

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vyztužování zemin geotextiliemi  
Bakalářská práce

2020

Jan Kuřík

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Kuřík**  
Osobní číslo: **D15203**  
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**  
Název tématu: **Vyztužování zemin geotextiliemi**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

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

Bakalářská práce bude vypracována v následujících přílohách:

1. Úvod a vymezení cíle práce
2. Popis současného stavu řešené problematiky, zhodnocení využití geosyntetických materiálů v dopravním stavitelství
3. Obecné zásady vyztužování zemin v dopravním stavitelství
4. Laboratorní zkoušky zemin a geotextilií
5. Vyhodnocení laboratorních testů
6. Fotodokumentace
7. Zhodnocení, diskuse a závěr práce

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. ČSN 73 6133. Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
2. ČSN EN 1997-1. Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
3. ČSN EN 1997-2. Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
4. ČSN CEN ISO/TS 17892-10. Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 10: Krabicová smyková zkouška. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
5. TP 97. Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy: Odbor infrastruktury, 2008.
6. ČSN EN 14475. Provádění speciálních geotechnických prací - Vyztužení zemní konstrukce. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
7. TP 76. Geotechnický průzkum pro pozemní komunikace. Praha: Ministerstvo dopravy: Odbor silniční infrastruktury, 2009.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.**

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce:

**26. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**21. května 2019**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.  
děkan

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. října 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 27. 7. 2020

Jan Kuřík

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Aleši Šmejdovi PhD. za velmi vstřícný přístup, cenné rady a odborné vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Erenu Balabanovi PhD. za vysvětlení dané problematiky, věcné konzultace a připomínky k provádění zkoušek. V neposlední řadě děkuji Univerzitě Pardubice za možnost využívat prostory laboratoří a veškeré pomůcky potřebné ke zkouškám.

## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zaměřuje na vyztužování zemin geotextiliemi. Úvodní část bakalářské práce je věnována popisu současného stavu vyztužování a hodnocení využití geosyntetických materiálů v dopravním stavitelství. Obsahuje principy vyztužování a udává rozdělení geosyntetik i geotextilií včetně jejich základních vlastností. Praktická část bakalářské práce je zaměřena na laboratorní zkoušky zemin v interakci s geotextilií při využití krabicové smykové zkoušky. Naměřené výsledky jsou mezi sebou porovnávány a dále hodnoceny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

vyztužování zemin, geotextilie, krabicová smyková zkouška, geosyntetika, dopravní stavitelství

## **TITLE**

Reinforcement of soil by geotextiles

## **ANNOTATION**

The bachelor thesis focuses on the reinforcement of soils with geotextiles. The introductory part of the bachelor's thesis is devoted to the description of the current state of reinforcement and evaluation of the use of geosynthetic materials in traffic construction. It contains the principles of reinforcement and gives the distribution of geosynthetics and geotextiles, including their basic properties. The practical part of the bachelor's thesis is focused on laboratory tests of soils in interaction with geotextiles using a box shear test. The measured results are compared with each other and further evaluated.

## **KEYWORDS**

soil reinforcement, geotextile, direct shear test, geosynthetics, transport structures

# OBSAH

PODĚKOVÁNÍ .....	5
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	10
SEZNAM TABULEK.....	11
SEZNAM ZKRATEK.....	12
ÚVOD .....	13
1 VYMEZENÍ CÍLE PRÁCE .....	14
2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY, ZHODNOCENÍ VYUŽITÍ GEOSYNTETICKÝCH MATERIÁLŮ V DOPRAVNÍM STAVITELSTVÍ .....	15
3 VLASTNOSTI GEOSYNTETIK A JEJICH STANOVENÍ .....	18
3.1 Popisné a indexové vlastnosti .....	18
3.1.1 Plošná hmotnost .....	18
3.1.2 Tloušťka geosyntetika.....	18
3.1.3 Velikost charakteristické průliny .....	19
3.2 Mechanické vlastnosti.....	19
3.2.1 Tahová pevnost a průtažnost .....	19
3.2.2 Vliv času na přetvárné charakteristiky – creep .....	20
3.2.3 Smykový odpor kontaktu geosyntetika – zemina .....	21
3.3 Hydraulické vlastnosti.....	23
3.3.1 Propustnost.....	23
3.4 Mechanická, chemická a klimatická odolnost.....	23
3.4.1 Mechanická odolnost geosyntetik .....	23
3.4.2 Zkoušky trvanlivosti.....	24
4 ROZDĚLENÍ GEOSYNTETIK.....	27
4.1 Rozdělení podle typu polymeru .....	27
4.2 Rozdělení podle technologie výroby (struktury).....	28
4.2.1 Geotextilie (GTX) .....	28
4.2.2 Geomříže (GGR).....	29
4.2.3 Geosítě (GNT).....	30
4.2.4 Georohože (GMA) .....	30
4.2.5 Geobuňky (GCE) .....	30

4.2.6	Geokompozity, sendvičové konstrukce s geosyntetiky a ostatní .....	30
4.3	Rozdělení podle funkce.....	30
4.3.1	Výztužná funkce.....	31
4.3.2	Separáční funkce .....	31
4.3.3	Filtrační funkce .....	31
4.3.4	Drenážní funkce .....	32
4.3.5	Ochranná funkce .....	32
4.3.6	Těsnící (izolační) funkce.....	32
4.3.7	Protierozní funkce .....	32
5	OBECNÉ ZÁSADY VYZTUŽOVÁNÍ ZEMIN V DOPRAVNÍM STAVITELSTVÍ .....	33
5.1	Princip vyztužení zeminy .....	34
5.1.1	Princip tahové membrány a interlockingu .....	35
5.2	Návrh, projekce a provádění .....	36
5.2.1	Opěrné zemní konstrukce a strmé násypové svahy.....	37
5.2.2	Vyztužené báze a podloží násypů .....	38
6	LABORATORNÍ ZKOUŠKY ZEMIN A GEOTEXTILÍ.....	40
6.1	Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic .....	41
6.2	Stanovení zrnitosti a zařídění zemin .....	42
6.3	Proctorova zkouška .....	43
6.4	Krabicové smykové zkoušky .....	45
6.4.1	Požadavky na potřebné přístroje .....	46
6.5	Krabicové smykové zkoušky bez geotextilie .....	47
6.5.1	Požadavky na zkušební vzorek a postup zkoušky.....	47
6.5.2	Množství prováděných zkoušek a okrajové podmínky .....	48
6.5.3	Popis průběhu zkoušek.....	49
6.6	Krabicové smykové zkoušky s geotextilií.....	49
6.6.1	Popis průběhu zkoušek.....	50
7	VYHODNOCENÍ KRABICOVÝCH SMYKOVÝCH ZKOUŠEK.....	51
7.1	Popis vyhodnocení jedné dílčí krabicové smykové zkoušky .....	51
7.2	Vyhodnocení parametrů smykové pevnosti krabicových smykových zkoušek.....	52
7.2.1	Vyhodnocení krabicové smykové zkoušky bez výztužné geotextilie .....	52
7.2.2	Vyhodnocení krabicové smykové zkoušky s výztužnou geotextilií .....	53



7.2.3 Vyhodnocení krabicové smykové zkoušky s výztužnou geotextilií se zvýšeným obsahem vody 54

ZHODNOCENÍ, DISKUSE A ZÁVĚR PRÁCE.....56

POUŽITÁ LITERATURA.....60

SEZNAM PŘÍLOH.....63

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 1</b>	Creepové chování některých výztužných materiálů při zatížení odpovídající 40 % tahové pevnosti .....	21
<b>Obrázek 2</b>	Základní rozdělení geosyntetických výrobků .....	27
<b>Obrázek 3</b>	Tkané, netkané a pletené geotextilie .....	29
<b>Obrázek 4</b>	Monolitické, extrudované, lepené a tkané GGR .....	29
<b>Obrázek 5</b>	Jednoosé, dvouosé a trojosé GGR.....	29
<b>Obrázek 6</b>	Separční funkce geosyntetika.....	31
<b>Obrázek 7</b>	Schéma působení výztuže v zemině (podle Jewella & Wrothe 1987) .....	34
<b>Obrázek 8</b>	Příklad grafického vyjádření výsledků Proctorovy zkoušky špatně zrněného písku .....	45
<b>Obrázek 9</b>	Mohr-Coloumbova křivka porušení.....	46
<b>Obrázek 10</b>	Krabicový smykový přístroj Matest S277-01 použitý při zkouškách.....	47
<b>Obrázek 11</b>	Schéma upevnění geotextilie ve smykové krabici .....	50
<b>Obrázek 12</b>	Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek bez výztužné geotextilie.....	52
<b>Obrázek 13</b>	Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií .....	54
<b>Obrázek 14</b>	Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií se zvýšeným obsahem vody .....	55
<b>Obrázek 15</b>	Porovnání soudržností smykání bez geotextilie, s geotextilií a s geotextilií se zvýšeným podílem vody .....	58
<b>Obrázek 16</b>	Porovnání úhlů vnitřního tření smykání bez geotextilie, s geotextilií a s geotextilií se zvýšeným podílem vody.....	58

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1</b>	Hodnoty poměru $tgj_{gs} / tg\phi$ pro různé typy zemin .....	22
<b>Tabulka 2</b>	Požadované vlastnosti geosyntetik podle funkce.....	26
<b>Tabulka 3</b>	Přehled nejčastěji používaných polymerů pro výrobu geosyntetik .....	28
<b>Tabulka 4</b>	Výsledky pyknometrických zkoušek .....	42
<b>Tabulka 5</b>	Výsledná hodnota zdánlivé hustoty pevných částic.....	42
<b>Tabulka 6</b>	Hodnoty pro zařazení zkoumaných zemin .....	43
<b>Tabulka 7</b>	Výsledky Proctorovy zkoušky .....	45
<b>Tabulka 8</b>	Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek bez výztužné geotextilie.....	52
<b>Tabulka 9</b>	Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií .....	53
<b>Tabulka 10</b>	Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií se zvýšeným obsahem vody .....	55
<b>Tabulka 11</b>	Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření ze všech tří typů měření. ....	57

## SEZNAM ZKRATEK

PET	polyethyltereftalát
PP	polypropylen
PE	polyethylen
UV	ultrafialové záření
GSY	geosyntetikum
GTX	geotextilie
PES	polyester
GTX-W	tkaná geotextilie
GTX-N	netkaná geotextilie
GTX-K	pletená geotextilie
GGR	geomříž
GNT	geosít'
GMA	georohož
GCE	geobuňka
SP	písek špatně zrněný
MI	hlína se střední plasticitou

# ÚVOD

Úprava zemin jakožto stavebního materiálu za účelem zlepšení mechanických vlastností pomocí vyztužování je nám známa už od dob starověku, kdy byl například papyrus použit pro vyztužení Zikurrat nebo tamaryškové větve při stavbě Velké čínské zdi. S postupem času se poznání o způsobech vyztužování rozšiřovalo a v posledních padesáti letech doznalo značného posunu zvláště v oblasti vyztužování pomocí geosyntetik. Ty nabízí několik nesporných výhod jako je nízká hmotnost, rychlý způsob výstavby nebo snížení nákladů, a proto je jejich použití stále rozšířenější.

Bakalářská práce je v úvodu teoretické části věnována popisu současného stavu vyztužování zemin geosyntetiky, konkrétněji pak vyztužování geotextiliemi. Hodnotí také využití geosyntetických materiálů v oblasti dopravního stavitelství. Následně je v bakalářské práci uvedeno základní rozdělení geosyntetických materiálů. Shrnuty jsou jejich základní vlastnosti, popis a způsob použití. V poslední kapitole teoretické části bakalářské práce jsou nejprve shrnuty důvody vedoucí k nutnosti vyztužování zemin, vysvětleny obecné zásady vyztužování, a nakonec představeny vybrané aplikace využití geotextilií v silničním stavitelství za účelem vyztužování.

Rozhodujícím místem při návrhu i realizaci zemních konstrukcí vyztužených geotextiliemi je kontakt zeminy a geotextilie. Znalost interakce konkrétního typu zeminy s vybranou výztužnou geotextilií je základním předpokladem pro správný návrh zemního tělesa, zdárné plnění funkce a pro dodržení návrhové životnosti. Proto se autor v praktické části bakalářské práce zaměřuje na zjišťování chování zeminy s výztužnou geotextilií na jejím rozhraní. V úvodu jsou popsány zkoušené vzorky zemin a také typ geotextilie, které jsou dále. V následných zkouškách zemin jsou stanoveny jejich vlastnosti jako zrnitost, konzistenční meze nebo optimální vlhkost pro zhutňování, které poslouží jednak k jejich zařazení a jednak ke správné přípravě vzorků zeminy pro krabicovou smykovou zkoušku, která je těžištěm praktické části. Ta slouží ke zjištění pevnostních parametrů zeminy – soudržnosti a úhlu vnitřního tření. Zjištěné hodnoty jsou důležitou veličinou v široké škále geotechnických návrhů a z pohledu tématu bakalářské práce poslouží zejména pro výpočty únosnosti zemin, modelování stability nebo výpočtu zemních tlaků.

V závěru praktické části bakalářské práce jsou porovnávána naměřená data z krabicových smykových zkoušek, jsou hledány souvislosti a vyvozovány závěry pro chování zemních těles bez geotextilie oproti zemním tělesům vyztuženým geotextiliemi.

# 1 VYMEZENÍ CÍLE PRÁCE

Při hledání tématu bakalářské práce jsem byl rozhodnutý směřovat do oblasti mechaniky zemin a zakládání staveb, avšak bez větší představy o možném zaměření. Z konzultací ohledně výběru konkrétní problematiky vyplynula možnost se připojit k výzkumným pracím Ing. Erena Balabana Ph.D., který se věnoval experimentální studii v oblasti chování smykové pevnosti zemin při nízkém omezujícím tlaku. Tuto nabídku jsem uvítal i z důvodu, že téma vyztužování zemin geotextiliemi se těší značnému zájmu a je aktuální. Z důvodu volné návaznosti na téma Ing. Erena Balabana Ph.D. bylo zvoleno po dohodě s vedoucím práce poněkud obecnější téma bakalářské práce. Cíle bakalářské práce jsou definovány tak, že autor:

- popíše a definuje základní rozdělení a nejdůležitější vlastnosti geosyntetik
- zaznamená současný stav vyztužování zemin geotextiliemi a popíše vybrané zásady vyztužování zemin geotextiliemi týkající se dopravních staveb
- provede základní zkoušky zemin, které vyhodnotí a dané výsledky využije jako dílčí vstupní hodnoty při krabicových smykových zkouškách
- realizuje krabicové smykové zkoušky bez geotextilie a s geotextilií, naměřená data zpracuje a vyhodnotí
- popíše a porovná výsledky provedených krabicových zkoušek, zhodnotí faktory ovlivňující pevnostní parametry zkoušených vzorků a definuje trend výsledků krabicových smykových zkoušek.

## 2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY, ZHODNOCENÍ VYUŽITÍ GEOSYNTETICKÝCH MATERIÁLŮ V DOPRAVNÍM STAVITELSTVÍ

Již od dávných dob se projevuje snaha vyztužovat zeminu i zemní konstrukce, vkládat do nich nové prvky a tím zlepšovat jejich vlastnosti, odolnost, stabilitu. Dokládajícími příklady takovýchto snah může být využití papyru při stavbách Zigurat, tamaryškových větví při stavbě Velké čínské zdi nebo později například použití armované zeminy při výstavbě opevnění Pražského hradu. S hlubším poznáním principů vyztužování zemních konstrukcí a obrovským vývojem materiálů v posledních desetiletích se použití geosyntetických materiálů dostává čím dál tím větší pozornosti.

Éra těchto materiálů začíná v první polovině dvacátého století v Holandsku. Tam je také poprvé vyrobena geotextilie. [1] O pár let později se stává novodobým zakladatelem vyztužování zemních konstrukcí francouzský architekt a inženýr Henry Vidal, který na řadě výzkumů a experimentů studuje mechanismus chování vyztužené zeminy a vypracovává počáteční výpočty. V roce 1963 tak vydává dokument Terre Armee neboli Reinforced Earth známý také jako mechanicky stabilizovaná zemina, ve kterém definuje princip vyztužené zeminy, podává první patent a záhy poté i další patenty v zahraničí. [2]

Od této doby probíhá velký rozmach zkoumání vyztužování zemin geosyntetiky. Prvotní způsob úpravy zemin podle H. Vidala prošel řadou modifikací, vyvinuly se nové typy materiálů včetně jejich tvaru a způsobu použití. Konkrétní vědeckovýzkumné aktivity zabývající se touto problematikou začínají v druhé polovině dvacátého století, kde probíhá řada experimentů jakožto prvotních zdrojů poznání, z nichž jsou následně odvozovány teoretické postupy. Vývoj na poli experimentů vedl od zkušebních rámců malých rozměrů např.:

- Guido, Chang, Sweeney v roce 1985 – zkouška s použitím extrudované geomříže a netkané geotextilie s pískem jako materiálem v podloží při šířce základu 0,305 m a poměru délky ku šířce L/B 1-3,5, s počtem výztuh 1-4,
- Guido, Biesiadecki, Sullivan v roce 1985 – zkouška s použitím tkané a netkané geotextilie s pískem jako materiálem v podloží při šířce základu 0,31 m a poměru délky ku šířce L/B 1-3, s počtem výztuh 1-4,
- Koerner v roce 1990 – zkouška s použitím tkané s jílem jako materiálem v podloží při průměru základu 0,15 m, s počtem výztuh 1-4. [1]

Až po experimenty v reálném měřítku 1:1, neboť se později potvrdilo, že experimenty v jiném a zpravidla menším měřítku nepostihnou zcela chování výztuhy se zeminou. Zde je dobré připomenout rozsáhlý experiment v oblasti vyztužování podkladních vrstev nezpevněných vozovek, který byl prováděn v Oxfordu v roce 1989. [1] Za zmínku také stojí výzkum vozovek s krytem, prováděný v roce 2002 v USA. V těchto experimentech byla sledovaným parametrem hloubka vyjeté koleje ku počtu přejezdů. Geosyntetika se ukázala jako přínosná, což potvrdily právě ony experimenty, zároveň se ale došlo k možná překvapivému závěru, že pro vyztužování podkladních vrstev hraje významnější roli struktura, a ne pevnost výztuhy, jak by se mohlo zdát. [1]

S počtem prováděných experimentů, množstvím teoretické opory, a hlavně vývojem materiálů, začalo razantně stoupat nejen množství využití geosyntetických materiálů v technické praxi, ale také rozsah a způsob aplikací. Z tohoto pohledu plní geosyntetika v praxi nejen funkci výztužnou, ale i separační, filtrační, drenážní, ochrannou, těsnící nebo protierozní. A logicky se liší i požadavky na plnění daných funkcí, což vede k rozšiřování sortimentu specializovaných firem, inovacím a dalšímu vývoji odvětví. Faktem je, že využití geosyntetik se těší stále větší oblibě ať už jde o zvyšování únosnosti podloží, stavbu opěrných stěn a mostních opěr, stabilizaci strmých svahů a sanaci sesuvů nebo o protierozní ochranu zemních svahů či vyztužování obrusných vrstev asfaltových vrstev vozovek.

Samotné plnění výztužné funkce je alternativou k různým dalším způsobům zlepšení jako je výměna podloží, promísení s jiným materiálem nebo chemická stabilizace a další. Avšak s ohledem na to, že jsou výchozí podmínky v řešených lokalitách vždy specifické, je nutné zvážit jaká z nabízených technologií bude nejvíce vhodná. Rozhodně totiž neplatí, že by vyztužování podkladních vrstev geosyntetiky bylo vždy tím nejlepším řešením, i přesto, že jde o celosvětově aktuální téma. Zároveň ale můžeme označit toto téma za kontroverzní, neboť zaznívají i názory o přeceňování výztužné funkce. Důsledkem diskuse je realizace mnoha v současné době probíhajících experimentů a pokračující výzkum v oblasti popsání principů chování rozhraní zeminy a výztužného geosyntetika. [1] Mechanismus interakce mezi zeminou a výztuží má rozhodující význam při navrhování vyztužených konstrukcí, a i z tohoto důvodu zaznamenáváme stále značný progres poznání této problematiky.

Dokladem těchto tendencí je hned několik výzkumů věnující se převážně zkouškám s geotextiliemi. Například Anubhau v roce 2009 zkoumal pomocí krabicové smykové zkoušky interakci Kapli písku s hrubě a jemně tkanou geotextilií a získané výsledky porovnával s předem namodelovaným chováním. [3] O čtyři roky později také studoval vliv tvaru částic písku na rozhraní s geotextilií využitím krabicové smykové zkoušky konvenční



velikosti. [4] Ve stejném roce Vieira provedl monotónní a cyklické krabicové smykové zkoušky se špatně zrněným křemičitým pískem v kontaktu s vysokopevnostní geotextilií a mimo jiné zjistil, že při prvních několika cyklech se tuhost rozhraní zvyšuje. [5] V roce 2016 provedl Infante se svými kolegy přímé smykové zkoušky se čtyřmi vzorky zemin v kombinaci se čtyřmi různými typy geosyntetik – tkanou a netkanou geotextilií, jednoosou a dvouosou geomříží. Obecně byly výsledky více příznivé pro vzorky vyztužené geomřížemi. [6] V témže roce Aldeeky provedl a hodnotil experimenty s využitím sedmi druhů tkaných i netkaných geotextilií v interakci se špatně zrněným pískem při různém rozmístění výztuhy ve vzorcích. [7] Velmi zajímavé zkoušky v této oblasti provedl v roce 2017 Fowmes, který porovnával chování prototypů texturovaných geomembrán vytvořených pomocí 3D tisku v interakci s hlínou a pískem s použitím smykové krabice o rozměrech 100x100 mm. [8] O rok později zkoumal Markou vliv tvaru a velikosti zrn na rozhraní písek-geotextilie. Využíval čtyři druhy písku různých velikostí a tvarů zrn se sedmi druhy netkané geotextilie při testech krabicové smykové zkoušky. [9]

Z množství jmenovaných výzkumů je zřejmé, že se problematika těší značnému zájmu. Interakci na rozhraní zeminy a geotextilie se věnují i v praktické části bakalářské práce, kde se zaměřují na provádění krabicových smykových zkoušek bez a s geotextilií na dvou různých typech zemin a jejich kombinací s následným porovnáváním výsledků a hledání příčin průběhu výsledků zkoušek.

## 3 VLASTNOSTI GEOSYNTETIK A JEJICH STANOVENÍ

V následující části bakalářské práce budou popsány základní popisné, indexové, mechanické a hydraulické vlastnosti, a nakonec i vlastnosti týkající se odolnosti, které zásadním způsobem předurčují chování geosyntetik v zemním tělese a díky kterým lze určit vhodné využití těchto materiálů nejen v oblasti dopravního stavitelství.

