

UNIVERZITA PARDUBICE
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza chování vyztužené zeminy s rozptýlenou
výztuží

Aneta Kaftanová

Bakalářská práce
2014

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aneta Kaftanová**
Osobní číslo: **D08350**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Analýza chování vyztužené zeminy s rozptýlenou výztuží**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Zhodnocení současného stavu v řešené problematice v ČR a v zahraničí
- 2) Písemný elaborát provedených laboratorních zkoušek
- 3) Grafické a početní vyhodnocení zkoušek
- 4) Fotodokumentaci

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Šimek, J., Holoušová, T. Mechanika zemin a zakládání staveb Skriptum ČVUT v Praze, 1996.

Day, Robert W. Soil testing manual: procedures, classification data, and sampling practices.

McGraw-Hill Professional, 2001. ISBN 0071363637, 9780071363631.

Vacek, J.: Geotechnika II, UPa DFJP, Pardubice 2000.

Lamboj, L.; Štěpánek, Z. Mechanika zemin a zakládání staveb. ČVUT, 2005.

Vaníček, I.: Mechanika zemin, Skripta FSV ČVUT, 2000

Hulla, J., Turček, P. Zakladanie stavieb Vyd. Jaga group, v.o.s. ISBN 80-88905-05-2, 1998.

I.Vaníček, I.Kudrnáčová, Mechanika zemin - cvičení, skriptum ČVUT

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2013**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Vladimír Dolžal, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1. února 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 20. 05. 2014

Aneta Kaftanová

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat Ing. Aleš Šmejda, Ph.D. za čas strávený v laboratoři.
Dále za vedení a odborné rady při tvorbě bakalářské práce.

Anotace

Cílem práce je představit problematiku rozptýlené výztuže a zhodnotit vliv vláken na vlastnosti zeminy. Práce obsahuje různé druhy vláken s jejich laboratorními pokusy za účelem zjištění vlivu na chování zeminy, jak v České republice tak hlavně v zahraničí.

Klíčová slova

zemina, výztuž, vlákno, geosyntetika

Title

Analysis of the behavior of reinforced soil with sparse reinforcement

Annotation

The aim of thesis is to introduce the problem of dispersed reinforcement and evaluate the effect of fiber on the properties of the soil. Working includes the various types of fibers and their laboratory experiments to determine the effect on the soil behavior, in the Czech Republic and in another countries.

Keywords

soil, reinforcement, fiber, geosynthetic

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	9
Seznam grafů	9
1 Úvod	11
2 Vyztužení zemin	12
2.1 Různé postupy vyztužení zemin	12
2.2 Geosyntetika	13
2.2.1 Dělení geosyntetik	13
2.2.2 Funkce a užití geosyntetik	14
3 Vlákna	14
3.1 Klasifikace	14
3.2 Stručná historie	14
3.3 Přírodní vlákna	15
3.3.1 Kokosové vlákno	16
3.3.2 Sisal	16
3.3.3 Palmové vlákno	17
3.3.4 Juta.....	17
3.3.5 Len	18
3.3.6 Barely slámy	18
3.3.7 Bambus	18
3.3.8 Třtina	19
3.4 Syntetická umělá vlákna	19
3.4.1 Polypropylen.....	19
3.4.2 Polyester	20
3.4.3 Polyethylen	20
3.4.4 Skelné vlákno	20
3.4.5 Nylonové vlákno	21
3.4.6 Ocelové vlákno	21
3.4.7 Polyvinyl alkohol.....	21
3.5 Oblast použití.....	21

3.6	Výhody použití vláken	21
3.7	Nedostatky při vyztužování zemin	22
3.8	Příprava laboratorních vzorků s rozptýlenou výztuží.....	22
3.9	Problematika v České republice	23
4	Praktická část.....	24
4.1	Laboratorní přístroje	24
4.1.1	Triaxiální přístroj ELE Multiplex 50, 25 – 3700.....	24
4.1.2	Váha Kern 600-2M.....	24
4.1.3	Váha KERN DE60K20.....	25
4.1.4	Sušárna VENTICELL 111	25
4.1.5	Penetrometr (kuželový přístroj).....	26
4.1.6	Moždíř	27
4.1.7	Automatizovaný mechanický smykový přístroj	27
4.1.8	Edometr	28
4.2	Laboratorní zkoušky	29
4.2.1	Stanovení meze plasticity	29
4.2.2	Stanovení meze tekutosti	30
4.2.3	Standardní zkouška Proctor	32
4.2.4	Pyknometr.....	33
4.2.5	Hustoměrná zkouška	34
4.2.6	Smyková krabicová zkouška	37
4.2.7	Oedometrická zkouška stlačitelnosti	41
5	Závěr a zhodnocení.....	45
6	Zdroje	46

Seznam zkratek

PP polypropylen

PET polyester

PE polyethylen

PVA polyvinylalcohol

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Netkaná geotextílie	13
Obrázek 2 - Geosyntetika	13
Obrázek 3 - Babylon.....	15
Obrázek 4 - Kern 600-2M	24
Obrázek 5 - Kern DE60K20	25
Obrázek 6 - Venticell 111.....	26
Obrázek 7 - Penetrometr.....	26
Obrázek 8 - Moždíř.....	27
Obrázek 9 - Smykový přístroj	28
Obrázek 10 - Edometr.....	28
Obrázek 11 - Válečky.....	29

Seznam tabulek

Tabulka 1 - ELE Multiplex vlastnosti	24
Tabulka 2 - Kern 600-2M vlastnosti.....	25
Tabulka 3 - Kern DE60K20 vlastnosti	25
Tabulka 4 - Penetrometr vlastnosti.....	26
Tabulka 5 - Moždíř vlastnosti.....	27
Tabulka 6 - Naměřené hodnoty při stanovení meze plasticity	30
Tabulka 7 - Stanovení meze plasticity.....	30
Tabulka 8 - Stanovení meze tekutosti - kužel 80g/30°	30
Tabulka 9 - Stanovení meze tekutosti	31
Tabulka 10 - Proctor	32
Tabulka 11 - Tabulka hustoty pomocné kapaliny	33
Tabulka 12 - Hustoměrná zkouška průběh výpočtu	35
Tabulka 13 - Hustoměrná zkouška	36
Tabulka 14 - Hustoměrná zkouška výsledek obou částí.....	36
Tabulka 15 - Výsledky závislosti smykové pevnosti na normálovém napětí	41
Tabulka 16 - Výsledky oedometrické zkoušky pro 0% vláken	42
Tabulka 17 - Výsledky oedometrické zkoušky pro 0,5% vláken	42
Tabulka 18 - Výsledky oedometrické zkoušky pro 2% vláken	43

Seznam grafů

Graf 1 - Stanovení meze tekutosti	31
Graf 2 - Proctor.....	33
Graf 3 - Dynamická viskozita vody.....	35
Graf 4 - Křivka zrnitosti	37
Graf 5 - Závislost pevnosti na posunutí smykové krabice 2kg	38

Graf 6 - Závislost pevnosti na posunutí smykové krabice 4kg	38
Graf 7 - Závislost pevnosti na posunutí smykové krabice 6kg	39
Graf 8 - Procenticky vyjádřena hodnota zlepšení.....	39
Graf 9 - Závislost smykové pevnosti na normálovém napětí pro 0% vláken.....	40
Graf 10 - Závislost smykové pevnosti na normálovém napětí pro 0,5% vláken.....	40
Graf 11 - Závislost smykové pevnosti na normálovém napětí pro 2% vláken.....	40
Graf 12 - Dilatance pro 2% vláken.....	41
Graf 13 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku pro 0% vláken.....	42
Graf 14 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku pro 0,5 % vláken.....	43
Graf 15 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku pro 2 % vláken.....	43
Graf 16 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku	44

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je představení technologií zlepšení vlastností zeminy a to zejména principem rozptýlené výztuže, kdy se do zeminy přidává další materiál tzv. vlákno.

V teoretické části práce jsou rozebrány různé druhy vláken, které se liší svými vlastnostmi, výrobou a vlivem na konečnou odolnost zeminy. Práce se zabývá oběma typy vláken a to jak syntetickým tak i přírodním, u kterých se v poslední době zvyšuje jejich použití, zejména kvůli jejich šetrnosti k životnímu prostředí. U každého z dílčích vláken je popsán nejen postup jejich získávání respektive výroby, ale hlavně jsou zde uvedeny i laboratorní pokusy, jak českých tak i zahraničních odborníků, které zkoumají jejich vlastnosti v konkrétních případech jejich praktického použití.

Mimo českých odborníků, které se v současné době zabývají problematikou zemní výztuže jsou v práci popsány i české firmy, které se zabývají výrobou geosyntetických materiálů.

V praktické části jsou provedeny vybrané laboratorní zkoušky nad vlastním vzorkem zeminy. Jsou zde uvedeny výsledky zkoušek, které slouží k základnímu zatřídění zeminy, určení meze tekutosti a plasticity, určení optimální zhutnitelnost zeminy pomocí Proctorovy zkoušky a určení měrné hmotnosti pomocí pyknometru. Hlavní důraz byl však kladen na provedení zkoušek nad zeminou obohacenou o konkrétní obsah vláken. Pro zjištění vlivu obsahu vláken na vlastnosti zeminy, byla provedena smyková krabicová zkouška a oedometrická zkouška stlačitelnosti. Všechny vybrané laboratorní zkoušky jsou doplněny nejen o postup, ale hlavně o dosažený výsledek, který je v některých případech znázorněn i v grafické podobě pomocí grafů.

2 Vyztužení zemin

Zeminu můžeme považovat za kombinaci čtyř základních typů materiálu a to šterku, písku, jílu a sedimentů obecně se vyznačující nízkou pevností v tahu a ve smyku. Ostatní vlastnosti mohou silně záviset na podmínkách životního prostředí v okolí. Z důvodů zlepšení některých vlastností jako je pevnost ve smyku, stlačitelnost, hustota a hydraulická pojivost, se využívá tzv. vyztužování. Zlepšení zeminy se provádí například pomocí kamenných sloupů nebo kořenových pilot či mikropilot. Mezi hlavní úkoly a cíle při vyztužování zeminy patří zlepšení stability, zvýšení únosnosti. [1]

2.1 Různé postupy vyztužení zemin

K vyztužování zemin se využívá především přírodního nebo syntetizovaného materiálu. Pro zlepšení vlastností zemin se uplatňují různé techniky vyztužování. Ty se dají dále klasifikovat do následujících kategorií:

- Zlepšení vlastností zeminy
 - Mechanické zlepšení zeminy se uskutečňuje smícháním zeminy s jinou odlišnou zeminou. Tímto smícháním se dosáhne lepší zhutnitelnosti a mechanických vlastností.
 - Přidáním do zeminy příměsi pojiva se celkově zlepši zhutnitelnost a zároveň se sníží vlhkost zeminy. Dosáhne se vyšší únosnosti a sníží se namrzavost.
- Vyztužení násypů pomocí geotextilií nebo pomocí jiných vyztužovaných prvků při zabudování zeminy do vrstevnatého násypu sendvičového typu.

U jemnozrnných a písčitých zemin je vhodné použít vláknitou výztuž. Pokud průměr zrn nepřesahuje velikost zrn v zemině, poté můžeme uvažovat, že ve šterkových zeminách nebudou mít vlákna vliv na jejich mechanické vlastnosti. U šterkových zemin se vyztužováním zeminy nebere v úvahu. [1]

- Varianty použití rozptýlené výztuže:
 - redukce trhlin ve svrchní vrstvě konstrukce
 - zasypy mostních pilířů
 - konstrukce násypů
 - protierozní opatření
 - snížení zemních tlaků od zemních konstrukcí

2.2 Geosyntetika

Obecně se jedná o termín, který se týká vyztužování zemních konstrukcí pomocí výrobků, které se skládají ze složek vyrobených ze syntetického případně přírodního polymeru ve formě pásů. Odborně se o tomto pásu mluví jako o vláknu, které se používá se zeminou nebo jiným materiálem při zemních a stavebních pracích. [2, 3]

2.2.1 Dělení geosyntetik

Pokud v rámci geosyntetik mluvíme o tzv. geotextíliích, pak máme namysli plošný, propustný, syntetický nebo přírodní textilní materiál, který se liší svojí strukturou podle typu jejich výroby.



Obrázek 1 - Netkaná geotextílie [2]

Kromě geotextílií se geosyntetika dají klasifikovat do geomembrán, geomříží, goesítí, geobuněk a geokompozit. Geomembrána je materiál ve tvaru továrně vyrobené tabule s velmi nízkou propustností nebo-li fólie, jejíž proděravěním dostáváme geomříž. Geosítí je chemické, teplotní nebo mechanické spojení pásů. Na druhé straně geobuňka je pouze jejich lokální pospojování. Nakonec geokompozita už jak název napovídá je výrobek tvoření více druhy komponentů. [2, 4]



Obrázek 2 – Geosyntetika [4]

2.2.2 Funkce a užití geosyntetik

Geosyntetika jsou nyní již nedílnou součástí všech, kteří pracují ve stavitelství. V posledních letech se trh s těmito materiály rozrůstá a výrobci nabízejí stále novější výrobky s lepšími vlastnostmi a kvalitou. Každý typ geosyntetického výrobku má své specifické vlastnosti, které předurčují jeho použití. Jinými slovy jednotlivé druhy nelze použít všude a do značné míry to závisí na daném problému a odbornému posouzení.

