



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

Návrh zařízení pro vsakovací zkoušku

Design of the infiltration measuring device

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Bc. Adam BUDÍNSKÝ

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí práce: Ing. Martin Dub Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Budínský** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **437296**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh zařízení pro vsakovací zkoušku

Název diplomové práce anglicky:

Design of the Infiltration Measuring Device

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce zpracujte návrh zařízení pro infiltrační zkoušku. Osnova:

- Rešerše problematiky měření infiltračních parametrů, měřících aparatur, pohonů
- Návrh koncepčních řešení
- Konstrukce vybraného řešení
- Návrhové a kontrolní výpočty
- 3D CAD model a výkres sestavení

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
ČSN EN ISO 22282-5
ČSN 759010

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

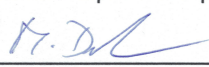
Ing. Martin Dub, Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS

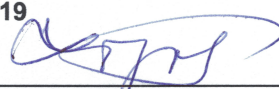
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **20.12.2019**


Ing. Martin Dub, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh zařízení pro vsakovací zkoušku“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Duba, Ph.D. s použitím literatury, uvedené na konci této diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 16. 6. 2019

.....

Bc. Adam Budínský

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Dubovi, Ph.D., za ochotu, čas, trpělivost a odborné vedení. Dále pak také svému kolegovi Bc. Filipu Haasovi, za perfektní spolupráci při tvorbě společného projektu. Nakonec bych rád poděkoval svojí rodině, za jejich podporu při studiu.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Adam BUDÍNSKÝ
Název DP:	Návrh zařízení pro vsakovací zkoušku
Anglický název:	Design of the infiltration measuring device
Rok:	2019
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí DP:	Ing. Martin Dub Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 63 počet obrázků: 65 počet tabulek: 4 počet příloh: 6
Klíčová slova:	Infiltrometr, infiltrace, vsakovací zkouška, geologický průzkum, hydraulická vodivost
Keywords:	Infiltration, infiltration measuring device, geological survey, hydraulic conductivity
Anotace:	Tato práce je zaměřena na návrh zařízení pro vsakovací zkoušku. Na začátku práce je vypracována rešerše způsobu stanovení koeficientu filtrace a popis principu funkce zařízení měřících propustnost. Dále je zpracována rešerše pohonů zatlačování infiltračního válce. Hlavní částí práce je konstrukční návrh měřícího zařízení včetně soupisu technických požadavků a omezení. Dále jsou pomocí MKP zkontrolována navržené konstrukce infiltračního zařízení. Součástí přílohy jsou výkresy sestav a výrobní výkresy.
Abstract	This thesis is focused on design of the infiltration measuring device. On the beginning of the thesis is retrieval part and description of the principle determining the filtration coefficient and the principle of the function of devices measuring the permeability. The main part of the thesis is the design of the measuring equipment including the list of requirements and limitations. The design is checked by the FEM. Assembly and part drawings are included in the appendix.

Obsah

PROHLÁŠENÍ	1
PODĚKOVÁNÍ	2
ANOTAČNÍ LIST	3
1. ÚVOD	6
2. PROPUSTNOST HORNIN	7
2.1. STANOVENÍ ZE ZRNITOSTI HORNIN	8
2.2. LABORATORNÍ ZPŮSOB.....	10
2.3. TERÉNNÍ HYDRODYNAMICKÉ ZKOUŠKY	11
3. ZAŘÍZENÍ PRO STANOVENÍ PROPUSTNOSTI HORNIN	13
3.1. DVOUVÁLCOVÝ INFILTROMETR	13
3.2. TLAKOVÝ INFILTROMETR	16
3.3. PŘETLAKOVÝ INFILTROMETR	17
4. POHONY MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ	19
4.1. LINEÁRNÍ AKTUÁTORY	19
4.2. ZDVIŽNÁ PŘEVODOVKA.....	20
4.3. HYDRAULICKÝ VÁLEC.....	21
5. TECHNICKÉ NORMY	23
5.1. NORMA ČSN EN ISO 22282-5.....	23
5.1.1. POŽADAVKY NA JEDNOVÁLCOVÝ UZAVŘENÝ SYSTÉM	24
5.1.2. PRŮBĚH MĚŘENÍ	24
6. MĚŘENÍ	25
6.1. PŘÍSTROJE A VYBAVENÍ.....	25
6.2. POPIS MĚŘENÍ.....	26
6.3. PRŮBĚH MĚŘENÍ	28
6.3.1. MĚŘENÍ Č.1 – VZOREK S3.....	29
6.3.2. MĚŘENÍ Č.2 – VZOREK S4.....	30
6.3.3. MĚŘENÍ Č.3 – VZOREK S4.....	31
6.3.4. MĚŘENÍ Č.4 – VZOREK S3.....	32
6.3.5. MĚŘENÍ Č.5 – DRN	33
6.3.6. MĚŘENÍ Č.6 – DRN	34
6.3.7. MĚŘENÍ Č.7 – DRN	35
6.4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ	36
6.5. VYHODNOCENÍ.....	36
7. KONSTRUKČNÍ NÁVRH	37
7.1. SOUPIS TECHNICKÝCH OMEZENÍ A POŽADAVKŮ	37
7.2. PRVOTNÍ NÁVRH.....	40
7.3. KONSTRUKCE	42
7.3.1. INFILTROMETR	46
7.3.2. VYHAZOVAČ DRNŮ S PORÉZNÍ STRUKTUROU	47
7.3.3. PRUŽINA	48
7.3.4. HYDRAULICKÝ VÁLEC.....	50
7.3.5. KONZOLE UKOTVENÍ	50
7.3.6. SESTAVA INFILTROMETRU.....	51
7.3.7. ZÁSTAVBA INFILTROMETRU	52
8. PEVNOSTNÍ ANALÝZA	53
8.1. ANALÝZA ZATÍŽENÍ INFILTROMETRU	53
8.2. ZTRÁTA STABILITY INFILTROMETRU	54
8.3. ANALÝZA ZATÍŽENÍ KONZOLE UCHYCENÍ	54



8.4.	ZTRÁTA STABILITY KONZOLE UCHYCENÍ	55
9.	ZÁVĚR.....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....	58
	POUŽITÁ LITERATURA	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK.....	62
	SEZNAM PŘÍLOH	63

1. Úvod

Nasyčená hydraulická vodivost je důležitým parametrem z hlediska hydrogeologických charakteristik a průzkumu hornin. Její hodnota je v zásadě klíčovým parametrem pro širokou škálu aplikací v hydrogeologii¹ a hydropedologii². Voda je pro lidstvo důležitým prvkem pro život a s růstem jejího nedostatku stoupají nároky na lepší hospodaření s vodními zásobami a využitím veškerých dostupných technologií. Neméně důležitou roli hraje také při určení hydrogeologických charakteristik zemin a stanovení jejich vhodnosti pro založení staveb, zemědělských ploch nebo sportovních povrchů



Obr. 1 - Terénní zkoušky propustnosti hornin [1]

V současnosti je metoda měření infiltrace vody do půdy prováděna pomocí různých metod měření, ať už jde o měření nenasycené nebo nasycené hydraulické vodivosti, vždy jde o poměrně náročné měření v požadavcích na obsluhu (Obr.1). Je nutné vlastnoručně dopravit veškeré měřicí zařízení a zásobu vody do poměrně těžko dostupných lokalit. Cílem je vytvořit automatizované zařízení, které by poskytovalo stále stejné podmínky měření ze strany měřicího zařízení, ale i menší náročnost na obsluhu a odstranit tak potenciální systematické chyby měření. Tento grantový projekt vznikl ve spolupráci s firmou Chemcomex a.s., která se zabývá geologickými průzkumy. Tato práce je zaměřena na návrh automatizovaného měřicího zařízení, které je součástí pojízdného vozítka.

¹ Vědní obor zabývající se podzemními vodami, jejich původem, podmínkami výskytu, zákony pohybu, jejich fyzikálními vlastnostmi a jejich interakci s okolním prostředím.

² Vědní obor, který se zabývá vztahem vody, půdy a rostlin a jejich postavením v hydrologickém cyklu krajiny.

2. Propustnost hornin

Půdu lze všeobecně brát jako porézní prostředí, které umožňuje proudění vody. Maximální objem, který může voda zaujmout v půdě odpovídá objemu všech pórů. Rozlišujeme dva druhy proudění. Proudění nasycené je takové, při kterém voda vyplňuje všechny póry půdy. Proudění, při kterém nedochází k vyplnění všech pórů nazýváme proudění nenasycené. [2]

Propustnost hornin je vyhodnocena koeficientem filtrace, který může být stanoven různými způsoby. Ten je později využit ke klasifikaci měřené půdy pomocí (Tab. 1). [3]

Zemina (podle relativní propustnosti ČSN 73 6850)	Přibližné rozmezí koeficientu filtrace [m/s]	Třída zeminy podle ČSN 73 1001	Příklady druhů zemin
velmi nepropustná	$< 10^{-10}$	F6 F7 F8	Jíly s nízkou a střední plasticitou Jíly a hlíny s vysokou až extrémně vysokou plasticitou
nepropustná	10^{-8} až 10^{-10}	F1 F2 F4 F5	Hlíny štěrkovité Jíly štěrkovité a písčité Hlíny s nízkou a střední plasticitou
málo propustná	10^{-6} až 10^{-8}	F3 S3 S5 G4 G5	Hlíny písčité Písky hlinité a jílovité Štěrk hlinité a jílovité
propustná	10^{-4} až 10^{-6}	S3 G3	Písky a štěrky s příměsí jemnozrnné zeminy (5 – 15 %)
velmi propustná	$> 10^{-4}$	S1 G1 S2 G2	Písky a štěrky dobře a špatně zrněné, tj. čisté písky a štěrky, písčité štěrky, písky a štěrky s velmi malou příměsí jemnozrnných zemin (<5%)

Tab. 1 - Zatrídění zemin podle koeficientu filtrace dle ČSN 72 1020

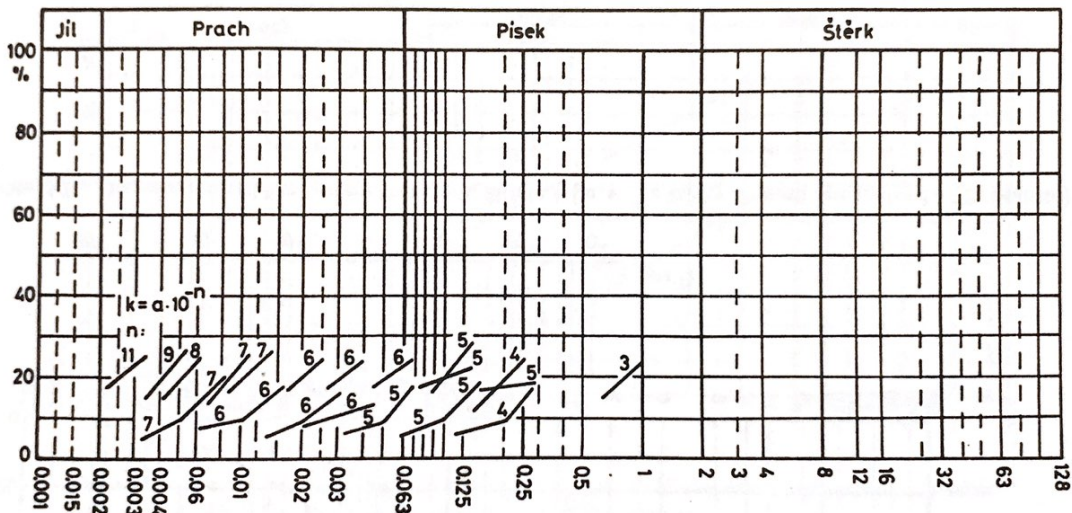
Horniny se pak dle propustnosti dělí na kolektory (horniny propustné $k = 10^{-2}$ až 10^{-7}) a na izolátory (horniny nepropustné $k = <10^{-8}$). Mezi kolektory řadíme štěrky, pískovce, písky, zkrasovatělé vápence apod. Do skupiny izolátorů řadíme jíly, jílovce, prachovce, celistvé vápence a dolomity aj. [4]

2.1. Stanovení ze zrnitosti hornin

Koeficient filtrace lze určit číselně dle velikosti zrna d_{10} [mm], dle vzorce:

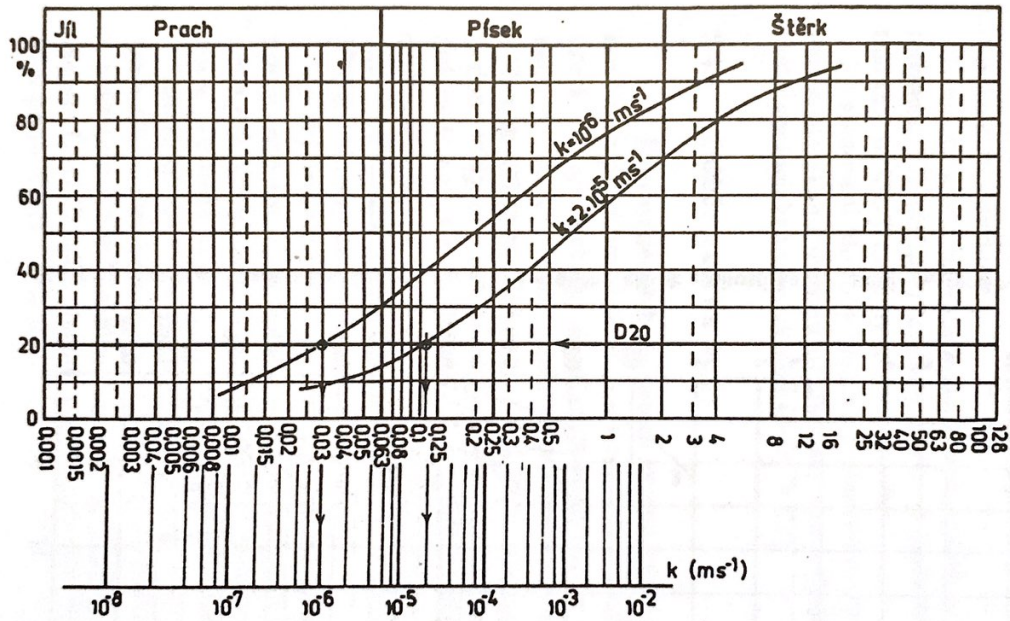
$$k = 10^{-2} \cdot d_{10}^2 \text{ [m/s]} \quad (1)$$

V diagramu (Obr.2) jsou dle tohoto vzorce vyznačeny koeficienty filtrace z průběhu křivek zrnitosti na d_{10} a d_{20} . Stejně tak lze propustnost posoudit pomocí křivky zrnitosti dle diagramu Ch. Malleta (Obr. 3).



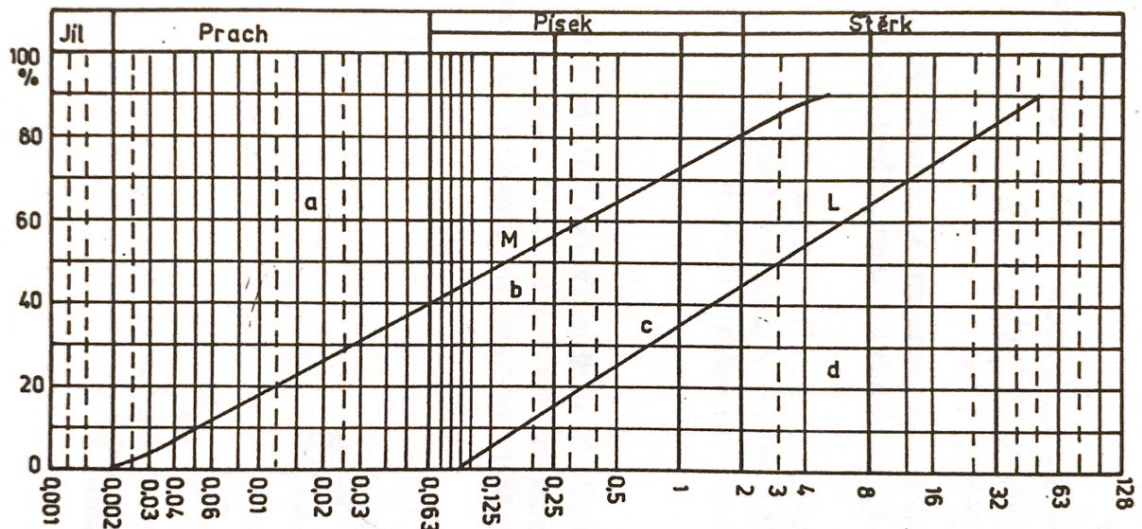
Obr. 2 - Odečtení koeficientu filtrace k [m/s] z průběhu křivek zrnitosti na d_{10} a d_{20} [3]

Kde d_{10} [mm] odpovídá průměru zrn příslušející 10 % propadu při zkoušce zrnitosti. Obdobně pak d_{20} [mm] pro průměr zrn příslušející 20 % propadu. Takovéto vyhodnocení poskytuje pouze orientační hodnoty koeficientu filtrace, jelikož neposuzujeme horninové podloží jako celek, nýbrž jako statistické vyhodnocení velikosti zrn. K vyhodnocení blíží se nejvíce realitě je potřeba zahrnout horninu jako celek i s jejími místními defekty.



Obr. 3 - Diagram pro přibližné určení koeficientu filtrace k [m/s] z křivky zrnitosti zeminy [3]

Zhutněné zeminy nebo orientačně zeminy v přirozeném prostředí lze určit z diagramu (Obr. 4).

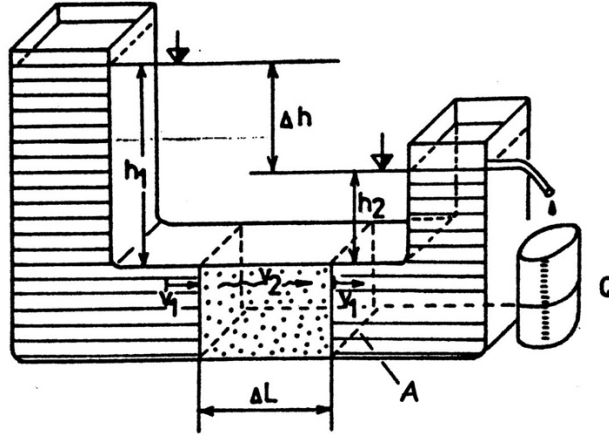


Obr. 4 - Posouzení propustnosti zemín podle zrnitosti. Mezní křivky zemín nepropustných a velmi málo propustných (M) a zemín málo propustných a propustných (L).

a – zeminy nepropustné, b – zeminy velmi málo propustné, c – zeminy málo propustné, d – zeminy nepropustné [3]

2.2. Laboratorní způsob

Stanovení koeficientu filtrace laboratorními zkouškami se provádí podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-11. Měří se na zkušebním vzorku umístěném do propustoměru (Obr. 5) při stálém nebo proměnlivém spádu.



