ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

DÁVKOVÁNÍ SUBSTRÁTU V AUTOMATICKÉM STROJI PRO VÝROBU SAZENIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022 TOMÁŠ VODENKA

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vodenka** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **491522**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Dávkování substrátu v automatickém stroji pro výrobu sazenic

Název bakalářské práce anglicky:

Soil dosing in an automatic potting machine for the seedlings production

Pokyny pro vypracování:

Automatický stroj na výrobu sazenic pracuje tak, že je nejprve vytvořen kelímek z papírové vlákniny. Do takto vyrobeného kelímku je v dalším kroku vložena sazenice. V posledním kroku je do kelímku vpraven substrát.
1) Vypracujte literární rešerši zaměřenou na způsoby automatické přípravy sazenic v květnících – zda takové stroje existují, na jakém principu pracují. Pozornost věnujte zejména způsobu dávkování substrátu do stroje a jakými metodami je možné charakterizovat vlastnosti substrátu.
2) Proveďte test vlivu různé doby míchání substrátu a připravené vzorky otestujte v prototypu automatického stroje pro výrobu sazenic. Sledujte zejména proces tvorby sazenice a kvalitu produktu. Zkuste změřit/sledovat také další vlastnosti různě připraveného substrátu.
3) Na základě poznatků z literární rešerše a provedených pokusů zkuste navrhnout/doporučit vhodnou úpravu pro zlepšení stávajícího řešení dávkovače substrátu v automatickém stroji.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní literární rešerše a doporučení vedoucího bakalářské práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jaromír Štancl, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

Ing. Jaromír Štancl, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

. | Podpis studenta

Datum převzetí zadání

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne ……

……

Jméno a Příjmení

Poděkování

Děkuji Ing. Jaromíru Štanclovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce za cenné rady a vstřícnost při vedení mé práce, mé rodině a přátelům za psychickou podporu během celého studia.

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš
Příjmení autora:	Vodenka
Název práce česky:	Dávkování substrátu v automatickém stroji na výrobu sazenic
Název práce anglicky:	Soil dosing in an automatic potting machine for the seedlings production
Rozsah práce:	počet stran: 52 počet obrázků: 39 počet tabulek: 5
Akademický rok:	2021/2022
Jazyk práce:	český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.
Anotace česky:	Tato práce se zabývá možnostmi dopravování rašeliny do pracovního prostoru automatického stroje na výrobu sazenic. V praktické části se zaměřuje na měření reologických vlastností suspenze rašeliny s vodou. Na závěr je navrhnuto nové řešení dávkování substrátu.
Anotace anglicky:	The aim of this thesis is finding a reliable way of soil dosing in an automatic potting machine. The second part of this paper focuses on measuring rheological properties of peat-water suspension. In conclusion, a new soil dosing system is suggested.
Klíčová slova:	dávkování substrátu, stroj na výrobu sazenic, reologie
Klíčová slova anglicky:	soil dosing, potting machine, rheology

Obsah

Úvod 1

1. Pojmy rašelina/substrát 1

2. Strojní zařízení pro automatizovanou přípravu sadebního materiálu 2

2.1. Systémy pro výsadbu semen 2

2.2. Automatizované vysévací linky 3

2.3. Plniče pěstebních nádob substrátem 3

2.4. Vysévače semen 4

2.5. Zasypání a kropení 5

2.6. Systémy pro výsadbu sazenic 5

2.7. Poloautomatické kontejnerovací stroje 5

2.8. Automatické kontejnerovací stroje 6

3. Jak funguje stroj vyvinutý na Fakultě strojní ČVUT 9

4. Dopravování rašeliny v suspenzi s vodou 11

4.1. Vřetenové čerpadlo 12

4.2. Šroubové čerpadlo 13

4.3. Pístové čerpadlo 13

4.4. Membránové čerpadlo 15

5. Používané metody pro charakterizování vlastností rašeliny/substrátu 16

5.1. Chemické vlastnosti 16

5.2. Objemová hmotnost 16

5.3. Granulometrie 16

5.4. Termogravimetrie (TGA) 16

5.5. Obsah spalitelných (organických) látek 16

5.6. Reologie 17

5.6.1. Newtonské kapaliny 17

5.6.2. Nenewtonské kapaliny 17

5.6.3. Působení času 19

5.6.4. Reologie vláknitých suspenzí 20
6. Praktická část 21
6.1. Stanovení rozložení velikosti částic substrátu 21
6.2. Příprava vzorků 22
6.3. Měření pevnosti substrátu 24
6.4. Měření reologických vlastností 26
6.4.1. Vyhodnocení reologických vlastností 28
6.5. Měření hustoty 33
6.6. Závěr z měření tokových vlastností substrátu 35
7. Návrh úpravy dávkovače substrátu 36
Závěr 39
Seznam použitých symbolů 40
Použité zdroje a literatura 41
Seznam obrázků 43
Seznam tabulek 45

Úvod

Kůrovcová kalamita během posledních let postihla velkou část lesů nejen v České republice. Se zvýšenou těžbou dřeva je tedy třeba zvýšit i rychlost obnovy lesů. Nabízí se tedy automatizace výroby sazenic. Dále je snaha o ekologičnost – tj. vyhnout se plastovým květníkům, které často po vysazení stromku nelze opětovně použít, dále je komplikovanější manipulace, tzn. při výsadbě je nutné sazenici z květníku vyjmout atd.