### 3.1 Popisné a indexové vlastnosti

#### 3.1.1 Plošná hmotnost

Plošná hmotnost  $m_g$ , která je udávána v gramech na metr čtvereční ( $g/m^2$ ), je základní popisnou vlastností pro různé typy geosyntetik, zvláště pak pro geotextilie. Rozsah hodnot, kterých plošná hmotnost nabývá, je v rozmezí od 70 do 1200  $g/m^2$ . [10] Hodnoty se však mohou pohybovat i mimo toto rozmezí, pokud si to žádají okolnosti použití. Použit plošnou hmotnost jako kritérium pro porovnání různých druhů netkaných geotextilií nelze, neboť výrobní postupy jsou různé s geotextiliemi různých plošných hmotností při zachování stejných mechanických vlastností. [10]

Způsoby stanovení plošné hmotnosti u geotextilií a výrobků podobným geotextiliím stanovuje norma ČSN EN ISO 9864 a v principu jde o vyříznutí plochy o daných rozměrech (zpravidla 100x100 mm případně 300x300 mm) pomocí šablony z měřeného materiálu a jeho následné zvážení. [10]

Takto získané hodnoty mohou být použity jako ukazatel použitelnosti. Dá se říct, že například těžší typy netkaných geotextilií mohou plnit ochranné či drenážní funkce, středně těžké filtrační funkce a lehčí typy zastanou separační funkce. [1] Ověření plošné hmotnosti má své využití také při procesu stavby, konkrétně jako kontrolní zkouška plošného geosyntetika před zabudováním do zemní konstrukce. [10]

#### 3.1.2 Tloušťka geosyntetika

Pohybuje se pro separační, filtrační a výztužné typy geosyntetik v řádu milimetrů. Avšak protierozní geosyntetika mohou mít tloušťku i několik cm. [10]

Při posuzování plnění drenážní funkce geosyntetika je potřeba znát vliv změny tloušťky na jeho drenážní kapacitu. [1] A je třeba definovat změnu tloušťky jako funkci zatížení. To má dosahovat až do maximálních očekávaných hodnot, zpravidla zkouška probíhá při svislém napětí 2,20 a 200 kPa. [10]

### 3.1.3 Velikost charakteristické průliny

Velikost charakteristické průliny udává charakteristickou hodnotu velikosti pórů v geosyntetiku. Zatímco pletené a tkané geotextilie, geosítě a geomříže vykazují póry rovnoměrné, jejichž velikost se určuje přímým měřením nebo projekcí s měřením ve větším měřítku, netkané geotextilie mají rozložení pórů nerovnoměrné navíc s různou velikostí závislou na průměru a hustotě vláken, jejich napojení a také na tloušťce geotextilie. Způsob zjištění charakteristické průliny je proto složitější a udává jej norma ČSN EN ISO 12 956, ve které najdeme i postup pro geotextilie tkané. [10]

Velikosti charakteristických průlin ( $O_{90}$ ) se pro tkané geotextilie pohybují od 0,15 do 0,6 mm a jsou o něco větší než u netkaných geotextilií, kde se  $O_{90}$  pohybují od 0,05 do 0,35 mm. [10] Velikost charakteristické průliny je při návrhu filtrační funkce geosyntetika důležitým kritériem. [1]

## 3.2 Mechanické vlastnosti

### 3.2.1 Tahová pevnost a průtažnost

Tahová pevnost geosyntetických materiálů je udávaná v kilonewtonech na metr ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a je nejdůležitější mechanickou vlastností, jejíž znalost je nezbytná pro posuzování jednotlivých funkcí, zvláště v případě posuzování výztužné funkce.

Tato klíčová vlastnost geosyntetik, které jsou tvořeny převážně polymery, je ovlivňována řadou faktorů, a to jak při laboratorních zkouškách, tak při samotné aplikaci. Můžeme vyjmenovat hned několik z nich. Výsledná hodnota tahové pevnosti závisí na typu zatížení, který na geosyntetikum působí, závisí také na tvaru zkoušeného vzorku, velikosti bočních zatížení, rychlosti provedené zkoušky i způsobu, jakým je vzorek upnut. Velkou roli hraje také teplota, která může negativně ovlivnit dosaženou pevnost. Například u polyolefinů s rostoucí teplotou taková pevnost výrobků klesá.

I proto jsou podmínky zkoušek tahové pevnosti normovány a sepsány v ČSN EN ISO 10319 kde se mimo jiné uvádí, že zkoušky se provádí při teplotě 20 °C s rychlostí zatěžování 20 %/min na vzorcích o šířce pásku 200 mm. Pro správné plnění výztužné funkce je rozhodující mobilizace tahové pevnosti v počátečních fázích protažení geosyntetika, která jsou v rozmezí 2-5 %, aby bylo zajištěno rychlé zapojení výztuhy do přenosu zatížení. [10] Proto je výsledkem tahové zkoušky pracovní diagram geosyntetika, ze kterého se odečte pevnost při porušení  $T_f$  [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ] a odpovídající přetvoření  $\varepsilon_f$  [%] a dále se definují pevnosti při 1 %, 3 % a 5% protažení zkoušeného geosyntetika.

Velikost tahové pevnosti je dosti rozdílná, neboť některé tkané geotextilie a pleteniny dosahují tahové pevnosti více jak 1000 kN/m při protažení menším než 10 %, zatímco u netkaných geotextilií se tahová pevnost pohybuje v rozmezí 5-50 kN/m s protažením i 30 % a více.

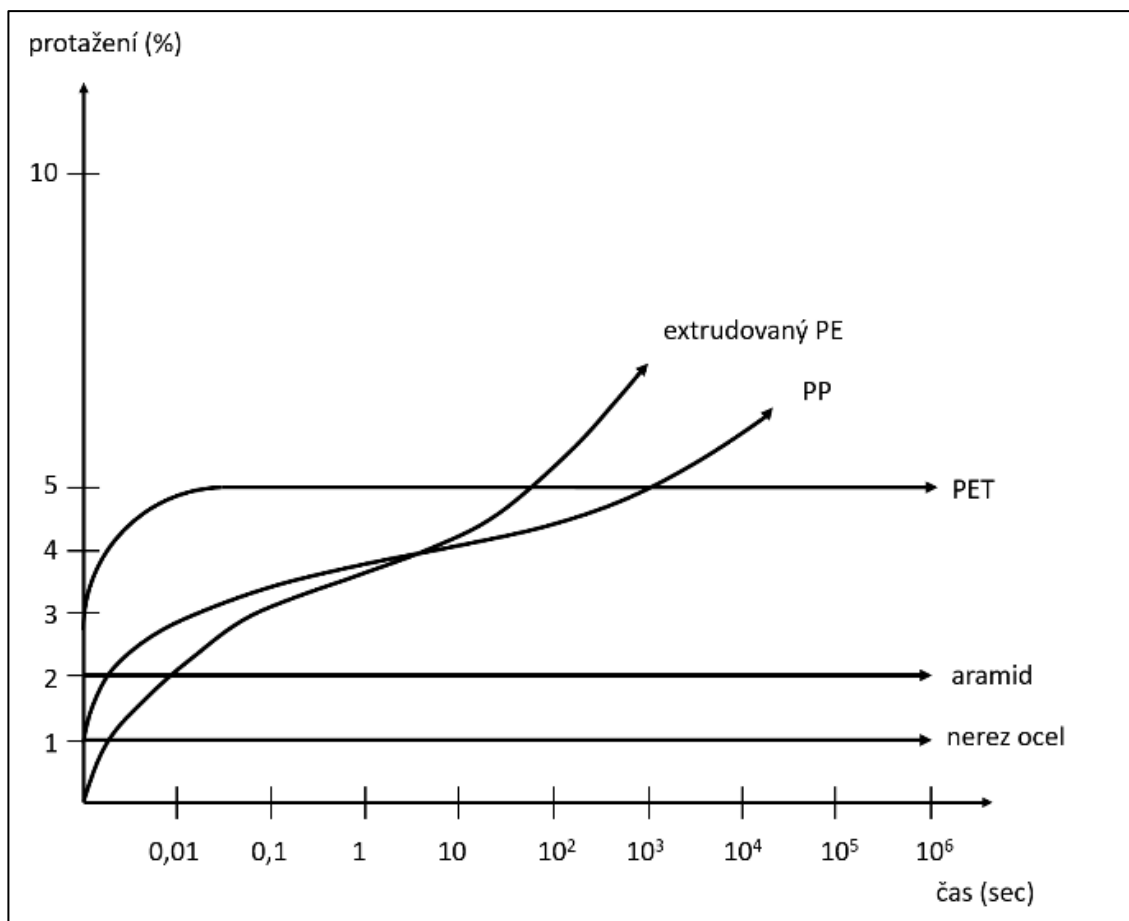
Velikost tahové pevnosti je stanovována pro oba na sebe kolmé směry geosyntetika a je potřeba těmto výsledkům věnovat pozornost, neboť rozdíly pevnosti mohou být značné. To v zásadě nevadí, pokud známe směr hlavního namáhání při použití geosyntetika. Při vyztužování podloží, opěrných stěn nebo strmých svahů liniových staveb, kde známe směr největšího namáhání a v kolmém směru jsou tahová napětí podstatně nižší, riziko zpravidla nenastává. Pozor je třeba si dát v případě vyztužování lokálně slabých míst jako například mokřadů, kde je potřeba volit geosyntetika s podobnými vlastnostmi v obou směrech.

### **3.2.2 Vliv času na přetvárné charakteristiky – creep**

Důležitým faktorem ovlivňujícím funkčnost výztužných geosyntetik je také čas. Ten se na geosyntetických materiálech zatěžovaných konstantním napětím podepisuje a dochází u nich k tzv. tečení neboli creep. Ten by se dal popsat jako v čase postupné – další protahování výrobku při konstantním napětí.

Creepu podléhají různé polymery různě. Nízkou úroveň creepu mají např. výrobky z PET, naopak u PP nebo PE výrobků je vliv creepu vyšší, jak také uvádí obrázek 1. Jaký bude význam creepu, závisí také na úrovni napětí, které výrobek zatěžuje a které se dá popsat jako poměr konkrétního zatížení ku zatížení při porušení v tahu pro krátkodobou zkoušku. [tp97] Pokud je totiž úroveň napětí nízká, nastává creep ustálený a rychlost přetváření se s časem snižuje. Pokud je ale úroveň napětí vysoká, je vše naopak a přichází creep neustálený, který rychlost přetvoření s časem roste až do úplného porušení.

Pro návrh konstrukce s ohledem na creep se uvádějí poměry mezi výpočtovou (návrhovou) pevností  $T_d$  a pevnosti při porušení  $T_f$ . Tyto poměry se pro polyestery pohybují takto:  $T_d/T_f < 0,5 - 0,7$  a pro polyolefiny takto:  $T_d/T_f < 0,3 - 0,4$ . Hodnoty  $T_d$  se stanovují z dlouhodobých creepových testů, které by měly odpovídat návrhové životnosti, jež je pro tyto typy konstrukcí např. 100 let. S ohledem na rozvoj vyztužování geosyntetiky není možné mít k dispozici creepové testy pro takto dlouhé intervaly, a proto se provádí extrapolace naměřených dat.



**Obrázek 1** Creepové chování některých výztužných materiálů při zatížení odpovídající 40 % tahové pevnosti [10]

### 3.2.3 Smykový odpor kontaktu geosyntetika – zemina

Velmi významnou vlastností při návrhu zemních konstrukcí a jejich posuzování je spolupůsobení mezi zeminou a geosyntetickou výztuhou nazývanou smykový odpor. Pro ověření této vlastnosti se využívá jednak modifikované krabicové zkoušky dle ČSN EN ISO 12957-1, dále také zkoušky na vytržení geotextilie tzv. pull-out test, který je podrobně definovaný v ČSN EN 13738 nebo zkoušky na nakloněné rovině dle ČSN EN ISO 12957-2, která se ale týká pouze sypkých materiálů.

Smyková zkouška pro dlouhodobou i krátkodobou stabilitu se provádí za odvodněných podmínek, kdy jsou výsledkem efektivní parametry smykového odporu a adheze. Pro tyto typy zkoušek se používání neodvodněných podmínek nedoporučuje, neboť vzhledem k vysoké propustnosti zejména geotextilií se v průběhu zkoušky pórové tlaky rozptýlí a vytvoří se již zmiňovaná efektivní napjatost. Z provedených zkoušek se vyhodnocuje smykový odpor vyztužené zeminy z rovnice:

$$t = a + s * tg j_{gs}$$

kde  $t$  (kN/m<sup>2</sup>) – smykový odpor

$s$  (kN/m<sup>2</sup>) – normálové napětí

$a$  (kN/m<sup>2</sup>) – adheze

$j_{gs}$  (°) – úhel tření mezi geotextilií a zeminou.

Ověření smykového odporu na kontaktu zeminy s geotextilií nám jednak dává možnost posoudit celkovou stabilitu navrhovaného zemního tělesa, protože umístěním geotextilie se může vytvořit v jinak homogenním zemině slabé místo, podél něhož by potenciálně mohlo dojít k usmyknutí, čemuž je potřeba předejít. A jednak ověřením zjistíme, zda smykový odpor bude schopný přenést požadovanou tahovou sílu, což je nezbytné při plnění výztužné funkce. Takovéto zjištění nám dává podklad pro řešení kotevní délky výztužného prvku.

Jak již bylo zmíněno, kontakt na rozhraní zeminy s geotextilií předurčuje rovinu s nižší smykovou pevností. Proto je nutné zohlednit při stabilitních řešeních snížení smykové odporu. Poměr tangenty úhlu vnitřního tření kontaktu geotextilie a zeminy, označované  $tgj_{gs}$  (°) k tangente úhlu vnitřního tření zeminy  $tg\phi$  (°) se pro písčité zeminy pohybuje od 0,7 do 0,9. S ohledem na princip efektivních napětí je pro jemnozrnné zeminy poměr obou tangente od 0,5 do 1,0. Smykový odpor je naopak příznivější u geomříží případně geokompozitů, kde se zrna zeminy snadněji zaklíní do otvorů (ok). Pokud je průměr oka cca 2x až 3x větší než průměr zrna  $d_{50}$  zeminy, nastává mobilizace smykového odporu dříve při nižších hodnotách smykového posunu. Zároveň je zde smykový odpor nejvyšší a blíží se smykové pevnosti vlastní zeminy. Tyto pozitivní vlastnosti však mizí při kontaktu s jemnozrnnými zeminami. Obecně však platí, že pokud je sypanina kvalitně zhutněná dochází k dilataci, díky tomu ke zvýšení smykového odporu, což následně vede i ke zvýšení hodnoty poměru  $tgj_{gs}/tg\phi$ .

**Tabulka 1** Hodnoty poměru  $tgj_{gs}/tg\phi$  pro různé typy zemin

<b><i>zemina</i></b>	<b><i>geotextilie</i></b>	<b><i>geomříže</i></b>
<i>štěrk, písek</i>	0,7-0,9	0,9-1,0
<i>hlína (písčítá, prachovitá)</i>	0,7-0,8	0,8-0,9
<i>jíl</i>	0,5-0,7	0,7-0,8

Zdroj: [10]

### 3.3 Hydraulické vlastnosti

#### 3.3.1 Propustnost

Propustnost neboli schopnost propouštět kapalinu je u geotextilie vysoká, kde se filtrační součinitel  $k_g$  z Darcyho filtračního zákona:

$$v = k_g \cdot i$$

kde:  $v$  (m/s) je rychlost proudění vody

$k_g$  (m/s) je filtrační součinitel geosyntetika

$i$  (-) je hydraulický gradient.

Propustnosti se pohybuje v řádu od  $1 \cdot 10^{-3}$  do  $1 \cdot 10^{-4}$ . Tyto hodnoty zhruba odpovídají propustnosti štěrků nebo písků. Citlivé na změnu propustnosti pod zatížením jsou netkané geotextilie. Norma ČSN EN ISO 11058 pak dále definuje postup pro stanovení filtračního součinitele geotextilie kolmo k rovině výrobku ( $k_{ng}$ ). Lze stanovit také propustnost v rovině výrobku označovanou  $k_{pg}$ , ze které po vynásobení tloušťkou ( $t_g$ ) výrobku odvodíme parametr zvaný transmitivita ( $q = k_{pg} \cdot t_g$ ). Obdobně je definována permitivita, kde je naopak propustnost kolmo k výrobku dělena tloušťkou výrobku. ( $y = k_{ng} / t_g$ ).

Hodnoty propustností a z nich vycházejících vlastností jsou zásadním předpokladem pro posouzení filtrační a drenážní funkce geosyntetika. Za zmínku stojí, že pro plnění filtrační funkce nejsou vhodné tkané textilie.

### 3.4 Mechanická, chemická a klimatická odolnost

#### 3.4.1 Mechanická odolnost geosyntetik

V procesu výstavby vyztužených zemních konstrukcí dochází při instalaci k různým situacím a postupům, které mohou geosyntetikum poškodit a negativně tak ovlivnit plnění dané funkce v zemním tělese. Ať už jde o poškození pracovními stroji, technologií instalace nebo počasím. Z tohoto důvodu je na geosyntetiku prováděno několik zkoušek mechanické odolnosti, které mají za cíl zjistit dopad daného pracovního postupu instalace a vyhodnotit vhodnost použití či upravení postupu instalace při výstavbě.

První z možných zkoušek mechanické odolnosti jsou tzv. penetrační zkoušky, při kterých je v jednom případě zjišťována velikost otvoru v napnutém geosyntetiku po dopadu kužele, což má simulovat poškození padajícími úlomky hornin. Tuto zkoušku dále popisuje norma ČSN EN 918. V dalším případě se jedná o zkoušku protlačování válcového razníku CBR skrz napnuté geosyntetikum, která modeluje statickou odolnost vůči působení úlomků hornin a štěrkových zrn. Tato zkouška je dále popsána v normě ČSN EN ISO 12236. [10]

Další ze zkoušek zjišťování mechanické odolnosti geosyntetik je ověření poškození geosyntetika při zabudování na stavbě, které se provádí při zhutňovací zkoušce nebo při práci na první vrstvě vyztužené zemní konstrukce. [10] Geosyntetikum je v takovém případě zabudováno do zhutňované zeminy, po ukončení hutnění je odkryto a vizuálně se posuzují jeho poškození. Také je odebrán vzorek takto zkoušeného geosyntetika, na němž je změřena pevnost v tlaku, která je porovnána s naměřenou hodnotou pevnosti v tlaku části geosyntetika odebraného přímo z role dodané na stavbu. Z porovnání obou hodnot se provede závěr a opatření z toho plynoucí.

Jedním z posledních faktorů na geosyntetikum působících a zde zmíněných je poškození geosyntetika v důsledku oděru. Zkouška napodobující poškození oděrem se také nazývá zkouška kluzným blokem a její podrobnosti definuje norma ČSN EN ISO 13427.

K mechanickému poškození geosyntetika může dojít i vlivem větru, čemuž se však dá předcházet lokálním přesypáním zeminou, která geosyntetikum dostatečně krátkodobě zafixuje.

Jemnozrnná zemina obecně poškozuje geosyntetika méně než drcené kamenivo, zároveň ale dosahuje nižších smykových pevností. Dá se také říct, že se zvyšující se velikostí zrn např. úlomků nebo balvanů a ostrohraností sypaniny stoupá náchylnost k poškození geosyntetika. A vzhledem k tomu, že geotextilie mohou plnit kromě výztužné funkce současně i další funkce jako separační nebo filtrační, je pro ně mechanická odolnost zvláště důležitá.

### **3.4.2 Zkoušky trvanlivosti**

Zkoušek trvanlivosti je podobně jako v případě mechanické odolnosti hned několik a simulují stav zabudování geosyntetika do prostředí s různými chemickými látkami a vlivy. Cílem zkoušek pak je zjistit, jestli nedochází k reakci polymeru s chemickými látkami, protože tím by mohlo dojít k degradaci jeho struktury, což negativně ovlivní výsledné chování a plnění funkce geosyntetika. Různé druhy polymerů jsou různě odolné vůči daným chemicky specifickým prostředím, ale dá se říct, že ve většině případů s chemickými látkami nereagují.

Pokud je však například geosyntetikum z PET bez speciální úpravy vystaveno alkalickému prostředí, kde je pH vyšší než 9, dochází k jeho degradaci. Takto alkalické prostředí vznikne mimo jiné při použití vápna nebo cementu v úpravě zeminy. Zkouška se provádí podle ČSN EN 12447. Existuje i speciální pasta, která geomříž nebo geosít z PET ochrání před stykem s takovýmto prostředím, je ale dobré zvážit, na kolik se tento povlak



poškodí při použití hrubozrnné nebo ostrohranné sypaniny. Vůči zásaditému mají vyšší odolnost výrobky z PP a PE.

Naopak odolnost vůči oxidaci (reakci s kyslíkem) mají tyto dva polymery v porovnání s ostatními nižší. Společně s nimi je třeba zkoušet dle ČSN EN ISO 13438 ještě výrobky z PA, pokud mají být zabudovány do zemní konstrukce s předpokládanou životností 25 let a více. Vyšší odolnost vykazují extrudované a orientované polyolefiny.

Pokud má být geosyntetikum zabudované do skládky odpadu nebo jiného podobného prostředí, musí prokázat odolnost proti chemické degradaci, kterou dále definuje norma ČSN EN 14414.

Další běžně vyšetřovanou odolností je zkouška dlouhodobé trvanlivosti vůči působení ultrafialového (UV) záření. Zkouška se provádí podle ČSN EN 12224 a je naprosto nezbytná pro geosyntetika vystavená na povrchu konstrukce dlouhodobému působení slunečního záření. A to kvůli tomu, že působením UV záření dochází k narušení řetězců polymerů, což vede k porušení jejich vnitřní struktury. Typickým příkladem, kdy dochází k působení UV záření, jsou konstrukce měkkého lícového opevnění, gabionových košů z geosyntetik nebo při aplikaci protierozní ochrany.

Poslední z odolností, která může být prokazována, je odolnost vůči mikrobiologické degradaci, která se provádí podle normy ČSN EN 12225. Jedná se ale o okrajovou záležitost.

**Tabulka 2** Požadované vlastnosti geosyntetik podle funkce

Vlastnost	Metodika	Jednotka	Funkce					
			filtrační	separační		drenážní	výztužná	
				klasická	ochranná			
Plošná hmotnost ( $m_g$ )	ČSN ISO 9864	g/m <sup>2</sup>	N	≥ 100	≥ 500	N	N	
Tloušťka ( $t_g$ )	ČSN EN ISO 9863-2	mm	N	N	≥ 4	≥ 4	N	
Velikost charakteristické průřiny ( $O_{90}$ )	ČSN EN ISO 12956	mm	D	N	N	drenážní	N	
Propustnost ( $k_g$ ) čl. 5.2.1	ČSN EN ISO 11058 ČSN EN ISO 12958	m/s	D ( $> 10^{-4}$ )	N	N	D ( $> 10^{-4}$ )	N	
Pevnost v tahu ( $T_f$ ) a průtažnost ( $e_f$ )	ČSN EN ISO 10319	kN/m %	> 5 > 10	> 5 * > 50	> 5 ** > 10	D	N	D
Pevnost v tahu švů a spojů ( $T_f$ )	ČSN EN ISO 10321	kN/m	N	N	N	N	N	D
Creep $T_d/T_f$	ČSN EN ISO 13431	-	N	N	N	N	N	D
Interakce geosyntetikum – zemina	ČSN EN ISO 12957-1,-2	$\varphi$ (°) $\tau$ (kPa)	N	N	N	N	N	D
Odolnost proti statickému protlačení (CBR)	ČSN EN ISO 12236	kN	> 1	> 3 *	> 2 **	N	> 1	D
Odolnost proti protržení protržení padajícím kuželem	ČSN EN 918	mm	N	< 10 *	< 20 **	N	N	D
Zkoušky trvanlivosti	ČSN EN 12224, ČSN EN 14414, ČSN EN ISO 13438, ČSN EN 12225, ČSN EN 14415	-	D	N	N	N	D	D

N – nepovinný údaj

D – stanovuje dokumentace stavby

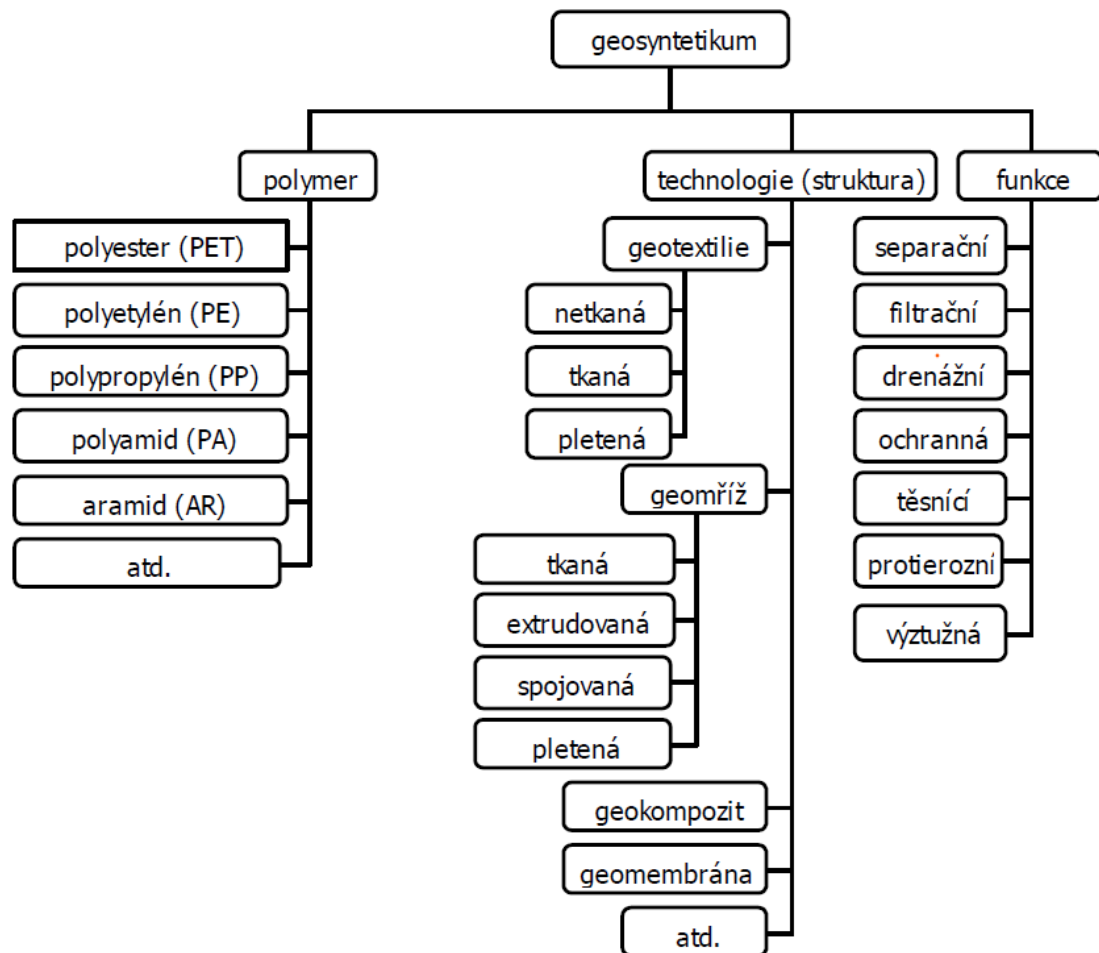
\* - hrubozrnná sypanina na měkkém podloží