Mezi širokou škálu použití geosyntetik patří dopravní stavitelství a to pro výstavbu cest, dálnic, železnic a parkovišť. Dále pak pro zvyšování únosnosti podloží, pro výstavbu opěrných stěn, při výstavbě protihlukových bariér a v neposlední řadě všude, kde je potřeba vyztužení, drenáž a protierozní funkce. [2]

Geosyntetické materiály se vyznačují funkcemi, které zajišťují mnoho oblastí použití. Mezi tyto funkce patří funkce ochranná, která slouží k zachování vlastností původního materiálu při pokládce dalšího. Drenážní funkce odvádí vodu z drenážní konstrukce v požadovaném množství po celou dobu její životnosti. Separační funkce zabraňuje mísení dvou sousedních podkladních vrstev a chrání je proti klimatickým vlivům. Výztužná funkce zvyšuje stabilitu násypů, dovoluje budování strmějších svahů a zlepšuje tahové vlastnosti konstrukce a filtrační funkce zaručuje proudění vody v kolmém směru. [3]

3 Vlákna

Standardní zemina s vlákny je definována jako hmotnost zeminy, která obsahuje náhodně rozložené diskretní prvky, tj. vlákna, které pomáhají ke zlepšení mechanického chování zeminy. Jinými slovy zemina se chová jako složený materiál, ve kterém jsou uložena vlákna s relativně vysokou pevností v tahu. [1]

3.1 Klasifikace

Na vlákna jakož to na materiál pro zlepšení vlastností zeminy může být nahlíženo ze dvou odlišných úhlů pohledů. Prvním je náhodné začlenění vláken do půdy, druhým pak přidáním orientovaných vláknitých materiálů, například již zmíněných geosyntetik. Je potřeba zdůraznit, že syntetická vlákna případně geosyntetika poskytují v nejhorším případě alespoň částečné zlepšení vlastností než je v případě obyčejné zeminy.

3.2 Stručná historie

Vyztužování zeminy patří mezi velmi starou technologii, která se začala používat již dávnými předky. Ke zlepšení stability svahů se již nějaký čas používá vegetace. Hliněné cihly s rákosem nebo slámou byly již popisovány v Bibli. Stabilizace zemin byla prováděna celá tisíciletí. Již v Mezopotámii a ve starém Římě objevili, že je možné zlepšit vlastnosti zemin smícháním půdy se stabilizačním činidlem, jako je vápenec či vápník. Alternativou je poté přítomnost kořenů rostlin, jako přírodní způsob vyztužení pomocí vláken. Tato rostlinná vlákna pomáhají ke zlepšení pevnosti a stabilitě přírodních svahů.

Tento koncept vyztužení vláknou byl rozpoznán již před více než 5000 lety. Starověké civilizace používali seno a slámu, aby posílili bahenní bloky za účelem vytvoření zpevněného svahu. Existuje i několik starověkých budov, které jsou tím jasným důkazem. Například Velká čínská zeď, kde bylo pro vyztužení využito větve stromů, nebo například užití tkaných rohoží u zikkuratu v Babylonu.

Nejen v antice se používaly přírodní materiály jako výztuž. Tato metoda je nadále používána napříč časem. Při zkoumání historických staveb i teď v nich najdeme pozůstatky z hlín, které jsou smíchány s rákosem, slámou nebo prasečími štětinami.



Obrázek 3 – Babylon [2]

V novodobé historii se o vývoj v oblasti vyztužování zemin postaral Vidal. V roce 1966 prokázal, že využití vláknitých materiálů zvyšuje odolnost zeminy proti smyku. Od té doby se postavilo nesčetně staveb v mnoha zemích světa využívající techniky zemní výztuže. Ze začátku se pro opěrné zdi a svahy využívaly tzv. polyesterová vlákna. V současné době však více pozornosti přitahují náhodně rozdělené vlákna ve vyztužené zemině tzv. micro vlákna. [1] [2]

3.3 Přírodní vlákna

V současné době se vývoj upírá spíše v hledání ekologicky šetrných materiálů, které by nahradily doposud využívané syntetická vlákna. Jedné se především o vědomí, že naše planeta je abnormálně znečištěna a ne-obnovitelné materiály tu dříve nebo později nebudou. Tento nepopiratelný fakt se stal důvodem pro mnoho experimentů pro vytvoření studie o používání přírodních vláken pro vyztužování. Ukazuje se, že ekologické

kompozitní materiály mají důležitou roli v moderním průmyslu. Hlavní nevýhoda při použití přírodních materiálu je biologický rozpad.

Hlavní faktory ovlivňující vlastnost přírodního vlákna jsou, ze které části rostliny pochází, jaký je věk rostliny a jak bylo vlákno vyrobeno. Je třeba uvést, že přírodní vlákna již byla použita v mnoha rozvojových zemích zejména pro jejich velice nízké náklady.

V následujících několika kapitolách jsou uvedeny některá přírodní vlákna a jejich vliv na vlastnosti vyztužené zeminy. [1]

3.3.1 Kokosové vlákno

Jako vlákno je využit jen vnější vláknitý obal zralého kokosového ořechu. Vlákna jsou normálně 50-350mm dlouhá a skládají se převážně z ligninu, taninu, celulózy, pektinu a dalších ve vodě rozpustných látek. Nicméně, vzhledem k vysokému obsahu ligninu, degradace kokosových vláken probíhá mnohem pomaleji než v jiných přírodních vláknech. Vlákna mají dlouhou životnost 4-10 let. Absorpce vody je asi 130 až 180%, a průměr je asi 1-0,6mm.

Kokosové vlákno má velkou pevnost v tahu. Degradace kokosových vláken závisí na typu zeminy, ve které je využito a na klimatických podmínkách. Při použití v hlíně je zjištěno, že udrží až 80% vody po dobu půl roku. Kokosové geotextilie jsou v současné době k dispozici s širokou škálou vlastností, které mohou být ekonomické pro dočasné vyztužování. Vlákna vykazují lepší pružné reakce oproti syntetickým vláknům a vyšší koeficient tření. [1]

Ravishankar a Raghavan potvrdili, že v případě kokosových vláken, se maximální hustota suché zeminy s přídavkem kokosu snižuje a hodnoty optimálního obsahu vlhkosti se zvyšují se zvyšujícím se procentem obsahu kokosových vláken. Jinými slovy se procento absorpce vody a pevnost v tahu zvyšuje se zvyšujícím se obsahem kokosových vláken v zemině. [7,8]

3.3.2 Sisal

Sisal je celulózové vlákno (v angl. Lingo-cellulose), které se tradičně používá jako vyztuž sádrokartónů ve stavebnictví. Vyznačuje se 60 až 70 % absorpcí vody a průměr tohoto vlákna činí asi 0,06 - 0,4mm. Sisalová vlákna se získávají z listů rostlin, které se liší ve velikosti, ty jsou mezi 6 - 10cm na šířku a 50 do 250 centimetrů na délku. Obecně platí, že Brazílie, Indonésie a východní africké země jsou hlavními světovými producenty sisalových vláken.

Skupina okolo Ghavami zjistila, že začlenění 4 % sisalových nebo kokosových vláken, značně zlepšují tvárnost a mírně zvyšují pevnost v tlaku. Bylo také zjištěno, že využití

bitumenové emulze¹ nepomohlo nejen ke zlepšení spojení mezi zeminou a vlákny, ale výrazně se zlepšila odolnost zeminy. [9]

Prabakar a Siridihar ve své studii využili 0,25% , 0,5% , 0,75% a 1% zastoupení sisalového vlákna v zemině. Využito bylo čtyř různých délek vláken a to 10, 15 , 20 a 25mm pro posílení. Došli k závěru, že sisalová vlákna snižují hustotu suché půdy. Zvýšením délky a obsahu se také snižuje hustota půdy za sucha. Stejně tak bylo zjištěno, že smykové napětí se zvýší nelineárně s nárůstem délky vlákna až do 20 mm a dále, že zvýšení délky snižuje smykové napětí. Obsah vláken také zlepšuje pevnost ve smyku. [10]

3.3.3 Palmové vlákno

Vlákno se vyrábí z kůry plodů kokosové palmy. Palmová vlákna mají mnoho speciálních vlastností, které se projevují na konečných vlastnostech vyztužené zeminy. Mezi pozitiva, které přináší použití palmových vláken jsou nízké náklady, vysoká trvanlivost, lehkost a velmi hojně zastoupení v některých regionech. Na druhé straně také vysokou kapacitu zatížení a relativní odolnost vůči deformaci. Bylo zjištěno, že vlákna z palm jsou velice křehká, mají nízkou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti, ale velmi vysokou absorpci vody. [1]

Marandi provedl několik testů nad vzorkem čistých palmových vláken, mezi které zařadil například pevnost v prostém tlaku či zhutnění. Došel k výsledku, že pokud je zemina tvořena pouze 0 až 1% palmovými vlákny konstantní délky, dochází k nárůstu maximální pevnosti. Stejný trend byl pozorován i v případě nárůstu délky vlákna na velikost 20 až 40mm. [11]

3.3.4 Juta

Juta je rostlina, která se hojně pěstuje v Bangladéši, Číně, Indii a Thajsku. Jutové vlákna jsou extrahovány z vláknité kůry jutové rostliny, která roste do výšky 2,5m s průměrem základny kmene kolem 25mm. Existují různé druhy jutových vláken s různými vlastnostmi.

Juta je především šetrná k životnímu prostředí. Vlákno, které se používá pro výrobu porézních textilií, jsou široce používány pro filtraci, odvodnění a stabilizaci zeminy. Obchodní název výrobku tkaného z jutových vláken je GEOJUTE. [1]

Aggarwal a Sharma použili různé délky vláken (5-20mm) z juty v různých procentech zastoupení v zemině (0,2-1,0%) k posílení zeminy. Živice byla používána pro nátěr vláken na jejich ochranu před mikrobiálním napadením a degradací. Došli k závěru, že juta snižuje a zároveň zvyšuje otevřené metody koordinace. Maximální hodnota je pozorována u 10mm dlouhých a 0,8% jutových vláken, což představuje nárůst hodnoty o více než 2,5 krát od prosté zeminy. [12]

¹ Jedná se o typ izolace sloužící k lepšímu spojení několika materiálů. Využívaný například při asfaltování, kdy je potřeba docílit lepšího spojení mezi podkladovým materiálem a asfaltem.

Islám a Ivashita ukázali, že jutová vlákna jsou účinná pro zlepšení pevnosti malty, jakož i soudržnosti mezi blokem a maltou. [13]

3.3.5 Len

Pravděpodobně nejstarší textilní vlákno je len. Byl využit již pro výrobu pláten od starověku. Len je štíhlá rostlina s modrými květy. Pěstuje se pro své vlákna a semena v mnoha částech světa. [1]

Segetin ve snaze zlepšit tažnost zeminy doporučil využití lněných vláken o délce 85mm a 0,6% obsahem v zemině. [14]

3.3.6 Barely slámy

Barely slámy jsou dalším typem přírodních vláken, které byly využívány již ve starověkém Egyptě. Stébla slámy byly přidávány do hliněných cihel jako výztuhy při výstavbě obydlí. Do začátku 19. století se sláma začala používat i ve spojeném království. V dnešní době se pěstuje ve všech venkovských oblastech po celém světě. Používá se zejména k výrobě složených bloků zeminy, která se vyznačuje zlepšenými vlastnostmi. Zároveň je využívání slámy nejvíce nákladově efektivní.

Pozitivní účinky po přidání slámy v podobě sníženého smrštění, zkrácené doby regenerace a posílené pevnosti v tlaku pozoroval Bouhicha. Směs slámy a cementu může tvořit stavební materiál, který rovněž snižuje znečištění ovzduší. Kromě zmíněných výhod může působit jako tepelně izolační materiál při nepříjemných povětrnostních podmínkách, pro udržení příjemných vnitřních teplot. [1]

Studie Ashoura, přidání vláken z pšeničné slámy, slámy z ječmene a dřevěných hoblin do omítky, vedla k významnému vlivu na její pevnost a tažnost. Je potřeba dodat, že obsah vláken byl kolem 1%. [15]

3.3.7 Bambus

Bambusové vlákno je regenerovatelné celulózové vlákno, které je zřídka kdy napadené škůdci nebo infikované patogeny. Vědci zjistili, že bambus vlastní jedinečné antibakteriální a bakteriostatické bio-agenty. Další vlastností bambusu je skryto v jeho kořenech, které jsou velice dobrými půdními pojivy a můžou tak zabraňovat erozi. Mezi nejdůležitější vlastnosti, kterými se bambusové vlákno vyznačuje, je vysoká pevnost v tahu, na druhé straně nízký modul pružnosti asi 33-40 kN/mm² a vysoká absorpce vody, okolo 40 až 45%. [1]

Testy provedené Couttsem ukázaly, že bambusové vlákno je možné začlenit do cementové směsi. Rozšířené testování Ramaswamy, který využil kořenů bambusu namísto vláken pro výztuž cementu došlo k výsledku, že jejich vliv na vlastnosti betonu je podobný jako v případě užití samotných bambusových vláken. [16,17,18]

3.3.8 Třtina

Cukrová třtina je travina, která roste do výšky až 6m o průměru až 6cm. Pro výztuž se používá zbytek, který vzniká po extrakci šťávy ze stonku cukrové třtiny. Průměr těchto vláken je kolem 0,2 až 0,4mm. Užití třtinových vláken je velice omezené, protože vlákna obsahují zbytkový cukr a ovlivňují tak vlastnosti uvnitř vlákna. Na druhé straně má tento zbytkový cukr dopad na konečnou výrobu, tj. tužší fáze lepení kompozitní struktury a z tohoto důvodu se objevila na trhu. [1]

3.4 Syntetická umělá vlákna

Jedná se o textilní suroviny, které se získávají syntézou vodíku, uhlíku, dusíku, síry, fluoru a chloru, kdy při chemických reakcích dochází ke spojování jednotlivých molekul a ty poté vytváří tzv. polymery. Syntetická vlákna slouží jako náhražka vláken přírodních zejména pro jejich cenovou dostupnost a pevnost. Dají se charakterizovat jako nemačková, rychleschnoucí a odolná vůči hmyzu. Mnohdy se kombinují s přírodními vlákny, aby byly mnohem účinnější. [5]

3.4.1 Polypropylen

Polypropylenové vlákno dále jen PP, je nejrozšířenějším vláknem při laboratorních zkouškách pro vyztužování zeminy. V současné době se využívá zejména ke zvýšení pevnostních vlastností, ke snížení smrštění a překonání chemických a biologických degradací zeminy. [1]

