

Gimnazija Jožeta Plečnika
Šubičeva ulica 1
1000 Ljubljana



Naravoslovnotehniška fakulteta
Aškerčeva c. 12.
1000 Ljubljana

Univerza v Ljubljani
Naravoslovnotehniška fakulteta



SODOBNI NAČINI GRADNJE PREDOROV

Raziskovalna naloga s področja gradbeništva

Maksim Jelača

Nik Siegl

Šolski mentor:

Grega Celcar, prof. fiz.

Gimnazija Jožeta Plečnika
Ljubljana

Somentor:

Blaž Janc, mag. inž. geotehnol.

Naravoslovnotehniška fakulteta v
Ljubljani

Ljubljana, marec 2024

Ta stran je namerno prazna

Zahvala

Raziskovalna naloga je bila izdelana v okviru srečanja mladih raziskovalcev ljubljanske regije, ki jo podpira Zveza za tehnično kulturo Slovenije (ZOTKS). Slikovni, teoretični in eksperimentalni del sva v večini opravila samostojno. Vendar brez ustreznih napotkov, pomoči in izkušenj mentorjev težko prišla do cilja.

Za pomoč pri raziskovalni nalogi se zahvaljujema zunanjemu mentorju Blažu Jancu iz Naravoslovnotehniške fakultete v Ljubljani in šolskem mentorju Gregi Celcarju, prof. fizike. Pri nalogi sta nama nudila podporo ter naju usmerjala v pravilno smer.

Zahvaljujema se tudi Oddelku za geotehnologijo, rudarstvo in okolje na Naravoslovnotehniški fakulteti za možnost uporabe njihove večnamenske delavnice in laboratorijev ter opreme.

Zahvaljujema se tudi ravnateljici Gimnazije Jožeta Plečnika Ljubljana, gospe Lidiji Žigon za odobritev najine raziskovalne naloge ter sredstev za raziskovalno nalogo in rabo šolskih prostorov na Gimnaziji Jožeta Plečnika Ljubljana.

Posebna zahvala gre tudi mag. Mojci Podlipnik, ki nama je stala ob strani pri najinemu raziskovanju ter opravičevala izostanke v šoli.

Povzetek

V tej raziskovalni nalogi sva hotela podrobneje preučiti kako gradnja predorov vpliva na okolje, še posebej v urbanih naseljih, kjer se izkop predora največkrat izvaja na plitvih globinah. Opravila sva serijo poskusov, s katerimi sva ugotavljala velikost posedanja površine terena nad predorom pri različnih globinah izkopa, kar je predstavljalo simulacijo gradnje predora v plitvih globinah na urbanih območjih. Poleg tega sva v uvodnem delu raziskovalne naloge preučila tudi različne metode gradnje predorov ter se podrobneje posvetila metodi z uporabo predorskih vrtnih strojev TBM, ki se tudi pogosto uporabljajo pri izdelavi predorov na urbanih območjih.

KLJUČNE BESEDE: Gradnja predorov, posed površine, stroji TBM

Abstract

In this research paper, we aimed to examine in detail how tunnel construction affects the environment, especially in urban areas where tunnel excavation is often carried out at shallow depths. We conducted a series of experiments to determine the extent of surface settlement above the tunnel at various excavation depths, simulating tunnel construction at shallow depths in urban areas. Additionally, in the introductory part of the research paper, we also studied various tunnel construction methods and focused specifically on the method using Tunnel Boring Machines (TBMs), which are commonly used in tunnel construction in urban areas.

KEYWORDS: Tunnel construction, surface settlement, TBM machines

KAZALO VSEBIN

1. UVOD	1
2. METODE GRADNJE PREDOROV	2
2.1. TBM	3
3. OKOLJSKI VIDIK GRADNJE PREDOROV	5
3.1. GRADNJA PREDOROV V URBANIH NASELJIH	5
4. HIPOTEZE	6
5. PRAKTIČNI DEL	7
5.1. OSNOVNA IDEJA	7
5.2. SESTAVA ŠKATLE IN NAŠE CEVI	7
5.3. IZBIRA PESKA TER SEJALNA ANALIZA	9
5.4. MERJENJE IN REZULTATI MERITEV	12
6. PRIMER IZ VSAKDANJEGA ŽIVLJENJA	15
7. SKLEP	16
8. LITERATURA	17
9. PRILOGE	18

KAZALO SLIK

Slika 1. Izkop kalote predora po metodi NATM	2
Slika 2. Stroj TBM s ščitom	3
Slika 3. Posledice pogrezanja pri gradnji predorov v urbanih območjih	5
Slika 4. Izbruh podzemne vode v izkopni prostor predora.....	6
Slika 5: Slika narejenega osnovnega modela.	7
Slika 6: Leva slika prikazuje cev, zraven nje pa čep, ki je drsel po notranjosti. Desna slika prikazuje škatlo z izvrtanimi luknjami v katero smo dajali cev s čepom.....	9
Slika 7. Prikaz procesa sušenja peska.....	9
Slika 8. Sita za sejalno analizo peska.	10
Slika 9. Uporaba pripomočka za ravnanje površine peska.....	12
Slika 10. Proces merjenja posedka.....	12

KAZALO GRAFOV

Graf 1. Grafični prikaz sejalne analize.	11
Graf 2. Prikaz rezultatov meritev.....	14

1. UVOD

V najini raziskovalni nalogi sva hotela ugotoviti kako globina predora vpliva na posedanje tal. Ker se večina predorov izven mestnih območij gradi na dovolj velikih globinah, kjer je posedanje površine terena minimalno, smo se osredotočili na gradnjo predorov v urbanih okoljih, kjer so globine izkopa neprimerno manjše, vpliv na površje pa posledično večji. S povečevanjem naseljenosti in z razvojem človeka se tudi v urbanih okoljih razvija potreba po gradnji cestne infrastrukture in podzemnih prostorov, med drugim predorov.