\*\* - oddělení hrubozrnné sypaniny od jemnozrnné zeminy

Zdroj: [10]

## 4 ROZDĚLENÍ GEOSYNTETIK

Jak udává norma ČSN EN ISO 10318-1 geosyntetikum (GSY) je: „druhový termín popisující výrobek, u něhož alespoň jedna složka je vyrobena ze syntetického nebo přírodního polymeru ve tvaru fólie, pásku nebo trojrozměrné struktury, používaný ve styku se zeminou a/nebo jinými materiály v geotechnice a stavebním inženýrství“. [11] Geosyntetika dělíme podle několika kritérií, jako jsou typ polymeru, technologie výroby nebo funkce (obr. 2)



Obrázek 2 Základní rozdělení geosyntetických výrobků [1]

### 4.1 Rozdělení podle typu polymeru

Jak je uvedeno v tabulce 3, využívané polymery jsou převážně syntetické a zároveň z jejich relativně odlišných vlastností vychází výsledné chování. To do určité míry předurčuje, jaké druhy aplikací jsou pro dané geosyntetikum vhodné a kde se naopak použití vyvarovat. Například polyolefiny – polypropylen, polyester, vysokohustotní polyethylen vykazují v porovnání s vodou menší specifickou hmotnost. [1]

**Tabulka 3** Přehled nejčastěji používaných polymerů pro výrobu geosyntetik

<i>Polymer</i>	<i>Zkratka</i>	<i>Specifická hmotnost Gs [1]</i>	<i>Přechodová teplota Tg [°C]</i>	<i>Teplota tání [°C]</i>	<i>Modul pružnosti E [GPa]</i>	<i>Tahové napětí σ [GPa]</i>
<i>Polypropylen</i>	PP	0,91	-15	160-170	2-5	0,037
<i>Polyethylen</i>	PE	0,91-0,95	-100	110-140	variabilní*	
<i>Vysokohustotní polyethylen</i>	HDPE	0,96-0,97	-100	125-135	variabilní*	0,031
<i>Polyamid</i>	PA	1,05-1,14	30-50	215-250	2-4	0,1
<i>Polyvinylalkohol</i>	PVA	1,19-1,32	85	280	4,5-5	0,13-0,17
<i>Aramid</i>	AR	1,23-1,44	-	400	60-186	3,4-3,8
<i>Polyester</i>	PET	1,22-1,38	60-80	250-260	12-18	0,061

\* u těchto polymerů modul větší rozptyl oproti ostatním polymerů (v jednotkách GPa),

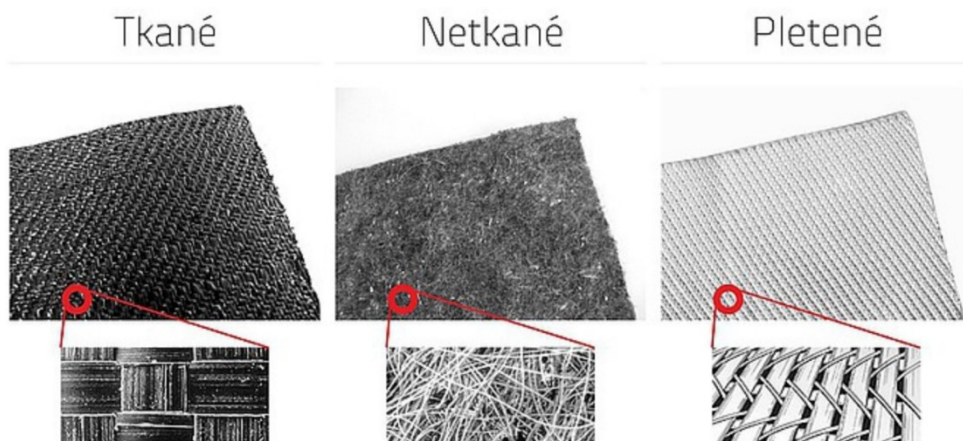
Zdroj: [1], upraveno autorem

## 4.2 Rozdělení podle technologie výroby (struktury)

### 4.2.1 Geotextilie (GTX)

Geotextilie je definována jako plošný polymerní (syntetický nebo přírodní) textilní materiál, který může být tkaný, netkaný nebo pletený, používaný ve styku se zemí a/nebo jinými materiály v geotechnice a stavebním inženýrství. [11] Geotextilie jsou nejvíce používané geosyntetikum v geotechnice a stavebnictví. Kromě běžného samostatného použití se dají využít i jako součást geokompozitu. Geotextilie jsou obvykle vyráběny z polypropylenu (PP) a/nebo polyesteru (PES) a můžeme je dále dělit na tkané, netkané a pletené.

Tkaná geotextilie (GTX-W) je plošná textilie vyráběná ze dvou vzájemně kolmých soustav nití, které jsou spojené vazbou tkaniny. Netkané geotextilie (GTX-N) jsou textilní plošné struktury, vyrobené zpevněním stříže nebo nekonečného vlákna mechanickým nebo fyzikálně chemickým způsobem, popř. jejich kombinací. Pletená geotextilie (GTX-K) je vytvořená z nití vytvarovaných do oček vzájemně provázaných, které jsou uspořádané do řádků a sloupků. [12]



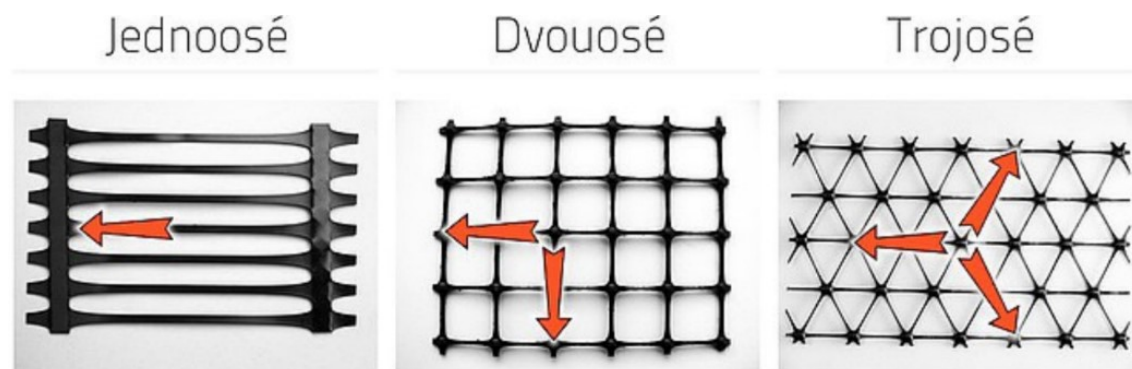
**Obrázek 3** Tkané, netkané a pletené geotextilie [13]

#### 4.2.2 Geomříže (GGR)

Geomříže plní v zemi konstrukci zpravidla výztužnou funkci a jsou tvořeny rovinnou polymerní strukturou na sebe vzájemně kolmých tahových podélných a příčných žebírek. Žebířka jsou spojována lepením, svařením anebo provázáním, čímž jsou vytvářena oka s velikostí otvoru 10-100 mm. [12] Díky tomu mohou částice zeminy/horniny proniknout do geomříže a zaklínit se v ní, což je základní princip při vyztužování zemin geomřížemi. Geomříže můžeme dále rozdělit na monolitické, extrudované, lepené a tkané nebo podle směru převládající pevnosti na klasické jednoosé, dvouosé anebo trojosé, které jsou relativní novinkou v tomto odvětví.



**Obrázek 4** Monolitické, extrudované, lepené a tkané GGR [14]



**Obrázek 5** Jednoosé, dvouosé a trojosé GGR [14]

### **4.2.3 Geosítě (GNT)**

Geosítě jsou tvořeny rovnoběžnou soustavou žeber ve dvou nebo třech vrstvách přes sebe tak, aby vznikla maximálně propustná konstrukce. Jednotlivé vrstvy jsou pevně spojeny. Žebra geosítí tvoří pruty vzniklé extrudováním. Výrobky nacházejí využití při plnění drenážní funkce nebo jsou používány v geokompozitech. [12]

### **4.2.4 Georohože (GMA)**

Georohože definuje norma ČSN EN ISO 10318-1 jako propustnou trojrozměrnou strukturu vyrobenou z polymerních vláken a/nebo jiných prvků, které jsou mechanicky, tepelně nebo chemicky spojeny. [11] Georohože nachází využití v ochraně svahů proti povrchové erozi a k odvodňování. [12]

### **4.2.5 Geobuňky (GCE)**

Geobuňky vznikají vzájemným propojením proužků geosyntetik, čímž se vytváří trojrozměrná propustná polymerní struktura. Stěny geobuněk mohou být děrované, aby bylo dosaženo propustnosti. Geobuňky se odlišují svojí velikostí, která určuje hustotu buněk na jednotku plochy a hloubkou pohybující se od 10 do 20 cm. V praxi se nejčastěji využívají geobuňky z PE materiálu k protierozní ochraně svahů, k vyztužení nedostatečně únosného podloží a k výstavbě opěrných konstrukcí. Geobuňky se instalují v jedné nebo více vrstvách podle oblasti použití a jsou vyplněny zeminou určité zrnitosti. [12]

### **4.2.6 Geokompozity, sendvičové konstrukce s geosyntetiky a ostatní**

V zásadě se jedná převážně geosyntetika plnicí funkce drenážní nebo separační, ve kterých jsou izolačním prvkem přímo samotné polymery, anebo se izolaci stará jiná negeosyntetická látka jako například jíla nebo asfalt. Ve většině případů se jedná o sendvičové konstrukce nebo geokompozity složené zpravidla ze tří vrstev ve tvaru fólie. Existují i geokompozity plnicí další funkce jako protierozní, výztužnou nebo ochrannou, kde se užívá tkaných a netkaných geotextilií, georohoží a geomříží v různých kombinacích. [12]

## **4.3 Rozdělení podle funkce**

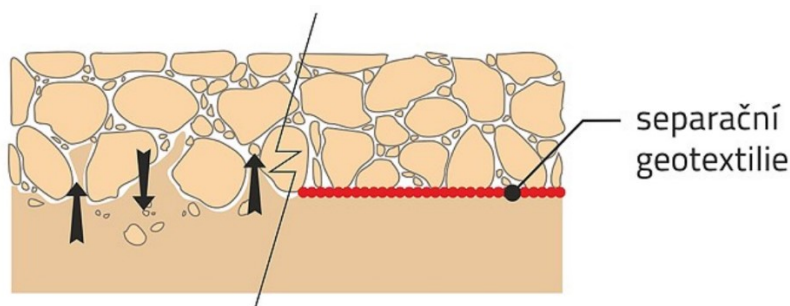
Geosyntetika mohou dopravním stavitelství a v geotechnických aplikacích plnit jednu nebo i více funkcí v závislosti na požadavcích a konkrétní situaci. Samotných funkcí rozlišujeme hned několik – od oddělení různých materiálů a zabránění mísení, zajištění proudění kapalin se zamezením pohybu pevných částic přes odvod kapalin a přenesení tahových napětí po ochranu vrstev před erozí či poškozením. [10]

### 4.3.1 Výztužná funkce

U výztužného geosyntetika se využívá jeho vlastnosti napětí-deformace ke zlepšení mechanických vlastností zeminy nebo jiných stavebních materiálů. [11] Vlastností napětí-deformace je myšleno plnění výztužné funkce prostřednictvím vysoké tahové pevnosti při minimálním prodloužení. Výztužné geosyntetikum zabudované v zemině se při zatěžování zemního tělesa postupně aktivuje a přejímá zatížení od zeminy, čímž se vytváří příznivý statický stav. [12] Vyztužováním zemního tělesa můžeme dosáhnout zvýšení jeho stability, snížení nerovnoměrných deformací, využití podmínečně vhodných a nevhodných zemín do násypů, zmenšení záboru půdy, zlepšení estetického působení a snížení nákladů v porovnání např. s betonovými opěrnými konstrukcemi. [10]

### 4.3.2 Separační funkce

Separace je definována jako zabránění smísení sousedních zemín odlišných vlastností a/nebo sypanin. [11] Trvalým oddělením rozdílných typů zemín zabezpečíme funkčnost jednotlivých vrstev. Pro separaci se zpravidla používají tkané a netkané geotextilie, u kterých je potřeba zabezpečit s ohledem na zrnitost a ostrohranost zásepového materiálu dostatečnou robustnost. [10] Zároveň se návrh odvíjí od podloží, které bude geosyntetikum překrývat, neboť lze tvrdit, že čím měkčí podloží, tím jsou vyšší požadavky na pevnost proti protlačení a na hodnoty protažení při zachování dostatečné pevnosti. Díky tomu je separační geotextilie schopna kopírovat deformaci bez přetržení. [12]



Obrázek 6 Separační funkce geosyntetika [15]

### 4.3.3 Filtrační funkce

Filtrační geosyntetikum slouží k zadržení neřízeného průchodu zeminy nebo jiných částic, kdy je zároveň umožněn průtok kapalin. [11] Pro správné fungování geotextilie jako filtru je zapotřebí vytvoření minerálního filtru ze zrn zeminy, který se vytváří po odplavení malého množství nejmenějších částic chráněné zeminy. Geotextilní filtr má umožňovat průchod vody bez zvýšení pórového tlaku nad filtrem a zároveň zabraňovat pohybu částic

zeminy, což jsou v podstatě protichůdné požadavky. Výsledkem návrhu je určitý kompromis při splnění kritéria propustnosti a kritéria zadržení a zabránění ucpání. [10]

#### **4.3.4 Drenážní funkce**

Úkolem drenážního geosyntetika je shromáždit a poté odvézt nežádoucí vodu v rovině materiálu v požadovaném množství po celou dobu životnosti. [11] Klíčovým kritériem při návrhu je propustnost v požadovaném směru. Důležitá je také odolnost vůči stlačení a dobré je také uvažovat s možným zanášením či ucpáváním. V praxi se setkáme s plošnými drenážními kompozity tvořené jednou nebo dvěma vrstvami netkané filtrační geotextilie s jádrem tvořeným geosítí nebo rounem a také s pásovými drenážními prvky. [10]

#### **4.3.5 Ochranná funkce**

Smyslem použití ochranného geosyntetika je zabránění nebo omezení poškození daného prvku nebo materiálu. [12] Ochrana před porušením přisypávanou zeminou je používána zpravidla pro izolace. Určujícími parametry při návrhu jsou pevnost v tahu, odolnost proti protlačení, odolnost vůči proražení a tloušťka při zatížení. Vhodnými geosyntetiky jsou netkané geotextilie ze střížových vláken s vysokou plošnou hmotností a geokompozity s větší tloušťkou. [10]

#### **4.3.6 Těsnící (izolační) funkce**

Při plnění těsnící funkce je geosyntetikum použito k zabránění nebo omezení migrace kapalin. [11] Opět platí, že výběr vhodného geosyntetika ovlivňují dílčí požadavky. Ovšem předpokladem celistvosti a funkčnosti systému je především kvalitní montáž. [12]

#### **4.3.7 Protierozní funkce**

Protierozní geosyntetické materiály slouží k zabránění nebo omezení pohybů zeminy nebo jiných částic. [11] Typická je ochrana povrchu svahů a násypů před dešťovou vodou, další využití je při ochraně břehů vodních toků před proudící vodou. [12] S ohledem také na sklon svahu a odolnost vůči UV záření se navrhuje vhodné geosyntetikum, které může být v některých případech jen dočasné do doby, než se uchytlí přirozený porost. [10]



## 5 OBECNÉ ZÁSADY VYZTUŽOVÁNÍ ZEMIN V DOPRAVNÍM STAVITELSTVÍ

Vyztužování zemních konstrukcí je moderní a progresivní způsob, který má, při správném využití, své nesporné výhody. Při návrzích v oblasti mechaniky zemin a zemních konstrukcí jsou v zásadě dvě varianty, buď využít zeminu tak jak je přítomná v místě stavby, nebo ji nějakým způsobem upravit. Jedná se totiž o situace, kdy zemina, obdobně jak další stavební materiály-dřevo, ocel nebo železobeton, má relativně dobré vlastnosti při zatěžování tlakem. Rozdíl oproti zmíněným materiálům je však v tahové pevnosti, kterou zemina vykazuje velmi malou nebo až nulovou. Tento fakt je hlavním důvodem pro vyztužování zemin, v našem případě pro vkládání geosyntetických výztužných prvků do zemní konstrukce tak, že dojde ke zvýšení tahové pevnosti daného prostředí. Výztuhy přenášejí i smykové síly díky tření na rozhraní geosyntetika – zemina nebo díky zaklínění zrn zeminy ve struktuře výztužného prvku, zpravidla geomříží. Dalším příznivým důsledkem při použití výztužného geosyntetika je snižování absolutních i nerovnoměrných deformací. [16]

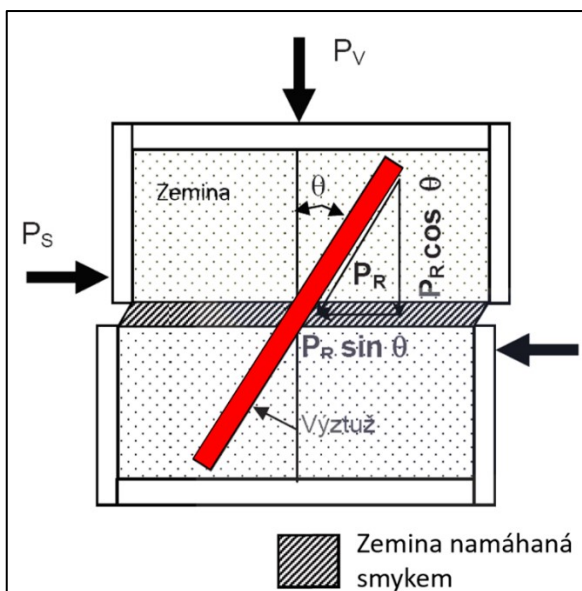
Systém vyztužování zemních těles můžeme v současné době rozdělit na mikrovyztužování a makrovyztužování. Mikrovyztužování zemních těles se provádí promícháním zeminy s malými, nahodile orientovanými výztužnými elementy. Pro tento účel slouží například tenká kontinuální vlákna, krátké výztuhy z individuálních vláken nebo malé výstřižky z geotextilií či geomříží. Vzhledem k tomu, že jednotlivé mikrovýztužné elementy ovlivňují poměrně malý objem zeminy ve svém okolí, je jich zapotřebí velké množství, které však obvykle nepřesahuje 1 % hmotnostního podílu. Princip mikrovyztužování je založen na mechanické interakci a pasivním odporu. [17] V ideálním stavu tak vznikne trojdimenzionálně zpevněná izotropní směs se zlepšenými mechanickými vlastnostmi.

Makrovyztužování zemin se provádí umístěním geosyntetických výrobků do zemní konstrukce, přičemž jsou tyto výrobky rozměrově velké ve srovnání se zrny zeminy. Mezi tyto výrobky nejčastěji řadíme geotextilie, geomříže, geosítě, georochože, geobuňky a další geosyntetika. V porovnání k celkovému objemu zemní konstrukce ovlivňují jednotlivé makrovýztužné prvky velmi významný podíl objemu zeminy, proto se jejich počet pohybuje od 1 či 2 v případě násypů na měkkém podloží až po 20 a více při řešení rozsáhlých vyztužených zemních svahů nebo opěrných stěn. [17] Ke zvýšení stability a únosnosti dochází tím, že smyková plocha prochází nově vloženou výztuhou anebo se smyková plocha přesune a probíhá mimo oblast vyztužení, což je kinematicky obtížnější a díky tomu se tak zvyšuje stupeň stability. Kromě zvýšení stability a únosnosti napomáháme umístěním výztuhy

ke snížení absolutních i nerovnoměrných deformací, na čemž má podíl jednak pevnost výztuhy a jednak zapojení větší části zemního tělesa do spolupůsobení na přenosu zatížení. [17]

## 5.1 Princip vyztužení zeminy

Smyková pevnost (úhel vnitřního tření  $\phi$ ) je kritériem pro posouzení mechanických vlastností zeminy, zvláště ve vztahu k vyztužování. Naopak s druhým z pevnostních parametrů zemin – soudržností není běžně počítáno. Zvláště proto, že se vyztužená konstrukce staví hutněním zeminy po vrstvách, čímž dojde ke zrušení všech strukturálních vazeb v zemině a také proto, že při mobilizaci tření mezi zeminou a výztuží dochází k pohybu, při kterém se uplatňují zejména třecí vlastnosti zeminy v efektivních napětích. [10] Princip fungování výztuže v zemině na příkladu krabicové smykové zkoušky s vloženým výztužným prvkem je vidět na obrázku č.11. Interakcí zeminy a výztuže při pohybu v krabicovém smykovém přístroji dochází k mobilizaci tahové síly ve výztuži ( $P_R$ ), která se projeví zvýšením normálového napětí na potenciální smykové ploše, což v důsledku vede i ke zvýšení smykového odporu. Zároveň se snižuje působící smyková síla o hodnotu vodorovnou složku takové síly ve směru výztuže ( $P_R \sin \theta$ ). [10]



**Obrázek 7** Schéma působení výztuže v zemině (podle Jewella & Wrothe 1987) [10]

Výsledný vztah smykové odolnosti je proto pro vyztuženou zeminu stanoven jako

$$P_S = P_V \tan \phi + P_R (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi)$$

přičemž na účinnost vyztužení má rozhodující vliv stupeň mobilizace výztužné síly  $P_R$ , kterou ovlivňuje tuhost výztuže a vzájemné spolupůsobení výztuže a zeminy. Z tohoto důvodu se

nejlepšího účinku dosáhne v případě, že normálová síla působí kolmo na rovinu vyztužení. Zaklínění zrn zeminy do otvorů výztuže je neméně důležité a pro optimální spolupůsobení se například v geomříži doporučuje velikost otvoru 2 až 3 x větší, než je průměr zrna  $d_{50}$ . [10] Velikost deformace na kontaktu zeminy s výztuží je ovlivněna tuhostí dané výztuže, která je obvykle stanovována pro 1% přetvoření a to i z důvodu, že při větším přetvoření než 1 %, může u zeminy dojít k překonání vrcholové pevnosti a následnému poklesu ke kritické (koncové) pevnosti. Z hlediska vytvoření rovnováhy sil je důležité, aby maximální tahové přetvoření výztuže bylo shodné se smykovým přetvořením zeminy. Velikost přetvoření pro mobilizaci vrcholové pevnosti závisí na zařídění a ulehlosti použité zeminy. [10] Protože například při použití tuhé výztuhy v kypré zemině může dojít k vysoké mobilizaci pevnosti ve výztuži, vedoucí až k jejímu porušení. A naopak při použití např. netkané geotextilie v ulehlé zemině se ve výztuži mobilizuje jen velmi malá tahová síla a zemní těleso se chová jako nevyztužené. Z tohoto důvodu jsou netkané geotextilie nevhodné pro plnění výztužné funkce. Dobře poslouží geosyntetika z polyesteru.