Výzkum Puppala a Musenda v rámci výztuže pomocí PP vláken došlo k závěru, že zemina má poté lepší pevnost v prostém tlaku. Z dalších experimentů na zkušebních úsecích, tvořených písčitou zeminou stabilizovanou PP vlákny, Santoni a Webster dospěli k závěru, že technika má velký potenciál zejména pro vojenské letiště a silniční aplikace. Písčitá vrstva silná 203mm tvořená PP vlákny byla dostatečná, aby vydržela značné množství vojenského provozu. Polní pokusy také ukázaly, že je nutné obohatit povrch o emulzní pojivo, aby se zabránilo vytahování vláken při provozu. [19]

Skupina vědců kolem Consolihho zkoumala odezvu zatížení tlusté homogenní hutněné písčité vrstvy vyztužené PP vlákny. Závěry testů doporučují potencionální použití vláknové výztuže pro mělké základy a jiné zemní práce, které mohou trpět nadměrnou deformací. [20]

Setty, Rao a Murthy prováděli triaxiální testy, CBR testy a testy pevnosti v tahu na prachovitém písku tvořeného černou bavlnou a vyztuženého pomocí polypropylenových vláken. Výsledky testů ukázaly významné zvýšení soudržnosti a mírný pokles úhlu vnitřního tření při obsahu vláken okolo 3%. [11, 21, 22]

Zaimoglu zjistil, že ztráta hmotnosti v PP vyztužené půdě (12mm, 0,75% z celkové suché půdy) byla téměř o 50% nižší, než je v nevyztužené zemině. To také ilustruje, že pevnost v tlaku se u vzorku podrobeného mrazu a tání obecně zvyšuje s rostoucím obsahem vláken. [23]

Tang vyšetřoval mikromechanické chování interakce mezi půdními částicemi a vyztužujícími PP vlákny. Došel k závěru, že mezifázová smyková únosnost vláken a zeminy závisí především na uspořádání půdních částic a efektivním rozhraní mezi povrchem vlákna a zeminou. [24]

3.4.2 Polyester

Dalším používaným syntetickým vláknem je polyester dále jen PET. V několika vědeckých studiích, například Consoliho a Kumara bylo zjištěno, že obsah PET vláken v jemném písku případně v jílu, zlepšuje mez pevnosti této zeminy. Obsah vláken byl stanoven postupně na 0%, 0,5%, 1%, 1,5% a 2% a byly testovány vlákna délky 3, 6 a 12mm. Výsledky jasně dokázaly, že se zvyšujícím se obsahem vláken respektive délkou se zvyšuje i pevnost a stabilita zeminy. [25]

Kromě výše zmíněných studií stojí za zmínku i práce Tanga a Maheswariho, kteří používali jiný obsah vláken a došli ke stejnému závěru. Dále je pak zajímavá studie japonských vědců, kteří zjistili, že krátká vlákna dokáží zvýšit stabilitu hráze proti dešťovým srážkám a povodním. [26]

3.4.3 Polyethylen

Na rozdíl od předešlých syntetických vláken, jsou polyethylenová (PE) vlákna využívána pro vyztužování pouze v malém rozsahu. Je o nich známo, že hustá přítomnost malých PE vláken má za následek zvýšení pevnosti zeminy stejně tak jako v případě PP a PET vláken. V současné době se však, co se týká jejich použití, nejčastěji využívají spolu s polypropylenovými vlákny v hlinitých případně písčitéch zeminách. [1]

3.4.4 Skelné vlákno

Consoli a ostatní ukázali, že zahrnutí skelných vláken do prachovitého písku účinně zlepšuje jeho sílu. V další práci zkoumali účinek PP, PET a skelných vláken na mechanické chování cementované půdy. Jejich výsledky ukázaly, že zahrnutí PP vláken výrazně zlepšilo křehkost cementové zeminy. [27]

Maher a Ho studovali chování kaolinitových vláken (PP a skelné vlákno) a zjistili, že zvýšení pevnosti bylo výraznější než v případě skelných vláken. Naopak Al-Refeai uvedl, že PP vlákna překonaly vlákna skelná. [28]

V současné době se skelná vlákna používají pro posílení nesoudržných zemin. Objem sklolaminátových vláken je obecně mezi 0,10% a 0,20%, vztažen na hmotnost směsi půdy. Experimentální studie ukázaly, že skelná vlákna zvyšují soudržnost půdy mezi 100 a 300 kN/m².

3.4.5 Nylonové vlákno

Kumar a Tábor studovali chování pevnosti nylonového vlákna vyztuženého prachovitým jílem s různým stupněm zhutnění. Studie ukazuje, že vrchol a zbytkové pevnosti vzorků pro 93% zhutnění je podstatně větší, než u vzorku zhutněného při vyšších hustotách. [27, 29]

Gosavi hlásil, že smícháním nylonových vláken a jutových vláken, hodnota CBR zeminy je zvýšena asi o 50%. Vzhledem k tomu, kokosové vlákno zvyšuje hodnotu na 96%. Optimální množství vláken, které má být smícháno s půdou je 0,75% a každý přírůstek vláken nemá významný nárůst hodnoty CBR. [7, 130]

3.4.6 Ocelové vlákno

Výztuhy ocelového vlákna nalezené v betonových konstrukcích slouží k posílení půdy cementových kompozitů. Kromě toho mohou ocelová vlákna pomoci ke zlepšení pevnosti půdy, toto zlepšení není porovnané s použitím jiného druhu vlákna. Nicméně Ghazavi a Roustaie doporučují použití tam, kde je půda ovlivněna mrazivými cykly. [1]

3.4.7 Polyvinyl alkohol

Polyvinylalkohol PVA, je syntetické vlákno, které v poslední době bylo použito k vyztužení betonu. Chemická odolnost vůči počasí a pevnost v tahu jsou lepší než u PP vláken. PVA vlákno má výrazně nižší úbytek tepla než nylon a polyester. Vyznačuje se specifickou hmotností 1,3 g/cm³, s dobrou přilnavostí na cement a vysoce anti-alkalickými vlastnostmi. [1]

3.5 Oblast použití

V případě vyztužování zeminy pomocí přírodních nebo syntetických vláken existuje několik oblastí jejich použití. Mezi nejvíce užívané patří silniční stavitelství, železniční násypy a svahy, opěrné zdi a obecně základy staveb.

V dlažebních vrstvách se výztuž využívá zejména k napomáhání zvýšení odolnosti proti vyjíždění kolejí. Vlákna se používají při výstavbě opěrných zdí a železničních násypů, kde zvyšují stabilitu a snižují náchylnost na sesunutí zdí. Tyto vlastnosti jsou zejména účinné, když se spolu s krátkým vláknem použije geomříž. Půdy smíchané s náhodnými vlákny jsou vhodné použít, jako záplaty pro opravy chybných svahů. Výztuž napomáhá proti zemětřesení. [1]

3.6 Výhody použití vláken

Tato kapitola popisuje nejdůležitější přínos využití náhodně distribuovaných vláken pro zpevnění zeminy. Obecně vlákna při výztuži zlepšují stabilizaci zeminy, pevnost v tahu, pružnost, koeficient tření a savost. Náhodně distribuovaná vlákna nejlépe simulují půdní směs tzn. přítomnost kořenů v zemině, která slouží jako přírodní výztuž. V případě takto distribuovaných vláken se napomáhá větší stabilizaci zeminy než v případě rovnoměrného

rozmístění. Tyto vlákna, na rozdíl od použití vápna, cementu a jiných chemických stabilizačních metod, významně neovlivňují povětrnostní podmínky.

Materiály, které se používají jako zemní výztuž jsou široce dostupné. Jedná se především o syntetická vlákna. Jak již bylo řečeno, v posledních letech se začínají více využívat ekologicky šetrnější materiály tzn. vlákna přírodní. Na místo syntetických vláken se v některých případech využívají kořeny rostlin, drcené pneumatiky nebo recyklovaný odpad. Hlavním přínosem v případě využití přírodních vláken není jenom jejich široká dostupnost, ekologičnost, ale zejména cena.

3.7 Nedostatky při vyztužování zemin

Použití vláken k vyztužování zemin má mnoho výhod, které posilují jejich použití. V praxi však existují některé nedostatky, které nebyly ještě zcela vyřešeny, z důvodu krátké existence této technologie výztuže na trhu. Mezi největší nedostatky, které jsou přímo spjaté se stářím technologie je nedostatek vědecké úrovně. Jinými slovy se jedná o existenci charakteristik použití vláken v různých typech zeminy, ale neexistence standartu a techniky pro konkrétní typ použití.

Druhým problémem je přilnavost mezi vláknem a zeminou. Při špatném styku vlákna a zeminy může při změně vlhkosti a teploty dojít ke snížení stability tohoto kompozitního materiálu, tzn. vlákno pak neplní funkci vyztužení. Chybí vědecký podklad pro tento typ problému, který je způsoben odporem půdy vzhledem k povrchu vlákna.

3.8 Příprava laboratorních vzorků s rozptýlenou výztuží

Všeobecně pro laboratorní výzkum vlivu vláken na stabilitu zeminy je důležitá příprava vzorků s rozptýlenou výztuží. Při přípravách zkušebních vzorků se musí dávat pozor na to, aby byla smíchána relativně homogenní směs, tzn. vlákna budou ve směsi rovnoměrně rozmístěna. Pomocí různých postupů se dají smíchat zkušební směsi. Při míchání se však musí brát zřetel na to, že to co můžeme udělat v laboratoři v malém měřítku, nemusí být aplikovatelné v in-situ.

Michalowski, Čermák (2003) prováděl vzorky tímto způsobem. Množství zeminy, které bylo potřeba rozdělit na 15 částí. Speciální vyrobenou mřížkou zajišťující, že vlákna nebudou uložena ve vzorku převážně horizontálně, položil na dno moždíře. Poté na mřížku rozprostřel jednu z patnácti částí zeminy a zakryl jí danou hmotností vláken. Takto to opakoval ještě se dvěma vrstvami zemina a vlákno. Mřížka se následně opatrně vytáhla na povrch, čímž docílil změny orientace vláken. Takto zhotovenou pětinu budoucího vzorku byla jemně zvlhčovaná, aby bylo dosaženo požadované pórovitosti. Mřížka se vrátila zpět na povrch směsi a daný postup se opakoval ještě se zbylým vzorkem. Tato zkouška, ale není vhodná pro použití na stavbě.

Fallorca, Pinto (2004) měl jednodušší metodu přípravy. Zemina se před zkouškou navlhčila požadovaným množstvím vody. Na jednu třetinu vlhkého vzorku se dala část

vláken a na ní následovala zemina opět s vlákny. Postup se opakoval do vyčerpání vzorku. Směs byla ručně smíchána a poté v Proctorově moždíři zhutněna. [1]

3.9 Problematika v České republice

Použití vláken je relativně nový způsob zemní výztuže, proto se základní informace týkající se dané problematiky nacházejí zejména v zahraničních zdrojích. V České republice se výzkumem zabývá Ing. Rubišarová, Ph.D., která se zabývá především využití krátkých syntetických vláken. Výzkum navazující na práci Ing. Rubišarové, Ph.D., zahrnující i terénní zkoušky a využívající vlákna PET, byl proveden skupinou lidí z katedry Geotechniky a podzemního stavitelství, za účelem zjištění smykové pevnosti a celkové únosnosti nového vzniklého kompozitního materiálu. [32]

Dalším výzkumem v tomto oboru se zabývá Čermák. Studie probíhala na téma metoda vyztužování zemin rozptýlenou výztuží. [6]

V České republice je několik firem, které se zabývají výrobou a vývojem geosyntetických materiálů. Mezi nejznámější patří například Kordárna Plus, a.s., Juta a.s. a GEOMAT s.r.o.. Tyto firmy mají zajímavou historii a vyváží množství produktů do zahraničí.

V roce 1948 byla zahájena výroba firmou Baťa Zlín, která se specializovala na výrobu bavlněných kordových tkanin. Na počátku 90.let minulého století začala výroba tkaných výztužných geosyntetik v Kordárně. Zabývají se výrobou tkaných výztužných geomříží, geokompozitů a geotextilií, které jsou určené pro stabilizaci podloží, náspů a asfaltových povrchů. Mimo to vyrábí technické tkaniny pro gumárenský průmysl.

Od druhé poloviny 19. století začala továrna společnosti Juta a.s. vyrábět příze, tkaniny, pytle, vázací motouzy a lana z přírodních materiálů. V současné době je hlavním výrobním produktem výroba sortimentu z polypropylenu a polyethylenu, které se používají ve stavebnictví, zemědělství a výroba technických materiálů. Pro dopravní stavby se používají hydroizolační folie, tkané geotextilie, netkané geotextili, nopované fólie, varovné pásky inženýrské sítě, drenážní geosyntetikum. Tato firma má více jak 80% produkce vyváženo do zemí celého světa. Náklady na výzkum a vývoj v rámci stanovených projektů za rok 2010 činily 13 mil. Kč.

Společnost GEOMAT s.r.o. přišla na trh na začátku roku 1998, kromě výroby firma zajišťuje také servis až po asistenci při realizaci na stavbě. Geosyntetika pro dopravní stavitelství jsou rozdělena podle oblastí, kde je jejich využití nejefektivnější. Pro vyztužování asfaltových vrstev vozovek se jedná o prvky Tensor AR-G a Tensor Glasstex. Vyztužení má výhodu v tom, že je ometen vznik a vývoj reflexních a únavových trhlin, trvalá deformace krytu a také zvyšuje životnost krytu. [6]

4 Praktická část

Tato kapitola je věnována praktickému provedení zkoušek uvedených v teoretické části práce. Jejich výsledky jsou nedílnou součástí ke zjištění základních vlastností předem připraveného vzorku zeminy. Jedná se nejenom o správné vyhodnocení a zařídění, ale i o porovnání s možností vyztužení zeminy pomocí vláken. Jsou zde podrobně popsány nejen průběhy a dosažené výsledky každého z dílčích testů, ale i použité přístroje s jejich základními parametry.

