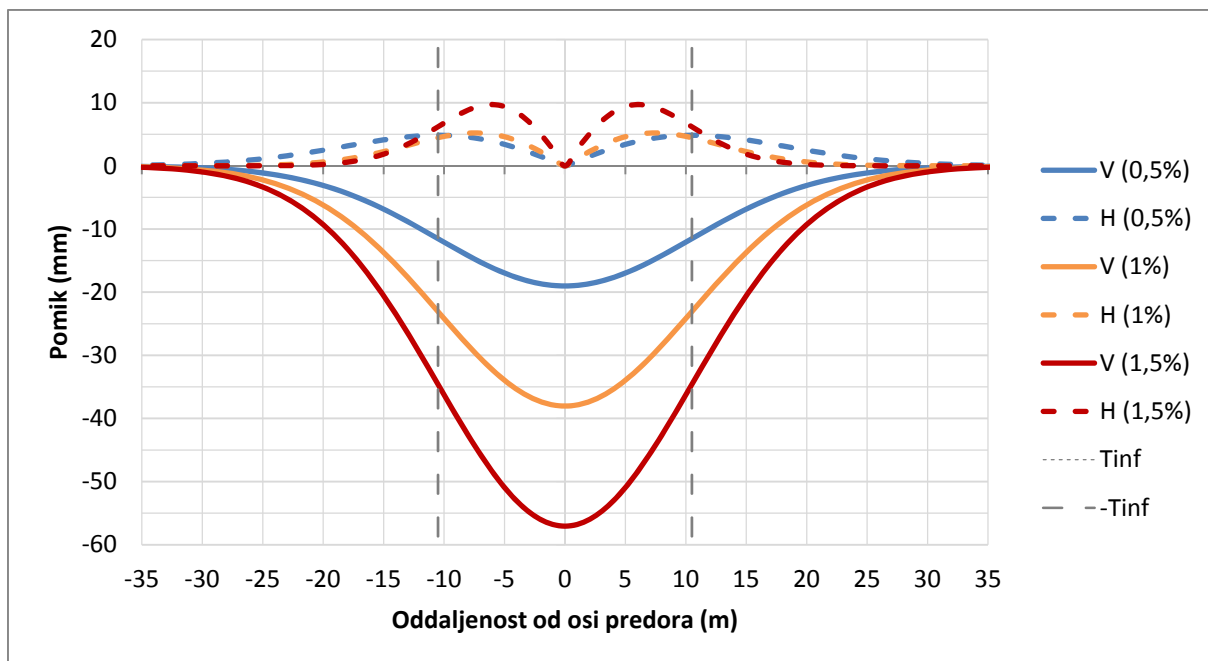
Slika 8-32: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,42$.
Figure 8-32: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=16$ m and $k=0,42$.



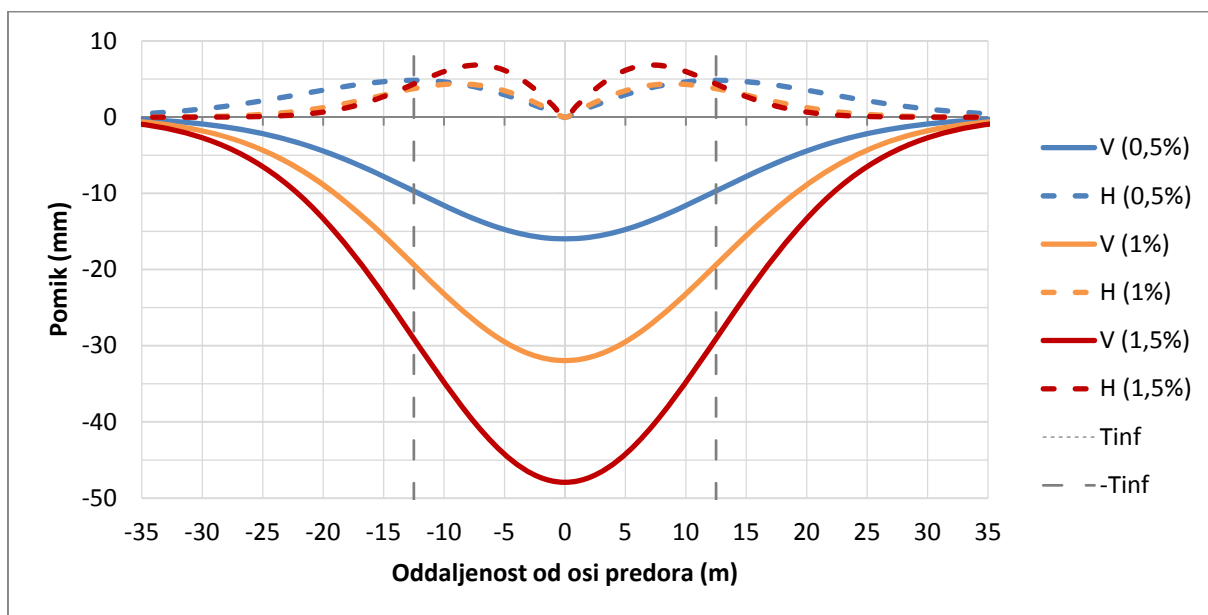
Slika 8-33: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,50$.
Figure 8-33: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=16$ m and $k=0,50$.



Slika 8-34: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,35$.
Figure 8-34: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=25$ m and $k=0,35$.

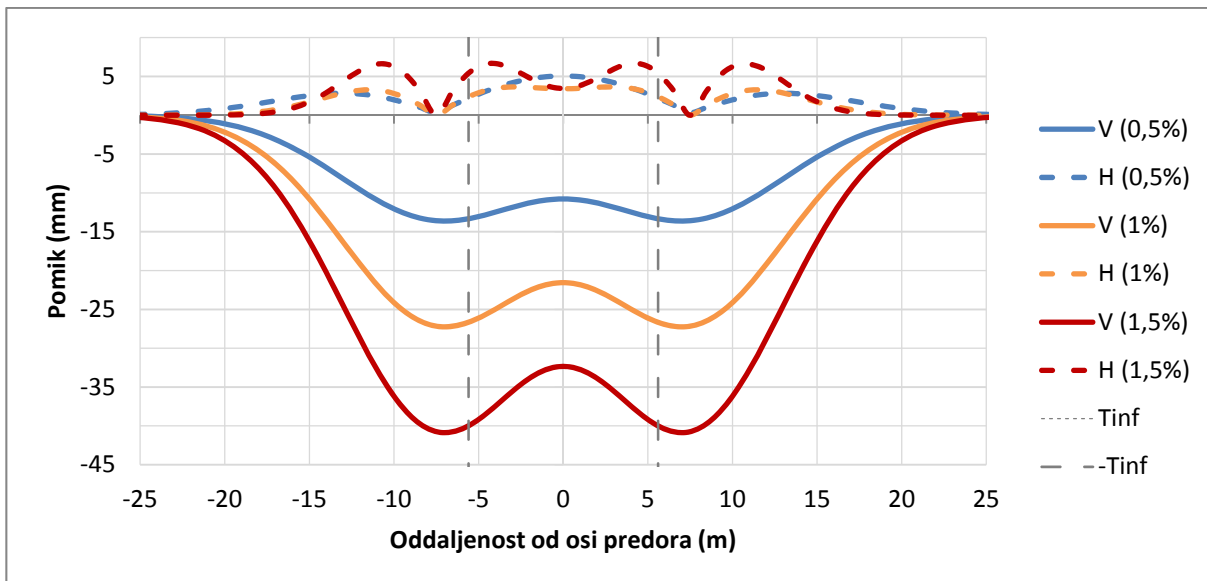


Slika 8-35: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,42$.
Figure 8-35: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=25$ m and $k=0,42$.



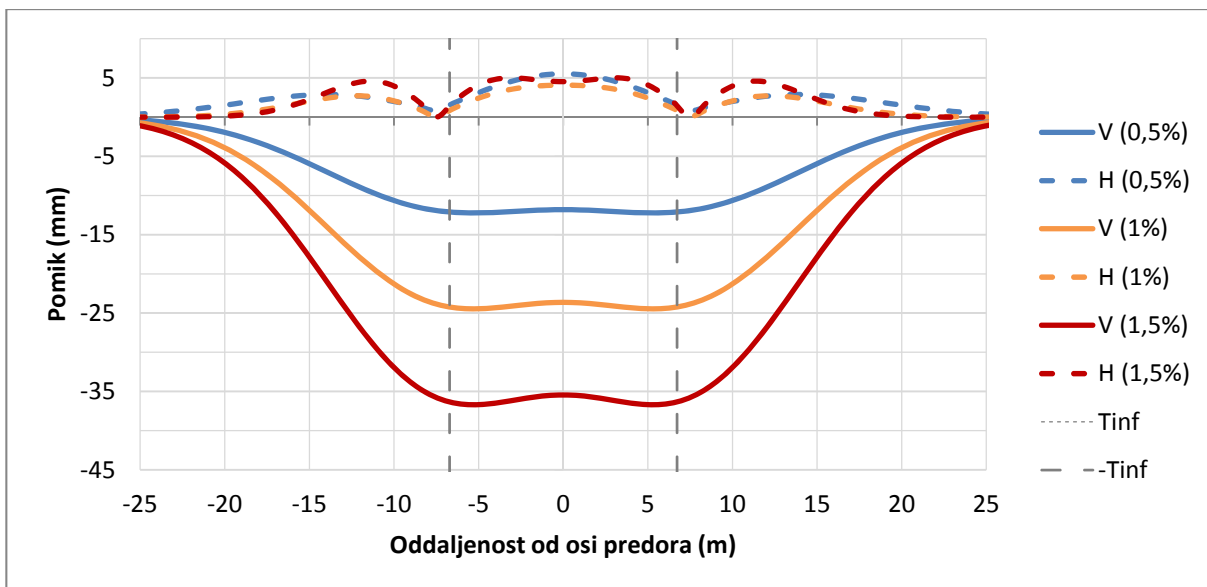
Slika 8-36: Vertikalni in horizontalni pomiki za dvotirni predor pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,50$.
Figure 8-36: Vertical and horizontal displacement for double track tunnel at $Z_0=25$ m and $k=0,50$.

V nadaljevanju prikazujemo še rezultate za dva vzporedna enotirna predora. Osi predorskih cevi sta med seboj razmahnjeni 15 m. Pomike smo določili za eno cev in jih nato po principu superpozicije izračunali za obe predorski cevi.



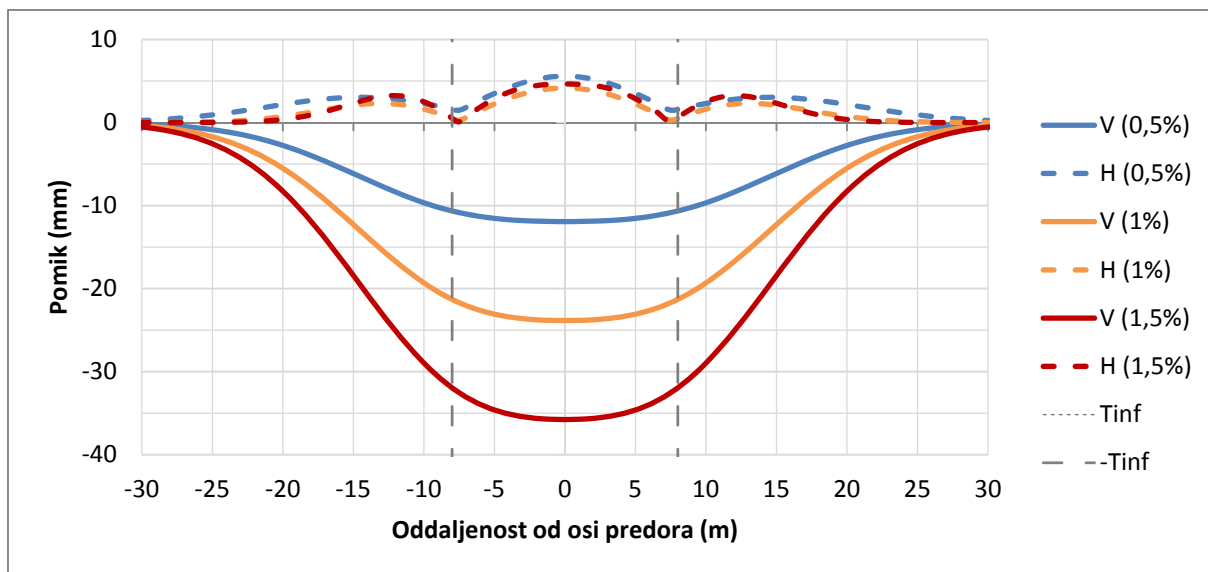
Slika 8-37: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,35$.

Figure 8-37: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=16$ m and $k=0,35$.



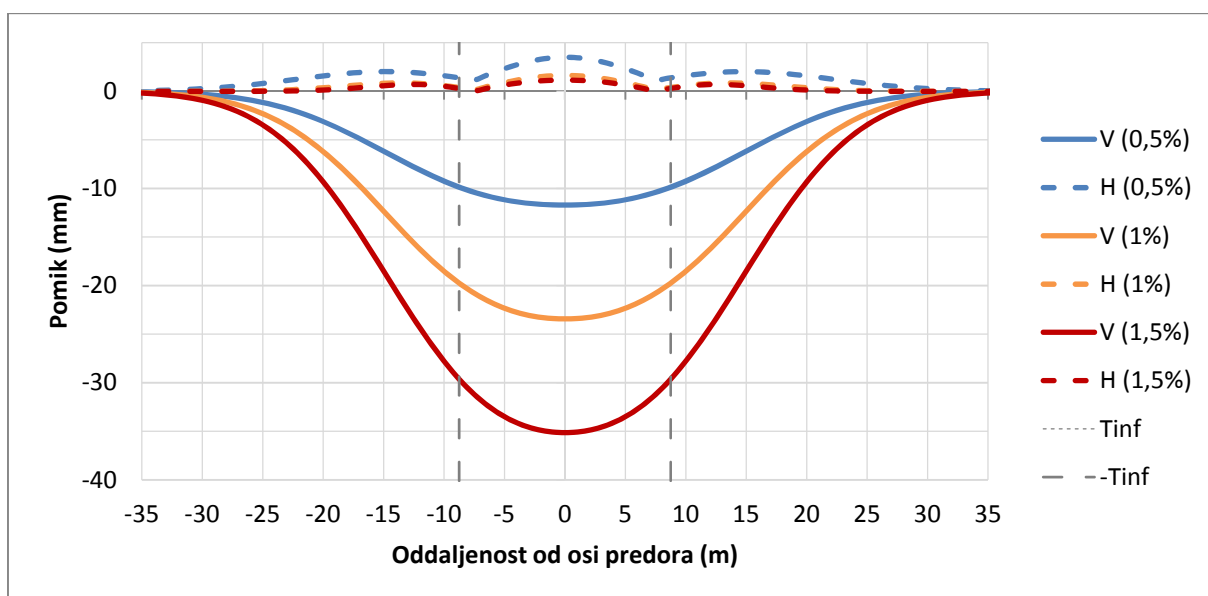
Slika 8-38: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,42$.

Figure 8-38: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=16$ m and $k=0,42$.



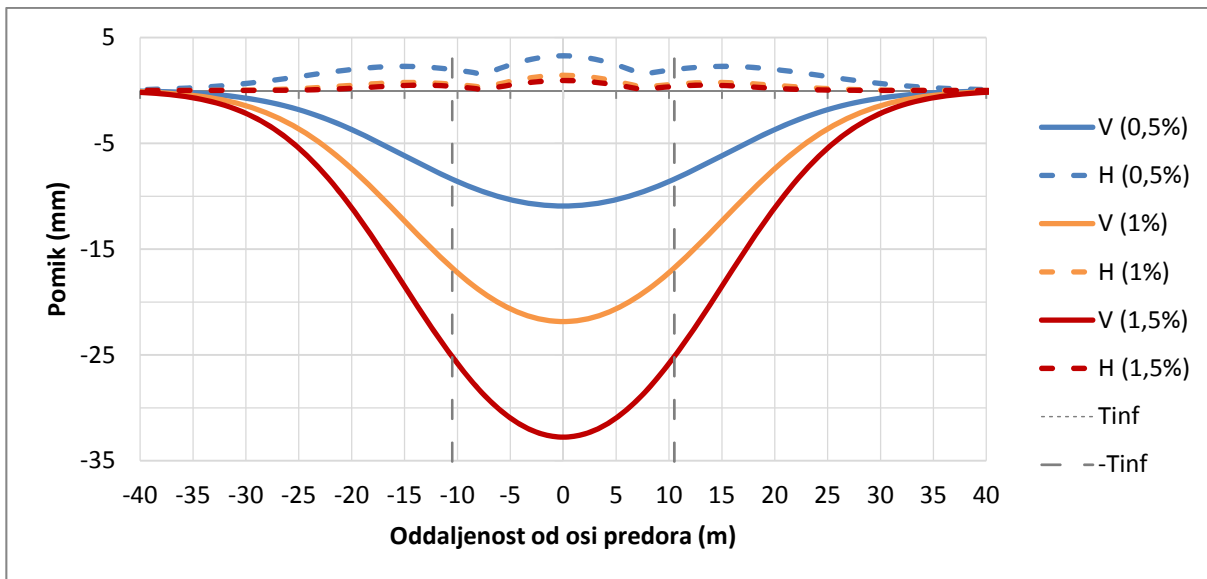
Slika 8-39: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=16$ m in $k=0,50$.

Figure 8-39: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=16$ m and $k=0,50$.



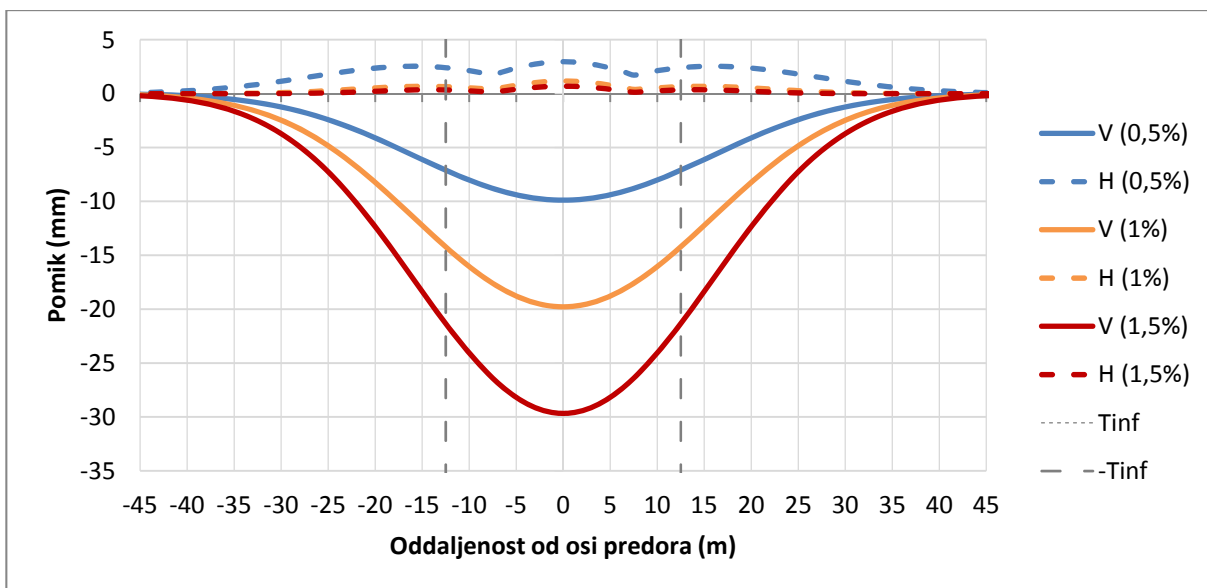
Slika 8-40: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,35$.

Figure 8-40: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=25$ m and $k=0,35$.



Slika 8-41: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,42$.

Figure 8-41: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=25$ m and $k=0,42$.



Slika 8-42: Vertikalni in horizontalni pomiki dveh vzporednih cevi enotirnega predora pri globini $Z_0=25$ m in $k=0,50$.

Figure 8-42: Vertical and horizontal displacement for two single track tunnels at $Z_0=25$ m and $k=0,50$.

Poleg grafičnih prikazov pomikov, rezultate podajamo tudi v preglednici (8-20), kjer smo povzeli izračunane vrednosti maksimalnih pomikov (s_{max}) za vse našteje vhodne parametre (V_L , k in Z_0).

Preglednica 8-20: Vrednosti maksimalnih posedkov glede na vrednosti vhodnih podatkov.
Table 8-20: Values of maximum settlements according to input data values.