Predore se gradi z namenom zagotavljanja transporta, tako ljudi kot materialnih snovi. Med drugim nam predori olajšajo potovanja, saj nam omogočajo boljše prometne povezave in hitrejše potovanje ter posledično hitrejši razvoj okolice. Seveda pa imajo predori lahko tudi svoje posledice. Strokovno neustrezna gradnja predora lahko povzroči onesnaženje okolja ter močno poseže v naravo in ekosisteme. V primeru slabega načrtovanja predora obstaja nevarnost, da se del predora poruši ter da se tla pogreznejo. Na nekaterih območjih je ta nevarnost večja, na drugih pa manjša in je odvisna predvsem od geološke sestave tal, kjer gradnja predora poteka. Nevarnost ki jo predstavlja posedanje tal, je odvisna tudi od globine na kateri gradnja predora poteka, kar bova midva poskušala pokazati v najini raziskovalni nalogi.

Na začetku so predore gradili na bolj preprost način kot danes. Graditelji niso imeli posebnih pripomočkov in opreme, zato je delo potekalo predvsem ročno. V sodobnem svetu je gradnja predorov bolj izpopolnjena in tehnološko dovršena, delo pa posledično tudi bolj varno [1]. Poznamo različne metode gradnje predorov, kot sta na primer klasična metoda z miniranjem in izkopom po fazah ter TBM metoda z uporabo predorskega vrtalnega stroja (TBM – Tunnel Boring Machine). Danes je po svetu najbolj razširjena Nova avstrijska metoda gradnje predorov (NATM – New Austrian Tunnelling Method), ki se v večini primerov uporablja tudi v Sloveniji. Izbira metode izdelave predorov je odvisna predvsem od geometrijskih zahtev predora ter od geoloških razmer na območju načrtovane gradnje [2].

2. METODE GRADNJE PREDOROV

Poznamo več metod za izgradnjo predorov. V preteklosti so bile v uporabi številne metode kot so na primer Belgijska metoda, Nemška metoda, Italijanska metoda in Angleška metoda [1]. Danes se uporabljata najpogosteje le še dve metodi in sicer Nova avstrijska metoda ter TBM metoda [1,2]. Nova avstrijska metoda je ena izmed bolj razširjenih metod izdelovanja predorov. Ta tehnika temelji na načelu minimalnih podpor. Metoda je izredno uporabna zaradi svoje prilagodljivosti različnim hribinskim razmeram. Poleg tega je metoda prilagodljiva tudi različnim geometrijskim oblikam in velikostim predorskega profila in omogoča sprotno prilagajanje razmeram [1]. Imenovana metoda se je v Avstriji prvič pojavila leta 1962, od takrat pa se je še izboljšala. Metoda izdelovanja predorov TBM pa je metoda z uporabo predorskega vrtalnega stroja.



Slika 1. Izkop kalote predora po metodi NATM [3].

Če gradnja predora poteka na klasičen način v kamninah, je podporne ukrepe mogoče določiti z uporabo Q klasifikacija kamnin, kot prikazuje enačba (1)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF'} \quad (1)$$

kjer RQD predstavlja oceno kakovosti kamnine, J_n predstavlja število razpok, J_r predstavlja hrapavost najbolj negodnih razpok, J_a stopnjo spremembe vzdolž najšibkejših razpok, J_w dotok vode in SRF faktor redukcije napetosti.

2.1. TBM

Na tem mestu bova podrobneje opisala predorski vrtalni stroj TBM. Metoda gradnje predorov s strojem TBM je primerna za izdelavo daljših predorov, ki na primer presegajo dolžino 4 km. Pri tej metodi gradnja predora poteka v celotnem profilu, kar pomeni da se celoten profil izkopa predora izvaja naenkrat in ne po delih. Uporaba TBM tehnologije pri gradnji predorov omogoča hitro napredovanje, ki pa je odvisno predvsem od geoloških in geotehničnih pogojev. Tehnologija TBM omogoča gradnjo predorov tako v kamninah kot zemljinah [2].

TBM stroji so lahko odprtega ali zaprtega tipa, odvisno od geoloških razmer v katerih poteka vrtanje. Pri trdnih in stabilnih kamninah, kjer ni nevarnosti porušitev, se lahko uporablja odprti tip TBM stroja. V primeru nestabilnih kamnin in zemljin (prod, pesek, glina), pa se uporablja zaprti tip TBM stroja, kjer so TBM stroji opremljeni s posebnimi cevni štiti (slika 2). Ščit je zunanji ovoj TBM stroja, ki služi za izkop v težjih pogojih in kadar je težko zavarovati stabilnost



Slika 2. Stroj TBM s štitom [5].

predora. Poznanih je več različnih izvedb štitev, vsi pa opravljajo podobno funkcijo, to je zaščita izkopnega prostora [4].

TBM stroj je ime za celotno postrojenje z vsemi sklopi, ki skrbijo za izdelavo predora od izkopa do nameščanja betonske obloge in transporta navrtanega materiala. Na vrtni glavi, ki opravlja vrtnje, so nameščena posebna orodja v obliki dlet in kotalnih diskov, ki omogočajo rušenje materiala na čelu predora. Izbira orodij je odvisna od materiala (kamnine ali zemljine), v katerem poteka vrtnje. Za učinkovitost vrtnja je pomembna tudi hitrost vrtenja kotalnih diskov na vrtni glavi. Hitrost vrtenja kotalnih diskov je odvisna od hitrosti vrtenja vrtnne glave. Pri tem je potrebno nameniti pozornost hitrosti vrtenja kotalnih diskov, saj v primeru da se vrtna glava in z njo diski vrtn prehitro, je vrtnje lahko neučinkovito, poleg tega pa lahko privede do povečane obrabe orodij [2].

Pri vrtnju predorov v zelo stabilnih in trdnih kamninah zaščita izkopa ni posebej potrebna oziroma je minimalna. Vendar je takih primerov v realnosti zelo malo. V večini primerov je podpiranje izkopa predora nujno in neizogibno. Predvsem to velja za izkope v zemljinah in razpokanih ter nestabilnih kamninah, kjer obstaja velika možnost rušenja. Podpiranje izkopa je nujno tudi pri gradnji predorov na plitvih globinah, posebej v urbanih območjih, saj se tako preprečuje možnost posedanja površine, ki lahko privede tudi do poškodb na stavbah in ostali infrastrukturi. Ostenje predora se pri gradnji z metodo TBM zaščiti z uporabo brizganega betona in armaturnih elementov ali z nameščanjem armirano-betonske segmentne obloge [2].