4.1 Laboratorní přístroje

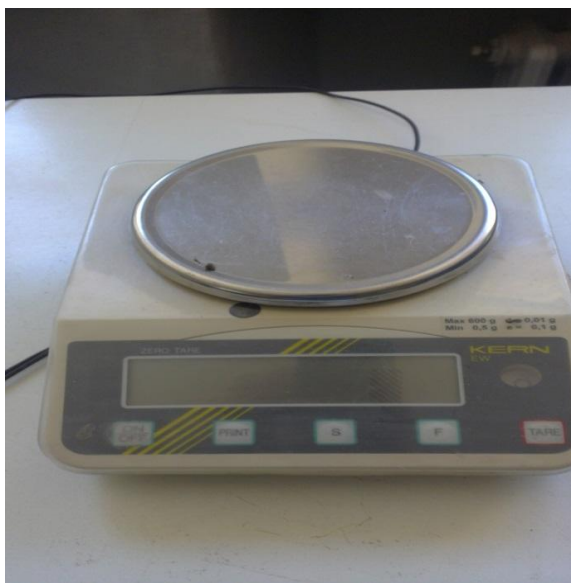
Před zahájením samotných zkoušek je potřeba blíže popsat každý přístroj, který byl v rámci dané zkoušky zapotřebí. Jedná se především o přístroje na sušení, vážení a o speciální přístroje podle typu zkoušky. Každý přístroj je popsán množinou svých nejdůležitějších vlastností a fotodokumentací.

4.1.1 Triaxiální přístroj ELE Multiplex 50, 25 – 3700

Rozměry (D x Š x V):	550mm x 400mm x 1230mm
Max. vertikální vzdálenost:	795mm
Min. vertikální vzdálenost:	210mm
Horizontální vzdálenost:	265mm
Deska o průměru:	133,3mm
Deska průměr adaptér:	158,5mm
Deska stavba:	100 mm (nominální)
Kopírovací rychlost	0,5-50,8 mm/min (0,020 - 2 cm/min)
Hmotnost:	71kg

Tabulka 1 - ELE Multiplex vlastnosti

4.1.2 Váha Kern 600-2M



Obrázek 4 - Kern 600-2M

Přesnost:	0,01g
Kapacita:	600g

Tabulka 2 - Kern 600-2M vlastnosti

4.1.3 Váha KERN DE60K20



Obrázek 5 - Kern DE60K20

Plošinové váhy:	60kg
Rozlišení, hmotnost:	20g
Hmotnost, zatížení max:	60kg
Přesnost:	20%
Krytí IP:	54
Délka/výška, vnější:	310mm
Rozsah:	60kg
Hmotnost, kalibrace:	60kg

Tabulka 3 - Kern DE60K20 vlastnosti

4.1.4 Sušárna VENTICELL 111

U této sušičky jsou nejdůležitějšími vlastnostmi objem komory, který je stanoven na 111 litrů a pracovní teplota od 10° C do 250° C.



Obrázek 6 - Venticell 111

4.1.5 Penetrometr (kuželový přístroj)



Obrázek 7 - Penetrometr

Penetrační rozsah:	0 – 360mm
Kůžel:	nerezová ocel
Hmotnost kůžele:	80g
Vrcholový úhel:	30°

Tabulka 4 - Penetrometr vlastnosti

4.1.6 Moždíř



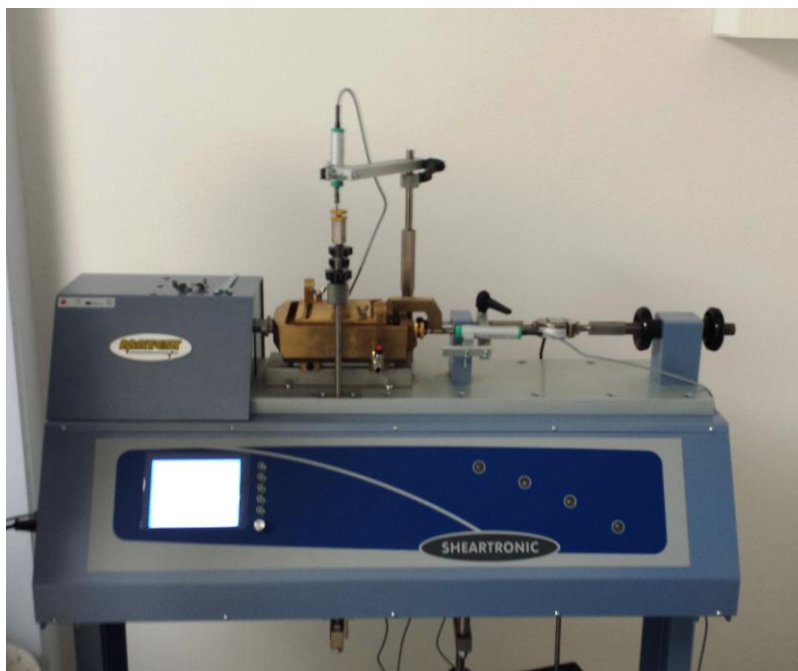
Obrázek 8 - Moždíř

Objem:	946,7 cm ³
Hmotnost:	4,3kg

Tabulka 5 – Moždíř vlastnosti

4.1.7 Automatizovaný mechanický smykový přístroj

Automatický mechanický smykový stroj s automatickým sběrem dat a jejich následného zpracování. Mimo jiné obsahuje snímač zatížení, lineární potenciometrickou vertikální a horizontální sondu 10 a 25mm a sadu závaží.



Obrázek 9 – Smykový přístroj

4.1.8 Edometr

Edometr je vyroben z hliníkové slitiny, aby disponoval vysokým stupněm pevnosti. Přístroj obsahuje možnost tří zatěžovacích poměrů 9:1, 10:1 a 11:1. Montážní nosník je vybaven nastavitelným protizávažím. Maximální zatížení je 170kg což odpovídá 1870kg při poměru 11:1. Důležitou součástí je poté lineární vertikální snímač posuvu do 10mm zdvih.



Obrázek 10 – Edometr

4.2 Laboratorní zkoušky

V rámci bakalářské práce je kladen velký důraz na praktické zvládnutí daných zkoušek nad vlastním vzorkem zeminy. Tato kapitola tedy podrobně popisuje nejen průběh, ale hlavně výsledek každé z vybraných zkoušek. Tento výsledek je poté rozebrán k určení některých vlastností zeminy.

4.2.1 Stanovení meze plasticity

První zkouška, která proběhla v rámci laboratorních prostor, byla stanovení meze plasticity. Příčinou provedení právě této zkoušky, je spolu s mezí tekutosti, schopnost určit základní zatřídění zeminy.

Prvním krokem bylo vytvoření vzorku a to smícháním suché a rozemleté zeminy s vodou. Poté se odebral zkušební vzorek o hmotnosti cca 20g, který se umístil na desku k vyschnutí a to na dobu, než se stal dostatečně plastický. Jinými slovy se dal formovat do tvaru koule. Vzorek se poté ještě chvíli převaloval mezi prsty a také v dlani než teplo ruky vysušilo zeminu tak, že se na vzorku objevily jemné trhlinky. Následovalo rozdělení vzorku na dva přibližně stejně velké díly a na každém zvlášť se provedlo stanovení meze plasticity.



Obrázek 11 - Válečky

Z dílů se pomocí ukazováčku a palce vytlačily válečky o průměru cca 6 mm (Obrázek 11). Válečky se poválely na dřevěné podložce, která ještě vsákla přebytečnou vodu. Všechny popraskané válečky se poté ihned vložily do sušárny a stanovila se vlhkost zkušebních vzorků.

V tabulce níže (Tabulka 6) je pro jednotlivé misky uvedeno mimo jejich samotných hmotností i hmotnosti s vlhkým vzorkem tzn. hmotnost zeminy odpovídající stavu po odebrání vzorku z půdy. Dále je uvedena hmotnost jednotlivých misek po vysušení respektive po vyjmutí po době stanovená na 24 hodin ze sušičky.

Číslo misky	Hmotnost misky	Hmotnost misky s vlhkým vzorkem	Hmotnost misky s vysušeným vzorkem
1	10,81	13,64	13,26
2	11,58	13,91	13,60
3	10,78	13,11	12,78
4	10,74	13,46	13,08
5	11,80	13,60	13,37
6	10,81	12,57	12,35
7	11,55	13,27	13,05
8	11,08	12,78	12,55

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty při stanovení meze plasticity

Následující tabulka (Tabulka 7) pak slouží pro konečný výpočet meze plasticity, kde pro každý zkušební vzorek je vypočítána vlhkost. Výsledná mez plasticity je potom průměr vlhkostí vzorků, které splňují kritérium. Tímto kritériem se rozumí, že rozdíl dvou po sobě jdoucích vlhkostí vzorků se musí lišit maximálně o 0,5%. Hodnota meze plasticity je poté rovna 15,42%.

Číslo misky	Hmotnost vody ve vzorku	Hmotnost vysušeného vzorku	Vlhkost	Kritérium
1	0,38	2,45	15,51	< 0,5%
2	0,31	2,02	15,35	
3	0,33	2,00	16,50	< 0,5%
4	0,38	2,34	16,24	
5	0,23	1,57	14,65	< 0,5%
6	0,22	1,54	14,29	
7	0,22	1,50	14,67	> 0,5%
8	0,23	1,47	15,64	
			$W_p = 15,42\%$	

Tabulka 7 - Stanovení meze plasticity

4.2.2 Stanovení meze tekutosti

Pro stanovení meze tekutosti byl použit jiný přístroj než Casagrandeho a to kuželový. Konkrétně pak kužel 80g/30°, jehož vlastnosti jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 8). Aby penetrace kužele dosahovala hodnot v tabulce, musel být vzorek dostatečně promíchán a v případě potřeby se přidalo malé množství destilované vody.

První penetrace	okolo 15mm
Penetrační rozsah	15 až 20mm
Maximální rozdíl mezi dvěma úspěšnými zkouškami	0,5mm
Hloubka penetrace	20mm

Tabulka 8 - Stanovení meze tekutosti - kužel 80g/30°

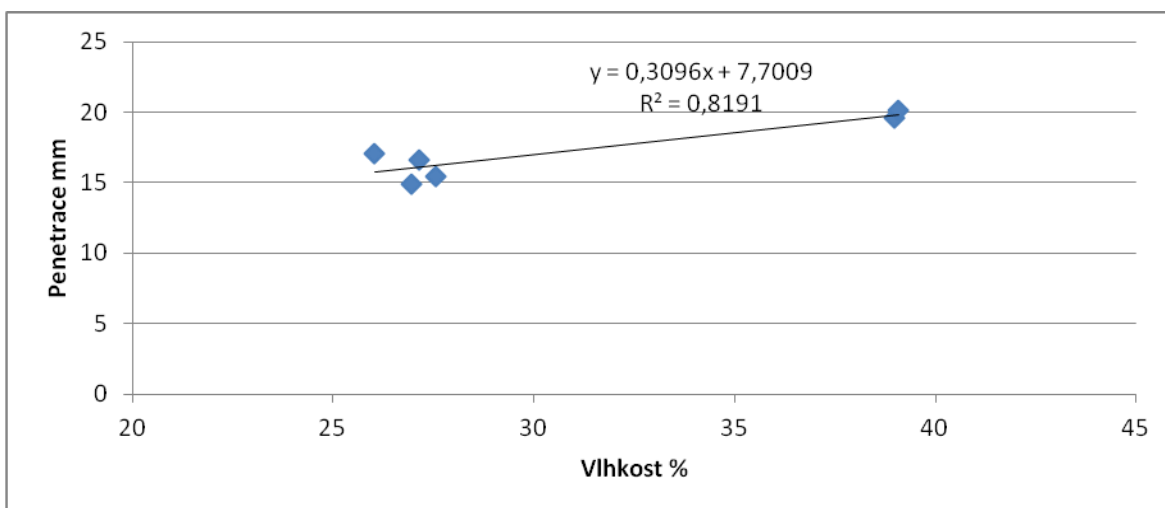
Všech sedm předem připravených vzorků se vložilo do připravené nádoby, aby došlo k co nejmenšímu styku zkušební vzorku s okolním vzduchem. U každého vzorku jsme z horní části odstranili přebytečnou zeminu pomocí srovnávacího pravítka, aby se vytvořil hladký povrch. Nádobu s každým vzorkem jsme poté umístili těsně pod kužel, aby se

jemně dotýkal zeminy. Následovalo uvolnění kužele a ponechání ve spuštěné poloze cca 5s.

U všech sedmi vzorkách uvedených v tabulce (Tabulka 9) bylo provedeno zvážení a stanovení penetrace kužele. Z těchto dvou naměřených hodnot pak byla vypočítána vlhkost každého vzorku. Tyto vlhkosti byly znázorněny spolu s jejich penetracemi do grafu (Graf 1), kde byla ještě vynesena křivka jejich lineární závislosti.

Číslo misky	Hmotnost misky	Hmotnost misky s vlhkým vzorkem	Hmotnost misky s vysušeným vzorkem	Hmotnost vody ve vzorku	Penetrace kužele	Vlhkost vzorku
1	85,47	142,06	130,05	12,01	14,9	26,94033
2	77,1	143,32	129,01	14,31	15,4	27,56694
3	79,17	129,4	118,68	10,72	16,6	27,13237
4	86,39	142,95	131,27	11,68	17,1	26,02496
6	89,29	169,89	147,29	22,6	19,6	38,96552
7	85,45	148,47	130,76	17,71	20,1	39,08629

Tabulka 9 - Stanovení meze tekutosti



Graf 1 - Stanovení meze tekutosti

Pokud se blíže podíváme na rovnici závislosti mezi vlhkostí vzorku a penetrací kužele, můžeme poté lehce vypočítat výslednou mez tekutosti zeminy a to dosažením maximální dosažené penetrace za neznámou y .

$$y = 0,3096x + 7,7009$$

$$20 = 0,3096x + 7,7009$$

$$W_L = 39,73\%$$

Posledním krokem je poté vypočítání čísla plasticity I_p . Jedná se o odečtení dvou hodnot a to meze plasticity dosažené v předešlé zkoušce a výše uvedené meze tekutosti. Odečtením

těchto dvou hodnot dostáváme, že index plasticity je roven 24,45%. Pro úplnost jsou zde uvedené i výsledky stupně tekutosti I_L a konzistence I_C , kde přirozená vlhkost byla 26%.

$$I_P = W_L - W_P = 24,45\%$$

$$I_L = \frac{W - W_P}{I_P} = 0,43$$

$$I_C = \frac{W_L - W}{I_P} = 0,57$$

4.2.3 Standardní zkouška Proctor

Proctorova zkouška proběhla nad vzorkem zeminy o hmotnosti cca 1,7kg, která byla přesáta sítím na hrudky o maximální velikosti 5mm. K provedení zkoušky byla využita válcová nádoba, moždíř, o objemu 946,7 cm³ a hmotnosti 4,3kg.