V _L 0,50%				V _L 1,00%				V _L 1,50%			
Z ₀ (m)	k	s _{max} (mm)		Z ₀ (m)	k	s _{max} (mm)		Z ₀ (m)	k	s _{max} (mm)	
		dvotirni	enotirni			dvotirni	enotirni			dvotirni	enotirni
16	0,35	35,66	13,59	16	0,35	71,31	27,17	16	0,35	106,97	40,76
16	0,42	29,71	12,23	16	0,42	59,43	24,46	16	0,42	89,14	36,69
16	0,5	24,96	11,92	16	0,5	49,92	23,84	16	0,5	74,88	35,76
25	0,35	22,82	11,71	25	0,35	45,64	23,42	25	0,35	68,46	35,13
25	0,42	19,02	10,92	25	0,42	38,03	21,83	25	0,42	57,05	32,75
25	0,5	15,97	9,89	25	0,5	31,95	19,77	25	0,5	47,92	29,66

Iz rezultatov je razvidno, da v primeru plitve nivelete predora in hribine z nizko kohezijo ali celo brez, lahko pričakujemo znatnejše posedanje površine pri enem dvotirnem predoru, kot pri dveh enotirnih predorih. Glede na velike vertikalne pomike pri plitvi niveleti, lahko pričakujemo tudi velike horizontalne pomike v smeri pravokotno proti osi predora. Ti so bistveno manjši pri enotirnih predorih. Vrednosti posedkov dvotirnega predora, pri bolj kohezivnih zemljinah in plitvi niveleti, so kar 2,6 krat večji od enotirnih. Pri globoki niveleti in zemljinah z večjo kohezijo, je faktor nižji in znaša le še 1,6. Eurocode 7 predpisuje vrednost maksimalnih absolutnih pomikov, ki znaša 50 mm, oziroma so le ti lahko večji, če so relativni zasuki v znotraj sprejemljivih vrednosti. Iz preglednice 8-20 je razvidno, da so posedki vzporednih enotirnih predorov, vselej znotraj dovoljene meje, kar pa ne velja za dvotirni predor. V tem primeru velja, da ima predor s plitvo niveleto v materialih brez kohezije in izgubi prostornine več kot 1,0 %, prekomerne vplive na posedanje površine.

V splošnem lahko pričakujemo manjše pomike pri zasnovi dveh enotirnih predorov, kar pa ne velja za velikost vplivnega območja. Pri dvotirnem predoru je pričakovani vpliv gradnje predora pri niveleti 16 m, v oddaljenosti od 20 do 25 m in pri niveleti 25 m, od 30 do 40 m. Pri enotirnem predoru, pa lahko pričakujemo vplive pri niveleti 16 m, od 25 do 30 m in pri niveleti 25 m, od 35 do 45 m. Vplivno območje je pri enotirnih predorih večje za približno 12 do 25%. Vpliv je odvisen od vrste hribine, saj kohezija poskrbi za širšo razporeditev in manjši posedek.

Poleg posedkov so vplivi na obstoječe objekte odvisni tudi od relativnih zasukov temeljev, ki nastanejo zaradi posedanja površine. Eurocode 7 za običajne konstrukcije predpisuje največji sprejemljiv zasuk velikostnega reda 1:500, pogojno je mejna vrednost lahko 1:300. Pri vrednosti relativnega zasuka 1:150, pa je verjetno doseženo mejno stanje uporabnosti oziroma je celo ogrožena stabilnost konstrukcije. Da bi lahko ugotovili morebitne vplive na objekte, smo iz dobljenih rezultatov posedkov, izračunali še vrednosti relativnih zasukov. Iz poteka posedkov je razvidno, da bo vrednost največjega relativnega zasuka v točki prevoja (*i*). V izračunu nismo upoštevali togost objekta ter interakcijo med objektom in površino, ki bi verjetno ugodno vplivala na rezultate.

Dobljeni rezultati pokažejo, da so pri dvotirnem predoru, relativni zasuki zelo veliki in so praktično znotraj mejnih vrednosti le v primeru, če je niveleta predora na globini 25 m in izguba prostornine zaradi gradnje predora do 0,5 %. V primeri vzporednih enotirnih predorov so vplivi bistveno manjši, saj do največjih relativnih zasukov pride le v primeru gradnje predora s plitvo niveleto ($Z_0=16$ m), v materialih brez kohezije in v primeru izgube prostornine

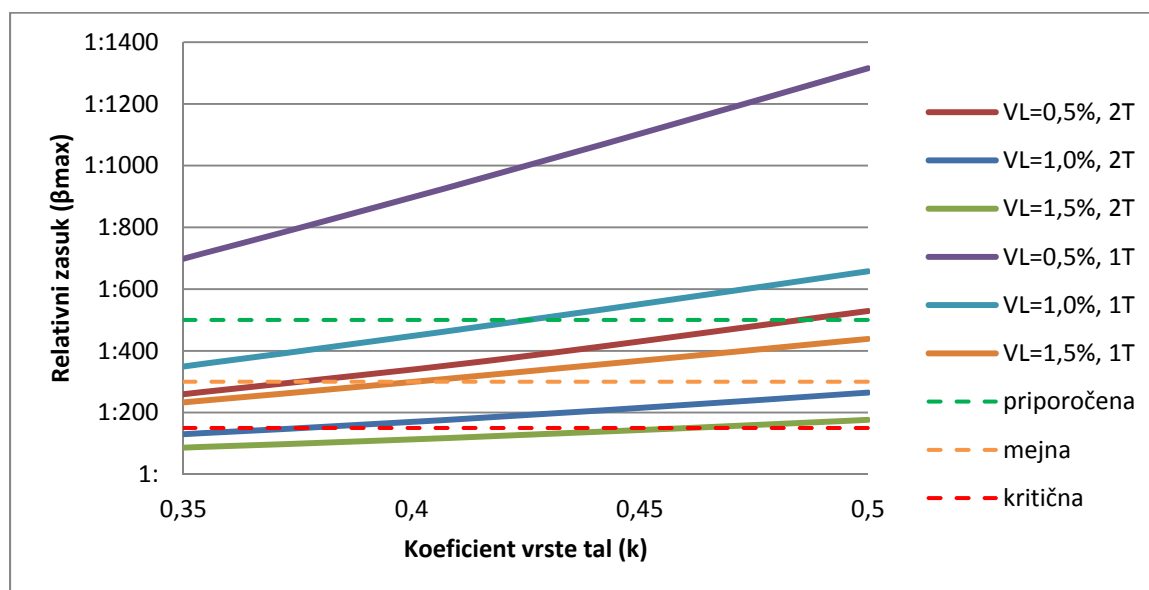
nad 1 %. Vrednost relativnega zasuka 1:300 je presežena le v primeru enotirnega predora z niveleto pri 16 m, $k=0,35$ in $V_L=1,5$ %.

Preglednica 8-21: Vrednosti maksimalnih relativnih zasukov.

Table 8-21: Values of maximum relative rotations.

V_L	β_{max}			V_L	β_{max}			V_L	β_{max}		
Z_0 (m)	k	dvotirni	enotirni	Z_0 (m)	k	dvotirni	enotirni	Z_0 (m)	k	dvotirni	enotirni
16	0,35	1:260	1:698	16	0,35	1:130	1:349	16	0,35	1:87	1:233
16	0,42	1:374	1:978	16	0,42	1:187	1:488	16	0,42	1:125	1:326
16	0,5	1:529	1:1316	16	0,5	1:265	1:658	16	0,5	1:176	1:439
25	0,35	1:633	1:1505	25	0,35	1:316	1:753	25	0,35	1:211	1:502
25	0,42	1:911	1:1938	25	0,42	1:456	1:969	25	0,42	1:304	1:648
25	0,5	1:1291	1:2454	25	0,5	1:645	1:1227	25	0,5	1:430	1:818

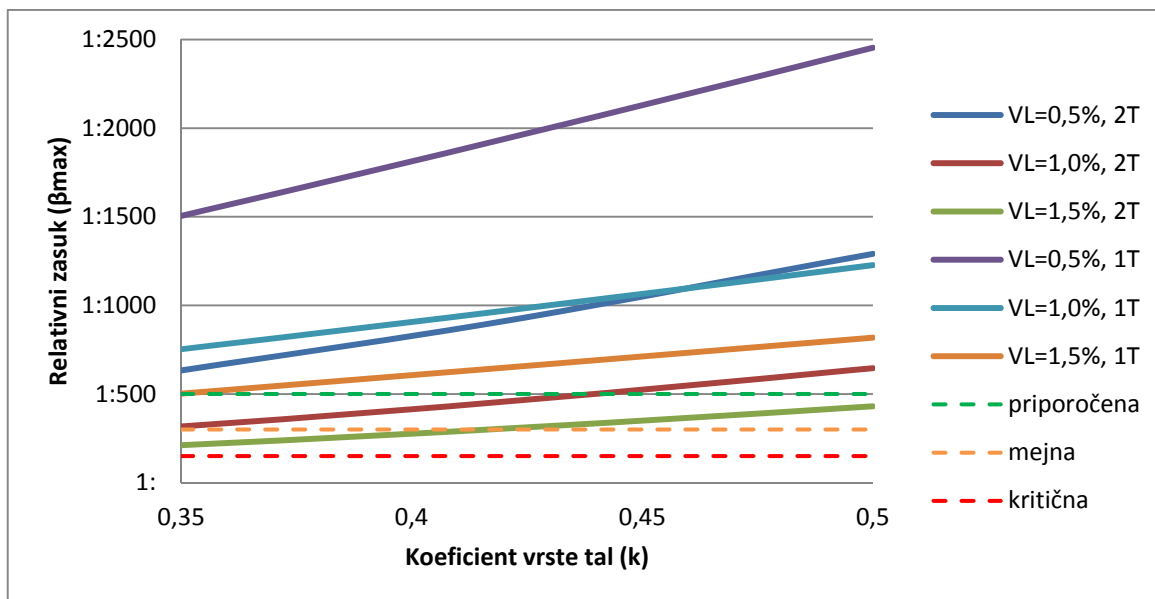
Za lažjo predstavo, smo izrisali tudi dva diagrama, kjer smo ločeno prikazali za vsako obravnavano globino nivelete ($Z_0=16$ m in $Z_0=25$ m), vrednosti največjih relativnih zasukov glede na količnik k , zasnovno predora (eno oz. dvotirno) in možno izgubo prostornine. V diagram smo vnesli tudi mejne vrednosti dovoljenih poškodb, kjer je 1:500 priporočena vrednost, 1:300 mejna vrednost in 1:150 kritična vrednost relativnega zasuka.



Slika 8-43: Relativni zasuka glede na količnik k pri niveletu $Z_0=16$ m.

Figure 8-43: Relative rotation according to coefficient k at $Z_0=16$ m.

Iz diagrama (Slika 8-43) je razvidno, da bi bila uporaba dvotirnega predora smiselna le v homogenih materialih, ki imajo kohezijo ter v primeru, da lahko med gradnjo zagotavljamo izgubo prostornine le do 0,5 %, kar je izredno zahteven pogoj. Pri globini nivelete $Z_0=16$ m, so rezultati bolj vzpodbudni za vzporedna enotirna predora, katere lahko načrtujemo v materialih tudi z nižjo kohezijo, ob gradnji pa zagotavljamo izgubo prostornine do 1,0 %.



Slika 8-44: Relativni zasuka glede na količnik k pri niveleti $Z_0=25$ m.

Figure 8-44: Relative rotation according to coefficient k at $Z_0=25$ m.

Bolj ugodne rezultate, za obe obravnavani zasnovi predorov, dobimo pri globlji niveleti (Slika 4-44), kjer je razvidno, da je gradnja dvotirnega predora pogojno ustrezna v homogenih materialih z nizko kohezijo, pri čemer moramo med gradnjo zagotavljati izgubo prostornine do 1,2 %. Za globljo niveleto so rezultati pričakovano boljši tudi pri enotirnem predoru, kjer imajo materiali lahko nizko kohezijo oz. so lahko celo brez kohezije, pri gradnji pa moramo zagotavljati izgubo prostornine zaradi izkopa predora 1,5 % oz. je ta lahko nekoliko večja. V splošnem je možno zaključiti, da je zasnova vzporednih enotirnih predorov z vidika vplivov na okolje, zaradi posedanja površine ustrežnejša.

Dobljeni rezultati največjega absolutnega posedka in relativnega zasuka, kažejo na nujno potrebno izdelavo natančnejših analiz, zaradi vplivov posedanja površine na objekte, saj so vrednosti tako posedkov, kot tudi relativnih zasukov, ob bolj neugodnih parametrih močno presežene. Opozoriti velja, da v izračunih nismo upoštevali dejanskih gabaritov objekta, njihovih togostnih parametrov in interakcije med objektom in tlemi. Za tovrstno analizo, bi potrebovali popis obstoječih objektov, ki se nahajajo nad potencialnimi trasami, kar pa presega obseg te naloge. V tej fazi obdelave lahko izpostavimo še, da trenutni rezultati izkazujejo potrebo po izvedbi preventivnih zaščitnih ukrepov.

V nadaljevanju smo izdelali še nekaj parametričnih analiz, s pomočjo katerih smo želeli preveriti soodvisnost parametrov. Kot prvo smo izdelali parametrično analizo, kjer smo za obe zasnovi predorov (**ena dvotirna cev in dve enotirni cevi**) spremljali maksimalni pomik glede na povečevanje globine. Izračun smo izdelali za globine Z_0 od 15 do 30 m pri čemer smo vrednosti maksimalnega pomika iskali pri vseh treh vrednostih k (0,35, 0,42 in 0,50) ter za vse tri vrednosti izgube prostornine V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%). Ugotovimo lahko, da vrednosti maksimalnega pomika pri dvotirnem predoru padajo z eksponentno funkcijo. To pa ne velja za vzporedna enotirna predora, kjer se maksimalna vrednost posedka ne spreminja enakomerno. Namreč vrednost se med globino 20 in 25 m spremeni le za okoli 2% pri $k=0,35$, pri višjih vrednostih k pa je razlika večja, trend bolj enakomeren in podoben

linearnemu. V preglednici 8-21 in preglednici 8-22 podajamo le delne rezultate izračunov pri treh izbranih globinah. Celotni rezultati so v grafični in tabelarični obliki prikazani v prilogi A.

Preglednica 8-22: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za dvotirni predor pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Table 8-22: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Z_0 (m)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
15	38,03	31,69	26,62	76,06	63,39	53,25	114,10	95,08	79,87
20	28,52	23,77	19,97	57,05	47,54	39,93	85,57	71,31	59,90
30	19,02	15,85	13,31	38,03	31,69	26,62	57,05	47,54	39,93

Preglednica 8-23: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Table 8-23: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for two single track tunnels at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Z_0 (m)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
15	14,33	12,59	11,97	28,67	25,19	23,94	43,00	37,78	35,91
20	12,08	11,82	11,17	24,15	23,65	22,33	36,23	35,47	33,50
30	10,92	9,83	8,70	21,83	19,67	17,41	32,75	29,50	26,11

Naredili smo tudi parametrično analizo in sicer kako na potek maksimalnega pomika vpliva spreminjanje koeficienta k in sicer za območje vrednosti med 0,3 in 0,5 za obe zasnovi predorov (**ena dvotirna cev in dve enotirni cevi**). Izračun smo naredili za tri globine nivelete predora in sicer 15, 20 in 25 m ter za vse tri vrednosti izgube prostornine V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%). Ugotovimo, da se vrednost maksimalnega posedka pri dvotirnem predoru ravno tako, kot v prejšnji primerjavi, spreminja z eksponentno funkcijo. Zopet pa beležimo večja odstopanja pri dveh enotirnih predorih. Spreminjanje vrednosti pomika s_{max} je podobno eksponentni funkciji le pri izračunu za globino 15 m, pri drugih dveh, pa je bolj enakomeren in podoben linearnemu trendu. V preglednici 8-23 in preglednici 8-24 podajamo le delne rezultate izračunov pri petih izbranih vrednostih k . Celotni rezultati so v grafični in tabelarični obliki prikazani v prilogi B.

Preglednica 8-24: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za dvotirni predor pri različnih vrednostih k .

Table 8-24: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at different values of k .

k (-)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	$Z_0=15m$	$Z_0=20m$	$Z_0=25m$	$Z_0=15m$	$Z_0=20m$	$Z_0=25m$	$Z_0=15m$	$Z_0=20m$	$Z_0=25m$
0,3	44,37	33,28	26,62	88,74	66,56	53,25	133,11	99,84	79,87
0,35	38,03	28,52	22,82	76,06	57,05	45,64	114,10	85,57	68,46
0,4	33,28	24,96	19,97	66,56	49,92	39,93	99,84	74,88	59,90
0,45	29,58	22,19	17,75	59,16	44,37	35,50	88,74	66,56	53,25
0,5	26,62	19,97	15,97	53,25	39,93	31,95	79,87	59,90	47,92

Preglednica 8-25: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri različnih vrednostih k .

Table 8-25: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for two single track tunnels at different values of k .

k (-)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	Zo=15m	Zo=20m	Zo=25m	Zo=15m	Zo=20m	Zo=25m	Zo=15m	Zo=20m	Zo=25m
0,3	16,51	12,59	12,01	33,02	25,19	24,02	49,53	37,78	36,02
0,35	14,33	11,98	11,82	28,67	23,96	23,65	43,00	35,94	35,47
0,4	12,97	11,82	11,36	25,95	23,65	22,71	38,92	35,47	34,07
0,45	12,21	11,42	10,76	24,42	22,85	21,52	36,63	34,27	32,29
0,5	11,97	10,92	10,14	23,94	21,83	20,28	35,91	32,75	30,42

Čeprav velikost prereza ni primarnega pomena za izbiro infrastrukture, saj le tega določimo na podlagi analize kakšno infrastrukturo potrebujemo, smo kljub temu naredili še izračun maksimalnih posedkov površine za **enocevni** predor, pri čemer smo spreminjali površino prereza predora A (od 35 do 115 m²). V parametrični analizi smo upoštevali tri vrednosti k (0,35, 0,42 in 0,50), tri vrednosti za izgubo prostornine V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%) in dve globini nivelete predora Z_0 , 16 in 25 m. Rezultati prikazujejo linearno odvisnost pomika in površine prereza.

Za globino nivelete 16 m pod površino lahko pričakujemo pomike od 12,5 mm do 26,2 mm pri prerezu A=35 m² in od 41 mm do 86 mm pri prerezu A=115 m². Kot je vidno iz predhodnih izračunov, lahko pričakujemo manjše posedke pri globlji niveleti. Pri globini 25 m znaša posedek od 8 do 16,8 mm za A=35 m² in od 26,2 mm do 55 mm za A=115 m². V preglednici 8-25 in 8-26 podajamo le delne rezultate izračunov pri petih izbranih prečnih prerezih predora. Celotni rezultati so v grafični in tabelarični obliki prikazani v prilogi C.

Preglednica 8-26: Rezultati vertikalnih posedkov s_{max} (mm) za enocevni predor pri različnih površinah prečnega prereza A in globini (Z_0) 16 m.

Table 8-26: Results for vertical settlement s_{max} (mm) for single double track tunnel at different cross sections and at depth (Z_0) 16 m.

A (m ²)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
35	12,47	10,39	8,73	24,93	20,78	17,45	31,17	31,17	26,18
55	19,59	16,33	13,71	39,18	32,65	27,43	48,98	48,98	41,14
75	26,71	22,26	18,70	53,43	44,52	37,40	66,79	66,79	56,10
95	33,84	28,20	23,69	67,68	56,40	47,37	84,60	84,60	71,06
115	40,96	34,14	28,67	81,93	68,27	57,35	102,41	102,41	86,02

Preglednica 8-27: Rezultati vertikalnih posedkov s_{\max} (mm) za enocevni predor pri različnih površinah prečnega prereza A in globini (Z_0) 25 m.

Table 8-27: Results for vertical settlement s_{\max} (mm) for single double track tunnel at different cross sections and at depth (Z_0) 25 m.