3. OKOLJSKI VIDIK GRADNJE PREDOROV

Z gradnjo predorov močno posegamo v okolico. Še posebej je to pomembno, če je okolica urbana. S predori dobimo veliko prednosti kot sta na primer hitrejši transport in manjša onesnaženost, vendar po drugi strani lahko dobimo tudi negativne posledice. Ena izmed teh posledic je možnost posedanja tal, zlasti v plitvih predorih ki potekajo v zemljinah (slika 3). Možnost za posedanja obstaja vedno, ne glede na to kakšno metodo uporabljamo pri izkopu. Možnost za prekomerno posedanje tal se je skozi čas zmanjšala, saj se metode za izkop izboljšujejo, vendar nevarnost še vedno obstaja. Na velikost posedanja ima zelo velik vpliv globina, na kateri gradnja predora poteka, ter vrsta materiala v katerem se izkop vrši. Pri večjih globinah predora je posedanje na površini manjše, pri manjših globinah pa večje [2].



Slika 3. Posledice pogrezanja pri gradnji predorov v urbanih območjih [6].

3.1. GRADNJA PREDOROV V URBANIH NASELJIH

Kot smo že predhodno napisali, do posedanja tal lahko pride ne glede na to kakšna metoda se uporablja pri izkopu predora. Posedanje je le ena izmed težav s katerimi se soočamo pri gradnji predorov. Največji problemi s katerimi se srečujemo pri izkopu so poleg pogrezanja tudi vpliv na podzemno vodo (slika 4), ravnanje z izkopnim materialom ter hrup, vibracije in prah, ki ga gradnja predora povzroči.

Z vplivom na podzemno vodo lahko območju na katerem gradnja poteka onemogočimo dostop do pitne vode, kar je na urbanih območjih velik problem. To se lahko zgodi z onesnaženjem podzemne vode ali pa s preusmeritvijo njenega toka zaradi vrtanja na vodonosnih območjih.

S prekomernim hrupom, vibracijami in prahom lahko onesnažimo okolje v katerem izkop poteka. Življenje ljudi in organizmov, ki na tem območju prebivajo, je začasno moteno, kar jim lahko povzroča določene težave. Prav tako je lahko problematičen izkopni material, saj zavzema veliko prostora na površini. V primeru da odvoz tega materiala ni pravilno in pravočasno organiziran, to lahko privede do dodatnih nevšečnosti.

Zaradi naštetega je pomembno, da se ob poseganju v podzemni prostor na urbanih območjih izkop in vsi postopki vezani na gradnjo predora pravilno in natančno načrtujejo ter da se uporablja ustrezna tehnologija gradnje, ki je varna in preverjena [2].



(a)



(b)

Slika 4. Izbruh podzemne vode v izkopni prostor predora.

4. HIPOTEZE

Hipoteza je bila, da se s povečevanjem globine predora maksimalni posedek na površini zmanjšuje, vplivno območje pa povečuje. To hipotezo smo preverjali z eksperimentalnim delom te raziskovalne naloge.

5. PRAKTIČNI DEL

5.1. OSNOVNA IDEJA

Osnovna ideja raziskovalne naloge je bila preveriti vpliv porušitve čela predora na površino v sipkih materialih (peskih) pri različnih globinah predora z uporabo fizičnega modela. To je predvsem pomembno v naseljenih območjih, saj tam pogrezanje lahko predstavlja veliko težavo. Z uporabo fizičnega modela smo hoteli simulirati posedanje tal. Edina težava, s katero smo se srečali pri izvedbi eksperimentalnega dela je bila ta, da je bil pesek s katerim smo izvajali meritve, preveč vlažen. Vlaga peska je vplivala na njegovo kompaktnost in je preprečevala posedanje tal. Problem smo rešili tako, da smo pesek posušili in nato izvedli meritve. Suh pesek je zaradi svoje sipkosti omogočal dobro izvedbo meritev.

5.2. SESTAVA ŠKATLE IN NAŠE CEVI

Škatlo, ki je predstavljala fizični model, je sestavljalo pet lesenih desk (slika 5).



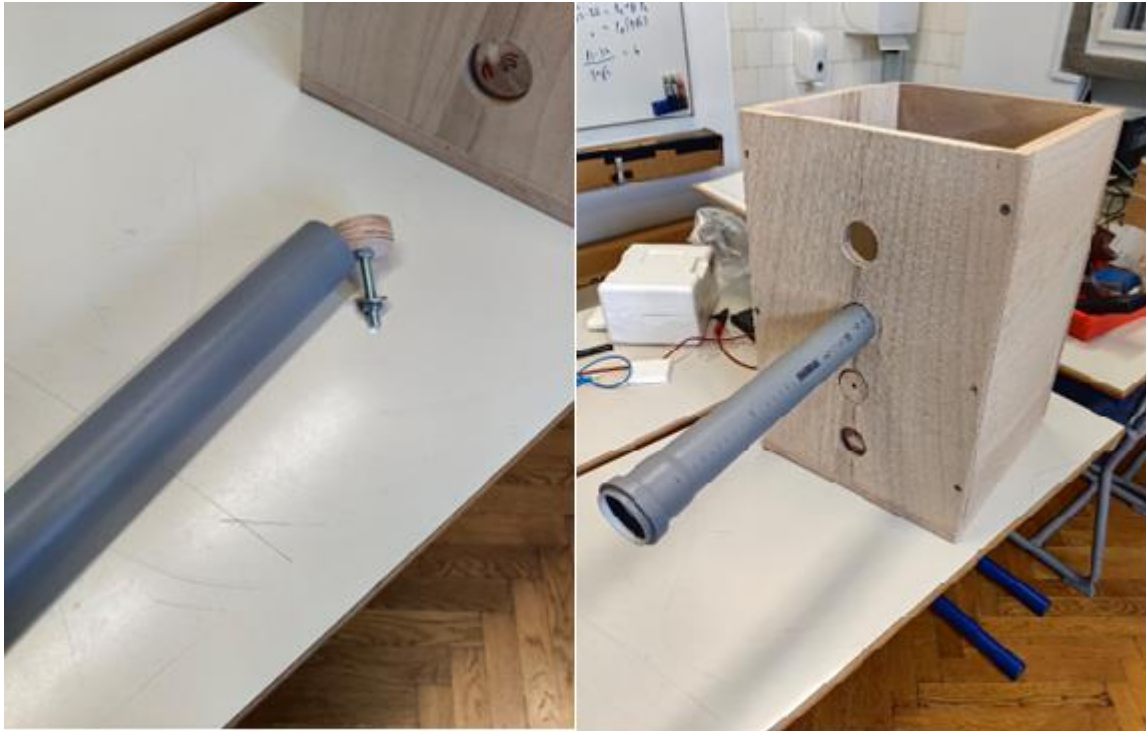
Slika 5: Slika narejenega osnovnega modela.

