

# Deformabilnost mehaničko-biološki obrađenog komunalnog otpada

---

**Petrović, Igor; Szavits-Nossan, Vlasta; Kovačić, Davorin**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2011, 63, 255 - 264**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:776478>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Deformabilnost mehaničko-biološki obrađenog komunalnog otpada

Igor Petrović, Vlasta Szavits-Nossan, Davorin Kovačić

## Ključne riječi

mehaničko-biološki obrađeni otpad, mehanička svojstva, stišljivost, konsolidacija, propusnost, veliki edometar

## Key words

biomechanically treated waste, mechanical properties, compressibility, consolidation, permeability, big-size oedometer

## Mots clés

déchets soumis au traitement biomécanique, propriétés mécaniques, compressibilité, consolidation, perméabilité, grand oedomètre

## Ключевые слова

отходы, прошедшие механико-биологическую обработку, механические свойства, сжимаемость, консолидация, проницаемость, крупный эдометр

## Schlüsselworte

mechanisch - biologisch bearbeiteter Abfall, mechanische Kennzeichen, Verdichtbarkeit, Konsolidierung, Durchlässigkeit, grosser Oedometer

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Kovačić

Prethodno priopćenje

## Deformabilnost mehaničko-biološki obrađenog komunalnog otpada

Prikazana su ispitivanja mehaničkih svojstava mehaničko-biološki obrađenog (MBO) komunalnog otpada koja se bitno razlikuju od tih svojstava neobrađenog komunalnog otpada. Dani su rezultati ispitivanja stišljivosti, konsolidacije i propusnosti MBO otpada provedena u novom velikom edometru domaće proizvodnje. Uz podatke o vlastitim rezultatima istraživanja autori su dali i pregled objavljenih rezultata istraživanja drugih autora. Usporedba je pokazala dobro slaganje rezultata.

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Kovačić

Preliminary note

## Deformability of municipal waste after biomechanical treatment

The testing of mechanical properties of municipal waste subjected to biomechanical treatment is presented. These properties differ significantly from properties of municipal waste prior to such treatment. Results obtained by subjecting the biomechanically treated waste to the compressibility, consolidation and permeability testing, as conducted in the new big domestically-produced oedometer, are given. In addition to information about their own test results, the authors also present test results published by other authors. The comparison has revealed a good correspondence of results.

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Kovačić

Note préliminaire

## La déformabilité des déchets communaux suite au traitement biomécanique

Les essais des propriétés mécaniques des déchets communaux soumis au traitement biomécanique sont présentée. Ces propriétés diffèrent de manière considérable des propriétés des déchets communaux avant ce traitement. Les résultats obtenus en soumettant ces déchets aux essais de compressibilité, consolidation et perméabilité, et cela dans le nouveau grand oedomètre produit dans le pays, sont présentés. En plus de l'information sur les résultats de leurs propres essais, les auteurs présentent également les résultats des essais publiés par d'autres auteurs. La comparaison a montrée une bonne correspondance des résultats.

И. Петрович, В. Сзавитс-Носсан, Д. Ковачич

Предварительное сообщение

## Деформабильность бытовых отходов, прошедших механико-биологическую обработку

Показаны испытания механических свойств бытовых отходов, прошедших механико-биологическую обработку (МБО), которые значительно отличаются от свойств необработанных бытовых отходов. Приведены результаты испытаний отходов, прошедших механико-биологическую обработку, на сжимаемость, консолидацию и проницаемость. Испытания проводились в новом крупном эдометре отечественного производства. Помимо результатов собственных исследований авторами приведен обзор опубликованных результатов исследований других авторов. Сравнение показало хорошее совпадение результатов.

I. Petrović, V. Szavits-Nossan, D. Kovačić

Vorherige Mitteilung

## Verformbarkeit des mechanisch - biologisch bearbeiteten Kommunalabfalls

Dargestellt sind Untersuchungen der mechanischen Kennzeichen mechanisch - biologisch bearbeiteten (MBB) Kommunalabfalls die sich wesentlich von diesen Kennzeichen des unbearbeiteten Kommunalabfalls unterscheiden. Vorgelegt sind Ergebnisse der Untersuchung der Verdichtbarkeit, Konsolidierung und Durchlässigkeit des MBB Abfalls im neuen grosse Oedometer einheimischer Herstellung. Neben den Angaben eigener Untersuchungsergebnisse geben die Verfasser auch einen Überblick der veröffentlichten Untersuchungsergebnisse anderer Verfasser. Der Vergleich zeigte gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Autori: Prof. dr. sc. **Vlasta Szavits-Nossan**, dipl. ing. mat., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb; dr. sc. **Igor Petrović**, dipl. ing. geot.; prof. dr. sc. **Davorin Kovačić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet

## 1 Uvod

Prema odredbi Pravilnika o načinima i uvjetima odlaganja otpada [1], a u skladu s Direktivom 99/31/EZ o odlagalištu otpada [2], na odlagališta otpada dopušteno je odlaganje samo prethodno obrađenog otpada. Na temelju Plana za gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje od 2007.-2015. godine [3], također je prepoznata potreba za obradom komunalnog otpada prije njegova odlaganja, pri čemu je upravo mehaničko-biološka obrada (MBO) najčešće planirana tehnologija obrade komunalnog otpada u nacrtima županijskih planova gospodarenja otpadom. Time se nameće potreba za poznavanjem mehaničkih parametara MBO otpada, kako bi bilo moguće osigurati integritet i stabilnost zaštitnih slojeva odlagališta, stabilnost njegovih privremenih i trajnih pokosa, stabilnost sustava za otplinjavanje i sl. Ovdje valja napomenuti da kod nas još uvijek ne postoji nijedno postrojenje za mehaničko-biološku obradu otpada, a time ni iskustvo u laboratorijskom ispitivanju MBO otpada.

Stoga je, u sklopu znanstvenoistraživačkog projekta «Karakterizacija krutog komunalnog otpada», na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (voditelj projekta: prof. dr. sc. Davorin Kovačić) pokrenuta izrada velikog edometra u kojem je moguće ispitivati stišljivost MBO komunalnog otpada. Kao što je opisano u prethodnom članku [4], za potrebe ispitivanja stišljivosti MBO otpada, a na temelju suglasnosti Ministarstva zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, uzorci MBO otpada uvezeni su s odlagališta MBO otpada iz Republike Austrije. Uvezeni su uzorci prosušeni na zraku i nakon dva tjedna sušenja određen je udio vode koji je iznosio 7 %. Granulometrijski sastav [4] pokazao je da je ispitivani MBO otpad dobro građurani krupnozrnati materijal širokog raspona veličine zrna i maksimalne veličine zrna 30 mm × 20 mm. Gustoća čestica ispitivanog MBO otpada  $\rho_s$ , određena na uzorcima veličine zrna do 4,75 mm, iznosila je 2,147 g/cm<sup>3</sup>.

Pokusi stišljivosti provedeni su na tri uzorka MBO otpada koji su pripremljeni tako da su za poznati obujam edometarske ćelije, poznatu gustoću čestica otpada i proračunski udio vode uzoraka od 7 % proračunane ukupne mase potrebnog otpada i mase vode za različite udjele vode uzoraka pri ugradnji. U uzorcima je udio vode iznosio za prvi uzorak 65 %, za drugi uzorak 31 %, a za treći uzorak 45 % [4].