A (m ²)	V _L = 0,5%			V _L = 1,0%			V _L = 1,5%		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
35	7,98	6,65	5,59	15,96	13,30	11,17	19,95	19,95	16,76
55	12,54	10,45	8,78	25,08	20,90	17,55	31,35	31,35	26,33
75	17,10	14,25	11,97	34,20	28,50	23,94	42,74	42,74	35,90
95	21,66	18,05	15,16	43,31	36,09	30,32	54,14	54,14	45,48
115	26,22	21,85	18,35	52,43	43,69	36,70	65,54	65,54	55,05

Z vidika varnosti v predorih, bosta dva vzporedna enotirna predora verjetno zagotavljala večjo varnost, vendar bo imela taka zasnova večji vpliv in širše vplivno območje na površini. Glede na to, da so predvidene trase predorov večinoma v gosto poseljenem delu mesta, se širše vplivno območje lahko odraža pri znatnejšem vplivu na obstoječe zgradbe in morebitnem nastanku novih poškodb. Vplivno območje pri enem dvotirnem predoru je sicer ožje, vendar so vrednosti pomikov bistveno večje in bi v primeru take zasnove zahtevalo obsežnejšo uporabo predhodnih ukrepov (npr. kompenzacijsko injektiranje, ipd.).

8.6.2 Vpliv na podtalnico

Pri gradnji predorov v Ljubljani in okolici lahko pričakujemo vplive nad podtalnico, katere pa je potrebno omejevati skladno s pravilnikom o vodonosniku Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. Razen v delu osrednjega in južnega dela mesta bo vsakršen gradbeni poseg znotraj vodovarstvenega območja. Iz poglavja 8.4 je razvidno, da predvidene trase ne posegajo v najožje območje vodovarstvenih območjih, zato je gradnja predorov pogojno mogoča.

Analiza vpliva gradbenih materialov na podtalnico mora biti vključena v proces načrtovanja in imeti vpliv na izbiro primerne naprave. Materiali, kot so bentonit, dodatki za izboljševanje zemljine, injekcijska masa za zapolnjevanje odprtine med ščitom in hribino, masa za zapolnjevanje stikov med segmenti in mast za tesnjenje ščita se uporabljajo že vrsto let v predorogradnji, tako nad kot tudi pod nivojem podtalnice. Kljub temu je v fazi načrtovanja potrebno analizirati uporabo vseh gradbenih materialov in dokazati, da je njihov vpliv pri gradnji v dovoljenih mejah.

Dolžina potencialnih tras predorov, ki jih obravnavamo v tej nalogi je 62,49 km, od tega jih je 17,91 km v pretežno zaglinjenih ali glinastih materialih, 38,45 km v zameljenih peščenih in prodnatih tleh in 6,13 km v podlagi iz peščenjak, meljevca in glinastega skrilavca. Gladina podzemne vode na južnem robu mesta je okoli 3 do 4 m pod površjem in se znižuje proti severu, kjer je na globini 20 m in več. Ocenjena niveleta predora, ki je med 16 in 25 m pod površjem vsekakor sega pod nivo podtalnice, kar bo pri načrtovanju zahtevalo izdelavo hidrogeološkega modela in natančno vrednotenje.

Obravnavane trase predora in tehnologija gradnje, že zagotavljajo izpolnjevanje nekaterih pogojev, ki ščitijo vodonosnik Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja. Trase predorov, ki so znotraj vodovarstvenega območja, se nahajajo v obstoječih koridorjih, razen nekaterih

novih tras podzemne železnice. Le te bi bilo potrebno obravnavati v analizi tveganja in določiti njihove negativne vplive. Predori segajo tudi v območje nihanja gladine podzemne vode zaradi depresijskih lijakov črpališč in morajo zato biti grajeni vodotesno, kar TBM tehnologija v zemljinah omogoča.

8.6.3 Ravnanje z izkopanim materialom

Glavna surovina, ki jo »pridobivamo« pri gradnji predorov, je izkopani material. Ravnanje z izkopanim materialom pri TBM napravah obsega transport in obdelavo pred končno izrabo materiala. Transport se bo po iznosu iz izkopne komore, vršil po transportnih trakovih (EPB naprava) ali tlačnih vodih (naprava z izplako). Kombinacija obojega nastopa v primeru kombinirane TBM naprave, ki omogoča delovanje v obeh režimih. Material iz izkopa ponavadi zbiramo, razvrščamo in obdelujemo na območju logističnega centra. V tem poglavju bomo poskušali odpadke v največji meri identificirati, oceniti njihove deleže in jih razporediti na podlagi hierarhičnega pristopa R5 (prevention – reduction – reuse – recycle – disposal), kar pomeni (preprečevanje-minimiziranje-ponovna uporaba-reciklaža-odlaganje) gradbenih odpadkov.

V nalogi smo izračunali količino izkopane materiala, ki bi ga pridobili z izkopom predorov. Osredotočili smo se le material glavnih predorskih cevi. Na količino v veliki meri vpliva zasnova predora, ki je lahko v obliki dveh enotirnih predorov ($2 \times 37,1 \text{ m}^2$) oziroma enega dvotirnega predora ($100,1 \text{ m}^2$). Oceno količin materiala smo izračunali glede na posamezne proge podzemnih prometnic in jih razdelili na tri glavne vrste materialov (peščeno prodnati material, močno zaglinjen material in meljevec oz. glinasti skrilavec).

Preglednica 8-28: Količine izkopane materiala za enotirna predora in dvotirni predor po posameznih progah.

Table 8-28: Quantities of excavated material for two single track and one double track tunnel for each railway line.

Ime proge	Dolžina proge (m)	Peščeno prodnati material (m^3)		Močno zaglinjen material (m^3)		Meljevec oz. glinasti skrilavec (m^3)	
		Enotirni	Dvotirni	Enotirni	Dvotirni	Enotirni	Dvotirni
A	7365	546.483,0	737.236,5	0,0	0,0	0,0	0,0
B - sever	7622/11485	852.187,0	1.149.648,5	0,0	0,0	0,0	0,0
B - jug	3743	99.279,6	133.933,8	178.451,0	240.740,5	0,0	0,0
C	6143	455.810,6	614.914,3	0,0	0,0	0,0	0,0
D - vzhod	5684	421.752,8	568.968,4	0,0	0,0	0,0	0,0
D - zahod	4344/6915	79.394,0	107.107,0	433.699,0	585.084,5	0,0	0,0
E	6426	181.790,0	245.245,0	295.019,2	397.997,6	0,0	0,0
F	8281	176.225,0	237.737,5	310.972,2	419.519,1	127.253,0	171.671,5
F - krak 1	3046	0,0	0,0	61.215,0	82.582,5	164.724,0	222.222,0
F - krak 2	3403	40.068,0	54.054,0	49.417,2	66.666,6	163.017,4	219.919,7
Skupaj izkopani material (m^3)		2.852.990,0	3.848.845,0	1.328.773,6	1.792.590,8	454.994,4	613.813,2
Skupaj izkop enotirni (m^3)		4.636.758,0					
Skupaj izkop dvotirni (m^3)		6.255.249,0					

Iz preglednice lahko vidimo, da skupna količina izkopane materiala za dva enotirna predora znaša $4.636.758,0 \text{ m}^3$, za dvotirni predor pa $6.255.249,0 \text{ m}^3$. Razlika med obema zasnovama predorov torej znaša kar $1.618.491,0 \text{ m}^3$. Za izvedbo predorov v peščeno prodnati materialih, bo predvidoma uporabljena naprava z izplako (oranžno), v močno

zaglinjenih materialih pa EPB naprava (modro). V podlagi, torej meljevcih oz. glinastih skrilavcih, se sicer lahko uporabljata oba tipa naprave, vendar je EPB primernejša zaradi izkopnih orodij. Iz preglednice 8-21 je razvidno, da bo večji del izkopenega materiala, pridobljen z napravo z izplako, kar zmanjšuje možnosti ponovne uporabe. Močno zaglinjen material bo sicer izkopen z EPB napravo in ne bo vseboval veliko dodatkov, vendar njegove geomehanske karakteristike omejujejo izrabo. Širše možnosti ponovne uporabe ima izkopni material pridobljen v meljevcu oz. skrilavcu, ki bo v čistejši obliki.

Uporaba naprave z izplako potrebuje sistem za obdelavo mešanice izplake in izkopenega materiala. Kot smo omenili, je stopnja obdelave odvisna od zastopanosti finih delcev. Postrojenje je potrebno dimenzionirati konzervativno, saj obstaja možnost izdatnega deleža drobnozrnatih frakcij v posameznih delih Ljubljane. Konfiguriranje in dimenzioniranje separacije je odvisno od predvidene zrnastostne sestave in količine mešanice izplake ter izkopenega materiala. Upoštevati je potrebno tudi preoblikovanje izkopenega materiala v fazi samega izkopa (drobljenje in mletje v izkopni komori), saj le to vpliva na povečevanje deleža finih zrn. Ravno tako, večja gostota suspenzije in večji delež abrazivnih mineralov povečuje obrabo izkopnih orodij in tlačnih vodov.

Predvidoma bo naprava za mehansko ločevanje (separiranje) vsebovala tri stopnje in sicer:

- v prvi stopnji se ločijo peski in prodi. Tu se uporabljajo sita, cikloni, vibracijska vodna sita.
- v drugi fazi se ločujejo delci manjši od 0,063 mm s pomočjo filtrnih preš, centrifug in visokih ciklonov. Pri centrifugiranju običajno dodajamo flokulante za bolj učinkovito izločanje trdnih delcev in
- v tretji stopnji bazene za odpadno suspenzijo in zadrževanje reciklirane suspenzije.

Ponovno uporabo izplake preverimo s pomočjo testa njenih glavnih lastnosti, ki se ga izvede lahko na mestu odvzema vzorca oz. v laboratoriju. Test obsega: kontrolo gostote, vsebnost trdnih delcev, pH vrednost, plastična viskoznost, pretočnost po Marshu in druge reološke lastnosti. V primeru, da izplaka ne ustreza projektiranim lastnostim, jo izboljšamo z dodajanjem bentonita, polimernih dodatkov, disperzijskih sredstev oz. pH stabilizatorjev.

Kljub napredni obdelavi izkopenega materiala, bentonit ostaja prisoten v grobi frakciji v deležu do 5%. To vrednost lahko s pranjem zmanjšamo, vendar je še vedno mogoče zaslediti koncentracijo ostanka uporabljenih dodatkov. Glede na veliko ponudbo dodatkov na trgu je potrebno pred uporabo preveriti tehnični in varnostni list posameznega proizvoda. Ponovna uporaba zaradi tega ni omejena, je pa odvisna od stopnje obdelave. Nekoliko drugače je pri fini frakciji, saj je njen delež zelo velik, konsistenca pa zaradi velike količine vode židka. Ta material ni primeren za ponovno uporabo in ga je potrebno odložiti na trajnih odlagališčih viškov materiala. Naknadna obdelava in odlaganje je potrebna tudi za izrabljeno bentonitno suspenzijo.

Uporaba EPB naprave za obravnavano področje ne zagotavlja boljšega izkoristka pri ponovni uporabi izkopenega materiala, saj so glineni materiali srednje do težkognetni oz. glinasti skrilavci. Slednji bi ob določeni stopnji obdelave ustrezali za vgradnjo v nasipe cest, vendar nad nivojem podtalne vode.

Glede na geološko sestavo obravnavanega območja je potencialna uporaba materialov iz izkopa predora lahko naslednja (Žigman, 2000):

- permokarbonske sedimentne kamnine (C,P) – Permokarbonske kamnine so uporabne za vgradnjo v nasipe cest, od tega se skrilavce vgrajuje izven območja podzemne vode oz. je potrebno material vgrajevati v trajne lokacije viškov materiala.
- savski konglomeratni zasip (Q_1) – Apneni konglomerat s primerno zrnastostjo je primeren za vgradnjo v cestne nasipe v območju z ali brez podzemne vode.
- starejši savski prodni nanos (Q_1) – Karbonaten prod predstavlja prvovrsten material za vgradnjo v cestni nasip v vseh pogojih, če ga separiramo, pa ga lahko uporabljamo za izdelavo betonov.
- mlajši savski prodni nanos (Q_1) – Enako kot starejši savski prod ga lahko uporabljamo v cestnih nasipih v vseh pogojih. Separiranega lahko uporabljamo za izdelavo betonov.
- poplavno – zaježitveni in hudourniški nanosi ($Q_{1,2}$) – Nanosi imajo previsoko vlago in organske primesi, zato material ni primeren za vgradnjo v cestne nasipe in ga je možno odložiti na odlagališčih trajnih viškov oz. ga uporabiti za zapolnjevanje depresij.
Gradaški prod lahko opredelimo kot ustrezen material za vgradnjo v cestne nasipe v vseh pogojih.
- spraline s pobočij (Q_2) – Imajo previsoko vlago in organske primesi, zato material ni primeren za uporabo v cestnih nasipih in ga je potrebno odložiti na lokacijah trajnih viškov oz. ga uporabiti za zapolnjevanje depresij.

Sestavo obdelanega izkopanega materiala lahko v primeru uporabe naprave z izplako opredelimo z naslednjimi opisi. Uporaba grobe in srednje zrnate frakcije z deležem do 5% bentonita je možna za nasipe, ki so nad gladino podzemne vode oz. so ti nasipi zaščiteni pred vdorom vode. Prodnati material lahko v sklopu separacijskega obrata tudi operemo in je to ekonomsko upravičeno, ga tako uporabljamo za gradnjo cestnih nasipov oz. ob primerni zrnastosti tudi kot agregat za betone.

Fini frakciji z druge faze obdelave moramo izboljšati fizikalne lastnosti, s katerimi so ustrezne za odlaganje. To lahko naredimo z mešanjem apna oz. jo odložimo v zadrževalne bazene oz. usedalnike, kjer se material naravno posuši in ga nato odložimo. V tem primeru potrebujemo velike površine, ki se nahajajo v bližini separacije, kar bi v Ljubljani težko našli. Če pa so bili uporabljeni tudi dodatki, je poleg sušenja potrebno določiti tudi natančno kemijsko sestavo preostanka materiala, saj je od tega odvisna vrsta odlagališča. Smiselno je, da se vrsta in količina dodatkov izbere in uporablja v taki meri, da lahko izpolnimo pogoje za odlaganje viškov materiala na odlagališčih za inertne odpadke.

V spodnji preglednici prikazujemo še posamezne kategorije odpadkov po deležih z možnostmi predelave in odstranjevanja (Rengshausen, 2014). Pri izvedbi predora res da največje količine materiala pridobimo z izkopom, vendar približno 25% vseh odpadkov izvira iz ostalih del pri gradnji. Gradbene odpadke v glavnini klasificiramo s številko 17 05 04, manjši del pa uvrščamo v druge kategorije gradbenih odpadkov.

Preglednica 8-29: Deleži gradbenih odpadkov pri gradnji predora z možnostmi predelave in odstranjevanja (prirejeno po Renghausen, 2014).

Table 8-29: Quantity of construction waste at tunnel construction with possibilities of recycling or disposal (adapted from Renghausen, 2014).

Opis materiala	Ocenjena količina	Možen postopek predelave	Možen postopek odstranjevanja	Opis možne predelave in odstranjevanja
Odpadni material (rušitev objektov na območju trase, odpadni beton, keramika, železo, les, ...)	3,50%	R5	D1	Material je možno reciklirati in ga uporabiti kot anorgansko surovino, če to ni možno ga moramo trajno odložiti na odlagališčih
Material iz izkopa (predor, jaški, portal)	74,50%	R5, R10	D1, D2,	Material je možno delno reciklirati in ga uporabiti kot anorgansko surovino, del pa je potrebno odložiti na odlagališčih
Onesnažen izkopani material (odpadni material, ki nastane pri gradnji predora, odpadni beton, železo, prekomerno uporabljeni dodatki, ...)	6,00%	predelava ni možna	D1	Predelava onesnaženega materiala ni možna, zato ga je potrebno v celoti odložiti na odlagališču
Gradbeni material pri klasični gradnji (izkopani material, ki nastane pri gradnji jaškov, portalov in je pomešan z betonom in drugimi snovmi iz izkopa)	15,00%	R5	D1	Material je možno reciklirati in ga uporabiti kot anorgansko surovino, če to ni možno ga moramo trajno odložiti na odlagališčih
Delež odpadka, ki odpade na embalažo, prevelike količine gradbenega materiala, nevarni odpadki, poškodovani material	1,00%	R5 in pogojna uporaba	D1	V to kategorijo spada zelo heterogen material, katerega je potrebno v prvi vrsti sortirati, kar je tudi delno recikliranje ter nato preveriti ali se višek materiala oz. poškodovani material lahko uporabi. Preostanek trajno odložimo na odlagališčih

V Sloveniji trenutna praksa ponovne uporabe gradbenega materiala ni dobra. Še največ primerov lahko zabeležimo v cestogradnji, kjer so reciklirane surovine že v osnovi dokaj čiste in se lahko ponovno uporabijo brez zahtevne obdelave. Reciklaža gradbenega materiala pridobljenega pri predorogradnji ni prav razširjena, saj se material običajno odloži na odlagališča trajnih viškov ali pa se uporabi na degradiranih območjih z namenom oživljanja krajine. Material iz izkopa predorov v Ljubljani, bo v osnovi dokaj nečist in bo za ponovno uporabo potrebna obsežna obdelava, katere smotrnost pa je potrebno dokazati s študijo upravičenosti (ekonomski in tehnični vidik).

8.6.4 Hrup in prah

Povzročanje emisij hrupa in prahu je normalno pri vsaki gradbeni aktivnosti in enako velja za gradnjo predorov. Območja koncentracije lahko razdelimo na območje dela in zagotavljanje varnosti pri delu in območje, ki pade v vplivno območje zaradi izvajanje del. Regulacija prahu in plinov v območju dela je regulirana z ventilacijskim sistemom, ki je obvezen element pri vsakršni vrsti predorogradnje. Z njim dovajamo svež zrak, s katerim zagotavljamo minimalni 19% delež kisika, preprečujemo prekoračenje nevarnih koncentracij strupenih plinov in preprečujemo nastajanje eksplozivnih mešaníc plina. Gradnja predorov s TBM tehnologijo je

v primerjavi s klasično sekvenčno metodo bolj enakomerna, saj je faza izkopa kontinuirana in nima nihanja koncentracij, kot nastanejo pri miniranju in manipulaciji z izkopanim materialom. Vseeno pa lahko pri uporabi EPB tehnologije, pričakujemo nekoliko večje emisije prahu na mestu, kjer se material nalaga iz vijaka na transportni trak.

Vplivno območje zaradi izvajanja del pa je veliko večje, saj nastane okoli vsakega mesta, kjer se izvajajo posamezne aktivnosti gradnje (pri TBM gradnji predvsem območje jaškov in podpornih centrov). Za obvladovanje koncentracij znotraj dovoljenih mejnih vrednosti se vzpostavi sistem monitoringa s katerim merimo vrednosti na najbolj izpostavljenih lokacijah. Obseg monitoringa je sestavljen iz ničelne meritve na referenčnih mestih, ki se izvede pred pričetkom del in rednih kontrolnih meritev na referenčnih mestih, s katerimi se spremlja koncentracije prahu in vrednosti hrupa.

V primeru uporabe TBM metode v Ljubljani, bi bila določitev merskih mest odvisna od postavitve logističnih ali podpornih centrov za TBM napravo. Na teh mestih poleg skladiščenja in transporta segmentov obdelujemo tudi izkopani material. Pri EPB napravi so lahko pričakovane vrednosti prahu in hrupa sorazmerno nizke, saj obdelava odpadkov ni tako obsežna kot pri napravi z izplako. Pri tej napravi je v sklopu logističnega centra običajno postavljena še separacijska naprava za obdelavo odpadkov, kjer lahko pričakujemo večje emisije hrupa in prahu.