Škatlo smo sestavljali v šolski delavnici. Izdelava je potekala tako da smo na osnovno desko velikosti 30 x 30 cm postavili in pritrdili stranske deske velikost 30 x 50 cm. Luknje, ki smo jih zvrtili za vstavitev vijakov so bile premera 7 mm. Potem je sledila pritrditev stranskih ploskev. Te smo povezali z vijaki dolžine 4 cm.

Nato je sledilo vrtanje lukenj za cev. Morali smo izvrtati sedem lukenj v dve od štirih stranskih ploskev. Za te luknje sva morala uporabiti kronsko žago za les premera 50 mm.

Središče zgornje in prve luknje je bilo 12,5 cm pod samim vrhom škatle. Luknje oziroma odprtine so bile med seboj po globini oddaljene za en premer cevi, to je 5 cm. Štiri luknje smo tako izvrtali na eni strani škatle, tri pa na drugi strani.

Potem je sledila še izdelava cevi. Uporabili smo vodovodno plastično cev premera 50 mm in jo skrajšali na 20 cm. Za to cev smo naredili tudi čep, ki lepo drsi po notranjosti cevi. V cev smo prvo vstavili distančnik približno 7 cm od konca cevi, ki je bil v notranjosti cevi. Na koncu smo še izdelali čep. Za čep smo uporabili lesen odrezek od kronske žage in vanj pritrdili vijak. Na ta vijak smo privezali vrvico, da smo čep enakomerno izvlekli do zelene točke oziroma do distančnika. S premikom čepa iz konca cevi v njeno notranjost smo med poskusom simulirali porušitev čela predora (slika 6).



Slika 6: Leva slika prikazuje cev, zraven nje pa čep, ki je drsel po notranjosti. Desna slika prikazuje škatlo z izvrtanimi luknjami v katero smo dajali cev s čepom.

5.3. IZBIRA PESKA TER SEJALNA ANALIZA

Material, ki sva ga uporabila za meritev je bil pesek, ki se uporablja na primer za peskovnike. Velikost zrn peska je bila glede na podatke iz embalaže med 0,063 mm ter 1 mm. Pesek sva najprej morala posušiti, saj je bil v vrečah vlažen. Proces sušenja je trajal sedem dni v laboratorijskih prostorih Naravoslovnotehniške fakultete (NTF). Proces sušenja je prikazan na sliki 7.



Slika 7. Prikaz procesa sušenja peska.

Pesek je bilo potrebno vsak dan obračati. S tem smo dobili optimalno vlago oziroma posušen pesek, s katero smo izvajali meritev. Z namenom ugotavljanja granulacijske sestave, sva opravila tudi sejalno analizo peska. Za sejalno analizo sva vzela 200 g vzorca peska. Pri sejanju in manipulaciji se je nekaj vzorca izgubilo, tako da ga je bilo na koncu 199,7 g. Poznamo dve vrsti sejanja – ročno ali z uporabo naprave za sejanje. Ker nismo imela dostopa do naprave, smo sejali ročno. Uporabljali smo sita različnih velikosti, ki smo jih dobila v laboratoriju NTF. Ta sita so prikazana na sliki 8. Rezultate sejalne analize sva prikazala v preglednici 1.

ODPRTINA SITA [mm]	OSTANEK NA SITU [g]	OSTANEK NA SITU [%]	KUMULATIVNI OSTANEK $\Sigma\Delta R$ [%]	KUMULATIVNI PRESEVEK $\Sigma\Delta D$ [%]
1,250	1,879	0,94	0,94	99,06
1,000	5,078	2,54	3,48	96,52
0,800	11,212	5,62	9,10	90,90
0,630	19,645	9,84	18,94	81,06
0,500	17,478	8,75	27,69	72,31
0,375	45,384	22,73	50,42	49,58
0,250	17,546	8,79	59,21	40,79
0,125	51,715	25,90	85,11	14,89
0,000	29,732	14,89	100,00	0,00

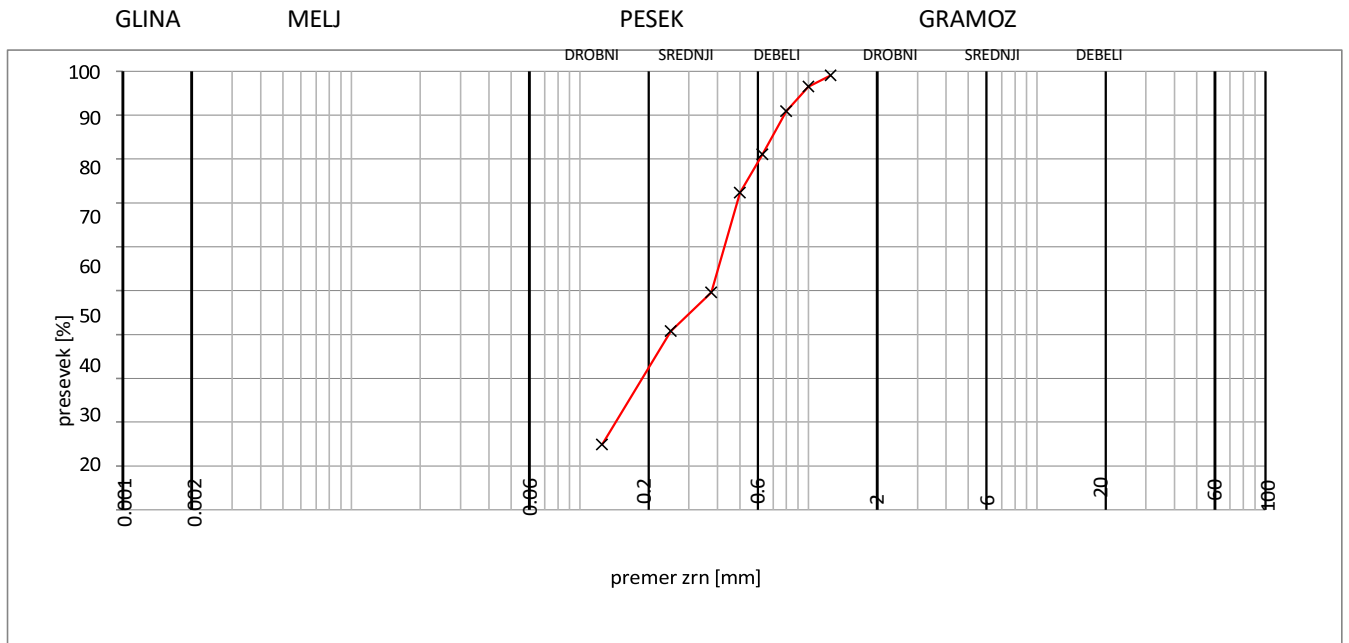
Preglednica 1. Prikaz rezultatov pri sejalni analizi.

Σ 199,7 g 100,00 $\Sigma\Delta D = 100 - \Sigma\Delta R$



Slika 8. Sita za sejalno analizo peska.

S sejalno analizo sva ugotovila velikost delcev peska, ki sva ga uporabljala pri meritvah v fizičnem modelu. Iz preglednice je razvidno, da so zrna peska sestavljena iz veliko različnih velikosti. Rezultati sejalne analize kažejo, da so zrna peska tudi večja od 1 mm. Za lažjo predstavbo sva rezultate sejalne analize uprizorila v grafu 1.



Graf 1. Grafični prikaz sejalne analize.

5.4. MERJENJE IN REZULTATI MERITEV

Pri sami izvedbi poskusa smo uporabljali številne pripomočke. Uporabljali smo zidarske žlice, vedra, kamor smo pretresli suho mivko, vodno tehtnico, kljunasto merilo, meter itd.

Uporabili smo približno 60 kg peska oziroma mivke za otroške peskovnike. Cev je bila najprej vstavljena v določeno odprtino v škatli. Ko smo nasipali mivko do končne višine, ki je bila vsakič enaka, smo površino poravnali s posebej izdelanim lesenim orodjem za ravnanje (slika 10). Nato smo s kljunastim merilom izmerili ničo višino. To je bilo potrebno, da smo lahko kasneje določili posedek peska. Potem smo z vrvico potegnili čep iz konca cevi v njeno notranjost do distančnika. Pri tem smo opazovali, kako se je pesek na površini posedel. S kljunastim merilom smo izmerili novo višino na mestu maksimalnega posedka (slika 9). Od te nove višine smo odšteli ničo višino in dobili dejanski maksimalni posedek peska. Enak postopek smo izvedli za preostale luknje oziroma globine cevi.

Pri opazovanju smo merili tudi vplivno območje posedanja. To smo naredili tako, da smo na ravnini površine pogledali kje vse se je material posedel. Nato smo z zidarskim metrom izmerili dve razdalji v obliki dveh premerov krožnega ali eliptičnega vplivnega območja. Vendar je bilo s povečevanjem globine cevi vse težje odčitati območje posedanja. Prav tako pri sedmi (čisto spodnji) luknji posedek ni bil več viden. Zato smo uporabili le meritve iz šestih globin.



Slika 10. Proces merjenja posedka.



Slika 9. Uporaba pripomočka za ravnanje površine peska..

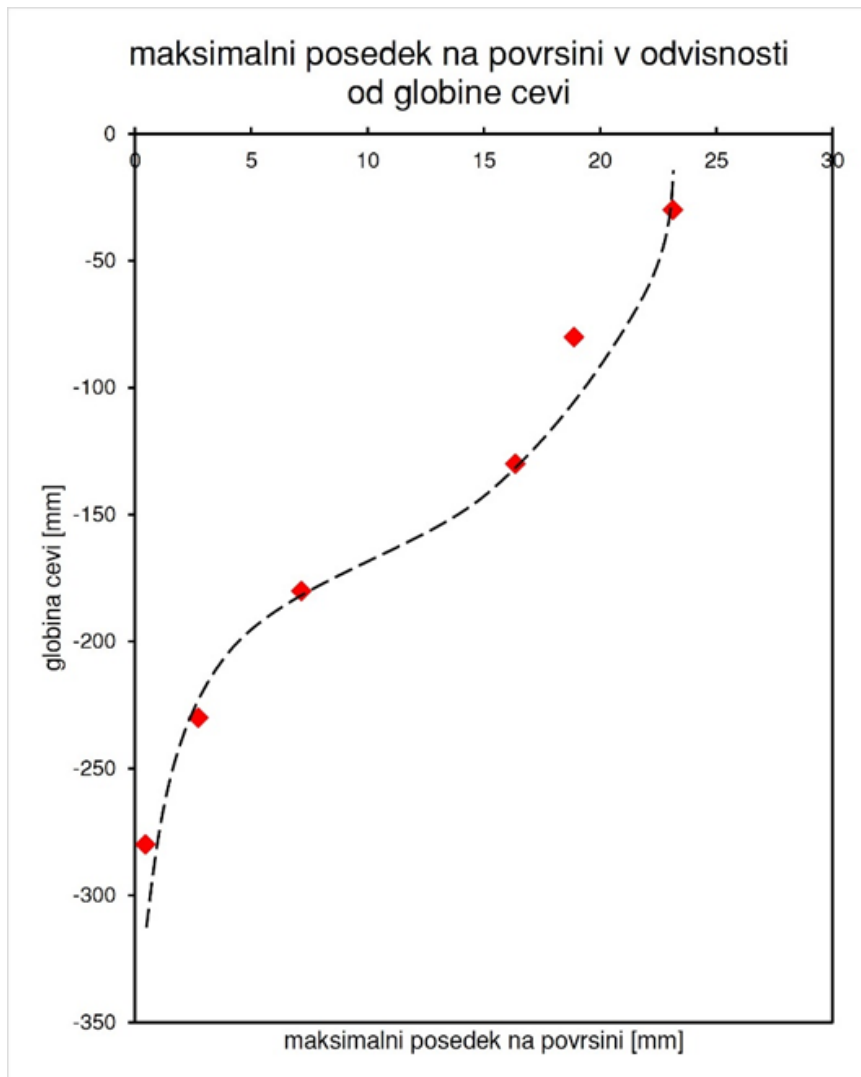
Vse meritve sva potem zapisala v preglednico 2.