U ovom članku prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja karakteristika stišljivosti, konsolidacije i propusnosti mehaničko-biološki obrađenoga komunalnog otpada. Na osnovi edometarskog modula i indeksa stišljivosti može se prognozirati veličina slijeganja u tijelu odlagališta, što onda može služiti za procjenu integriteta

pokrovnog sustava. Pokrovni sustav može, naime, biti podvrgnut znatnim vlačnim naprezanjima zbog pojave diferencijalnih slijeganja te time podložan oštećenjima.

Na osnovi koeficijenta konsolidacije može se prognozirati vremenski tijek onog dijela slijeganja u tijelu odlagališta koji se odnosi na deformacije zbog promjene efektivnih naprezanja. Ovim se koeficijentom ne može prognozirati vremenski tijek slijeganja koji će se ostvariti zbog razgradnje organskog otpada u tijelu odlagališta. Koeficijent propusnosti neizravno je određen iz koeficijenta konsolidacije. Poslužio je za usporedbu dobivenih vrijednosti s objavljenim vrijednostima drugih autora. Tamo gdje je bilo moguće, prikazani su rezultati drugih autora i za ostale karakteristike MBO otpada. Pokazuje se da se dobiveni rezultati dobro uklapaju u raspone objavljenih vrijednosti.

Budući da je krajnji cilj MBO otpada smanjenje volumena otpada koji je potrebno odložiti na odlagalište, interes investitora za ove tehnologije je neupitan. Osim produženog vijeka trajanja odlagališta zbog smanjenja volumena otpada, treba naglasiti da MBO otpad posjeduje i bolja mehanička svojstva od neobrađenoga otpada što projektiranje nasipa od MBO otpada čini znatno pouzdanijim. Redukcija volumena i bolja mehanička svojstva MBO otpada glavni su čimbenici koji potiču istraživanja ovog tipa i opravdavaju radove o ovoj temi.

## 2 Ispitivanje uzoraka MBO otpada

Standardizirani postupci za ispitivanje parametara stišljivosti, konsolidacije i koeficijenta propusnosti MBO otpada ne postoje pa rezultati uvelike ovise o postupcima ispitivanja koje su primjenjivali pojedini istraživači. Budući da je MBO otpad vizualnim izgledom i granulometrijskim sastavom nalik krupnozrnatom tlu, uputno je pri ispitivanju geotehničkih karakteristika MBO otpada rukovoditi se praksom i standardiziranim postupcima koji se primjenjuju za ispitivanje tla. U ovom su se istraživanju uglavnom slijedile preporuke norme BS 1377: Part 5: 1990.

### 2.1 Stupanj zasićenosti

Osnovni geotehnički parametri za sva tri uzorka prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Osnovni geotehnički parametri ugrađenih uzoraka

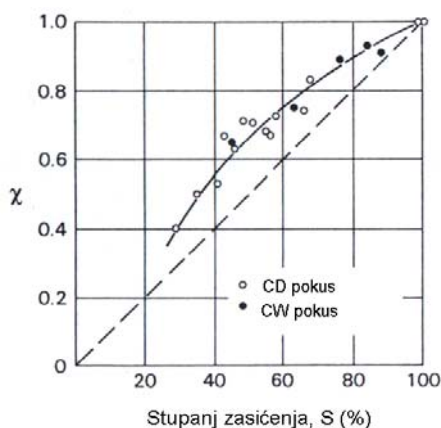
Uzorak	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	w [%]	$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$e_0$	S [%]
1.	1366	65	828	2147	1,59	88
2.	1093	31	834	2147	1,57	42
3.	1350	45	931	2147	1,31	74

Iz tablice 1. vidljivo je da su pripremljeni uzorci bili nezasićeni što je posebno naglašeno za drugi uzorak. Za nezasićene uzorke efektivna naprezanja ne ovise samo o tlaku vode u porama, već i o tlaku zraka u porama prema sljedećem izrazu:

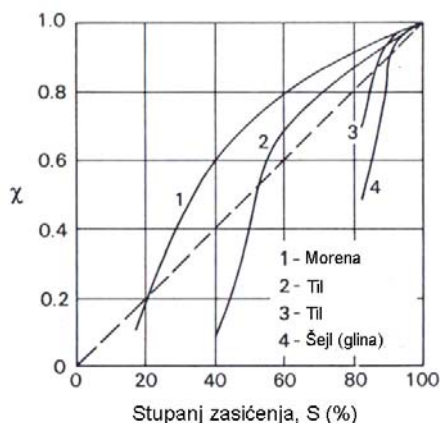
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)$$

gdje je  $u_a$  tlak zraka,  $u_w$  tlak vode u porama tla, a parametar  $\chi$  je povezan sa stupnjem zasićenja uzorka.

Kada je  $\chi = 1$  ovaj se izraz transformira u poznati izraz za efektivna naprezanja u tlu:  $\sigma' = \sigma - u_w$  koji vrijedi za potpuno zasićene uzorke. Na slikama 1. i 2. prikazan je odnos parametra  $\chi$  i stupnja zasićenosti za razne materijale. Iz prikazanih se slika vidi da za morenu (materijal koji se sastoji od razdrobljenih stijena različitih dimenzija - od sitne prašine do blokova) i prah, pri stupnju zasićenosti od 88 %,  $\chi$  približno iznosi 0,95, dok je za stupanj zasićenosti od 74 %  $\chi$  približno 0,85. Iako, iz dostupne literature, nije pronađen odnos parametra  $\chi$  i stupnja zasićenosti za krupnozrnato tlo, pretpostavljeno je da ovako velike vrijednosti parametra  $\chi$  čine utjecaj tlaka zraka na efektivna naprezanja dovoljno malim da ga se može zanemariti.



Slika 1. Odnos parametra  $\chi$  i stupnja zasićenja za prah [5]



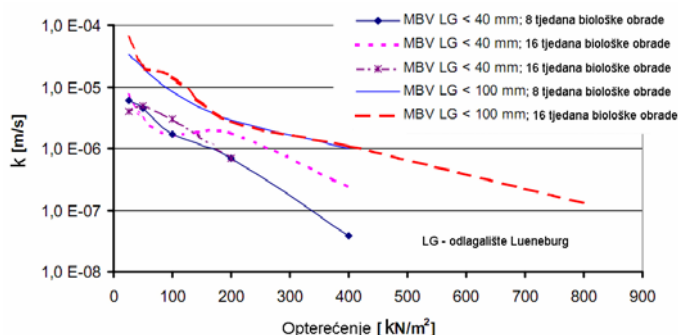
Slika 2. Odnos parametra  $\chi$  i stupnja zasićenja za morenu, til i šejl [6]

Nadalje, vrijednost drugog dijela izraza za efektivna naprezanja u nezasićenim uvjetima, odnosno vrijednost usisa ( $u_a - u_w$ ) obrnuto je proporcionalna radijusu kapilara koje se nalaze u uzorku. Za krupnozrnate materijale, kakav je i razmatrani MBO otpad, radijus kapilara je, u odnosu na sitnozrnate materijale, velikih dimenzija tako da ovaj dio izraza ima mali utjecaj na ukupna efektivna naprezanja. Tako su, za interpretaciju rezultata prvog i trećeg uzorka, ovi uzorci tretirani kao potpuno zasićeni, dok za drugi uzorak to nije bilo moguće pretpostaviti. Stoga se drugi uzorak neće rabiti za interpretaciju rezultata pokusa koji se odnose na indeks stišljivosti, koeficijent konsolidacije te koeficijent vodopropusnosti.