Cílem vývoje automatického stroje pro výrobu sazenic byla snaha využít nádob z materiálu šetrného k přírodě, materiálu, který se v zemi samovolně rozloží a benefit sazenice, že ji bude možné sadit tak jak je, tj. včetně nádoby, a to i automatizovaným sazečem. Využití je primárně v lesních školkách, ale i v hromadné přípravě jiných sazebních materiálů.

1. Pojmy rašelina/substrát

Pojmem substrát je v této práci myšlen substrát zahradnický. Ten obsahuje rašelinu a případně i hnojivo a také další příměsi (písek, štěrk, agroperlit) a používá se jako základ při sázení rostlin. Často se substráty připravují „na míru“ pro konkrétní druhy rostlin.

Rašelina vzniká v průběhu tisíců let v mokřadech a močálech. Je to nahromaděný organický materiál, rozložený ve vodě s omezeným přístupem vzduchu. Rašeliniště, ze kterého se rašelina těží, má několik vrstev. Nejkvalitnější je rašelina světlá (bílá), má hrubou a vláknitou strukturu, díky které si dobře udržuje vzdušnost a dokáže pojmout až dvacetinásobek vody v poměru ke své hmotnosti. Bílá rašelina leží nad tmavou (černou), starší a více rozloženou rašelinou. Tmavá rašelina obsahuje větší podíl prospěšných organických látek, ale je jemnější a hůře udržuje vzdušnost. Rašelina má mírně kyselé pH (3,5 – 4,5), což vyhovuje pouze kyselomilným rostlinám. Pro zvýšení pH pro rostliny, kterým vyhovuje neutrální či zásadité prostředí se do rašeliny přidává vápenec [1].

2. Strojní zařízení pro automatizovanou přípravu sadebního materiálu

V automatizované přípravě sadebního materiálu se jedná o zařízení, která vpravují do substrátem naplněných nádob semena – systémy pro výsadbu semen a druhým typem je příprava výsadbového materiálu sázením předpěstovaných sazenic – systémy pro výsadbu sazenic.

2.1. Systémy pro výsadbu semen

Na trhu jsou dostupná poloautomatická sázecí zařízení až plně automatizované sázecí linky.

Příkladem poloautomatického sázecího zařízení je např. vysévač SA-10 holandské firmy VISSER horti systems [2]. Jedná se o samostatný krokový secí stroj s nerezovým držákem pěstební nádoby (tácu), která je již předem naplněna substrátem (buď ručně, nebo na poloautomatické plničce). Hustota výsevu je regulována pomocí vyměnitelného stupňovitého hřebenu, který nádobu se substrátem posune o požadovaný krok. Zařízení je dále vybaveno vypichovacím lisem, který před setím vylisuje výsevní otvory, do nichž jsou následně vpravena semena rostlin. Výrobce uvádí kapacitu cca 25-30 cyklů/min. Zařízení je vhodné spíše pro malokapacitní výrobny.

Obrázek 1: Vlevo – celkový pohled na poloautomatický vysévač, vpravo detail vysévací hlavy stroje [2]

2.2. Automatizované vysévací linky

Automatizované vysévací linky většinou kombinují několik samostatných jednotek (plnič nádob, vysévač, zasypávač a kropič) do jednoho celku – linky. Do linky je vložena prázdná pěstební nádoba (tác, květník). V prvním kroku linky je nádoba naplněna substrátem. V následujícím kroku jsou předlisovány otvory pro semena a vpravena semena. Dalším krokem je zásyp nádoby substrátem, případně hnojivem, posledním krokem je pokropení nádoby vodou.

2.3. Plniče pěstebních nádob substrátem

Plniče nádob jsou nejčastěji tvořeny násypkou, v níž je umístěn elevátor (dopravník), který dopravuje substrát do plnící hlavy. Uvnitř plnící hlavy je pak umístěn rotor s gumovými klapkami, které vtlačují substrát do pěstební nádoby, která je dopravována do prostoru plnící hlavy pásovým dopravníkem. Po naplnění nádoby je zařazen kartáč, který substrátem naplněnou nádobu začistí. Odpadní materiál propadává zpět do násypky [3].

Obrázek 2: Vlevo – plnič pěstebních nádob, vpravo detail rotoru s gumovými klapkami plniče pěstebních nádob Quick Filler firmy VISSER, Holandsko [3]

2.4. Vysévače semen

Účelem vysévače semen je vytvoření důlku do substrátu a vpravení semena. Konstrukce vysévačů se liší dle kapacity linky a velikosti semen určených k výsevu. Nízkokapacitní vysévače nejčastěji pracují v krokovém režimu, kdy je nejprve v substrátu pomocí vypichovadel předlisován otvor. