

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji



Václav Sedláček

Analýza faktorů ovlivňující geotechnické parametry materiálu skládek TKO
Analysis of the factors influencing the geotechnical material parameters of MSW landfills

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Kudrna CSc.

Odborná konzultace: RNDr. Jaromír Šantrůček

Praha, 2013

Abstrakt

Materiál skládek tuhých komunálních odpadů je velmi pestrá směs materiálů s rozdílnými vlastnostmi. V závislosti na zpracování před a po uložení materiálu na skládce jsou původní geotechnické parametry materiálu pozměněny. Za příznivých podmínek se v tělese skládky rozvíjí biodegradční procesy rozkládající organickou hmotu. Doba a průběh biodegradčních procesů je řízen komplexním působením vnějších i vnitřních vlivů.

Geotechnické vlastnosti materiálu ovlivňuje složení komunálního odpadu a způsob jeho zpracování při přepravě a přímo při ukládání. Postupem času ztrácí tento materiál biologicky rozložitelnou složku. Rozklad biologicky rozložitelného materiálu je v prostředí skládky víceletý proces. Pro správný průběh degradčních procesů je nutné splnění následujících podmínek: Dostatečný obsah organické složky, dostatečná vlhkost materiálu a stabilní hodnoty teploty a pH.

Klíčová slova: Tuhý komunální odpad, geotechnické parametry, zrnitost, vlhkost, smyková pevnost, přetvoření, pružnost, deformace, zhutňování, biodegradční procesy

Abstract

The material of Municipal Solid Waste landfills is a varied mix of materials with different properties. This material changing his properties according the procesing before or after the material is stored in landfill body. While the conditions in the landfill body are suitable, the bacteria start the development of biodegradation process. The process is affected by a number of factors. During the process, a large volume of lanfill gas is released from the landfill body and the landfill surface is declining.

Material composition with processing methods during and after the transportation of waste to the landfill create geotechnical parameters of fresh material. As time goes by, this material loses biodegradable ingredients. The biodegradation process takes several years in the space of lanfill body. For the proper process of biodegratation, it's important to compliance next parameters: Sufficient organic matter content, sufficient material moisture and stable temperature with pH.

Keywords: Municipal solid waste, geotechnical properties, grain, moisture content, shear strength, strain, elasticity, deformation, compaction, biodegradation processes

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně a dle pokynů mého školitele, Ing. Zdeňka Kudrny Csc. , a mého konzultanta RNDr. Jaromíra Šantrůčka. Všechny převzaté údaje, citace, grafy a tabulky uvádím v seznamu použité literatury. Údaje sdělené ústně jsou v textu práce označeny jako ústní sdělení.

Poděkování

Děkuji mému školiteli, Ing. Zdeňku Kudrnovi, za jeho ochotu a rady, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Taktéž děkuji mému konzultantovi, RNDr. Jaromíru Šantrůčkovi za jeho konzultace, které mi pomohli napsat části této práce týkající se chemismu vod a jeho doporučenou literaturu v této oblasti.

Obsah práce

Abstrakt	2
1. Úvod	5
2. Faktory ovlivňující indexové parametry materiálu TKO	6
2.1 Zrnitostní složení materiálu	6
2.2 Vlhkost a objemová hmotnost materiálu TKO	7
2.3 Konzistence materiálu TKO	8
3. Faktory ovlivňující smykovou pevnost materiálu TKO	9
3.1 Faktory krátkodobé (neodvodněné) smykové pevnosti	9
3.2 Faktory dlouhodobé smykové pevnosti	10
4. Faktory ovlivňující pružnost a deformace materiálu	13
4.1 Mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů podílejících se na složení TKO	13
4.2 Poissonovo číslo	14
4.3 Moduly pružnosti	16
4.4 Deformace materiálu	16
5. Technologické vlastnosti materiálu TKO	18
5.1 Faktory ovlivňující zhutňování materiálu TKO	18
5.2 Hospodaření s vodou na skládkách TKO	19
5.3 Nakládání s materiálem při svozu a následném ukládání	20
6. Faktory ovlivňující biodegradační procesy	20
6.1 Úvod do degradačních procesů	20
6.2 Aerobní biodegradace	21
6.3 Anaerobní Digesce	22
6.4 Skládková voda a její vliv na biodegradační procesy	23
7 Závěr	24
Seznam použité literatury	27

1. Úvod

Materiál skládek tuhého komunálního odpadu (dále TKO) je pestrá směs materiálů různého původu. Materiál tvoří směs organických, anorganických a syntetických materiálů. Tento materiál lze rozdělit dle geotechnického chování materiálů. Jednu skupinu představuje snadno přetvárný antropogenní materiál podléhající deformacím při nižších tlacích. Druhou skupinu tvoří materiál s chováním zemin, případně se jedná o zeminy samotné. Část materiálů spadající do první skupiny představují látky podléhající časem rozkladným procesům. Jedná se často o více než desetinu celkového materiálu, který podléhá změně mechanických vlastností a postupnému úbytku hmoty. Následkem rozkladných procesů dochází ke změnám geotechnických parametrů a k následnému postupnému sedání skládkového tělesa.

V rámci práce jsou geotechnické parametry rozděleny do 4 skupin. První skupinu představují indexové parametry materiálu TKO. Sem jsou zařazeny faktory ovlivňující popisné a stavové veličiny materiálu TKO. Důraz je při tom kladen na ty fyzikální parametry, které následně ovlivňují další geotechnické parametry TKO.

Druhá část práce hovoří o faktorech ovlivňujících geotechnické parametry mezních stavů I. skupiny materiálu TKO – jeho smykovou pevnost. Ve zkratce jsou popsány faktory ovlivňující neodvodněnou smykovou pevnost materiálu TKO. Většina této části práce se však věnuje faktorům odvodněné pevnosti materiálu TKO. Z velkého množství měření geotechnických parametrů odvodněné smykové pevnosti (σ' , ϕ' , c') je vybráno několik málo s méně obvyklými údaji.

Třetí část práce se zabývá mezními stavy II. skupiny – pružností a deformacemi. Jsou zde popsány faktory následujících parametrů materiálu TKO: Poissonovo číslo ν , Youngův modul pružnosti E , modul pružnosti ve smyku G , oedometrický modul E_{oed} a index stlačitelnosti c_c .

Čtvrtá část hovoří o faktorech ovlivňujících zhutňování materiálu TKO. Protože se jedná o faktory ovlivňující provoz vlastní skládky, je tato část pojmenovaná jako Technologické parametry materiálu TKO.

Poslední část práce se zabývá ve zkratce faktory ovlivňující biodegradační procesy na skládkách TKO. V podmínkách České Republiky jsou biodegradační procesy běžnou a z ekonomického hlediska i nutnou součástí provozu skládky TKO. Rozkladem organické hmoty v materiálu TKO dochází k postupnému poklesu objemu materiálu, což se projevuje zvýšeným sedáním tělesa skládky. Tento poznatek se využívá při navážení materiálu na těleso skládky. Těleso skládky je třeba neprojektovat na vyšší výšku než je konečná výška po proběhnutí konsolidace a biodegradačních procesů (tzv. převýšit skládku), protože následným sednutím poklesne těleso skládky na stavebním řízením schválenou

definitivní výšku. Teorie biodegradačních procesů je velmi obsáhlá a tato práce obsahuje pouze nejnужnější základy a poznatky využívané na skládkách komunálního odpadu.

2. Faktory ovlivňující indexové parametry materiálu TKO

2.1 Zrnitostní složení materiálu

Složení materiálu TKO dle velikosti zrn tvoří základní předpoklad pro geotechnické parametry tohoto materiálu. Čerstvě navezený materiál má prázdné póry a je nesoudržný. Proto je tento materiál velmi sypký. Velikosti zrn se pohybují od zrn velikosti jílu až po desítky centimetrů v průměru. Materiál TKO obsahuje zrna všech frakcí. Výzkum provedený studenty vedený Dr. Benešovou v letech 2003 a 2008 ukázal dvě významné skutečnosti ve složení materiálu TKO.

Výzkum zkoumal složení materiálu TKO podle velikosti zrn pro oblast intenzivně zastavěnou (sídlště a centra měst), středně zastavěnou (předměstí či satelitní městečka) a venkovskou zástavbu. Ve všech třech oblastech se mezi lety 2003 a 2008 projevil nárůst podílu frakce nad 40mm. Tento podíl přesahoval u sídlštní a střední zástavby 80 procent celkového složení. Venkovská zástavba dále ukázala nárůst podílu frakce menší 8 mm z 33 % podílu na materiálu TKO v lokalitě výzkumu (2003) na 40 % v roce 2008 ve zkoumané oblasti. Ostatní zástavba vykázala podíl frakce menší 8 mm 5% podílem na složení. U venkovské zástavby tvořily materiál frakce menší 8 mm převážně popeloviny, u městské zástavby tvořil tento materiál písek a prach. (Benešová a kol. , 2011). Vysoký podíl popelovin byl dříve typický i pro střední zástavbu a pro centra měst. Popílek obsahuje částice odpovídající velikostí jílu a stejně jako jíly mají vysokou porositu a velmi nízkou hydraulickou propustnost (Kolář, 1969)

Tento výzkum byl proveden na nezpracovaném materiálu. Materiál je před definitivním uložením opakovaně zhutňován. Podíly minerálních složek se dalším zpracováním mění jen minimálně. Zrna většiny materiálu budou během zpracování stlačeny i na méně než 1/5 své původní velikosti. Výzkum, který by zkoumaný odpad prozkoumal před a po zpracování nebyl zatím proveden.

2.2 Vlhkost a objemová hmotnost materiálu TKO

Čerstvě navezený materiál TKO má nízkou vlhkost. Na skládkách v blízkém okolí Prahy (Ďáblice, Úholičky či Uhy) se vlhkost materiálu pohybuje mezi 10 – 15%. Nízká vlhkost je daná složením tohoto materiálu. Běžný komunální odpad má vázanou vodu v organické složce materiálu, zatímco ostatní materiál se na celkové vlhkosti prakticky nepodílí. Podíl organické složky je velmi proměnlivý a v podmínkách ČR se běžně pohybuje mezi 12 - 25 % skládkovaného materiálu (Benešová a kol, 2011). Při pohledu do historických tabulek federálního statistického úřadu pro Prahu v letech 1981-84 zjistíme, že tehdejší složení pražského komunálního odpadu zhruba odpovídá dnešnímu venkovskému odpadu.

Materiál TKO se skládá z materiálů schopných pojmout větší objem vody než stejný objem zeminy. Tato schopnost je omezena mírou nasycení materiálu (perkolační mez). Perkolační mez se liší v závislosti na složení materiálu. Hlavním faktorem je zde obsah minerální složky (popílek, štěrky, písek, prach) a dalších složek, které schopnost vsakování nemají. Hodnota perkolační meze byla experimentálně zjištěna v rozmezí 55 – 60 % vlhkosti materiálu (Rees, 1980). Perkolační mez je zásadní i pro biodegradční procesy. U rozkladných procesů nasyceného materiálu byl dosažen nejrychlejší průběh procesů.

S vlhkostí materiálu úzce souvisí konzistenční meze. Jsou důležité u materiálu TKO s převahou zrn prachovité a jílovité frakce. Dobrým ukazatelem pro možnost měkké a tekuté konzistence materiálu TKO je číslo pórovitosti e . Pokud je e příliš vysoké a zrna balvanité/písčité frakce se vzájemně nedotýkají, může materiál zplastičtět. Vlhkost na mezi plasticity je odvislá od podílu jemnozrné komponenty a od velikosti jejich zrn a to nepřímo úměrně.

Mimo biodegradční procesy je vlhkost materiálu zásadní i pro geotechnické chování materiálu. Velká část materiálu vykazuje přímou úměru mezi vlhkostí a objemovou hmotností. Jedná se zejména o materiál se schopností vsakovat vodu (papír, lepenka a textil). Tyto materiály v čerstvém stavu vykazují nízkou vlhkost a společně s biogenní hmotou jsou nízké hodnoty objemové hmotnosti materiálu TKO.

Nízká objemová hmotnost materiálu je jedním z původců nízké stability tělesa skládky. Pro zvýšení stability musí být materiál postupně zhutňován opakovanými pojezdy zhutňovacího stroje (kompaktoru). Na skládce TKO v Praze – Ďáblicích se zhutněním dosahuje objemová hmotnost materiálu TKO kolem 1100 kg/m^3 (dle ústního sdělení pana Ing. Kudrny) a jedná se o vysoký stupeň zhutnění. Při tomto zhutnění zatěžuje kompaktor plochu 1 cm^2 hmotností 40 kg. Ty nejtěžší současné kompaktory jsou schopné vyvinout hmotnost 60 kg na 1 cm^2 . Hlavní faktor je však složení materiálu. Výsledná objemová hmotnost bude růst s podílem inertního odpadu a kovů, a naopak klesat s podílem biologicky rozložitelných komunálních odpadů (BRKO) a plastů.

Materiál TKO se nechává odkrytý do ukončení skládkování v dané část skládky. Během času expozice slouží tato část skládky jako zdroj vlhkosti pro celou etapu tělesa skládky. Je žádoucí dosažení vlhkosti alespoň 30 – 40 % během této doby. Případné průtoky srážkové vody tělesem jsou na bázi tělesa odváděny podélnými drény do nepropustné jímky skládkových vod a jímaná skládková voda je podle potřeby zpětně distribuována do tělesa skládky.

2.3 Konzistence materiálu TKO

U soudržných zemin je několik pevnostních stavů zeminy v závislosti na její vlhkosti. Rozlišujeme tak konzistenci tvrdou, pevnou, tuhou, měkkou a kašovitou. Na rozdíl od zemin nemá materiál TKO pro významné přechody mezi konsistencemi (vlhkost na mezi tekutosti a vlhkost na mezi plasticity) shodné ani podobné hodnoty i při výzkumu pouze jednoho tělesa.

Materiál TKO není materiálem shodným se zeminami. Po uložení na skládce má charakter nesoudržné zeminy a postupem času se stává kompaktnějším. V důsledku biodegradačních procesů dochází k úbytku hmoty zastoupené zrny frakce písčité a balvanité. Dochází tak k postupnému nárůstu podílu jemnozrnné frakce.

Čerstvý materiál TKO prakticky nemůže mít plastickou konzistenci, protože podíl zrn velikostí soudržných zemin není dostatečný. Staré materiály TKO dosahují měkké až tvrdé konzistence výrazně snáze. Pro skládky v USA byl vypočítán průměrný index plasticity $I_p = 12$ %, změřené vlhkosti na mezi tekutosti starého materiálu TKO jsou v USA v rozpětí $w_L = 23,4$ až $35,4$ % (Lee, 2007).

Na skládkových tělesech v České republice by k zplastizování materiálu TKO docházet nemělo. Uzavřením tělesa skládky a zpětnou recirkulací skládkové vody je stanoven maximální objem vody v materiálu tělesa skládky. Důsledkem biodegradačních procesů množství vody v tělese postupně klesá.

Otevřená tělesa skládek v USA mohou přijímat vodu i po skončení skládkování. Zplastizování materiálu TKO v důsledku přísunu vlhkosti a následná nehoda není v tomto případě ojedinělá událost.

3. Faktory ovlivňující smykovou pevnost materiálu TKO

3.1 Faktory krátkodobé (neodvodněné) smykové pevnosti

Měření neodvodněné pevnosti se provádí ve velkoobjemném trojosém přístroji. Volba velikosti vzorku je zde limitující faktor pro velikost zrn ve vzorku. Průměr vzorku TKO pro trojosou zkoušku se zatím pohyboval mezi 100 a 150 mm (Reddy a kol., 2011). Protože se zatím provádělo jen několik málo zkoušek materiálu TKO na neodvodněnou pevnost, je počet známých faktorů velmi omezený. Chybí soustavné měření geotechnických parametrů smykové pevnosti v neodvodněných podmínkách.

Geotechnický parametr	c' (kPa)	c_u (kPa)	ϕ' (°)	ϕ_u (°)
Čerstvý materiál	18	21	11	8
Aerobní fáze	51	48	7	6
Methanogeneze zrychlená	37	37	1	1
Methanogeneze zpomalená	43	41	10	9
Methanogeneze stabilizovaná	56	57	6	5

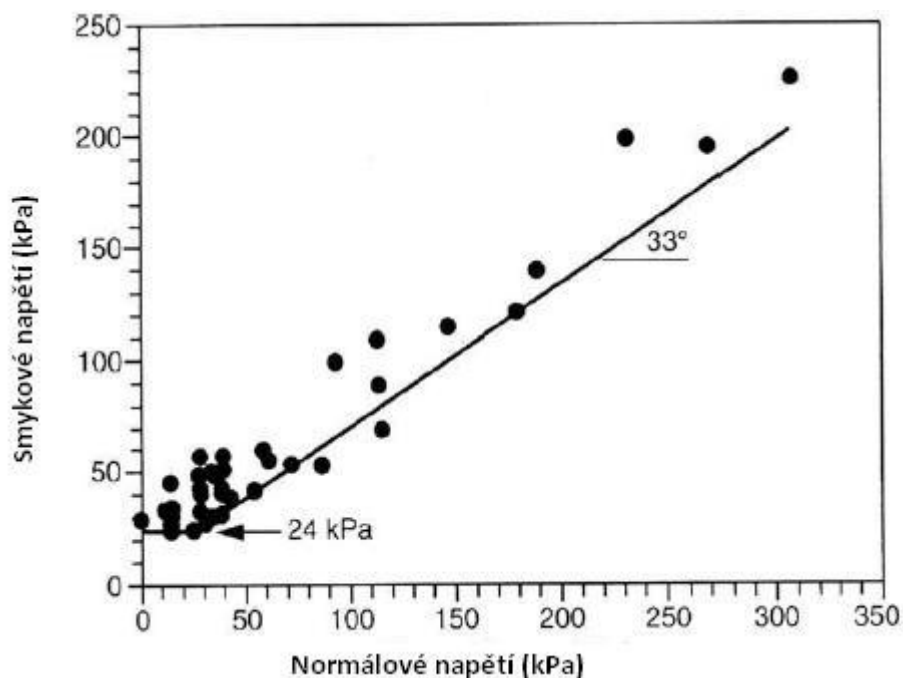
Tab. 1: Efektivní a totální parametry smykové pevnosti materiálu TKO při 15% přetvoření - neodvodněná zkouška (Reddy a kol., 2011)

Syntetický materiál využitý při zkouškách ukázal velký rozptyl v hodnotách bez zjevné závislosti na biodegradčních procesech. Otázka je, ale nakolik nejde o vliv vlastní zkoušky. Reddy dříve na skutečném materiálu skládky TKO v čerstvém stavu změřil podobné hodnoty (Reddy a kol., 2009). Jediná z literatury dostupná zkouška na materiálu ze skládky TKO v závěrečné fázi biodegradace zjistila hodnoty $c = 12$ kPa a $\phi = 34^\circ$ (Gabr a Valero, 1995) při stejném přetvoření jako Reddy. Měření efektivních hodnot parametrů smykové pevnosti nebylo zatím provedeno.

Z hlediska bezpečnosti skládky nejsou hodnoty neodvodněné smykové pevnosti a faktory je ovlivňující důležité. Skládka musí být bezpečná 20 – 30 let po skončení skládkování a na dlouhodobou bezpečnost skládky mají vliv faktory odvodněné pevnost (σ' , ϕ' , c').

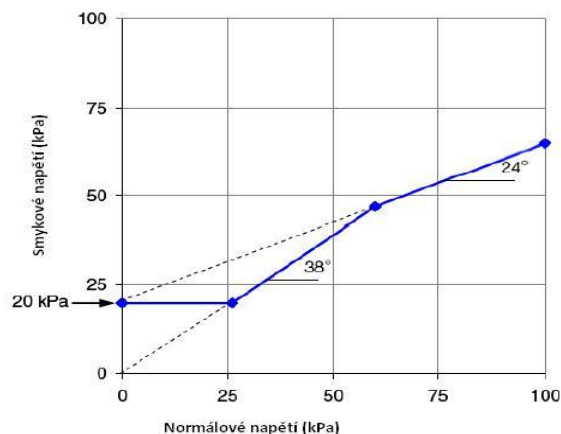
3.2 Faktory dlouhodobé smykové pevnosti

Smyková pevnost materiálu musí být dlouhodobě sledována. Počet sesuvů těles skládek TKO poukazuje na důležitost znalostí o chování materiálu TKO. Bylo provedeno velké množství zkoušek materiálu TKO at' v terénu, nebo v laboratoři. Velký podíl měření byl proveden pomocí velkoobjemných krabicových přístrojů, malé množství měření bylo provedeno v trojosém přístroji. Vlastní hodnoty vykazují velké rozptyly v hodnotách kvůli heterogenitě materiálu a různým postupům při měření. Většina měření se provádí pro normálové napětí σ' větší než 50 kPa. Problémové chování materiálu TKO se projevuje právě při σ' menší než 50 kPa. Přišlo se na to při provádění několika nezávislých zkoušek pevnosti materiálu TKO. Zde jsou uvedeny dva příklady rozdílného chování materiálu TKO při smykové zkoušce v krabicovém přístroji (Obr.1):



Obr 1: Extrapolace hodnot porušení materiálu TKO při různých hodnotách normálového napětí (Kavazanjian a kol., 1995)

Kavazanjian provedl sérii měření na 6 skládkových tělesech v jižní Kalifornii. Změřené hodnoty z jednotlivých těles se mírně liší. Projevy heterogenity materiálu bez výjimky vykazaly všechna tělesa. Všechna tělesa vykazala při nízkých hodnotách normálového napětí σ' efektivní soudržnost c' , což je znak soudržných zemin. Při růstu normálového napětí se od určité úrovně σ' začaly vzorky chovat jako nesoudržné zeminy s úhlem vnitřního tření ϕ' přibližně 33°. Z obr. 2 je dobře vidět, že jednotlivé vzorky mají prakticky shodné hodnoty ϕ' a liší se hlavně soudržností při nízkých hodnotách σ' . Taková měření jsou cenná, protože se pevnost zemin při hodnotách σ' nižší než 50 kPa obvykle neměří.



Obr 2: Porušení materiálu TKO při různých hodnotách normálového napětí (Manassero a kol., 1996)

Na Obr. 2 je zkoušený materiál testován na vybraných hodnotách σ' . Při hodnotách σ' mezi 0 a 25 kPa vykazuje zkoušený materiál chování soudržné zeminy s hodnotou soudržnosti $c = 20$ kPa. Mezi hodnotami $\sigma' = 25$ kPa a 60 kPa se materiál chová shodně jako nesoudržná zemina s úhlem vnitřního tření $\phi' = 38^\circ$. V dalším úseku vzorek vykazuje zakřivení obálky pevnosti. Mezi zkouškami při $\sigma' = 60$ kPa a $\sigma' = 100$ kPa vykázal vzorek pokles ϕ' na hodnoty kolem 24° . To odpovídá soudržným zeminám a je to výrazný pokles proti předchozímu úseku. Není bez zajímavosti, že prodloužení spojnice bodů odpovídající normálovému napětí $\sigma' = 60$ kPa a $\sigma' = 100$ kPa přesně dosahuje bodu soudržnosti c' . Vzorek celkově vykazuje mechanické chování soudržných zemin.

Objemová tíha (kN/m^3)	Vlhkost (hmotn. %)	Porozita (%)	Propustnost (m/s)	Obsah vody v pórech (%)	Smyková pevnost		Koefficient stlačitelnosti a_{1-2}
					$\sigma < 30$ kPa	$\sigma > 30$ kPa	
9.3~12.4	20~35	40~52	10^{-5}	22.4~55	$C = 24$ kPa $\phi' = 0 \sim 5^\circ$	$C = 0 \sim 8$ kPa $\phi' = 33^\circ$	0.17~0.36

Tab. 2: Geotechnické parametry čínského materiálu skládek TKO z vybraných měst (Xiong a kol., 2008)

K Tab. 2 patří také údaje o zkoumaném materiálu TKO a jeho původu z tab. 3.:

Třídění	Organický materiál (%)					Anorganický materiál (%)				
	Kuchyňský odpad	Papír	Plasty	Dřevo a textil	Cellkem	Popelo- viny	Sklo a keramika	Kovy	Ostatní	Cellkem
Lokalita skládky										
Sanghaj	42.6	1.6	0.40	0.47	45.2	53.7	0.43	0.53		54.7
Peking	50.9	4.2	0.61	1.16	56.2	42.2	0.92	0.80		43.9
Wuhan	26.5	2.3	0.31	0.74	29.9	68.0	0.85	0.17	1.04	70.1
Ganžhú	38.6	1.4			40.0	55			5.0	60.0

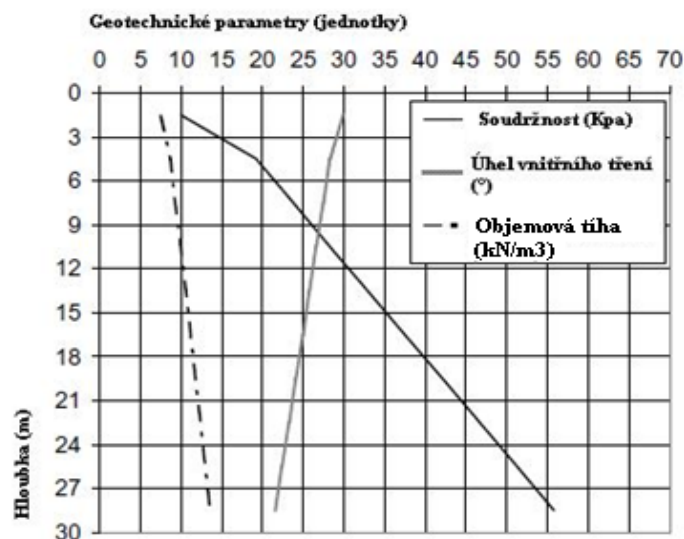
Tab. 3: Složení materiálu TKO použitého při měření geotechnických parametrů v obr. 4 (Xiong a kol., 2008)

Čínský materiál skládek TKO vykazuje velmi neobvyklé složení. Zprv je velmi vysoký podíl biologicky rozložitelných komunálních odpadů (BRKO) na celkovém složení materiálu. V Evropě se bioodpad obvykle třídí samostatně a v USA taktěž. Zde však například v Pekingu tvoří nadpoloviční podíl materiálu TKO. Zadruhé stojí za povšimnutí minimální podíl plastů. V tabulce figurují pouze biologicky rozložitelné plasty. Chybí všechny ostatní plasty, které jinde tvoří běžně 20% i více materiálu TKO. Dále je nutné upozornit na vysoký podíl popelovin na celkovém složení materiálu. V případě města Wuhan je podíl popelovin na celkovém materiálu TKO 68%. Absence materiálů s nízkou objemovou tíhou a vysoký podíl popelovin se projevuje na objemové tíži zkoumaného materiálu TKO. Ta se pohybuje mezi 9,3 až 12,4 kN/m³ a je neobvykle vysoká. V USA se objemová tíha běžně pohybuje mezi 4 – 8 kN/m³ a v České Republice se zhuštěním dosahuje objemová tíha mezi 10 – 11 kN/m³.

Dále není bez zajímavosti hodnota hydraulické vodivosti versus složení. Dle vysokého obsahu popelovin lze očekávat nízkou hodnotu hydraulické vodivosti materiálu (v řádech 10⁻⁷ až 10⁻⁹ m/s). Změřené hodnoty se pohybují v řádech 10⁻⁵ m/s, což je ještě celkem propustný materiál.

Hodnoty smykové pevnosti nijak zásadně nevybočují od ostatních těles skládek TKO. Při nízkých hodnotách σ' vykazuje materiál efektivní hodnotu soudržnosti $c' = 24$ kPa, při růstu hodnot normálového napětí σ' se materiál TKO chová jako nesoudržná zemina s hodnotami efektivní hodnoty úhlu vnitřního tření $\phi' = 33^\circ$, což je obvyklá hodnota většiny skládek TKO.

V některých případech se však uvedené chování neobjevuje a těleso skládky při tom není uzavřené (Obr. 3):



Obr 3: Výsledky výzkumu geotechnických parametrů (Babu a kol., 2010)

Měření probíhalo na tělese skládky v Nai Delhi (Nové Dillí). Těleso skládky je 30 metrů vysoké se sklony svahů 1:3. Objemová hmotnost na vrcholu skládky má hodnoty nižší než 900 kg/m^3 . Pokles hodnoty úhlu vnitřního tření může mít příčinu v biodegradačních procesech (Reddy a kol., 2011), kde s postupným průběhem biodegradace byl zjištěn shodný trend u syntetického materiálu TKO.

Trend růstu objemové hmotnosti s hloubkou může být způsoben dvěma faktory. Prvním faktorem je konsolidace materiálu hmotností nadloží. Druhým faktorem je průběh biodegradačních procesů. Stáří materiálu není z textu práce známo. Objemová hmotnost 1400 kg/m^3 změřená na bázi ukazuje na pokročilý průběh biodegradačních procesů. Lze to odvodit ze zkušeností s českými skládkovými tělesy. Tlak nadloží na bázi skládky lze odhadnout na přibližně 360 kPa. Pro srovnání v Praze Ďáblicích se při zhutňování materiálu dosahuje tlak 4,5 MPa a dosažená objemová hmotnost je okolo 1180 kg/m^3 (Ing. Kudrna – ústní sdělení). Již zmíněný Wong provedl celou sérii měření vybraných geotechnických parametrů stejného materiálu při různém obsahu vody.

4. Faktory ovlivňující pružnost a deformace materiálu

Tato kapitola se zabývá schopností materiálu odolávat vnějšímu namáhání. Do určitého napětí materiál odolává jen s malou deformací. Při překročení této hodnoty napětí dochází k zhroucení struktury materiálu. První stav charakterizují parametry pružnosti, druhý deformační parametry. Z první skupiny parametrů jsou vybrány faktory ovlivňující Poissonovo číslo ν , oedometrický modul E_{oed} a Youngův modul pružnosti E . Z druhé skupiny jsou v samostatné kapitole popsány faktory ovlivňující pevnostní parametry materiálu (soudržnost c , úhel vnitřního tření ϕ a normálové napětí σ). Faktory ovlivňující fyzikální parametry materiálu (objemová hmotnost, vlhkost materiálu a další) mají k dispozici mnohem širší spektrum literatury než vlastní geotechnické parametry. Faktorům ovlivňující indexové parametry materiálu TKO je vyčleněna druhá část této práce.

4.1 Mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů podílejících se na složení TKO

Materiál TKO je složen z různorodého materiálu, kde každá z jeho komponent má odlišné mechanické chování. Nacházejí se zde pružné i křehké materiály. Empiricky je u zemin zjištěna závislost mechanického chování na hodnotě čísla pórovitosti pro danou zeminu. Nicméně pro materiál TKO toto zatím nebylo potvrzeno.

Sklo je materiál s výbornou pevností v tlaku, ale nízkou pevností v tahu a v rázu (10x vyšší pevnost v tlaku než v tahu). Chová se křehce. Pro zvýšení pružnosti je nutno dosáhnout výrazně vyšších teplot, než jaké jsou v tělese skládky. Pevnost skla snižují jeho strukturální poruchy. Sklo tvoří jednotky procent materiálu skládek. V podmínkách skládky je dlouhodobě stabilní. (Fanderlík, 1996)

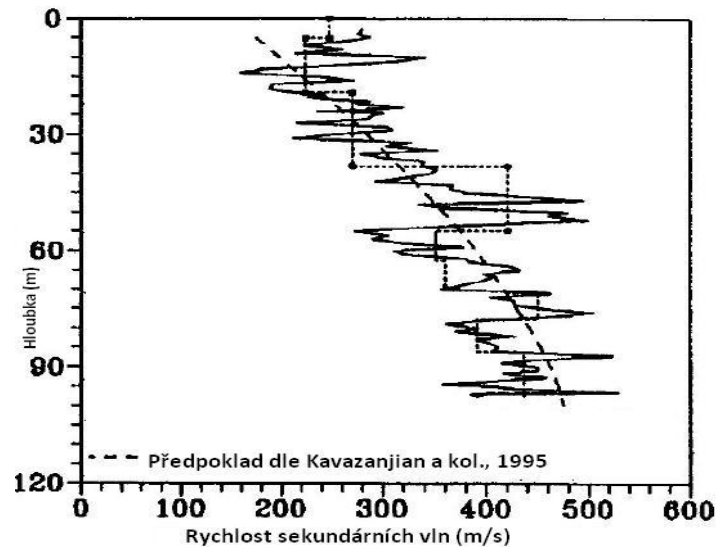
Plasty tvoří širokou skupinu materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Pevnost a pružnost plastů vykazuje závislost na teplotě formou nepřímé úměrnosti. Koeficient příčné roztažnosti roste s teplotou. Běžně se u plastů projevují následující faktory: tvar plastu a stav plastu po vyrobení (vnitřní pnutí a krystalové uspořádání).

Organický materiál vykazuje přímou úměru mezi vlhkostí a pružností. Pevnost organické hmoty je odvislá od její struktury. Vlivem biodegradačních procesů ztrácí s časem organická hmota svou pevnost a přechází do kašovitě konzistence.

Na některých skládkách se lze setkat s částí tělesa tvořenou inertním odpadem. Zde pak záleží na složení tohoto odpadu. Tyto materiály nepodléhají biodegradačním procesům a vykazují dlouhodobou stabilitu. Proti ostatnímu materiálu vykazují vyšší objemovou hmotnost proti ostatním skládkovaným materiálům.

4.2 Poissonovo číslo

Poissonovo číslo ν je dáno poměrem podélného zkrácení proti příčnému prodloužení. Několik nezávislých měření ukázalo značnou variabilitu Poissonova čísla v tělesech skládky. Měření lze provést v laboratoři mechaniky zemin nebo přímo na skládce pomocí rychlosti seizmických vln (Lee, 2007). Druhá varianta umožňuje získat data napříč tělesem skládky (Obr. 4).



Obr. 4: Rychlost sekundárních seizmických vln V_s v tělese skládky OII nedaleko města Fremont, Kalifornie (Matasovic a kol., 1995 in Lee, 2007)

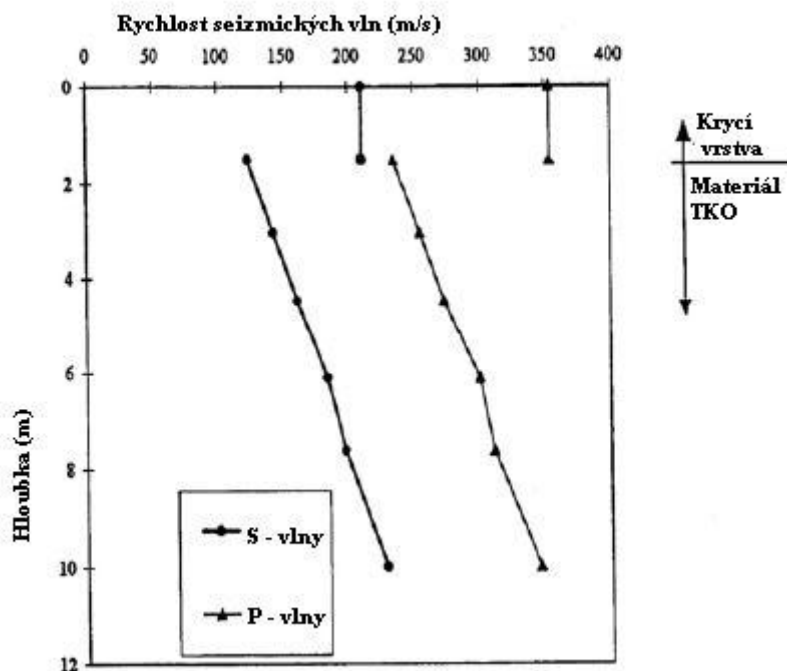
Pomocí rychlostí primárních a sekundárních seizmických vln v tělese skládky lze vypočítat Poissonovo číslo přímo:

$$\nu = \frac{0.5 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (1) \quad (\text{Lee, 2007})$$

Pomocí uvedeného vzorce vypočítal Matasovic průměrnou hodnotu Poissonova čísla na 0,33 pro skládku OII v kalifornském Fremontu. Změřené hodnoty variovaly od 0,1 do 0,4 bez zjevného trendu s hloubkou (Matasovic a kol., 1995). Uvedené hodnoty vznikly shodným trendem v rychlosti primárních i sekundárních vln při průchodu tělesem skládky (Obr. 5)

Stejné chování seizmických vln bylo změřeno i na skládce Maricopa, Arizona (Houston a kol., 1995)

Obr 5:



Obr. 5: Rychlost primárních vln (P-vlny) a sekundárních vln (S-vlny) na skládce TKO Maricopa, AZ (Houston a kol., 1995)

Z Obr. 5 je patrné, že oba typy vln se chovají v tělese skládky TKO velmi podobně a liší se v podstatě rychlostí. Matasovic pozoroval na skládce OII v Kalifornii ve stejnou dobu shodný trend v rychlosti seizmických vln jako Houston na skládce Maricopa.

Z obou výzkumů vyplynulo, že biodegradční procesy nemají vliv na hodnotu Poissonova čísla. Pro Seizmická i laboratorní měření (Zekkos, 2005 in Lee, 2007) mají shodné závěry – hodnoty Poissonova čísla závisí od složení materiálu a je ukazatelem heterogenity materiálu.