## 2.2 Završetak primarne konsolidacije i inkrementi opterećenja

Prema istraživanju koje su proveli Doedens i dr. [7], koeficijent propusnosti MBO otpada s najvećim zrnom od 40 mm, pri rasponu opterećenja od 25 kN/m<sup>2</sup> do 400 kN/m<sup>2</sup>, kreće se u granicama od 10<sup>-5</sup> m/s do 10<sup>-8</sup> m/s (slika 3.).

Očitavanja približnih vrijednosti koeficijentata propusnosti sa slike 3., pri opterećenjima od 50, 100, 200 i 400



Slika 3. Ovisnost koeficijenta propusnosti o efektivnim naprezanjima [7]

kN/m<sup>2</sup>, prikazana su u tablici 2. Ista tablica prikazuje i srednje vrijednosti edometarskog modula pri opterećenjima od 50, 100, 200 i 400 kN/m<sup>2</sup> određenih na osnovi edometarskog modula MBO otpada koje je objavio Kuehle-Weidemeier [8], a prikazani su u poglavlju 3.1.1, tablica 6. Na osnovi ovih vrijednosti može se i izrazom

$$c_v = \frac{k_{zasiceno} \cdot M_{v,srednje}}{\gamma_w}$$

proračunati odgovarajuća vrijednost koeficijenta konsolidacije MBO otpada za pripadajuća opterećenja. Proračunani koeficijenti konsolidacije prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Proračunane vrijednosti koeficijena konsolidacije

Opterećenje [kN/m <sup>2</sup> ]	M <sub>v,srednje</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	Koeficijent propusnosti [m/s]	Koeficijent konsolidacije [m <sup>2</sup> /s]
0- 50	792	≈ 7×10 <sup>-6</sup>	5,5×10 <sup>-4</sup>
50-100	1412	≈ 2×10 <sup>-6</sup>	2,8×10 <sup>-4</sup>
100-200	1898	≈ 8×10 <sup>-7</sup>	1,5×10 <sup>-4</sup>
200-400	2960	≈ 6×10 <sup>-8</sup>	1,8×10 <sup>-5</sup>

Ako se sada, na osnovi izraza koji slijedi iz metode korijena vremena, odnosno Taylorove metode

$$0,848 = \frac{c_v \cdot t_{90}}{d^2}$$

proračuna, prema podacima iz tablice 2., vrijeme potrebno da se u obostrano dreniranom uzorku, visine 20 cm, ostvari 90 % primarne konsolidacije (t<sub>90</sub>), može se procijeniti potrebno vrijeme trajanja pojedinog inkrementa opterećenja. Proračunane vrijednosti prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Vrijeme potrebno da se u obostrano dreniranom uzorku, visine 20 cm, ostvari 90 % primarne konsolidacije

Koeficijent konsolidacije [m <sup>2</sup> /s]	Opterećenje [kN/m <sup>2</sup> ]	Vrijeme potrebno za 90 % primarne konsolidacije [s]
5,5×10 <sup>-4</sup>	0- 50	15,4
2,8×10 <sup>-4</sup>	50-100	30,3
1,5×10 <sup>-4</sup>	100-200	56,5
1,8×10 <sup>-5</sup>	200-400	471,1

Iz tablice 3. vidi se da je potrebno kratko vrijeme za ost-

varivanje 90 % konsolidacije te je odlučeno da će svaki inkrement opterećenja na uzorku ostati 24 sata, kao u standardnom edometarskom pokusu, što je dovoljno za ostvarivanje primarne konsolidacije.

Početno opterećenje krutom pločom za prijenos inkremenata opterećenja na uzorak iznosilo je 4,7 kN/m<sup>2</sup>. Inkrementi opterećenja iznosili su kako slijedi: 0-36, 36-82, 82-180 i 180-365 kN/m<sup>2</sup>. Pri opterećenju od 180 kN/m<sup>2</sup>, uzorak je rasterećen i ponovno opterećen da bi se dobile karakteristike rekompresije za edometarsku krivulju.

### 3 Rezultati

Izgled uzorka na kraju edometarskog pokusa prikazan je na slici 4.

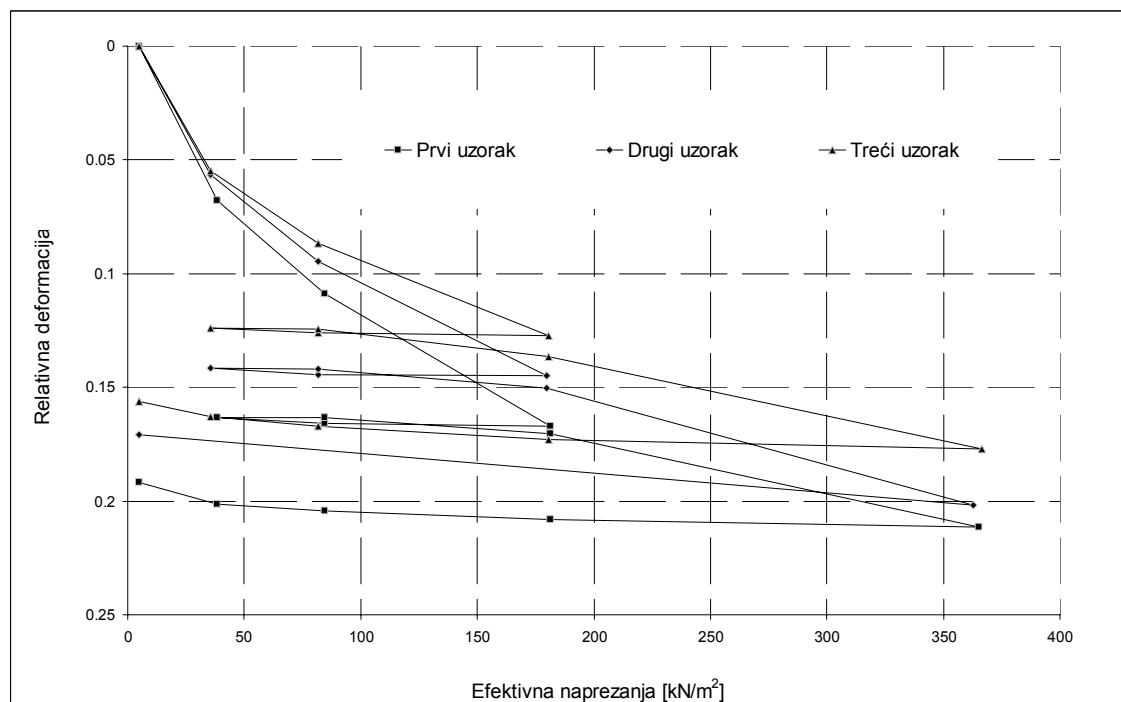


Slika 4. Uzorak otpada u edometarskoj ćeliji nakon završenoga pokusa

#### 3.1 Karakteristike stišljivosti

##### 3.1.1 Edometarski moduli

Na slici 5. prikazane su krivulje ε<sub>1</sub> – σ' za sva tri uzorka, uz napomenu da za drugi uzorak nije poznata točna vrijednost efektivnih napreznja. U tablici 4. prikazani su dobiveni sekantni edometarski moduli (M<sub>v</sub>) svih triju