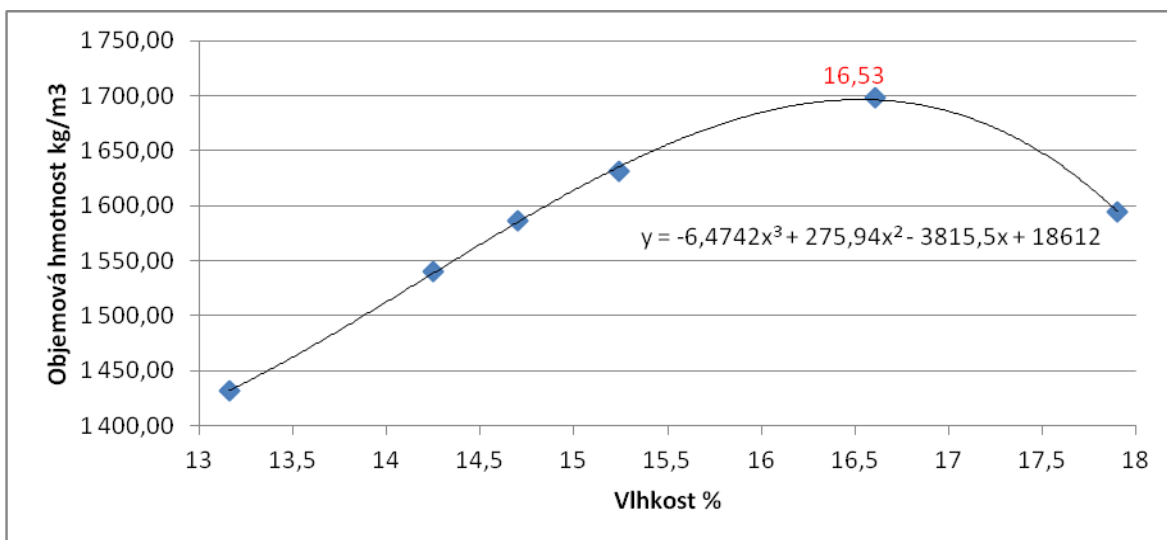
Hmotnost (g)									
Moždíř a vzorek	Vlhký vzorek	Miska a mokrý vzorek	Prázdná miska	Mokrý vzorek	Miska a suchý vzorek	Suchý vzorek	Voda	Vlhkost vzorku (%)	Objemová hmotnost suchého vzorku
5920	1 620	196,29	86,43	109,86	183,51	97,08	12,78	13,16	1 431,55
6060	1 760	186,04	85,55	100,49	173,51	87,96	12,53	14,25	1 540,55
6120	1 820	201,14	79,21	121,93	185,78	104,47	15,36	14,70	1 586,71
6180	1 880	203,85	89,21	114,64	188,69	99,48	15,16	15,24	1 631,39
6280	1 980	189,87	85,77	104,10	175,04	89,27	14,83	16,61	1 697,93
6180	1 880	220,45	110,77	109,68	203,80	93,03	16,65	17,90	1 594,61

Tabulka 10 – Proctor

V tabulce výše (Tabulka 10) je zaznamenán celý průběh zkoušky tzn. na každém řádku tabulky se nachází váha moždíře se zeminou, ze které se odebral vzorek. Ten se nechal vysušit, aby se následně mohla zaznamenat hmotnost vody a tím spočítat vlhkost vzorku dle rovnice:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} * 100$$

, kde m_1 je hmotnost misky a vlhkého vzorku, m_2 je hmotnost misky a suchého vzorku a m_c pak hmotnost misky.



Graf 2 - Proctor

Všech šest odebraných vzorků se vyneslo do grafu závislosti hustoty suchého vzorku na její vlhkosti. Data se proložila regresní křivkou, ze které se určila optimální zhutnitelnost zeminy pro vlhkost **16,53%** o maximální objemové hmotnosti $1694,55 \text{ kg/m}^3$.

4.2.4 Pyknometr

Hmotnost prázdného pyknometru byla 43,51 g, ten byl následně naplněn vzorkem o hmotnosti 16,50 g. Po přidání vody do prázdného pyknometru se zvažila hmotnost 156,09 g. Považený vzorek vážil 145,77 g. Hustota pevných částic je vypočtena dle vzorce:

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} * \rho_w$$

, kde m_0 je hmotnost suchého pyknometru, m_1 je hmotnost pyknometru zcela naplněného pomocnou kapalinou, m_2 je hmotnost suchého pyknometru s vysušeným zkušebním vzorkem a m_3 je hmotnost pyknometru, zcela naplněného zkušebním vzorkem a pomocnou kapalinou. Hustota pomocné kapaliny ρ_w byla stanovena pro teplotu 23°C z tabulky (Tabulka 11). Všechny použité hodnoty veličin spolu s konečným výsledkem jsou uvedeny níže.

Teplota $^\circ\text{C}$	Hustota g/cm^3	Teplota $^\circ\text{C}$	Hustota g/cm^3	Teplota $^\circ\text{C}$	Hustota g/cm^3
10	0,99973	17	0,99880	24	0,99733
11	0,99963	18	0,99862	25	0,99708
12	0,99953	19	0,99843	26	0,99681
13	0,99941	20	0,99823	27	0,99654
14	0,99927	21	0,99802	28	0,99626
15	0,99913	22	0,99780	29	0,99598
16	0,99897	23	0,99757	30	0,99568

Tabulka 11 - Tabulka hustoty pomocné kapaliny

$$\begin{aligned}
m_0 &= 43,51 \text{ g} \\
m_1 &= 145,77 \text{ g} \\
m_2 &= 60,01 \text{ g} \\
m_3 &= 156,09 \text{ g} \\
m_4 &= 16,50 \text{ g} \\
\rho_w &= 0,99757 \text{ g/cm}^3
\end{aligned}$$

$$\rho_s = \frac{16,50}{102,26 - 96,08} \times 0,99757$$

$$\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$$

Závěrem stanovení hustoty pevných částic zeminy pomocí pyknometru je dosažení měrné hmotnosti vzorku $2,66 \text{ g/cm}^3$.

4.2.5 Hustoměrná zkouška

Prvním krokem této zkoušky byla příprava suspenze, která se musela řádná promíchat. Promísení, např. pomocí vrtačky s míchadlem o 360° , probíhá po dobu než se dokonale smísí voda s částicemi zeminy o průměru menší než $0,063 \text{ mm}$. Válec se postaví na vodorovnou podložku, ještě před začátkem odpočtu času je do suspenze vložen hustoměr, tak aby se mohl volně pohybovat po hladině. Ve stanovených intervalech je prováděno čtení na hustoměru s přesností na $0,001 \text{ g/ml}$. Intervaly určené pro měření byly stanoveny: 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 a 420s. Dalším krokem bylo zaznamenání teploty suspenze s přesností na $0,5^\circ \text{ C}$. O tuto teplotu se poté opraví čtení na hustoměru a získáme z toho pravé čtení na hustoměru.

Dle rovnice pravého čtení hustoměru byly vypočítány hodnoty pro všechny intervaly určené k měření:

$$H_{op} = R'_h + t_m$$

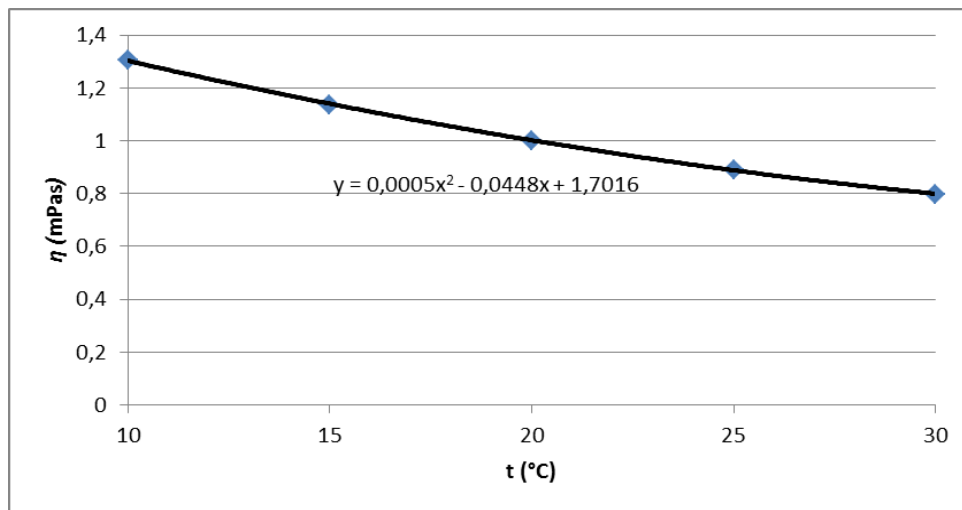
, kde H_{op} je pravé čtení hustoměru, R'_h je odečtená hodnota na hustoměru a t_m oprava o teplotu.

Pro všechny tyto hodnoty se provedla kalibrace hustoměru H_r , respektive vypočítání efektivní hloubky hustoměru dle rovnice:

$$H_r = 225,4 - 4,7H$$

Následovalo stanovení náhradních průměrů zrn d_i , kde se brala v úvahu dynamická viskozita vody η pro teplotu suspenze 22° C . Ta byla spočítána pomocí rovnice v grafu (Graf 3).

$$d_i = 0,005531 \times \sqrt{\frac{\eta \times H_r}{(\rho_s - 1) \times t}}$$



Graf 3 - Dynamická viskozita vody

Posledním krokem hustoměrné zkoušky byl výpočet frakce menší než náhradní průměr zrna K , kde m je hmotnost zkušební vzorku:

$$K = \frac{100 * \rho_s * H_{op}}{m * (\rho_s - 1)}$$

Čas (s)	R'h (mm)	Hop	Hr (mm)	η	Di (mm)	K (%)
5	26,4	26,80	99,04	0,958	0,0187	50,24
10	25,0	25,40	105,62	0,958	0,0137	47,61
20	23,8	24,20	111,26	0,958	0,0099	45,37
40	22,00	22,40	119,72	0,958	0,0073	41,99
60	21,4	21,80	122,54	0,958	0,0060	40,87
120	19,8	20,20	130,06	0,958	0,0044	37,87
240	17,4	17,80	141,34	0,958	0,0032	33,37
360	13,6	14,00	159,20	0,958	0,0028	26,24
480	9,8	10,20	177,06	0,958	0,0026	19,12
600	5,0	5,40	199,62	0,958	0,0024	10,12
720	2,0	2,40	213,72	0,958	0,0023	4,50

Tabulka 12 - Hustoměrná zkouška průběh výpočtu

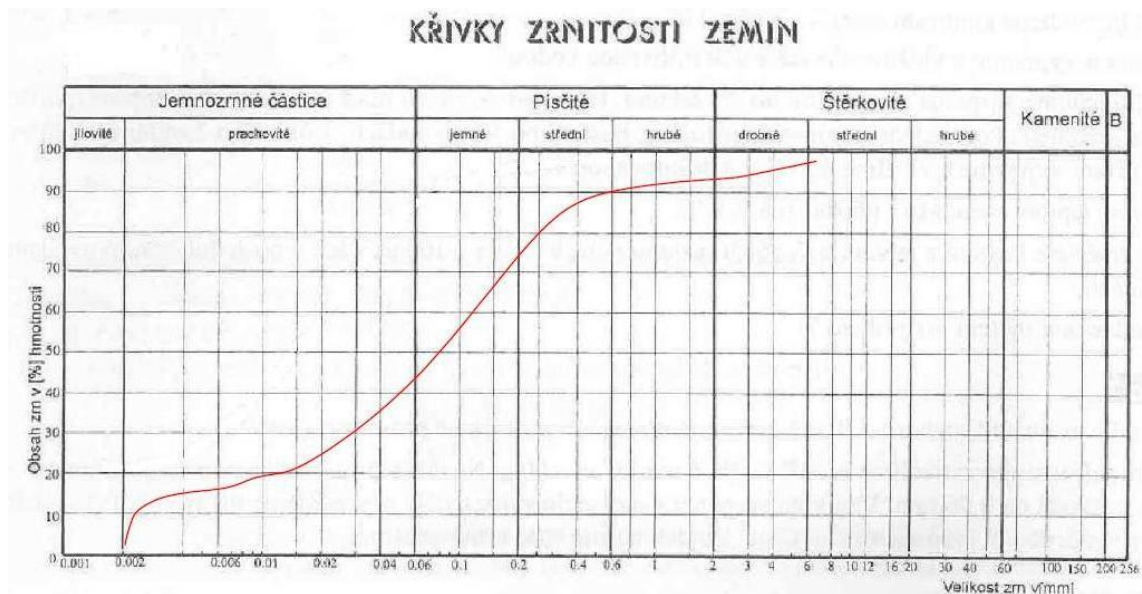
Pro ostatní síta větší než 0,0187mm byl celkový propad zjišťován nikoli pomocí hustoměrné zkoušky (Tabulka 13), ale pomocí sady dostupných sít. Výsledek obou částí je uveden v tabulce níže (Tabulka 14) a zároveň jsou hodnoty velikosti sít a odpovídajícího propadu znázorněny v grafu (Graf 4 - Křivka zrnitosti) tzv. křivkou zrnitosti zeminy.