4.3 Moduly pružnosti

Modul pružnosti v tlaku a v tahu E a modul pružnosti ve smyku G jsou geotechnickými parametry důležitými pro bezpečnost těles skládek TKO. Jejich hodnoty mají vzájemnou závislost danou vzorcem:

$$G = E / 2(1 + \nu) \quad (2)$$

kde ν je Poissonovo číslo. Využití tohoto vztahu pro materiál TKO je velmi problematické. Hodnota Youngova modulu pružnosti je pro danou zeminu konstantou, podmínkou je izotropie materiálu. Materiál TKO je však materiál anizotropní, a proto má proměnlivou hodnotu Youngova modulu. Měření Youngova modulu pružnosti je v literatuře velmi vzácné pro technologickou náročnost při odběru vzorků. Beaven a Powrie (1995) a Castelli a Maughery (2008) provedly sérii zkoušek při postupném zvyšování σ z 0 na hodnotu 600 kPa. Beaven a Powrie změřily nárůst E ze 138 kPa na 2418

kPa, Castelli a Maughery změřily nárůst z 68 kPa na 7231 kPa. Z rozdílu obou hodnot je vidět velký vliv heterogenity materiálu na hodnoty E, z čehož vyplývá závěr nemožnosti reprezentativního odběru vzorku z materiálu TKO.

Na syntetickém materiálu TKO byl zjišťován vzájemný vliv vlhkosti w a přetvoření na hodnotách sečného a tečného Youngova modulu. Z grafů vyplynul závěr, že oba tyto faktory jsou pro hodnoty obou Youngových modulů důležité (Wong, 2009). Srovnávací měření s materiálem ze skládky TKO nebylo zatím provedeno.

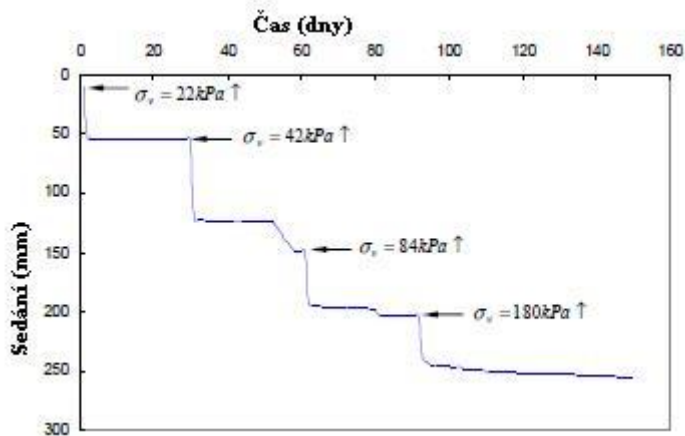
Pro zjišťování hodnot smykového modulu pružnosti G byl vyvinut experimentální postup s využitím sekundárních seizmických vln (Obr. 5). Pro zanedbatelné deformace se využívá smykový modul pružnosti pro malé deformace:

$$G_{\max} = \zeta V_s^2 \quad (3)$$

kde ζ je objemová hmotnost a V_s^2 je druhá mocnina rychlosti smykových vln (Zekkos a kol., 2008). Ze série měření na velkém počtu vzorků ze skládky Fremont (Kalifornie, USA) vyšly následující závěry: Na velikost smykového modulu pružnosti G pro malé deformace má největší vliv složení materiálu, důležité jsou též hodnota napětí v zemině a objemová hmotnost materiálu. (Zekkos a kol., 2008).

4.4 Deformace materiálu

Při pohledu mechaniky zemin, faktory ovlivňující moduly E_{oed} a E_{def} vycházejí ze vzorce $E_{\text{def}} = E_{\text{oed}} \cdot \beta$. Hodnota E_{oed} je dána vzájemným poměrem změny normálového napětí a velikostí podélného přetvoření. Hodnota β je dána Poissonovým číslem zeminy, resp. materiálu TKO (Jesenák, 1994). Jak již zaznělo v kapitole 4.1, hodnota Poissonova čísla je funkce heterogenity materiálu. Velikost normálového napětí je dána hmotností hutnicího stroje (kukavůz a kompaktor), s postupem času se významným faktorem stává objemová hmotnost nadložních vrstev. Skutečnost je však od mechanických předpokladů odlišná (Obr. 6)



Obr. 6: Výsledky dlouhodobé oedometrické zkoušky materiálu TKO (Sighn, 2008)

Sighn provedl oedometrickou zkoušku na vzorku materiálu TKO skládky Spadina nedaleko města Saskatoon, Kanada. Přitěžování probíhalo v několika krocích vždy po 30 dnech. Z grafu je patrné nejen velikost sedání při přitěžovacích krocích, ale také sedání mimo přitěžování – následky biodegradačních procesů. Biodegradační procesy během zkoušky (po 150 dnech) proběhly v rozsahu cca 55% (Sighn, 2008).

Výsledky zkoušky podporují poznatky dalších autorů (například Sowers, 1973). V materiálu TKO lze rozlišit dva typy sedání. Prvotní sedání probíhá při zhuštění kompaktozem, druhotné sedání probíhá vlivem biodegradačních procesů. Faktory ovlivňující geotechnické parametry E_{def} , E_{oed} a C_c je nutno rozdělit podle toho, na kterém ze sedání působí.

Na primární jednoosé stlačení má vliv míra heterogenity materiálu a tlak vyvíjený kompaktozem. Druhotné stlačení je ovlivňováno biodegradačními procesy a jejich faktory (6. kap.) v kombinaci s číslem pórovitosti materiálu e a časem (Sighn, 2008). Hodnoty primárního indexu stlačitelnosti C_{ep} vykazují velký rozptyl v literatuře (0,16 – 0,92), hodnoty sekundárního indexu stlačitelnosti se C_{cs} shodují na hodnotách 0,099 – 0,1 bez ohledu na metodiku zkoušek.

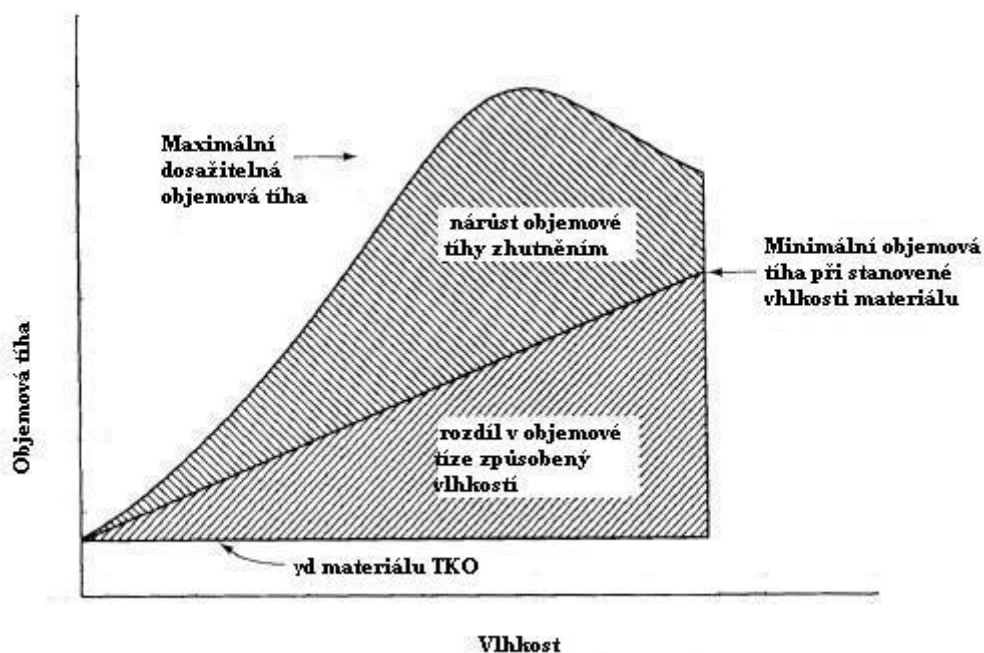
5. Technologické vlastnosti materiálu TKO

Technologickými vlastnostmi rozumíme ty geotechnické vlastnosti materiálu TKO, které ovlivňují technologii provozu skládky. Jedná se o faktory ovlivňující zhušťování materiálu TKO a biodegradační procesy. Tato část práce se věnuje faktorům ovlivňující ukládání materiálu TKO a jeho hutnění. Biodegradační procesy podrobně analyzuje 6. kap.

5.1 Faktory ovlivňující zhutňování materiálu TKO.

Základními geotechnickými parametry ovlivňující hutnění materiálu TKO jsou suchá objemová tíže γ_d , vlhkost materiálu TKO w a číslo pórovitosti e . Tyto faktory platí jak pro zeminy, tak pro materiál TKO. Proti zeminám je u materiálu TKO několik odlišností.

Materiál TKO obsahuje zrna všech frakcí a při hutnění má Proctorovu křivku shodnou se soudržnými zeminami (Wong, 2009 a Hazon a kol., 2010). Z toho plyne, že materiál TKO je při hutnění silně ovlivňován svou vlhkostí. S vlhkostí se objevuje jedna zásadní odlišnost materiálu TKO od zemin, a tou je nízká objemová hmotnost materiálu TKO proti zeminám.



Obr 7. Charakteristika podílů zhutnění a vlhkosti na celkové objemové tíze materiálu TKO (Holtz a Kovacs, 1981)

Na Obr.7 je vidět oblast, kde lze nejvíce snížit pórovitost a současně dosáhnout nejvyšší objemové hmotnosti. Tato oblast se označuje jako oblast optimální vlhkosti (w_{opt}). Suchá objemová hmotnost po dosažení určité vlhkosti klesá s nárůstem w . w_{opt} je pro Proctor standard funkcí vlhkosti, objemové hmotnosti a čísla pórovitosti.

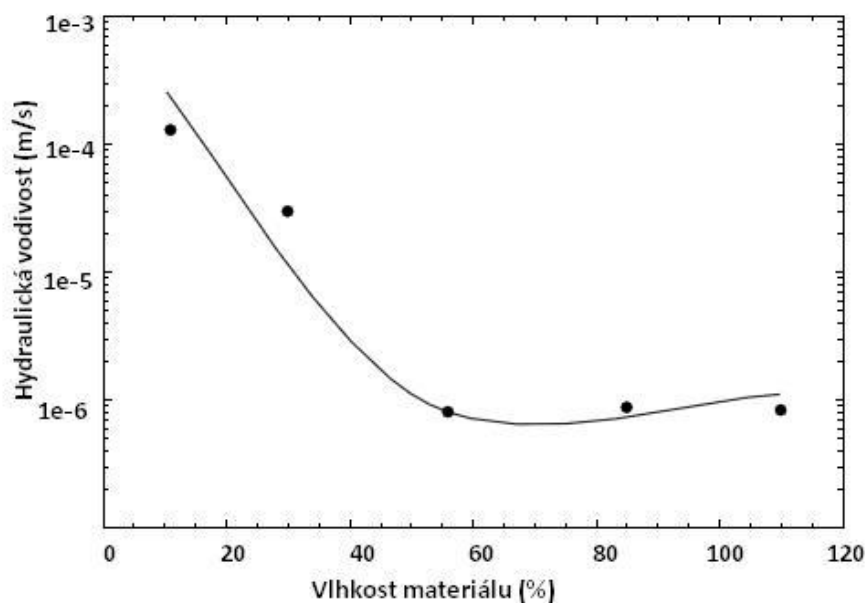
5.2 Hospodaření s vodou na skládkách TKO

Pro řádný průběh biodegradčních procesů je nutný určitý objem vody v materiálu. Legislativa České Republiky nedovoluje vypouštění skládkové vody z tělesa skládky a experimenty s přidávkou čisté vody do tělesa skládky prokázali inhibici skládkových procesů. Pro správný provoz skládky byl vyvinut následující postup:

Materiál TKO se nechává odkrytý do ukončení skládkování v dané části skládky. Během času expozice slouží tato část skládky jako zdroj vlhkosti pro příslušnou etapu tělesa skládky. Je žádoucí dosažení vlhkosti alespoň 30 – 40 % během této doby. Případné průtoky srážkové vody tělesem jsou na bázi tělesa odváděny podélnými drény do nepropustné jímky skládkových vod a jímaná skládková voda je podle potřeby zpětně distribuována do tělesa skládky.

Srážkový deficit v čase expozice nebo nečekaně rychlé ukládání materiálu proti plánu se následně dlouhodobě projevuje ve zpomalení biodegradčních procesů v postižené části skládky.

U zemin je důležitý vliv vlhkosti na hodnotu hydraulické vodivosti. Laboratorními měřeními bylo toto potvrzeno i pro materiál skládek TKO (Obr. 8):



Obr 8: Vliv vlhkosti na hydraulickou vodivost materiálu TKO v semilogaritmickém zobrazení (Wong, 2009)

Údaje na obr. 8 byly zjištěny zkouškou syntetického materiálu TKO s postupným zvyšováním jeho vlhkosti při sérii zkoušek v propustoměru. Hodnoty hydraulické vodivosti mezi tělesy skládek vykazují velký rozptyl v řádech 10^{-4} až 10^{-7} m/s. Pro dosažení vhodné vlhkosti materiálu pro řádný průběh biodegradčních procesů je důležitý poměr mezi převažující zrnitostí materiálu, mocností tělesa, množstvím spadlých srážek v místě skládky a časem.

Úhrny srážek jsou rozdílné v závislosti na poloze skládky a na variabilitě klimatu v místě skládky. Hydraulická vodivost materiálu TKO je spíše nízká ve srovnání se zeminami. Pro provoz skládky proto nejsou vhodné vysoké srážkové úhrny v krátkém časovém intervalu.

5.3 Nakládání s materiálem při svozu a následném ukládání

Ve sběrném kontejneru na směsný odpad lze nalézt velmi pestrá směs materiálů. Tato kapitola popisuje nakládání s touto směsí v průběhu přepravy a uložení v areálu skládky.

Materiál TKO je po vyprázdnění kontejneru vysypán do specializovaného vozidla na svoz odpadu (hovorově nazýván kukavůz), kde je okamžitě lisován. Dříve byla praktikována kompakce rotačním lisem (stlačení materiálu 1:2,5), dnes je trend stlačovat lineárně (stlačení materiálu až 1:5). Po vyložení na skládce je materiál rozhrnut a následně zhutněn kompaktozem. Kompaktor působí jednak staticky svou hmotností, dále také dynamicky. Je také vybaven ježkovými válci, kterými je materiál jednak zhutňován a současně také dochází k prohnětení odpadu. Toto zatížení je nejvyšší dosažené za dobu pobytu na skládce TKO a moderní stroje jsou schopny vyvinout hutnicí tlak 5 – 7 MPa. Vlastní hutnění materiálu je dvoufázový proces. V první fázi se přetvářejí zrna s nízkou pevností, druhá fáze představuje stlačení pórů. Zhutnění materiálu kompaktozem je vhodné pro zvýšení pevnosti materiálu a pro zvýšení kapacity skládky. Vyvozaný tlak způsobený zhutněním materiálu kompaktozem je důležitý faktor geotechnických parametrů materiálu pro stabilitu skládkového tělesa.

6. Faktory ovlivňující biodegradační procesy

6.1 Úvod do degradačních procesů

Rozklad organické hmoty je starý jako organická hmota samotná. Nejstarším způsobem odbourávání organické hmoty je rozklad prokaryontními organismy v anoxickém prostředí. Energií uvolněnou při anaerobním rozkladu dodnes využívají autogenní a methanogenní organismy. Jejich činností vzniká plyn s obsahem methanu.

Bioplyn, důlní plyn, kalový plyn, skládkový plyn, zemní plyn a nově i břidličnatý plyn jsou chemicky podobné plyny a vznikají shodnými chemickými pochody ze shodných zdrojů, tedy z různých organických zbytků. Přesto o těchto šesti plynech nelze říct, že jsou synonyma. Odlišné jsou podmínky jejich vzniku. Skládkový plyn může vznikat pouze ve skládkách komunálních odpadů, kalový plyn vzniká pouze v kalových nádržích, důlní a zemní plyn vzniká v podzemí a bioplymem se někdy neúplně správně nazývá jakýkoliv plyn s obsahem methanu (CH_4) a dalších složek vzniklých rozkladnými procesy ať už samovolně či za řízených podmínek (Kára a kol., 2007).

Rozkladné procesy pracují i za přístupu vzduchu. Jedná se o odlišný proces proti předchozímu a působením aerobního rozkladu vzniká kompost, organický materiál bohatý na živiny. Viditelné projevy obou variant jsou shodné. Vznik skládkového plynu i kompostu provází uvolňování plynu a pokles tělesa skládky.

Výzkum v oblasti rozkladných procesů probíhal hlavně v druhé polovině 20. století. Souvisel s kritickou situací okolo množství komunálního odpadu a snahou o průmyslovou výrobu plynu z organické hmoty. Největší rozvoj probíhá v západní Evropě a USA v sedmdesátých a osmdesátých letech. Tehdy výzkumníci plně prokázali možnost průmyslového využití komunálního odpadu jako zdroje plynu pro spalování. Ukázalo se, že biodegradační procesy jsou složitou strukturou biologických, chemických a technologických faktorů.

Materiál skládek TKO bývá tvořen z 20 – 30 % hmotou podléhající biodegradaci (Benešová a kol., 2011). Tato hmota, tvořena biogenní hmotou a výrobky z ní, podléhá postupně během přibližně 15 let od navezení na skládku biodegradačním procesům a její objem klesá, zatímco objem ostatního materiálu v daleko menší míře. Pokles objemu skládky se projevuje sedáním povrchu jejího tělesa a to často u velkých skládek v řádu prvních metrů (Kudrna, 2012). Pokles tělesa skládky je provázen uvolňováním značného objemu skládkového plynu.

6.2 Aerobní biodegradace

Aerobní rozklad je organismy preferován před anaerobním z důvodu vyšších energetických výnosů proti rozkladu anaerobnímu. Těchto výnosů se dosahuje u aerobního procesu daleko rychleji, než u procesu anaerobního a za vyšších teplot. Při řízeném aerobním rozkladu teplota nedlouho po startu procesů stoupá až k 70°C a celý proces trvá přibližně 11 týdnů (Hejátková, 2008). Po celou dobu procesu je nezbytně nutný přístup kyslíku k materiálu skládky.

Teplota uvnitř materiálu je základním ukazatelem rychlého rozvoje degradačních procesů. Proti anaerobním procesům je teplota uvnitř citlivá na vnější teplotu. Chladné počasí může výrazně zpomalit celý proces, protože psychrofilní bakterie jsou ze všech typů bakterií nejpomalejší (Graves, 2000). Proces bude rychlejší, čím je vyšší teplota materiálu.

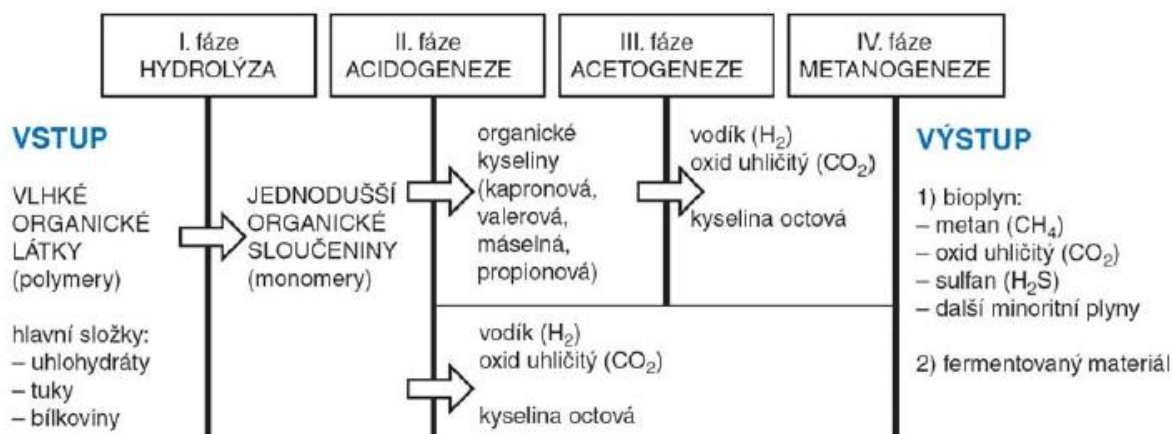
Vlhkost materiálu je u aerobního rozkladu kritická. Příliš vlhký materiál se zbytečně ochlazuje o nadbytečnou vodu v materiálu, příliš suchý materiál se může kvůli vysokým teplotám samovolně vznítit (Hejátková, 2008).

Tento proces nebyl zatím zkoumán v prostředí skládky. Aerobní procesy na skládkách TKO nejsou příliš sledované pro svůj malý podíl na biodegradačních procesech. Jsou však důležité pro požární bezpečnost nezakrytých skládkových těles. Dle Gravese je ideální vlhkost pro aerobní procesy kolem

40 % (hmotn.), zatímco materiál TKO má běžně jen 20-30 % (hmotn.). Graves uvádí vhodné pH v hodnotách v rozmezí 6,5 až 8. Shodné rozpětí uvádí i Hejátková.

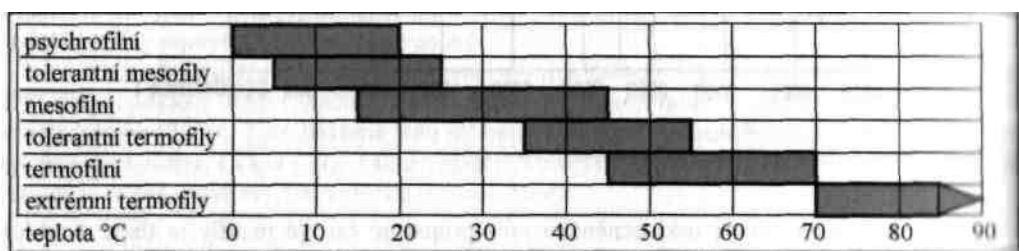
6.3 Anaerobní digesce

Za nepřítomnosti kyslíku jsou látky vzniklé při hydrolyze rozkládány složitějším tří – až čtyřkrokovým procesem v závislosti na chemickém složení (Obr.9).



Obr. 9: Schéma anaerobní digesce (Kára a kol., 2007)

Na procesech se podílí velké množství různých bakterií. V každé fázi procesu je to jiný typ bakterií. Methanogenní bakterie jsou nejvíce citlivé na stabilitu prostředí (Tab. 4). Ostatní skupiny bakterií nejsou tolik závislé na stabilitě podmínek.



Tabulka 4: Rozdělení methanogenních bakterií podle preferované teploty (Straka a kol., 2006)

Z Tab. 4 je názorně vidět pestrost jednotlivých oblastí výskytu methanogenů. I změny pH mohou mít pro methanogeny ničivé následky (Straka a kol., 2006). Nejobodlnější methanogen se uvádí Methanobacterium thermoautotrophicum (Dohányos a kol., 1998), schopný přežít nárůst teploty překračující 50 °C. Příčinou zmíněné závislosti methanogenů na pH jsou acidobazické rovnováhy vybraných látek pozitivně nebo negativně ovlivňující bakterie.

Skládkové těleso produkuje nejvíce methanu při teplotách 50 – 60 °C, na většině těles jsou hodnoty teploty pouze kolem 40 °C .

6.4 Skládková voda a její vliv na biodegradační procesy

Již v první části byla zmíněna potřeba určité vlhkosti materiálu nutná k průběhu biodegradačních procesů. Mimo vodu z materiálu TKO (tzv. skládková voda) proniká do tělesa skládky voda srážková.

Srážková voda samotná není pro provoz skládky vůbec vhodná. Hodnoty pH srážkové vody mezi 4 a 5,8 (Pitter, 1996) nespádají do rozpětí vhodné pro činnost bakterií. Takové hodnoty pH vedou k inhibici všech procesů. Její chemické složení ji navíc dělá velmi labilní, pokud se týká stability hodnoty pH. Ve vodách obecně se o stabilitu pH nejvíce zaslouhují tlumivé roztoky neboli pufrý. Tlumivé roztoky jsou konjugované páry kyselin či zásad a jejich solí. Mají schopnost do určité míry vyrovnávat změnu pH roztoku vyvolanou přibýtkem jiné látky v roztoku. Skládkové vody s dostatečnou dobou zdržení v tělese skládky mají mnoho typů takových párů a obecně patří mezi nejlepší tlumivé roztoky.

Srážková voda má pouze jeden takový systém (uhličitanový systém daný přítomností rozpuštěného CO₂ ve vodě), o který se voda stačila obohatit v průběhu kontaktu kapaliny s atmosférou. Při svém průtoku nadložní vrstvou má jen omezený čas obohatit své složení o látky z okolí před prvním kontaktem s materiálem skládky (dle ústního sdělení RNDr. Šantrůčka).

Experimentálně je prokázána vhodnost cirkulace skládkové vody pro rychlý průběh biodegradačních procesů a to pokusnými velkoobjemnými jímkami v lokalitě Sonora County (Leckie a kol., 1979), a na lokalitě Mountain View (Pacey a van Heuit, 1983 a Haivadakis a kol., 1988), obě lokality ve státě Kalifornie, USA. Skládková voda je odebírána z báze tělesa a po přečerpání je rozstříkována na horní vrstvu materiálu. Dochází tak k zvlhčování horních vrstev materiálu tělesa. Výsledkem je homogenizace složení vod v tělese a zrychlení degradačních procesů. Absencí cirkulace je znevýhodněna vrchní vrstva materiálu proti spodním vrstvám. Dalším potenciálně zrychlujícím faktorem jsou dodávky vody do tělesa skládky. Pokud však není k dispozici skládková voda, musí být do vody dodán nějaký tlumivý systém. Experiment s příměsí mletého vápence ve vodě pouštěné do tělesa skládky (Pacey a van Heuit, 1983) prokázal další zesílení biodegradačních procesů.

Skládkové těleso musí být zajištěno proti úniku skládkové vody. Za vhodných podmínek stačí použití okolní velmi málo propustné zeminy (vhodné jsou spraše, sprašové hlíny a jíly) pro vybudování technické bariéry – tzv. minerálního těsnění. Další těsnicí bariéra se umísťuje pod svrchní rekultivační vrstvu zeminy a izoluje tak materiál TKO zhora. Voda do tělesa skládky může pronikat pouze

exponovanou částí tělesa, kde současně probíhá aktivní skládkování. Množství atmosférických srážek vsáknutých do této části tělesa je důležité pro následný rozvoj biodegradačních procesů.

Skládková voda pronikající tělesem až na bázi tělesa je sváděna do nepropustné jímky skládkových vod a redistribuována zpět do tělesa skládky. Množství vody v tělese je odvislé od aktuálních srážek v místě skládky a času expozice části tělesa. Tělesu skládky roste schopnost absorbovat vodu s růstem mocnosti tělesa.

7. Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat domácí a světovou literaturu a shrnout poznatky o ovlivňování geotechnických parametrů TKO různými činiteli. V průběhu psaní této práce jsem narážel na velmi omezené možnosti, pokud šlo o dostupnost tuzemské literatury. Je to způsobeno absencí jakéhokoliv zařízení použitelného pro výzkum geotechnických parametrů TKO. Nejbližší smykový krabicový přístroj dostatečných rozměrů pro materiál TKO je v Lausanne, Švýcarsko. V Německu si pro výzkum skládky TKO v Braunschweigu dovezli krabicový přístroj z USA. Pro výzkum geotechnických parametrů pro skupiny I. a II. mezních stavů nelze konvenční přístroje pro zeminy v případě materiálu TKO použít z prostého důvodu: Materiál TKO obsahuje zrna všech frakcí a je velmi heterogenní a anizotropní. Je vhodné zkoumat co největší objem materiálu současně. Druhým problémem je ovlivnění vlastností materiálu vlivem odběru vzorku a následné manipulace s ním. Pokud se k tomu přidají různé technologické postupy, vzniká velký rozptyl v hodnotách. Velký rozptyl hodnot vlivem obou faktorů je nejvíce patrný u výsledků smykové pevnosti materiálu. Hodnoty ϕ' se pohybují od 15 do 65° a hodnoty c' mezi 0 a 64 kPa. V případě I. MS je příčina rozptylu hodnot ještě jedna. V některých pracích se měřilo normálové napětí v nižších hodnotách, než je obvyklé ($\sigma' < 50$ kPa) a zjistilo se u materiálu TKO neobvyklé chování. Při $\sigma' < 30$ kPa se materiál choval jako soudržná zemina (vysoká hodnota c' a nízká hodnota ϕ'). Po překročení určitého napětí se materiál chová jako nesoudržná zemina (vysoká hodnota ϕ' a nízká hodnota c').