Slika 5. Krivulje efektivnih napreznja i relativnih deformacija za sva tri uzorka

uzoraka ispitivanog MBO otpada. Radi lakše usporedbe s rezultatima drugih istraživača moduli stišljivosti prikazani su za uobičajene inkremente opterećenja (0-50, 50-100, 100-200 i 200-365 kN/m<sup>2</sup>). U tablici 5. prikazani su dobiveni sekantni edometarski moduli također za uobičajene dekremepte opterećenja.

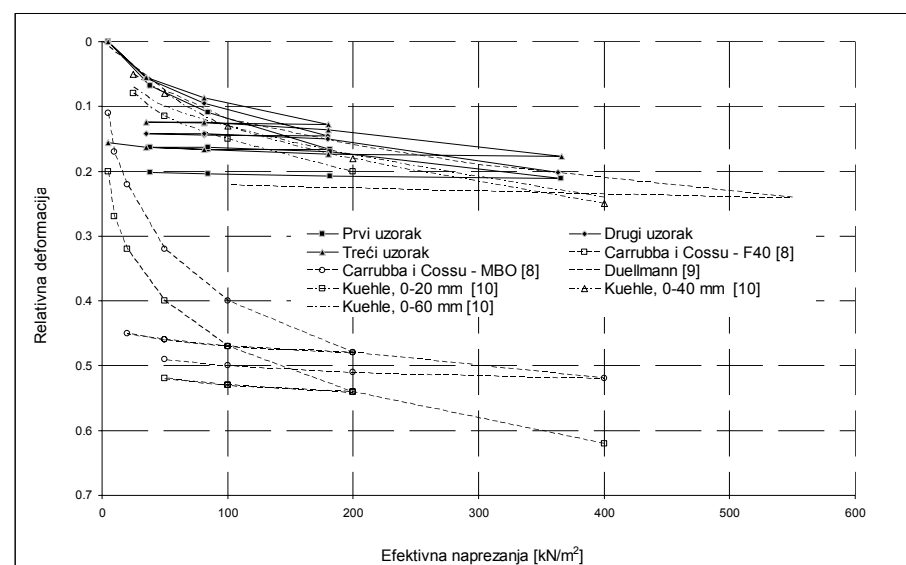
Tablica 4. Edometarski moduli za pojedine inkremente opterećenja

Raspon opterećenja	4,7-50 [kN/m <sup>2</sup> ]	50-100 [kN/m <sup>2</sup> ]	100-200 [kN/m <sup>2</sup> ]	200-365 [kN/m <sup>2</sup> ]
1. uzorak	566	1190	1515	3666
2. uzorak	657	1316	1639	2860
3. uzorak	686	1613	1961	3722

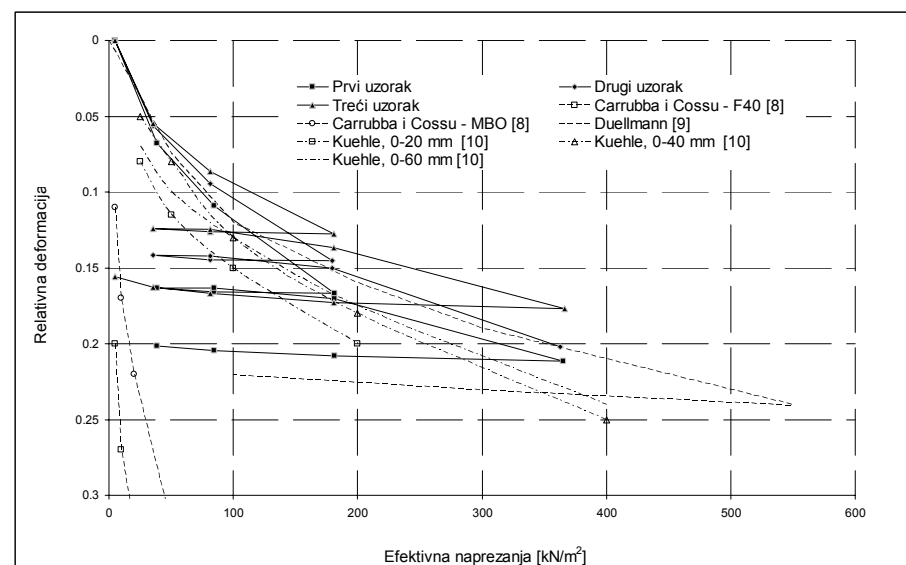
Tablica 5. Edometarski moduli za pojedine dekremepte opterećenja

Raspon rastereć.	365-200 [kN/m <sup>2</sup> ]	200-100 [kN/m <sup>2</sup> ]	100-50 [kN/m <sup>2</sup> ]	50-4,7 [kN/m <sup>2</sup> ]	365-4,7 [kN/m <sup>2</sup> ]
1. uzorak	41250	33333	25000	3775	-
2. uzorak	-	-	-	-	9075
3. uzorak	36087	16667	10000	5033	-

Na slici 6. prikazan je sumarni dijagram  $\varepsilon_1 - \sigma'$  koji uključuje krivulje  $\varepsilon_1 - \sigma'$  nekoliko autora i krivulje  $\varepsilon_1 - \sigma'$  dobivene u sklopu ovog istraživanja, a na slici 7. prikazan je uvećani dio slike 6. Na slici 7. vidi se da su relativne deformacije uzoraka na kojima se obavljalo istraživanje istog reda veličine kao i relativne deformacije



Slika 6. Krivulje efektivnih napreznja i relativnih deformacija MBO otpada (F-40 sastojao se od 60 % MBO otpada i 40 % otpadnog mulja) iz vlastitih istraživanja i iz literature



Slika 7. Uvećani detalj slike 6. (gornji dio)

koje su postigli drugi istraživači ispitujući uzorke MBO otpada s raznih odlagališta MBO otpada u Republici Njemačkoj. U ove se rezultate ne uklapa istraživanje Carrubbe i Cosua [9] (slika 6.), koji su ispitali uzorke MBO otpada iz Italije. Nadalje, važno je uočiti da sva istraživanja MBO otpada u edometru pokazuju njegovo elastoplastično ponašanje. Edometarski moduli MBO otpada iz literature prikazani su u tablici 6.