Obr. 5 - Model propustoměru, kde Q je průsakov, A – plocha průsaku. [3]

Měří se množství kapaliny, která za jednotku času proteče vzorkem horniny o daném průřezu A [m^2], délce l [m] a stálém průtoku Q [m^3/s] při stálém spádu h [m]. [3]

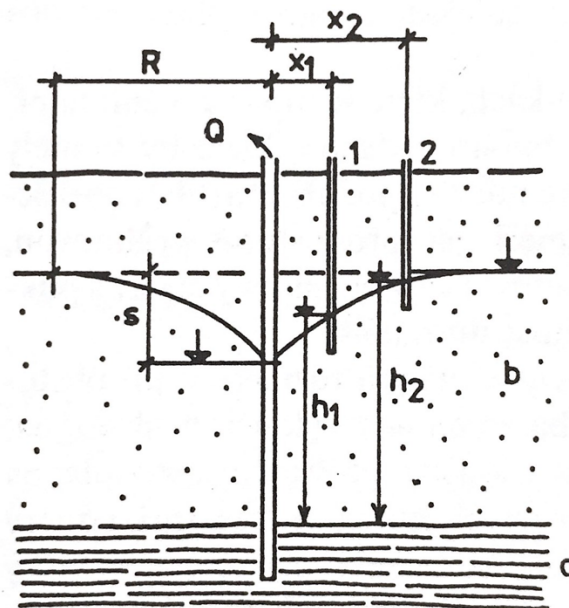
$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h} \text{ [m/s]} \quad (2)$$

Z výsledků laboratorních zkoušek získáváme jen zúžený pohled na filtrační vlastnosti hornin. Zkušební vzorek nemůže poskytovat reprezentativní hodnoty pro celý horninový masiv včetně puklin, které jsou pro jeho propustnost rozhodující. Dalším nedostatkem zkušebního vzorku je jeho homogenita a nutnost vyloučení hrubších zrn vzhledem k malým rozměrům propustoměru. Často také dochází k vyplavování jemné frakce. To je důvodem, proč se hodnoty až řádově odlišují od hodnot zjištěných terénními zkouškami. [3]

2.3. Terénní hydrodynamické zkoušky

Tyto zkoušky stanovují koeficient filtrace, který se nejvíce blíží skutečnosti, jelikož bere geologické prostředí jako celek. Patří mezi ně zkoušky čerpací, stoupací, nálevové, vtláčeční a další. Principem je měření množství vody odebírané nebo přidávané do vrtů v daných časových intervalech a sleduje se změna hladiny.

Čerpací zkoušky se řídí podle ČSN 73 6614 a provádí se nepřetržitým odčerpáváním podzemních vod, které je zakončené stoupací zkouškou. Ta spočívá ve sledování zpětného vracení podzemní vody do původního stavu. [3]



Obr. 6 - Depresní kužel na volné hladině podzemní vody při čerpání z dokonalé studny
a – počevní izolátor, b – kolektor, 1, 2 – piezometry, R – poloměr deprese, Q – čerpané množství (vydatnost), s – pokles hladiny [3]

Čerpací zkouška s konstantní vydatností začíná s vytvořením měřicího vrtu, okolo kterého se umístí piezometry do na sebe kolmých rovin, tzv. hydrologického kříže, kdy jedna rovina by měla být rovnoběžná s předpokládaným směrem proudění podzemních vod. Následně je z vrtu čerpána voda a z čerpaného množství a naměřených hloubek je vyhodnocen koeficient filtrace. Zkouška je ovlivněna horninovým složením v široké oblasti v dosahu depresního kužele. Vyhodnocený koeficient filtrace pak charakterizuje průměrnou hodnotu propustnosti v oblasti s rozdílnými strukturními poměry. [3]

V případě, že zavodněný kolektor leží nad nepropustnými horninami a studna prochází až do ní, jedná se o dokonalou studnu. (Obr. 6) Podle Dupuita platí:

$$k = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{x_2}{x_1} \text{ [m/s]} \quad (3)$$

Pokud studna nezasahuje do nepropustné oblasti v podloží, jedná se o hydraulicky nedokonalou studnu (Obr. 7). V takovém případě poskytuje jen přibližné výsledky a v praxi se odhadem zvětší vydatnost přibližně o 20% přítokem v dnu. [3]

Sledujeme-li pouze hladinu vody ve studni, bez využití pozorovacích vrtů, upraví se Dupuitova rovnice:

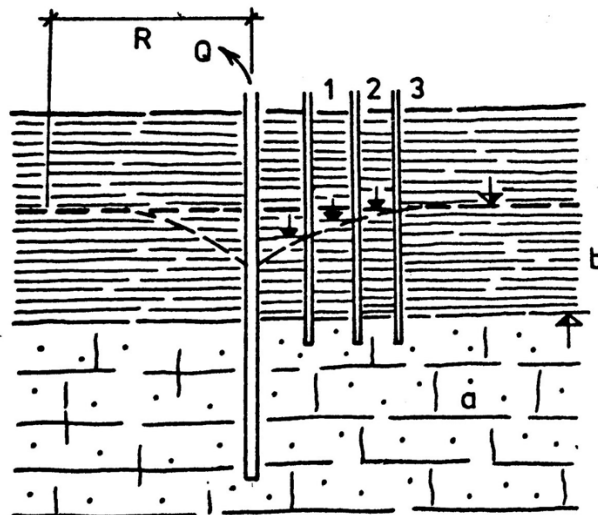
$$k = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \ln \frac{R}{r} \text{ [m/s]} \quad (4)$$

kde H – výška vodní hladiny mimo dosah depresního kužele [m]

h – výška vodního sloupce v čerpací studni [m]

R – poloměr depresního kužele [m]

r – poloměr studny [m]



Obr. 7 - Depresní kužel na piezometrické úrovni napjaté podzemní vody při čerpání
 a – kolektor, b – stropní izolátor, 1, 2, 3 – piezometry, R – depresní poloměr [3]

Nejčastěji se v praxi měří dvě hloubky h_1 a h_2 při dvou rozdílných čerpaných množstvích Q_1 a Q_2 , kdy platí [3]:

$$k = \frac{Q_2 - Q_1}{\pi} \frac{\ln R - \ln r}{h_1^2 - h_2^2} [m/s] \quad (5)$$

Nicméně dosah depresního kužele R neznáme a nemůžeme zjistit. K jeho určení však lze použít empirické vzorce, které berou v potaz jeho závislost na předem odhadnutém koeficientu filtrace a na velikosti snížení hladiny ve studni.

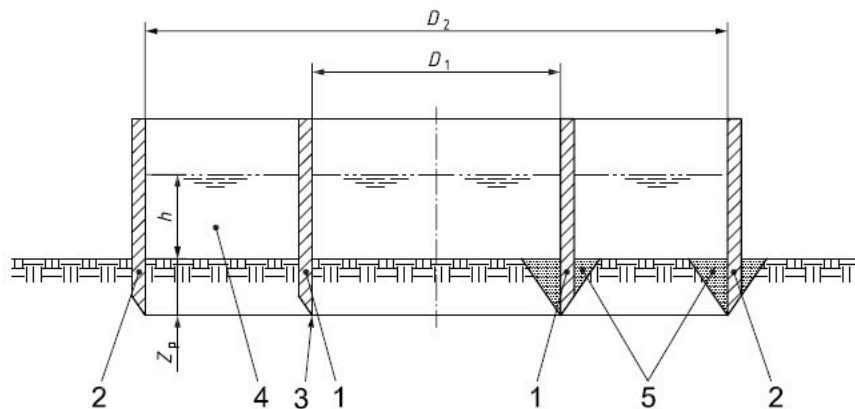
Čerpací zkoušky patří mezi nejpřesnější zkoušky propustnosti, ale jsou zdlouhavé a finančně náročné. Slouží nejen pro stanovení koeficientu filtrace, ale i pro ověření zásob podzemních vod. [3]

Vsakovací a nálevové zkoušky nám poskytují pouze orientační hodnoty koeficientu filtrace. Jejich principem je měření množství vody vsáknuté do horninového prostředí za určitý čas, které je přímo úměrné jeho propustnosti. [3]

3. Zařízení pro stanovení propustnosti hornin

3.1. Dvouválcový infiltrometr

Tato metoda patří mezi nejjednodušší metody infiltračních testů pro celou řadu aplikací. Řídí se dle normy ČSN EN ISO 22282-5. Norma stanovuje požadavky na rozměry měřicího zařízení a samotný průběh měření.



Obr. 8 - Dvouválcový infiltrometr, 1 – vnitřní válec, 2 – vnější válec, 3 – břit, 4 – objem vody, 5 – těsnící materiál, z_p – penetrační hloubka, h – výška hladiny [5]

Dvouválcový infiltrometr (Obr. 8) se skládá ze dvou soustředných válců o rozměrech doporučených normou. Válcce jsou zaraženy do hloubky alespoň 50 mm a do vnitřního válce je umístěna děrovaná deska (Obr. 10), sloužící k odečítání poklesu hladiny a zároveň zabraňující rozplavení povrchu zeminy při doplňování vody. [6]



Obr. 9 - Zarážení válců [6]



Obr. 10 - Dvouválcový infiltrometr [6]

Po zarážení válců (Obr. 9) se zaplaví mezikruží i vnitřní válec současně, do výšky vyššího hrotu ve vnitřním válci. V tu chvíli se začne měřit čas infiltrace až po dosažení menšího hrotu. Ve chvíli, kdy dosáhne hladina menšího hrotu se запиše hodnota času a voda se znovu dolije po dosažení vyššího hrotu. Měření časového úseku se opakuje přibližně 25~50krát nebo po dosažení lineárního úseku kumulativní infiltrace, kdy se stabilizuje rychlost infiltrace. [6]

Naměřené hodnoty jsou zapisovány do předem připravené tabulky a následně jsou vyhodnoceny pomocí Philipových rovnic infiltrace. [6]

$$i(t) = \sqrt{St} + At \quad (6)$$

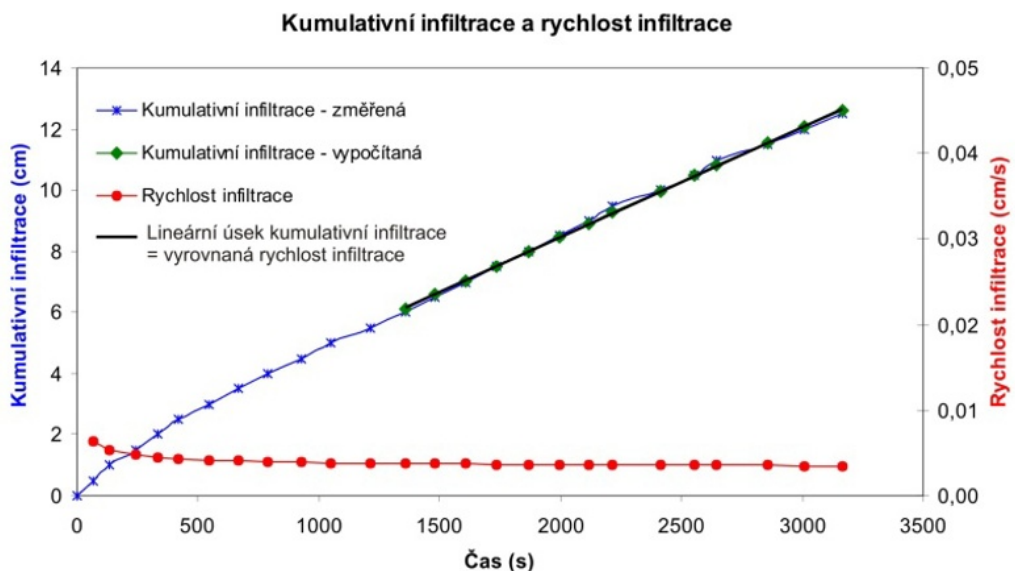
$$v(t) = \frac{1}{2\sqrt{St}} + A \quad (7)$$

Kde $i(t)$ je kumulativní infiltrace, S je sorptivita, t je čas a A je parametr.



Obr. 11 - Proces měření vsakovací zkoušky [6]

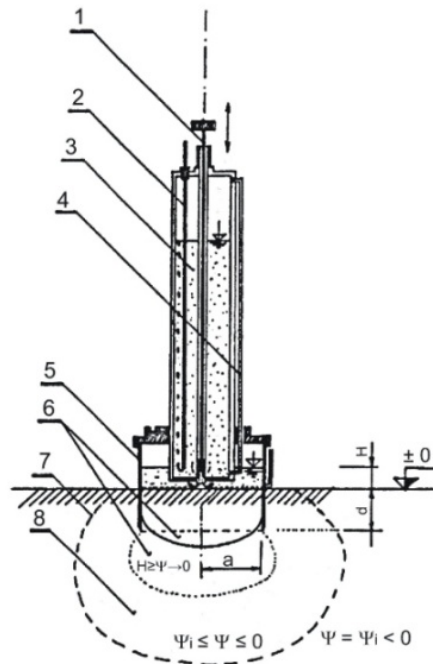
Grafické zpracování terénního experimentu může vypadat následovně (Obr. 12). V pozdějším čase měření je rychlost infiltrace konstantní a svou hodnotou se blíží nasycené hydraulické vodivosti. Z popisu a fotografií lze usoudit, že se jedná především o zdlouhavý a náročný experiment vyžadující součinnost většího počtu lidí. Zkouška je považována za fyzicky velmi náročnou, vzhledem k zaražení válců do země, následného vytažení a nutnosti přinést si vlastní zdroj vody. [6]



Obr. 12 - Grafické zobrazení kumulativní infiltrace a rychlosti infiltrace [6]

3.2. Tlakový infiltrometr

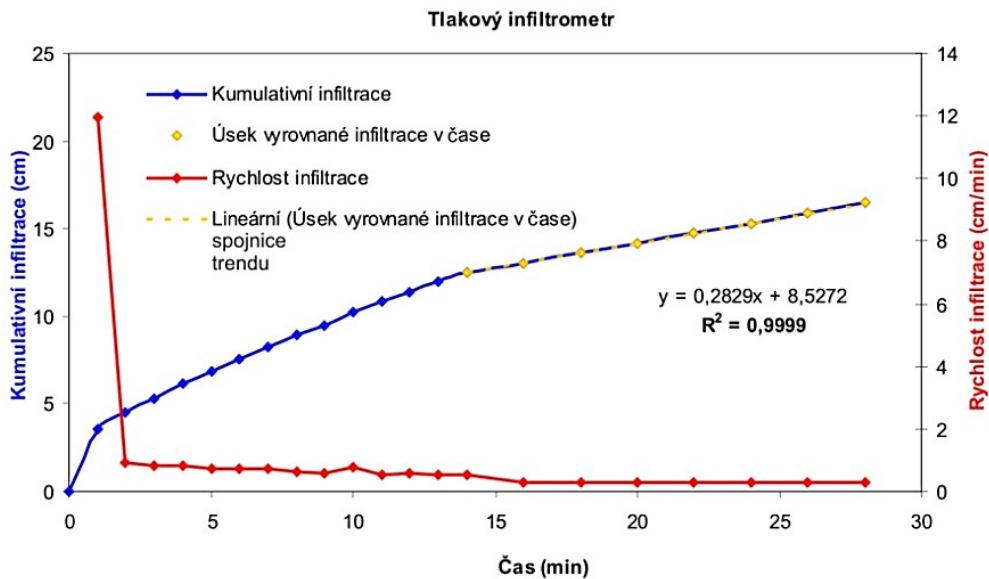
Jedná se o jednoduchý infiltrometr Mariottova typu, fungujícím na mechanicko-hydraulickém principu, bez nutnosti vnějších zdrojů energie (Obr. 13). Zařízení je kompaktní a snadno přenosné a méně náročné na obsluhu než u dvouválcového infiltrometru. S dobrou přesností jsme schopni měřit kumulativní infiltraci vody z rezervoáru.



Obr. 13 – Schéma tlakového infiltrometru, 1-pístový ventil, 2-trubička nastavení tlakové výšky H , 3-vodní rezervoár, 4-plexisklová trubice, 5-kovový válec, 6-saturovaná zóna, 7-čelo zvlhčení, 8-zóna zvlhčení [7]

Měření začíná zaražením infiltračního válce a vnitřním průměru 150 mm do hloubky po úroveň vodoznaku. Na povrch půdy ve válci položíme před každým měřením porézní hmotu proti rozplavení povrchu při měření a rovnoměrnějšímu roznesení vody v průřezu infiltračního válce. Poté se válec osadí samotným infiltrometrem a zásobník (3) se doplní vodou z přenosné nádoby. Po otevření ventilu (1) dojde k vytopení infiltračního válce se stopkami měří čas a sleduje se stoupaní vody ve vodoznaku. Zaznamená se čas ustálení hladiny ve vodoznaku infiltračního válce a v infiltrometru se začne odečítat pokles hladiny za určitý časový úsek.

Průběh měření kumulativní infiltrace a rychlostí může vypadat následovně (Obr. 14). [6]



Obr. 14 - Kumulativní infiltrace a rychlost infiltrace [6]

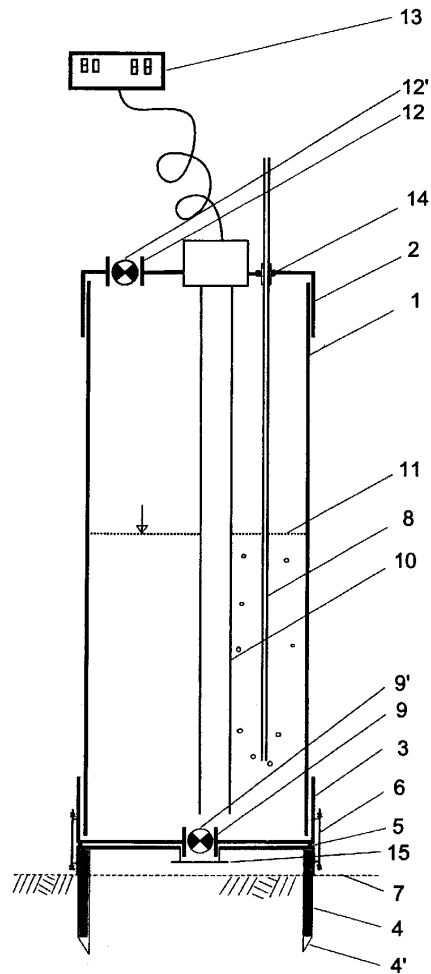
Výsledné hodnoty koeficientu filtrace „k“ jsou pak použity ke kvalifikování půdy pomocí (Tab. 1).

3.3. Přetlakový infiltrometr

Obě předchozí metody s sebou nesou určité nevýhody. V případě dvouválcového infiltrometru se jedná o nízkou produktivitu měření a v případě tlakového infiltrometru jde o členitost soupravy, nízkou přesnost měření a nemožnost data automaticky ukládat. V dnešní době je kladen důraz na automatické a přesné zaznamenávání a ukládání naměřených dat. [8]

Přetlakový infiltrometr vychází z tlakového infiltrometru a stejně tak funguje na principu jednoduché Mariottovy nádoby, kdy je kontinuálně měřen pokles hladiny zásobníku vody v průběhu infiltrace do půdního povrchu (Obr. 15). Infiltrace tak probíhá za působení konstantního hydrostatického tlaku.

Předpokladem této vsakovací zkoušky je, že voda je do půdy přiváděna stejnou rychlostí, jakou se vsakuje. Naměřená data jsou sbírána pomocí přesného elektronického hladinoměru a ukládána v připojeném dataloggeru. Výhodou přetlakového infiltrometru je jeho kompaktnost, snadná manipulovatelnost, nenáročnost a vysoká přesnost měření rychlosti infiltrace. [9]



Obr. 15 - Schéma přetlakového infiltrometru, 1-zásobník vody, 2-horní příruba, 3-dolní příruba, 4-prstenec, 4'-břit prstence, 5-pryžové těsnění, 6-spojovací úchyty, 7-povrch půdy, 8-zavdušňovací trubička, 9-výtokový otvor, 9'-uzávěr výtokového otvoru, 10-kapacitní hladinové čidlo, 11-úroveň hladiny vody, 12-nalévací otvor, 12'-uzávěr nalévacího otvoru, 13-záznamová jednotka, 14-těsnící kroužek, 15-usměrňovací destička [8]

4. Pohony měřicího zařízení

V této aplikaci zařízení pro vsakovací zkoušku je nutné zautomatizovat celý proces zatláčování a vytlačování infiltračního válce. Od pohonu je vyžadováno vyvození tlačné i tažné síly odhadnuté z provedeného měření na velikost přibližně 10 kN a velikost zdvihu přibližně 200 mm.

4.1. Lineární aktuátory

Čistě elektrickou variantou může být použití lineárních aktuátorů (Obr. 16). Jedná se o zařízení, které převádí rotační pohyb nízkonapěťového stejnosměrného motorku na lineární pohyb. Pohony tak zvládají obousměrné zatížení v rozmezí 200 – 15 000 N. Aktuátory jsou tichou a čistou možností pro vyvození lineárního pohybu s přesným ovládním polohy. V jistém ohledu jsou šetrné k životnímu prostředí, jelikož nemají žádné průsaky a mají nízkou spotřebu energie. Zároveň jsou aktuátory kompaktní a odpadá použití komplikované soustavy hydraulických prvků jako jsou hadice, rozvaděče, ventily a čerpadla. [10]

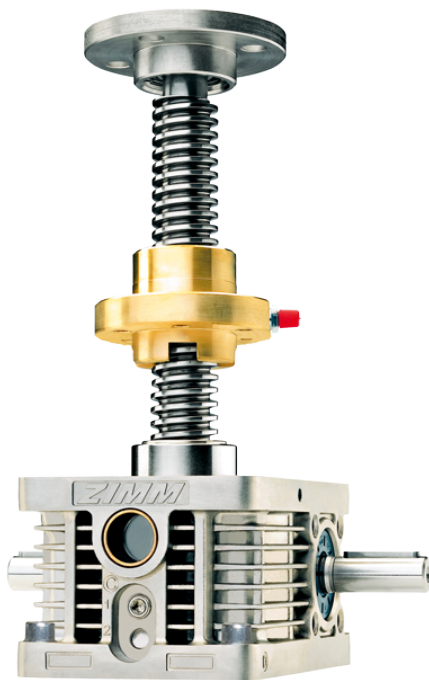


Obr. 16 - Lineární aktuátor LINAK LA37 [10]

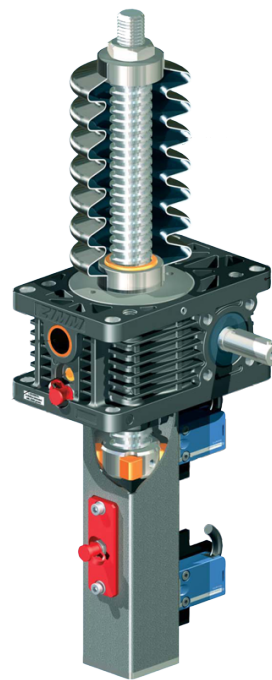
Nevýhodou lineárních aktuátorů je vysoká pořizovací cena včetně nutnosti pořízení dalších ovládacích modulů.

4.2. Zdvižná převodovka

Elektro-mechanickou variantou může být také použití zdvižné převodovky, skládající se ze šnekového převodu s trapézovým šroubem. Dodávají se v různých variantách, a to s rotujícím trapézovým šroubem (Obr. 17), kdy je nutné zajistit vedení posuvné matice, nebo jako posuvný trapézový šroub (Obr. 18), jehož vedení je zajištěno v profilu pomocí vodícího kamene.



Obr. 17 - Zdvižná převodovka Zimm s rotujícím šroubem



Obr. 18 - Zdvižná převodovka Zimm s posuvným šroubem

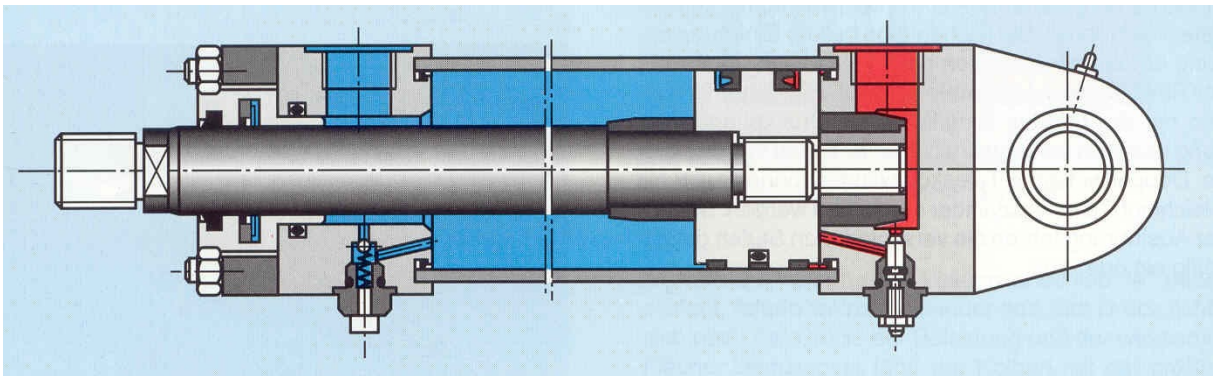
Pro zdvižné převodovky značky Zimm je příznačná modularita a široká škála možností výbavy. Jako pohon lze použít v podstatě jakýkoli elektromotor (střídavý, stejnosměrný, servomotor). Konec trapézového šroubu může být osazen přírubou, okem, kloubovým okem nebo závitem s maticí.

Mezi hlavní výhody zdvižných převodovek s trapézovými šrouby patří robustní konstrukce, která tlumí rázy a vyznačuje se tichým provozem. Konstrukcí je také dána samočinná samosvornost v klidovém stavu převodovky. Své uplatnění nachází v aplikacích, kde je potřeba vysoká zdvihová síla v kombinaci s nenáročností na údržbu a přesným řízením polohy.

4.3. Hydraulický válec

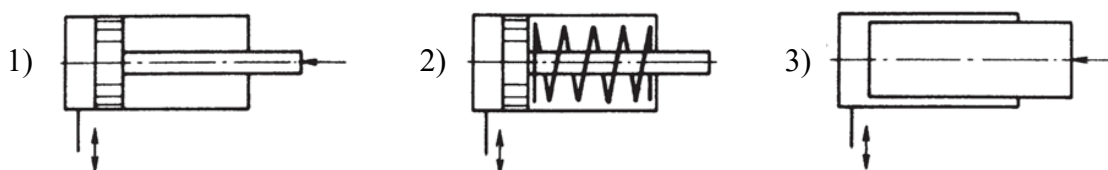
Patří do kategorie přímočarých hydromotorů a patří k hydraulickým prvkům, které s požadovanou silou a rychlostí vykonávají lineární pohyb (Obr. 19). Hlavními konstrukčními parametry pro návrh hydraulického válce je vnitřní průměr válce a zdvih.

Konstrukčně jsou hydraulické válce konfigurovány širokou škálou možností. Lze vybírat různé přípojovací a upevňovací prvky, typy spojení horního a spodního víka, nebo počet činných směrů.



Obr. 19 - Konstrukční řešení hydraulického válce

Jednočinný hydraulický válec koná rovnoměrný přímočarý pohyb přivedením tlaku pod píst. Vratný pohyb je pak způsoben vnější silou nebo pružinou. Speciálním případem jednočinného hydraulického válce je hydromotor s plunžrem (Obr. 19-3), kdy průměr pístu je totožný s průměrem pístnice.



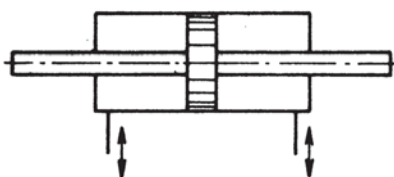
Obr. 20 - Jednočinné provedení hydraulického válce:
1) jednočinný, 2) jednočinný s pružinou, 3) jednočinný s plunžrem [11]

Dvojitý hydraulický válec koná rovnoměrný přímočarý pohyb v obou směrech přivedením kapalin pod nebo nad píst. U hydraulických válců s jednostrannou pístnicí je nutné brát v potaz rozdíl rychlostí při zasouvání a vysouvání pístnice. Důvodem je rozdílná plocha pod a nad pístem, kde je nutné odečíst průřez pístnice.



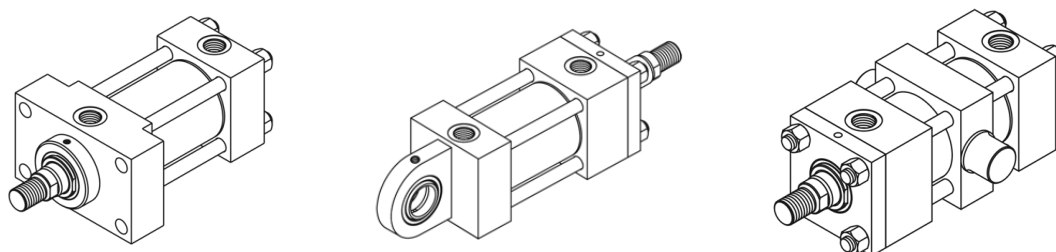
*Obr. 21 - Dvojičinné provedení hydraulického válce:
1) dvojičinný, 2) dvojičinný diferenční [11]*

Zároveň tato diference také způsobuje nerovnoměrnou akumulaci hydraulické kapaliny, jelikož ve vysunutém stavu je obsah hydraulického válce větší než při zasunutém. Tato vlastnost může být odstraněna použitím oboustranné pístnice, která umožňuje dosažení stejné rychlosti, při stejném průtoku a stejných sil při stejném tlakovém spádu (Obr. 22). V některých případech může být tato konstrukce nevhodná z hlediska kompaktnosti hydraulického systému a zástavbových rozměrů.



Obr. 22 - Hydraulický válec s oboustrannou pístnicí [11]

Hydraulické válce mohou být dále děleny dle způsobu uchycení. Pístnice může být v provedení kloubového ložiska, vnějšího nebo vnitřního závitu, nebo také pomocí tzv. plovoucího spoje, který funguje jako rychloupínací spoj. Pro spojení s rámem se nabízejí možnosti uchycení pomocí kloubových ložisek, čepů, závitových děr nebo přírub na předním nebo zadním víku (Obr. 23). Typy uchycení se řídí mezinárodní normou ISO 6020-2:2015.



Obr. 23 - Výběr z typů uchycení hydraulického válce dle ISO 6020-2:2015 [12]

5. Technické normy

5.1. Norma ČSN EN ISO 22282-5

Geotechnický průzkum a zkoušení – Hydrotechnické zkoušky – Část 5: Vsakovací zkoušky

Rozsah

Tato 5. část normy ISO 22282 upřesňuje požadavky pro půdní průzkum ve smyslu infiltračních zkoušek jako část geotechnického průzkumu s odkazem na EN 1997-1 a EN 1997-2. Infiltrační zkoušky slouží k zjištění propustnosti povrchů nebo malých hloubek půd. Jedná se o jednoduché zkoušky ke zjištění koeficientu permeability. Měření může probíhat metodou ustálené výšky hladiny i proměnlivé výšky hladiny.

Zkouška je založena na principu měření povrchového vertikálního průtoku vody, který se dále infiltruje do půdy. Povrchové měření infiltrace zahrnuje měřicí zařízení typu jednoválcového nebo dvouválcového s otevřeným nebo uzavřeným typem měření. Měřicí zařízení a měřicí procedury jsou přizpůsobeny odlišným rozsahům koeficientu filtrace. Otevřené systémy jsou přizpůsobeny rozsahu od 10^{-5} až do 10^{-8} m/s a uzavřené systémy jsou určeny pro hodnoty menší než 10^{-8} .

Testy mohou v závislosti na podnebných podmínkách a koeficientu filtrace půdy trvat pouhých pár minut nebo dokonce několik dní.

Tato část normy ISO 22282 definuje terminologii a měřené parametry. Specifikuje požadavky na vybavení, definuje procedury měření pro odlišné měřicí techniky a stanovuje výsledky měření. Je aplikovatelná pro stavební inženýrství, hydrogeologii, hydropedologii a další.

Vybavení pro provádění terénních zkoušek, dle ČSN EN ISO 22282-5:

- měřicí zařízení (Infiltrometr)
- zařízení pro měření tlaku, výšky hladiny a infiltrovaného objemu vody jako funkci času
- zařízení pro zatlačení měřicího zařízení
- zdroj vody a čerpadlo
- stopky pro měření času nebo nahrávací zařízení
- (volitelně) zařízení pro úpravu měřeného povrchu

5.1.1. Požadavky na jednoválcový uzavřený systém

Pro vybraný jednoválcový uzavřený systém (přetlakový infiltrometr) norma předepisuje velikost průměru infiltračního válce $D_1 = 200$ mm. Víko uzavřeného infiltrometru musí být opatřeno vypouštěcím ventilem a plnicím ventilem na vodu. Válec musí být opatřen tuhým, filtrujícím a porézním materiálem, který doléhá na měřený povrch a zabraňuje rozplavení půdy a zlepšuje rovnoměrnost infiltrace. Zařízení musí být zkonstruováno tak, aby měření probíhalo v zatlačeném stavu, v minimální hloubce 50 mm.

Pro měření při konstantní výšce hladiny bude využito principu Mariottovy nádoby, pro zajištění konstantního hydrostatického tlaku v měřicím válci. Infiltrované množství bude měřeno pomocí průtokoměru s rozlišením minimálně 0,1 ml.

5.1.2. Průběh měření

Doba měření závisí na koeficientu filtrace, nasycení půdy vodou a na velikosti výšky hydraulického sloupce.

- a) Napuštění měřicího zařízení čistou vodou
- b) Připojení hydraulického sloupce měřeného od povrchu půdy
- c) Měření infiltrovaného objemu vody
- d) Stanovení dosažení saturace půdy vodou
- e) Měření infiltrační rychlosti po dosažení saturace půdy

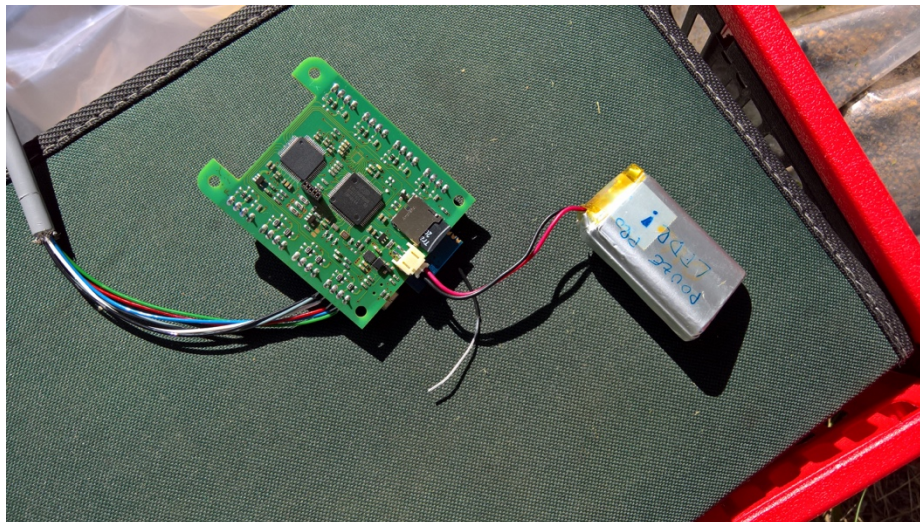
Výsledkem měření za konstantní hladiny je infiltrovaný objem v závislosti na čase.

6. Měření

Zkušební experiment zatlačování infiltrometru probíhal v areálu společnosti Chemcomex a.s. na předem připraveném stanovišti s různými vzorky hornin. Cílem experimentu bylo získání orientační hodnoty síly potřebné k zatlačení infiltračního válce do půdy. Norma ČSN EN ISO 22282-5 určuje zatlačení válce do hloubky minimálně 50 mm a minimální průměr infiltračního válce 200 mm.

6.1. Přístroje a vybavení

Pro určení síly potřebné k zatlačení infiltračního válce byl použit tlakový snímač HBM U10M, se zabudovaným plným tenzometrickým můstkem. Tlakový snímač byl vyveden do záznamového modulu LPDR s bezdrátovým připojením (Obr. 24), které přenášelo data dále do PC. Finální grafický výstup byl zpracován pomocí předpřipraveného programu v softwaru Matlab. Všechny přístroje byly kalibrovány v laboratořích Ústavu konstruování a částí strojů.