### **5.1.1 Princip tahové membrány a interlockingu**

Geotextilie a geokompozity jsou obecně vhodné pro vyztužování soudržných jemnozrnných materiálů – písků, hlín, jílu. Konkrétně se používají tkané, případně pletené geotextilie z polyesteru nebo polypropylenu. Fungují na principu tahové membrány, kde pro jejich mobilizaci musí dojít ke svislé deformaci konstrukčních vrstev, což je nutné zohlednit při návrhu, aby nedošlo k nekontrolovatelnému přetváření, porušení vzhledu nebo ztrátě bezpečnosti. Důležité je také při návrhu pamatovat na nízkou hodnotu smykového odporu na rozhraní geotextilie a zeminy, aby v zemině nevznikaly dodatečné kluzné plochy. Při účinné aplikaci výztužné geotextilie hraje podstatnou roli její schopnost pevnostní separace v souvrství. Vytváří se výrazný stabilizační efekt a je umožněno případné rozptýlení pórových tlaků. Výztužné geotextilie mají využití při budování strmých svahů a vytváření konstrukce typu obalovaného čela. Při zpětném zabalování geotextilií je nutné vytvořit pevnostní zámek zakotvením pod následující vrstvou, čímž je možné částečně eliminovat dotvarování. [18]

Na principu interlockingu jsou založeny geomříže. Jedná se o schopnost geosyntetika zaklínit ve své mřížové struktuře zrna zásypového materiálu. Po zhutnění se tento efekt umocní a vytvoří se vrstva s násobně vyšší tuhostí, než vykazuje samotný materiál zásypu. Díky tomu, se v případě vodorovných konstrukcí zvyšuje nosná schopnost a v případě svislých konstrukcí dochází ke zvýšené absorpci smykových sil. [18] Využití nachází obvykle pro zrnité, nesoudržné materiály na šterkové bázi. V praxi mohou geomříže stabilizovat

nestmelené vrstvy, na neúnosném podloží se díky jejich použití redukuje tloušťka nestmelených vrstev a v případě nehomogenního podloží snižují geomříže hodnoty nerovnoměrného sedání. Záležitost zaklínění zrn ve struktuře geosyntetika však není vždy jednoznačná, a ne všechny geomříže jsou v tvorbě zaklínění stejně účinné. Obecnou zásadou při použití geosyntetik není jen hodnocení maximální pevnosti jakožto dominantní vlastnosti, ale zohlednění dalších několika hledisek, kterými jsou celkové nízké protažení při namáhání, vysoká hodnota iniciační pevnosti (při protažení 2 %), sečnová tuhost prvku, geometrické vlastnosti mříže (tvarování prvků, velikosti ok atd.) a výběr výztuhy s ohledem na druh použité zeminy. [18] A právě tvarované geomříže (extrudované) – tedy s určitou specifickou geometrickou vlastností výrazně napomáhají zaklíňování zrn v poměrně mocné vrstvě. Oproti tomu geomříže „ploché“ vyrobené tkaním, pletením nebo svařováním vytváří jen tenkou ztužující vrstvu. [18]

## 5.2 Návrh, projekce a provádění

Vyztužené zemní konstrukce spadají podle ČSN EN 1997-1 do 2. geotechnické kategorie jen v případě jednoduchých základových poměrů jinak jde o konstrukce spadající do 3. geotechnické kategorie. To znamená, že je nutný samostatný geotechnický průzkum s použitím standartních postupů pro terénní a laboratorní zkoušky, kterými se získají údaje nutné pro posouzení jak prvního, tak i druhého mezního stavu. [10] Norma ČSN EN 1997-1 neboli Eurokód 7-1 udává zásady navrhování geotechnických konstrukcí a velmi stručně popisuje požadavky na vyztužování zemin. Z hlediska zemních konstrukcí staveb pozemních komunikací jsou některé zásady obsaženy v ČSN 73 6133 a ty dále upravuje příloha č. 3 technických podmínek TP 97. Podmínky pro provádění a způsob kontroly při stavbě popisuje norma ČSN EN 14475 a dále pak v technické kvalitativní podmínky TKP 30. [10]

Zahájení stavby předchází předložení výsledků průkazných zkoušek objednateli ze strany zhotovitele. Jedná se o zkoušky zeminy navržené k vyztužení, zásypového materiálu za vyztuženým zemním blokem (pokud se liší od vyztužované zeminy), zeminy v podloží, zrnitého materiálu pro drenážní účely, dále zkoušky výztužných prvků, lícového opevnění a jejich spojení. Vyhovující interakce mezi zeminou a výztužným prvkem dokládají výsledky provedených smykových zkoušek. Dále zhotovitel provedenou zkouškou prokáže stupeň porušení výztuhy při realizaci stavby a uvede porovnání takto zjištěného součinitele s hodnotou užívanou ve výpočtu. [10]

Před samotnou výstavbou vyztužené zemní konstrukce musí dojít k úpravě základové spáry v podobě vyčištění od vegetace, úlomků hornin a dalších prvků, které by mohly

poškodit výztuž. Další úpravy spočívají v odstranění případných čoček měkké zeminy a náhradou vhodným materiálem, dosažení roviny případně i stupňů a následném přehutnění pro splnění daných podmínek. Pokud se v základové spáře vyskytují zeminy jiné, než jsou uvedeny v dokumentaci, je nezbytné přehodnotit návrh zemní konstrukce. Při výstavbě vyztuženého zemního tělesa se navážení, rozhrnování a zhutňování zeminy provádí rovnoběžně s lícem této konstrukce, důsledně se dbá na ochranu výztuže před poškozením nebo posunutím – způsobem zásypu, přejíždění strojem a pokud dojde k porušení, musí být poškozená část vyměněna. Obdobné požadavky platí i pro lícové opevnění. Nejbližší líci konstrukce (1 m a méně) mohou pracovat na zhutňování pouze dusací žába, vibrační deska o maximální hmotnosti 1000 kg anebo vibrační válec o hmotnosti max. 1500 kg. [10]

Mezi vyztužené zemní konstrukce, které popisuje norma ČSN EN 14475, patří opěrné zemní konstrukce (svislé, ukloněné nebo šikmé stěny, mostní opěry, sila) s lícovým opevněním, které zadržuje sypaninu mezi jednotlivými vyztuženými vrstvami, dále vyztužené strmé svahy se zabudovaným lícovým opevněním při stavbě nebo dodatečně s obalením vrstev, vyztužené mírné svahy bez lícového opevnění, ale pokryté některou formou protierozní ochrany bez lícového opevnění, rekonstrukce sesutých svahů a také násypy s vyztuženou bází nebo podložím a násypy s vyztuženou korunou proti mrazovým zdvihům. [19]

### **5.2.1 Opěrné zemní konstrukce a strmé násypové svahy**

Vyztužené zemní svahy se skládají ze zemního materiálu, geosyntetické výztuhy a úpravy čela. Pro opěrné zemní konstrukce a jim podobné konstrukce popisuje norma ČSN EN 14475 několik obecných zásad. Pokud je sklon svahu do 45°, staví se bez lícového opevnění pouze s protierozní ochranou, kterou zpravidla tvoří polymerové geosítě, georohože nebo geotextilie z materiálů podléhají postupné degradaci jako je sláma, len, juta a další. Strmější sklony svahů než 45° musí být opevněny buď tuhým, měkkým nebo poddajným lícovým opevněním. U tuhého lícového opevnění je potřeba vytvořit vyrovnávací podklad z prostého betonu, který umožní vyrovnání a postavení lícových dílů. U zbylých typů lícového opevnění stačí vyrovnávací podklad ze šterku nebo šterkopísku a v případě měkkého lícového opevnění není vyrovnávací vrstva nezbytně nutná. [10] Výstavba vyztužené konstrukce probíhá obvyklým způsobem, kdy se střídá pokládka výztuhy s navážení a hutněním zeminy. Jednotlivé pásy výztuhy se kladou kolmo na podélnou osu zemní konstrukce s uchycením do lícových prvků.

Konkrétním příkladem vyztužené opěrné zdi je rozšíření atletického stadionu v Jablonci nad Nisou s výškou svahů od 3 až do 13,5 m. Zde bylo použito hned několik druhů tkaných geomříží v různém rozvrstvení. Lícové opevnění bylo provedeno ve spodní části z betonových prefabrikovaných tvárnic. Při stavbě bylo osazeno několik extenzometrů pro kontrolní sledování a dosud naměřené hodnoty splňují předpoklady. [20]

V oblasti dopravního stavitelství zmíním realizaci vysokého vyztuženého násypu na slovenské dálnici D1 na 2. části úseku Jánovce – Jablonov, kde byla realizována násypová tělesa až do výšky 22 m. [21] Další vybranou stavbou je stavba vyztuženého svahu pod dálnicí D3 v úseku Svrčinovec-Skalité, kde se sklony strmých naspů pohybovaly od 65° do 70° s výškou mezi 5 až 20 metry a lícem z ocelových sítí v kombinaci s geosyntetikem. [22]

### **5.2.2 Vyztužené báze a podloží naspů**

S ohledem na ochranu životního prostředí se běžně nová trasa vede přes oblasti se špatnými základovými poměry, jako jsou krasové oblasti, okolí vodních toků nebo rašelinišť. Zde se jeví jako nejvýhodnější řešení vyztužení podloží případně báze naspů, pro což norma ČSN EN 14475 udává obecné zásady. V místech, kde je velmi měkké podloží, jako rašelina nebo náplavy, se odstraní jen vzrostlá vegetace (stromy a keře), která se musí seříznout k úrovni terénu. Zbylý kořenový systém pokácených stromů a keřů a vegetační pokryv se mohou na místě ponechat. [19] Časem se tyto organické materiály rozloží a je nutné posoudit jejich vliv na sedání podloží zemního tělesa. Dále se musí odstranit ostrohranný materiál, který by mohl propíchnout či jinak poškodit výztuž. Pokud se na staveništi vyskytuje vyschlá povrchová krusta, musí zůstat během přípravných prací neporušená, pokud to ovšem nemění projektová dokumentace. Nerovnoměrné podloží a deprese je nutné zarovnat hutněnou sypaninou před zahájením pokládky. [19] Tato vrstva ani jakákoliv geosyntetická separační vrstva nesmí negativně ovlivnit rozptyl pórových tlaků v podloží. [19] První vrstvy navezené na rozloženou geosyntetickou výztuž musí být hrubozrnné s vysokou propustností. Očekává-li se velké sedání, lze pro zvýšení účinnosti vyztužení přetáhnout geosyntetikum přes okraj vrstvy a ukotvit ho v následující vrstvě. [10]

Příkladem zmíněných konstrukcí může být vyztužení dálničního tělesa v oblasti polských Katowic na dálnici A4, kde byla použita tkaná PET geotextilie různých pevností technologií výztužného polštáře se zpětným kotvicím zavínutím. Vyztužené zemní těleso bylo budováno jako stupňovité se sklonem 45° - 65° v celkové délce 4 km. [20] Situace s výstavbou násypu na mocné vrstvě rašeliny byla řešena na silnici I/4 z obce Strážné na hranice s Německem. Konstrukčním řešením byl zemní polštář na bázi naspů o maximální

výšce 5 m s použitím PET geotextilie ve dvou vrstvách nad sebou. Zeminu tvořil písčítý štěrk. Předpokládané sedání vypočítáno na 1,0 m, stavba byla osazena hydrostatickým měřením sedání. [23] Dalším příkladem je založení nově budovaného násypu silnice II/405 v úseku Příseka-Brtnice. Problém byl se zvodnělým měkkým podložím, a proto byla ke konstrukci použita geobuňková struktura v kombinaci s trojosou geomříží. [24]

## 6 LABORATORNÍ ZKOUŠKY ZEMIN A GEOTEXTILIÍ

Jak bylo již několikrát zmíněno, pro optimální návrh vyztužené zemní konstrukce je důležité znát hned několik vstupních parametrů, mezi které rozhodně patří vlastnosti použitých materiálů – výztužného geosyntetika a zeminy. Jelikož je výsledné zemní těleso kompozitem složeným z těchto dvou materiálů, je také klíčová znalost chování na rozhraní výztužného geosyntetika s danou zeminou. I z tohoto důvodu jsem se rozhodl věnovat se interakci geotextilie a zeminy.

Těžiště praktické části bakalářské práce spočívá v parametrické studii chování zeminy a vybrané geotextilie za použití krabicové smykové zkoušky. Prováděny byly jak běžné krabicové smykové zkoušky, tak i krabicové smykové zkoušky s výztužnou geotextilií. Dohromady jsem provedl 48 těchto zkoušek, což je z hlediska náročnosti relativně velké časové penzum i s ohledem na ruční hutnění každého vzorku ve smykové krabici. Krabicovým smykovým zkouškám předcházely zkoušky zemin, které byly použity v experimentech, jednak pro potřeby zatřídění a také pro zjištění vstupních parametrů pro správné nastavení a přípravu krabicových zkoušek.

Rozsah parametrické studie byl volen na základě konzultace s Dr. Balabanem a Dr. Šmejdou. Proto se dále v laboratorních zkouškách pracuje se špatně zrněným pískem (SP) a hlínou se střední plasticitou (MI) (rozdělení provedené dle ČSN 73 6133) v poměrech 100 % SP + 0 % MI, 80 % SP + 20 % MI, 20 % SP + 80 % MI a 0 % SP + 100 % MI. Poměr jednotlivých frakcí ve zkoušené zemině byl zvolen tak, aby autor bakalářské práce mohl z hlediska smykových zkoušek postihnout druhovou variabilitu jednotlivých tříd zemin, které se v praxi nejčastěji vyskytují. Výběr konkrétního typu geotextilie byl konzultován s odbornou firmou v oblasti geosyntetik a výsledkem bylo využití tkané PET geotextilie Bontec HS 110/50. Tato geotextilie je speciálně navržena a vyrobena pro vyztužování zemin (viz. Příloha A). Pro účely experimentů byl k dispozici krabicový smykový přístroj se smykovou krabicí o rozměrech 100x100 mm, což je pro zkoušky s geotextilií dostačující.

Pro zjištění vstupních parametrů hlavní zkoušky z pohledu této práce (krabicové smykové zkoušky) byly provedeny základní zkoušky zemin. Jednalo se o zjištění typu zeminy a zatřídění, k čemuž posloužila sítozrná zkouška, hustoměrná zkouška, dále stanovení zdánlivé hustoty pevných částic a kuželová zkouška. Veškeré výsledky jsou uvedeny ve vyhodnocení zkoušek a v příloze C. Fotodokumentace je obsažena v příloze D.



## 6.1 Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic

Jak už vyplývá z názvu zkoušky, cílem je zjištění zdánlivé hustoty pevných částic, neboli také měrné hmotnosti zrn zeminy. Ta je označována  $\rho_s$  a definována jako poměr hmotnosti zrn (částic)  $m_d$  k jejich objemu  $V_s$  podle následujícího vzorce. [25]

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_s}$$

Metoda stanovení  $\rho_s$  je pomocí pyknometru. Ta je založena na zjištění objemu zeminy o známé hmotnosti díky stanovení množství vytlačené zkušební kapaliny. Pyknometrická metoda je vhodná pro zeminy s velikostí částic menší jak 4 mm.

Při provádění zkoušky pro stanovení zdánlivé hustoty pevných částic byly dodrženy požadavky podle ČSN EN 17892-3, která udává postup zkoušky skládající se ze tří fází, první fáze – kalibrace, druhá fáze – požadavky na zkušební vzorek a třetí – provedení zkoušky.

Pro výsledky zkoušek se nejprve určí hmotnost suchého zkušební vzorku, jako rozdíl hmotnosti pyknometru s obsahem zkušební vzorku ( $m_2$ ) minus hmotnost samotného pyknometru viz vzorec.

$$m_4 = m_2 - m_0$$

Poté se již stanoví samotná hustota pevných částic ( $\rho_s$ ) podle následujícího vzorce, v němž jsou obsaženy dosud získané hodnoty.

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

- A kde dále:
- $m_0$  – hmotnost suchého pyknometru
  - $m_1$  – hmotnost pyknometru zcela naplněného vodou
  - $m_2$  – hmotnost suchého pyknometru s vysušeným zkušebním vzorkem
  - $m_3$  – hmotnost pyknometru, zcela naplněného saturovaným zkušebním vzorkem a pomocnou kapalinou
  - $m_4$  – hmotnost vysušeného zkušební vzorku
  - $\rho_w$  – hustota pomocné kapaliny.

Zdánlivá hustota pevných částic byla stanovována na vzorcích dvou zemin – pisek špatně zrněný (SP) a hlína se střední plasticitou (MI). Pro každou zeminu byla provedena pyknometrická zkouška dvakrát a výsledná hodnota zdánlivé hustoty pevných částic je dána jejich průměrem. Stanovené hodnoty dílčích hmotností, které jsou nezbytné pro finální výpočet, jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tabulka 4** Výsledky pyknometrických zkoušek

Číslo vzorku	Číslo nádoby	$m_0$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	teplota vody	$\rho_w$	$\rho_s$
		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[C°]	[Mg/m <sup>3</sup> ]	[Mg/m <sup>3</sup> ]
F5_Pyknometr_01	1	32,65	134,75	61,65	152,74	29,00	21	0,99802	2,629
F5_Pyknometr_02	148	26,53	133,76	50,99	148,98	24,46	21	0,99802	2,642
S2_Pyknometr_01	150	50,54	147,45	82,27	167,19	31,73	21	0,99802	2,641
S2_Pyknometr_02	12	33,45	136,46	59,58	152,74	26,13	21	0,99802	2,648

Výsledná hodnota zdánlivé hustoty pevných částic je v uvedena v tabulce 5. Hodnoty měrné hmotnosti se pohybují v úzkém rozmezí 2,650 – 2,750 [Mg/m<sup>3</sup>] s mírnými odchylkami na obě strany. Zároveň je ovlivněna převládajícími minerály v zemině. V mém případě se jedná o písek špatně zrněný – vzorek S2\_Pyknometr a hlínu se střední plasticitou – vzorek F5\_Pyknometr, jejichž očekávané hodnoty zdánlivé hustoty pevných částic jsou 2,650 [Mg/m<sup>3</sup>], což jsou hodnoty potvrzující relevantnost uvedených výsledků.

**Tabulka 5** Výsledná hodnota zdánlivé hustoty pevných částic

Vzorek	Zdánlivá hustota pevných částic $\rho_s$
	[Mg/m <sup>3</sup> ]
F5_Pyknometr	2,635
S2_Pyknometr	2,644

## 6.2 Stanovení zrnitosti a zatřídění zemin

Stanovení zrnitosti je pro účely této bakalářské práce důležité z hlediska možnosti zatřídění zeminy do patřičné třídy a vyvození orientačních hodnot základních vlastností pro potřeby dalších zkoušek.

Zkouška pro stanovení zrnitosti spočívá v roztržení a oddělení zeminy pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Použije se buď praní a následné prosévání za sucha anebo pouze prosévání za sucha. Ve vztahu k počáteční hmotnosti prosévané zeminy se uvádí hmotnost částic zachycených na jednotlivých sítích. Souhrnný propad jednotlivými sítí se uvádí v procentech jak číselně, tak i případně graficky pomocí křivky zrnitosti zemin.

Pro stanovení zrnitosti vzorku zeminy „A“ (později zatříděného jako písčité hlína) jsem provedl nejprve praní a následně jednak hustoměrnou zkoušku, která určila průběh zrnitosti křivky v oblasti jemnozrné frakce tohoto materiálu a jednak prosévání zbylého vypraného a vysušeného materiálu sadou sít. Vzorek zeminy „B“ byl prosit na sadě sít standardním způsobem. Pro lepší popsání křivky zrnitosti obou zemin jsem vypočítal číslo

nestejnozrnnosti (Cu) a součinitel křivosti (Cc). Zkoušky pro zjištění indexu plasticity jsem provedl pouze orientačně pro doplnění vlastní znalosti chování vzorku zeminy „A“.

Zeminu „A“ jsem klasifikoval podle ČSN 73 6133 jako hlínu se střední plasticitou na základě křivky zrnitosti a plasticitě a zeminu „B“ jako písek špatně zrněný.

**Tabulka 6** Hodnoty pro zařazení zkoumaných zemin

Vzorek		"A"	"B"
Velikost zrna odpovídající obsahu zrn v % hmotnosti	d10 [mm]	0,0023	0,275
	d30 [mm]	0,0027	0,400
	d60 [mm]	0,0220	0,800
Účinný průměr	def [mm]	0,0023	0,275
Číslo nestejnozrnnosti	Cu [-]	9,57	2,91
Číslo křivosti	Cc [-]	0,1441	0,73
Obsah	šterku [%]	12,12 %	14,36 %
	písku [%]	22,09 %	85,41 %
	jemnozrnné frakce [%]	65,80 %	0,23 %
Zatřídění zeminy dle	ČSN 73 6133	F5 - hlína se střední plasticitou (MI)	S2 - písek špatně zrněný (SP)
	ČSN EN ISO 14688-1(2)	saSi - písčitá hlína (prach)	Sa - sand (písek)

### 6.3 Proctorova zkouška

Výsledky Proctorovy zkoušky jsou v praktické části bakalářské práce nezbytným vstupním parametrem pro finální krabicovou smykovou zkoušku, neboť vzorky pro krabicové smykové zkoušky jsou připravovány o vlhkosti odpovídající maximální objemové hmotnosti dané suché směsi.

Proctorova zkouška je zkušební metodou pro stanovení vzájemného vztahu mezi vlhkostí a srovnávací objemovou hmotností zeminy a simuluje zhutnění vrstev zeminy na staveništi. Pro účely Proctorovy zkoušky jsou zapotřebí pomůcky jako moždíř, hutnicí zařízení, ocelová deska, zkušební síta, váhy a další zařízení. Pro správnou volbu velikosti Proctorova moždíře a variantě stejnojmenné zkoušky je zapotřebí znát maximální velikost zrna zeminy, přičemž se řeší propad průměrem 16, 31,5 a 63 mm. Sítový rozbor mnou používaných zemin je uveden v předchozí kapitole a z pohledu Proctorovy zkoušky propadne 100 % z obou zemin sítím o průměru 16 mm. Z toho vyplývá, že jsem použil Proctorův moždíř typu A o průměru 100 mm a výšce 120 mm. Mnou provedené zkoušky jsou z pohledu normy ČSN EN 13286-2 standardními Proctorovými zkouškami, při kterých je vzorek hutněn pěchem o hmotnosti 2,5 kg ve třech vrstvách po 25 úderech.

Při přípravě jsem souhrnný vzorek rozdělil na 5 nebo více dílčích vzorků, které jsem zvážil a pro první zkoušku přimíchal vodu v poměru 4 až 6 % k hmotnosti tohoto vzorku, což je všeobecně vhodná vlhkost pro písčité a štěrkovité zeminy. Celou směs jsem ručně promísil do té míry, až byla voda rovnoměrně rozptýlena. Abych mohl vypočítat objemovou hmotnost zhutněné zeminy, zvážil jsem si moždír s připravenou základní deskou. Následně jsem na moždír připevnil nástavec, vymazal separačním prostředkem a umístil do hutnicího zařízení. Připravenou směs zeminy o požadované vlhkosti jsem po 1/3 vložil do moždíře a zhutnil každou z vrstev 25 údery z výšky 305 mm hmotností 2,5 kg pomocí hutnicího stroje. Po zhutnění se sejmul nástavec moždíře a pomocí kovového pravítka byla odstraněna přebytečná směs, aby vznikla rovina jeho s hranou. Materiál se základní deskou a moždířem jsem zvážil a následně odebral vzorek pro stanovení vlhkosti. Tento postup byl aplikován při všech dalších zkouškách pouze se vzrůstající vlhkostí směsi.