Usporedbom vrijednosti edometarskih modula iz tablica 4. i 6. može se zaključiti da se, za uobičajene inkremente opterećenja od 0 – 50 (25-50), 50 – 100 i 100 – 200 kN/m<sup>2</sup>, dobivene vrijednosti dobro uklapaju u raspon vrijednosti drugih istraživača. Za inkrement opterećenja od 200 – 365 kN/m<sup>2</sup> ovim su istraživanjem dobivene nešto veće vrijednosti edometarskih modula u odnosu na Bidlingmaiera i dr. [10] te Kuehle-Weidemeiera [8], iako je, prema Duellmannu [11] i Ziehmannelu [12], za taj inkrement opterećenja moguće dobiti i veću vrijednost edometarskih modula.

Također treba napomenuti da osim Bidlingmaiera i dr. [10] nijedan autor nije izvjestio o početnom stupnju zasićenja ispitivanih uzoraka tako da za većinu objavljenih rezultata ostaje nejasno jesu li dobiveni na uzorcima koji su bili potpuno zasićeni ili

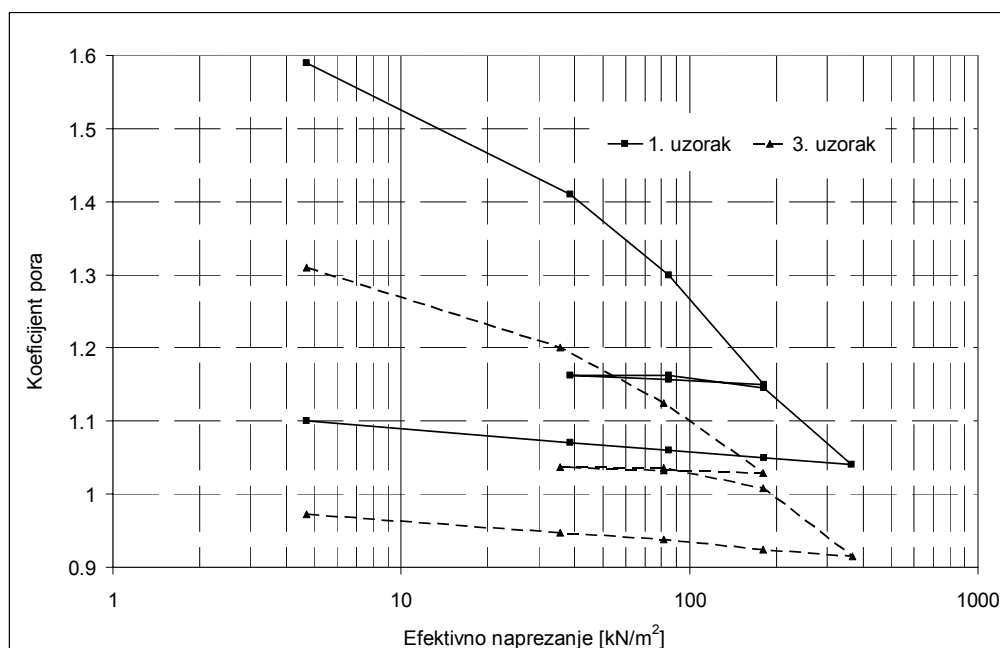
Tablica 6. Edometarski moduli za pojedine inkremente opterećenja iz literature

Raspon opt./Lit.	(0) 25-50 [kN/m <sup>2</sup> ]	50-100 [kN/m <sup>2</sup> ]	100-200 [kN/m <sup>2</sup> ]	200-400 [kN/m <sup>2</sup> ]	400-600 [kN/m <sup>2</sup> ]	280-420 [kN/m <sup>2</sup> ]	Frakcija [mm]/ Lokacija
[8]	840 800 1070 500 940 600	1990 1000 1590 1100 1490 1300	1870 1800 1680 1600 2440 2000	3290 - 2880 2800 3030 2800	- - - - - -	- - - - - -	0-20/Schaumburg 0-20/Schaumburg 0-40/Schaumburg 0-40/Schaumburg 0-60/Schaumburg 0-60/Schaumburg
[10]	355 239	1670 905	1947 1570	2904 2973	4514 4977	- -	<60/Meisenheim < 100/Lueneburg
[11]	730	1480	2460	4920	-	-	0-30/Lahe
[12]	- -	- -	- -	- -	- -	5100 7900	/ < 60 / -
[13]	385	970	2140	4480	-	-	/

ne. Početni stupanj zasićenja obaju uzoraka koje su ispitivali Bidlingmaier i dr. [10] iznosio je 76 %.

### 3.1.2 Indeks stišljivosti i indeks rekompresije

Na slici 8. prikazane su krivulje  $e - \log \sigma'$  za prvi i treći uzorak uz pretpostavku da je za oba ova uzorka tijekom pokusa približno vrijedio odnos  $\sigma' = \sigma - u_w$ . Na temelju ovih krivulja određen je indeks stišljivosti u području normalne konsolidacije i indeks rekompresije u području prekonsolidacije za dva uzorka. Rezultati su prikazani u tablici 7. Pregledom literature nije pronađena nijedna objavljena krivulja  $e - \log \sigma'$  ni podaci za indeks stišljivosti i indeks rekompresije, tako da usporedba ovih rezultata s rezultatima drugih autora nije moguća.

Slika 8. Krivulje  $e - \log \sigma'$  za prvi i treći uzorak

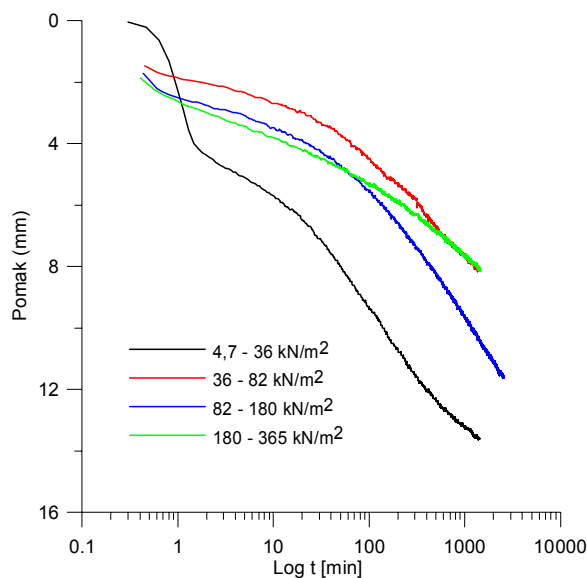
Tablica 7. Indeks stišljivosti i indeks rekompresije za prvi i treći uzorak

	Indeks stišljivosti	Indeks rekompresije
1. uzorak	0,40	0,032
3. uzorak	0,30	0,031

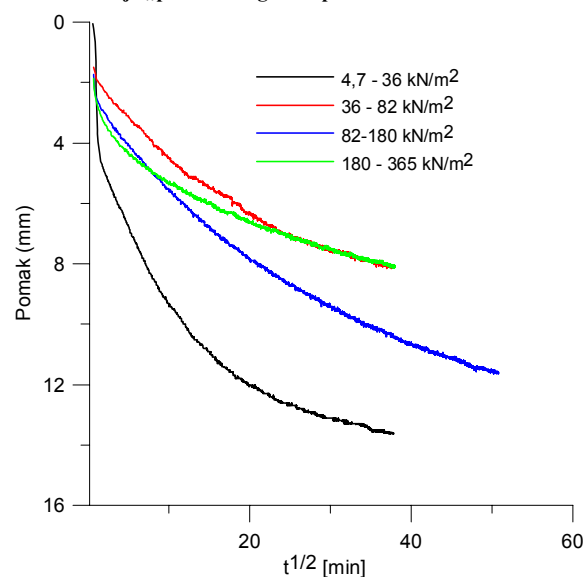
### 3.2 Koeficijent konsolidacije

Koeficijent konsolidacije parametar je koji slijedi iz Terzaghijeve jednodimenzijske teorije konsolidacije. Osnovna pretpostavka ove teorije jest da je uzorak potpuno zasićen tako da je ovaj parametar određen samo za prvi, najzasićeniji uzorak. Koeficijent konsolidacije može se odrediti metodom logaritma vremena ili metodom korijena vremena. Prema Nonveilleru [14], rezultati dobiveni ovim metodama međusobno se razlikuju do 13 % dok se prema Verruijtu [15] ova razlika kreće od 10 % do 20 %. U ovom je istraživanju primijenjena metoda korijena vremena, odnosno Taylorova metoda, budući da se nakon 24 sata, osim za prvi inkrement opterećenja, na krivulji  $\text{pomak} - \log t$  nije dobila točka infleksije koja bi naznačila završetak primarne i početak sekundarne konsolidacije (slika 9.), dok je iz krivulja  $\text{pomak} - t^{1/2}$  za sva četiri inkrementa dobiven početni (manje-više) linearni dio krivulje i završni dio krivulje koji se asimptotski približava ko-

načnoj vrijednosti pomaka (slika 10.). Na temelju krivulja sa slike 10., određeni su, za pojedine inkremente opterećenja, pripadajući koeficijenti konsolidacije. Rezultati su prikazani u tablici 8. i na slici 11. Slika 11. prikazuje smanjenje koeficijenta konsolidacije  $c_v$  s promjenom srednje vrijednosti koeficijenta pora u uzorku za svaki inkrement opterećenja.

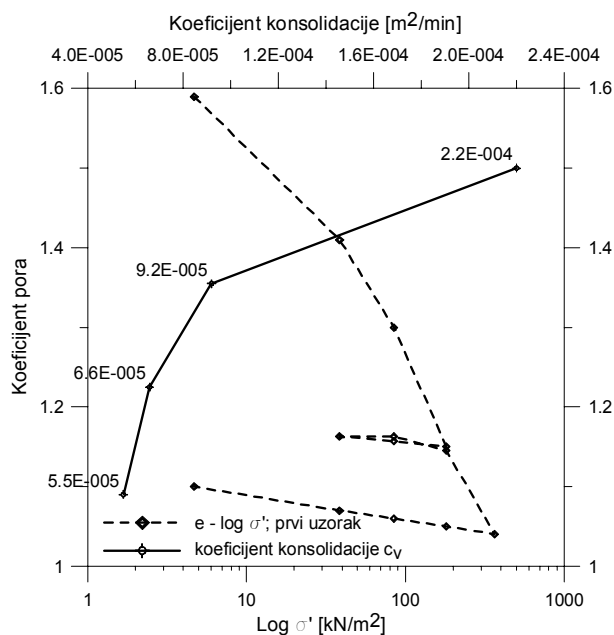


Slika 9. Krivulje „pomak – log t“ za prvi uzorak

Slika 10. Krivulje „pomak –  $t^{1/2}$ “ za prvi uzorak

Tablica 8. Koeficijenti konsolidacije za prvi uzorak

Raspon opterećenja [kN/m <sup>2</sup> ]	Modul stišljivosti [kN/m <sup>2</sup> ]	Koeficijent konsolidacije [m <sup>2</sup> /min]
4,7-36	498	$2,2 \times 10^{-4}$
36-82	1122	$9,2 \times 10^{-5}$
82-180	1671	$6,6 \times 10^{-5}$
180-365	4130	$5,5 \times 10^{-5}$

Slika 11. Smanjenje koeficijenta konsolidacije  $c_v$  s promjenom srednje vrijednosti koeficijenta pora u uzorku za svaki inkrement opterećenja

### 3.3 Koeficijent propusnosti

Iz teorije jednodimenzijske konsolidacije slijedi da je iz rezultata edometarskog pokusa moguće proračunati koeficijent propusnosti ispitivanog uzorka pomoću sljedećeg izraza:

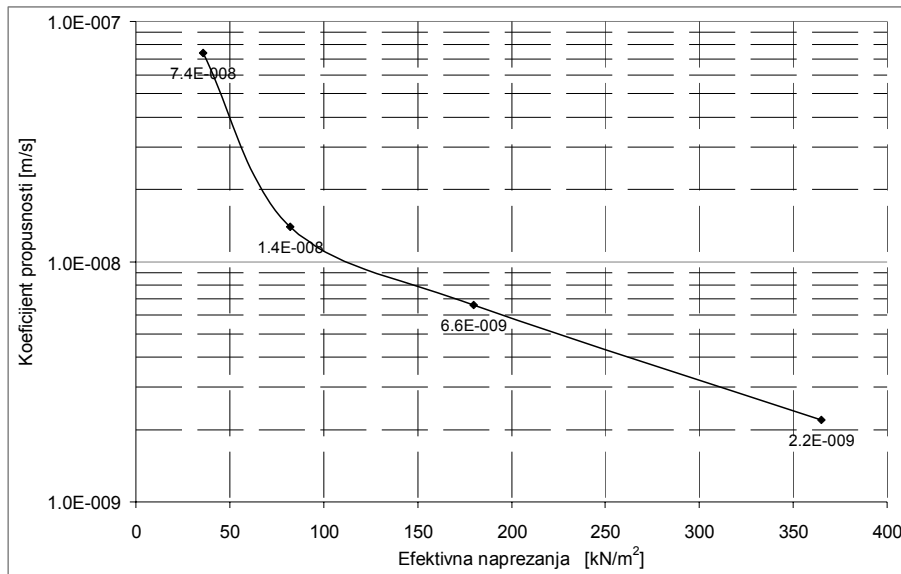
$$k_{\text{zasićeno}} = (\gamma_w \times c_v) / M_v$$

Na osnovi navedenog izraza i prikazanih rezultata proračunani su koeficijenti propusnosti prvog uzorka. Rezultati su prikazani u tablici 9. Na slici 12. u polulogaritamskom je dijagramu prikazan odnos koeficijenta propusnosti i efektivnih naprežanja za prvi uzorak, a na slici 3. (poglavlje 2.2) prikazan je isti odnos prema Doedensu i dr. [7]. Usporedbom slika 3. i 12. može se uočiti podjednak obrazac promjene koeficijenta propusnosti s porastom efektivnih naprežanja. Pri manjim efektivnim naprežanjima ovaj je odnos nelinearan, a s porastom efektivnih naprežanja prelazi u linearan dio. Na slici 13. prikazan je odnos koeficijenta propusnosti i koeficijenta pora u polulogaritamskom dijagramu za prvi uzorak. Pokazuje se da je ovaj odnos linearan, kao što je to slučaj za tlo [16].

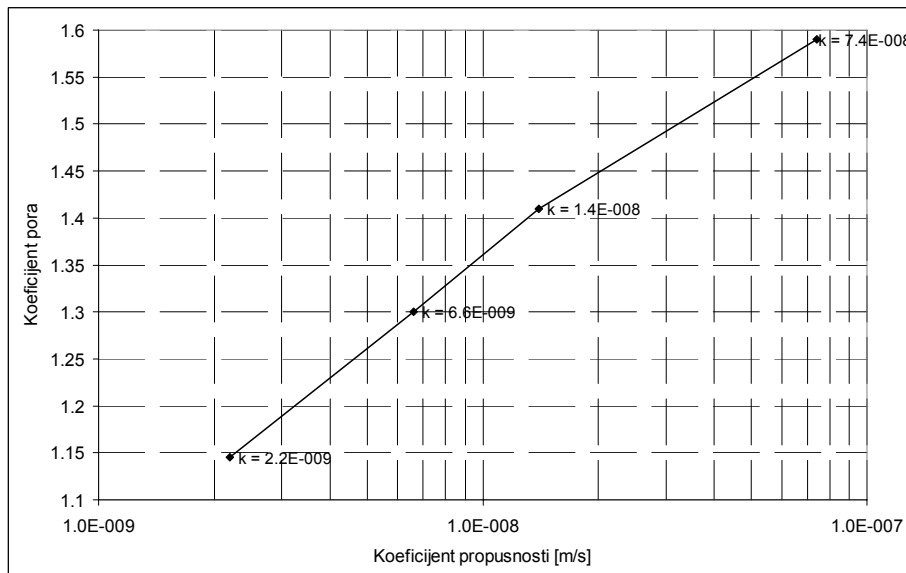
Tablica 9. Koeficijenti propusnosti za prvi uzorak MBO otpada

Raspon opterećenja	4,7-36 [kN/m <sup>2</sup> ]	36-82 [kN/m <sup>2</sup> ]	82-180 [kN/m <sup>2</sup> ]	180-365 [kN/m <sup>2</sup> ]
Koeficijent propusnosti [m/s]	$7,4 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$6,6 \times 10^{-9}$	$2,2 \times 10^{-9}$





Slika 12. Ovisnost koeficijenta propusnosti o efektivnim naprezanjima



Slika 13. Linearni odnos koeficijenta propusnosti i koeficijenta pora za prvi uzorak MBO otpada

Prema Kuehle-Weidemeieru [17], koeficijent propusnosti za MBO otpad kreće se u rasponu od  $10^{-5}$  m/s do  $10^{-10}$  m/s, a prema Rollandu [18] od  $10^{-6}$  m/s do  $10^{-10}$  m/s. Carrubba i Cossu [8] ustanovili su, mjereći propusnost MBO otpada metodom konstantnog i promjenljivog tlaka vode u edometru, da se koeficijent propusnosti MBO otpada kreće u granicama od  $10^{-4}$  m/s do  $10^{-6}$  m/s. Koeficijenti propusnosti MBO otpada pri stupnju zasićenja uzoraka od 100 % prikupljeni iz literature prikazani su u tablici 10. Usporedbom vrijednosti koeficijenata propusnosti iz tablica 9. i 10. za dane uvjete ispitivanja u ovom istraživanju, može se zaključiti da se dobivene vrijednosti dobro uklapaju u raspon vrijednosti drugih istraživača.

#### 4 Zaključak

Iskustvo stečeno tijekom razvojnog istraživanja prototipa velikog edometra za ispitivanje stišljivosti MBO otpada najveća je vrijednost ovog istraživanja. Koliko je ovo iskustvo važno svjedoči činjenica da edometar takvih dimenzija nije moguće komercijalno nabaviti.

Ovaj uređaj zadovoljava sve standarde za ispitivanje stišljivosti tla, pa nije pogodan samo za istraživanja u području mehanike otpada nego i u području mehanike tla. Prikazani rezultati istraživanja odnose se na mali broj uzoraka, ali se iz njih ipak mogu izvući preliminarni zaključci:

Prema Kuehle-Weidemeieru [17], rezultati pokusa propusnosti prihvatljivi su ako je promjer uzorka najmanje pet puta veći od promjera najvećeg zrna u uzorku. Isti autor navodi da je ovaj kriterij kod raznih istraživača narušen što rezultira većim propusnostima od stvarnih. U ovom ispitivanju navedeni kriterij nije bio narušen jer je promjer uzorka iznosio 500 mm a promjer maksimalnog zrna u uzorku 30 mm. Uklapanje dobivenih vrijednosti koeficijenta propusnosti u raspone vrijednosti iz literature ima veliku važnost. Naime, koeficijent propusnosti u pokusu je stišljivosti posredni parametar budući da ovisi o koeficijentu konsolidacije i edometarskom modulu. Da ove dvije veličine nisu valjano utvrđene pokusom, dobiveni koeficijenti propusnosti ne bi se uklopili u raspone propusnosti koje navode drugi istraživači, što navodi na zaključak da novi edometar, iako još uvijek u razvojnoj fazi, daje pouzdane rezultate.

Iako dobivene vrijednosti odgovaraju onima iz literature za potpuno zasićene uzorke otpada, treba naglasiti da vrijednost koeficijenta propusnosti pada sa smanjenjem stupnja zasićenosti pa bi ove rezultate trebalo ispitati dodatnim pokusima na potpuno zasićenim uzorcima MBO komunalnog otpada.

Tablica 10. Koeficijenti propusnosti MBO otpada prikupljeni iz literature

Lit.	Koeficijent propusnosti [m/s]	Fracija [mm]	Gustoća pri ugradnji $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Udio vode pri ugradnji [%]	Lokacija
[10]	$7,8 \times 10^{-08}$	0 – 20	0,80	56	Schaumburg
	$3,7 \times 10^{-09}$	0 – 20	0,80	70	Schaumburg
	$2,3 \times 10^{-10}$	0 – 20	0,80	72	Schaumburg
	$6,5 \times 10^{-06}$	0 – 40	0,70	58	Schaumburg
	$3,6 \times 10^{-06}$	0 – 40	0,70	64	Schaumburg
	$7,0 \times 10^{-10}$	0 – 40	0,90	67	Schaumburg
	$6,2 \times 10^{-06}$	0 – 60	0,80	57	Schaumburg
	$5,2 \times 10^{-05}$	0 – 60	0,60	70	Schaumburg
	$1,8 \times 10^{-08}$	0 – 60	0,90	53	Schaumburg
[19]			Relativni $\rho_{d,Pr}$ [%]		
	$7,8 \times 10^{-11}$	< 25	93,7	-	Oberpullendorf
	$1,8 \times 10^{-10}$	< 25	94,3	-	Oberpullendorf
	$8,2 \times 10^{-11}$	< 25	97,1	-	Oberpullendorf
	$7,0 \times 10^{-11}$	< 25	97,6	-	Oberpullendorf
	$6,3 \times 10^{-11}$	< 25	98,9	-	Oberpullendorf
	$6,2 \times 10^{-11}$	< 25	99,5	-	Oberpullendorf
	$3,4 \times 10^{-11}$	< 12	88,3	-	Allerheiligen
	$5,9 \times 10^{-11}$	< 12	89,9	-	Allerheiligen
	$3,9 \times 10^{-11}$	< 12	92,3	-	Allerheiligen
	$3,0 \times 10^{-11}$	< 12	92,5	-	Allerheiligen
	$1,7 \times 10^{-11}$	< 12	93,2	-	Allerheiligen
	$1,5 \times 10^{-11}$	< 12	94,9	-	Allerheiligen
	$1,1 \times 10^{-07}$	< 40	87,4	-	Allerheiligen
$3,1 \times 10^{-08}$	< 40	92,2	-	Allerheiligen	
	$2,4 \times 10^{-10}$	< 40	94,4	-	Allerheiligen
[20]			Gustoća po Proctoru $\rho_{d,Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Optimalni udio vode $w_{Pr}$ [%]	
	$1,5 \times 10^{-09}$	< 40	1,004	29,8	Schaumburg
	$1,4 \times 10^{-09}$	< 100	0,859	35,1	Schaumburg
	$2,0 \times 10^{-10}$	< 40	0,839	62,8	Neuwied
	$1,9 \times 10^{-09}$	-	-	-	Neuwied
	$5,7 \times 10^{-10}$	< 120	0,700	65,3	Wiefels
	$1,3 \times 10^{-10}$	-	-	-	Wiefels
	$6,5 \times 10^{-10}$	< 80	0,758	60,7	Bassum
	$2,0 \times 10^{-10}$	< 40	0,828-	59,7	Bassum
		$2,9 \times 10^{-10}$	-	-	-

\* - drugi laboratorij

- provjereno je da su dobiveni edometarski moduli redovito istog reda veličine kao i edometarski moduli većine drugih istraživača
- provjereno je elastoplastično ponašanje MBO otpada
- provjereno je da se unutar danih raspona opterećenja uglavnom (iako postoje iznimke, Carrubba i Cossu [9]) može očekivati relativna deformacija od 15 do 25 % početne visine
- provjereno je da se koeficijent propusnosti, za dane uvjete ispitivanja, dobro uklapa u raspon vrijednosti iz literature
- pokazuje se da je odnos koeficijenta pora i koeficijenta propusnosti u polulogaritamskom dijagramu linearan kao i za tlo
- neizravno je potvrđena kvaliteta izrade i ispitivanja uzoraka MBO otpada u novom velikom edometru.

Potrebna su dodatna ispitivanja uzoraka MBO otpada za potvrdu iznesenih zaključaka, a to se posebno odnosi na činjenicu da je MBO otpad heterogenog sastava. Stoga bi trebalo osigurati veći stupanj zasićenosti uzoraka njihovim plavljenjem prije ispitivanja te bi, za ovako velike uzorke, inkrementi opterećenja trebali trajati 48 h umjesto 24 h da bi se ispitala i karakteristike puzanja MBO otpada.

S obzirom na činjenicu da je koeficijent propusnosti  $k$  očito važan za donošenje odluke o duljini trajanja konsolidacije, predviđena je nadogradnja velikog edometra da bi se u idućim ispitivanjima koeficijent propusnosti mogao mjeriti direktnom metodom. Međutim, budući da u Hrvatskoj još nema postrojenja za MB obradu komunalnog otpada, ovi preliminarni rezultati pokazuju da su ispitivanja u novom velikom edometru korak u pravom smjeru za buduća nužna istraživanja ponašanja MBO komunalnog otpada.

**Potporna projektu**

*Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta „Karakterizacija krutog komunalnog otpada“ (160-0831529-3031), uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.*

**LITERATURA**

- [1] Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada, Narodne novine 117/07
- [2] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill waste, Official Journal of the European Communities, L 182, 16.7.1999.
- [3] Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007.-2015. godine, Narodne novine 85/07
- [4] Petrović, I.; Szavits-Nossan, V.; Štuhec, D.: *Priprema laboratorijska ispitivanja mehaničko-biološki obrađenog komunalnog otpada za veliki edometar*, Građevinar 63 (2011)1, 43-53
- [5] Donald, I. B.: *The Mechanical Properties of Saturated and Partly Saturated Soils with Special Reference to Negative Pore Water Pressure*, Ph.D. Dissertation, University of London, London, England, 1961
- [6] Blight, E.: *Strength and Consolidation Characteristics of Compacted Soils*, Ph.D. Dissertation, University of London, London, England, 1961,
- [7] Doedens, H.; von Felde, D.; Cuhls, C.; Ketelsen, K.; Broeker, E.; Fehre, E.; Giebel, B.: *Wissenschaftliche Begleitung der drei großtechnischen Demonstrationsanlagen zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen in Niedersachsen*. Endbericht. Institut fuer Siedlungswasserwirtschaft u. Abfalltechnik der Universitaet Hannover, Hannover und Ingenieurbuero fuer Abfallwirtschaft und Entsorgung, Hannover., 2000
- [8] Kuehle-Weidemeier, M.: *Landfilling and properties of MBP waste*, Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6-10 October 2003
- [9] Carrubba, P.; Cossu, R.: *Investigation on Compressibility and Permeability of Pre-treated Waste Mixture*, Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6-10 October 2003
- [10] Bidlingmaier, W.; Scheelhaase, T.; Maile, A.: *Langzeitverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandeltem Restmuell auf der Deponie*, Abschlußbericht zum Teilvorhaben 3.1 des BMBF-Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfaellen“, Universitaet Gesamthochschule Essen, Fachbereich 10 – Bauwesen, Fachgebiet Abfallwirtschaft, 1999
- [11] Duellmann, H.: *Untersuchungen zum Einbau von MBA-Abfaellen auf der Zentraldeponie Hannover*, Laboruntersuchungen zum Verdichtungs-, Durchlaessigkeits-, Last-Setzungs- und Scherverhalten. Februar 2002. Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes Hannover, 2002
- [12] Ziehmann, G.: *Veraenderung des mechanischen Verhaltens durch die mechanische und biologische Vorbehandlung*, Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfaellen. Veroeffentlichungen des Zentrums fuer Abfallforschung der Technischen Universitaet Braunschweig, Heft 14, S. 1 – 9, 1999
- [13] GDA-Empfehlung E 2-24: Setzungsprognosen für nicht bodenähnliche Abfälle, 3. Auflage, S. 209, DGGT, 1997
- [14] Nonveiller, E.: *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, Zagreb, 1979
- [15] Verruijt, A.: *Soil Mechanics*, Delft Univeristy of Technology, 2001
- [16] Lambe, T.W.; Whitman, R.V.: *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., 1969
- [17] Kuehle-Weidemeier, M.: *Geomechanical properties of mechanically and biologically treated municipal solid waste – Review of literature in German language and own investigations*, Wasteconsult International, Langenhagen, Germany, 2007
- [18] Rolland, C.: *Ablagerungsverhalten mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle*, Schriftenreihe des BMLFUW, Band 3, 2001