	1.meritev	2.meritev	3.meritev	4.meritev	5.meritev	6.meritev
Ničta meritev [mm]	92,34	92,62	93,64	93,42	93,30	94,01
Meritev [mm]	115,48	111,50	110,00	96,40	96,02	94,46
Rezultat [mm]	23,14	18,88	16,36	2,98	2,72	0,45
Oddaljenost od površine [mm]	30,00	80,00	130,00	180,00	230,00	280,00

Preglednica 2. Prikaz rezultatov meritev.

Kot je razvidno iz preglednice 2, se maksimalni posedek peska na površini zmanjšuje z večanjem oddaljenosti cevi od površine oziroma s povečevanjem globine. To smo tudi pričakovali in pri tem poskusu smo to potrdili. Ko je bila cev najbližje površini, se je pesek namreč posedel za 23,14 mm. Ko pa je bila cev na najnižji merljivi globini, pa je bil posedek peska le še 0,45 mm.

Vse te meritve smo predstavili v grafu 2. Meritve so v grafu 2 prikazane z rdečimi oznakami. Očitno je, da maksimalni posedek na površini v odvisnosti od globine cevi ni linearna funkcija. S črno črtkano črto smo narisali možno predpostavljeno obliko krivulje. Za večjo gotovost bi morali opraviti več meritev, tudi na dodatnih vmesnih globinah.



Graf 2. Prikaz rezultatov meritev.

Sedaj pa si pogledjmo še območje poseda. Ko smo imeli cev postavljeno najbližje površini, se je pesek posekel za 23,14 mm. Območje posedka je imelo obliko elipse z velikostjo premera osi 60 mm in 70 mm.

S postavitvijo cevi vedno globlje se je območje posedanja povečalo, maksimalni posedek pa zmanjšal. Območje posedanja je bilo zaradi razširjenosti že pri četrti meritvi (na 4. globini) nemogoče določiti.

6. PRIMER IZ VSAKDANJEGA ŽIVLJENJA

V našem vsakdanjem življenju se konstantno srečujemo s predori. Za najin primer iz vsakdanjega življenja sva uporabila predor Markovec. Nahaja se na Primorskem v bližini Kopra. Je sestavni del avtocesta A1 ter povezuje primorski del Slovenije z njeno notranjostjo. Zaradi ustrezne dolžine predora (5,2 km) je za izkop bila tudi uporabljena TBM metoda. Uporaba TBM metode je omogočila hiter ter učinkovit izkop. Za podporo tunela so uporabili obrizgan beton, ki je dodal moč strukturi tunela. Predor je bil pomemben za izboljšanje Slovenske infrastrukture. Namen tega projekta je izboljšati pretočnost prometa, zmanjšati zastoje in zagotoviti varnost v cestnem prometu, s čim so to tudi dosegli.

Ker je v Švici podzemna infrastruktura ter uporaba TBM najbolj razvita sva si tudi pogledala Gotthardski predor, ki je dolg 57 kilometrov. Gotthardski predor je dvojni železniški predor. Nahaja se v švicarskih Alpah. Gradili so ga v obdobju med 1996 ter 2016. Namen izgradnje predora je bil povečati kapaciteto železniških prevozov preko Alp, predvsem pa je služil za tovarni promet med Nemčijo in Italijo. Z izgradnjo predora so zmanjšali okoljsko škodo, saj so tovarni promet preusmerili iz cest na železnice. Predor je ključna povezava za evropsko železniško omrežje, zagotavljajoč hitre in učinkovite prevozne povezave med severno in južno Evropo.