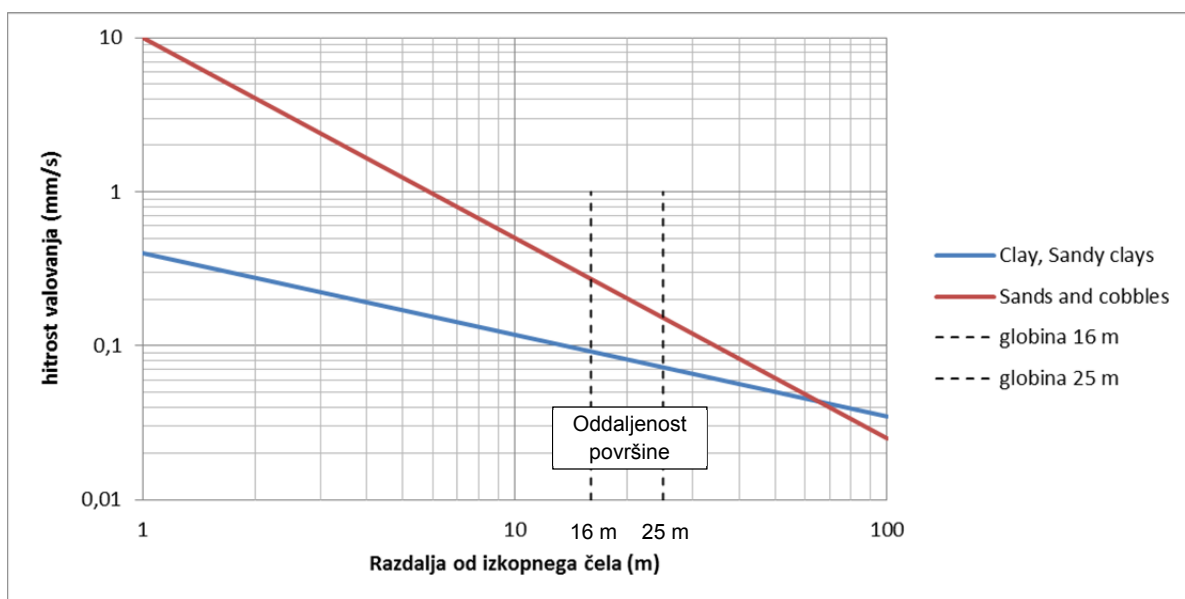
Kot vzorčne vrednosti meritev hrupa in prahu, ki nastanejo pri gradnji izkopa predora s TBM napravo, lahko navedemo vrednosti, ki so bile zabeležene pri gradnji tlačnih rofov Doblar II in Plave II (Sintezno letno poročilo ..., 2000). V tem primeru so uporabljali TBM za kamnino, ki povzroča večje emisije prahu in hrupa pri svojem delovanju. Glede na merilno mesto so bile zabeležene dnevne vrednosti hrupa od 50 do 74 dBA in nočne vrednosti hrupa od 33 do 67 dBA. Vrednosti so bile lokalno presežene za krajše časovno obdobje in bile ublažene s postavitvijo protihrupnih ograj, optimalno razporeditvijo del in drugih ukrepov. Povprečna vrednost meritve prahu so bile za PM_{10} $99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in za $PM_{2,5}$ $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vrednosti emisij pri gradnji predorov v Ljubljani sicer ne moremo natančno predvideti, vendar so odvisne od omenjenih parametrov, lahko pa zaključimo, da bodo zagotovo morale biti znotraj mejnih dovoljenih koncentracij.

8.6.5 Vibracije

Vpliv na okolje, ki nastane pri gradnji predorov so tudi vibracije. Vibracije so valovanje, ki ga sproži trenje izkopnih orodij in hribine v fazi izkopa oz. trenje med ščitom in hribino. Ločimo dva tipa valov in sicer v smeri povzročene motnje in pravokotno na njo. Hitrost vibracij z oddaljenostjo od predora pada.

Potencialne trase, ki so obravnavane v tej nalogi, se nahajajo v materialih, kjer zelo visokega prenosa valovanja ne moremo pričakovati. Poleg tega je TBM tehnologija bistveno manj problematična od klasične predorogradnje. Čeprav povzroča kontinuirane vibracije, so povzročene maksimalne hitrosti nihanja tal bistveno nižje. Tudi tu lahko kot vzorčni primer TBM tehnologije uporabljene v Sloveniji, navedemo meritve pri gradnji tlačnih rofov Doblar II in Plave II. Meritve so za najbližje mersko mesto pokazale vrednosti od 2 do 3 mm/s, kar je bistveno manj od dovoljenih hitrosti, ki znašajo 20 do 26 mm/s po standardu ÖNORM S 9020:1986 in od 5 do 20 mm/s po nemškem standardu DIN 4150:2001.

Največje hitrosti lahko pričakujemo pri frekvenci okoli 20 Hz, ki naj bi za prode in peske predvidoma znašale od 1 do 3 mm/s. Zmanjševanje hitrosti v odvisnosti od oddaljenosti od predora lahko opišemo z eksponentno funkcijo, kar pomeni, da lahko pri oddaljenosti 20 m od predora hitrosti upadejo že za ca 80% (Speakman, 2009). Informativne vrednosti hitrosti valovanja v peskih in prodih pri oddaljenosti 10 m od predora znašajo okoli 0,4 mm/s, v glinah pa so vrednosti nižje in znašajo okoli 0,1 mm/s pri razdalji 10 m od predora (Hiller, 2011). Na spodnji sliki prikazujemo vrednosti hitrosti valovanja, ki jih povzroči EPB naprava v peščeno prodnatih materialih in glinenih materialih (Hiller, 2011).



Slika 8-45: Hitrosti širjenja valov EPB naprave glede na vrsto zemljine (prirejeno po Hiller, 2011).

Figure 8-45: Vibration velocity of EPB machine according to soil (adapted from Hiller, 2011).

Vpliv vibracij na okolje, ki ga bo predvidoma povzročila uporaba TBM tehnologije, bo v primerjavi s klasično sekvenčno metodo predorogradnje bistveno nižji in s tega stališča za urbane površine bolj ugoden. Največje hitrosti nihanja tal na površini lahko pričakujemo pri globini 16 m v velikostnem redu od 0,1 do 0,3 mm/s pri globini 25 m pa v velikostnem redu od 0,07 mm/s do 0,2 mm/s.

8.6.6 Ravnanje z gradbenimi odpadki in vplivi na okolje pri gradnji predorov v Ljubljani

Ravnanje z gradbenimi odpadki, ki nastanejo pri gradnji predorov s TBM tehnologijo, težko enačimo s tistimi pri klasični metodi. V prvi vrsti gre za slabšo vrsto hribine, ki že sama po sebi ne zagotavlja visokih uporabnih vrednosti, poleg tega na kakovost materiala vpliva tudi tehnologija gradnje, ki med procesom spreminja osnovne lastnosti hribine.

Za obravnavano območje lahko ugotovimo, da je klasična izkopna metoda neprimerna za gradnjo in je zato primerjava nemogoča. Možna je uporaba metode s pokritim vkopom, kjer sicer lahko pričakujemo izkop čistejšega materiala, vendar zahteva obsežna pripravljalna dela in znatno vpliva na okolje, še posebej podtalnico.

V poglavju 8.6.4 in 8.6.5 smo opisali kakšni bi bili pričakovani vplivi hrupa, prahu in vibracij na okolje pri gradnji predorov s TBM tehnologijo. Natančna ocena dejanskih vplivov in emisij v okolje v tej fazi ni možna, saj obravnavamo le hipotetične trase predorov in ne razpolagamo z zadostno količino podatkov. Tako lahko oceno vplivov podamo le na podlagi vzorčnih primerov oziroma strokovnih prispevkov.

Emisije prahu in hrupa v okolje bi bile pri uporabi TBM tehnologije v Ljubljani in okolici manjše, kot bi nastale pri uporabi sekvenčne gradnje predorov oziroma z metodo pokritega vkopa. Kljub temu, pa se lahko pojavijo konice, kjer bi bile vrednosti prekoračene za krajše časovno obdobje. Večjo razliko lahko opazimo pri primerjavi vplivov vibracij, saj so vrednosti pri TBM tehnologiji lahko tudi 10 krat manjše od klasične metode. Velikostni red hitrosti vibracij, ki ga predlaga Hiller (2011) za prode, peske in gline, podajajo zelo nizke hitrosti valovanja tal na površini in so daleč pod zakonskimi omejitvami.

Še ena izmed delovnih hipotez, ki smo si jih zadali preveriti s to nalogo je ali so vplivi na okolje pri gradnji predorov s TBM tehnologijo manjši ali kvečjemu enaki kot pri gradnji predorov s klasično metodo. Ugotovimo lahko, da tako na področju ravnanja z odpadki, kot tudi pri vplivih hrupa, prahu in vibracij na okolje lahko pričakujemo enake oz. celo manjše vplive pri uporabi TBM tehnologije gradnje predorov. Zavedati pa se je potrebno pomanjkljivosti vhodnih podatkov oziroma dejstva, da je objektivna ocena vplivov možna šele ob dejanskem načrtovanju predorov.

9 ZAKLJUČEK

Sestavni del razvoja mest je izgradnja infrastrukture. Infrastrukturo gradimo z namenom izboljšanja prometnih povezav s pomočjo katerih ima mesto možnost razvijanja. Glavne infrastrukturne »žile« v Ljubljani so prometne in železniške povezave, katere lahko gradimo na površini oz. pod površino. V nalogi smo se osredotočili na gradnjo infrastrukturnih povezav pod površino, pri čemer smo preverjali možnost uporabe TBM tehnologije.

Zgodovina gradnje predorov sega daleč nazaj, saj so se predori začeli pogosteje graditi v 17. stoletju. Metoda klasične gradnje oz. v Sloveniji bolj poznana kot nova avstrijska metoda, se je tekom let razvijala in dosegla stopnjo in pristope, ki se uporabljajo še danes. Dobrih 160 let nazaj so gradnjo predorov poskušali tudi v celoti mehanizirati. Tu je začetni razvoj trajal kar 100 let, vendar danes poznamo popolnoma mehanizirane naprave za gradnjo predorov v celotnem profilu ali naprave TBM. Prvotna uporaba naprav je bila primerna pretežno za homogene materiale, nepredvidene okoliščine pa so ogrožale izvedbo projekta. Danes so TBM naprave visokotehnološki proizvod, ki omogoča učinkovito izvedbo in varnost pri uporabi. Omogoča tudi napovedovanje geoloških danosti pred čelom, med gradnjo in izvedbo dodatnih podpornih ukrepov iz same naprave. Kljub učinkoviti in varni izvedbi ene in druge metode, še vedno obstaja zadržek pri vključevanju predorov v načrtovanje novih infrastrukturnih mrež. Glavni razlog za to, so zelo variabilni stroški izvedbe, ki nastanejo zaradi nepopolnih geološko geomehanskih podatkov.

Glede na to, da je TBM tehnologija za gradnjo predorov v urbanem okolju v tujini zelo razvita, smo si želeli to hipotezo preveriti tudi za predore v Ljubljani in okolici. O tem so predhodno že bile izdelane analize in podane razne pobude, vendar se vrednotenja v tehnološkem smislu ter ocene vplivov na okolje še niso izvedle. Strokovne podlage izdelane z namenom posodobitve potniškega prometa v Ljubljani obravnavajo možnost izgradnje podzemne železnice, študije variant modernizacije ljubljanskega železniškega vozlišča pa predlagajo ureditev glavnih železniških povezav pod površino v samem mestnem jedru.

Namen magistrskega dela je bil poglobljen pregled znanj na področju TBM tehnologije in možnost njihove uporabe v Ljubljani in okolici. Hipoteze, ki smo jih v sklopu naloge preverili, so bile naslednje:

- Ali je gradnja predorov s TBM tehnologijo izvedljiva na ljubljanskem območju?
- Ali je možno je izbrati enovito tehnologijo TBM naprave za izgradnjo predora?
- Ali so vplivi na okolje pri gradnji predorov s TBM tehnologijo manjši ali kvečjemu enaki kot pri gradnji predorov s klasično sekvenčno metodo?

V ta namen smo v prvem sklopu naloge naredili temeljit pregled literature, ki obravnava razne tipe TBM tehnologij za zemljine, preverili izkušnje, pridobljene pri že izvedenih projektih, povzeli glavne pristope za načrtovanje predorov in izvedbo računskih kontrol, preverili obveznosti ravnanja z odpadki in oceno vplivov na okolje ter pregledali razpoložljive podatke o geoloških, hidrogeoloških in geomehanskih podatkih za obravnavano območje.

Usmeritve in priporočila iz prvega sklopa smo nato poskušali prenesti na primer načrtovanja predorov na območju Ljubljane in okolice. V tem drugem sklopu smo predstavili boljšo sliko geološko geomehanskih pogojev gradnje na mestu potencialnih tras predorov in na podlagi

priporočil različnih smernic ter novejših strokovnih izsledkov izdelali kriterijsko analizo za izbor najprimernejše TBM tehnologije.

Trase potencialnih predorov za Ljubljano smo povzeli po vsebini omenjenih strokovnih podlag in študije. V nalogi smo privzeli, da se vse potencialne trase prometnic (železniškega vozlišča in mestnega potniškega prometa) izvedejo kot predori. Skupna obravnavana dolžina predorov v nalogi znaša 62,49 km. Trase se nahajajo v dokaj raznoliki geološki zgradbi tal, saj so starosti prodnih nanosov različne, poleg tega je usedanje materiala skozi ljubljanska vrata zaradi večjih hitrosti oblikovalo bolj nehomogene in tanjše plasti. Manjši del potencialnih tras je lociranih v kompaktni hribini, ki jih tvorijo glineni skrilavci permokarbonske starosti.

Pri pregledu razpoložljivih podatkov o sestavi tal smo ugotovili, da lahko pri gradnji predorov naletimo na materiale od lahkogetne mestoma tudi židke glinje do čistih prodov z vložki konglomerata. Dokaj enakomerna je višina podzemne vode, saj pada od juga proti severu, vendar se pojavljajo različni horizonti, ki so odvisni od tanjših neprepustnih plasti.

Kriterijsko analizo pri izbiri najprimernejše TBM naprave smo opravili po več smernicah, ki se uporabljajo v sosednjih državah oz. so podane s strani mednarodnega združenja za predorogradnjo. Ugotovili smo, da nekatere dokaj dobro podajajo korake in vrednotenje kriterijev, spet druge so ohlapne in ne omogočajo natančne izbire. Pregled novejših izsledkov o TBM napravah kažejo, da se področje uporabe predvsem EPB tipa naprave širi, predvsem v območju grobozrnatih materialov.

Na podlagi poglobljenega pregleda literature in analize z dejanskimi podatki smo ugotovili, da je gradnja predorov na območju Ljubljane in okolice s TBM tehnologijo možna. Predvsem izstopa tehnološka prednost metode in povzročanje manjših vplivov na okolje pri sami gradnji. Zaradi hitro razvijajoče tehnologije, ocenjujemo, da bo področje uporabe posameznih tipov TBM naprav še bolj razširjeno, naprave pa bodo še bolj prilagodljive in sposobne soočanja z nepredvidenimi okoliščinami.

Bistvena hipoteza, ki smo jo želeli preveriti v nalogi, je možnost uporabe enovite TBM tehnologije pri gradnji predorov na obravnavanem območju. Rezultati kriterijske analize na podlagi smernic in priporočil, ki so bila podana v strokovnih prispevkih, nakazujejo, da sicer zelo široko področje delovanja EPB naprave, še ne omogoča uporabe samo enega tipa naprave, temveč bi ob današnjem stanju tehnike potrebovali oz. priporočali tako napravo z izplako, kot EPB napravo. EPB naprava bi bila najprimernejša v fino zrnatih in peščenih plasteh, kjer je prepustnost sorazmerno majhna in bi zadoščala zmerna uporaba dodatkov. Naprava z izplako pa bi bila bolj primerna v grobozrnatih materialih kot so peski in prodi, kjer je tudi prepustnost večja. Tveganje, ki ga je potrebno izpostaviti, je zahtevno podpiranje čela in s tem zagotavljanje stabilnosti izkopa in površine nad predorom, zaradi visokega nivoja podtalne vode in velike prepustnosti vodonosnika. Vrednosti, dobljene v nalogi so ravno na meji sprejemljivega, kar zahteva poseben poudarek pri načrtovanju.

Proizvajalci TBM naprav svoj razvoj usmerjajo v izvedbo naprav, ki lahko spreminja režim obratovanja med samo gradnjo. Spremembe sicer niso možne na sami rezalni glavi, vendar v načinu podpiranja izkopnega čela in iznosu izkopnega materiala. Glede na to, da se

poskuša TBM tehnologijo uporabljati v zelo heterogenih hribinah, lahko pričakujemo največji razvoj v tej smeri, kar bo še povečalo uporabnost in cenovno upravičenost metode.

Opravljen izbor TBM tehnologije je nadalje služila za izdelavo oceno vplivov na okolje. V tem poglavju smo za obe tehnologiji poskušali objektivno oceniti vplive, kot je bilo to glede na razpoložljive podatke in predpostavke možno. Vplivi na podtalnico so v prvi vrsti odvisni od izbirne naprave in uporabe dodatkov. Ti vplivi morajo biti znotraj dovoljenih omejitev, ki jih podajata uredbi o vodonosniku Ljubljanskega polja in Ljubljanskega barja in skupaj sestavljata vodonosnik državnega pomena. Omejitve v tej fazi, mestoma celo izključujejo možnost gradnje predorov, vendar je izvedljivost odvisna od dejanske izbire trase in rezultatov hidrogeološkega modeliranja vpliva na podtalnico.

Gradnja predorov vedno vpliva na okolje, ne glede na uporabljeno tehnologijo. Osnovni mehanski vpliv je posedanje površine, ki nastane zaradi prerazporeditve napetosti v hribini pri izkopu predora. Za oceno velikostnega reda pomikov, smo obdelali dva primera in sicer enocevni dvotirni predor in dva vzporedna enotirna predora. Slednja je najbolj običajna zasnova sodobnih predorov. Izračun smo izvedli z empiričnim izračunom po Pecku (1969), kjer smo variirali več predpostavk. V izračunu smo predpostavili tri vrednosti izgube prostornine V_L ter vrednost koeficienta k med 0,3 in 0,5, pri različnih globina nivelete predora Z_0 . Velikostni red izgube prostornine je namreč odvisen tudi od izbrane tehnologije TBM naprave. Iz preglednice rezultatov je razvidno, da so posedki vzporednih enotirnih predorov vselej znotraj dovoljene meje, kar pa ne velja za dvotirni predor. V tem primeru ima predor s plitvo niveleto v materialih brez kohezije in ob izgubi prostornine več kot 1,0 %, prekomerne vplive na posedanje površine. Eurocode 7 namreč predpisuje največji absolutni posedek 50 mm, ki je sicer lahko večji v primeru, da niso presežene mejne vrednosti relativnih zasukov objekta. V splošnem, so pričakovani posedki površine v primeru dveh enotirnih predorov manjši kot pri dvotirni zasnovi, vendar pa je širše vplivno območje posedanja.

Poleg absolutnih posedkov imajo velik vpliv na poškodbe objektov tudi relativni zasuki, ki nastanejo pri posedanju površine pod temelji. Posedki so prečno glede na os predora, različno veliki, kar lepo opišemo z relativnim zasukom na vsaki točki oddaljenosti od predora. Eurocode 7 za običajne objekte priporoča vrednost zasuka 1:500, pogojno ali mejno vrednost 1:300 in kritično vrednost 1:150. Pri slednji so zasuki že tako veliki, da je verjetno pričakovati mejno stanje uporabnosti in ogrožanje stabilnosti konstrukcije. Rezultati izračunov kažejo, da pri plitvi niveleti predora ($Z_0=16$ m), največji relativni zasuki za dvotirno zasnovo predora, močno presegajo priporočene vrednosti oz. so lokalno celo nad kritično mejo. Znotraj mejnih vrednosti so le v primeru nivelete 25 m in izgube prostornine manj kot 0,5 %. V primeru enotirnih predorov, so vplivi bistveno manjši, rezultati pa kažejo, da do preseženih priporočenih vrednosti (1:500) pride v materialih z nizko kohezijo, pri plitvi niveleti in izgubi prostornine nad 1 %. Mejna vrednost 1:300 je presežena samo v primeru, ko imamo material brez kohezije, niveleto 16 m in izgubo prostornine nad 1,5 %.

K prvotnim izračunom smo izdelali še nekaj parametričnih analiz, kjer smo pokazali kako na velikost posedkov vpliva sprememba površine prereza predora, čeprav je prerez predora definiran glede na potrebno infrastrukturo in se k temu dejstvu išče ustrezna tehnologija. Spremljali smo tudi kako na velikost maksimalnega pomika vpliva globina nivelete predora, kjer ugotovimo, da vrednosti posedkov pri dvotirnem predoru padajo z eksponentno funkcijo, pri vzporednih enotirnih predorih, pa je sprememba bolj linearna. Podobne rezultate smo

dobili, če smo za posamezne nivelete predora, spreminjali koeficient k , ki opisuje lastnosti tal.