síto	g	celkový propad (g)	celkový propad (%)
6,3	11,49	259,36	95,76
4,5	2,97	256,39	94,66
3,55	2,14	254,25	93,87
2,5	2,92	251,33	92,79
2	2,47	248,86	91,88
1,6	2,38	246,48	91
0,5	16,94	229,54	84,75
0,25	35,6	193,94	71,6

Tabulka 13 - Hustoměrná zkouška

síto	celkový propad (%)
6,3	95,76
4,5	94,66
3,55	93,87
2,5	92,79
2	91,88
1,6	91
0,5	84,75
0,25	71,6
0,0187	23,11
0,0137	21,90
0,0099	20,87
0,0073	19,32
0,0060	18,80
0,0044	17,42
0,0032	15,35
0,0028	12,07
0,0026	8,80
0,0024	4,66
0,0023	2,07

Tabulka 14 - Hustoměrná zkouška výsledek obou částí



Graf 4 - Křivka zrnitosti

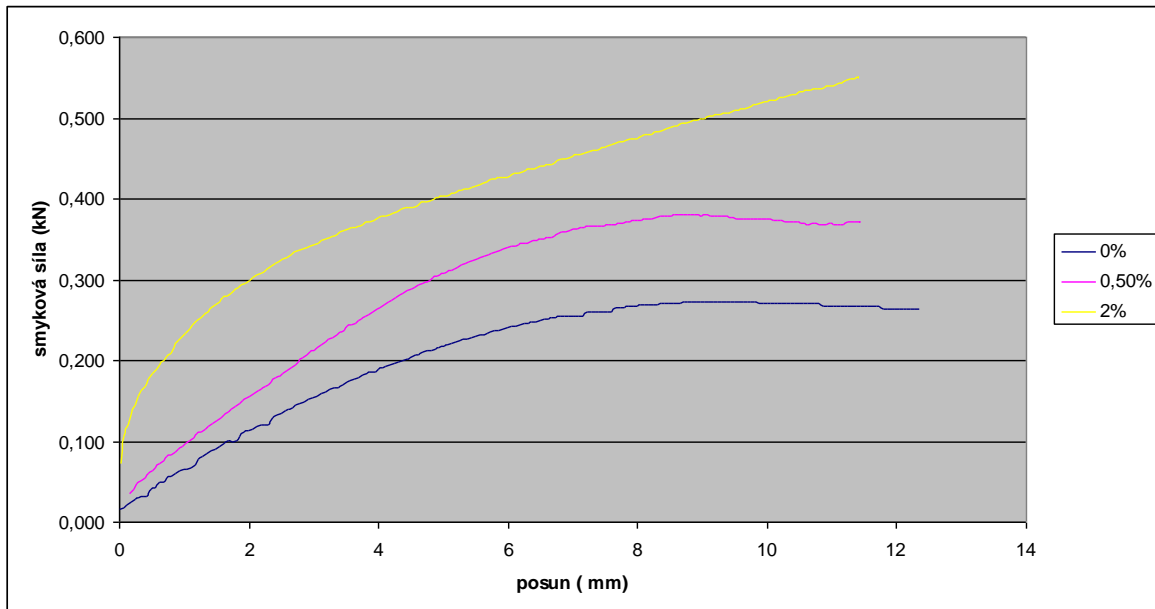
Dle ČSN EN ISO 14688-2 se zemina zařídí na základě zrnitosti, jako *saSi*.

4.2.6 Smyková krabicová zkouška

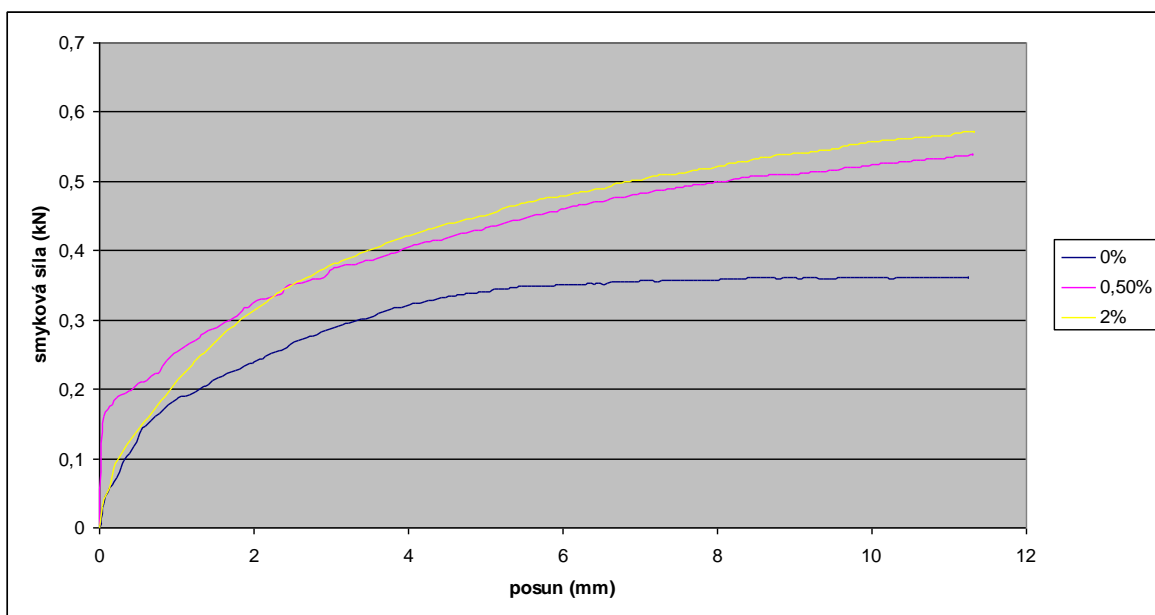
V této zkoušce byly poprvé použity vlákna, díky kterým bylo za úkol zjistit závislost velikosti úhlu vnitřního tření a soudržnosti na obsahu vláken v zemině. Aby byly zkoušky kompatibilní byly obsahy vláken zvoleny stejně jako u zkoušky stlačitelnosti. Bylo tedy použito 0%, 0,5% a 2,0% vláken při zatížení 2kg, 4kg a 6kg.

Postup této zkoušky byl následující. Zjistili se rozměry čtvercové smykové krabice. Spočítal se objem krabice, který je potřebný k určení hmotnosti zeminy na jednu zkoušku. Poté se spočítal procentuální podíl přidaných vláken. Zkouška se provádí na smykači s automatickým sběrem a zpracováním dat, který je napojený na počítač. První připravený vzorek byl bez použití vláken. Čistý vzorek byl vložen do smykové krabice. Na vzorek bylo uloženo víko s roznášecí destičkou. Šrouby, které zajišťují přenosy vodorovných napětí bylo nutné pořádně utáhnout. Měřidlo, které měří deformaci je připevněno mezi roznášecí destičkou a ramenem přenášející zatížení od závaží. Předposledním krokem bylo na toto rameno vložil první závaží. Rameno se odjistilo a současně tedy bylo spuštěno měření. Na přístroji byl nastaven posun 0,5mm za jednu sekundu. Po skončení prvního měření vzorku byl do krabice vložen nový vzorek, kdy se zkouška opakovala ale s tím rozdílem, že bylo vloženo větší zatížení. Software zaznamenával hodnoty, smykové síly, vodorovného a normálového posunu v závislosti na čase. Výsledky zkoušky byly převedeny do programu Microsoft Excel. Nejdůležitější výslednou hodnotou byla maximální smyková síla působící na vzorek, která byla využita k dalším výpočtům. Hodnoty úhlu vnitřního tření a soudržnosti zeminy se získaly z výpočtu rovnice regresní křivky.

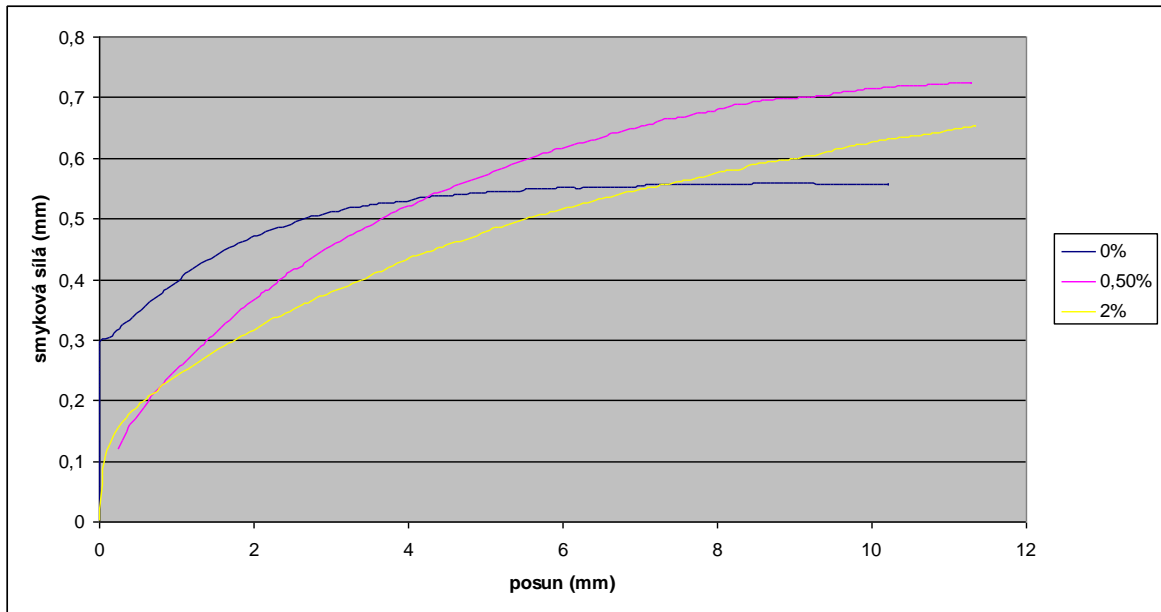
Výsledky zkoušky jsou uvedeny v grafech níže a to pro tři rozdílná zatížení. Každý graf (Graf 5, Graf 6, Graf 7) znázorňuje závislost pevnosti na posunutí smykové krabice s různým obsahem vláken ve vzorku.