Při vyhodnocení výsledků Proctorovy zkoušky jsem z odečtených hodnot vážení dílčích různě vlhkých vzorků vypočítal objemovou hmotnost vlhké směsi. A následně po zvážení vysušených směsí a výpočtu vlhkostí jsem získal výslednou objemovou hmotnost zhutněné suché směsi  $\rho_d$  dle vztahu:

$$\rho_d = (100 * \rho) / (100 + w)$$

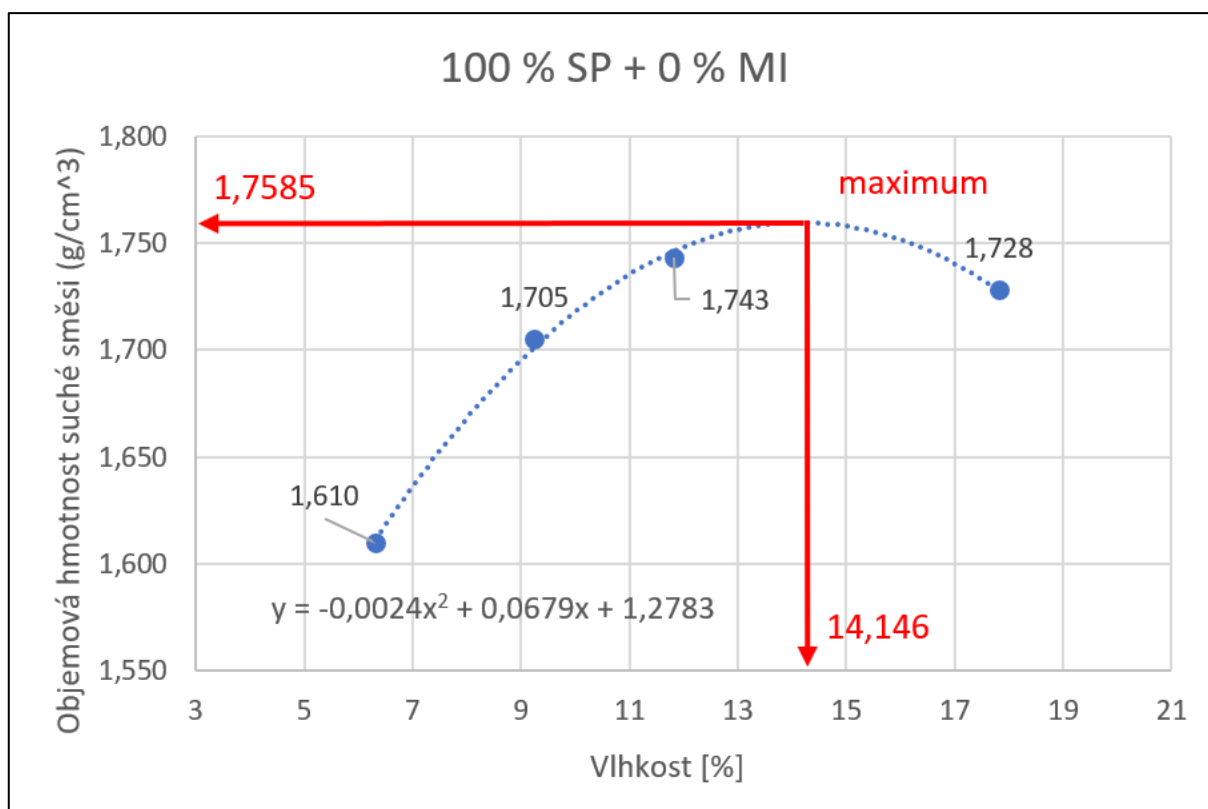
kde:

$\rho_d$  je objemová hmotnost zhutněné suché směsi v  $\text{kg/m}^3$

$\rho$  je objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi v  $\text{kg/m}^3$

$w$  je vlhkost směsi v procentech.

Z takto získaných hodnot jsem vytvořil graf, na kterém se na ose y vynáší vypočítaná objemová hmotnost zhutněné suché směsi a na ose x příslušná vlhkost dané směsi. Vynesenými body ze série stanovení jsem proložil spojitou křivku a z její rovnice vypočítal maximální objemovou hmotnost suché zhutněné směsi a následně i příslušnou vlhkost zeminy. Příklad grafického vyjádření výsledků je na následujícím obrázku.



**Obrázek 8** Příklad grafického vyjádření výsledků Proctorovy zkoušky špatně zrněného písku

Vypočítané hodnoty maximální objemové hmotnosti s příslušnou vlhkostí zeminy jsem shrnul do tabulky 7, ze které je mimo jiné patrné, že maximální objemová hmotnost roste od 100% hlíny se střední plasticitou až po 80 % špatně zrněný písek s 20% podílem hlíny se střední plasticitou. Tomu odpovídající vlhkost zeminy však naopak klesá.

**Tabulka 7** Výsledky Proctorovy zkoušky

Typ vzorku		Maximální objemová hmotnost suchého vzorku	Odpovídající vlhkost
Podíl špatně zrněného písku [%]	Podíl hlíny se střední plasticitou [%]	$\rho_d$ [g/cm³]	$w_{opt}$ [%]
100	0	1,7586	14,146
80	20	1,9803	9,009
20	80	1,8215	13,863
0	100	1,7832	14,541

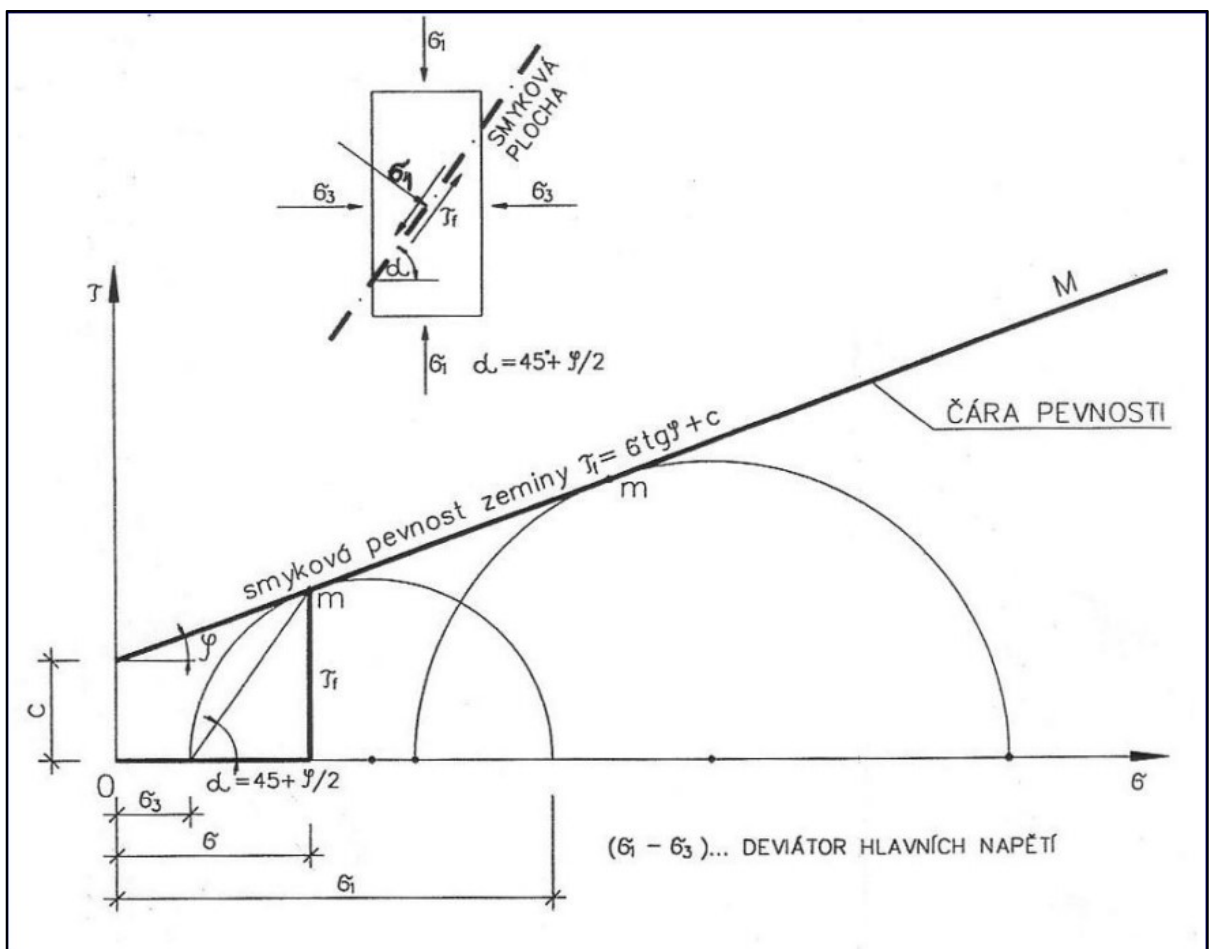
## 6.4 Krabicové smykové zkoušky

Jedná se o laboratorní zkoušky zemin sloužící ke stanovení parametrů efektivní smykové pevnosti. Konkrétně jde o úhel vnitřního tření a soudržnost, které získáme z rovnice

(Mohr-Coloumbovy) přímky, která tvoří tečnu k Mohrovým kružnicím porušení daných vzorků. Obecně se zde vychází ze stále platného vztahu, který uvedl Coulomb v roce 1773. [25]

$$\tau_f = \sigma * \operatorname{tg} \varphi + c$$

Kde  $\tau_f$  – tangenciální napětí na smykové ploše,  $\sigma$  – normálové napětí působící kolmo na smykovou plochu,  $c$  – soudržnost zeminy,  $\varphi$  – úhel vnitřního tření zeminy. Z výrazu je jasně patrné, že pevnost zeminy ve smyku závisí na vlastnostech zeminy – úhlu vnitřního tření a soudržnosti a zároveň na velikosti normálového napětí, které působí kolmo na smykovou plochu.



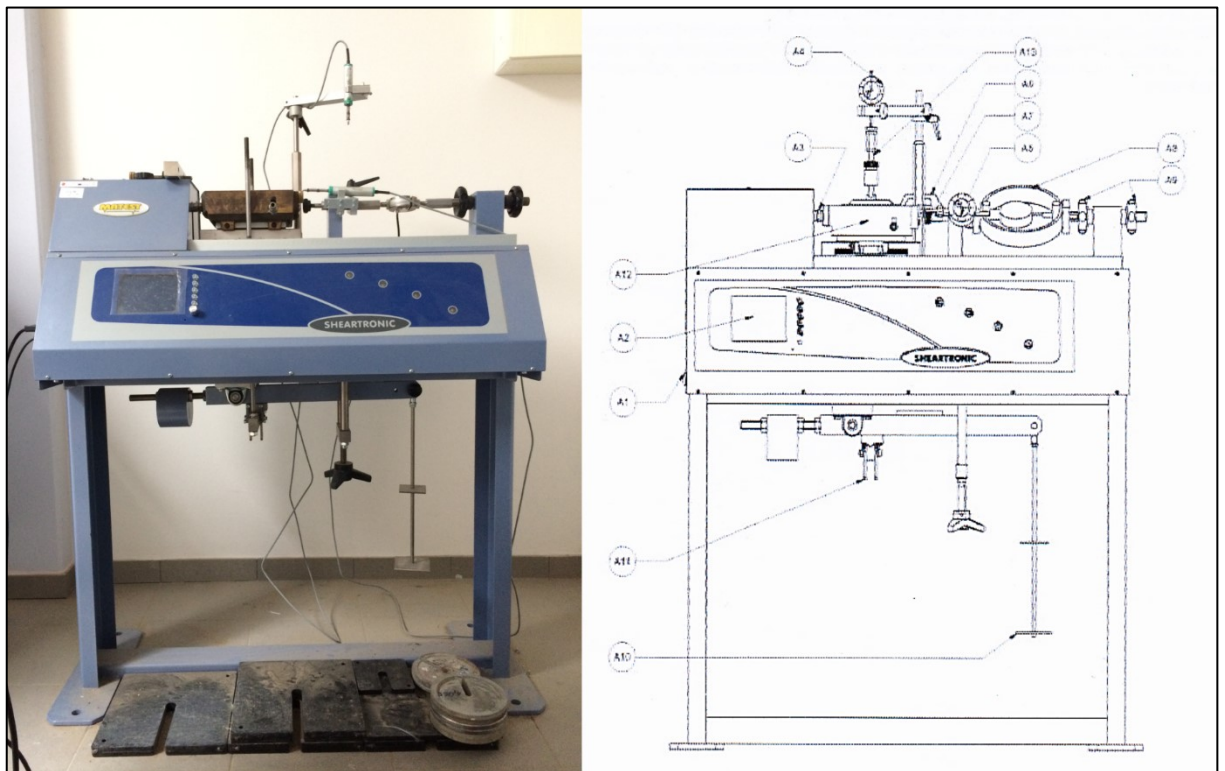
**Obrázek 9** Mohr-Coloumbova křivka porušení [26]

#### 6.4.1 Požadavky na potřebné přístroje

Základním potřebným přístrojem je smyková krabice kruhového nebo čtvercového průřezu různých velikostí, která je rozdělená na dvě poloviny a je dostatečně tuhá na to, aby bránila vodorovné deformaci zkušební vzorku. Smyková krabice musí umožňovat jednak pevné spojení obou částí a jednak možnost oddálení obou částí svislým posunutím.

Součástí smykové krabice je i zatěžovací hlava, která musí být v půdorysu o 0,5 mm menší než vnitřní průměr smykové krabice a musí být dostatečně tuhá, aby přenesla normálové napětí na vzorek. V ideálním případě má být směrově vedená, aby nedocházelo při zkouškách k jejímu náklonu.

Hlavním přístrojem je krabicový smykový přístroj (obr.11), ve kterém na zkušební vzorek působí smykové síly pouze v jednom směru a který mu dovolí vodorovný posun nejméně 20 % z délky zkušebního vzorku. Ten musí být měřen s přesností 0,02 mm. Svislý posun musí být měřen s přesností o řád vyšší, tj. o 0,002 mm. Dílčí součásti přístroje jsou dostatečně tuhé na to, aby se zabránilo nežádoucím deformacím a tím i zkreslení výsledků. Krabicový smykový přístroj musí umožňovat aplikaci normálového napětí, které musí být v průběhu smykání konstantní a musí být měřeno s přesností 3 % nebo 2,5 kN.



Obrázek 10 Krabicový smykový přístroj Matest S277-01 použitý při zkouškách

## 6.5 Krabicové smykové zkoušky bez geotextilie

### 6.5.1 Požadavky na zkušební vzorek a postup zkoušky

Abychom dosáhli relevantních výsledků, musí být vzorek vyřezán z neporušených dostatečně velkých vzorků nebo připraven tak, aby co nejvíce odpovídal podmínkám in-situ. Takto musí být připraveny a pod různými normálovými tlaky odzkoušeny tři vzorky.

Rozměry zkušební vzorku jsou dány minimálními rozměry smykové krabice. U čtvercového zkušební vzorku je minimální šířka smykové krabice 60 mm a u kruhového zkušební vzorku je minimální průměr D 70 mm. Přičemž minimální výška zkušební vzorku je alespoň 10 mm s největším rozměrem zrna maximálně 1/5 výšky zkušební vzorku. Zároveň poměr výšky ku šířce krabice nesmí překročit 1/3.

Při přípravě vzorku do smykové krabice musí být obě části smykové krabice pevně spojeny, aby nedošlo k jejich posunutí a také se doporučuje potřít stěny krabice tukem nebo vazelínou. Samotný zkušební vzorek by se měl svými vlastnostmi co nejvíce podobat podmínkám in-situ, tj. strukturou, objemovou hmotností, vlhkostí atd. Vzorek by měl být také připraven tak, aby nedošlo k jeho porušení a změně vlhkosti a musí být zvážen s přesností na 0,01g.

V první fázi se stanoví primární konsolidace ze zatížení vzorku svislým (normálovým) napětím v závislosti na odečítaném času. Z této závislosti se určí maximální rychlost smykání, která platí pro jemnozrné (soudržné) zeminy a nesmí být překročena. Pro hrubozrné (sypké) zeminy musí být rychlost smykání menší než 0,5 mm/min. Rychlost smykání musí být konstantní.

Dále je nutné oddálit obě části smykové krabice tak, aby mezi nimi vznikla mezera, která zabrání tření při smykání a zároveň bude dostatečně malá na to, aby skrz ni nedocházelo k protlačování materiálu. Tato mezera se pohybuje mezi 0,5 – 1 mm v závislosti na materiálu. V průběhu smykání musí být sledováno několik parametrů. Jedná se o změnu výšky zkušební vzorku, horizontální posun a smykovou sílu. Do dosažení vrcholu smykového napětí musí proběhnout alespoň 20 čtení tak, aby byl počet čtení dostatečný pro následné vyhodnocení. Zkouška končí ve chvíli, když je zjevně překročeno vrcholové zatížení nebo pokud vodorovný posun dosáhl 20 % průměru nebo šířky zkušební vzorku.

### **6.5.2 Množství prováděných zkoušek a okrajové podmínky**

Experimentální program byl nastaven tak, že proběhnou pro každou ze čtyř směsí čtyři krabicové smykové zkoušky, s postupně se zvyšujícím normálovým napětím na daný vzorek. Směsi byly složeny takto:

- 100 % písek špatně zrněný (SP) + 0 % hlína se střední plasticitou (MI)
- 80 % písek špatně zrněný (SP) + 20 % hlína se střední plasticitou (MI)
- 20 % písek špatně zrněný (SP) + 80 % hlína se střední plasticitou (MI)
- 0 % písek špatně zrněný (SP) + 100 % hlína se střední plasticitou (MI).



Rychlost smykání pro vzorky s převažujícím obsahem špatně zrněného písku byla 0,25 mm/min, a naopak pokud byla dominantní složkou špatně zrněná hlína, probíhaly smykové zkoušky rychlostí 0,0625 mm/min. Tato rychlost byla volena s ohledem na rychlost smykání jemnozrnných zemin a u sypkých materiálů nepřekročila rychlost 0,5 mm/min. Rychlost smykání byla po celou dobu zkoušek konstantní. Vlhkost všech vzorků byla odpovídající maximální objemové hmotnosti suchého vzorku pro danou směs, kterou najdeme v tabulce 7.

### 6.5.3 Popis průběhu zkoušek

Samotná zkouška probíhala tak, že jsem nejprve k sobě připevnil oba díly smykové krabice a stavěcími šrouby mezi nimi vytvořil 0,5 – 1 mm mezeru, aby měření nebylo zkresleno třením částí smykové krabice o sebe. Dále jsem si připravil směs vysušené zeminy v množství vypočítaném z maximální objemové hmotnosti suchého vzorku a objemu smykové krabice. Následným výpočtem jsem určil množství vody, které je potřeba do suché směsi přimíchat a celou směs jsem ručně promísil tak, aby byla voda rovnoměrně obsažena. Připravenou směs jsem ve třech vrstvách vsypával do smykové krabice a hutnil každou z nich 25 údery tak, abych množství předem připravené směsi do smykové krabice zhutnil. Následně jsem smykovou krabici upnul do krabicové smykového přístroje, zaaretoval měřící zařízení, nastavil rychlost smykání a odečtu hodnot a zkoušku spustil. Zkouška trvala v závislosti na rychlosti smykání 20-80 minut. Po ukončení zkoušky jsem uvolnil měřící zařízení, vyjmul smykovou krabici z přístroje a odebral dva váženky pro kontrolu vlhkosti připravené směsi.

## 6.6 Krabicové smykové zkoušky s geotextilií

Pro krabicové smykové zkoušky s geotextilií byla nutná úprava smykové krabice tak, aby bylo možné upevnit geotextilii. Geotextilie musí být upevněna naprosto důkladně, aby nedocházelo během zkoušky k jejímu pohybu a tím i zkreslení výsledků. Způsob upevnění je znázorněn na obrázku 12.

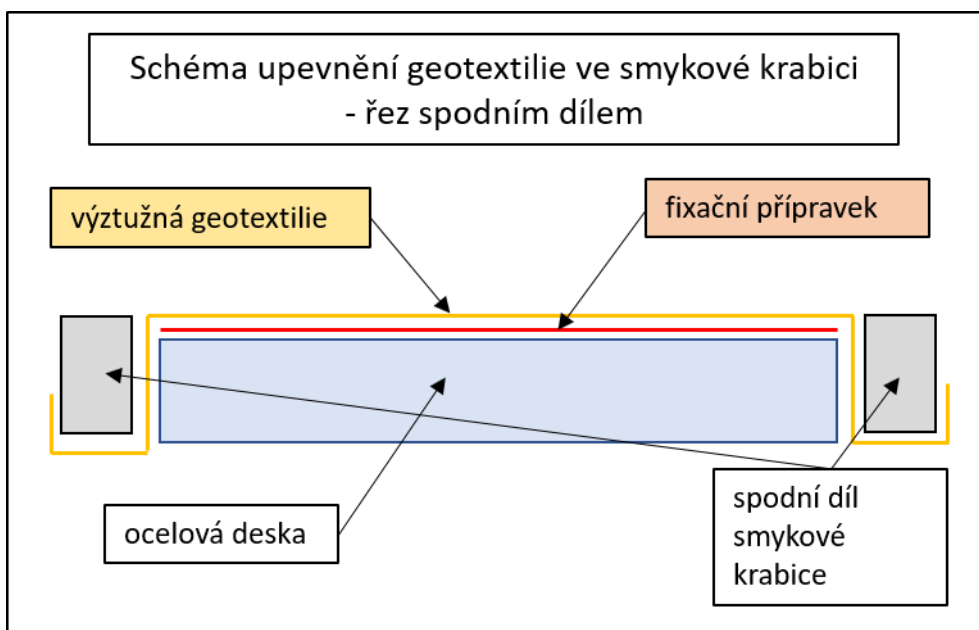
Výběr výztužné geotextilie byl konzultován s odbornou firmou v oblasti vyztužování zemin a byl zvolen typ Bontex HS 110/50 (viz. příloha A). Tato tkaná PET geotextilie je navržena a vyrobena pro vyztužování zemin, má nízkou průtažnost při vysokých zatíženích a vysokou propustnost pro vodu. Podélná pevnost v tahu podélně po roli je 110 kN/m s tažností 10,5 % a příčně k roli 50 kN/m s tažností 11 %. Plošná hmotnost této geotextilie, která může plnit i funkci separační a filtrační je 247 g/m<sup>2</sup>.

Zkoušky jsem prováděl na stejných směsích zemin jako v případě testů bez geotextilie:

- 100 % písek špatně zrněný (SP) + 0 % hlína se střední plasticitou (MI)
- 80 % písek špatně zrněný (SP) + 20 % hlína se střední plasticitou (MI)

- 20 % písek špatně zrněný (SP) + 80 % hlína se střední plasticitou (MI)
- 0 % písek špatně zrněný (SP) + 100 % hlína se střední plasticitou (MI).

Rychlost smykání pro vzorky s převažujícím obsahem špatně zrněného písku byla 0,25 mm/min, a naopak pokud byla dominantní složkou hlína se střední plasticitou, probíhaly smykové zkoušky rychlostí 0,0625 mm/min, která byla volena s ohledem na rychlost smykání jemnozrných zemin a u sypkých materiálů nepřekročila rychlost 0,5 mm/min. Rychlost smykání byla po celou dobu zkoušek konstantní. Vlhkost všech vzorků v první sérii smykání s geotextilií byla odpovídající maximální objemové hmotnosti suchého vzorku pro danou směs, kterou najdeme v tabulce 7, ve druhé sérii byly připravovány vzorky vlhčí o 4 %.



**Obrázek 11** Schéma upevnění geotextilie ve smykové krabici

### 6.6.1 Popis průběhu zkoušek

Proces přípravy vzorku před samotným smykáním byl relativně náročný, neboť jsem vše připravoval ručně a bylo nutné dodržovat veškeré zásady tak, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Nejprve jsem upevnil geotextilii ve spodním dílu smykové krabice podle obrázku 12, upnul vrchní díl a obě poloviny zaaretoval včetně vzájemné 1mm mezery. Další postup průběhu zkoušky byl shodný s průběhem pro zkoušky bez geotextilie (viz. 6.5.3)

Celkově bylo provedeno v každé ze sérií 16 krabicových smykových zkoušek a jejich výsledky jsou shrnuty v následující kapitole. Příloha D bakalářské práce obsahuje fotodokumentaci prováděných zkoušek.

## 7 VYHODNOCENÍ KRABICOVÝCH SMYKOVÝCH ZKOUŠEK

### 7.1 Popis vyhodnocení jedné dílčí krabicové smykové zkoušky

Při smykové zkoušce byla data přenášena z krabicového smykového přístroje pomocí USB konektoru do počítače, a následně shromažďována programem Putty. Před prováděním zkoušek bylo nutné nastavit správný interval odečtu měřených hodnot, aby s dostatečnou přesností pokryl průběh zkoušky, což záviselo jednak na rozdílné rychlosti smykání vzorků a jednak na znalosti posunu odpovídajícímu vrcholové smykové pevnosti.

Například při zkouškách o složení 0 % SP + 100 % MI s rychlostí smykání 0,0625 mm/min s horizontálním posunem 5 mm probíhala zkouška zhruba 20 minut. A tento čas bylo nutné rovnoměrně pokrýt 200 odečty, z čehož vychází jeden odečet měřených hodnot probíhající zkoušky po 24 sekundách. To však může vézt ke zkreslení, neboť nárůst smykové pevnosti se zpravidla v mnoha provedených zkouškách odehrával v do prvních tří milimetrů posunu, a tak by odečty s větším rozestupem nemusely zachytit vrcholovou hodnotu smykové pevnosti. Těmto problémům jsme předcházeli znalostí předpokládaného průběhu smykové pevnosti v závislosti na posunu a podle toho volili vhodný čas odečtu.

Po ukončení měření dané zkoušky, byla data, jejichž ukázka je uvedena v příloze B, otevřena v textovém souboru a překopírována do programu Excel, kde se základně upravila tak, aby šlo provést následné vyhodnocení. První sloupec měřených hodnot patří smykové síle měřené v kilonewtonech, kde jsem provedl přepočty na napětí. Z takto předpřipravených dat pro všechny čtyři přitěžovací cykly (1,2,4 a 6 kg) byly vytvořeny tři grafy. První graf zobrazuje chování smykové pevnosti v závislosti na horizontálním posunu, druhý závislost vertikálního posunu na horizontálním a třetí je graf smykové pevnosti s hodnotami vrcholových smykových napětí všech čtyř zkoušek v závislosti na normálových napětích. Posledním z uvedených grafů je proložena lineární regrese včetně rovnice přímky, čímž vzniká teoretické vyjádření závislosti mezi smykovým a normálovým napětím vyjádřené přímkou, a ze které jsou následně odečteny parametry smykové pevnosti.

Hodnoty parametrů smykové pevnosti ze zkoušek se stejným nastavením vstupních parametrů byly sloučeny do jednoho výsledného grafu, ve kterém jsou hledány závislosti a vyvozovány závěry z prováděných experimentů.

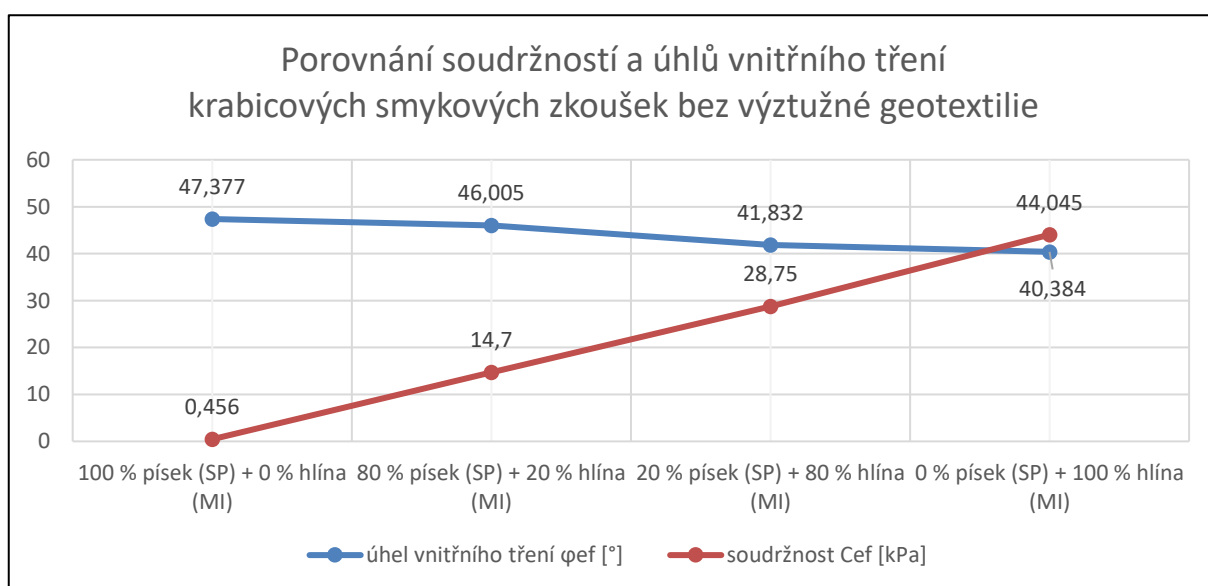
## 7.2 Vyhodnocení parametrů smykové pevnosti krabicových smykových zkoušek

### 7.2.1 Vyhodnocení krabicové smykové zkoušky bez výztužné geotextilie

V příloze C bakalářské práce jsou zobrazeny průběhy dílčích krabicových smykových zkoušek bez výztužné geotextilie, provedené dle zásad zaznamenaných v předchozí kapitole. Výsledky pevnostních parametrů krabicových smykových zkoušek pro jednotlivé směsi zemín jsou shrnuty v tabulce 8 a také graficky na obrázku 12.

**Tabulka 8** Porovnání soudržnosti a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek bez výztužné geotextilie

Porovnání soudržnosti a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek bez výztužné geotextilie				
	100 % písek (SP) + 0 % hlína (MI)	80 % písek (SP) + 20 % hlína (MI)	20 % písek (SP) + 80 % hlína (MI)	0 % písek (SP) + 100 % hlína (MI)
soudržnost $C_{ef}$ [kPa]	<b>0,456</b>	<b>14,700</b>	<b>28,750</b>	<b>44,045</b>
úhel vnitřního tření $\varphi_{ef}$ [°]	<b>47,377</b>	<b>46,005</b>	<b>41,832</b>	<b>40,384</b>



**Obrázek 12** Porovnání soudržnosti a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek bez výztužné geotextilie

Z teorie chování zemín vyplývá, že úhel vnitřního tření závisí obecně na struktuře materiálu a schopnosti zrn se navzájem zaklesnout a přenášet síly, což z pohledu prováděných zkoušek více odpovídá špatně zrněnému písku, než hlíně se střední plasticitou. Soudržnost zemín je odvislá od množství vazeb a interakcí mezi jednotlivými zrny zeminy, na což má

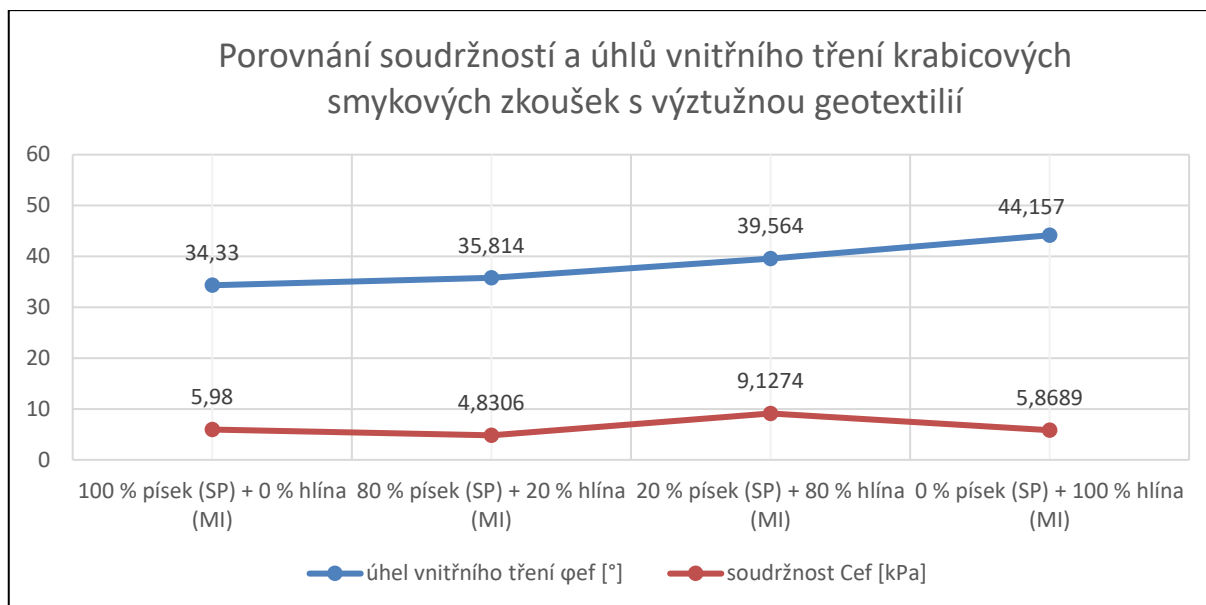
vliv množství částic, jejich struktura a také obsah vody. Předpokládaná vyšší soudržnost byla proto očekávána u hlíny se střední plasticitou. Tomuto předpokladu výsledky provedených krabicových smykových zkoušek odpovídají a z grafu lze vyčíst, že soudržnost vzorků se 100% podílem špatně zrněného písku je téměř nulová s hodnotou 0,456 kPa a je z naměřených hodnot nejnižší. Naopak úhel vnitřního tření pro písek špatně zrněný bez podílu hlíny je ze všech zkoušek nejvyšší o hodnotě 47,377°. S přidávaným množstvím jemnozrnějšího materiálu – hlíny se střední plasticitou razantně roste soudržnost až k hodnotě 44,045 kPa, a naopak úhel vnitřního tření mírně klesá a pro vzorek 0 % SP + 100 % MI je vypočítaná hodnota 40,384 °.

### 7.2.2 Vyhodnocení krabicové smykové zkoušky s výztužnou geotextilií

V příloze C bakalářské práce jsou zobrazeny průběhy dílčích krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií. Výsledky těchto zkoušek jsem shrnul do tabulky 9 a graficky vyjádřil v obrázku 13.

**Tabulka 9** Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií

Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií					
		100 % písek (SP) + 0 % hlína (MI)	80 % písek (SP) + 20 % hlína (MI)	20 % písek (SP) + 80 % hlína (MI)	0 % písek (SP) + 100 % hlína (MI)
soudržnost	$C_{ef}$ [kPa]	<b>5,980</b>	<b>4,831</b>	<b>9,127</b>	<b>5,869</b>
úhel vnitřního tření	$\varphi_{ef}$ [°]	<b>34,330</b>	<b>35,814</b>	<b>39,564</b>	<b>44,157</b>



**Obrázek 13** Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií

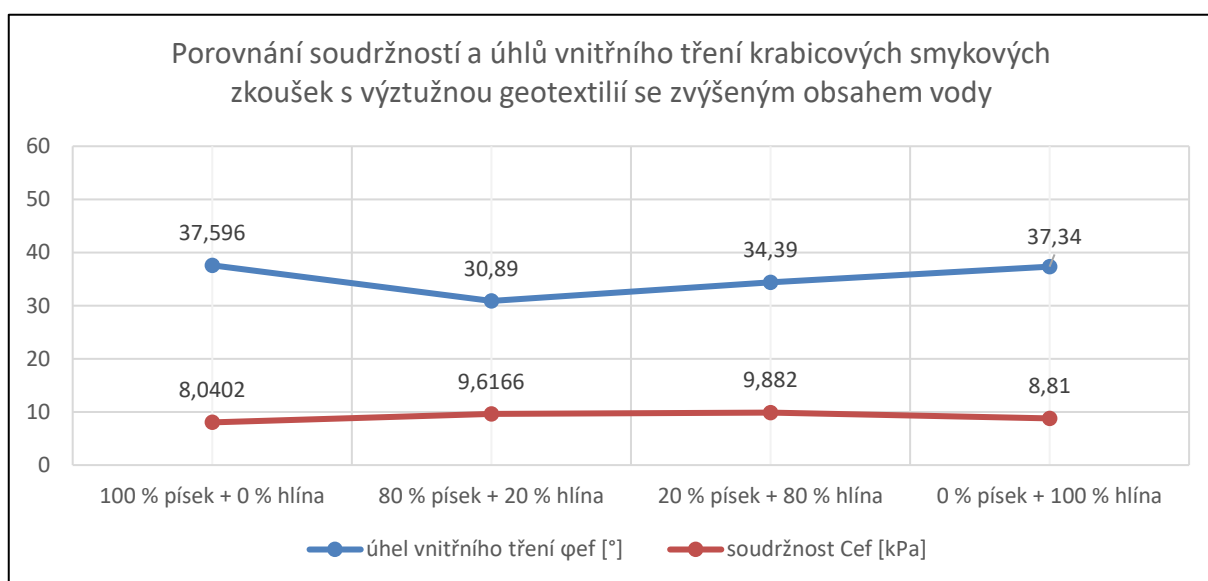
Krabicové smykové zkoušky s výztužnou geotextilií upevněnou na smykové ploše – tedy na rozhraní obou částí smykové krabice vykazují značně rozdílné výsledky oproti předpokladům ohledně chování zemin. A to z toho důvodu, že pevnostní parametry zásadně ovlivňuje výztužná geotextilie svou strukturou a možností zaklesnutí zrn. Geotextilie na smykové ploše také mění způsob rozptýlení pórových tlaků a vůbec chování vody v tomto kompozitu zemina – geotextilie. Například soudržnost nevykazuje nijak výrazný trend vzestupu k jednomu či druhému typu použité zeminy, což je způsobeno opět strukturou geosyntetika, na které, díky jeho struktuře, se nemůže jemnozrnná zemina navázat, neprobíhá interakce zrn se strukturou, a tudíž jsou vyvolány poměrně nižší silové poměry. Z hlediska úhlu vnitřního tření pozorujeme mírný vzestup naměřených hodnot se zvyšujícím se obsahem hlíny se střední plasticitou (MI). Tento fakt přisuzuji struktuře geotextilie, do které se směs se zvyšujícím se podílem špatně zrněného písku hůře zaklesne.

### 7.2.3 Vyhodnocení krabicové smykové zkoušky s výztužnou geotextilií se zvýšeným obsahem vody

Smykové zkoušky s výztužnou geotextilií se zvýšeným podílem vody o čtyři procentní body jsem vyhodnotil stejným způsobem jako předchozí dvě varianty krabicových smykových zkoušek. Jednotlivé průběhy zkoušek jsou obsaženy v příloze C této bakalářské práce. Získané hodnoty pevnostních parametrů uvádím v tabulce 10 a graficky znázorňuji na obrázku.

**Tabulka 10** Porovnání soudržnosti a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií se zvýšeným obsahem vody

Porovnání soudržnosti a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií se zvýšeným obsahem vody					
		100 % písek (SP) + 0 % hlína (MI)	80 % písek (SP) + 20 % hlína (MI)	20 % písek (SP) + 80 % hlína (MI)	0 % písek (SP) + 100 % hlína (MI)
soudržnost	$C_{ef}$ [kPa]	<b>8,040</b>	<b>9,617</b>	<b>9,882</b>	<b>8,810</b>
úhel vnitřního tření	$\varphi_{ef}$ [°]	<b>37,596</b>	<b>30,890</b>	<b>34,390</b>	<b>37,340</b>



**Obrázek 14** Porovnání soudržnosti a úhlů vnitřního tření krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií se zvýšeným obsahem vody

Z uvedeného grafu je patrné, že soudržnost všech čtyř typů vzorků je velmi podobná a pohybuje se od 8 kPa do necelých 10 kPa. Zásadní roli v těchto výsledcích hraje struktura výztužné geotextilie, díky které 100% písek špatně zrněný (SP) může dosahovat hodnoty zhruba 8 kPa a de-facto se jedná o zvýšení hodnoty oproti hodnotám ze smykových zkoušek bez geotextilie. Naopak hlína se střední plasticitou neinteraguje s geotextilií dostatečně a nedochází k vazbám mezi zrny a strukturou geotextilie. Z hlediska úhlu vnitřního tření pozorují mírný sestupný trend se snižujícím se podílem hlíny se střední plasticitou. Oproti tomu u čistého špatně zrněného písku hodnota úhlu vnitřního tření stoupá na 37.596 °.

## ZHODNOCENÍ, DISKUSE A ZÁVĚR PRÁCE

Bakalářská práce započala základními zkouškami zemin v laboratořích Univerzity Pardubice. Provedl jsem pyknometrickou zkoušku, sítozrnnou zkoušku včetně hustoměrné zkoušky jemnozrnné frakce hlíny se střední plasticitou. Dále jsem provedl zkoušky pro stanovení plasticity obou zemin a provedl zařídění. Proctorova zkouška byla provedena následně a po jejím vyhodnocení jsem započal s krabicovými smykovými zkouškami, které byly časově velmi náročné. Bylo také nutné najít vhodný způsob přípravy vzorku ve smykové krabici, neboť se vzorek hutnil na svoji maximální objemovou hmotnost suché zeminy s optimální vlhkostí. Proto jsem nejdříve použil pro zhutnění vzorku do smykové krabice Proctorovu zkoušku, a i přesto, že byla snaha o maximální preciznost ve vyřezávání vzorku a jeho umísťování do smykové krabice, vycházely výsledky krabicové smykové zkoušky naprosto mimo předpoklady s nedosaženým vrcholovým napětím a vzorek se choval více jako nezhutněný, což bylo z mého pohledu způsobeno vkládáním vzorku do smykové krabice, protože mohlo dojít k jeho mírnému porušení a mohl vykazovat lehké dilatace uvnitř krabice. Tím jsem se přesvědčil o citlivosti krabicové smykové zkoušky a následně, s ohledem na tyto zkušenosti, začal provádět hutnění vzorku přímo ve smykové krabici ručně hmoždířem se stejným poměrem úderů jako při Proctorově zkoušce. Tento postup se ukázal jako vhodný, avšak bylo potřeba dbát na přesnou a stejnou přípravu při každém vzorku. Ještě jsem se potýkal s problémy ohledně špatně nastavené mezery mezi oběma polovinami smykové krabice, což mělo v zásadě banální řešení. Pro krabicovou smykovou zkoušku s geotextilií byla nutná úprava smykové krabice pro pevné uchycení geotextilie. S upravenou smykovou krabicí jsem provedl několik zkušebních testů pro doladění způsobu fixace geotextilie. Samotná příprava vzorků s geotextilií byla časově náročná a bylo opět velmi zásadní dbát na striktní dodržování postupu. Několik zkoušek bylo nutné z důvodu nepřesností v přípravě opakovat.

V teoretické části bakalářské práce jsem shrnul stručnou historii v oblasti vyztužování zemin geosyntetiky a také popsal současný stav v mnou řešené problematice i z hlediska prováděných experimentů. Shrnutí nejdůležitějších vlastností geosyntetik a jejich rozdělení včetně popsání funkcí, které geosyntetika v zemním tělese mohou plnit, se podařilo popsat z mého pohledu věcně a výstižně. Náročná, v teoretické části bakalářské práce, byla kapitola popisující obecné zásady vyztužování zemin, protože možný rozsah a podrobné popsání této kapitoly byl nad rámec nastaveného rozsahu, a proto jsem se snažil vystihnout pouze



nejdůležitější skutečnosti. Vymezené cíle teoretické části bakalářské práce proto považuji za naplněné.

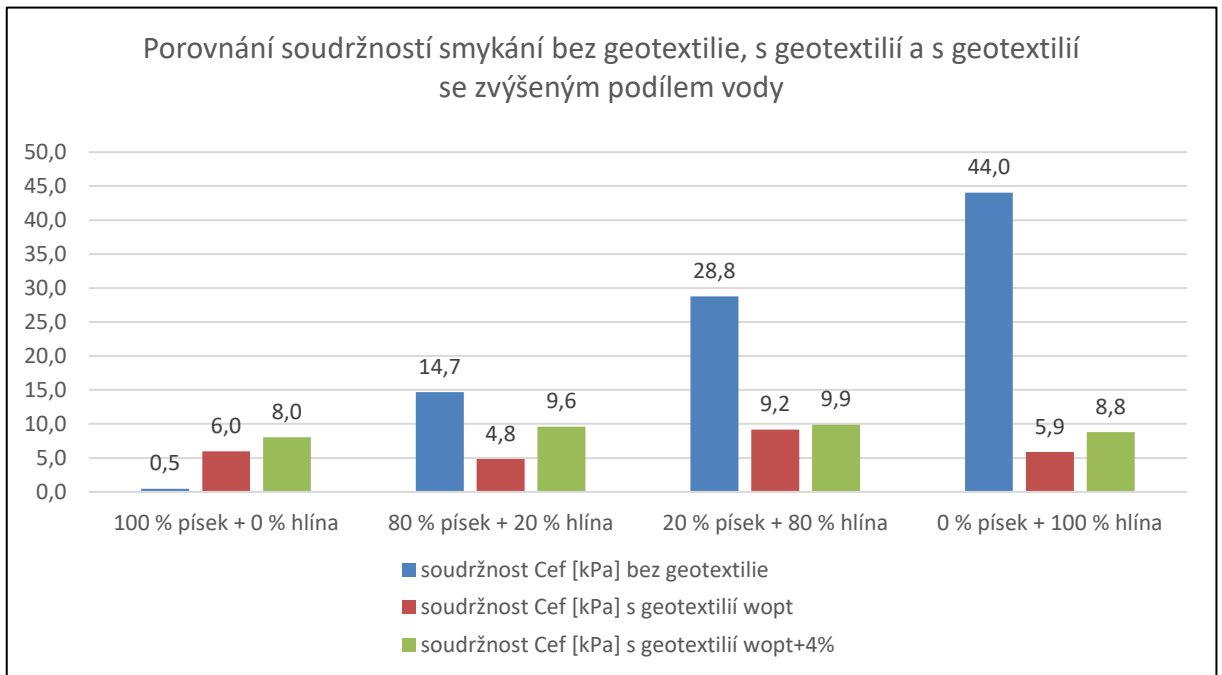
Výsledky prováděných zkoušek jsem interpretoval v kapitole 7 a nyní získané výsledky shrnu pro zhodnocení faktorů ovlivňujících naměřené parametry. Při porovnání výsledků z jednotlivých zkoušek s geotextilií a bez geotextilie docházíme k závěru, že zásadní vlastností použité výztužné geotextilie Bontex HS 110/50, která ovlivňuje hodnotu zjištěných výsledků, je její struktura – jedná se o tkanou geotextilii o plošné hmotnosti 247 g/m<sup>2</sup> s velikostí průlny 0,25 mm v interakci s použitými typy zemin. Jsem si samozřejmě vědom, že další krabicové smykové zkoušky s jinou výztužnou geotextilií by přinášely další možnosti zhodnocení naměřených dat, nicméně nebylo z časových důvodů možné tyto další zkoušky realizovat.

**Tabulka 11** Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření ze všech tří typů měření.

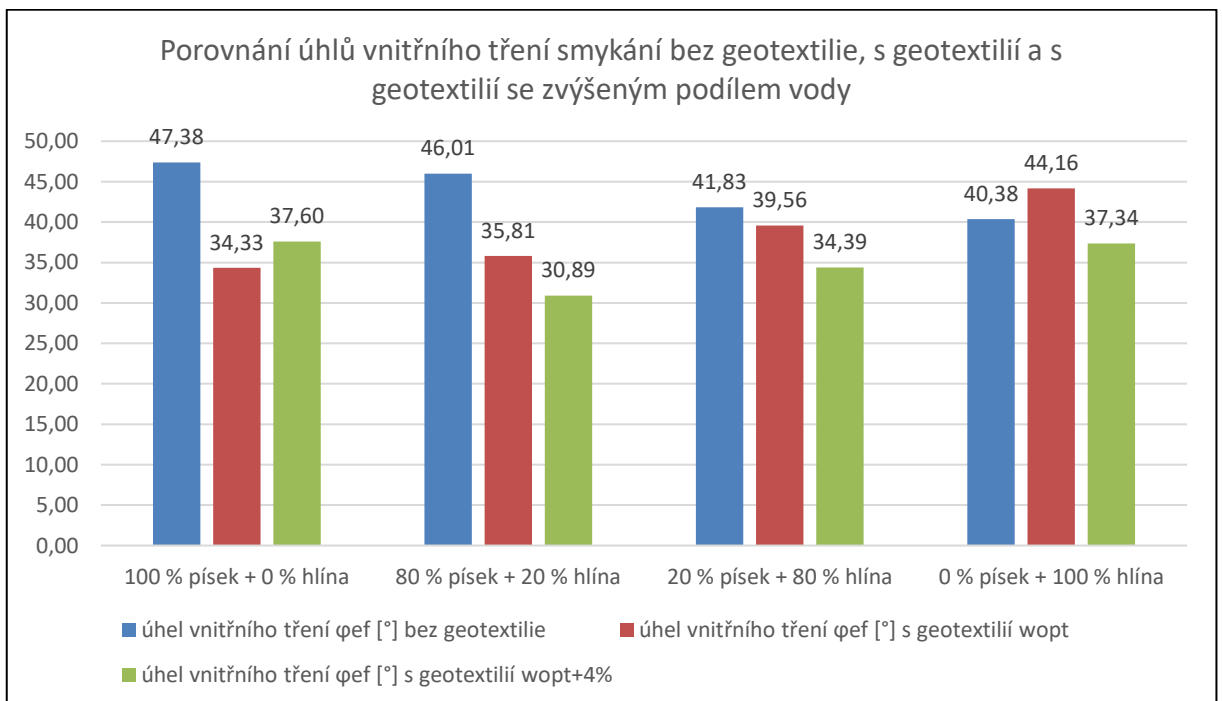
Porovnání soudržností a úhlů vnitřního tření ze všech tří typů měření						
pevnostní parametr		typ naměření	100 % písek (SP) + 0 % hlína (MI)	80 % písek (SP) + 20 % hlína (MI)	20 % písek (SP) + 80 % hlína (MI)	0 % písek (SP) + 100 % hlína (MI)
soudržnost	C <sub>ef</sub> [kPa]	bez geotextilie (w <sub>opt</sub> )	<b>0,5</b>	<b>14,7</b>	<b>28,8</b>	<b>44,0</b>
		s geotextilií (w <sub>opt</sub> )	<b>6,0</b>	<b>4,8</b>	<b>9,2</b>	<b>5,9</b>
		s geotextilií (w <sub>opt+4 %</sub> )	<b>8,0</b>	<b>9,6</b>	<b>9,9</b>	<b>8,8</b>
úhel vnitřního tření	φ <sub>ef</sub> [°]	bez geotextilie (w <sub>opt</sub> )	<b>47,38</b>	<b>46,01</b>	<b>41,83</b>	<b>40,38</b>
		s geotextilií (w <sub>opt</sub> )	<b>34,33</b>	<b>35,81</b>	<b>39,56</b>	<b>44,16</b>
		s geotextilií (w <sub>opt+4 %</sub> )	<b>37,60</b>	<b>30,89</b>	<b>34,39</b>	<b>37,34</b>

Výsledky zkoušek uvedené tabulce 11, které jsou graficky znázorněny na obrázcích 15 a 16 jsou shrnutím naměřených hodnot 48 krabicových smykových zkoušek. Vypočítaná soudržnost na vzorcích čisté zeminy ve všech typech odpovídá předpokladům z hlediska chování zemin, kdy se zvyšujícím se podílem jemnozrnných částic v závislosti na podílu vody, se soudržnost díky vazbám mezi jednotlivými zrny zeminy a jejich interakci zvyšuje. Pokud se však podíváme na průběh soudržnosti krabicových smykových zkoušek s výztužnou geotextilií, docházíme k závěru, že soudržnost kolísá mezi 4,8 kPa až 9,2 kPa bez zřejmého trendu a fungující vazby zrn v případě vzorků tvořené jen zeminou jsou oslabeny, neboť struktura geotextilie z její podstaty je taková, že funguje jako dren, dělí zeminu a nelze mluvit o navázání. V případě zvýšení podílu vody o čtyři procentní body nad jeho optimum pro danou směs, pozorujeme mírné zvýšení hodnot soudržnosti pro všechny typy směsí. Zvýšená

saturace geotextilie vodou vede ke zvýšení soudržnosti pro všechny typy směsí o jednotky kilopascalů.



**Obrázek 15** Porovnání soudržností smykání bez geotextilie, s geotextilií a s geotextilií se zvýšeným podílem vody



**Obrázek 16** Porovnání úhlů vnitřního tření smykání bez geotextilie, s geotextilií a s geotextilií se zvýšeným podílem vody

Úhel vnitřního tření při zkouškách bez geotextilie odpovídá předpokladu o chování zemin při krabicových smykových zkouškách, neboť se zvyšujícím se podílem větších zrn se zvyšuje odpor proti tření, a tudíž i hodnota úhlu vnitřního tření. Z tohoto důvodu pozorujeme, že se zvyšujícím se podílem písku úhel vnitřního tření roste. Při zkouškách z výztužnou geotextilií se však trend obrací a dochází ke zvýšení úhlu vnitřního tření u jemnozrného materiálu, na což má vliv struktura geotextilie, která se zdá být v tomto ohledu příznivější pro jemnozrný materiál. Se zvýšeným obsahem vody se hodnoty u všech vzorků s podílem jemnozrné frakce snižují, vzorek se 100% pískem však vykazuje vzestupnou tendenci úhlu vnitřního tření.

Poznatky chování výztužné geotextilie při krabicových smykových zkouškách s různými typy směsí zemin dokládají, že struktura geosyntetika hraje v tomto ohledu dominantní roli a zásadně mění hodnoty soudržností, ale i úhlu vnitřního tření. Vypočítané hodnoty parametrů smykové pevnosti jsou podkladem pro modelování a projektování vyztužených zemních těles. Autor si je vědom, že pro obsáhlejší poznatky by bylo nutné provést zkoušky s více typy výztužných geotextilií, což však naráželo na časové limity. Cíle praktické části bakalářské práce považuji za naplněné, neboť jsem provedl základní zkoušky zemin včetně uvedeného vyhodnocení, realizoval jsem krabicové smykové zkoušky, vyhodnotil a dále výsledky popisoval a porovnával.

Závěrem bych rád připomenul, že výztužná geotextilie funguje na principu tahové membrány, přičemž je zemní těleso kompozitem složeným ze sypaniny a geosyntetika. Pro přenos tahových sil je nezbytné znát chování a spolupůsobení zeminy s výztužnou geotextilií, čemuž jsem se věnoval v této bakalářské práci a považuji prezentované výsledky za přínosné.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MIČA, Lumír. *Vyztužování podloží geosyntetiky*. Antonínská 548/1, 601 90 Brno, 2011. ISBN 978-80-214-4351-8. ISSN 1213-418X. Teze habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.
- [2] *Henri Vidal (engineer)* [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Henri\\_Vidal\\_\(engineer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Vidal_(engineer))
- [3] ANUBHAV a P.K. BASUDHAR. Modeling of soil–woven geotextile interface behavior from direct shear test results. *Geotextiles and Geomembranes*. 2010, **28**(4), 403-408. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2009.12.005. ISSN 02661144. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266114409001319>
- [4] ANUBHAV a P. K. BASUDHAR. Interface Behavior of Woven Geotextile with Rounded and Angular Particle Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2013, **25**(12), 1970-1974 [cit. 2020-07-02]. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000774. ISSN 0899-1561. Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000774>
- [5] VIEIRA, C.S., M.L. LOPES a L.M. CALDEIRA. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests. *Geosynthetics International* [online]. 2013, **20**(1), 26-38 [cit. 2020-07-02]. DOI: 10.1680/gein.12.00037. ISSN 1072-6349. Dostupné z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/gein.12.00037>
- [6] INFANTE, Danny José Useche, Gonzalo Martin Aiassa MARTINEZ, Pedro Ariel ARRUA a Marcelo EBERHARDT. Shear Strength Behavior of Different Geosynthetic Reinforced Soil Structure from Direct Shear Test. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2016, **2**(2), 2-17. DOI: 10.1007/s40891-016-0058-2. ISSN 2199-9260. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s40891-016-0058-2>
- [7] ALDEEKY, Hussein, Omar AL HATTAMLEH a Bilal ABU ALFOUL. Effect of Sand Placement Method on the Interface Friction of Sand and Geotextile. *International Journal of Civil Engineering*. 2016, **14**(2), 133-138. DOI: 10.1007/s40999-016-0019-0. ISSN 1735-0522. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s40999-016-0019-0>
- [8] FOWMES, Gary John, Neil DIXON, Liwei FU a Catalin Alexandru ZAHARESCU.

- Rapid prototyping of geosynthetic interfaces: Investigation of peak strength using direct shear tests. *Geotextiles and Geomembranes* [online]. 2017, **45**(6), 674-687 [cit. 2020-07-02]. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2017.08.009. ISSN 02661144. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266114417301140>
- [9] MARKOU, Ioannis N. Direct Shear Testing of Sand – Geotextile Interfaces. *Advances in Reinforced Soil Structures*. Cham: Springer International Publishing, 2018, , 1-12. Sustainable Civil Infrastructures. DOI: 10.1007/978-3-319-63570-5\_1. ISBN 978-3-319-63569-9. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-63570-5\\_1](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-63570-5_1)
- [10] TP 97. *Geosyntetika v zemním tělese pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy Odbor infrastruktury, 2008.
- [11] ČSN EN ISO 10318-1. *Geosyntetika - Část 1: Termíny a definice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 16 s. Třídící znak 80 6172.
- [12] PONIKELSKÝ, Zdeněk, Lumír MIČA, Vladimír ŠTORK a Jan VALÁŠEK. *Geosyntetika - funkce, popis, terminologie, symboly*. 2. rev. vyd. Praha: International Geosynthetics Society - Česká republika, 2011. ISBN 978-80-903675-4-8.
- [13] Geotextilie. *Geomat* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.geomat.cz/vyrobky-katalog/geotextilie/>
- [14] Geomříže. *GEOMAT* [online]. GEOMAT, s.r.o., 2020 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.geomat.cz/vyrobky-katalog/geomrize/>
- [15] Separace zemin. *Geomat* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.geomat.cz/aplikace-co-resime/zlepseni-podlozi/separace-zemin/>
- [16] VANÍČEK, Martin. Vyztužené zemní konstrukce. *Stavitel*. 2000, **9**(5), 18-19. ISSN 1210-4825.
- [17] VANÍČEK, Ivan. Zemní konstrukce dopravních staveb. *Stavební ročenka 1999*. ČSSI, ČKAIT Praha, 1999, , 242-266. ISSN 0232-0819.
- [18] GREPL, Dalibor. Vyztužování zemních konstrukcí. *IGS News*. IGS.CZ, 2012, (2), 1-3.
- [19] ČSN EN 14475. *Provádění speciálních geotechnických prací – Vyztužené zemní konstrukce*. Praha: Český normalizační institut, 2006, 52 s. Třídící znak 731045.
- [20] GREPL, Dalibor. *Výztužná funkce geosyntetik ve stavební praxi* [online]. [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.igs.cz/images/prednasky/2005/grepl-2005.pdf>

- [21] Dálnice D1 SK Jánovce Jablonov. *GEOSYNTETIKA, s.r.o.* [online]. GEOSYNTETIKA, s.r.o., 2008 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <http://www.geosyntetika.cz/new/aktuality.php?id=6>
- [22] Vyztužené svahy pod dálnicí D3 v úseku Svrčinovec - Skalité. *Geomat* [online]. GEOMAT, s.r.o., 2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.geomat.cz/reference/strme-svahy-a-sanace-sesuvu/vyztuzene-svahy-pod-dalnici-d3-v-useku-svrcinovec-skalite/>
- [23] HERLE, Vítězslav. *Dlouhodobé chování vyztužených zemních konstrukcí* [online]. International Geosynthetics Society Česká republika [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.igs.cz/images/prednasky/2006/herle-2006.pdf>
- [24] Založení nově budovaného násypu rekonstruované silnice II/405 Příseka–Brtnice. *GEOMAT* [online]. GEOMAT, s.r.o., 2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.geomat.cz/reference/zlepsovani-podlozi-a-vyztuzovani-nasypu/zalozeni-nove-budovaneho-nasypu-rekonstruovane-silnice-ii405-priseka-brtnice/>
- [25] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Vyd. 3. přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1437-1.
- [26] Přednáška 4. *Mário Lenčేశ* [online]. c2008–2020 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/-%20-%20P%C5%99edm%C4%9Bty%20dle%20semestru%20-%20-%20-4-semester/BF02%20-%20Mechanika%20zemin/Ucebni\\_texty/2-Voda-v-zemine.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/-%20-%20P%C5%99edm%C4%9Bty%20dle%20semestru%20-%20-%20-4-semester/BF02%20-%20Mechanika%20zemin/Ucebni_texty/2-Voda-v-zemine.pdf)

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha A** Technické specifikace geotextilie Bontex HS

**Příloha B** Ukázka naměřených dat z jedné krabicové smykové zkoušky

**Příloha C** Průběhy dílčích krabicových smykových zkoušek

**Příloha D** Fotodokumentace

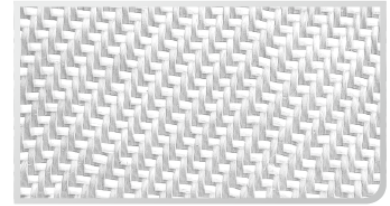




# Příloha A Technické specifikace geotextilie Bontec HS

## Bontec HS

### Technické špecifikácie

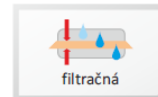
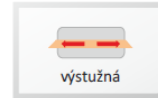


#### Popis výrobku:

Geotextília Bontec HS je tkaná geotextília vyrobená modernou technológiou. Hlavným výrobným polymérom je 100 % polyester (PET). Používa sa v násypoch, oporných konštrukciách a strmých svahoch, líniových stavbách, skládkach odpadov apod.

- 1 navrhnutá a vyrobená špeciálne pre vystúžovanie zemín
- 2 malé pretiahnutie výrobku pri vysokých zaťaženiach
- 3 široký výber variantov s rôznymi pevnosťami v ťahu
- 4 vysoká priepustnosť pre vodu z podložia

#### Funkcia:



#### Certifikáty:



Bontec	Pevnosť v ťahu		Ťažnosť		Mechanická odolnosť		Priepustnosť vody kolmo k rovine výrobku [l/m <sup>2</sup> /s] EN ISO 11058	Veľkosť pružiny [mm] EN ISO 12956	Plošná hmotnosť [g/m <sup>2</sup> ] EN ISO 9864	Šírka [m]	Dĺžka [m]	Rola		
	pozdĺžne [kN/m]	priečne [kN/m]	pozdĺžne [%]	priečne [%]	proti pretrhnutiu – CBR [kN] EN ISO 12236	proti dynamickému pretrhnutiu [mm] EN ISO 13433						plocha [m <sup>2</sup> ]	hmotnosť [kg]	
	EN ISO 10319													
<b>HS 110/50</b>	110	50	10,5	11	5,0	15	33	0,25	247	5,25	100	525	155	
<b>HS 165/50</b>	165	50	10,5	11	7,0	15	20	0,20	329	5,25	100	525	173	
<b>HS 220/50</b>	220	50	10,0	11	7,5	12	15	0,12	416	5,15	100	515	215	

#### Poznámky:

Ak nie je uvedené inak sú hodnoty stanovené podľa platných európskych noriem a sú platné k dátumu vydania tohto dokumentu. Výrobky podliehajú neustálemu vývoju a zlepšovaniu a uvedené hodnoty sa môžu v čase meniť.

V prípade záujmu o **technickú konzultáciu** kontaktujte technické oddelenie spoločnosti GEOMAT (e-mail: [info@geomat.sk](mailto:info@geomat.sk)).

Dodávateľ výrobku: **GEOMAT Slovakia s.r.o.**

Ďalšie informácie o iných produktoch nájdete na webových stránkach [www.geomat.sk](http://www.geomat.sk)

**Příloha B** Ukázka naměřených dat z jedné krabicové smykové zkoušky

Velká písmena nad jednotlivými sloupci značí:

N° – pořadové číslo odečtu měřených hodnot

R – horizontální smyková síla v kilonewtonech

G – horizontální posun smykové krabice v milimetrech

B – vertikální posun vzorku uvnitř smykové krabice v milimetrech

W – neměřená veličina

T – čas odečtu v sekundách.

=====  
PuTTY log 2020.05.13 10:49:40  
=====

[TEST]

Date : 13/05/20

Code : ? /S

[DATA]

[SPECIMEN]

[SERIES]

N°	R	G	B	W	T		
0	0.001		-0.001		-0.002	0	1
1	0.049		0.008		0.002	0	20
2	0.086		0.018		0.005	0	40
3	0.119		0.034		0.008	0	60
4	0.148		0.044		0.011	0	80
5	0.173		0.055		0.016	0	100
6	0.196		0.075		0.010	0	120
7	0.216		0.094		0.017	0	140
8	0.234		0.108		0.023	0	160
9	0.251		0.128		0.024	0	180
10	0.267		0.146		0.019	0	200
11	0.282		0.166		0.019	0	220
12	0.297		0.183		0.020	0	240
13	0.309		0.200		0.020	0	260
14	0.322		0.220		0.021	0	280
15	0.334		0.234		0.021	0	300
16	0.344		0.250		0.021	0	320
17	0.355		0.274		0.021	0	340
18	0.365		0.295		0.021	0	360
19	0.374		0.308		0.021	0	380
20	0.383		0.332		0.024	0	400
21	0.392		0.349		0.021	0	420
22	0.400		0.365		0.021	0	440
23	0.407		0.388		0.024	0	460
24	0.414		0.400		0.023	0	480

25	0.422	0.422	0.019	0	500
26	0.429	0.437	0.017	0	520
27	0.436	0.457	0.022	0	540
28	0.442	0.478	0.018	0	560
29	0.448	0.498	0.022	0	580
30	0.455	0.509	0.018	0	600
31	0.462	0.524	0.021	0	620
32	0.468	0.550	0.013	0	640
33	0.474	0.575	0.016	0	660
34	0.480	0.583	0.016	0	680
35	0.486	0.603	0.009	0	700
36	0.491	0.623	0.014	0	720
37	0.496	0.647	0.012	0	740
38	0.502	0.663	0.014	0	760
39	0.509	0.676	0.008	0	780
40	0.514	0.698	0.011	0	800
41	0.520	0.731	0.013	0	820
42	0.525	0.744	0.014	0	840
43	0.530	0.761	0.014	0	860
44	0.535	0.777	0.011	0	880
45	0.540	0.804	0.011	0	900
46	0.545	0.824	0.009	0	920
47	0.550	0.849	0.009	0	940
48	0.555	0.869	0.004	0	960
49	0.559	0.887	0.004	0	980
50	0.564	0.906	0.004	0	1000
51	0.567	0.920	-0.008	0	1020
52	0.571	0.952	-0.008	0	1040
53	0.574	0.970	-0.012	0	1060
54	0.579	0.988	-0.012	0	1080
55	0.583	1.009	-0.016	0	1100
56	0.586	1.027	-0.017	0	1120
57	0.590	1.046	-0.020	0	1140
58	0.593	1.069	-0.026	0	1160
59	0.596	1.087	-0.029	0	1180
60	0.599	1.112	-0.034	0	1200
61	0.602	1.125	-0.033	0	1220
62	0.604	1.150	-0.037	0	1240
63	0.608	1.172	-0.043	0	1260
64	0.609	1.187	-0.044	0	1280
65	0.612	1.207	-0.045	0	1300
66	0.614	1.224	-0.050	0	1320
67	0.616	1.248	-0.055	0	1340
68	0.619	1.271	-0.060	0	1360
69	0.620	1.291	-0.067	0	1380
70	0.622	1.309	-0.070	0	1400
71	0.623	1.331	-0.075	0	1420
72	0.624	1.350	-0.079	0	1440
73	0.624	1.375	-0.083	0	1460
74	0.625	1.393	-0.087	0	1480

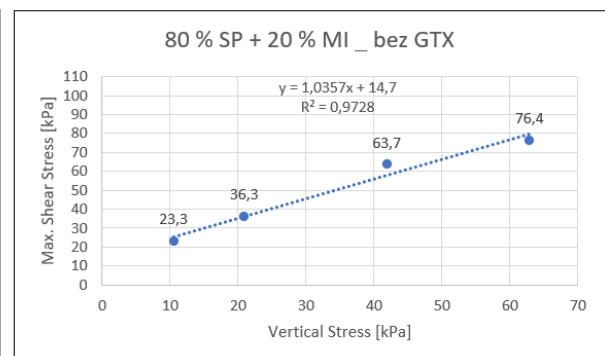
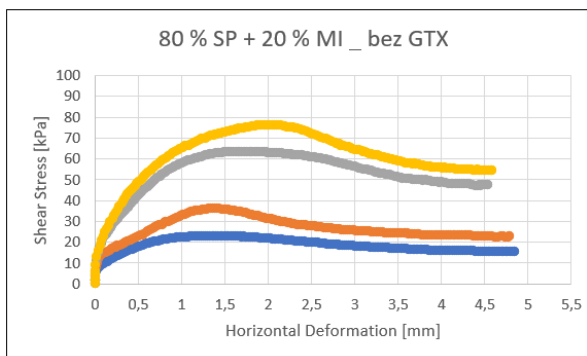
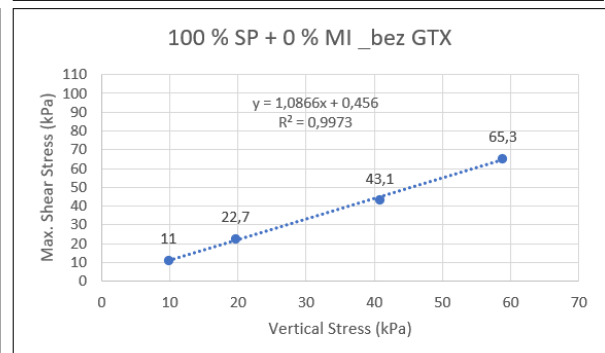
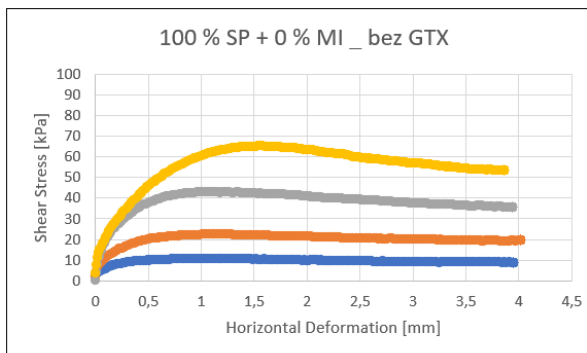
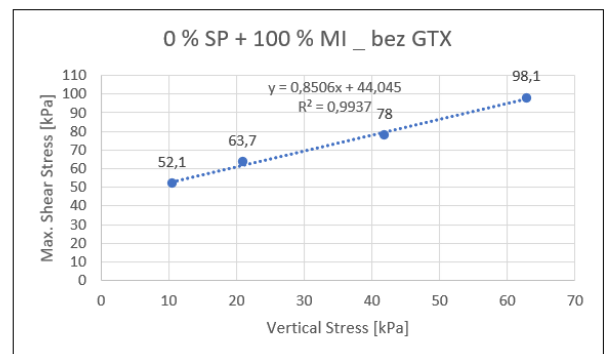
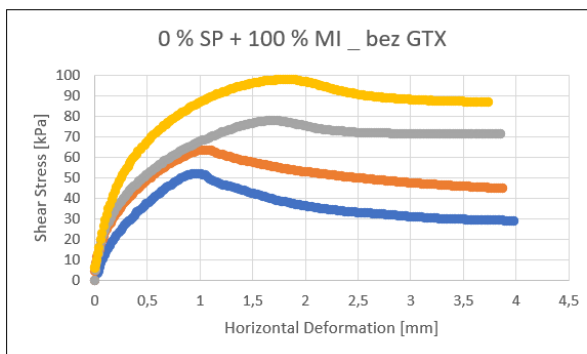
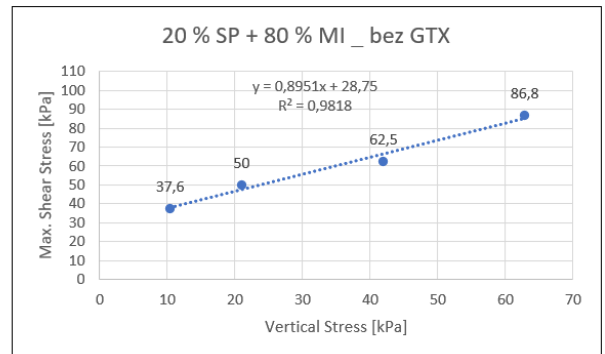
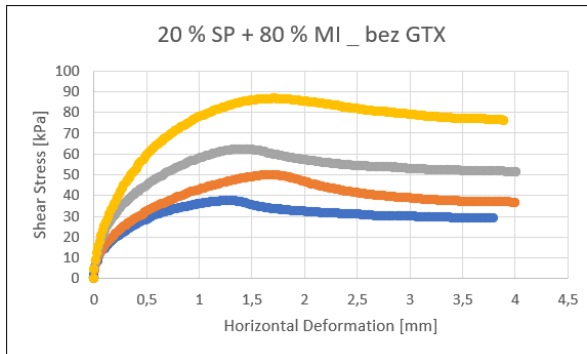
75	0.625	1.421	-0.090	0	1500
76	0.625	1.445	-0.095	0	1520
77	0.623	1.461	-0.098	0	1540
78	0.623	1.481	-0.105	0	1560
79	0.622	1.502	-0.109	0	1580
80	0.620	1.527	-0.116	0	1600
81	0.618	1.549	-0.120	0	1620
82	0.616	1.569	-0.123	0	1640
83	0.613	1.589	-0.131	0	1660
84	0.612	1.617	-0.132	0	1680
85	0.609	1.633	-0.139	0	1700
86	0.606	1.651	-0.149	0	1720
87	0.605	1.676	-0.154	0	1740
88	0.601	1.703	-0.160	0	1760
89	0.600	1.712	-0.158	0	1780
90	0.597	1.738	-0.164	0	1800
91	0.594	1.755	-0.168	0	1820
92	0.592	1.782	-0.170	0	1840
93	0.590	1.806	-0.175	0	1860
94	0.588	1.824	-0.179	0	1880
95	0.586	1.844	-0.182	0	1900
96	0.584	1.860	-0.185	0	1920
97	0.582	1.886	-0.192	0	1940
98	0.580	1.901	-0.195	0	1960
99	0.579	1.931	-0.200	0	1980
100	0.577	1.952	-0.203	0	2000
101	0.576	1.965	-0.203	0	2020
102	0.574	1.991	-0.211	0	2040
103	0.573	2.011	-0.213	0	2060
104	0.571	2.027	-0.220	0	2080
105	0.570	2.049	-0.226	0	2100
106	0.569	2.068	-0.226	0	2120
107	0.567	2.088	-0.228	0	2140
108	0.565	2.111	-0.233	0	2160
109	0.563	2.133	-0.235	0	2180
110	0.562	2.140	-0.238	0	2200
111	0.561	2.168	-0.241	0	2220
112	0.559	2.198	-0.243	0	2240
113	0.558	2.221	-0.244	0	2260
114	0.557	2.233	-0.250	0	2280
115	0.556	2.257	-0.254	0	2300
116	0.555	2.281	-0.256	0	2320
117	0.553	2.300	-0.256	0	2340
118	0.552	2.327	-0.260	0	2360
119	0.551	2.344	-0.259	0	2380
120	0.549	2.358	-0.254	0	2400
121	0.548	2.386	-0.269	0	2420
122	0.548	2.405	-0.271	0	2440
123	0.547	2.433	-0.273	0	2460
124	0.546	2.454	-0.276	0	2480

125	0.545	2.474	-0.280	0	2500
126	0.544	2.493	-0.281	0	2520
127	0.544	2.521	-0.284	0	2540
128	0.543	2.538	-0.295	0	2560
129	0.543	2.567	-0.297	0	2580
130	0.543	2.588	-0.294	0	2600
131	0.541	2.605	-0.298	0	2620
132	0.541	2.617	-0.300	0	2640
133	0.541	2.637	-0.303	0	2660
134	0.541	2.669	-0.307	0	2680
135	0.540	2.685	-0.308	0	2700
136	0.539	2.706	-0.307	0	2720
137	0.539	2.727	-0.314	0	2740
138	0.539	2.749	-0.316	0	2760
139	0.539	2.770	-0.319	0	2780
140	0.539	2.791	-0.322	0	2800
141	0.538	2.815	-0.325	0	2820
142	0.536	2.838	-0.328	0	2840
143	0.537	2.862	-0.331	0	2860
144	0.535	2.878	-0.334	0	2880
145	0.534	2.904	-0.335	0	2900
146	0.533	2.924	-0.334	0	2920
147	0.533	2.951	-0.339	0	2940
148	0.532	2.973	-0.336	0	2960
149	0.531	2.997	-0.337	0	2980
150	0.531	3.016	-0.339	0	3000
151	0.531	3.032	-0.341	0	3020
152	0.530	3.063	-0.341	0	3040
153	0.530	3.073	-0.357	0	3060
154	0.529	3.097	-0.352	0	3080
155	0.529	3.118	-0.354	0	3100
156	0.529	3.144	-0.358	0	3120
157	0.527	3.160	-0.361	0	3140
158	0.527	3.182	-0.362	0	3160
159	0.527	3.199	-0.364	0	3180
160	0.526	3.224	-0.366	0	3200
161	0.526	3.248	-0.366	0	3220
162	0.526	3.266	-0.369	0	3240
163	0.525	3.282	-0.373	0	3260
164	0.525	3.302	-0.378	0	3280
165	0.525	3.334	-0.379	0	3300
166	0.525	3.351	-0.382	0	3320
167	0.525	3.365	-0.382	0	3340
168	0.525	3.381	-0.379	0	3360
169	0.524	3.408	-0.395	0	3380
170	0.524	3.427	-0.390	0	3400
171	0.524	3.449	-0.389	0	3420
172	0.523	3.465	-0.393	0	3440
173	0.522	3.490	-0.390	0	3460
174	0.522	3.509	-0.392	0	3480

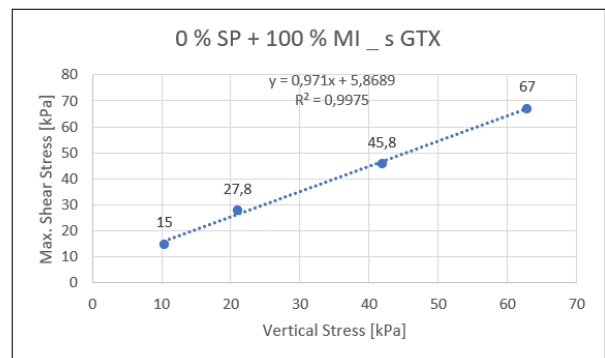
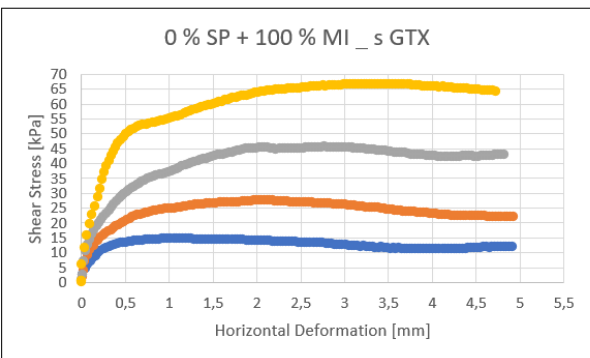
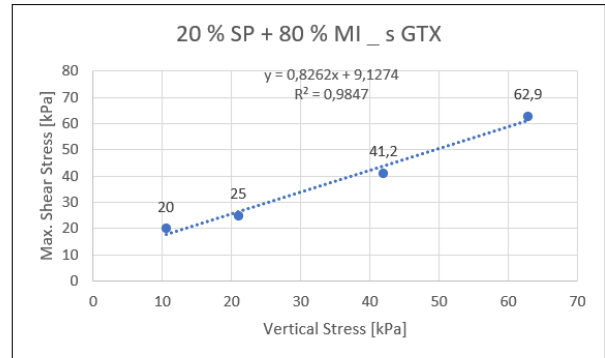
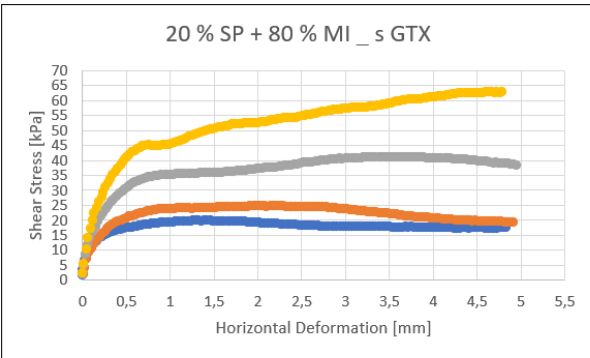
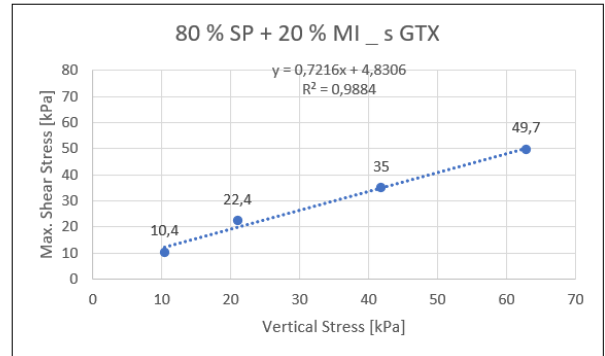
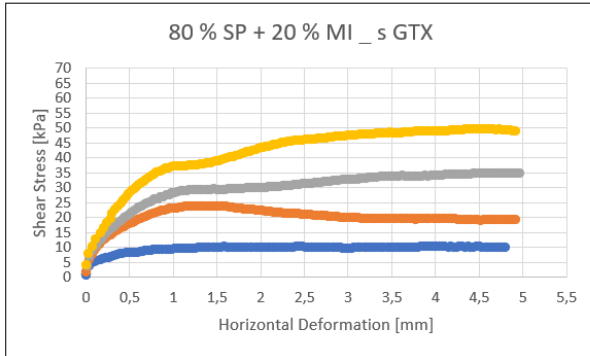
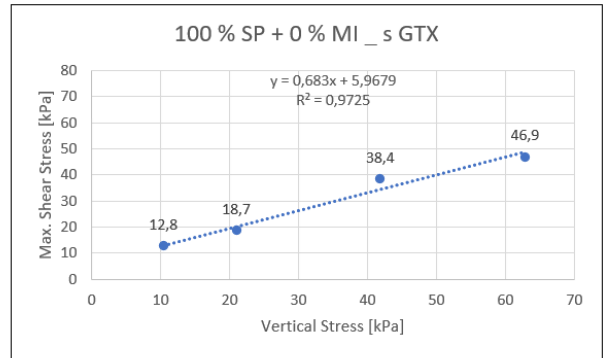
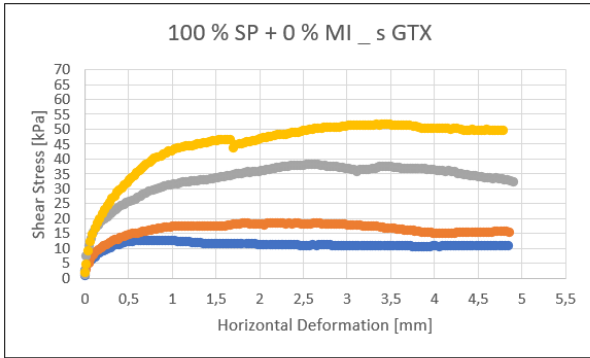
175	0.522	3.528	-0.395	0	3500
176	0.521	3.544	-0.399	0	3520
177	0.521	3.566	-0.396	0	3540
178	0.521	3.587	-0.397	0	3560
179	0.520	3.610	-0.399	0	3580
180	0.520	3.627	-0.398	0	3600
181	0.520	3.638	-0.401	0	3620
182	0.520	3.663	-0.405	0	3640
183	0.521	3.689	-0.407	0	3660
184	0.520	3.706	-0.410	0	3680
185	0.521	3.726	-0.419	0	3700
186	0.521	3.748	-0.410	0	3720
187	0.520	3.776	-0.427	0	3740
188	0.520	3.795	-0.432	0	3760
189	0.519	3.818	-0.421	0	3780
190	0.518	3.839	-0.432	0	3800
191	0.519	3.854	-0.424	0	3820
192	0.518	3.881	-0.427	0	3840
193	0.517	3.907	-0.428	0	3860
194	0.517	3.928	-0.431	0	3880
195	0.517	3.947	-0.434	0	3900
196	0.516	3.968	-0.434	0	3920
197	0.516	3.992	-0.435	0	3940
198	0.515	4.008	-0.438	0	3960
198	0.515	4.008	-0.438	0	3960
198	0.515	4.008	-0.438	0	3960
198	0.515	4.008	-0.438	0	3960

## Příloha C Průběhy dílčích krabicových smykových zkoušek

### a) Krabicové smykové zkoušky bez geotextilie

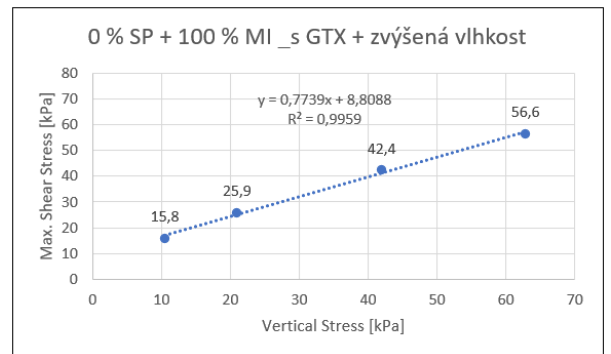
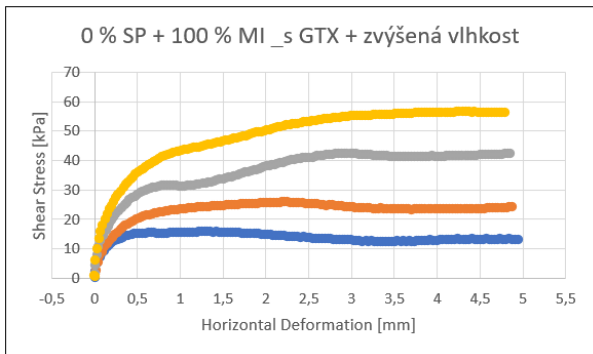
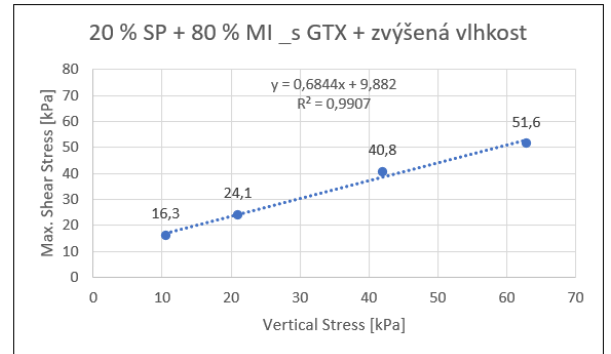
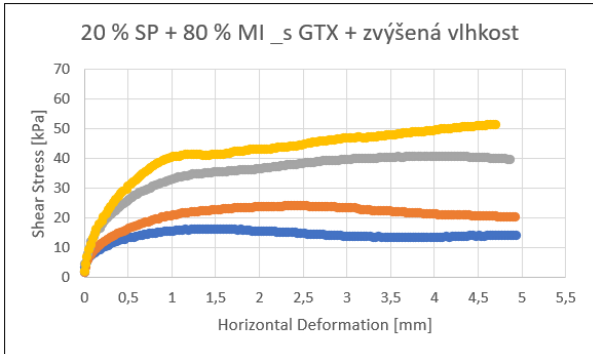
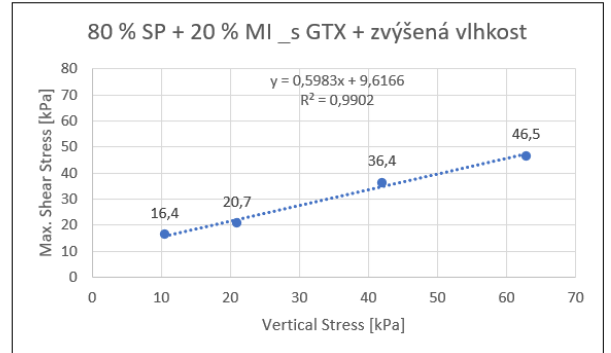
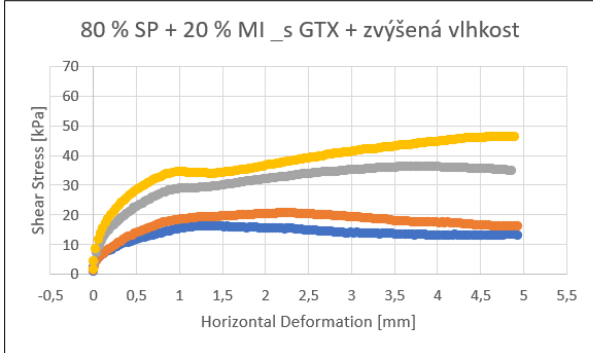
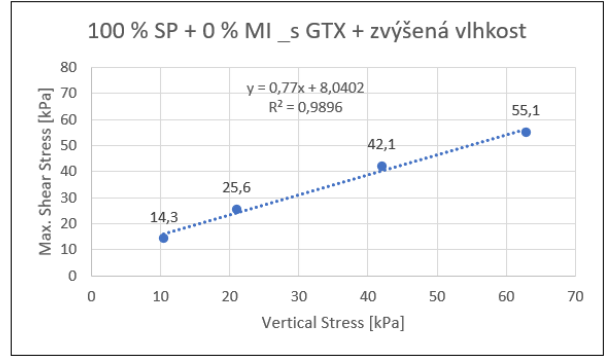
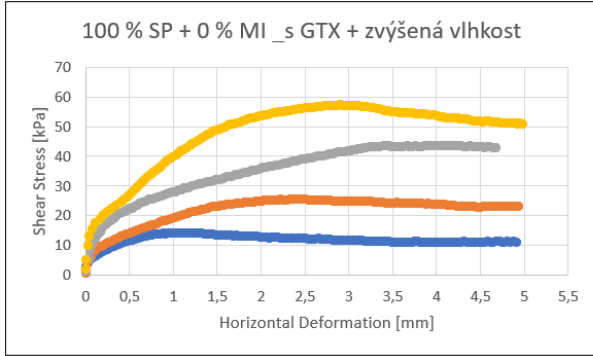


## b) Krabicové smykové zkoušky s geotextilií





c) Krabicové smykové zkoušky s geotextilií se zvýšeným obsahem vody

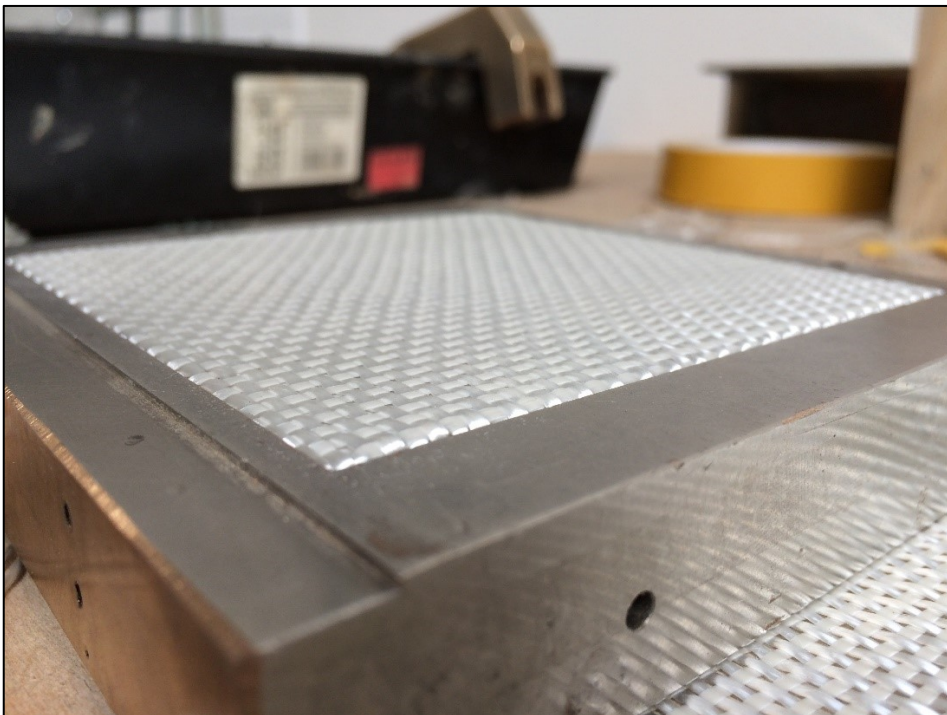


**Příloha D** Fotodokumentace

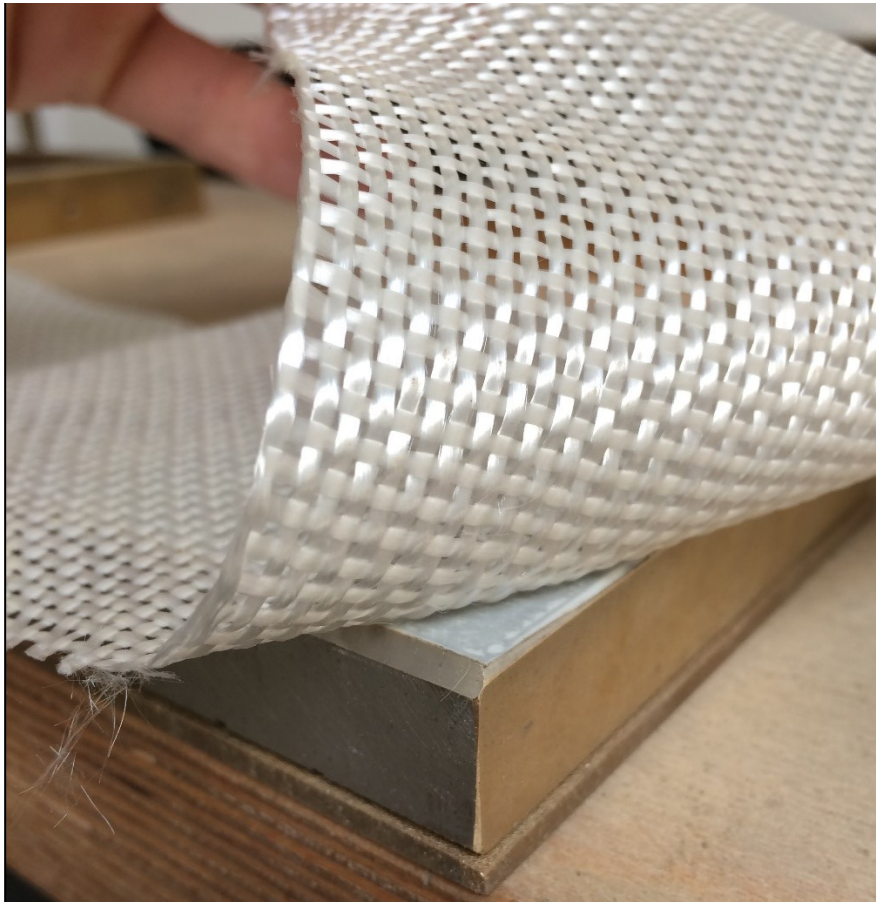
Detail špatně zrněného písku na výztužné geotextilii po krabivocé smykové zkoušce



Detail zafixované geotextilie ve smykové krabici



Fixace geotextilie k ocelové desce



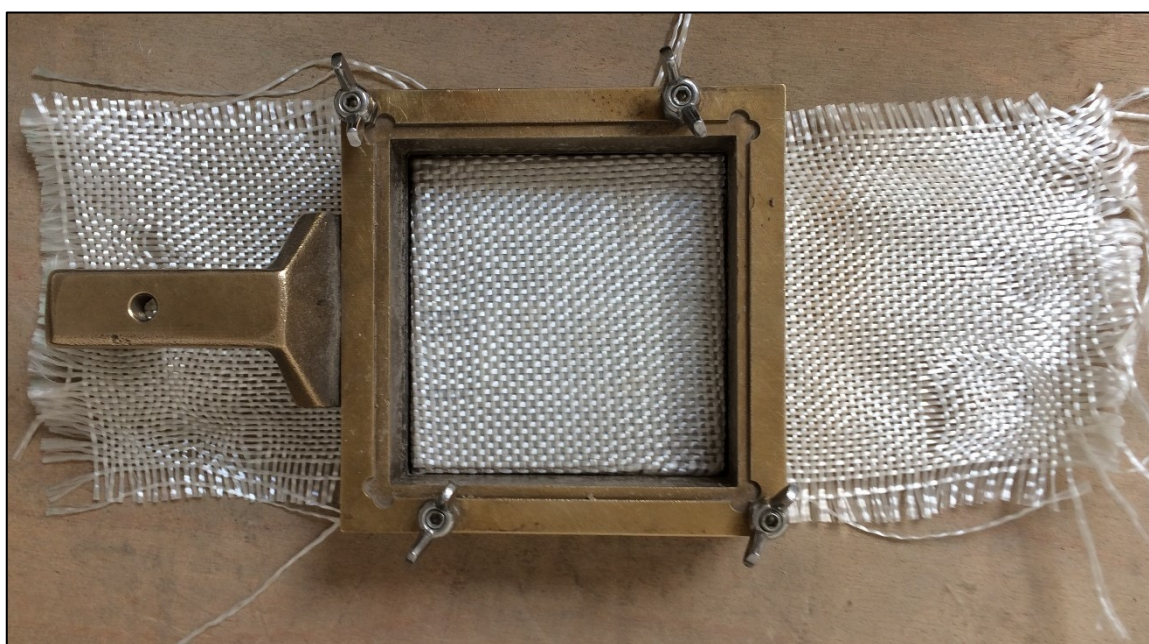
Příprava vzorku pro krabicovou smykovou zkoušku



## Hutnící zařízení Proctorovy zkoušky



Připravená smyková krabice s upevněnou geotextilií



Krabicový smykový přístroj



Ruční hutnění ve smykové krabici