Obr. 24 - Záznamový modul LPDR s bezdrátovým připojením

Celá měřicí soustava byla tvořena ocelovou trubkou o vnitřním průměru 200 mm a stěnou 3 mm. Trubka byla opatřena zbrošeným břitem pod úhlem 30° a narýsovanou stupnicí od 0 do 120 mm pro usnadnění odečítání hloubky zatlačení. Na trubku byl volně položen ocelový výpalek o rozměru 15x130x350 mm, který sloužil jako podpora tlakového snímače HBM U10M (Obr.21). Jako externí zdroj tlakové síly bylo využito pojízdného vrtacího zařízení (Obr. 25) z areálu firmy Chemcomex, a.s.



Obr. 25 - Pojízdné vrtací zařízení RDBS mini (zdroj tlakové síly)

6.2. Popis měření

Měření probíhalo v areálu firmy Chemcomex, a.s. na předem připravených vzorcích půdy (Obr. 26), na kterých bylo provedeno celkem sedm měření. Vzorky byly vybrány podle nejpravděpodobnějšího výskytu při budoucím používání měřicího zařízení. Ve skutečnosti je ale složení půdy vždy nahodilé a málo kdy se setkáme s homogenní strukturou půdy, tak jako v takto předem připravených podmínkách. Jednalo se konkrétně o vzorky třídy F4 (jíl písčitý), S4 (písek hlinitý) a S3 (písek s příměsí jemnozrnné zeminy) dle následujících tabulek (Tab.2, Tab.3). Třídy S se obecně klasifikují jako písčité zeminy a třídy F se klasifikují jako jemnozrnné zeminy dle ČSN 73 1001.



Obr. 26 - Zkušební vzorky půdy (zleva) S3, S4, F4

Třída ČSN 73 1001	Název typu zeminy	Symbol	Kvalitativní znaky			Poloha vůči čáře A na diagramu plasticity
			obsah f (%)	Cu	Cc	
S1	písek dobře zrněný	SW	< 5	> 4	1 - 3	-
S2	písek špatně zrněný	SP	< 5	< 4	< 1..>3	-
S3	písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S-F	5 – 15	-	-	-
S4	písek hlinitý	SM	15 – 35	-	-	POD
S5	písek jílovitý	SC	15 - 35	-	-	NAD

Tab. 2 - Klasifikace písčitých zemin (ČSN 72 1001) [4]

Třída ČSN 73 1001	Název typu zeminy	Symbol	Kvalitativní znaky			
			obsah f (%)	g : s	Poloha vůči čáře A na diagramu plasticity	wL (%)
F1	šterkovitá hlína	MG	35-65	g > s	POD	-
F2	jíl šterkovitý	CG	35-65	g > s	NAD	-
F3	hlína písčitá	MS	35-65	g > s	POD	-
F4	jíl písčitý	CS	35-65	g > s	NAD	-
F5	hlína s nízkou plasticitou	ML	> 65	-	POD	< 35
	hlína se střední plasticitou	MI	> 65	-	POD	35-50
F6	jíl s nízkou plasticitou	CL	> 65	-	NAD	< 35
	jíl se střední plasticitou	CI	> 65	-	NAD	35-50
F7	hlína s vysokou plasticitou	MH	> 65	-	POD	50-70
	hlína s velmi vysokou plasticitou	MV	> 65	-	POD	70-90
	hlína s extrémně vysokou plasticitou	ME	> 65	-	POD	> 90
F8	jíl s vysokou plasticitou	CH	> 65	-	NAD	50-70
	jíl s velmi vysokou plasticitou	CV	> 65	-	NAD	70-90
	jíl s extrémně vysokou plasticitou	CE	> 65	-	NAD	> 90

Tab. 3 - Klasifikace jemnozrnných zemin (ČSN 72 1001) [4]

Po příjezdu k měřenému stanovišti bylo s ohledem k vysoké vlhkosti půdy způsobené deštěm v předchozích dnech upuštěno od měření na vzorku třídy F4. Ten dle Tab.1 patří mezi nepropustné zeminy a měření v takto nasáknuté půdě by postrádalo vypovídající hodnotu. Při prvotním ohledání bylo možné infiltrační válec zatlačit pouze rukou. Proto byl jako náhradní vzorek určeno místo nedaleko měřeného stanoviště s nahodilým složením zhutnělé půdy porostlé travinou. To daleko přesněji dokáže zohlednit skutečné podmínky měření v terénu. Později byl také odebrán půdní vzorek (Obr. 27) pro zjištění přibližného složení půdy.



Obr. 27 - Náhradní vzorek neznámého složení

Při měření na náhradním vzorku neznámého složení bylo vyzorováno tvoření „drnů“, ulpívajících ve vnitřní části infiltračního válce. To je dáno zejména dlouhodobým zhutněním půdy, soudržností kořenů travin a nižší hodnotou vlhkosti na rozdíl od předem připravených vzorků. To dalo vzniknout myšlence na vyhazovač drnů, potřebný pro zautomatizovaný proces měření.

6.3. Průběh měření

Průběh všech měření probíhal stejným způsobem. Na zkušební vzorek byl umístěn infiltrační válec, přes který byla umístěna podložka pro silový snímač, měřicí stanice byla připojena k záznamovému zařízení a po odzkoušení komunikace mezi záznamovým zařízením a PC, byl silový snímač předzatížen (Obr. 28). Následně byla trubka pomalým pohybem zatlačována do zkušební vzorku půdy, až po dosažení konce měřicí stupnice nebo po dosažení maximálních možností stroje.

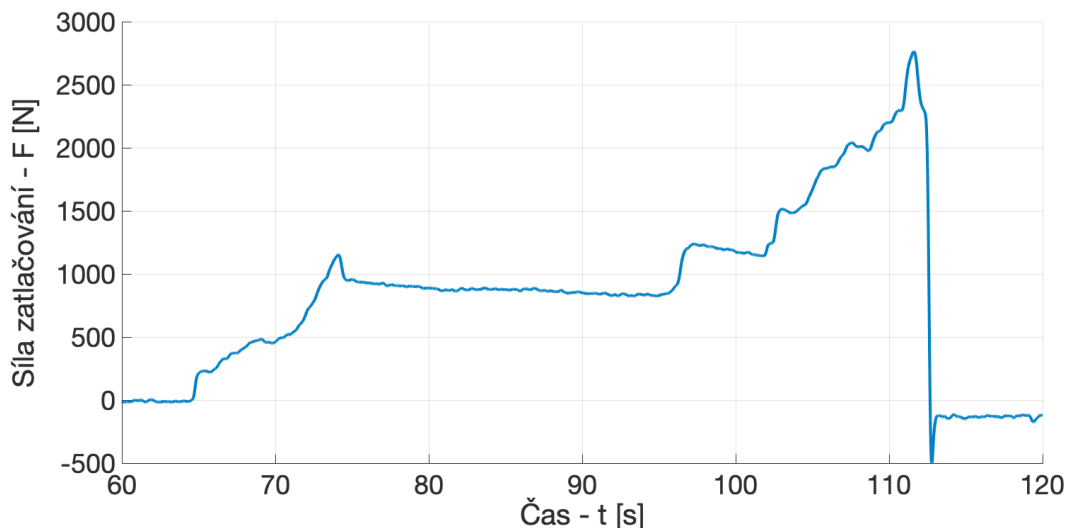
Pro zpětné vyhodnocení průběhu měření a zjištění hodnot dosažené hloubky byl pořízen videozáznam každého měření. Grafy měření byly vyhodnoceny dle programu v aplikaci Matlab. Průběhy odpovídají střední hodnotě síly zbavené šumu.



Obr. 28 - Měřicí soustava – infiltrační válec, podložka, silový snímač, vrtací zařízení

6.3.1. Měření č.1 – vzorek S3

Zatlačování probíhalo plynule až po dosažení hloubky 50 mm v čase $t_{50} = 74$ s. Maximální síla dosažená k zatlačení infiltrační trubky do této hloubky odpovídá $F_{50} = 1150$ N. V této poloze došlo k přerušení zatlačování z důvodu úpravy zkušebního terénu.

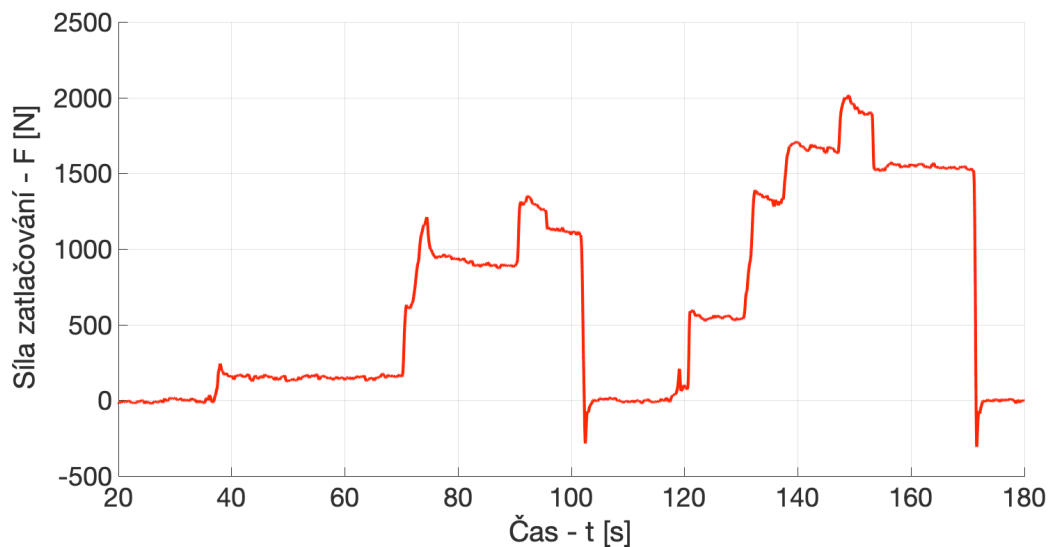


Obr. 29 - Průběh měření č.1 - vzorek S3

Po drobné úpravě došlo k dalšímu nárůstu síly až do maximální hodnoty $F_{\max} = 2765$ N v čase $t_{\max} = 112$ s, odpovídající hloubce zatlačení 110 mm.

6.3.2. Měření č.2 – vzorek S4

První lokální extrém nastal v čase $t_1 = 74$ s, odpovídající síle $F_1 = 1210$ N a hloubce zatlačení trubky $h_1 = 30$ mm. Zatlačování bylo dále na moment přerušeno z důvodu kontroly možné kolize měřící soustavy. Poté bylo zatlačování obnoveno až do hloubky 50 mm dané normou, to odpovídá času $t_{50} = 91$ s a síle $F_{50} = 1310$ N. Následně došlo k úpravě měřící soustavy tak, aby nedošlo ke kolizi s přehrádkou mezi zkušebními vzorky. Zatlačování pokračovalo do maximální hodnoty v čase $t_{\max} = 149$ s a síle $F_{\max} = 2020$ N, odpovídající hloubce 115mm.



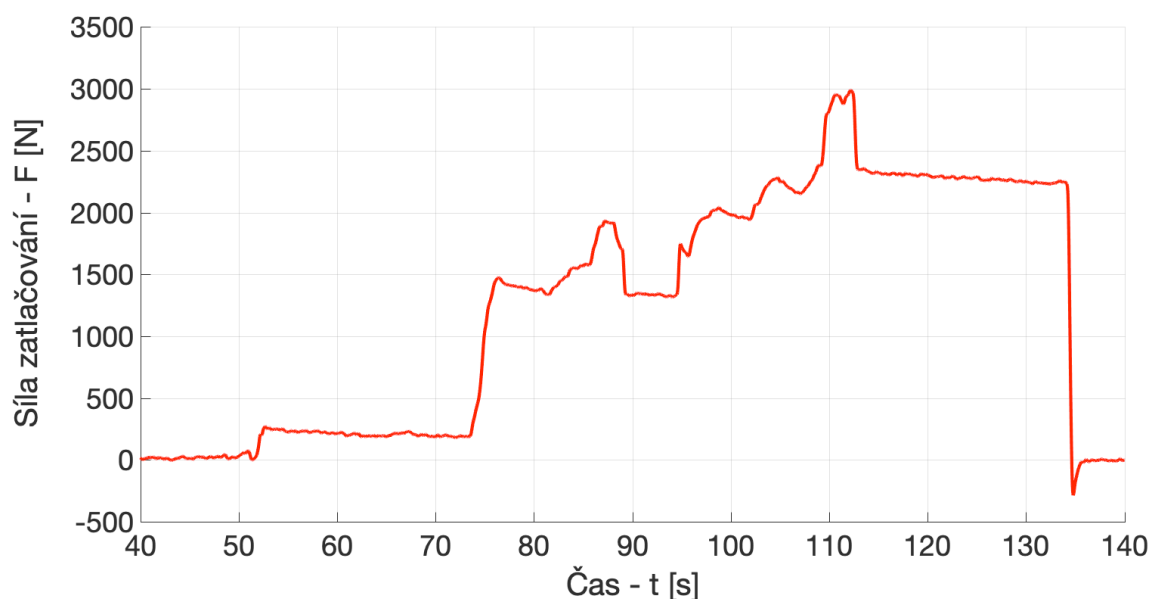
Obr. 30 - Průběh měření č.2 - vzorek S4



Obr. 31 - Měření č.2 - vzorek S4

6.3.3. Měření č.3 – vzorek S4

Měření probíhalo ve výrazných skoků. Síla průběžně rostla od počátku měření a rostla až do maxima o hodnotě $F_{\max} = 3000$ N, v čase $t_{\max} = 112$ s. Při této hodnotě jsme dosáhli úplného zanoření měřicí stupnice v hloubce 120 mm. Zatlačovací hloubka 50 mm daná normou, byla dosažena při hodnotě zatlačovací síly $F_{50} = 1400$ N, v čase $t_{50} = 82$ s.



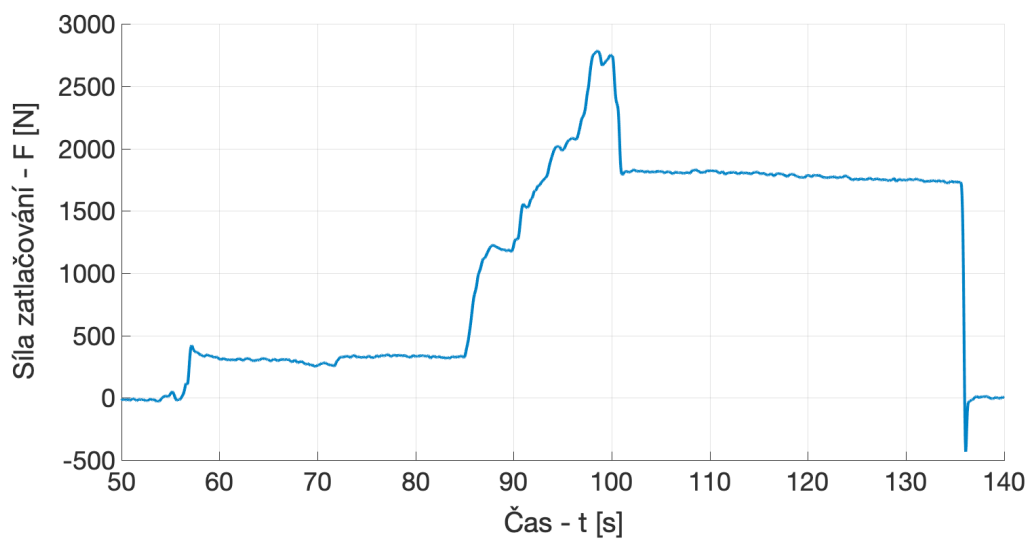
Obr. 32 - Průběh měření č.3 - vzorek S4



Obr. 33 - Měření č.3 - vzorek S4

6.3.4. Měření č.4 – vzorek S3

Kvůli nerovnému terénu v počátku zatlačování, nevnikl válec do zkušební vzorku kolmo ve vertikálním směru. K následnému zlomu a vyrovnání válce došlo až v hloubce zatlačení odpovídající 90 mm. K dosažení normované hloubky 50 mm došlo v čase $t_{50} = 92$ s, při hodnotě síly $F_{50} = 1500$ N. Poté došlo k vysokému nárůstu působící síly až do globálního extrému $F_{\max} = 2785$ N v čase $t_{\max} = 99$ s, odpovídající hloubce zatlačení 90 mm a následnému vyrovnání osy válce. Vyrovnání zapříčinilo prudké klesání zatlačovací síly na hodnotu $F = 1800$ N v čase $t = 102$ s, kdy došlo k úplnému zatlačení měřicí stupnice.



Obr. 34 - Průběh měření č.4 - vzorek S3



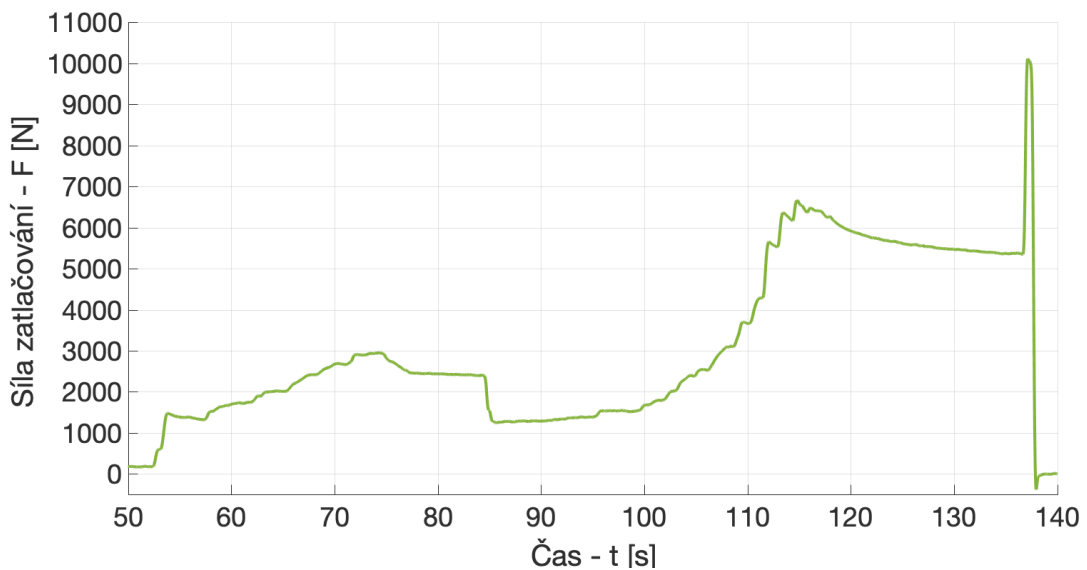
Obr. 35 - Vyosení zatlačovaného válce



Obr. 36 - Vyrovnání zatlačovaného válce

6.3.5. Měření č.5 – drn

Skokový nárůst síly na počátku do hodnoty síly $F_1 = 1500$ N, v čase $t_1 = 54$ s a mírném poklesu stále nedokázal proniknout prvotní vrstvou udusané traviny. Hodnota síly stále rostla do hodnoty $F_2 = 2950$ N, v čase $t_2 = 74,5$ s odpovídající hloubce $h_2 = 30$ mm. Následně došlo ke skokovému zrychlení zatlačování v čase $t_{50} = 85$ s, kdy došlo k dosažení normované hloubky 50 mm, při síle $F_{50} = 1500$ N. Pokračováním působení síly jsme získali exponenciální průběh zatížení až do globálního maxima $F_{\max} = 6650$ N, v čase $t_{\max} = 115$ s a hloubce 90 mm.



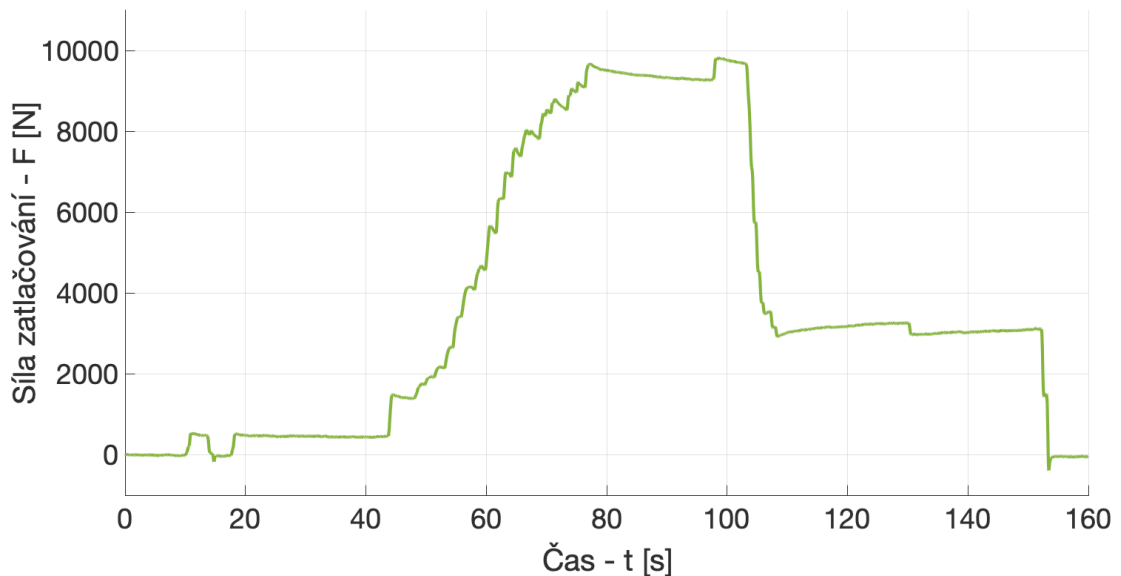
Obr. 37 - Průběh měření č.5 - vzorek "drn"



Obr. 38 - Měření č.5 - vzorek "drn"

6.3.6. Měření č.6 – drn

Při tomto měření došlo k zatačení válce do hloubky 20 mm, kde došlo k destabilizaci sestavy a měření muselo být ukončeno. Po bližším ohledání měřeného místa bylo usouzeno, že k neprůkaznému měření došlo kvůli překážce v dráze zatačovaného válce. Břit infiltračního válce narazil na vrchní násep štěrku.



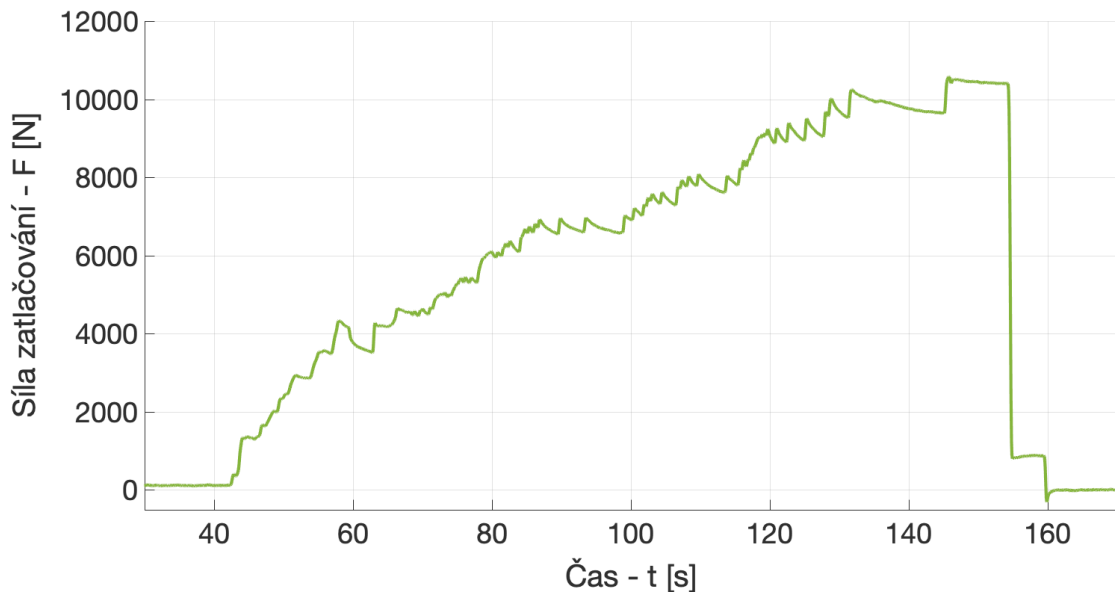
Obr. 39 - Průběh měření č.6 - vzorek "drn"



Obr. 40 - Měření č.6 s nahodilým složením půdy a výskytem kamení

6.3.7. Měření č.7 – drn

Průběh měření vykazoval téměř konstantní hodnoty růstu zatěžování, až do svého maxima o velikosti $F_{\max} = 10200$ N, v čase $t_{\max} = 132$ a odpovídající hloubce 80 mm. Hloubka zatlačení válce 50 mm daná normou byla dosažena v čase $t_{50} = 91$ s, odpovídající silou $F_{50} = 6900$ N.



Obr. 41 - Průběh měření č.7 - vzorek "drn"



Obr. 42 - Měření č.7 - vzorek "drn"

6.4. Výsledky měření

	Vzorek S3		Vzorek S4		Vzorek "drn"	
	Měření 1	Měření 2	Měření 1	Měření 2	Měření 1	Měření 2
Síla F_{50} v hloubce 50mm [N]	1150	1 500	1 310	1 400	2 950	6 900
Maximální síla F_{max} [N]	2 765	2 785	2 020	3 000	6 650	10 200
Hloubka zatlačení F_{max} [mm]	110	90	115	120	90	80

Tab. 4 – Výsledky naměřených hodnot

6.5. Vyhodnocení

Experimentálním měřením na zkušebním stanovišti byly naměřeny hodnoty odpovídající síle zatlačení do normované hloubky pro provedení infiltrační zkoušky. Veškerá měření jsou podpořena videozáznamy, ze kterých lze podpořit pozorování průběhů zatěžování, a zejména určit hloubku zatlačování válce. Pro každý vzorek byly provedeny dvě vypovídající měření.

U vzorku S3 v opakovaném měření bylo dosaženo poměrně odlišných hodnot velikostí sil k dosažení normované hloubky 50 mm. To je přisouzeno zejména vyosením válce vlivem nerovnosti zkoušené půdy v měření č.4. Maximální hodnoty sil jsou ale naopak velmi podobné a lze tak usoudit, že pro homogenní prostředí vzorku S3 odpovídá hodnota zatlačovací síly do normované hloubky o velikosti přibližně $F_{50} = 1\,200$ N.

U vzorku S4 nedošlo při měření k žádným anomáliím, a to lze pozorovat i na výsledcích měření. Obě síly potřebné k zatlačení válce do normované hloubky 50 mm jsou velmi podobné. Blíží se hodnotě $F_{50} = 1\,350$ N pro měřený vzorek S4.

Vzorek „drn“, neboli vzorek s náhodným složením půdy, porostlý travinami s občasným výskytem štěrku. Tento vzorek nejdůvěryhodněji nasimuloval reálné měření v terénu. Na výsledcích lze pozorovat velmi výrazné rozdíly v hodnotách sil potřebných pro zatlačení do normované hloubky 50 mm. To je dáno zejména nehomogenním složením půdy, které je nutné při měření zohlednit. Při reálném měření bude nutné, aby zařízení rozpoznalo překážku v cestě zatlačování válce. Limitem zatlačování bude samotná hmotnost zařízení a musí být zabráněno tomu, aby se zařízení na zatlačovaném válci zvedlo, pokud by stálo na zpevněném povrchu. Dalším problémem může být při vytahování válce z půdy jeho ucpávání drny. Je nutné zajistit vyhadzovací mechanismus drny pro opakovatelné a bezobslužné měření.

7. Konstrukční návrh

Úkolem od zadavatelů ze společnosti Chemcomex, a.s. bylo vytvoření autonomního vozítka se zařízením pro měření infiltrace vody do půdy a vyhodnocení koeficientu filtrace. Hlavními požadavky byla snadná obsluha stroje a jeho servis, možnost převozu na přívěsném vozíku o ložné ploše 2x1 m a zvládnání pohybu v náročném terénu bez použití spalovacího motoru.

V této aplikaci zařízení pro vsakovací zkoušku je nutné zautomatizovat celý proces zatlačování a vytlačování infiltračního válce. Od pohonu je tedy vyžadováno vyvození tlačné i tažné síly přibližující se vlastní tíze samotného vozidla. V závislosti na použitém podvozku a světlosti uloženého válce je předpokládána velikost zdvihu okolo 200 mm.

Na začátku projektu bylo důležité zvolit mezi variantou čistě elektrického pohonu a pohonu elektro-hydraulického. Díky dobrým vztahům mezi fakultou strojní ČVUT a společností Bobcat nám byl nabídnut kompletní pásový podvozek včetně hydromotorů. To naše rozhodování nasměrovalo cestou hydraulického pohonu, který byl také jedním z požadavků na měřicí zařízení společnosti Chemcomex, a.s.

7.1. Soupis technických omezení a požadavků

Vozítko:

- Hmotnost

Ovlivňuje zejména velikostí síly zatlačování. Tíha celého stroje by měla být vždy větší, než je zatlačovací síla infiltračního válce v opačném případě by mohlo dojít ke zdvižení celého stroje. Samotné zatlačovací zařízení musí být ale i tak schopno takové síly dosáhnout a být na to dimenzované, nicméně velikost síly musí být regulována tak aby nedošlo k nežádoucímu efektu zdvižení stroje. Naopak maximální hmotnost zařízení je limitována únosností přívěsného vozíku.

- Rozměry vozítka

Stejně jako u hmotnosti je limitujícím faktorem rozměr přívěsného vozíku a obecně platí že čím menší konstrukce, tím lépe. V úvahu musí být brána v potaz i snadná dostupnost pro údržbu a servis zařízení.

- Rychlost

Z hlediska bezpečnosti při manipulaci s takto těžkým zařízením bude rychlost omezena na hodnotu 5 km/h.

- Zajištění polohy

Zajištění polohy je neméně významnou funkcí. Bude využívána na přivěsném vozíku, ve svahu a zejména při měření, kdy bude válec zatlačen do země. K zajištění polohy bude využito hydraulického systému a jako parkovací brzda bude fungovat hydraulický zámek.

- Kapacita baterií

Kapacita baterií byla zvolena s ohledem na zvládnutí celodenního měření v terénu. Její omezení je zejména finanční a také hmotnostní. S použitím lithiových baterií výrazně stoupá jejich cena, ale zaručují až dvojnásobný počet dobíjecích cyklů oproti olověným. Zároveň mají oproti olověným i nižší hmotnost.

- Kapacita vodních nádrží

Dle testování vsakovací funkce měřicího válce, realizovaného zadavateli ze společnosti Chemcomex, bylo určeno nejvyšší množství vody potřebné k vsakování o hodnotě 2 l. Přímou nad měřicí válec byla umístěna nádrž o objemu 70 litrů, která je tak schopna na jedno naplnění provést až 35 měření. Díky dostatečnému množství vody bude možné využít vodu i jiným způsobem.

- Ovladatelnost

Měřicí zařízení bude ovládané z rádiového vysílače podobnému RC soupravám. Ovládání bude řídit rychlost i směr vozidla a při dosažení zkoumaného terénu bude dálkově provedeno spuštění měření.

- Obsluha

Obsluha zařízení bude velmi jednoduchá. Hlavními požadavky na obsluhu bude doplnění vody v nádrži pro měření a dobití baterií. Jediným náročnějším úkonem pak může být naložení a vyložení zařízení na přivěsný vozík.

- Servis

Pro snadný servis zařízení bude nutné zařízení zkonstruovat tak, aby byly všechny kritické komponenty snadno dostupné. Jedná se zejména o elektrický a hydraulický okruh včetně samotného infiltračního válce.

Měřicí zařízení:

- Výměna měřicího válce

Výhodou bude snadná vyměnitelnost měřicího válce po jeho opotřebení, popřípadě výměna za jiný typ měřicího zařízení. Stroj se pak může stát víceúčelovým.

- Počet měření

Vyplývá zejména z objemu nádrže na vodu, která byla určena na velikost 70 litrů, která je tak schopna poskytnout vodu pro přibližně 35 měření.

- Vyhodnocení

Vyhodnocení bude probíhat v záznamovém zařízení měřicího válce. Po dosažení konstantní rychlosti infiltrace bude možné měření ukončit a vyhodnotit koeficient filtrace. Data bude možné sbírat jak ze záznamové jednotky, tak přes bezdrátový příjem dat.

- Stírací mechanismus

Jelikož měření probíhá v půdách různého složení a různé vlhkosti, bude nutné zajistit dostatečné očištění vnitřní a vnější strany válce. Časem by mohlo docházet k většímu zanášení nečistot a zhoršení podmínek pro úspěšné zatlačení měřicího válce.

- Vyhazovač drnů

Z měření, které jsme absolvovali společně se zástupci společnosti Chemcomex bylo zjištěno, že v případě měření v půdě o neznámém složení, porostlé travinami a částečně zhutněné je náchylné na ulpívání drnů v měřicím válci. Toto je nutné odstranit zejména kvůli potřebě měření opakovat a neklást další nároky na obsluhu.

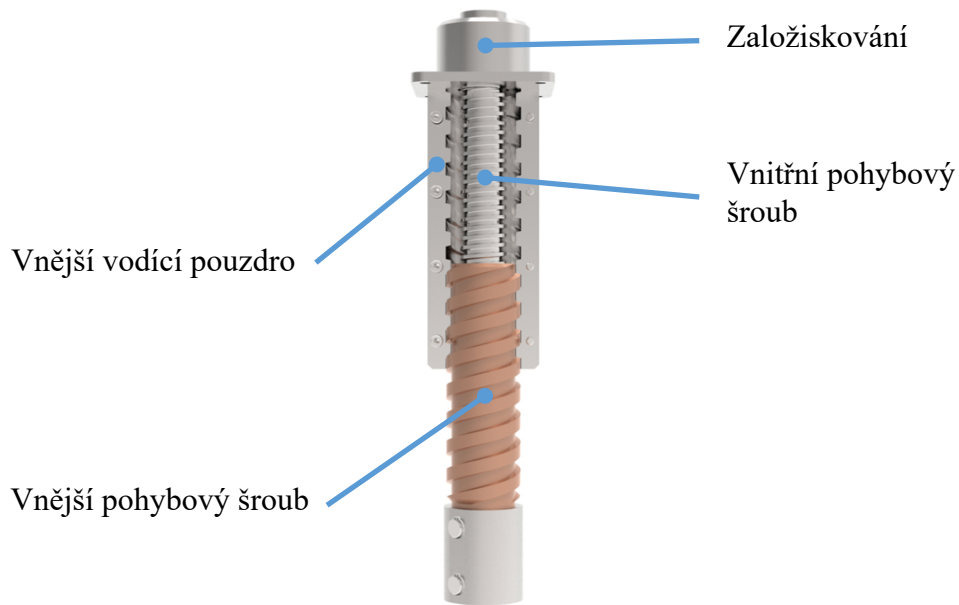
7.2. Prvotní návrh

U prvotního návrhu bylo počítáno s čistě elektrickou verzí vozítka včetně zatlačovacího zařízení. Tento návrh byl vytvořen ještě před provedeným měřením sil zatlačování. Byla proto snaha o co nejefektivnější zatlačení válce do půdy a nebylo jisté jakých sil bude nutno zatlačovacím zařízením dosáhnout. Konfigurace se tak skládala z elektromotoru a převodového ústrojí které pohánělo dvoušroubový mechanismus (Obr. 43). Ten si lze snadněji představit jako pohybovou matici vedenou po šroubové dráze. Snahou bylo zlepšit šroubovým pohybem zatlačovací proces.



Obr. 43 – Dvoušroubový infiltrometr

Dvoušroubový mechanismus se skládá z vnitřního pohybového šroubu se samosvorným trapézovým závitem, který je přímo spojen s výstupem převodovky a koná čistě rotační pohyb. Vnější pohybový šroub má vnitřní závit shodný s vnitřním pohybovým šroubem a jeho vnější závit je nesamosvorný trapézový (Obr. 44). Ten slouží jako šroubové vedení ve vnějším pouzdru, které je pevně spojeno s rámem.



Obr. 44 - Dvoušroubový mechanismus

Uvažován byl malý závit TR50x10 a velký závit TR80x60 (P30).

$$i_p = \frac{s_2 - s_1}{s_1} [1] \quad (8)$$

$$h = \frac{s_2}{i_p} [mm] \quad (9)$$

Kde (s_1) je stoupání malého závitu a (s_2) je stoupání velkého závitu. Zdvih šroubového mechanismu je vyjádřen pomocí (h). Pro převod mechanismu (i_p) pak platí:

$$i_p \neq 0 \quad (10)$$

$$i_p > 0 - \text{jiné směry otáčení} \quad (11)$$

$$i_p < 0 - \text{jiné směry otáčení} \quad (12)$$

$$i_p > |1| - \text{převod do pomala} \quad (13)$$

$$i_p < |1| - \text{převod do rychla} \quad (14)$$

Vzhledem k obtížné výrobě tohoto mechanismu a zjištění, že šroubový pohyb zatlačování by naopak mohl mít negativní vliv na těsnost důsledkem rozrušení půdy v oblasti měření, bylo dále rozhodnuto pro čistě lineární pohyb zatlačování. Ten byl pozdějším měřením sil zatlačování uznán za dostatečný a nadále už jsme tento mechanismus nebrali v potaz.

7.3. Konstrukce

Po načerpaných poznatcích z proběhlého měření na připravených vzorcích byla dále provedena řada úprav. Z měření dvouválcovou metodou se stala metoda měření přetlakovým infiltrometrem, která vyžaduje menší množství vody pro měření a rozměrově je průměr válce o polovinu menší. Zároveň vzešel požadavek i na vyhadzovač drnů, který musel být v této verzi již zakomponován. Celková konstrukce měřicího zařízení (Obr. 45) byla navrhována s ohledem na všechny předem zmíněné omezení a požadavky viz. Kapitola 6.1. Zároveň konstrukce probíhala ve spolupráci s kolegou Filipem Haasem, který pracoval na vývoji podvozku pro měřicí zařízení, kde bylo potřeba navrhnout vhodné připojovací rozměry a celkově rozvrhnout konfiguraci stroje.

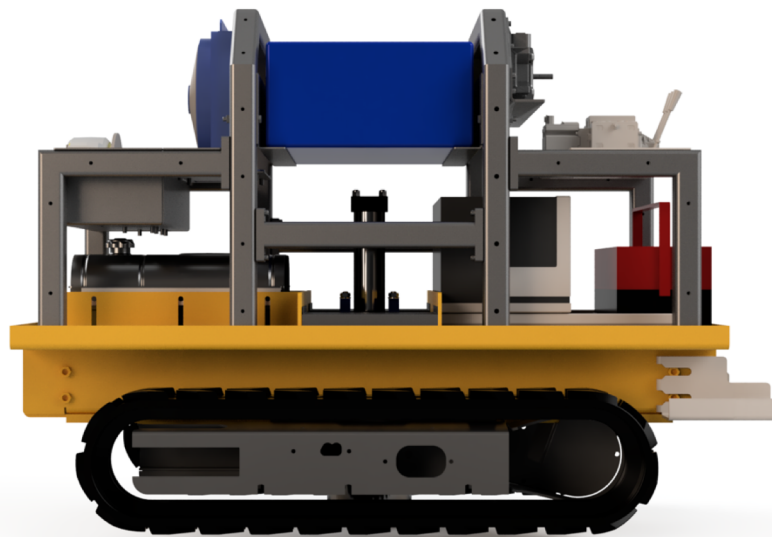


Obr. 45 - Vsakoň měřicí zařízení

Na Obr. 21 je kompletní vozítko s měřicím zařízením, skládající se z hlavního robustního podvozku, ke kterému jsou uchyceny pásy poskytnuté společností Bobcat. K pásovému pohonu jsou napevno připojeny dva obdélníkové profily. Ty jsou opatřeny ocelovými segmenty a překrycí ohraňovaný plech jsou přišroubovány do základní desky podvozku. Pásový pohon je již od výrobce opatřen dvěma hydromotory s „rychlým“ a „pomalým“ okruhem umožňující transportní nebo pracovní rychlost vozítka. Na podvozek je přišroubována konstrukce ze svařených čtvercových profilů, které slouží pro další uchycení příslušenství, funkčních prvků a v neposlední řadě také kapotáže.

Jak už bylo dříve řečeno, rozhodli jsme se pro koncept hydraulicky poháněného a ovládaného stroje se zdrojem v trakčních lithiových bateriích umožňujících dojezd 3–5 km a přibližně 15-20 měřících cyklů. Tato koncepce je výhodná zejména v univerzálnosti využití hydraulických prvků a tím možnosti později připojit libovolné příslušenství. To bylo hlavní motivací pro hydraulicky poháněnou soustavu.

Stroj je opatřen olejovou nádrží se vstupním filtrem, ze které je okruh dále vyveden do hydraulického čerpadla, které dále tlakuje okruh směrem k rozvaděči. Ten je tří sekční s možností délkového ovládnání, kdy dvě sekce obstarávají oba pásové pohony a třetí sekce je pracovní, určená k zatlačování infiltrometru. Pracovní okruh pro zatlačování může být ve funkci pouze při zastaveném podvozku, to je zahrnuto přímo v konstrukci rozvaděče.

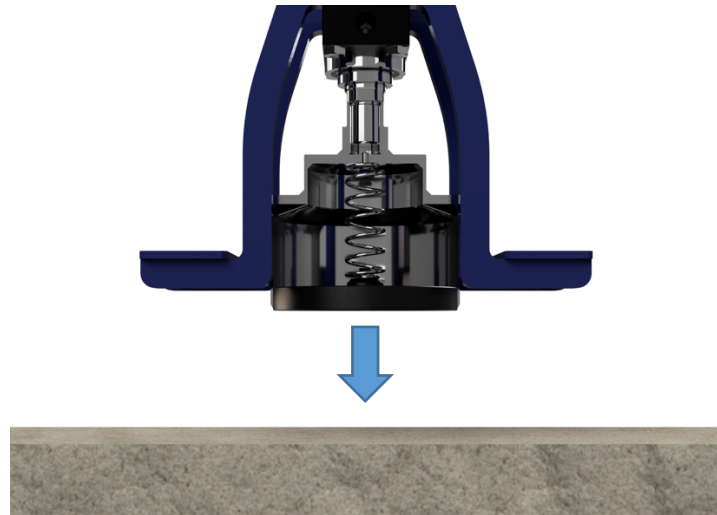


Obr. 46 - Vsakoň měřící zařízení

Pro pracovní fázi měření je rám opatřen nádrží na vodu a zařízením fungujícím na principu Mariottovy nádoby, sloužící k zalévání infiltračního válce vodou a zároveň bude sloužit jako měřící a vyhodnocovací jednotka. Toto zařízení bude poskytnuto společností Chemcomex, a.s. Sestava infiltrometru byla navržena s ohledem na minimalizování zástavbového prostoru v podvozku vozítka, dobrého přístupu přívodu vody a také umístění v těžišti stroje. To bylo jedním z nejdůležitějších kritérií při konfiguraci příslušenství stroje s ohledem na možné výměny baterií, výměny oleje v hydraulickém okruhu a běžnou údržbu stroje.

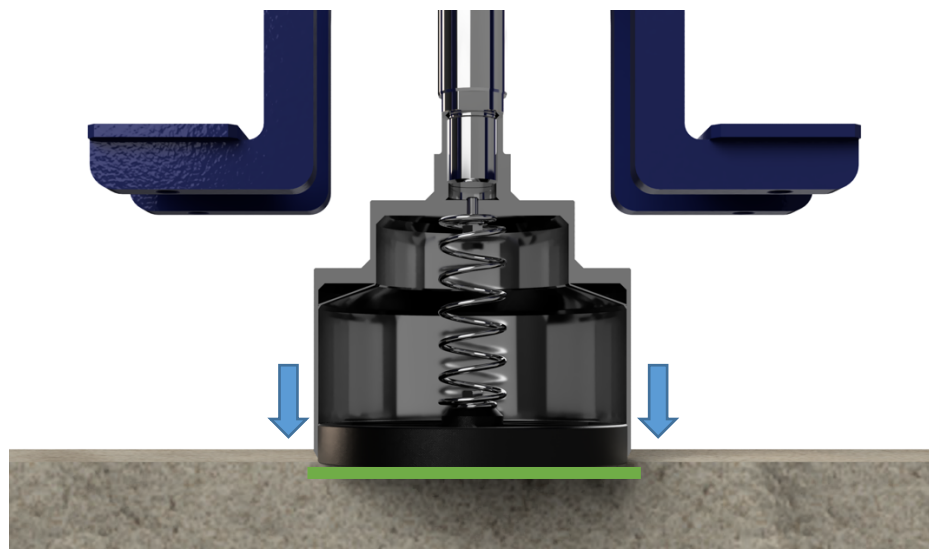
Popis funkce infiltrometru:

Měření v terénních podmínkách bude začínat vyložením měřicího zařízení z transportního přívěsného vozíku a doplněním zásoby vody. Po zvolení vhodného místa měření bude vozítko pomocí dálkového ovládání přemístěno a zajištěno v daném místě. Následně bude rozvaděč přesunut do pracovní polohy, kdy začne probíhat zatlačování infiltračního válce do země.

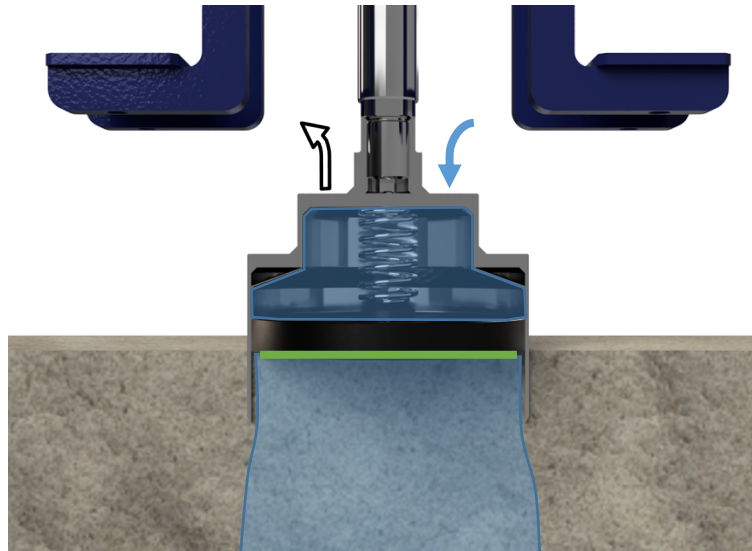


Obr. 47 - Převozní poloha infiltračního válce

V okamžiku dosednutí válce s vyhazovačem drnů na povrch měřeného místa dojde k počátku stlačení pružiny (Obr. 48). Od této chvíle vyhazovač drnů zůstává ve stejné pozici, kdy kolem něho bude dále zatlačen infiltrační válec do hloubky 50 mm, až do nejnižší možné polohy vysunutí hydraulického válce.

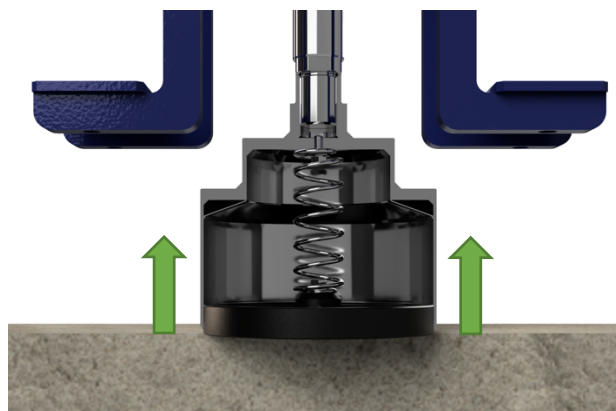


Obr. 48 - Počátek stlačení pružiny



Obr. 49 - Fáze měření

V tomto okamžiku končí fáze zatlačování a přívodem vody do infiltračního válce začíná být plněn vodou, kdy veškerý vzduch z válce odchází vypouštěcím ventilem (Obr. 49). Měření probíhá za konstantní výšky hladiny pomocí měřícího a vyhodnocujícího zařízení dodané společností Chemcomex a.s.

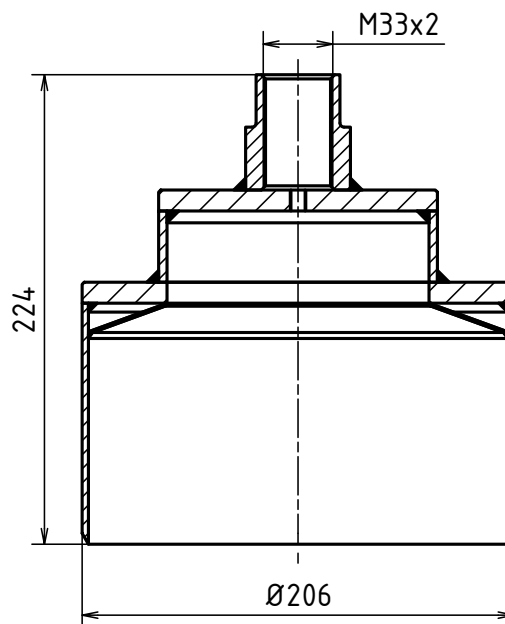


Obr. 50 - Fáze vysunutí

Po skončení samotného měření následuje fáze vysunutí válce z měřené půdy. Obrácením smyslu ovládání dvojčinného hydraulického válce dojde k jeho zasouvání (vysunutí z půdy), kdy vyhazovač drnů zůstává stále přitíštěn k povrchu půdy pomocí síly pružiny a kolem něho se vysouvá infiltrační válec. A to až do okamžiku, kdy dojde k uvolnění pružiny do volné délky, tj. když břit infiltračního válce dosáhne výšky hrany vyhazovače drnů (Obr. 50). Následně je infiltrometr vyzdvihnut do nejvyšší (převozní) polohy.

7.3.1. Infiltrometr

Konstrukce infiltračního válce je řešena jako poměrně jednoduchý svařenec ze dvou ocelových trubek, dvou ocelových výpalků, skruženého plechu a horního uchycovacího členu (Obr. 51). Jako materiál byla zvolena nerezová ocel 1.4307 (X2CrNi 18-9). Jde o austenitickou ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku (0,03 %) a vynikající odolností vůči korozi. Dosahuje pevnosti v tahu $R_m = 500-670 \text{ N/mm}^2$. Je svařitelná i hlubšími průvary nad 5 mm tloušťky a oproti nerezové oceli 1.4301 (X5CrNi 18-10) má zvýšenou odolnost vůči mezikystalové korozi. Její třísková obrobitelnost je navíc velmi dobrá.



Obr. 51 - Svařenec infiltračního válce

Největší trubka o vnějším rozměru 206 mm a tloušťce stěny 3 mm je zkrácena na patřičný rozměr a bude opatřena břitem o úhlu 30°. Koutový svar bude vyvařen z vnitřní strany válce pod kuželovým skruženým plechem. Větší výpalek usazený na velké trubce je vytvořen z polotovaru plechu 12 mm, který je následně oboustranně ofrézován na tloušťku 10 mm a začištěn. Přes tento koutový svar je dále přivařen skružený plech. Tento plech má za úkol při měření dokonale odvést vzduch a zabránit jeho výskytu v měřeném válci.

Menší trubka o vnějším průměru 133 mm a tloušťce stěny 4 mm je zakráčena na potřebnou délku a svařena koutovým svarem z vnitřní strany k menšímu výpalku. Ten je stejně jako větší výpalek z 12 mm plechu a oboustranně ofrézován na konečnou tloušťku 10 mm a začištěn.

Oba svařence jsou k sobě svařeny koutovým svarem na vnější straně mezi velkým výpalkem a malou trubkou. Jako poslední je ke svařenci přivařen horní závitová hlava.

Jelikož se jedná o svařenec z austenitické oceli, je vhodné následně provést proces moření a pasivace. Ten zajistí barevné sjednocení povrchu a obnoví plnohodnotně korozivzdornost oceli. Moření se provádí ve směsi kyseliny dusičné a fluorovodíkové po předchozím odmaštění svařence. Následuje pasivace, která se provádí pomocí oxidační kyseliny a jejím výsledkem je zvýšení korozní odolnosti zejména proti atmosférickým vlivům.

7.3.2. Vyhazovač drnů s porézní strukturou

Původní konstrukce pro vyhazovač drnů byla navržena jako svařenec klece z nerezové oceli, opatřený výplní z porézního materiálu. Jak už bylo popsáno dříve, tato nerezová klec má za úkol přidržet drn v půdě během zatlačování a vytlačování infiltračního válce. Zároveň musí tato konstrukce dovolit propouštění vody do půdy, bez rozplavení povrchu a očistit vnitřní stranu infiltračního válce.



Obr. 52 - Vyhazovač drnů s porézní strukturou (3D tisk)

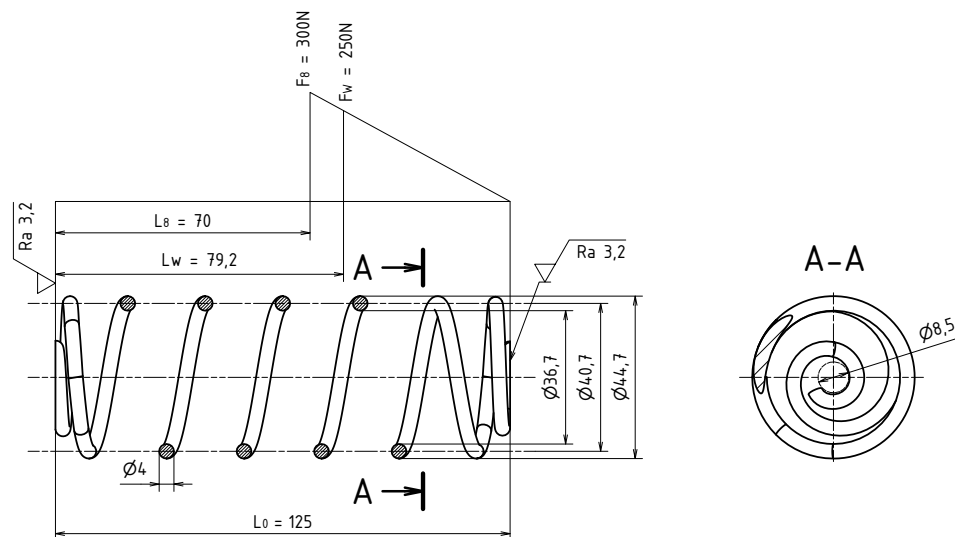
Nynější konstrukce vyhazovače drnů (Obr. 52) je navržena čistě jako jeden 3D tištěný díl z materiálu PETG. Materiál je vhodný pro více namáhané díly a je voděodolný.

Tento porézní kotouč oproti původnímu návrhu tak znatelně snižuje náklady na materiál a samotnou výrobu, při zachování stejné funkčnosti a snadné vyměnitelnosti. Porézní struktura bude jak v původním, tak v nynějším řešení časem zanášena nečistotami, a proto je důležité zachování snadné vyměnitelnosti kotoučů. Ta bude při dobré dostupnosti k podvozku velmi snadná a spočívá ve vytažení kotouče z válce a montáži pouze jedné matice.

K dispozici bude kromě náhradních kotoučů i možnost instalace kotoučů s různou velikostí porézni struktury s ohledem na zkoušenou třídu zeminy. To může být objektem dalšího testování a je to tak ideálním případem pro 3D tištěný díl, kdy zákazníkovi může být poskytnuto řešení takřka na míru do druhého dne. V tomto případě můžeme využít úložných prostor vozítka infiltrometru, kde bude sada vyměnitelných kotoučů.

7.3.3. Pružina

Pružina (Obr. 53) pro tuto aplikaci byla vyrobena na míru potřebám infiltračního válce. Požadavky na pružinu spočívají zejména v jejím zakončení, kdy na obou koncích požadujeme zavřená broušená oka. Ta nám slouží k uchycení vyhazovače drnů v nezátíženém stavu. Pružina tak funguje jako tažně-tlačná, kdy při pracovním zatížení pracuje jako tlačná a pro udržení tíhy vyhazovače drnů v nezátíženém stavu pracuje jako tažná. Síla pro vytlačení drnu byla odhadnuta na základě experimentu na 300 N.



Obr. 53 - Pružina infiltrometru

Materiál pružiny byl zvolen dle nabídky výrobce na 1.8159 (15260), nízkouhlíková ušlechtilá chrom-vanadová ocel hodná k zušlechťování.

Materiálová vlastnosti:

Modul pružnosti ve smyku:	$G = 84\,000 \text{ Nmm}^{-2}$
Modul pružnosti:	$E = 206\,000 \text{ Nmm}^{-2}$
Dovolené namáhání ve smyku:	$\tau_A = 918 \text{ Nmm}^{-2}$

Zadané a volené parametry:

Zatížení při pracovním zdvihu:	$F_8 = 300 \text{ N}$
Pracovní zdvih:	$y = 55 \text{ mm}$
Volná délka pružiny:	$l_0 = 125 \text{ mm}$
Průměr pružiny:	$D = 40 \text{ mm}$
Předběžný průměr drátu	$d = 4 \text{ mm}$

Tuhost pružiny

$$k = \frac{F}{y} = \frac{300}{55} = 5,5 \text{ N/mm} \quad (15)$$

Výpočet průměru drátu a ověření pomocí i-faktoru (16) a K-faktoru (17).

$$i = \frac{D}{d} = \frac{40}{4} = 10 \quad (16)$$

$$K = \frac{i + 0,2}{i - 1} = \frac{10 + 0,2}{10 - 1} = 1,13 \quad (17)$$

$$d_v = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_8 \cdot D \cdot K}{\pi \cdot \tau_A}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{300 \cdot 40 \cdot 1,13}{\pi \cdot 918}} = 3,35 < d = 4 \text{ mm} \quad (18)$$

Zvolený průměr drátu $d = 4 \text{ mm} > d_v = 3,35 \text{ mm}$ a proto **VYHOVUJE**.

Počet aktivních závitů lze vypočítat z rovnice (19). Celkový počet závitů je pak dán rovnicí (20).

$$n = \frac{G \cdot y \cdot d^4}{8 \cdot F_8 \cdot D^3} = \frac{82\,000 \cdot 55 \cdot 4^4}{8 \cdot 300 \cdot 40^3} = 7,7 \cong 8 \text{ závitů} \quad (19)$$

$$z = n + 1,5 = 8 + 1,5 = 9,5 \text{ závitů} \quad (20)$$

Kontrola napětí při pracovním zatížení F_8 dle rovnice (21).

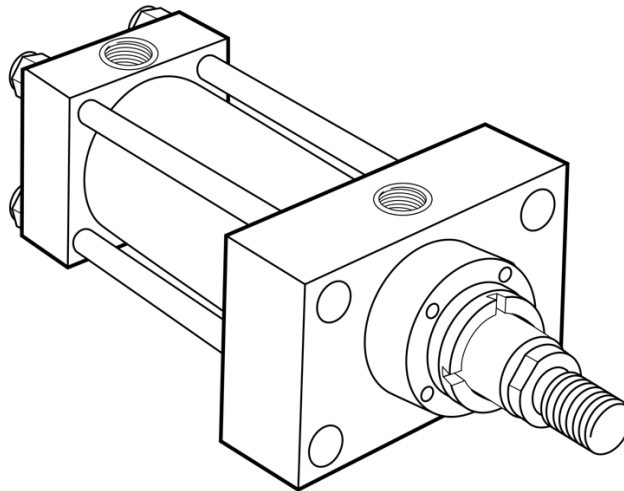
$$\tau = \frac{8 \cdot F_8 \cdot D \cdot K}{\pi \cdot D^3} = \frac{8 \cdot 300 \cdot 40 \cdot 1,13}{\pi \cdot 40^3} = 540 \text{ Nmm}^{-2} \quad (21)$$

Napětí při pracovním zatížení $\tau = 540 \text{ Nmm}^{-2} < \tau_A = 918 \text{ Nmm}^{-2}$. Pružina **VYHOVUJE**.

Výpočet byl následně ověřen návrhovým řešičem v aplikaci Autodesk Inventor 2018.

7.3.4. Hydraulický válec

V původním návrhu byl vybrán dvojčinný hydraulický válec s okem na válci i na pístní tyči osazenými kloubovými ložisky. Toto řešení bylo nevhodné z hlediska velkého vyložení při vysunutém stavu pístnice a také k nutnosti dalšího vedení hydraulického válce vzhledem k uložení v kloubových ložiskách.



Obr. 54 - Hydraulický válec typu ISO ME5 – přední hlava s přírubou [13]

Proto bylo rozhodnuto pro přírubový hydraulický válec (Obr. 54), který je přes konzole pevně přišroubovaný k rámu vozítka a nedovoluje tak oproti předchozímu řešení pohyby či natočení válce mimo jeho osu. Konfigurace hydraulického válce má zdvih 200 mm, průměr pístní tyče je 45 mm a její zakončení je v podobě šroubu se závitem M33x2. Válec je ovládán vlastním okruhem a k hlavnímu rozvaděči je připojen přes BSP přívody.

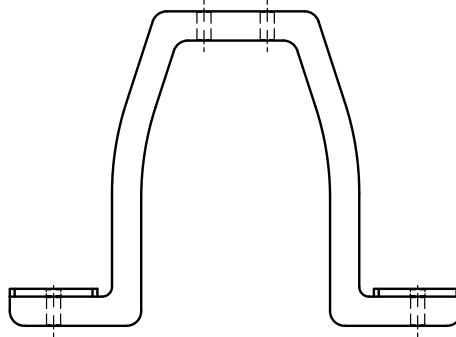
Parametry hydraulického válce:

Průměr válce	- $\varnothing D_v = 63$ mm
Průměr pístnice	- $\varnothing D_p = 45$ mm
Max. pracovní tlak	- $p_{Max} = 215$ bar
Maximální zatížení pístnice při vysunutí	- $F_{max_vys} = 40$ kN (při 120 bar)
Maximální zatížení pístnice při zasunutí	- $F_{max_zas} = 19$ kN (při 120 bar)

7.3.5. Konzole ukotvení

Konzole je konstruována jako svařenec dvou výpalků z plechu S235JR tloušťky 25 mm a dvou výpalků z plechu S235JR tloušťky 8 mm, který slouží k uchycení příruby hydraulického válce k rámu vozítka pomocí šroubů M14x90 (Obr. 55).

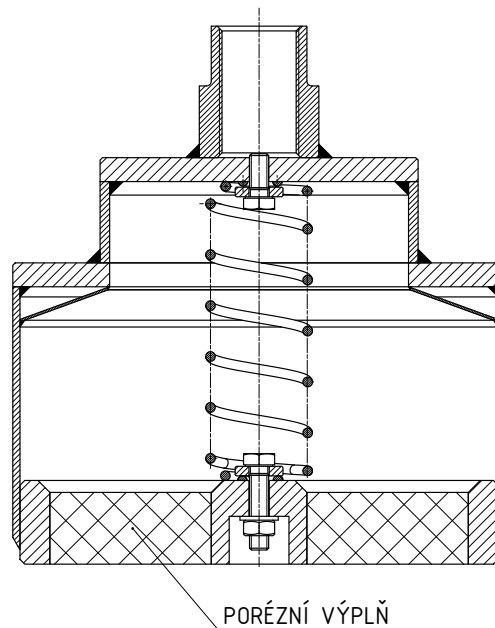
Jejich atypický tvar je navržen vzhledem k co nejmenším zástavbovým rozměrům a co nejjednodušší výrobě. Konstrukce byla následně zkontrolována v MKP řešiči a bude blíže popsána v další kapitole.



Obr. 55 - Konzole ukotvení hydraulického válce k rámu vozítka

7.3.6. Sestava infiltrometru

Sestava infiltrometru se skládá ze svařence, vyhadzovače drnů s porézní strukturou, pružiny s uzavřenými oky, podložek, šroubů a matic (Obr. 56). Montáž pružiny je provedena přišroubováním šroubu M8x18 s podložkou ke svařenci. Následně je na konec pružiny umístěn šroub s podložkou a vytažením pružiny směrem z válce dosáhneme přístupu k hlavě šroubu. Tím je umožněna montáž vyhadzovače drnů pomocí šroubu M8x35. Přívod vody a odvod vzduchu je do svařence vyvrtán až po svaření a je umístěn v malém výpalku.



Obr. 56 - Infiltrační válec

7.3.7. Zástavba infiltrometru

Pro sestavení infiltrometru a následnou zástavbu do pojízdného vozítka je nutné zajistit dobrou dostupnost k podvozku. Konstrukce kotev umožňuje připojení pouze ze spodní strany podvozku, a to včetně instalace válce. Zástavba začíná přišroubováním hydraulického válce ke konzoli ukotvení pomocí šroubů M14x90 a matic M14. Následně se tato sestava přišroubuje ze spodu podvozku pomocí šroubů M14x80 a matic M14. Ve vysunuté poloze hydraulického válce následuje jeho osazení infiltračním válcem, který je k němu přišroubován přípojovacím závitem M33x2.



Obr. 57 - Zástavba infiltrometru shora



Obr. 58 - Zástavba infiltrometru zespoda

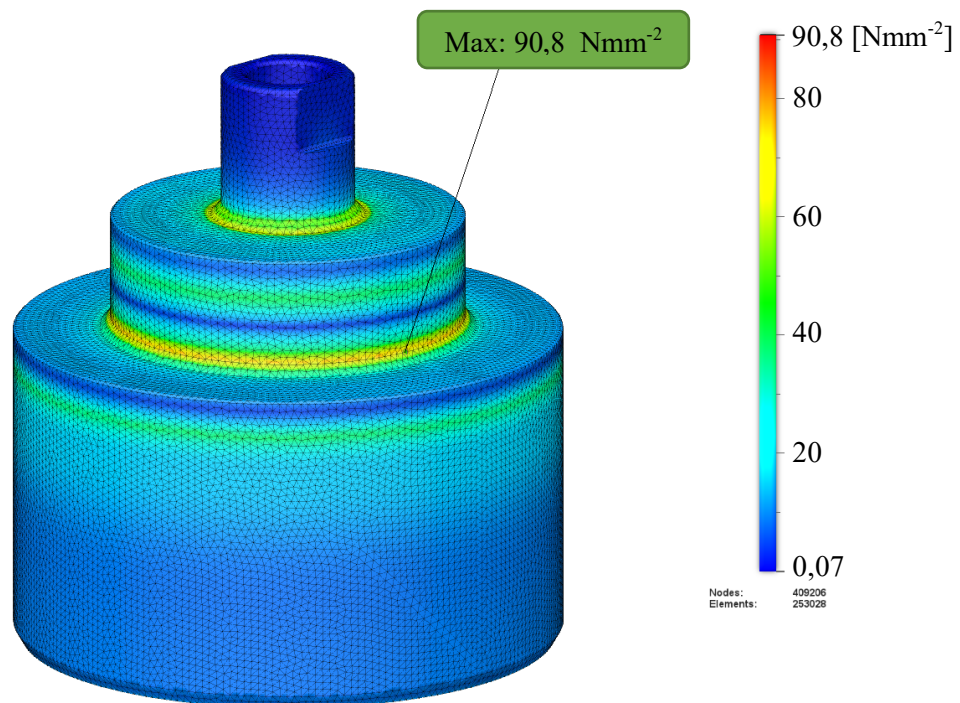
Slícování otvorů mezi konzolí a vozítkem musí být zohledněno ve výrobní dokumentaci a také technologickém postupu výroby. Otvory budou vrtány po svaření pomocí přípravku nebo vrtacích šablon.

8. Pevnostní analýza

Pro ověření návrhu zařízení pro infiltrační zkoušku byl proveden výpočet pomocí metody konečných prvků v programu Autodesk Fusion 360. Kde byla zvolena hodnota maximálního zatížení 10 000 N, která odpovídá hodnotě maximální tíhy celého měřicího zařízení.

8.1. Analýza zatížení infiltrometru

Předpokladem pro zjednodušený MKP model byla homogenita svarových spojů a vyloučení svarových defektů. Materiál svaru odpovídá materiálu svařovaných dílů.



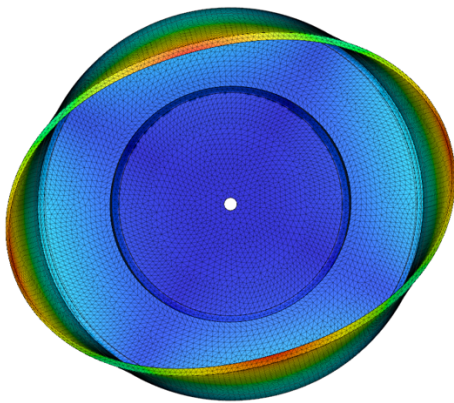
Obr. 59 – Analýza zatížení infiltračního válce

Okrajovými podmínkami bylo pevné uložení v závitové hlavě válce a zatížení působilo na spodní plochu břitu kolmo vzhůru. Maximální hodnota napětí ve svařenci dosahuje hodnoty 90,8 Nmm⁻². Materiál 1.4307 má nevýraznou mez kluzu o hodnotě $R_{p0,2} = 200 \text{ Nmm}^{-2}$, ta je větší než maximální napětí v zatíženém stavu infiltrometru, tudíž lze usoudit, že konstrukce válce infiltrometru staticky vyhovuje maximálnímu zatížení.

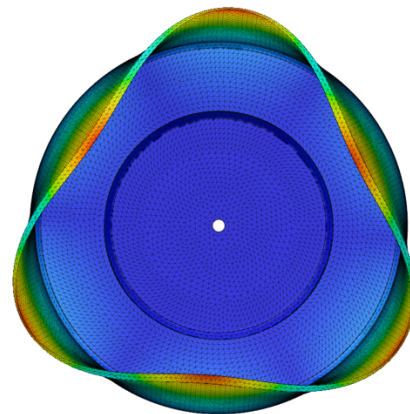
Nelegovaná jakostní konstrukční ocel S355J2 je na tom z hlediska minimální meze kluzu ($Re = 355 \text{ [Nmm}^{-2}\text{]})$ znatelně lépe než legovaná ušlechtilá nerezová ocel. Tuto nevýhodu však vyvažují její výborné korozivzdorné vlastnosti včetně odolnosti vůči mezikystalové korozi.

8.2. Ztráta stability infiltrometru

Simulace ztráty stability infiltračního válce se projevuje ve dvou odlišných tvarech viz. (Obr. 30,31). První tvar ztráty stability (Obr. 60) nastává při zatížení 110x větším, než je maximální hodnota zatížení, která byla zvolena na 10 000 N. To znamená, že součinitel kritického zatížení³ $f = 110$ [1]. Druhý tvar ztráty stability (Obr. 61) vykazoval součinitel kritického zatížení o hodnotě $f=137$ [1]. Z hlediska pracovních zatížení našeho stroje jsou tato zatížení nereálná, a proto lze usoudit, že ztráta stability je v tomto případě nepravděpodobná.



Obr. 60 - První tvar ztráty stability infiltrometru $f = 110$ ($110 \times 10\,000 \text{ N}$)



Obr. 61 - Druhý tvar ztráty stability infiltrometru $f = 137$ ($137 \times 10\,000 \text{ N}$)

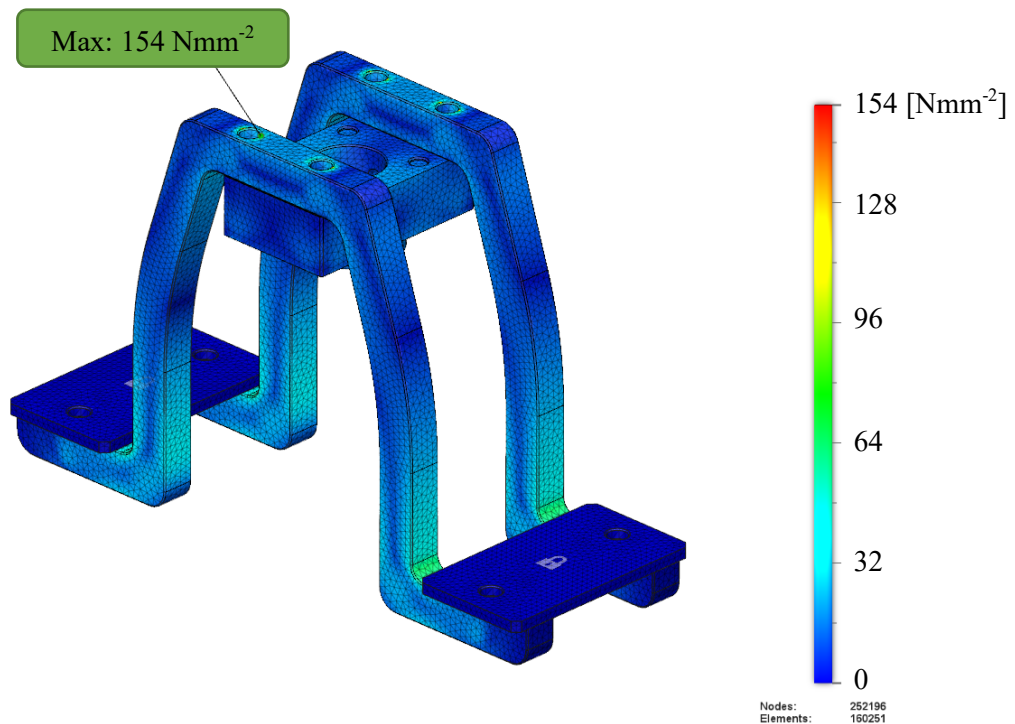
8.3. Analýza zatížení konzole uchycení

Předpokladem pro zjednodušený MKP model byla homogenita materiálu a reprezentativní okrajové podmínky. Spojení součástí bylo provedeno pomocí virtuálních šroubových spojů. Nominálním zatížením je stejně jako u zatížení infiltrometru síla o velikosti 10 000 N.

Provedenou analýzou MKP bylo zjištěno napětí pro maximální hodnotu zatížení konstrukce o velikosti 154 Nmm^{-2} .

³ „Součinitel menší než 1,00 poukazuje na nestabilitu konstrukce. Součinitel větší než 1,00 znamená, že zatížení vlivem zadaných normálových sil vynásobené tímto součinitelem vede k porušení konstrukce vybočením nebo boulením. Součinitele kritického zatížení menší než 10 vyžadují podle EN 1993-1-1, čl. 5.2.1(3) výpočet dle teorie II. řádu.“ [15]

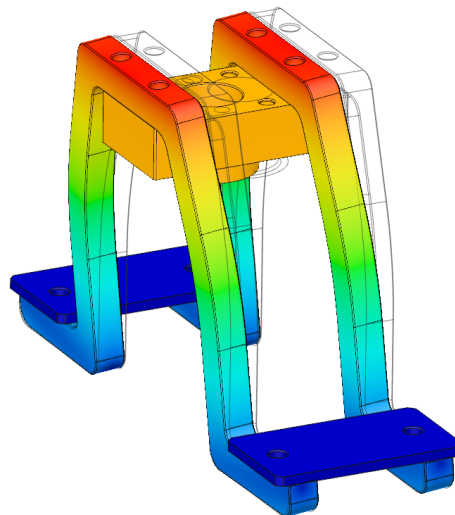
Toto napětí se nachází v oblasti otvoru pro šroub u příruby hydraulického válce (Obr. 62). To je pro použitou konstrukční ocel S235JR s minimální mezí kluzu ($R_e = 225 \text{ Nmm}^{-2}$ pro polotovary v rozmezí tloušťek 16 ~ 40 mm) vyhovující hodnota zatížení. V případě dosažení maximální síly, která odpovídá tíze celého měřicího zařízení, dojde ke zvednutí vozítka na hydraulickém válci.



Obr. 62 - Analýza zatížení konzole uchycení

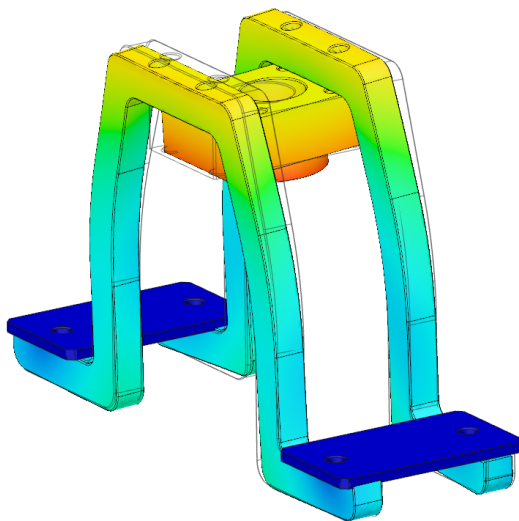
8.4. Ztráta stability konzole uchycení

První tvar ztráty stability konzole uchycení (Obr. 63) odpovídá zápornému násobku maximální zátěžné síly. Hodnota součinitele kritického zatížení $f = -16$ [1]. Fakticky se tedy jedná o zatížení konzole uchycení při zpětném pohybu vytahování infiltračního válce z půdy. To si lze vyložit tak, že při opačném směru působení zadaného zatížení by došlo k porušení boulením nebo vybočením.

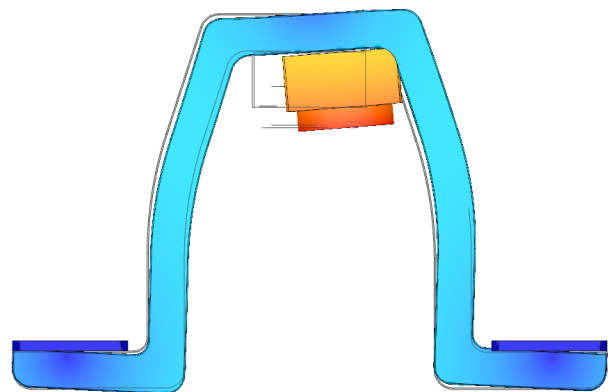


Obr. 63 - První tvar ztráty stability konzole uchycení $f = -16$ ($-16 \times 10\,000\text{N}$)

Druhý a třetí tvar ztráty stability konzole uchycení odpovídají kladnému násobku maximální zátěžné síly. Pro druhý tvar $f = 150$ [1] a pro třetí tvar $f = 160$ [1].



Obr. 64 – Druhý tvar ztráty stability konzole uchycení ($150 \times 10\,000\text{N}$)



Obr. 65 - Třetí tvar ztráty stability konzole uchycení ($160 \times 10\,000\text{N}$)

Všechny tři případy jsou mimo rozsah pracovních zátěžných sil, a proto lze usoudit, že stabilita konzole uchycení nedosahuje kritických hodnot. Konstrukce vyhovuje navrženému zatížení.

9. Závěr

Na začátku této diplomové práce byla provedena rešerše týkající se propustnosti hornin a problematiky s tím spojené. Představeny byly způsoby laboratorního a terénního zjištění propustnosti hornin z půdních vzorků, včetně zařízení k tomu určených. Dále byly představeny možná řešení způsobů zatlačování infiltrometru do půdy.

Stručně byla popsána norma (ČSN EN ISO 22282-5) a její požadavky pro měření a měřicí zařízení, které bylo zvoleno v našem konstrukčním návrhu.

Podrobně bylo popsáno měření, uskutečněné v areálu společnosti Chemcomex a.s., pro zjištění orientačních velikostí sil zatlačovacího zařízení infiltrometru.

Byla představena kompletní konstrukce měřicího zařízení včetně podvozku, podrobně vysvětlen princip funkce infiltrometru a proveden soupis technických omezení a požadavků na měřicí zařízení.

Dále byl proveden návrhový výpočet pružiny vyhazovače drnů a pevnostní analýza infiltračního válce a konzol uchycení k podvozku vozítka. Konzole a infiltrační válec byly také zkontrolovány na ztrátu stability při nejvyšším možném zatížení.

Konstrukční návrh byla podrobně popsán a byl vypracován výkres sestavy a spolu s výrobními výkresy.

Měřicí zařízení infiltrometru bylo modelováno v 3D programu Autodesk Inventor.

Výstupní výkresy jsou připojeny na konec práce ve formě příloh.

Na základě návrhu konstrukce infiltračního zařízení ve spolupráci s Bc. Filipem Haasem a pod odborným vedením Ing. Martina Duba, Ph.D. byl získán užitečný vzor. [14]

Seznam použitých veličin

τ_A	$[N/mm^2]$	<i>dovolené napětí ve smyku</i>
A	$[m^2]$	<i>průřez</i>
D	$[m]$	<i>střední průměr pružiny</i>
d	$[m]$	<i>průměr drátu pružiny</i>
D_p	$[m]$	<i>průměr pístnice</i>
D_v	$[m]$	<i>průměr hydraulického válce</i>
E	$[N/mm^2]$	<i>modul pružnosti</i>
F	$[N]$	<i>síla</i>
f	$[1]$	<i>součinitel kritického zatížení</i>
G	$[N/mm^2]$	<i>modul pružnosti ve smyku</i>
h	$[m]$	<i>spád, výška, zdvih</i>
H	$[m]$	<i>výška vodní hladiny mimo depresní kužel</i>
i	$[1]$	<i>i-faktor</i>
i_p	$[1]$	<i>převod mechanismu</i>
k	$[m/s]$	<i>koeficient filtrace</i>
K	$[1]$	<i>K-faktor</i>
l	$[m]$	<i>délka</i>
l_0	$[m]$	<i>délka volné pružiny</i>
p_{max}	$[bar]$	<i>maximální pracovní tlak</i>
Q	$[m^3/s]$	<i>objemový průtok</i>
R	$[m]$	<i>poloměr depresního kužele</i>
r	$[m]$	<i>poloměr studny</i>
R_e	$[N/mm^2]$	<i>mez kluzu</i>
R_m	$[N/mm^2]$	<i>mez pevnosti</i>
$R_{p0,2}$	$[N/mm^2]$	<i>smluvní mez kluzu</i>
t	$[s]$	<i>čas</i>
y	$[m]$	<i>zdvih</i>
z	$[1]$	<i>poč. závitů pružiny</i>

Použitá literatura

- [1] *Nasyčená hydraulická vodivost - dvouválcový infiltrometr* [online]. Dostupné z: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz/dvouvalec.html>
- [2] KUTÍLEK, Miroslav, Václav KURÁŽ a Milena CÍSLEROVÁ. *Hydropedologie 10*. Vyd. 2. př. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02237-4.
- [3] PAŠEK, Jaroslav. *Inženýrská geologie I*. 1. vyd. Praha: ČMT, 1995.
- [4] GRMELA, Arnošt. *Hydrogeologie. Interní učební texty. VŠB-TU Ostrava, 2004* [online]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/Geologie/KAPITOLY/10_základy_hydro/10_základy_hydrgeologie.htm
- [5] ČSN EN ISO 22282-5. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Hydrotechnické zkoušky - Část 5: Vsakovací zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2012
- [6] BÁŤKOVÁ, K., MATULA, S., MIHÁLIKOVÁ, M. *Multimediální učebnice hydrogeologických terénních měření. 2. doplněné vydání* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2013. Dostupné z: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz>
- [7] MATULA, Svat a H KOZÁKOVÁ. A simple pressure infiltrometer for determination of soil hydraulic properties by in situ infiltration measurements. *Rostlinna Vyroba*. 1997, **43**, 405–413.
- [8] VÝZKUMNÝ ÚSTAV MELIORACÍ A OCHRANY PŮDY, V.V.I., PRAHA, CZ, ZBA GEOTECH, S.R.O., NOVÉ MĚSTO NAD METUJÍ, CZ. Přetlakový infiltrometr pro terénní stanovení vsakovací schopnosti půd. CZ 300463 B6 PATENTOVÝ SPIS. Přihlášeno 11.10.2006. Uděleno 16.04.2009.
- [9] HENEK, M., DYMÁK, R., KINC, M., DANĚK, M., KRAVKA, M. *Stanovení saturevané hydraulické vodivosti písčitého substrátu za použití přetlakového infiltrometru*. Brno: VUT Brno, Fakulta stavební, 2013. ISBN 978-80-214-4670-0
- [10] LINAK C&S S.R.O. *Technologie lineárních pohonů* [online]. Dostupné z: <http://www.linak.cz/>
- [11] PIVOŇKA, Josef. *Tekutinné mechanismy*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [12] *CMB Cilindri* [online]. Dostupné z: <http://www.cmbcilindri.com/index.php/it/>
- [13] *Parker - cylinder division* [online]. Dostupné z: www.parker.com/cylinder
- [14] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Automatický infiltrometr*. Bc. Adam Budínský, Ing. Martin Dub, Ph.D., prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D., Bc. Filip Haas, RNDr. Pavel Špaček. 2019. Česká Republika. Užitný vzor CZ 32 898 U1. Přihlášeno 08.04.2019. Zapsáno 28.05.2019.
- [15] *Dlubal Software - Structural Engineering Software for Analysis and Design* [online]. Dostupné z: www.dlubal.com

Seznam obrázků

Obr. 1 - Terénní zkoušky propustnosti hornin [1]	6
Obr. 2 - Odečtení koeficientu filtrace k [m/s] z průběhu křivek zrnitosti na d_{10} a d_{20} [3].....	8
Obr. 3 - Diagram pro přibližné určení koeficientu filtrace k [m/s] z křivky zrnitosti zeminy [3]	9
Obr. 4 - Posouzení propustnosti zemin podle zrnitosti. Mezní křivky zemin nepropustných a velmi málo propustných (M) a zemin málo propustných a propustných (L). a – zemin nepropustné, b – zemin velmi málo propustné, c – zemin málo propustné, d – zemin nepropustné [3].....	9
Obr. 5 - Model propustoměru, kde Q je průsak, A – plocha průsaku. [3].....	10
Obr. 6 - Depresní kužel na volné hladině podzemní vody při čerpání z dokonalé studny a – počevní izolátor, b – kolektor, 1, 2 – piezometry, R – poloměr deprese, Q – čerpané množství (vydatnost), s – pokles hladiny [3]	11
Obr. 7 - Depresní kužel na piezometrické úrovni napjaté podzemní vody při čerpání a – kolektor, b – stropní izolátor, 1, 2, 3 – piezometry, R – depresní poloměr [3]	12
Obr. 8 - Dvouválcový infiltrometr, 1 – vnitřní válec, 2 – vnější válec, 3 – břit, 4 – objem vody, 5 – těsnicí materiál, z_p – penetrační hloubka, h – výška hladiny [5].....	13
Obr. 9 - Zarážení válců [6]	14
Obr. 10 - Dvouválcový infiltrometr [6].....	14
Obr. 11 - Proces měření vsakovací zkoušky [6].....	15
Obr. 12 - Grafické zobrazení kumulativní infiltrace a rychlosti infiltrace [6]	15
Obr. 13 – Schéma tlakového infiltrometru, 1-pístový ventil, 2-trubička nastavení tlakové výšky H , 3-vodní rezervoár, 4-plexisklová trubice, 5-kovový válec, 6-saturovaná zóna, 7-čelo zvlhčení, 8-zóna zvlhčení [7].....	16
Obr. 14 - Kumulativní infiltrace a rychlost infiltrace [6]	17
Obr. 15 - Schéma přetlakového infiltrometru, 1-zásobník vody, 2-horní příruba, 3-dolní příruba, 4-prsteneček, 4'-břit prstence, 5-pryžové těsnění, 6-spojovací úchyty, 7-povrch půdy, 8-zavdušňovací trubička, 9-výtakový otvor, 9'-uzávěr výtakového otvoru, 10-kapacitní hladinové čidlo, 11-úroveň hladiny vody, 12-nalévací otvor, 12'-uzávěr nalévacího otvoru, 13-záznamová jednotka, 14-těsnicí kroužek, 15-usměrňovací destička [8].....	18
Obr. 16 - Lineární aktuátor LINAK LA37 [10].....	19
Obr. 17 - Zdvižná převodovka Zimm s rotujícím šroubem.....	20
Obr. 18 - Zdvižná převodovka Zimm s posuvným šroubem.....	20
Obr. 19 - Konstruktivní řešení hydraulického válce	21
Obr. 20 - Jednočinné provedení hydraulického válce: 1) jednočinný, 2) jednočinný s pružinou, 3) jednočinný s plunžrem [11].....	21
Obr. 21 - Dvojčinné provedení hydraulického válce: 1) dvojčinný, 2) dvojčinný diferenční [11].....	22
Obr. 22 - Hydraulický válec s oboustrannou pístnicí [11]	22
Obr. 23 - Výběr z typů uchycení hydraulického válce dle ISO 6020-2:2015 [12].....	22
Obr. 24 - Záznamový modul LPDR s bezdrátovým připojením	25
Obr. 25 - Pojízdové vrtací zařízení (zdroj tlakové síly)	26
Obr. 26 - Zkušební vzorky půdy (zleva) S3, S4, F4.....	26
Obr. 27 - Náhradní vzorek neznámého složení	28
Obr. 28 - Měřicí soustava – infiltrační válec, podložka, silový snímač, vrtací zařízení	29
Obr. 29 - Průběh měření č.1 - vzorek S3	29
Obr. 30 - Průběh měření č.2 - vzorek S4	30
Obr. 31 - Měření č.2 - vzorek S4.....	30
Obr. 32 - Průběh měření č.3 - vzorek S4.....	31

Obr. 33 - Měření č.3 - vzorek S4	31
Obr. 34 - Průběh měření č.4 - vzorek S3	32
Obr. 35 - Vyosení zatlačovaného válce	32
Obr. 36 - Vyrovnání zatlačovaného válce	32
Obr. 37 - Průběh měření č.5 - vzorek "drn"	33
Obr. 38 - Měření č.5 - vzorek "drn"	33
Obr. 39 - Průběh měření č.6 - vzorek "drn"	34
Obr. 40 - Měření č.6 s nahodilým složením půdy a výskytem kamení	34
Obr. 41 - Průběh měření č.7 - vzorek "drn"	35
Obr. 42 - Měření č.7 - vzorek "drn"	35
Obr. 43 – Dvouválcový infiltrometr	40
Obr. 44 - Dvoušroubový mechanismus	41
Obr. 45 - Vsakoň měřící zařízení.....	42
Obr. 46 - Vsakoň měřící zařízení.....	43
Obr. 47 - Převozní poloha infiltračního válce	44
Obr. 48 - Počátek stlačení pružiny.....	44
Obr. 49 - Fáze měření	45
Obr. 50 - Fáze vysunutí	45
Obr. 51 - Svařenec infiltračního válce.....	46
Obr. 52 - Vyhazovač drnů s porézní strukturou (3D tisk).....	47
Obr. 53 - Pružina infiltrometru	48
Obr. 54 - Hydraulický válec typu ISO ME5 – přední hlava s přírubou [13].....	50
Obr. 55 - Konzole ukotvení hydraulického válce k rámu vozítka.....	51
Obr. 56 - Infiltrační válec	51
Obr. 57 - Zástavba infiltrometru shora	52
Obr. 58 - Zástavba infiltrometru zespoda.....	52
Obr. 59 – Analýza zatížení infiltračního válce	53
Obr. 60 - První tvar ztráty stability infiltrometru $f = 110$ ($110 \times 10\,000$ N)	54
Obr. 61 - Druhý tvar ztráty stability infiltrometru $f = 137$ ($137 \times 10\,000$ N).....	54
Obr. 62 - Analýza zatížení konzole uchycení.....	55
Obr. 63 - První tvar ztráty stability konzole uchycení $f = -16$ ($-16 \times 10\,000$ N).....	56
Obr. 64 – Druhý tvar ztráty stability konzole uchycení ($150 \times 10\,000$ N).....	56
Obr. 65 - Třetí tvar ztráty stability konzole uchycení ($160 \times 10\,000$ N).....	56

Seznam tabulek

Tab. 1 - Zatřídění zemin podle koeficientu filtrace dle ČSN 72 1020	7
Tab. 2 - Klasifikace písčitých zemin (ČSN 72 1001) [4]	27
Tab. 3 - Klasifikace jemnozrnných zemin (ČSN 72 1001) [4].....	27
Tab. 4 – Výsledky naměřených hodnot	36

Seznam příloh

- Příloha 1. Výkres sestavy – V-000-0000 – ZÁSTAVBA INFILTROMETRU
- Příloha 2. Výkres sestavy – V-000-0001 – KONZOLE
- Příloha 3. Výkres sestavy – V-001-0000 – INFILTROMETR
- Příloha 4. Výkres sestavy – V-001-0001 – SVAŘENEC INFILTROMETRU
- Příloha 5. Výrobní výkres – V-001-0002 – SKRUŽ
- Příloha 6. Výrobní výkres – V-001-0003 – PRUŽINA