Pri gradnji predorov nastanejo tudi drugi vplivi. Nekateri izmed teh so emisije hrupa, prahu in vibracij, ki jih moramo ohranjati v dopustnih mejah. V nalogi smo prikazali primerjalne vrednosti že izvedenega projekta, ki izkazuje, da je uporaba TBM tehnologije ugodnejša z vidika vibracij, težje pa primerjamo emisije hrupa in prahu, saj te emisije v največji meri nastajajo na območju logističnega centra, kjer napravo oskrbujemo z gradbenimi surovinami in manipuliramo z izkopanim materialom. Faza ravnanja z izkopom oz. gradbenimi odpadki, je pri TBM tehnologiji nekoliko bolj zapletena, saj je tudi v primerjavi s klasično metodo izkopa, kakovost materiala nižja. Namen naloge je bil podati oceno ali je reciklaža možna in v kakšni meri, ter kako lahko material ponovno uporabimo. Ugotovili smo, da praksa čim večje izrabe sekundarnih surovin v Sloveniji na področju predorov ni prav dobro razvita. Izkaže se tudi, da je obdelava izkopanih materialov z namenom pridobivanja dobre sekundarne surovine zelo zapletena in jo je potrebno za vsak projekt ustrezno analizirati (tehnološki in finančni vidik).

Zadnja izmed hipotez, ki smo si jih zadali preveriti je, ali so vplivi na okolje pri gradnji predorov s TBM tehnologijo manjši ali kvečjemu enaki kot pri gradnji predorov s klasično metodo. Ugotovimo lahko, da tako na področju ravnanja z odpadki, kot tudi pri vplivih hrupa, prahu in vibracij na okolje lahko pričakujemo enake oz. celo manjše vplive pri uporabi TBM tehnologije gradnje predorov. Podobno lahko trdimo tudi za vplive na okolje zaradi posedanja površine. Za izvedbo plitvih predorov pod urbanimi površinami je bolj primerna uporaba TBM naprav, saj lahko pričakujemo manjšo izgubo prostornine, podpiranje čela izkopa pa zagotavljamo hkrati z izkopavanjem hribine. Vendar pa se je potrebno zavedati, da je ocena odvisna od razpoložljivih vhodnih podatkov oziroma dejstva, da je objektivna ocena vplivov možna šele ob dejanskem načrtovanju predorov. Glede na to, da je velik del Ljubljane znotraj vodovarstvenega območja, se lahko pri načrtovanju in izvedbi pojavijo tveganja zaradi uporabe dodatkov, kar pomeni omejeno uporabo oz. druge spremembe. To ima lahko učinek tako na izbiro drugačne tehnologije TBM naprave ali celo metode gradnje in vpliv na kvaliteto vodonosnika. V ta namen je potrebno v fazi načrtovanja nameniti veliko pozornosti in tveganja zmanjšati na sprejemljivo raven.

Vsebina naloge pokaže, da je TBM tehnologija za aplikacijo na urbaniziranih površinah v svetu dobro razvita in verjetno celo bolj upravičena, kot klasična sekvenčna metoda. Za učinkovito in stroškovno vzdržno načrtovanje, pa zahteva zelo širok nabor geološko geomehanskih raziskav, kar je velik problem pri današnjem projektiranju.

Glede na to, da se v Sloveniji oz. Ljubljani in okolici TBM tehnologija za namen gradnje podzemnih prometnic še ni uporabljala, lahko kljub temu pogumno pristopimo k sodobnejšim metodam in načinom gradnje predorov, vendar moramo biti pri tem previdni in premišljeni.

10 POVZETEK

Gradnja predorov omogoča izboljševanje prometnih povezav. Slovenija s svojim značilnim razgibanim terenom že sama po sebi zahteva gradnjo predorov, poleg tega pa gradnja predorov pod urbanimi površinami omogoča boljšo izrabo površin. Zgodovina gradnje predorov sega daleč nazaj in je do danes napredovala tako v metodah gradnje kot v mehaniziranosti izvedbe. Poznamo tri osnovne metode gradnje predorov, kjer poleg klasične sekvenčne metode in pokritega vkopa, poznamo še metodo kontinuiranega izkopa. Med naprednejše pristope uvrščamo kontinuirano gradnjo predorov v celotnem profilu za katero uporabljamo popolnoma mehanizirano napravo. Za to vrsto predorogradnje uporabljamo tudi izraz TBM tehnologija, ki izhaja iz angleške besedne zveze tunnel boring machine. Poznamo več vrst TBM naprav, ki so primerne za različne naravne danosti in se uporabljajo pri predorih premera do 20 m v zemljinah in do 15 m v kamninah. Naprave se razlikujejo tudi v načinu podpiranja izkopnega čela.

Namen magistrskega dela je bil podrobno predstaviti TBM tehnologijo gradnje predorov z opisom spremljajočih objektov, ki omogočajo kvalitetno izvedbo del, navesti nabor kontrolnih izračunov, ki jih je potrebno izdelati, opisati geološko geomehansko sliko na območju Ljubljane, izdelati kriterijsko analizo za izbor najprimernejše TBM naprave in oceniti vplive na okolje, ki nastanejo pri mehanizirani gradnji predorov. V sklopu naloge smo želeli preveriti naslednje hipoteze in sicer ali:

- je gradnja predorov s TBM tehnologijo izvedljiva na Ljubljanskem območju,
- je možno je izbrati enovito tehnologijo TBM naprave za izgradnjo predora in
- so vplivi na okolje pri gradnji predorov s TBM tehnologijo manjši ali kvečjemu enaki kot pri gradnji predorov s klasično tehnologijo.

Uporaba TBM tehnologije pri gradnji predorov v Ljubljani je možna na različnih področjih, kot so kanalizacijski sistemi, podzemne prometnice in poštni rovi. Osredotočili smo se na gradnjo predorov za potrebe železniške infrastrukture ali podzemne železnice. Za Ljubljano in okolico so bile že v preteklosti izdelane različne študije in analize. Bolj podrobno so bile izdelane strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji (2009) in študija variant ljubljanskega železniškega vozlišča (2010). Prva obravnava različne sisteme posodobitve mestnega prometa, kjer je ena izmed možnosti tudi podzemna železnica. Druga je izdelana na podlagi ugotovitev, da je obstoječe železniško vozlišče preobremenjeno, nefunkcionalno in ima visoke vplive na okolje v bližini trase, ki v celoti poteka po površini. V ta namen so bile obravnavane različne variante modernizacije vozlišča, kjer bi večina prog v ožjem mestnem središču potekala v predorih.

Na območju Ljubljane in okolice lahko tla uvrstimo v zemljine, z izjemo posameznih gričev, kjer gre za podlago. Za gradnjo predorov v zemljini so primerne TBM naprave z dvojnimi ščitom, ki zagotavljajo podpiranje »poškodovane« hribine, vse do vgradnje segmentne betonske obloge. Naprave razvrščamo na tri tipe, ki se med seboj razlikujejo v načinu podpiranja izkopnega čela, to so: podpiranje z izkopano zemljino ali EPB, z izplako in zračnim nadtlakom. Slednja za območje Ljubljane ni primerna, zaradi prodnih plasti z veliko prepustnostjo. Podpiranje z izkopano zemljino (EPB) je najbolj razširjena TBM tehnologija. Za podpiranje čela, uporablja izkopani material, ki se zadržuje v zaprti izkopni komori. Potrebni pritisk za podpiranje uravnavamo z iznosnim vijakom, s katerim tudi odstranjujemo izkopani material. Podpiranje z izplako je način podpiranja s tekočim medijem, ki ga

ohranjamo v zaprti izkopni komori. Izplaka penetrira v hribino in zagotavlja prenos pritiska na nestabilno čelo, hkrati služi tudi za iznos izkopanega materiala.

Eden izmed pomembnih elementov TBM tehnologije je uporaba dodatkov, s katerimi uravnavamo razmere v izkopni komori. Hribina in izkopani material nista ves čas gradnje enaka, zato se razmere na čelu izkopa spreminjajo. Izboljševanje lastnosti materiala v izkopni komori vpliva na enakomerno razporeditev podpornega pritiska, tesnjenje izkopnega čela, učinkovit transport materiala in drugo.

Uspešna gradnja predorov s TBM tehnologijo je odvisna od učinkovite logistične podpore in ostalih elementov gradnje predora. Med te štejemo: logistični center za dobavo predizdelanih segmentov, dobavo injekcijske mase in drugih materialov, skladiščenja in obdelave izkopanega materiala, lokacije in števila štartno-sprejemnih jaškov, možnosti vzdrževanja in menjave izkopnih orodij, nadzorovanje posedkov na površini, predvidevanja ovir na trasi, izvedbe prečnih povezav in obvladovanje ostalih tveganj pri gradnji.

Načrtovanje predorov je širok pojem, ki zajema izvedbo poglobljenih raziskav tal, določanje poteka trase, izbira velikosti profila, izpolnjevanje varnostnih zahtev, načrtovanje prezračevalnega sistema, izdelavo kontrolnih izračunov in drugih faz. V nalogi smo predstavili pomembnejše kontrolne izračune: stabilnost izkopnega čela, stabilnost plašča, določitev potrebne potisne sile naprave, kontrola posedkov na površini in kontrolo relativnih zasukov. Pomemben sestavni del predora je tudi predizdelana segmentna obloga. Načrtovana mora biti tako, da zagotavlja nosilnost med gradnjo (opiranje naprave pri napredovanju), končno nosilnost gotovega predora in varnost pri uporabi.

V nalogi smo za praktični primer, združili usmeritve strokovnih podlag in študije železniškega vozlišča, z namenom obravnavanja vseh potencialnih tras podzemnih prometnic. Za bolj natančno oceno gradbenih odpadkov in posedanja površine, smo predvideli dve zasnovi predorov in sicer dva vzporedna enotirna predora in en dvotirni predor. Svetli profil tirnega vozila je bil izbran za primer podzemne železnice z niveleto predora med 16 in 25 m. Na podlagi omenjenih dokumentov smo določili 6 novih podzemnih prog, katere smo označili s simboli od A do F. Progi B in D smo razdelili na dva dela, katera lahko predstavljata tudi ločeni progi. Progo F pa dopolnjujeta še dva priključna kraka (F1 in F2) in sicer na proge skozi center mesta.

Proge potekajo skozi osem glavnih geoloških enot, kjer lahko na podlagi podatkov določi še sedem variacij sestave tal. Predor na globini 16 do 25 m poteka v fino-zrnatih in grobo-zrnatih zemljinah s prisotnostjo podzemne vode v osrednjem in južnem delu mesta. V severnem delu prevladujejo pretežno peščene in prodnate plasti, ki so delno zaglinjene oziroma zameljene. Pojavljajo se tudi vložki konglomerata. Osrednji del se pojavljajo pretežno glinene in meljaste plasti s peski in prodi. Južni del mesta je popolnoma sedimenten in sestavljen pretežno iz glin z vložki peska in delno tudi proda. Globlje se pojavlja prod v čistejših oblikah, pojavlja se tudi organska glina. Podtalnica je varovana kot vodni vir nacionalnega pomena, zato proge lahko potekajo le po obstoječih koridorjih oz. izven najožjih vodovarstvenih območij.

Izbiri najprimernejše naprave smo izdelali na podlagi zbranih podatkov in s pomočjo smernic različnih združenj za predorogradnjo in strokovnih priporočil. Izkaže se, da za področje

Ljubljane z okolico, ne moremo izbrati le enega tipa TBM naprave, temveč potrebujemo dva in sicer: EPB naprava in naprava z izplako. EPB naprava je primerna za izvedbo predorov v južnem in osrednjem delu Ljubljane vključno z deli prog, ki potekajo skozi permokarbonsko podlago. Naprava z izplako, pa je primerna za severni del Ljubljane, ki poteka v grobozrnatih zemljinah.

Ocena posedkov površine zaradi gradnje predora je bila izdelana za vzporedna enotirna predora in dvotirni predor. V izračunu smo upoštevali tri vrednosti izgube prostornine V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%) in različne vrednosti količnika k , ki odraža geotehnične lastnosti tal. Izkaže se, da so posedki pri plitvi niveleti (16 m) večji, kot pri globlji (25 m). Glede na zasnovo predora, pa lahko manjše vplive pričakujemo pri dveh enotirnih predorih. Velikostni red posedkov za obravnavane primere je pri dvotirnem od 16 do 107 mm in pri vzporednih enotirnih od 10 do 41 mm.

Vplivi na podtalnico, ki bi lahko nastali pri gradnji predorov, so ocenjeni le hipotetično in na podlagi drugih strokovnih prispevkov. Proge bodo ponekod potekale nad podtalnico, v osrednjem in južnem delu mesta pa pod nivojem podtalnice. Zaradi uporabe dodatkov, bo potrebno predhodno preveriti kemijske učinke dodatkov na podtalnico in jih ob gradnji tudi sprotno izvajati. S pomočjo hidrološkega modeliranja bo potrebno preveriti tudi vplive gradnje predora na vodonosnik.

Poleg vplivov na podtalnico, smo preverili tudi v kakšni meri lahko pričakujemo emisije prahu, hrupa in vibracij. Največje emisije prahu in hrupa lahko pričakujemo v podpornih oz. logističnih centrih, kjer se bodo izdelovali in dobavljali betonski segmenti ter obdeloval izkopani material. Raven emisij je odvisna od izbranega postrojenja in preventivnih ukrepov. Vibracije, ki nastajajo pri obratovanju TBM naprave so bistveno nižje, kot pri klasični sekvenčni metodi. Pričakujemo lahko nihanje tal velikostnega reda od 0,1 do 0,3 mm/s pri globini nivelete 16 m in od 0,07 do 0,2 mm/s pri globini nivelete 25 m. Za seznanjanje javnosti o poteku gradnje, napredku in vplivih na okolje, mora biti predviden informacijski center.

Izkopani material v celoti zbiramo na začasni deponiji v območju podpornega centra. Glede na vrsto TBM naprave je odvisno postrojenje, s pomočjo katerega gradbeni odpadke poskušamo obdelati do te mere, da je možno dosežati čim večjo stopnjo ponovne uporabe. Glede na tip zasnove predorov lahko pričakujemo 4.636.758 m³ pri vzporednih enotirnih predorih in 6.255.249 m³ pri dvotirnem predoru. Od tega bo predvidoma dobrih 60 % izkopanih z napravo z izplako. Odvisno od stopnje obdelave in uspešnosti reciklaže, lahko materiale iz prodnih nanosov in podlage, uporabljamo v nasipih cestnih teles in drugih umetnih nasipih. Materiale iz sedimentnih plasti in spralin s pobočij pa ne moremo ponovno uporabljati, ampak jih je potrebno trajno odložiti na lokacijah viškov materiala.

Izsledki naloge pokažejo, da je uporaba TBM naprave pri gradnji predorov v Ljubljani in okolici mogoča, vendar je potrebno uporabiti dva tipa naprav. Pri gradnji lahko pričakujemo vplive na okolje, katere je z vidika vibracij, emisij prahu in hrupa ter posedkov možno omejiti. Drugače je z vplivi na podtalnico, kjer je v fazi načrtovanja potrebno računsko preveriti vplive na vodonosnik in s tem potrditi izvedljivost gradnje podzemnih prometnic.

11 SUMMARY

Tunnelling allows the improvement of transport links. Slovenia, with its characteristic varied terrain, itself requires tunnelling and in addition to that, the construction of tunnels under the urban areas allows for a better utilization of land. A history of tunnelling goes far back and has to date progressed both in the methods of construction and in application of mechanization. There are three basic methods of tunnel construction, where in addition to classical sequential method and a cut and cover method, the third method is continuous excavation. Among the more advanced method we include continuous excavation of tunnels in full profile, which uses fully mechanized device. This type of tunnelling is known as TBM technology (Tunnel Boring Machine). There are several types of TBM machines that are suitable for different grounds and are used in soils with a diameter of up to 20 m and in rock with diameter of up to 15 m. TBM machines vary in way of providing support on excavated face.

The purpose of this thesis was detailed presentation of the TBM tunnelling method with a description of accompanying facilities, which provide quality performance of executed works, specify a general set of control verifications that need to be performed, describe the geological and geomechanical properties in Ljubljana area, perform a criteria analysis to select the most appropriate TBM machine and assess the impacts on the environment, which are resulting in tunnel construction. As part of the tasks we wanted to confirm the following hypotheses, namely whether:

- construction of tunnels with TBM technology is feasible in the Ljubljana area,
- is it possible to choose a single TBM method for the construction of the tunnels and
- if environmental impacts from the construction of tunnels with TBM technology are less than or at most the same as at the construction of tunnels with conventional method.

Application of TBM technology in the tunnel construction in Ljubljana is possible at various fields, such as sewage systems, road and railway tunnels and mail tunnels. We focused on the construction of tunnels for the needs of railway or subway. For Ljubljana and its surroundings there are already made various studies and analysis for. Two documents were made as more detailed and that is expert study of upgrading the public transport in region (2009) and study of Ljubljana railway junction modernisation (2010). The first study considers different systems of modernization of urban transport, which includes also a option of building a metro railway. The second is made on the basis that the existing railway junction is overloaded, non-functional and has a high impact on the environment in the vicinity of the existing routes, which is built entirely on the surface. For this purpose different options were considered where the majority of lines in the city centre are built as tunnels.

Geologically Ljubljana with its surroundings lies on ground classified as soil, with the exception of the individual hills, where there is geological substratum. Tunnelling in the soil is usually performed with TBM machine with double shield, which provides support of exposed ground till the installation of segmental concrete lining. Machines for soils can be classified into three types, which differ in the way of supporting the excavation face: earth pressure balance, slurry machine and compressed air machine. The latter for the Ljubljana area is not suitable since mostly gravel layers with high permeability are present. Earth pressure balance machine is the most widespread TBM technology. For supporting the face is using

excavated material, which is kept in a closed excavation chamber. The necessary pressure is provided with screw conveyor, which also removes the excavated material. Slurry machine is using liquid as support medium. It is kept in closed excavation chamber. Slurry penetrates into ground and ensures the transfer of pressure on the unstable face. Slurry is also used as transportation medium.

One of the most important elements of the TBM technology is the use of soil conditioners to regulate the features of the ground in excavation chamber. Soil features are not always the same during the construction. Improving the properties of the material in the excavation chamber affects the even distribution of the support pressure, sealing the excavation face, makes mucking and transport more efficient, etc.

Successful tunnel construction with TBM technology depends on the efficient support system and other elements of the construction. Among these are: support center for the supply of precast segments, the supply of injection grouts and other materials, storage and processing of spoil, the location and number of starting and receiving shafts, maintenance options and exchange excavation tools, monitoring of displacements on the surface, forecasting the obstacles on the route, construction of cross passages and the management and mitigation of other risks during the construction.

Planning of the tunnels is a broad term which includes ground investigation, route selection, selection of the size of the profile, fulfilling the safety requirements, the design of the ventilation system, Execution of calculations and dimensioning and the other phases. In the thesis we outlined main control calculations: face stability, stability to the breakout or blowout, required thrust force and control of the surface displacements. An important component of the tunnel is a pre-casted segmental lining. It has to be designed to ensure capacity during construction (thrust forces and segmental handling), the final capacity of the finished tunnel and safety during serviceability.

For the purpose of the practical example in the thesis, we had combined all potential lines from railway study and study for upgrading public transport to check potential tunnel lines. For a more accurate estimation of construction waste and settlement of an area, we anticipated the design of two tunnels, two parallel single track tunnels and a double-track tunnel. Clearance profile was selected for metro rail vehicle with spring line set between 16 and 25 m. Based on mentioned documents, we had set six new underground routes, which were labeled from A to F. The track B and D are divided into two sections, which may represent a separate line. Line F is complemented by two connecting lines to the route that goes through the city center.

Lines are passing through eight main geological units, which can be subdivided to seven variations due to ground structure. The tunnel at a depth of 16 to 25 m is located in a fine-grained and coarse-grained soil with the presence of groundwater in the central and southern part of the city. In the northern part dominates mainly sand and gravel layers, with presence of clay and silt. There is also presence of the conglomerate. The central part is located mainly in clay and silt layers with sand and gravel. The southern part of the city is completely in sediment grounds and is consisting mainly of clay with small presence sand and partly gravel. Organic clay can appear as well. In deeper layers gravel is present in more pure form. Groundwater is protected as a water source of national importance, so the lines can

only be planned in existing corridors respectively outside the narrowest water protection areas.

Selection of the most appropriate TBM machine was made based on the data collected and guideline instructions with expert recommendations. It turns out that in the area of Ljubljana and its surroundings, just one type of TBM machine is not sufficient, therefore we need two, namely: EPB machine and Slurry machine. EPB is suitable for construction of tunnels the tunnels in the southern and central part of Ljubljana including parts of routes that pass through perm-carbonic substratum. A Slurry machine is suitable for the northern part of Ljubljana, which goes through the coarse-grained soils.

Assessment of surface settlements due to the construction of the tunnel was performed for two parallel single-track tunnels and a double-track tunnel. In the calculation we assume three values of volume loss V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%) and different values of the coefficient k , which reflects the geotechnical properties of the soil. It turns out that the settlements at the shallow spring line (16 m) are bigger than at the deeper spring line (25 m). Based on the tunnel design we can expect milder impacts at parallel single-track tunnels. Expected settlements for the case with double-track tunnel are from 16 to 107 mm and at the single-track tunnel from 10 to 41 mm.

Impacts on groundwater, which could result in the construction of tunnels, are estimated only hypothetical and are based on scientific papers. Lines are sometimes held over the groundwater level and in the central and southern part of the city below the groundwater level. Due to the use of additives it is required to verify the impacts of chemical substances on the groundwater. Monitoring has to be performed during the construction as well. With a hydrological modelling is necessary to check the impact of tunnel construction on the aquifer.

In addition to the impact on groundwater, we have also checked to what extent can we expect emissions of dust, noise and vibration. The maximum emission of dust and noise can be expected in support areas, where pre-casted lining will be produced and process of the recycling of spoil will take place. The level of emissions depends on the selected plant and preventive measures. The vibrations generated by the TBM machines are significantly lower than with conventional method. We can be expected surface vibration of the order of 0,1 to 0,3 mm/s at 16 m spring line, and from 0,07 to 0,2 mm/s at spring line of 25 m.

Excavated material is collected at the temporary landfill in the support centre. Depending on the type of TBM a recycle plant is selected and of which spoil should be processed to such extent that it is possible to re-use. Depending on design of the tunnels it can be expected 4,636,758 m³ at single-track tunnels and 6,255,249 m³ at double-track tunnel design. Of this it is expected to be over 60% material excavated with slurry machine. Depending on the level of processing and performance of recycling materials, gravel deposits and substrates can be used in road embankments and as a fill. Materials from sediment layers can't be re-used and should be deposited.

The results of the thesis are showing that the use of TBM for tunnel construction in Ljubljana and surroundings is possible, but it is necessary to use two types of machines. In the construction impacts on the environment can be expected, of which vibration, dust and noise emissions and settlements can be reduced and mitigated. Other than that, impacts on the

groundwater, should be checked in planning phase, to confirm the feasibility of the construction for underground works.

VIRI

Anagnostou, G., Kovari, K. 1996. Face Stability Conditions with Earth-Pressure-Balanced Shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 11, No. 2: p. 165-173.

Anagnostou, G., Kovari, K. 1996. Face stability in slurry and EPB shield tunnelling. V: Mair, R.J. (ur.), Taylor, J. (ur.). *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Balkema, Rotterdam, Netherland. 1996. Taylor & Francis: p. 453-458.

Atzl, G., Bach, D. 2013. Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagbauten mit kontinuierlichem Vortrieb. Salzburg. ÖGG - Österreichische Gesellschaft für Geomechanik: p. 49.

Baderna, D., Lomazzi, E., Passoni, A., Pogliaghi, A., Petoumenou, M. I., Bagnati, R., Lodi, M., Viarengo, A., Sforzini, S., Benfenati, E., Fanelli, R. 2015. Chemical Characterization and ecotoxicity of three soil foaming agents used in mechanized tunnelling. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 296: p. 210-220.

Bakhshi, M., Nasri, V. 2014. Review of International Practice on Critical Aspects of Segmental Tunnel Lining Design. V: Davidson, G. (ur.), Howard, A. (ur.), Jacobs, L. (ur.), Pintabona, R. (ur.), Zernich, B. (ur.). *North American Tunnelling Conference. Proceedings 2014*. Englewood, Colorado. Society for Mining, Metallurgy and Exploration: p. 274-282.

Bakker, E. J., Blom, C. B. M. 2009. Ultimate Limit State Design for Linings of Bored Tunnels. *Geomechanics and Tunnelling*. Vol. 2, No. 4: p. 345 – 358.

Bakker, E.J. 2003. Structural design of linings for bored tunnels in soft ground. *Heron*. Vol. 48, No. 1: p. 33-63.

Ball, R.P.A., Young, J. D., Isaacson, J., Champa, J., Gause, C. 2009. Research in soil conditioning for EPB Tunnelling through difficult soils. V: Almeraris, G. (ur.), Mariucci, B. (ur.). *Rapid Excavation and Tunnelling Conference (RETC) Proceedings, Las Vegas, USA, 14-17 June, 2009*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.: p. 320-333.

Barton, Nick. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. A.A Balkema, Rotterdam, Brookfield, 2000: p. 172.

Bellopede, R., Marini, P. 2011. Aggregates from tunnel muck treatments. Properties and uses. *Physiochemical Problems of Mineral Processing*. Vol. 47: p. 259-266.

Bellopede, R., Oreste, P. 2011. Main Aspects of Tunnel Muck Recycling. *American Journal of Environmental Sciences*. Vol. 7: p. 338-347.

Bensa, B. 2009. Strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji. Končno poročilo. Ljubljana. Regionalna razvojna agencija Ljubljanske urbane regije: p. 429.

Blom, C. B. M. 2002. Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. Doctoral thesis. Delft University of Technology: 248 f.

Boscardin, M.D, Cording, E.J. 1989. Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 115, No. 1: p. 1-21.

Bračič Železnik, B., Prestor, J. 2002. Izviri Ljubljanskega polja in Barja, pomembni za količinsko in kakovostno stanje telesa podzemne vode. *Geologija*. Št. 45/2: p. 319-324.

Brenčič, M. 2008: Vode Ljubljanskega barja in njegovega obrobja. V: Pavšič, J. (ur.). *Ljubljansko barje: neživi svet, rastlinstvo, živalstvo, zgodovina in naravovarstvo*. Ljubljana: Društvo Slovenska matica: p. 17-31.

Breznik, M. 1969. Podtalnica Ljubljanskega polja in možnosti njenega povečanega izkoriščanja. *Geologija*. Št. 12: p. 165-184.

Budach, C. 2011. Untersuchungen zum erweiterten Einsatz von Erddruckschilden in grobkörnigem Lockergestein, Doctoral Thesis. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Ruhr-Universität Bochum: 338 f.

Burland, J. 2008. The assessment of the risk of damage to buildings due to tunnelling and excavations. V: Agreda, E. A. (ur.), Toledo, M.A. (ur.), *Jornada Tecnica de Movimientos de Edificios Iducidos por Excavaciones*. Barcelona, 16 December, 2008: p 3-25.

Buser, S. 1968a. Osnovna geološka karta Slovenije. List Kranj. Merilo 1:100 000. Zvezni geološki zavod. Beograd

Buser, S. 1968b. Osnovna geološka karta Slovenije. List Ljubljana. Merilo 1:100 000. Zvezni geološki zavod. Beograd

Buser, S. 1968c. Osnovna geološka karta Slovenije. List Postojna. Merilo 1:100 000. Zvezni geološki zavod. Beograd

Buser, S. 1968d. Osnovna geološka karta Slovenije. List Ribnica. Merilo 1:100 000. Zvezni geološki zavod. Beograd

Capital Transit Partners. 2011. Geotechnical Data Report. Geotechnical and hydrogeological investigation Ottawa Light Rail Transit (OLRT) Tunnel (Segment 2). Ottawa, Ontario. 60 f.

Cardu, M., Oreste, P. 2011. Tunnelling in urban areas by EPB machines: Technical evaluation of the system. *Earth Sciences*. Vol. 15: p. 5-11.

Chong, P.T., Tang, S.K., Lim, T.L., Sugawara, S., Furusono, T. 2004. Bored Tunnel Lining Design in Soft soils – A comparison between analytical and numerical analysis. *Underground space for sustainable urban development*. V: Shirlaw, N. (ur.), Zhao, J. (ur.), Krishnan, R. (ur.). *Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress*. Singapore. 22-27 May, 2004. ITA-AITES: p. 7.

Davis, D. 2010. A Review of Predicting Methods for Ground-Borne Noise due to Construction Activities. V: Burgess, M. (ur.). *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, 23-27 August, 2010. Sydney, Australia. The Australian Acoustical Society: p. 1-6.

Di Ponio, M., Chapman, D., Bournes, C. 2007. EPB Tunnel Boring Machine Design for Boulder Conditions. V: Taylor, T. M. (ur.), Townsend, J. W. (ur.). *Rapid Excavation and Tunnelling Conference (RETC) Proceedings*. Toronto, Canada, June 10-13. 2007. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.: p. 215-228.

Drobne, F., Tovornik, S. 1961. Obvestilo o raziskavah geoloških pogojev za gradnje na območju mesta Ljubljane. *Geologija*. Št. 7: p. 269-274.

Duddeck, H., Erdmann, J. 1982. Structural design models for tunnels. Proceedings of the Tunnelling 1982 Symposium, London: p. 83-91.

EFNARC. 2005. Specification and Guidelines for the use of special products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock, Farnham, April 2005. Efnarc: p. 45.

Ercelbi, S. G. 2011. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. Environmental Earth Science. Vol. 62: p. 357-365.

Fang, Y.S., Lin, C.T., Liu, C., Cheng, K.H., Su, C.S., Chen, T.J. 2013. Construction of a Cross Passage between two MRT Tunnels. V: Delage, P. (ur.), Desrues, J. (ur.), Frank, R. (ur.), Puech, A. (ur.), Schlosser, F. (ur.). 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2-6 September. Paris. ISSMGE: p. 1699-1702.

Filipič, M., Pečolar, T. 2012. Poročilo o CPTu sondiranju tal na lokaciji športni park Svoboda – gimnastična dvorana, Ljubljana – Vič. IRGO Consulting: 7 str.

Fritz, P., Hermanns Stengele, R., Heinz, A. 2002. Modified Bentonite Slurries for Slurry Shield in Highly Permeable Soils. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. France, Toulouse: p. 6.

Galli, M., Thewes, M. 2014. Investigations for the application of EPB shields in difficult grounds. Geomechanics and Tunnelling. Vol. 7. No. 1: p. 31-44.

Gertsch, L., Fjeld, A., Nilsen, B., Gertsch, R. 2000. Use of TBM Muck as Construction Material. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 15, No. 4: p. 379-402.

Girmscheid, G. 2013. Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus. Zürich, Wilhelm Ernst & Sohn: p. 760.

Hiller, D. M. 2011. The prediction and mitigation of vibration impacts of tunnelling. V: Mee, D. J., (ur.), Hillock, D. M. (ur.). Proceedings of Acoustics – Breaking New Ground, 2–4 November, 2011. Gold Coast, Australia. The Australian Acoustical Society: p. 1-8.

Hollmann, F. S. 2014. Bewertung von Boden und Fels auf Verlebungen und Feinkornfreisetzung beim maschinellen Tunnelvortrieb. Doctoral Thesis. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Ruhr-Universität Bochum: 254 f.

ITA-AITES Working Group No. 2. 2000. Guidelines for the Design of shield Tunnel Lining. ITA - International Tunnelling Association, Working Group – “Design of Tunnel Lining”. ITA-AITES: p. 24.

Jovičić, V., Merhar, B. 2007. Geološko-geomehansko poročilo o pogojih gradnje na zemljišču v Dravljah. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 9 str.

Ketelaars, M.B.G., Saathof, L.E.B. 2000, From spoil to soil: Reuse of soil from TBM's in the Netherlands. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. A.A. Balkema, Rotterdam: p. 239-243.

Kolymbas, D. 2005. Tunnelling and Tunnel Mechanics, Berlin Heidelberg, Springer Verlag: p. 431.

Koyama, Y. 2003. Present status and technology of shield tunnelling method in Japan. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 13: p. 145-159.

Koželj, T. 2005. Vrednotenje linijskega prometa v mestni občini Ljubljana. Diplomski naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo (samozaložba T. Koželj): 126 f.

Krivec, D., Klun, M., Plesec, T. 2010. Izboljšanje javnega potniškega prometa – trajnostni vidik načrtovanja prometne infrastrukture. V: 10. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 20. – 22. Oktober, 2010. Družba za raziskave v cestni in prometni stroke Slovenije: 211-219 str.

Križnič, A. 2009. Geološko-geotehnični elaborat o sestavi tal in načinu gradnje trase ter temeljenja objektov na navezovalni cesti NC Jeprca-Stanežiče-Brod: faza IDP. IRGO Consulting: 3 mape.

Križnič, A., Pregl, M., Ratej, J., Rojšek, M., Galuf, S., Fabjan, T., Ivačič, B., Peternel, M. 2009. Geomehansko in hidrogeološko poročilo gradbene jame na spodnjih Poljanah v Ljubljani – območje treh akademij. IRGO Consulting: 60 str.

Kumlanc, P. 2005. Reciklaža gradbenih odpadkov in ponovna uporaba v cestogradnji. Diplomski naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Kumlanc): 86 str.

Kumpfmüller, S. 2008. Large Diameter Soft Ground Tunnel Boring Machines, Master's Thesis. FH Joanneum Gesellschaft mbH, University of Applied sciences, Construction Management and Engineering, Graz: 110 f.

Kuwahra, S. 2000. Mechanised Tunnelling, Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs). ITA - International Tunnelling Association, Working Group 14 – "Mechanised Tunnelling". ITA-AITES: p. 119.

Langmaack, L. 2000. Advanced Technology of Soil Conditioning V: Levent, O. (ur.). North American Tunnelling Congress, 6-11 June, 2000. Boston, Massachusetts. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield: p. 525-540.

Langmaack, L. 2003. Ecological aspects of soil conditioning for EPB-TBM Projects. V: Saveur, J. (ur.). Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, 12-17 April, 2003. Amsterdam, The Netherlands. A.A. Balkema Publishers: p. 733-736.

Langmaack, L., Ibarra, J. 2011. Speciality Chemicals for Tunnel Boring Machines. V: Redmond, S. (ur.), Romero, V. (ur.). Rapid Excavation and Tunnelling Conference proceedings, Short Tunnelling Lecture, San Francisco, California, June 19-22. 2011. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.: 72 f.

Lawrence, C. Taylor, J. 2011. Design of Tunnel Cross Passages. V: Redmond, S. (ur.), Romero, V. (ur.). Rapid Excavation and Tunnelling Conference (RETC) Proceedings. San Francisco, California, June 19-22. 2011. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.: p. 119-136.

Likar, J. 2010. Uporaba Evrokodov pri projektiranju predorov. V: 10. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 20. – 22. Oktober, 2010. Družba za raziskave v cestni in prometni stroke Slovenije: 1174–1183 str.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G. 2012. Mechanised Shield Tunnelling, 2nd Edition, Berlin, Wilhelm Ernst & Sohn: 512 str.

Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M., Sturge, D. 2007. Hardrock tunnel boring machines, Berlin, Ernst&Sohn Verlag: p. 356.

Maidl, B., Thewes, M., Maidl, U. 2013. Handbook of Tunnel Engineering, Volume I: Structures and Methods. Berlin, Wilhelm Ernst & Sohn: p. 250.

Maidl, B., Thewes, M., Maidl, U. 2013. Handbook of Tunnel Engineering, Volume II: Basics and Additional Services for Design and Construction. Berlin, Wilhelm Ernst & Sohn: p. 250.

Maidl, U. 1995. Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum. Doctoral Thesis. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Ruhr-Univesität Bochum: 188 f.

Maidl, U., Frieztsche, W., Grübl, F., et al. 2010. Empfehlung zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB), Essen, ITA-AITES: p. 48.

Maidl, U., Pierri, C.D.D.J., 2014. Innovative hybrid EPB tunnelling in Rio de Janeiro. Geomechanics and Tunnelling. Vol. 7. No. 1: p. 55-63.

Mair, R. J. 1996. Settlement effect of bored tunnels. V: Mair, R.J. (ur.), Taylor, J. (ur.). Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, Netherland. 1996. Taylor & Francis: p. 43-53.

Mair, R. J., Taylor, R. N., Burland, J. B., 1996. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. V: Mair, R.J. (ur.), Taylor, J. (ur.). Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, Netherland. 1996. Taylor & Francis: p. 623-628.

Maksimović, M., 2008. Mehanika tla. Beograd, AGM knjiga: p. 519.

Mancinelli, L. 2005. Evaluation of superficial settlements in low overburden tunnel TBM excavation: Numerical approaches. Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 23: p. 263-272.

Mazi, J. 2008. Vpliv izgradnje predorov na metropolizacijo oziroma razvoj mest – primerjava predorov Šentivd v Ljubljani in Mrazovka v Pragi. Magistrska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Mazi): 152 str.

Mencej, Z. 1988/1989. Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega barja. Geologija. Št. 31, 32: p. 517-553.

Oggeri, C., Fenoglio, T.M., Vinai, R. 2014a. Muck Classification: Raw Material or Waste in Tunnelling Operation. Mining Revue Vol. 20. Issue 4: p. 240-249.

Oggeri, C., Fenoglio, T.M., Vinai, R. 2014b. Tunnel spoil classification and applicability of lime addition in weak formations for muck reuse. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 44: p. 97-107.

Palmstrom, A., Broch, E. 2006. Use and Misuse of Rock Mass Classification System with Particular Reference to the Q-system. Tunnels and Underground Space Technology, Vol. 21: p. 575-593.

Pavšič, J., 2008. Geologija Barja in njegovega obrobja. V: Pavšič, J. (ur.). Ljubljansko barje, Društvo Slovenska matica, Ljubljana: str. 6.

Potts, D.M., Addenbrooke, T.I., 1996. The influence of an existing surface structure on the ground movements due to tunnelling. V: Mair, R.J. (ur.), Taylor, J. (ur.). *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Balkema, Rotterdam, Netherland. 1996. Taylor & Francis: p. 573-578.

Pregl, M. 2011. Program zniževanja gladine podzemne vode med gradbenimi izkopi posamezne faze na območju Tobačna mesto v Ljubljani. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 1 mapa.

Pregl, M. 2015. Hidrogeološko poročilo za pridobitev vodnega dovoljenja za neposredno rabo vode za pridobivanje toplote in neposredno rabo za tehnološke namene na lokaciji Doma starejših občanov Fužine v Ljubljani. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 57 str.

Pregl, M., Ratej, J., Okorn, M. 2013. Hidrogeološko poročilo za pridobitev dovoljenja za raziskavo podzemnih voda za raziskovalna piezometra, kot osnova za izdelavo črpalnega ter ponikovalnega vodnjaka za zajem in vračanje pretočnih količin do 20 l/s za neposredno rabo vode za pridobivanje toplote na lokaciji Schenker d.d. na Brnčičevi ulici v Ljubljani. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 1 mapa.

Premelč, M. 2006. Strokovna podlaga predlaganega krajinskega parka Ljubljansko barje. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za Geografijo (samozaložba M. Premelč): 76 f.

Presa, J. 2008. Madrid Calle 30: An urban transformation project. V: 4th International Conference Tunnel Safety and Ventilation, Graz: p. 40-46.

Psomas, S. 2001. Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications. Master of Science Thesis. Michaelmas, University of Oxford: 150 f.

Quebaud S., Sibai M., Henry J-P., 1998. Use of chemical foam for improvements in drilling by earth pressure balanced shields in granular soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 13, Issue 2: p. 173-180.

Renghausen, R., Tauriainen, R., Raedle, A. 2014. TBM and spoil treatment selection process – case history Crossrail C310 Thames Tunnel, Slurry TBM versus EPB TBM. *Geomechanics and Tunnelling*. Vol. 7, No. 1: p. 45-54.

Riviera, P. P., Bellopede, R., Marini, P., Bassani, M. 2014. Performance-based re-use of tunnel muck as granular material for subgrade and sub-base formation in road construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 40: p. 160-173.

Robert, A. 2014. Forward probing ahead of tunnel boring machines. *AFTES - French Tunnelling and Underground Space Association*: 43 f.

Rojšek, M. 2011. Laboratorijske preiskave z lokacije: Ljubljana – Galjevica, za objekt »Prizidek k vrtcu Galjevica in prizidek k OŠ Oskar Kovačič«. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 1 mapa.

Rojšek, M. 2011. Poročilo o opravljenih geomehanskih preiskavah vzorcev za objekt »Bencinski servis Petrol Barje«. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 1 mapa.

Rojšek, M. 2012. Poročilo o opravljenih geomehanskih laboratorijskih preiskavah vzorcev za objekt Soseska Polje, Ljubljana – Polje. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 5 str.

Rojšek, M. 2012. Poročilo o opravljenih geomehanskih preiskavah vzorcev za objekt Spar – Zalog. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 7 str.

Rojšek, M. 2012. Poročilo o opravljenih geomehanskih preiskavah vzorcev za objekt: »Džamija v Ljubljani, ob Kurilniški cesti v Ljubljani«. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 4 str.

Rojšek, M. 2013. Poročilo o opravljenih geomehanskih preiskavah vzorcev za objekt: »Fotometer in poslovni objekt – Hella Saturnus Slovenija«. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 3 str.

Rojšek, M., Pečnik, B., Zahorik, M. 2008. Laboratorijske preiskave vzorcev z lokacije Kolezija. Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje: 4 str.

Schmidt, T. 2014. C305 Drive G TBM Launch Bearing – Technical Memo. Dr. Sauer & Partners: p. 21.

Schneider, E., Max, J. 2002. Guideline for the design of TBM-bored railway tunnels. V: Österreichischer Tunneltag, Salzburg. Austrian Society for Geomechanics: p. 93-103.

Seeley, T. R. 2004. Estimating ground loss from EPB tunnelling in alluvial soils for ECIS project. V: Ozdemir, E. (ur.), Proceedings from North American Tunnelling Conference. Atlanta, Georgia, USA. 17-22 April 2004. A.A. Balkema Publishers: p. 79-86.

Smith, C., Jones, M. 2004. Tunnel lining design guide. The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers. London. Thomas Telford: p. 195.

Sovinc, I. 1965. Nekaj osnovnih geotehničnih značilnosti sedimentov iz vrtine BV-1 med Notranjimi Goricami in Podpečjo na Ljubljanskem barju. Geologija. Št. 8: p. 28-33.

Speakman, C., Lyons, S. 2009. Tunnelling induced ground-borne noise modelling. Proceedings of Acoustics – Research to Consulting, 23 – 25 November, 2009. Adelaide, Australia. The Australian Acoustical Society: p. 1-5.

Šram, D., Brenčič, M., Lapajne, A., Janža, M. 2012. Prostorski model visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju. Geologija. Št. 55/1: p. 107-116.

Stojanovski, H. 2009. Primerjava prečnih profilov predora v Sloveniji in drugih evropskih državah. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometna smer (samozaložba H. Stojanovski): 96 str.

Sugiyama, T., Hagiwara, T., Nomoto, T. 1999. Observations of Ground Movements during Tunnel Construction by Slurry Shield Method at the Docklands Light Railway Lewisham Extension – East London. Soils and Foundations. Vol. 39, No. 3: p. 99-112.

Tentschert, E., Vigl, A., Goricki, A. 2003. Guideline for Geomechanical Design for Underground Structures with Continuous Excavation. Felsbau 21, No. 4: p. 20-25.

Thewes, M. 2007. TBM Tunnelling challenges – redefining the state of the art. V: Bartak, J. (ur.), Hrdina, I. (ur.), Romancov, G. (ur.), Zlamal, J. (ur.). Proceedings from ITA-AITES World Tunnelling conference – Underground Space – The 4th Dimension of Metropolises. Prague. Taylor & Francis: p. 13-21.

Vinai, R., Oggeri, C., Peila, D. 2008. Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 23: p. 308-317.

Vinai, R., Peila, D., Oggeri, C., Pelizza, S. 2007. Laboratory tests for EPB tunnelling soil conditioning. V: Bartak, J. (ur.), Hrdina, I. (ur.), Romancov, G. (ur.), Zlamal, J. (ur.). Proceedings from ITA-AITES World Tunnelling conference – Underground Space – The 4th Dimension of Metropolises. Prague. Taylor & Francis: p. 273-278.

Vrhovšek, D., Smolar Žvanut, N., 2001. Sintezno letno poročilo o izvajanju monitoring – opazovanje vplivov na okolje med gradnjo in obratovanjem HE Plave II in HE Doblar II v letu 2000. Limnos, Podjetje za aplikativno ekologijo, d.o.o. Maj 2001. 55 str.

Vukmirović, D. 2008. Možnost gradnje dolgih predorov z uporabo TBM. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo (samozaložba D. Vukmirović): 91 f.

Wangryul Jee, W., Ha, S. 2007. Feasible Boulder treatment methods for soft ground shielded TBM. V: Bartak, J. (ur.), Hrdina, I. (ur.), Romancov, G. (ur.), Zlamal, J. (ur.). Proceedings from ITA-AITES World Tunnelling conference – Underground Space – The 4th Dimension of Metropolises. Prague. Taylor & Francis: p. 217-223.

Zajc, T. 2010. Odnos med posedki in poplavami na ljubljanskem barju v luči klimatskih sprememb. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo (samozaložba T. Zajc): 133 f.

Žigman, U. 2000. Analiza možnosti gradnje podzemnega tramvaja v Ljubljani. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo (samozaložba U. Žigman): 135 str.

Žlebnik, L. 1971. Pleistocen Kranjskega, Sorškega in Ljubljanskega polja. Geologija. Št. 17: p. 477-491

Žličar, B., Fimpler, J., Šemrov, D. 2010. Študija variant ljubljanskega železniškega vozlišča. V: 10. Slovenski kongres o cestah in prometu, 20. – 22. Oktober, 2010, Portorož. Družba za raziskave v cestni in prometni stroke Slovenije: p. 313–321.

Zakonodaja in standardi

Pravilnik o ocenjevanju kakovosti zunanjega zraka. Uradni list RS št. 55/11 in 6/15.

Pravilnik o spodnjem ustroju železniških prog. Uradni list RS št. 93/2013: 3378-3391.

Pravilnik o zgornjem ustroju železnih prog. Uradni list RS št. 92/2010: 4867-4868.

Uredba o emisijah snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo. Uradni list RS št. 47/05, 45/07, 79/09 in 64/12.

Uredba o kakovosti zunanjega zraka. Uradni list RS št. 9/11 in 8/15.

Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa. Uradni list RS št. 105/05, 34/08, 109/09 in 62/10.

Uredba o obdelavi odpadkov v premičnih napravah. Uradni list RS št. 34/08.

Uredba o obremenjevanju tal z vnašanjem odpadkov. Uradni list RS št. 34/08.

Uredba o ocenjevanju in urejanju hrupa v okolju. Uradni list RS št. 121/04.

Uredba o odpadkih. Uradni list RS št. 37/15 in 69/15.

Uredba o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih – področna uredba. Uradni list RS št. 34/08.

Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji. Uradni list RS št. 48/2006: 5189-5225, 54/09.

Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnika Ljubljanskega polja. Uradni list RS št. 43/15.

Uredba o vodovarstvenem območju za vodno telo vodonosnikov Ljubljanskega barja in okolice Ljubljane. Uradni list RS št. 115/07, 9/08-popr., 65/12 in 93/13.

Uredba o vrstah posegov v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje. Uradni list RS št. 51/14, 57/15.

Zakon o graditvi objektov (ZGO-1). Uradni list RS št. 102/04 – uradno prečiščeno besedilo, 14/05 – popr., 92/05 – ZJC-B, 93/05 – ZVMS, 111/05 – odl. US, 126/07, 108/09, 61/10 – ZRud-1, 20/11 – odl. US, 57/12, 101/13 – ZDavNepr, 110/13 in 19/15.

Zakon o prostorskem načrtovanju /ZPNačrt/. Uradni list RS št. 33/2007: 4585-4602.

Zakon o varstvu okolja (ZVO-1). Uradni list RS št. 39/2006 – UPB, 49/06, 66/06, 33/07, 57/08, 70/08, 108/09, 48/12, 57/12, 92/13, 56/15.

Zakon o vodah (ZV-1). Uradni list RS št. 67/02, 2/04 – ZZdrl-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14 in 56/15

DIN 4150-1:2001. Structural vibration – Part 1: Predicting vibration parameters.

DIN 4150-2:2001. Structural vibration – Part 2: Human exposure to vibration in buildings.

DIN 4150-3:2001. Structural vibration – Part 3: Effects of vibration on structures.

ÖNORM B 2203-2:2005. Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm – Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb.

ÖNORM S 9020:1986. Bauwerkerschütterungen; Sprengerschütterungen und vergleichbare impulsförmige Immissionen.

SIST EN 1997-1:2005/A1:2014. Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila.

Ostali viri

Andersen, T., Paaske, B. J. 2002. Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept.
<http://www.lotsberg.net/artiklar/andersen/paper.html> (Pridobljeno 30.3.2016.)

Barcelona Metro line 9
<http://www.railway-technology.com/projects/barcelona-metro-line-9/>
(Pridobljeno, 12.11.2015.)

Crossrail project <http://www.crossrail.co.uk/route/> (Pridobljeno, 10.11.2015.)

Doha Metro project https://en.wikipedia.org/wiki/Doha_Metro (Pridobljeno 2.3.2016.)

Gruebl, F. 2012. Segmental Ring Design – New challenges with High Tunnel Diameters. Muir Wood Lecture 2012, ITA-AITES: 16 str.

<https://www.ita-aites.org/en/publications/muir-wood-lecture> (Pridobljeno 28.1.2016.)

Heathrow Post T5 Transfer Baggage System

<http://www.teambfk.co.uk/projects/heathrow-baggage/> (Pridobljeno, 18.11.2015.)

Izvedba oslabitve v pilotni steni za prehod TBM naprave

<http://www.asiatunneling.com/tunneleyeconstruction.html> (Pridobljeno, 19.11.2015.)

Izvedba priključka prečnika na glavno predorsko cev

<http://www.tunneltalk.com/New-Zealand-04March2015-Managing-back-up-gantry-assembly-and-cross-passage-construction-at-Waterview.php> (Pridobljeno, 22.11.2015.)

Koraki izvedbe pokritega vkopa

<http://www.railsystem.net/cut-and-cover/> (Pridobljeno, 2.9.2015.)

Kretschmer, M., Jäntsche, M. 2012. The Doha Metro – Tunnelling in special Dimensions. Tunnel 5/12: 34-41.

http://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_2012-05_The_Doha_Metro_Tunnelling_in_special_Dimensions_1459895.html
(Pridobljeno 10.3.2016.)

Madrid Calle M30

http://www.roadtraffic-technology.com/projects/m30_madrid/ (Pridobljeno, 15.11.2015.)

Madrid Metro https://en.wikipedia.org/wiki/Madrid_Metro (Pridobljeno, 15.11.2015.)

Milligan G.W.E., 2000. Soil conditioning and lubrication in tunnelling, pipe jacking and micro tunnelling. A State-of-the-art review. August 2000.

<http://www.civils.eng.ox.ac.uk/research/pipejack.htm>. (Pridobljeno, 12.2.2016.)

Ottawa confederation line project <http://www.ligneconfederationline.ca/the-plan/what/>
(Pridobljeno, 13.11.2015.)

Podatki o predorih na železnici v Sloveniji https://sl.wikipedia.org/wiki/zeleznica_v_Sloveniji
(Pridobljeno, 10.11.2015.)

Podatki o TBM predorih za HE Doblar II in Plave II:

[http://www.seng.si/mma_bin.php/\\$fId/2008101008155718/\\$fName/03_Plave_zlozenka210x210splet.pdf](http://www.seng.si/mma_bin.php/$fId/2008101008155718/$fName/03_Plave_zlozenka210x210splet.pdf) (Pridobljeno, 10.11.2015.)

http://www.seng.si/hidroelektrarne/predstavitev_hidroelektrarn/velike_hidroelektrarne/
(Pridobljeno, 10.11.2015.)

Podatki o vrstah TBM naprav in možnosti uporabe

<https://www.herrenknecht.com/en/home.html> (Pridobljeno, 12.12.2015.)

RQD (Deere classification)

https://www.rocscience.com/hoek/corner/11_Rock_mass_properties.pdf
(Pridobljeno, 5.12.2015.)

RQD (Deere classification) in Q in Q_{TBM} (Barton classification)

http://www.rockmass.net/articles/classification/classification_systems.html
(Pridobljeno, 5.12.2015.)

Seizmične meritve pred TBM napravo

http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html (Pridobljeno 10.2.2016.)

Seznam predorov na slovenskem avtocestnem omrežju

http://www.dars.si/Dokumenti/O_avtocestah/Objekti_na_avtocestah/Predori_85.aspx
(Pridobljeno, 31.03.2016.)

Spencer, M., Stolfa, A., Bentz, E., et al. 2009. Tunnel Boring Machines. IMIA Conference Istanbul, IMIA Working Group Paper WGP 60 (09), Istanbul: 38 str.

www.imia.com/wp-content/.../TBM-WG60-f-021209.pdf (Pridobljeno, 17.12.2015.)

Sterling, R. L., Godard, J. P., 2000. Geoengineering considerations in the optimum use of underground space. V: ITA-AITES, Lausanne: 18 str.

<https://www.ita-aites.org/es/news/559-geoengineering-considerations-in-the-optimum-use-of-underground-space> (Pridobljeno, 05.01.2016.)

Stuttgart 21 railway project

<http://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/aktuell/> (Pridobljeno, 16.11.2015.)

Tehnični odbor za pripravo tehničnih specifikacij za javne ceste TO 06. 2001. TSC

06.800.2001: Ponovna uporaba materialov v cestogradnji – recikliranje. Tehnična specifikacija za javne ceste. Republika Slovenija, Ministrstvo za promet: 19 str.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_800_2001_Ponovna_uporaba_materialov_v_cestogradnji_Recikliranje.pdf
(Pridobljeno 14.2.2016.)

Thames Tideway Tunnel project

<http://www.tideway.london/the-tunnel/our-solution/> (Pridobljeno, 15.11.2015.)

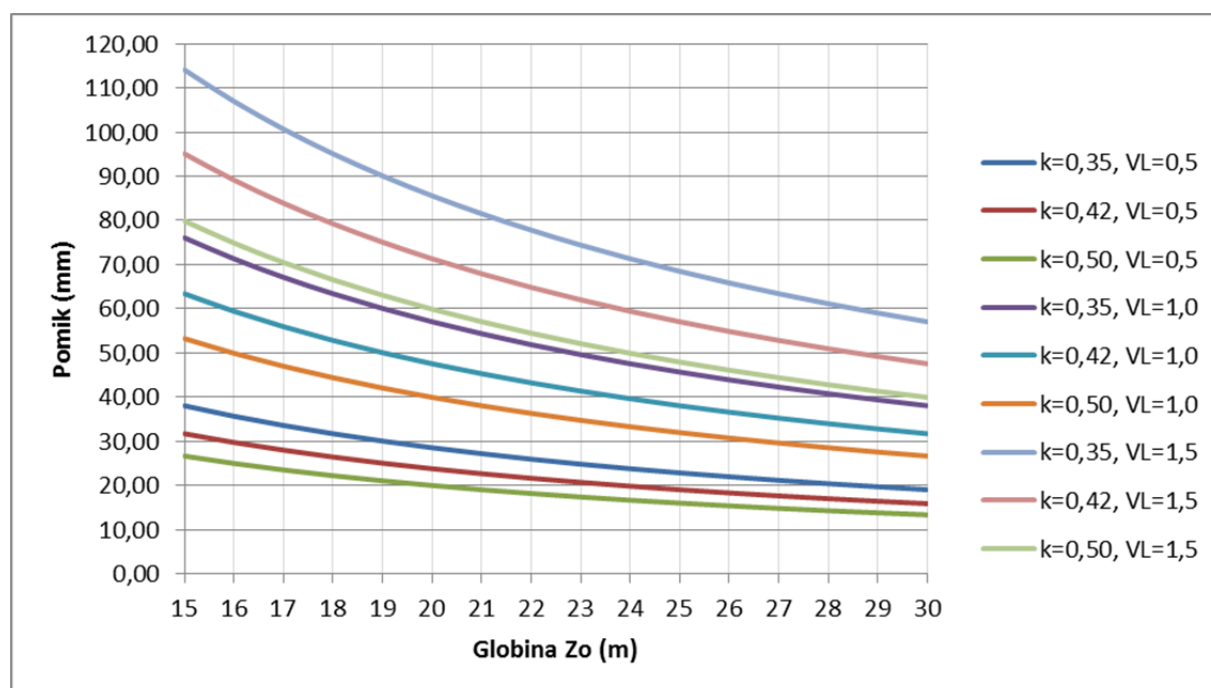
Volume loss theory <http://www.groundloss.com/theory/> (Pridobljeno 9.4.2016.)

PRILOGA A: VREDNOSTI POSEDKOV s_{\max} PRI SPREMENLJIVI Z_0

Preglednica A-1: Rezultati posedkov s_{\max} (mm) za dvotirni predor pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Table A-1: Results for settlement s_{\max} (mm) for single double track tunnel at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Z_0 (m)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
15	38,03	31,69	26,62	76,06	63,39	53,25	114,1	95,08	79,87
16	35,66	29,71	24,96	71,31	59,43	49,92	106,97	89,14	74,88
17	33,56	27,97	23,49	67,12	55,93	46,98	100,67	83,9	70,47
18	31,69	26,41	22,19	63,39	52,82	44,37	95,08	79,23	66,56
19	30,03	25,02	21,02	60,05	50,04	42,04	90,08	75,06	63,05
20	28,52	23,77	19,97	57,05	47,54	39,93	85,57	71,31	59,9
21	27,17	22,64	19,02	54,33	45,28	38,03	81,5	67,92	57,05
22	25,93	21,61	18,15	51,86	43,22	36,3	77,79	64,83	54,46
23	24,8	20,67	17,36	49,61	41,34	34,73	74,41	62,01	52,09
24	23,77	19,81	16,64	47,54	39,62	33,28	71,31	59,43	49,92
25	22,82	19,02	15,97	45,64	38,03	31,95	68,46	57,05	47,92
26	21,94	18,28	15,36	43,88	36,57	30,72	65,83	54,85	46,08
27	21,13	17,61	14,79	42,26	35,22	29,58	63,39	52,82	44,37
28	20,37	16,98	14,26	40,75	33,96	28,52	61,12	50,94	42,79
29	19,67	16,39	13,77	39,34	32,79	27,54	59,02	49,18	41,31
30	19,02	15,85	13,31	38,03	31,69	26,62	57,05	47,54	39,93



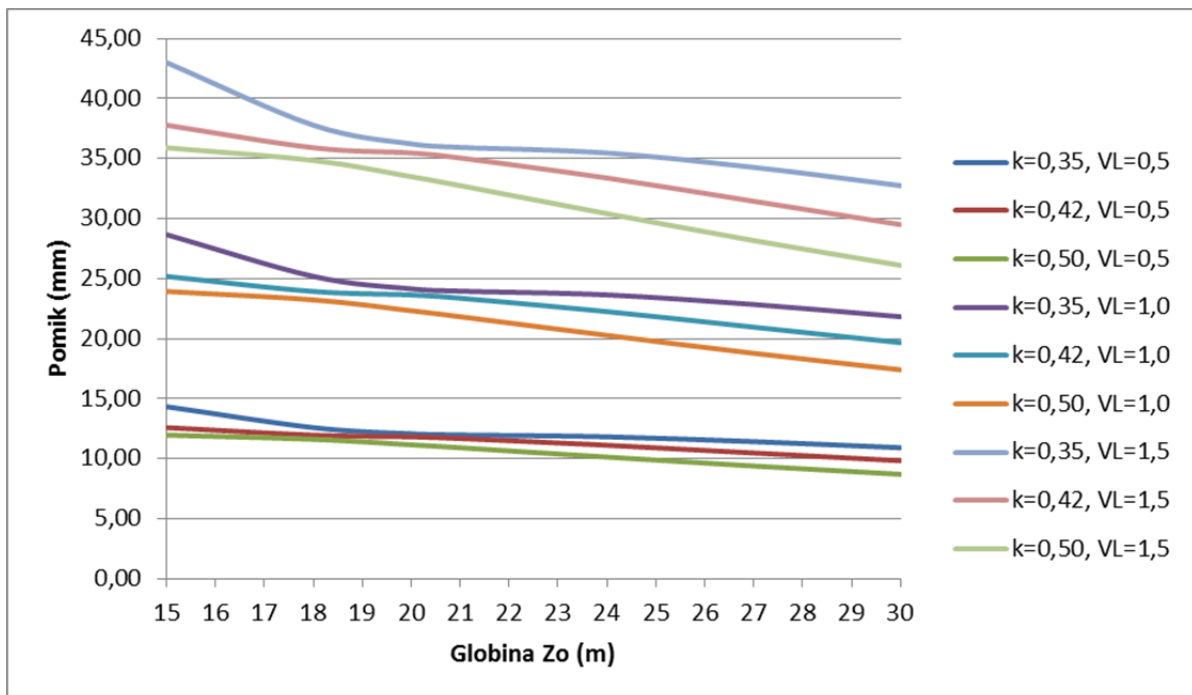
Slika A-1: Vrednosti maksimalnega pomika za dvotirni predor glede na globino predora pri vrednostih k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).

Figure A-1: Values of maximum settlement for one double track tunnel based on spring line depth at values k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).