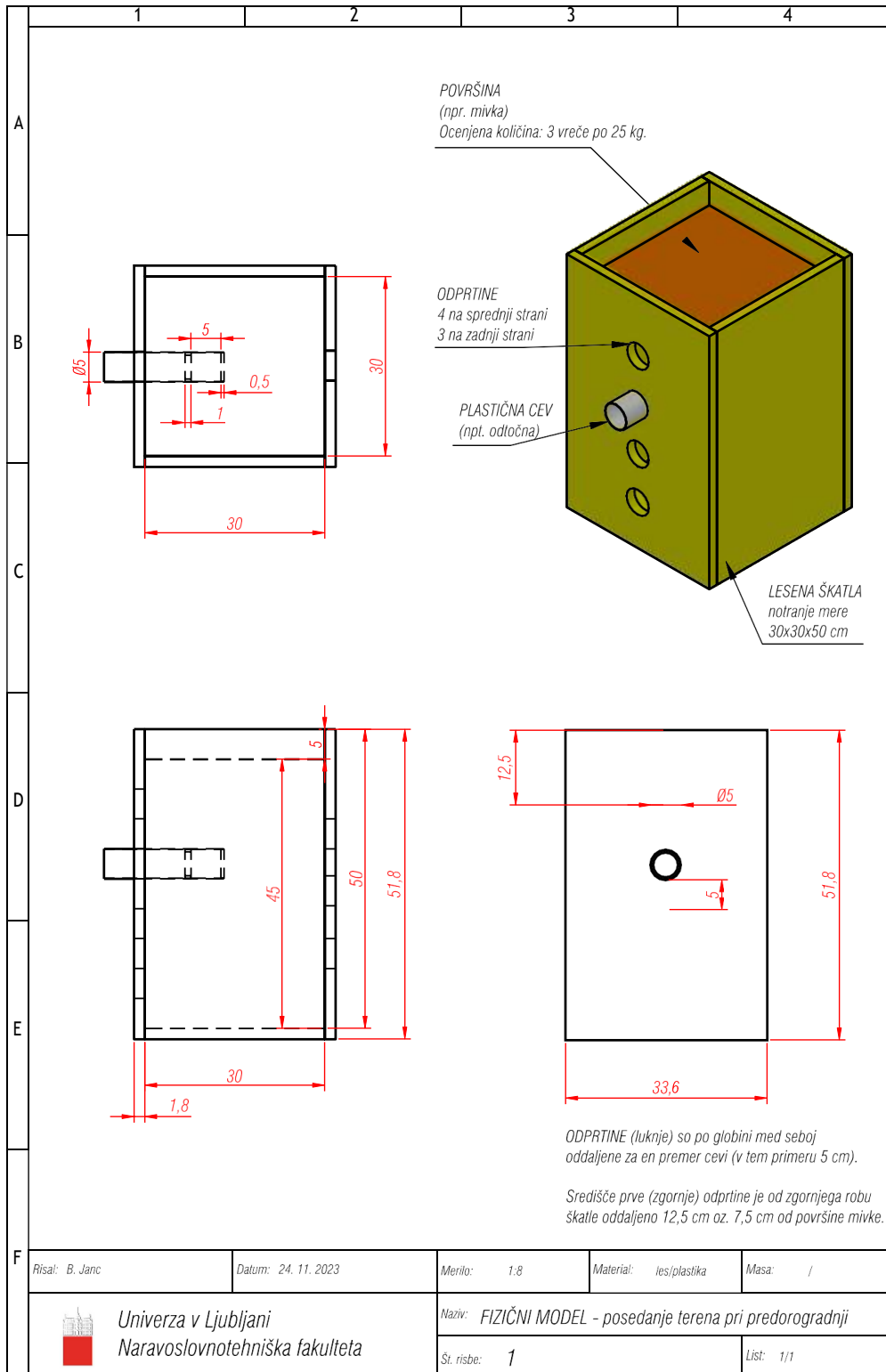
7. SKLEP

Z najino raziskovalno nalogo sva potrdila zastavljeno hipotezo, da se bo z globino izkopa predora maksimalni posedek na površini zmanjšal, območje posedanja pa povečalo. Pri tem sva tudi raziskala različne tehnike gradnje predorov ter podrobneje preučila metodo TBM z uporabo predorskega vrtalnega stroja, ki je najbolj razširjena pri gradnji predorov v urbanih okoljih. Eksperimentalni del najine raziskovalne naloge ima veliko možnosti za praktični prikaz posedanja, poleg tega pa omogoča tudi nadaljnjo nadgradnjo z ustreznimi pripomočki. Fizični model bi se lahko uporabljalo za simulacije v primeru porušitve pri gradnji predorov v sipkih materialih. Raziskovalno nalogo bi lahko nadgradila z menjavo materiala, tako da bi uporabila primerljiv material, ki ustreza talni sestavi na določenem območju potencialne gradnje predora. Nadgradila bi jo lahko tudi z izdelovanjem modela, ki bi bil narejen v ustreznih geometrijskih razmerjih določenega predora.

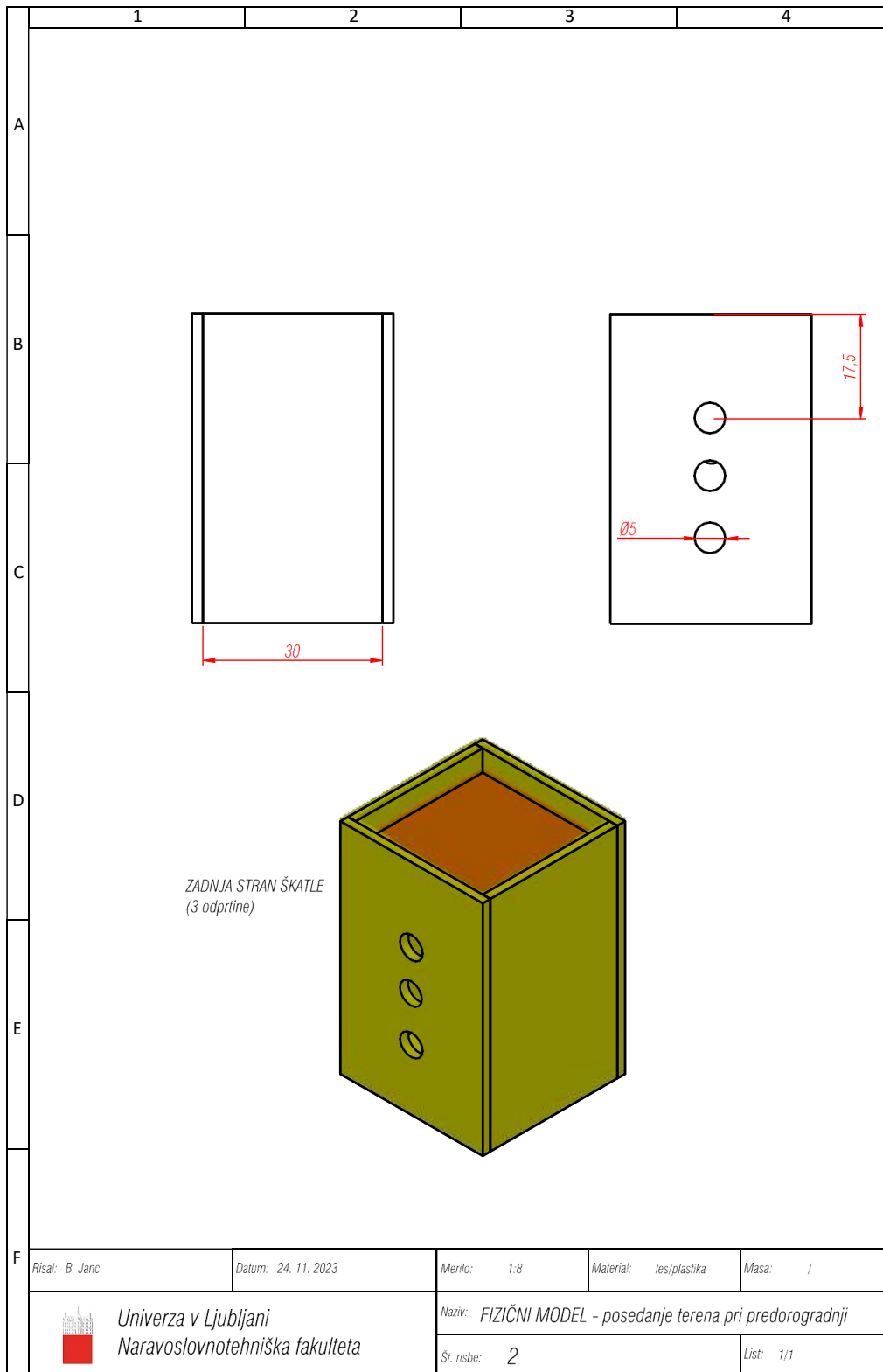
8. LITERATURA

- [1] B. Makovšek, *Izdelovanje podzemnih prostorov, predorov in jaškov* (Center RS za poklicno izobraževanje, Ljubljana, 2014)
- [2] B. Volk, *Uporaba TBM tehnologije pri gradnji predorov in ocena vplivov na okolje*, (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – magistrsko delo, Ljubljana, 2016)
- [3] Structurae (2016), <https://structurae.net/en/media/255016-excavation-in-accordance-with-the-new-austrian-tunnelling-method-natm> [ogled 20. 2. 2024]
- [4] D. Nikić, *Tehnologija izkopa predorov* (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo – diplomsko delo, Maribor, 2011)
- [5] World Largest Class TBM, <https://ugitec.co.jp/en/products/largest/> [ogled 22. 2. 2024]
- [6] V. Kontogianni, S. C. Stiros, *Ground Loss and Static Soil-Structure Interaction during Urban Tunnel Excavation: Evidence from the Excavation of the Athens Metro* (Infrastructures 2020, **5(8)**, 64)

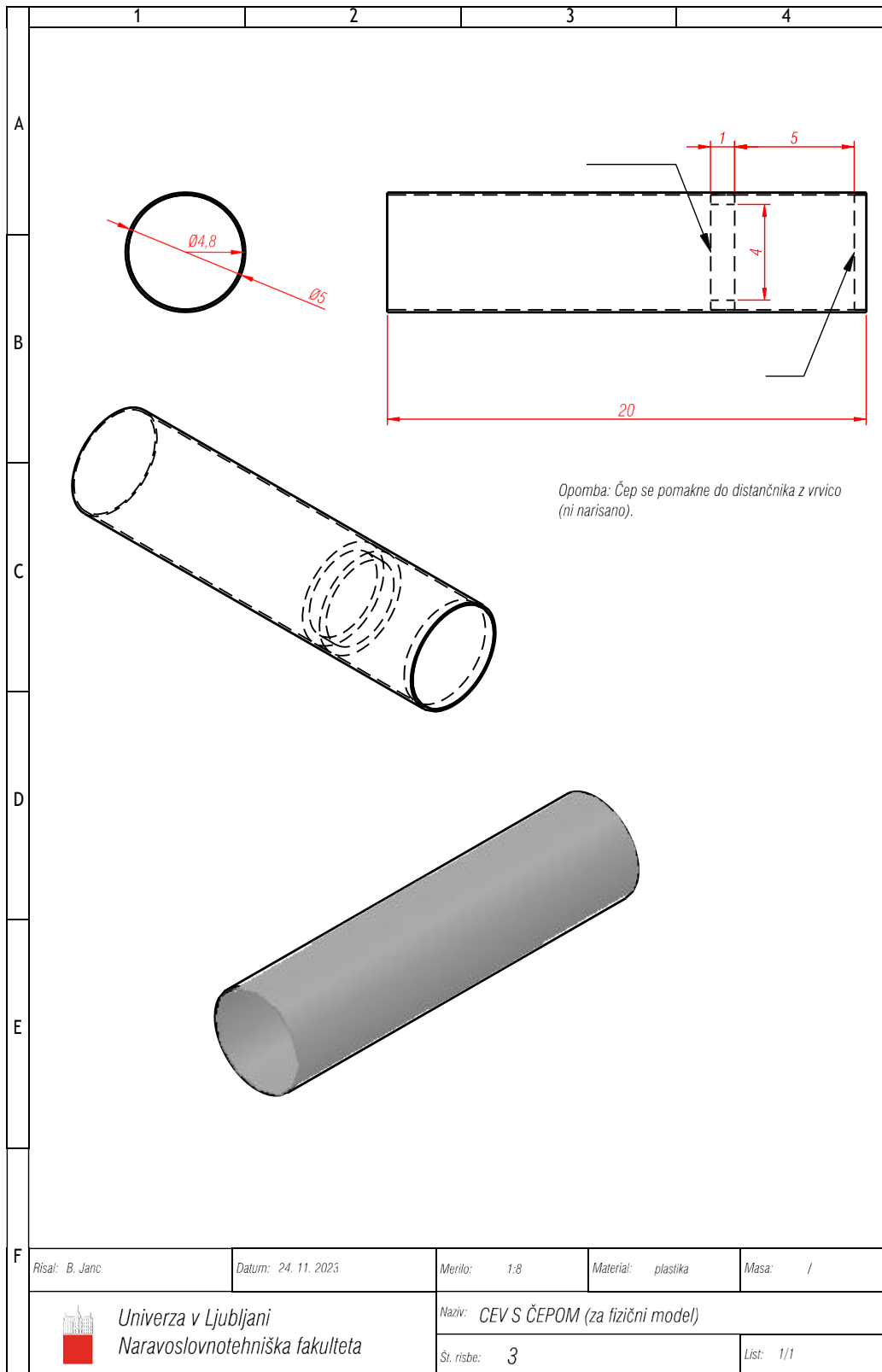
9. PRILOGE



Priloga 1. Načrt izdelave modela s sprednje strani.



Priloga 2. Načrt izdelave modela z zadnje strani.



Priloga 3. Načrt cevi z distančnikom oziroma blokado.