Graf 5 - Závislost pevnosti na posunutí smykové krabice 2kg

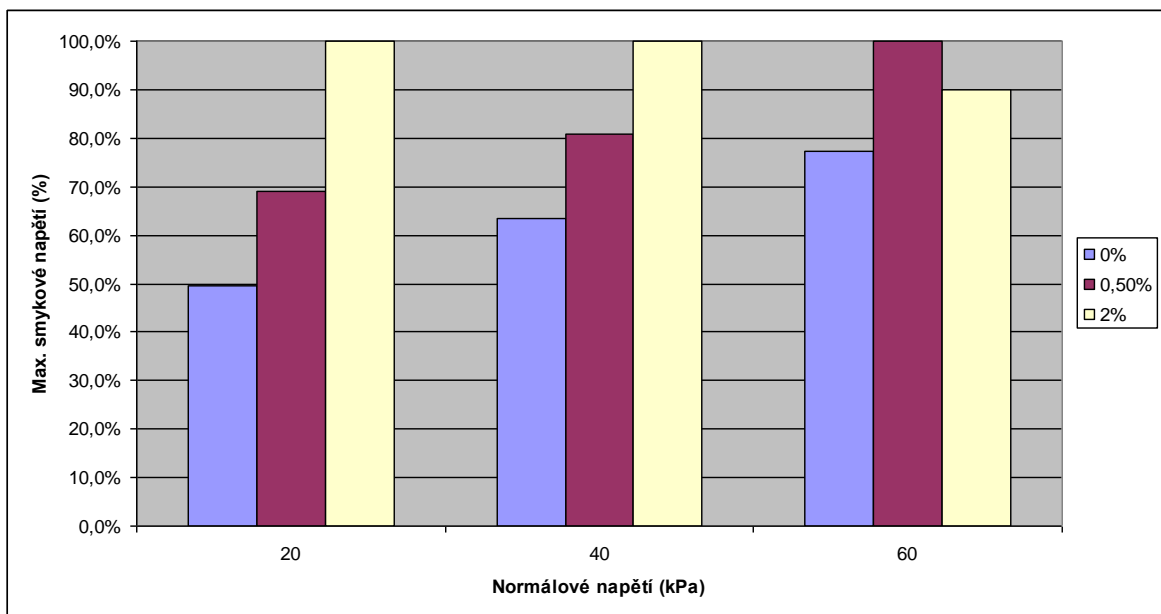


Graf 6 - Závislost pevnosti na posunutí smykové krabice 4kg

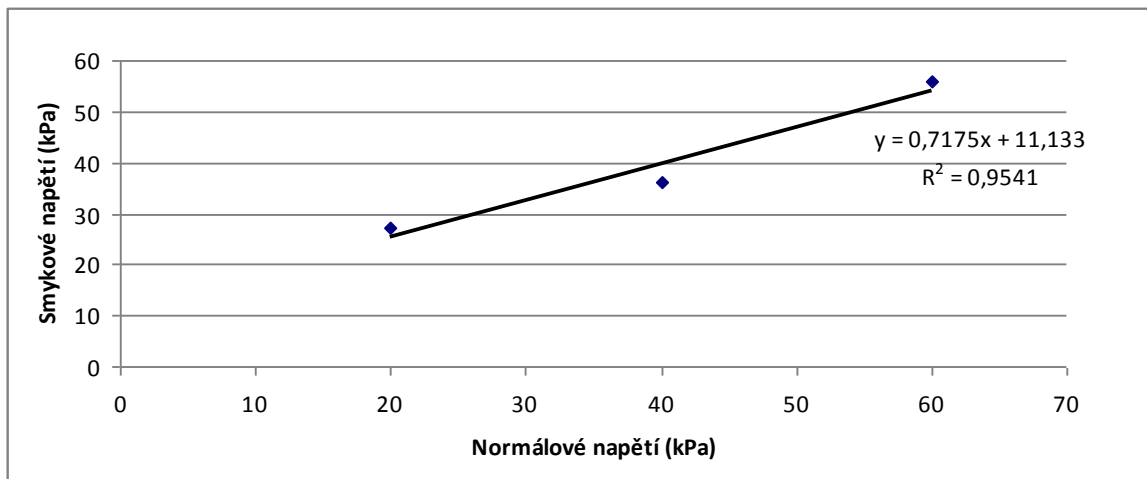


Graf 7 - Závislost pevnosti na posunutí smykové krabice 6kg

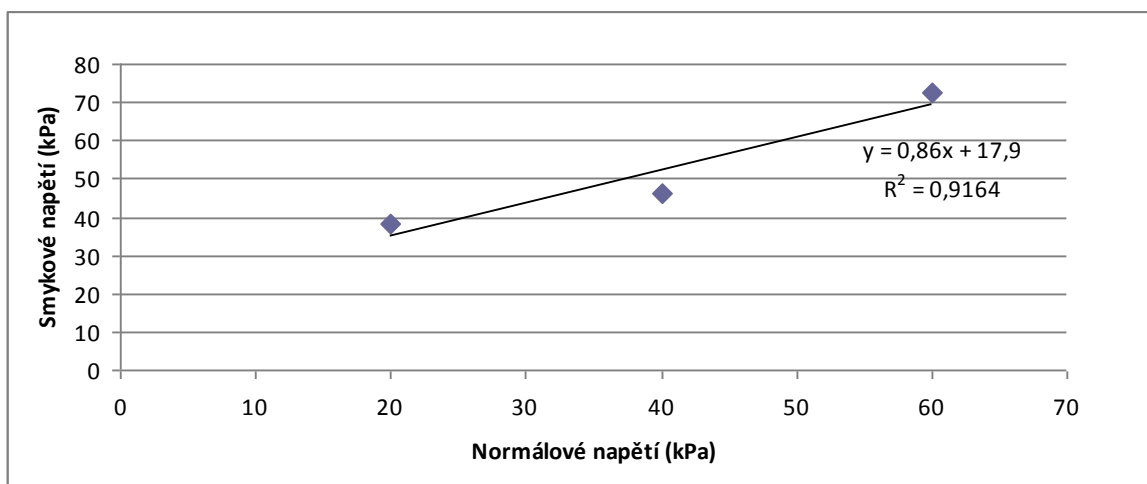
Z výsledku, které jsme obdrželi ze smykového přístroje a vynesli v grafech, můžeme obecně tvrdit, že obsah vláken má vliv na pevnost zeminy. Pokud se blíže podíváme, pak je zřejmé, že i 0,5% obsah vláken je lepší než zemina bez vláken. Pokud použijeme obsah vláken rovnající se 2% pak vliv na pevnost v případě 2kg a 4kg zatížení je lepší než v případě 0,5%.



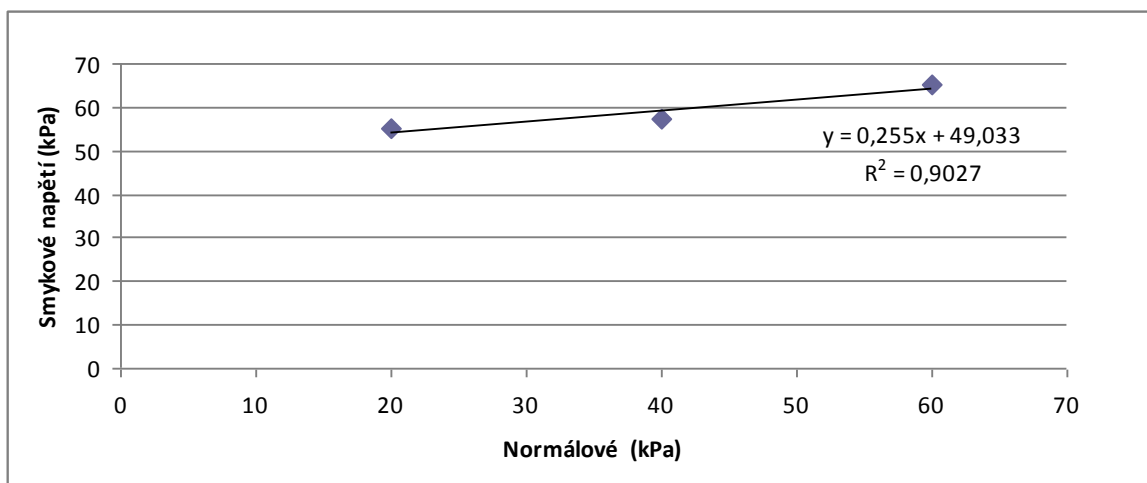
Graf 8 - Procenticky vyjádřena hodnota zlepšení



Graf 9 - Závislost smykové pevnosti na normálovém napětí pro 0% vláken



Graf 10 - Závislost smykové pevnosti na normálovém napětí pro 0,5% vláken

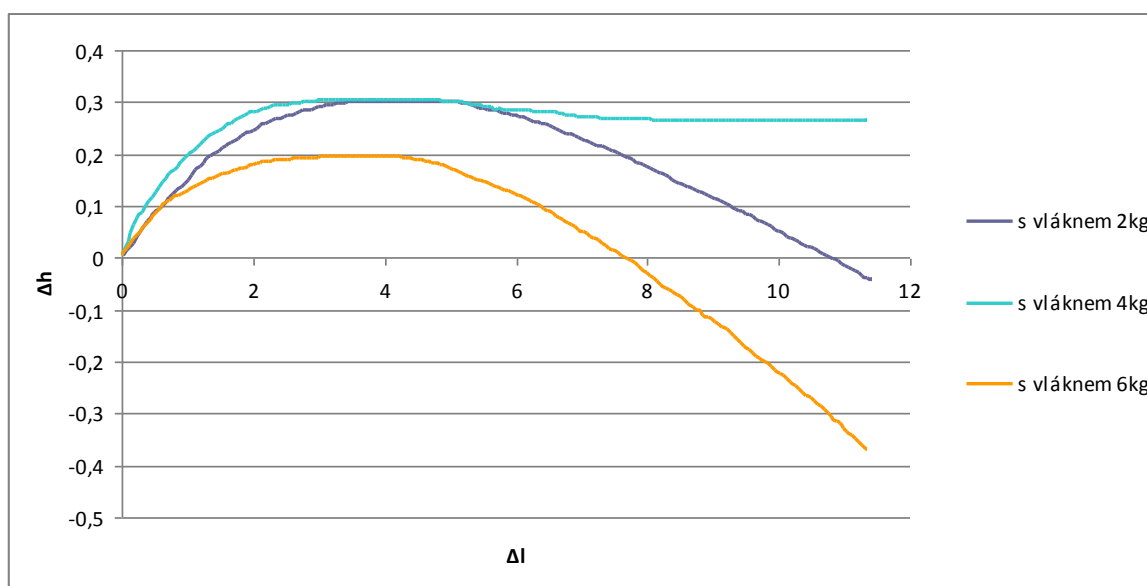


Graf 11 - Závislost smykové pevnosti na normálovém napětí pro 2% vláken

V grafech výše (Graf 9, Graf 10, Graf 11) je zobrazena závislost smykové pevnosti na normálovém napětí pro obsah 0%, 0,5% a 2% vláken. Parametr smykové pevnosti, soudržnost zeminy pro 0% vláken je 11,13 kPa a úhel vnitřního tření je 35°. Výsledek závislosti pro 0,5% vláken je soudržnost 17,9 kPa a úhel vnitřního tření je 40°. Pro poslední závislost vyšla soudržnost zeminy 49 kPa a velikost úhlu je 14°.

obsah vláken	0%	0,50%	2%
úhel vnitřního tření	35°	40°	14°
soudržnost	11,13 kPa	17,9 kPa	49 kPa

Tabulka 15 - Výsledky závislosti smykové pevnosti na normálovém napětí



Graf 12 - Dilatance pro 2% vláken

Pro představu, je zde uveden graf dilatace respektive kontraktance pro 2% obsah vláken odpovídající všem třem zatížením (Graf 12). Ze všech třech průběhů je patrné, že odpor proti usmyknutí roste až dosáhne vrcholové pevnosti. Po jejím překročení klesá k hodnotě reziduální. Pro uvedené hodnoty odpovídá průběh dilataci.

4.2.7 Oedometrická zkouška stlačitelnosti

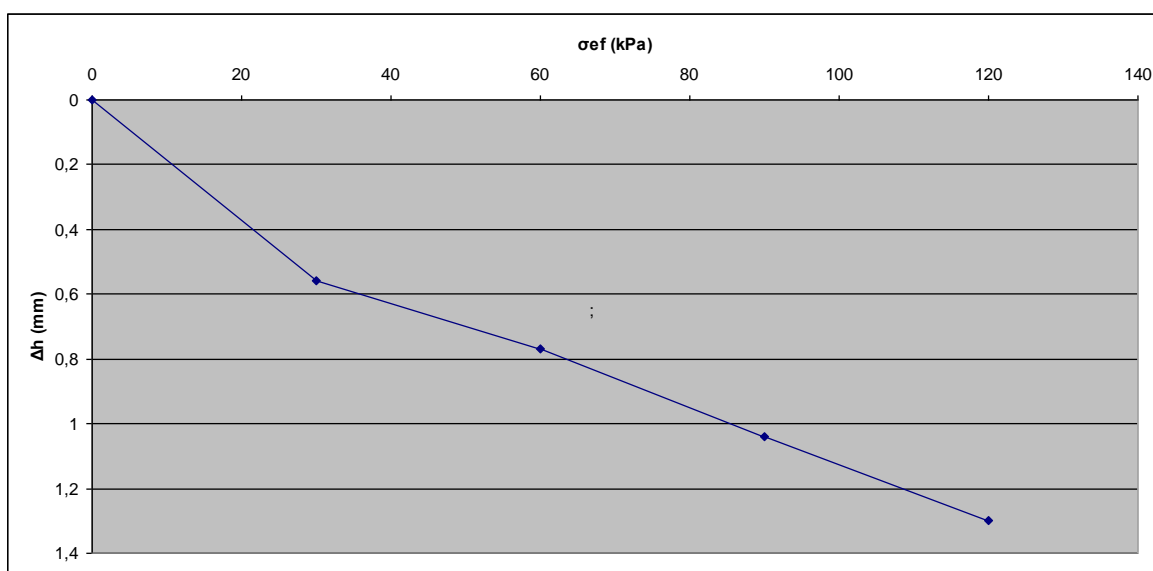
Cílem poslední zkoušky bylo stanovit závislost obsahu vláken v zemině na oedometrických modulech zeminy. Obsah vláken byl stanoven na hodnoty 0%, 0,5% a 2%. Jako první byla porovnávaná čistá zemina. Aby zemina byla zlepšena a sjednocena byl vzorek zhutněn pomocí proctorova přístroje.

Postup zkoušky byl následující. Ze spočítaného objemu byla určena hmotnost zeminy pro zhutnění do edometrického prstence. Zemina byla nasypana do moždíře, kde byla poté v Proctorově přístroji zhutněna. Prsteneček byl poté odebrán a zemina začištěna po okraj. Naplněný prsteneček se vložil do edometrického přístroje, rameno s měřičem deformací bylo přiděleno do požadované polohy a plně zafixováno. Vzorek se začal postupně zatěžovat. Po ustálené deformaci bylo další den přidáno další závaží. Takto se postupovalo další

4dny. Stejným způsobem bylo na konci zkoušky provedeno odlehčení. Další vzorky byly provedeny téměř totožně. Vzorky se liší jen tím, že bylo do zeminy přimíchané dané množství vláken před začátkem zhuštění zeminy. Vláknina byla pečlivě rozptýlena a smíchána se zeminou. Při dané hmotnosti se jen dopočítaly hmotnosti vláken na jednotlivé vzorky. Všechny výsledky se zaznamenaly a zpracovaly do grafů.