Preglednica A-2: Rezultati posedkov s_{\max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri globinah (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Table A-2: Results for settlement s_{\max} (mm) for two single track tunnels at depth (Z_0) 15, 20 in 30 m.

Z_0 (m)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
15	14,33	12,59	11,97	28,67	25,19	23,94	43,00	37,78	35,91
18	12,59	11,97	11,62	25,19	23,94	23,23	37,78	35,90	34,85
20	12,08	11,82	11,17	24,15	23,65	22,33	36,23	35,47	33,50
21	11,98	11,68	10,92	23,96	23,37	21,83	35,94	35,05	32,75
24	11,82	11,13	10,14	23,65	22,25	20,28	35,47	33,38	30,42
27	11,42	10,48	9,39	22,85	20,96	18,78	34,27	31,45	28,17
30	10,92	9,83	8,70	21,83	19,67	17,41	32,75	29,50	26,11



Slika A-2: Vrednosti maksimalnega pomika za vzporedna enotirna predora glede na globino predora pri vrednostih k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).

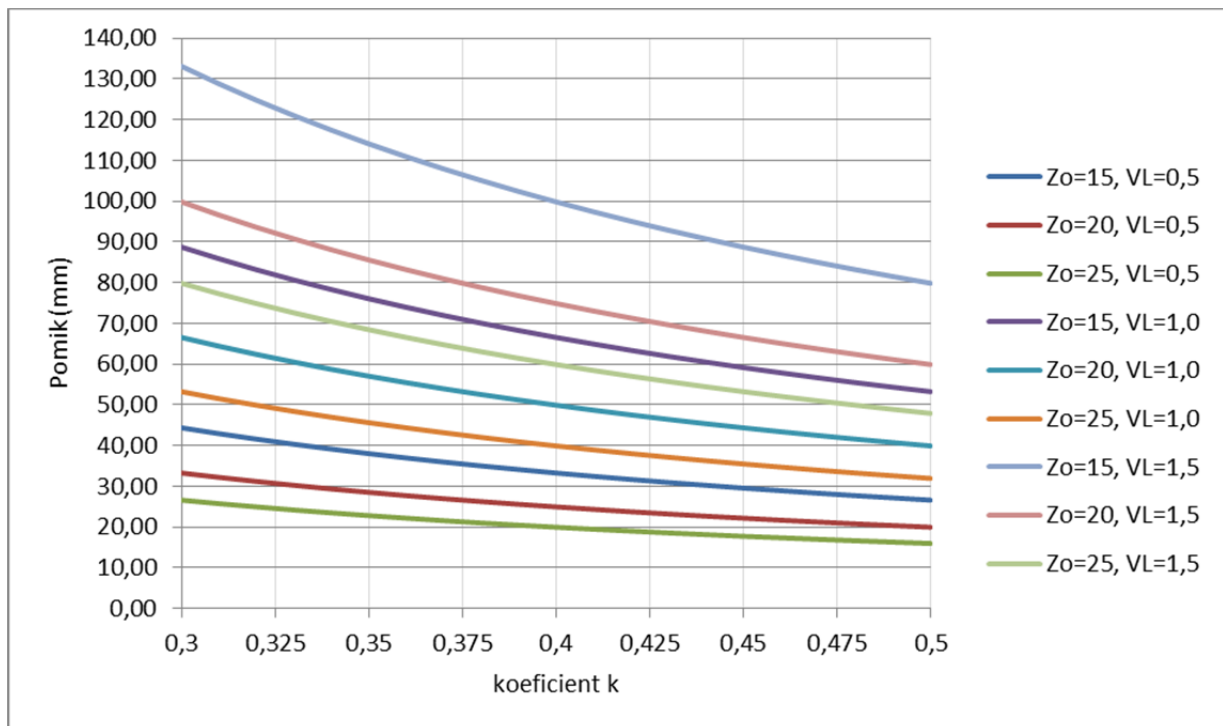
Figure A-2: Values of maximum settlement for two single track tunnels based on spring line depth at values k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).

PRILOGA B: VREDNOSTI POSEDKOV s_{MAX} PRI SPREMENLJIVEM k

Preglednica B-1: Rezultati posedkov s_{max} (mm) za dvotirni predor pri različnih vrednostih koeficienta k .

Table B-1: Results for settlement s_{max} (mm) for one double track tunnel at different values of coefficient k .

k (-)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	Zo=15	Zo=20	Zo=25	Zo=15	Zo=20	Zo=25	Zo=15	Zo=20	Zo=25
0,3	44,37	33,28	26,62	88,74	66,56	53,25	133,11	99,84	79,87
0,31	42,94	32,20	25,76	85,88	64,41	51,53	128,82	96,61	77,29
0,32	41,60	31,20	24,96	83,20	62,40	49,92	124,79	93,60	74,88
0,33	40,34	30,25	24,20	80,67	60,51	48,40	121,01	90,76	72,61
0,34	39,15	29,36	23,49	78,30	58,73	46,98	117,45	88,09	70,47
0,35	38,03	28,52	22,82	76,06	57,05	45,64	114,10	85,57	68,46
0,36	36,98	27,73	22,19	73,95	55,46	44,37	110,93	83,20	66,56
0,37	35,98	26,98	21,59	71,95	53,97	43,17	107,93	80,95	64,76
0,38	35,03	26,27	21,02	70,06	52,54	42,04	105,09	78,82	63,05
0,39	34,13	25,60	20,48	68,26	51,20	40,96	102,40	76,80	61,44
0,4	33,28	24,96	19,97	66,56	49,92	39,93	99,84	74,88	59,90
0,41	32,47	24,35	19,48	64,93	48,70	38,96	97,40	73,05	58,44
0,42	31,69	23,77	19,02	63,39	47,54	38,03	95,08	71,31	57,05
0,43	30,96	23,22	18,57	61,91	46,44	37,15	92,87	69,65	55,72
0,44	30,25	22,69	18,15	60,51	45,38	36,30	90,76	68,07	54,46
0,45	29,58	22,19	17,75	59,16	44,37	35,50	88,74	66,56	53,25
0,46	28,94	21,70	17,36	57,88	43,41	34,73	86,81	65,11	52,09
0,47	28,32	21,24	16,99	56,64	42,48	33,99	84,97	63,72	50,98
0,48	27,73	20,80	16,64	55,46	41,60	33,28	83,20	62,40	49,92
0,49	27,17	20,37	16,30	54,33	40,75	32,60	81,50	61,12	48,90
0,5	26,62	19,97	15,97	53,25	39,93	31,95	79,87	59,90	47,92



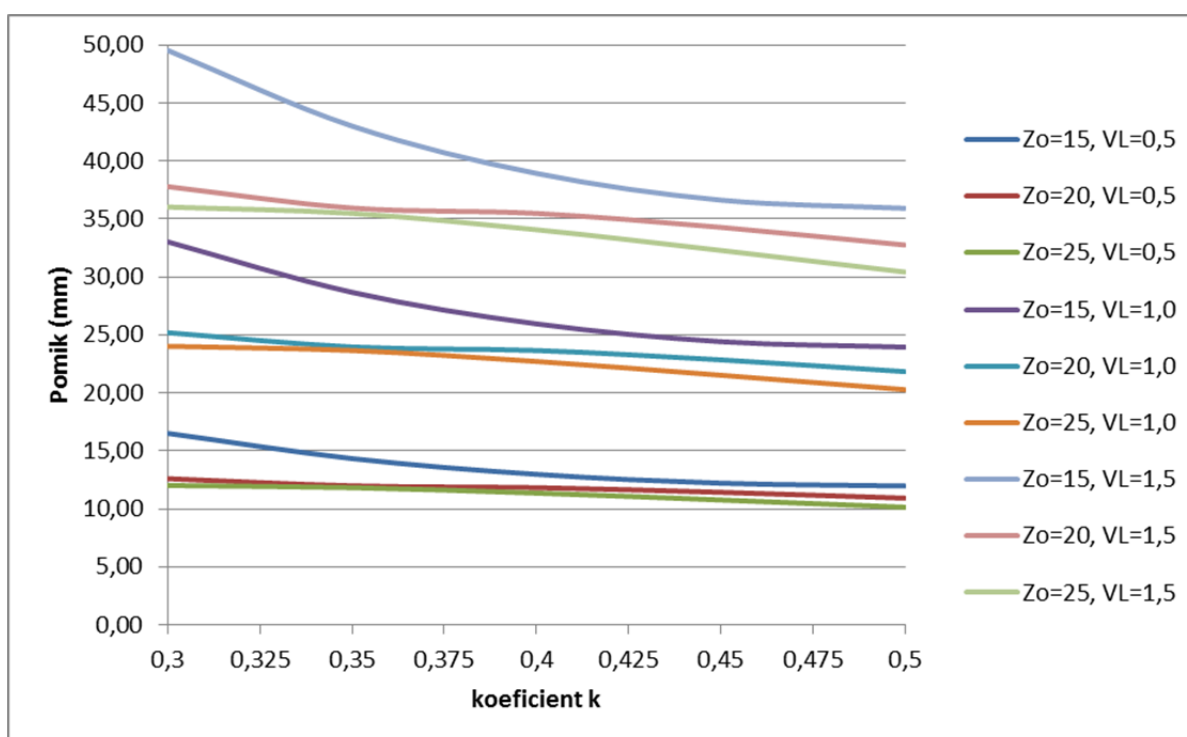
Slika B-1: Vrednosti maksimalnega pomika za dvotirni predor glede na koeficient k pri globinah Z_0 (15,0, 20,0 in 25,0 m) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).

Figure B-1: Values of maximum settlement for one double track tunnel based on coefficient k at spring line depth Z_0 (15,0, 20,0 in 25,0 m) and V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).

Preglednica B-2: Rezultati posedkov s_{max} (mm) za vzporedna enotirna predora pri različnih vrednostih koeficienta k .

Table B-2: Results for settlement s_{max} (mm) for two single track tunnels at different values of coefficient k .

k (-)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	Zo=15m	Zo=20m	Zo=25m	Zo=15m	Zo=20m	Zo=25m	Zo=15m	Zo=20m	Zo=25m
0,3	16,51	12,59	12,01	33,02	25,19	24,02	49,53	37,78	36,02
0,35	14,33	11,98	11,82	28,67	23,96	23,65	43,00	35,94	35,47
0,4	12,97	11,82	11,36	25,95	23,65	22,71	38,92	35,47	34,07
0,45	12,21	11,42	10,76	24,42	22,85	21,52	36,63	34,27	32,29
0,5	11,97	10,92	10,14	23,94	21,83	20,28	35,91	32,75	30,42



Slika B-2: Vrednosti maksimalnega pomika za vzporedna enotirna predora glede na koeficient k pri globinah Z_0 (15,0, 20,0 in 25,0 m) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).

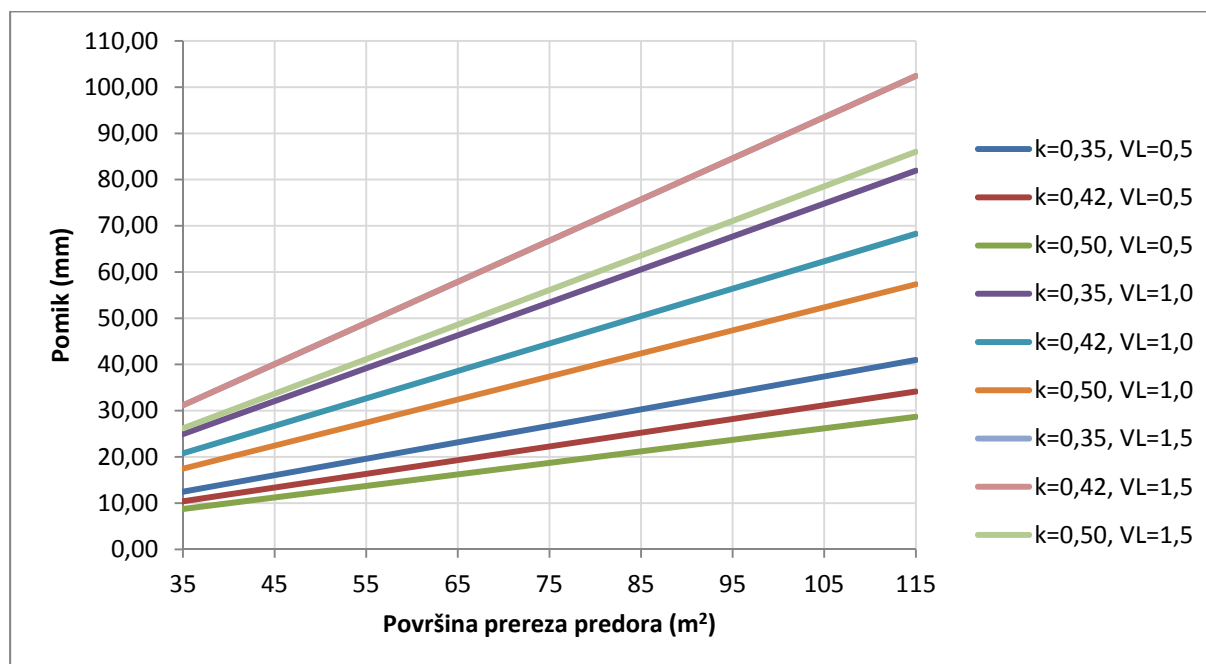
Figure B-2: Values of maximum settlement for two single track tunnels based on coefficient k at spring line depth Z_0 (15,0, 20,0 and 25,0 m) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).

PRILOGA C: VREDNOSTI POSEDKOV s_{\max} PRI SPREMENLJIVEM PREREZU ZA ENOCEVNI PREDOR

Preglednica C-1: Rezultati s_{\max} (mm) pri globini $Z_0=16$ m za enocevni predor glede na površino prereza A.

Table C-1: Results for s_{\max} (mm) at depth $Z_0=16$ m single tube tunnel according to cross section A.

A (m ²)	$V_L = 0,5\%$			$V_L = 1,0\%$			$V_L = 1,5\%$		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
35	12,47	10,39	8,73	24,93	20,78	17,45	31,17	31,17	26,18
40	14,25	11,87	9,97	28,50	23,75	19,95	35,62	35,62	29,92
45	16,03	13,36	11,22	32,06	26,71	22,44	40,07	40,07	33,66
50	17,81	14,84	12,47	35,62	29,68	24,93	44,52	44,52	37,40
55	19,59	16,33	13,71	39,18	32,65	27,43	48,98	48,98	41,14
60	21,37	17,81	14,96	42,74	35,62	29,92	53,43	53,43	44,88
65	23,15	19,29	16,21	46,31	38,59	32,41	57,88	57,88	48,62
70	24,93	20,78	17,45	49,87	41,56	34,91	62,33	62,33	52,36
75	26,71	22,26	18,70	53,43	44,52	37,40	66,79	66,79	56,10
80	28,50	23,75	19,95	56,99	47,49	39,89	71,24	71,24	59,84
85	30,28	25,23	21,19	60,55	50,46	42,39	75,69	75,69	63,58
90	32,06	26,71	22,44	64,12	53,43	44,88	80,14	80,14	67,32
95	33,84	28,20	23,69	67,68	56,40	47,37	84,60	84,60	71,06
100	35,62	29,68	24,93	71,24	59,37	49,87	89,05	89,05	74,80
105	37,40	31,17	26,18	74,80	62,33	52,36	93,50	93,50	78,54
110	39,18	32,65	27,43	78,36	65,30	54,85	97,95	97,95	82,28
115	40,96	34,14	28,67	81,93	68,27	57,35	102,41	102,41	86,02



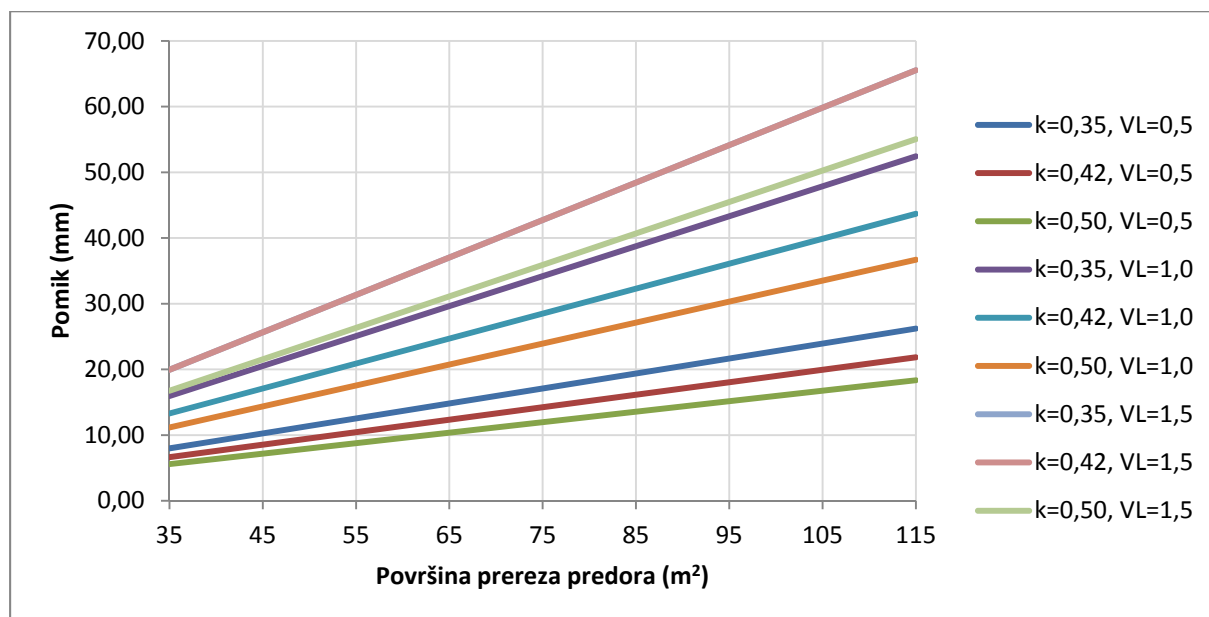
Slika C-1: Vrednosti maksimalnega pomika za enocevni predor glede na izkopno površino pri globini $Z_0=16$ m in koeficientu k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).

Figure C-1: Values of maximum settlement for single tunnel tube on excavation area at depth $Z_0=16$ m, coefficient k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).

Preglednica C-2: Rezultati s_{max} (mm) pri globini $Z_0=25$ m za enocevni predor glede na površino prereza A.

Table C-2: Results for s_{max} (mm) at depth $Z_0=25$ m single tube tunnel according to cross section A.

A (m ²)	V _L = 0,5%			V _L = 1,0%			V _L = 1,5%		
	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50	k=0,35	k=0,42	k=0,50
35	7,98	6,65	5,59	15,96	13,30	11,17	19,95	19,95	16,76
40	9,12	7,60	6,38	18,24	15,20	12,77	22,80	22,80	19,15
45	10,26	8,55	7,18	20,52	17,10	14,36	25,65	25,65	21,54
50	11,40	9,50	7,98	22,80	19,00	15,96	28,50	28,50	23,94
55	12,54	10,45	8,78	25,08	20,90	17,55	31,35	31,35	26,33
60	13,68	11,40	9,57	27,36	22,80	19,15	34,20	34,20	28,72
65	14,82	12,35	10,37	29,64	24,70	20,74	37,04	37,04	31,12
70	15,96	13,30	11,17	31,92	26,60	22,34	39,89	39,89	33,51
75	17,10	14,25	11,97	34,20	28,50	23,94	42,74	42,74	35,90
80	18,24	15,20	12,77	36,47	30,40	25,53	45,59	45,59	38,30
85	19,38	16,15	13,56	38,75	32,30	27,13	48,44	48,44	40,69
90	20,52	17,10	14,36	41,03	34,20	28,72	51,29	51,29	43,09
95	21,66	18,05	15,16	43,31	36,09	30,32	54,14	54,14	45,48
100	22,80	19,00	15,96	45,59	37,99	31,92	56,99	56,99	47,87
105	23,94	19,95	16,76	47,87	39,89	33,51	59,84	59,84	50,27
110	25,08	20,90	17,55	50,15	41,79	35,11	62,69	62,69	52,66
115	26,22	21,85	18,35	52,43	43,69	36,70	65,54	65,54	55,05



Slika C-2: Vrednosti maksimalnega pomika za enocevni predor glede na izkopno površino pri globini $Z_0=25$ m in koeficientu k (0,35, 0,42 in 0,50) ter V_L (0,5%, 1,0% in 1,5%).

Figure C-2: Values of maximum settlement for single tunnel tube on excavation area at depth $Z_0=25$ m, coefficient k (0,35, 0,42 and 0,50) and V_L (0,5%, 1,0% and 1,5%).