Zrnitost materiálu je dána zdrojovým materiálem. Velké části materiálu jsou v průběhu přepravy nebo při zhutňování deformovány. Jemnozrná složka se při hutnění mění méně, protože se jedná zpravidla o zrna zemin nebo jim podobným materiálům.

Vlhkost materiálu je odvislá od množství srážek spadlých po dobu mezi zahájením skládkování a uzavřením tělesa skládky a také od hydraulickou vodivostí materiálu. Zdrojem vody jsou srážky spadlé na těleso skládky. Po uzavření skládky nedochází k vnějšímu přírůstku vlhkosti. Po uzavření lze vlhkost regulovat rozstříkem skládkových vod jímaných z nepropustné jímky skládkových vod. Použit vlhkost ze srážek spadlých na krycí vrstvu zeminy nebo skládkovou vodu odčerpávat z tělesa

skládky není platnou legislativou ČR povoleno. Místy ve světě, zejména v rozvojových zemích, tato legislativa neplatí nebo se nedodrží. Vlhkost je jedna ze zásadních faktorů ovlivňujících jak geotechnické vlastnosti materiálu, tak také provoz skládky. Při zhutňování materiálu a biodegradačních procesech je vlhkost materiálu kritická. Vzhledem k objemové tíze suchého materiálu TKO ($4 - 9 \text{ kN/m}^3$) má voda významný podíl na objemové hmotnosti celého tělesa.

Faktory ovlivňující I. a II. mezní stav se v případě zanedbání biodegradačních procesů shodují se zeminami. Není zatím známo, jak moc promlouvají do obou mezních stavů biodegradační procesy. Výzkumy věnující se vlivu biodegradačních procesů na pevnost a deformace materiálu TKO proběhly zatím mimo území ČR a je jich jen několik málo. Více informací se lze dozvědět nepřímo porovnáním údajů z různých skládek. Vliv rozkladných procesů na smykovou pevnost TKO je potvrzen.

Hodnoty Poissonova čísla a dalších modulů materiálu TKO se obtížně získávají laboratorním měřením, protože je prakticky nemožné odebrat reprezentativní vzorek materiálu. Pro studium tělesa skládky TKO byl vyvinut experimentální postup pomocí rychlosti primárních a sekundárních seizmických vln. V ČR nebyl tento postup zatím aplikován. Dle seizmických měření má výrazný vliv na deformační / pružnostní parametry materiálu TKO jeho heterogenita. Měření geotechnických parametrů II. MS komplikuje skutečnost, že materiál TKO nezná pojem materiálová konstanta.

Materiál TKO se při zhutňování chová jako jemnozrná zemina. Proti zeminám se odlišuje vyšší optimální vlhkostí (w_{opt} přibližně 50%) a nižší dosahovanou objemovou hmotností.

V případě materiálu TKO je ještě mnoho nejasností kolem odlišného chování materiálu TKO od chování zemin. Právě tomu by se měla česká odborná literatura, která je v případě této tematiky velmi chudá, věnovat. Otázkou je, nakolik by nepomohlo vybavení některé laboratoře speciální technikou na měření parametrů materiálu TKO. Běžné zařízení laboratoře mechaniky zemin na zkoušení materiálu TKO nestačí.

V Praze dne, 29.7.2013

Václav Sedláček

Seznam použité literatury

- Babu G. L. S., Reddy K. R., Srivastava A., Kulkarni H. S. (2010) Reliability Analysis of Municipal Solid Waste Landfill Slopes, 6th International Congress of Environmental Geotechnics, New Delhi, India, 1711-1716.
- Beaven R.P. and Powrie W. (1995) Hydrigeological and Geotechnical properties of refuse using a large scale compression cell, Proc. 5th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Sardinie, 745-760.
- Benešová L., Černík B., Kotoulová Z. (2011) Základní charakteristiky komunálních odpadů, Odpadové fórum Kouty nad Desnou 13-15.4.2011, 8 str.
- Castelli F., Maugeri M. (2008) Experimental analysis of waste compressibility, Proceedings Geocongress 2008, ASCE Geotechnical Special Publication No. 117, 208-215.
- Dohányos M., Zábranská J., Jeníček P., Fialka P., Kajan M. (1998) Anaerobní čistírenské technologie, NOEL2000, Brno, 343 str.
- Fanderlík I. (1996) Vlastnosti skel, Informatorium spol s.r.o., Praha, 313 str.
- Graves, R. E. (2000) Environmental Engineering Part 637/2 Composting, National Engineering Handbook, US Department of Agriculture, 62 str.
- Haivadakis C.P., Findikakis A.N., Papelis C., Leckie J.O. (1988) The Mountain View Controlled Landfill Project Field Experiment, Waste Man. Res. 6, 103-114.
- Hejátková K. (2008) Řešení odpadu v regionu, první vydání, Zemědělská a ekologická regionální agentura o. s., Náměšť nad Oslavou, 60 str.
- Holtz R., Kovacs W. (1981) An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., 646 str.
- Houston W. N., Houston S. L., Liu J. W., Elsayed A., Sanders C. O. (1995) In-Situ Testing Methods for Dynamic Properties of MSW Landfills, Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills, ASCE Geotechnical Special Publication No. 54, Reston, Virginia, 73-82.
- Jesenák J. (1994) Mechanika zemín, stavebná fakulta Slovenskej Technickej Univerzity, Bratislava, 249 str.
- Kára J., Pastorek Z. a Příbyl E. (2007) Výroba a využití bioplynu v zemědělství, Výzkumný ústav zemědělské techniky v. v. i., Praha, 120 str.

Kavazanjian E., Matasovic N., Bonaparte R., Schmertmann G. R. (1995) Evaluation of MSW properties for Seismic Analysis, Geotechnical Special Publication No. 46, ASCE, Reston, Virginia, 1126-1141.

Kolář L. (1969) Popílky a možnosti jejich využití, 1. Vydání, Práce , 96 str.

Kudrna Z. (2012) Zpráva o vyhodnocení měření sedání skladky TKO v Uhách, Praha 2012, 19 str.

Leckie J.O., Pacey J. G., Haivadakis C.P. (1979) Lanfill Management with Moisture Control, J. Environ. Eng. Div.EE2 (4), 337-355.

Lee J. J. (2007) Dynamics Characteristics of Municipal Solid Waste in Linear and Nonlinear Strain Ranges, disertační práce, University of Texas, Austin, Texas, USA, 446 str.

Manassero M., Van Impe W. F., a Bouazza A. (1996) Waste Disposal and Containment., Proc. 2th International Congress on Environmental Geotechnics, sv. 3 , Osaka, Japonsko, 1425-1474.

Matasovic N., Kavazanjian E., Abourjeily F. (1995) Dynamics Properties of Solid Waste from Field Observations, Proc. 1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, sv. 1, str. 549-554.

Pacey J. G. , van Heut R. E.(1983) Analysis of Lanfill Gas Enhancements Data, Controlled Lanfill Project, Mountain View, California, Int. Gas. Res. Conf. IGRC/B20-83 13-16.6,London UK

Pitter P. (1996) Hydrochemie, 3. vydání, VŠCHT Praha, 555 str.

Reddy K. R., Hettiarachchi H., Parakalla N., Gangathulasi J., Bogner J. E. (2009) Geotechnical properties of fresh Municipal Solid waste at Orchard Hills lanfill, USA, Waste Management Journal Volume 29, 952 – 959.

Reddy K. R., Hettiarachchi H., Gangathulasi J., Bogner J. E. (2011) Geotechnical properties of Municipal solid waste at different phases of biodegradation, Waste management Journal Volume 31, Elsevier science B. V., Amsterdam, Nizozemí, 2275 – 2286.

Rees J. F. (1980) The Fate of Carbon compounds in the Lanfill Disposal of Organic Matter, J. Chem. Tech. Biotechnol.30, 161-175.

Sighn M. K. (2008) Characterization of Stress-Deformation Behaviour of Municipal Solid Waste, disertační práce, Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Kanada, 177 str.

Sowers G. (1973) Settlement of Waste Disposal Fills, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, International Society for Soil Mechanics and Foundation, Montreal, Quebec, Kanada, 207-210.

Straka F., Dohányos M., Zábranská J., Jeníček P., Dědek J., Malijeviský A., Novák J, Oldřich J. a Kunčarová M. (2006) Bioplyn - příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových stanic, II. rozšířené vydání, GAS s.r.o., Praha, 706 str.

Wong W. W. Y. (2009) Investigation of the Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste as a function of Placement Conditions, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, Kalifornie, 140 str.

Xiong X., Gui G., Shi B., Wang B., Jia M., Zhao Q., Li C., (2008) Evaluation and Discussion of Liner System in Sanitary Landfills, 9th Int. Symposium of Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, 1st - 4th June, Hong-Kong, Čína, 189-199.

Zekkos D.P. (2005) Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste , Disertační práce, Department of Civil and Environmental engineering, University of Berkeley, Kalifornie, USA, 1156 str.

Zekkos D. P., Bray J. a Riemer M. F. (2008) Shear modulus and Material damping of Municipal Solid waste Landfill based on large-scaled cycling triaxial testing, Canadian Geotechnical Journal Vol. 45, 45 – 58.