Efektivní zatížení (kPa)	Celkové stlačení (mm)	Eoed (kN/m ²)
30	0,56	1178,57
60	0,77	3142,86
90	1,04	2444,44
120	1,3	2538,46

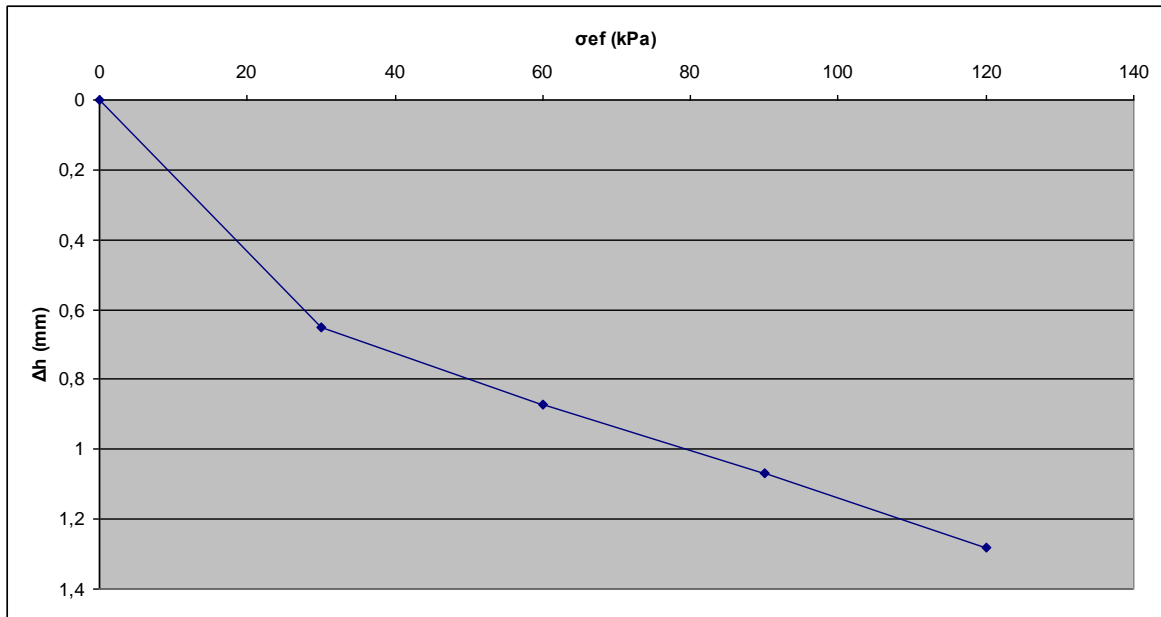
Tabulka 16 - Výsledky oedometrické zkoušky pro 0% vláken



Graf 13 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku pro 0% vláken

Efektivní zatížení (kPa)	Celkové stlačení (mm)	Eoed (kN/m ²)
30	0,65	1015,38
60	0,87	3000,00
90	1,07	3300,00
120	1,28	3142,86

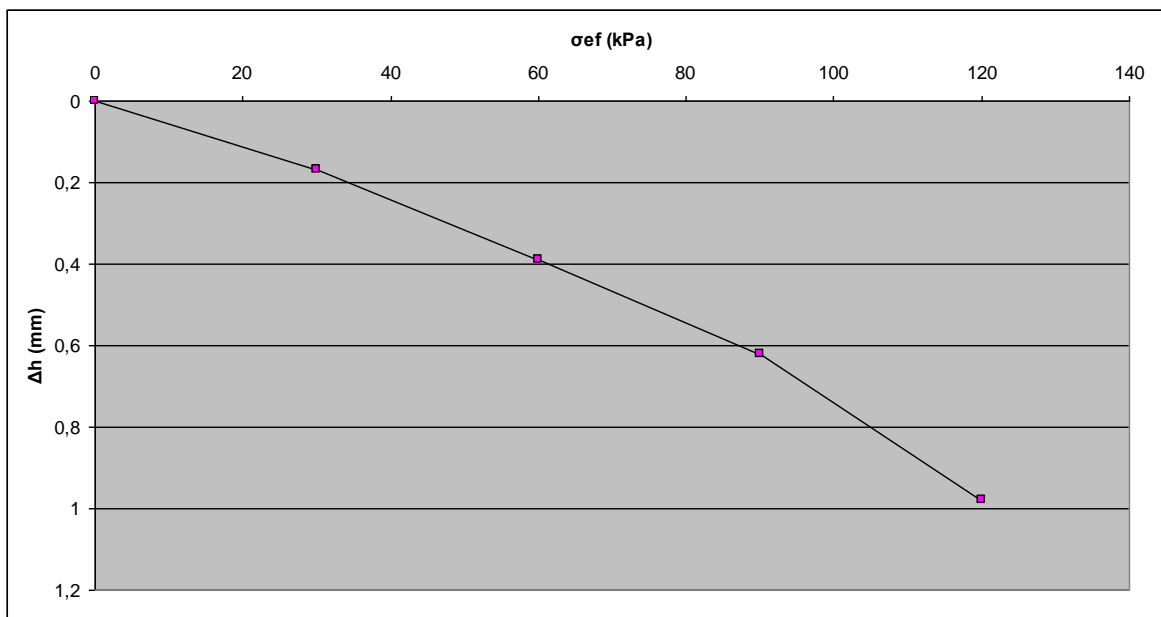
Tabulka 17 - Výsledky oedometrické zkoušky pro 0,5% vláken



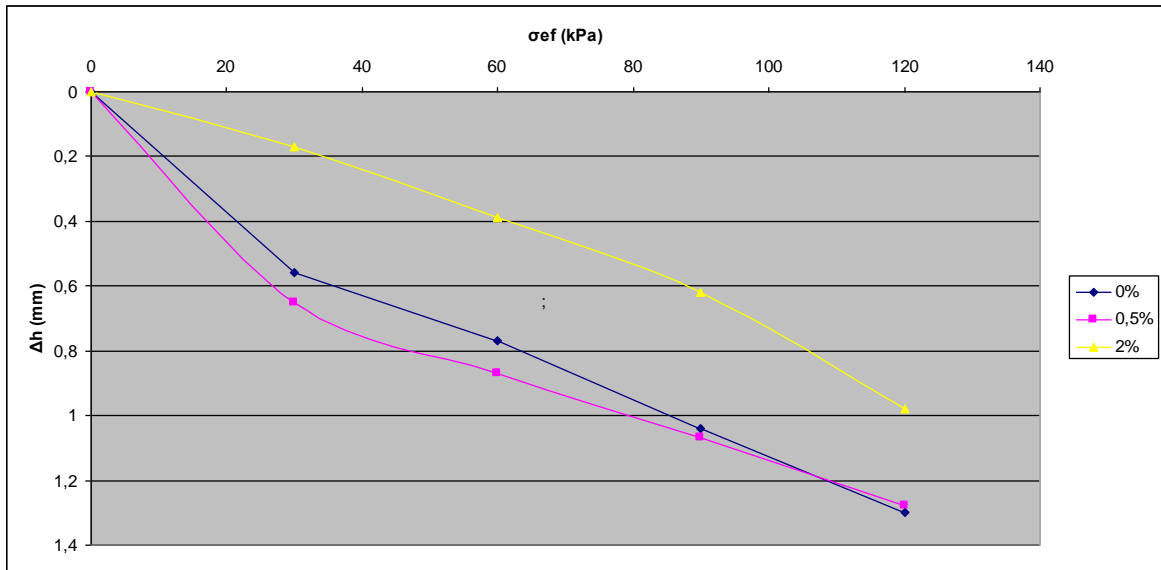
Graf 14 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku pro 0,5 % vláken

Efektivní zatížení (kPa)	Celkové stlačení (mm)	Eoed (kN/m ²)
30	0,17	3882,35
60	0,39	3000,00
90	0,62	2860,57
120	0,98	1833,33

Tabulka 18 - Výsledky oedometrické zkoušky pro 2% vláken



Graf 15 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku pro 2 % vláken



Graf 16 - Závislost efektivního zatížení na stlačení vzorku

Z výsledného grafu (Graf 16), kde jsou uvedeny závislosti efektivního zatížení na stlačení vzorku pro všechny obsahy vláken je patrné, že zatížení nejlépe odolává zemina s 2% obsahem vláken. Graf znázorňuje i nepatrný rozdíl mezi zeminou bez vlákna a s 0,5% obsahem. Závěrem lze pak tvrdit, že obsah vláken má vliv na odolnost proti zatížení.

5 Závěr a zhodnocení

Cílem mé práce bylo představit a popsat způsob zlepšení vlastností zeminy pomocí rozptýlené výztuže. Byla popsána řada typů vláken, která byla charakterizována dle svých vlastností a byly u nich uvedeny i některé především zahraniční publikace, které dále ověřují jejich použití v konkrétních případech v praxi.

Za účelem posouzení vlivu rozptýlené výztuže na vlastnosti zeminy, byly provedeny některé základní laboratorní zkoušky nad vlastním vzorkem zeminy. Výsledky smykové krabicové zkoušky a oedometrické zkoušky stlačitelnosti se shodovaly s předpokládaným závěrem. Bylo potvrzeno, že obsah vláken v zemině má pozitivní vliv na vlastnosti zeminy. Musíme však připomenout, že i tyto laboratorní pokusy potvrdily, že neplatí přímá úměrnost mezi obsahem vlákna a zlepšením pevnosti zeminy. Lze tedy obecně tvrdit, že se musí vždy volit optimální množství vláken, jelikož jejich větší obsah může způsobit i zhoršení některých vlastností zeminy, jako množství malé nebo žádné. Výsledky zkoušek se týkají jen jednoho typu zeminy, proto se nedá tento závěr obecně tvrdit pro jakoukoli zeminu.

Určování vlivu rozptýlené výztuže bylo rozšířeno i o laboratorní zkoušky potřebné pro správné zatřídění zeminy respektive zjištění jejich vlastností. Na základě mezí tekutosti a plasticity, Proctorovy zkoušky, pyknometru a hustoměrné zkoušky bylo zjištěno, že daný vzorek zeminy je klasifikován jako písčítý prach (saSi) s jemnými zrny a se střední schopností vázat vodu beze změny jejího stavu. Podle dalších výsledků lze vzorek zeminy charakterizovat jako tuhý, pórovitý a mírně namrzavý. Dle zjištěných vlastností můžeme říci, že daná zemina je málo vhodná do násypu a podloží vozovky.

Zlepšení zeminy se provádí i pomocí hydraulických pojiv, jako jsou cement, vápno, struska nebo popílek. Zemina s vlákny disponuje lepší stabilitou a v případě přírodních vláken je použití i ekologické. Na druhé straně při využití cementu případně vápna je vliv na konečný rozpočet menší a to až několikanásobně. Jednotková cena za jeden kilogram vápna resp. cementu je několikrát menší než za stejné množství polypropylenových vláken

Z hlediska vědecké základny, v případě rozptýlené výztuže, je toto téma poměrně dost studováno v zahraničí. V České republice je jen několik málo odborníků, kteří se věnují této problematice.

6 Zdroje

- [1] MAHDI HEJAZI, Sayyed, Mohammad SHEIKHZADEH, Sayyed MAHDI ABTAHI a Ali ZADHOUSH. Construction and Building Materials: A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. 2012, č. 30, s. 100-116
- [2] MIŽÁK, Miroslav. *APLIKÁCIA GEOSYNTETICKÝCH VÝROBKOV PRI BUDOVANÍ SKLÁDOK*. Košice, 2006. Študentská vedecká odborná činnosť. Technická univerzita v Košiciach. Vedúcou práce prof. RNDr. Nadežda Številová PhD.
- [3] *Geosyntetika v zemním tělese: Pozemních komunikacích*. Praha: Stavební geologie GEOTECHNIKA, 2008
- [4] Geosyntetické názvosloví. In: *International Geosynthetics Society ČR* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.igs.cz/geosynteticke-nazvoslovi.html>
- [5] Syntetická vlákna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Syntetická_vlákna
- [6] RUBIŠAROVÁ, Helena a František KRESTA. Možnosti využití rozptýlené výztuže při úpravě vlastností zemin. In: [online]. 2009 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/geotechnika/moznost-vyuziti-rozptylene-vyztuze-pri-uprave-vlastnosti-zemin>
- [7] Chauhan S, Mittal S, Mohanty B. *Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fiber*. Geotext Geomembr 2008;26:429–35.
- [8] Ravishankar U, Raghavan S. *Coir stabilised lateritic soil for pavements*. In: *Indian geotech conf, Ahmedabad, India; 2004*.
- [9] Ghavami K, Filho R, Barbosa P. *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers*. Cement Concrete Compos 1999;21:39–48.
- [10] Prabakara J, Sridhar R. *Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behavior of soil*. Construct Build Mater 2002;16:123–31.
- [11] Marandi M, Bagheripour H, Rahgozar R, Zare H. *Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils*. Am J Appl Sci 2008;5:209–20.
- [12] Aggarwal P, Sharma B. *Application of jute fiber in the improvement of subgrade characteristics*. In: Proc of int conf on adva in civ eng, Trabzon, Turkey; 27–30 September, 2010
- [13] Islam M, Iwashita K. *Earthquake resistance of adobe reinforced by low cost traditional materials*. J Nat Disas Sci 2010;32:1–21.
- [14] Segetin M, Jayaraman K, Xu X. *Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: manufacturability and properties*. Build Environ 2007;42:3066–79.
- [15] Ashour T, Bahnasawey A, Wu W. *Compressive strength of fiber reinforced earth plasters for straw bale buildings*. AJAE 2010;1:86–92.

- [16] Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J. *Development of fiber-based soil–cement block with low thermal conductivity*. Cement Concrete Compos 2005;27:111–6.
- [17] Coutts P. *Autoclaved bamboo pulp fiber reinforced cement*. Cement Concrete Compos 1995;17:99–106.
- [18] Ramaswamy S, Ahuja M, Krishnamoorthy S. *Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres*. Cement Concrete Compos 1983;5:3–13.
- [19] Puppala J, Musenda C. *Effects of fiber reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils*, trans res boa. In: 79th Annual meeting, Washington, USA; 2000.
- [20] Consoli C, Casagrande T, Prietto M, Thome A. *Plate load test on fiberreinforced soil*. J Geotech Geoenviron Eng ASCE 2003;129:951–5.
- [21] Setty S, Rao G. *Characteristics of fiber reinforced lateritic soil*, IGC (87), Bangalore, India; 1987.
- [22] Setty S, Murthy A. *Behavior of fiber-reinforced Black Cotton soil*, IGC (90), Bombay; 1987. p. 45–9.
- [23] Zaimoglu A. *Freezing–thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers*. Cold Reg Sci Technol 2010;60:63–5.
- [24] Tang C, Shi B, Zhao L. *Interfacial shear strength of fiber reinforced soil*. Geotext Geomembr 2010;28:54–62.
- [25] Consoli C, Prietto M, Pasa S. *Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste*. J Geotech Geoenviron Eng ASCE 2002;128:462–72.
- [26] Maheshwari V. *Performance of fiber reinforced clayey soil*. EJGE 2011;16:1067–87.
- [27] Jadhao D, Nagarnaik B. *Performance evaluation of fiber reinforced soil–fly ash mixtures*. In: 12th Int conf of int assoc for comp meth and adv in geomech (IACMAG), Goa, India; 2008.
- [28] Maher H, Ho C. *Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads*. Geotech Test J 1993;16:330–8.
- [29] Kumar S, Tabor E. *Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers*. EJGE 2003;127:774–82.
- [30] Gosavi M, Patil A, Mittal S, Saran S. *Improvement of properties of black cotton soil subgrade through synthetic reinforcement*. J Inst Eng (India) 2004;84:257–62.
- [31] Park S. *Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand*. Geotext Geomembr 2009;27:162–6.
- [32] VOLTR, Adam. *Syntetická vlákna jako prostředek pro zlepšení vlastností zemin*. Brno, 2011. Studentská vědecká a odborná činnost. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta.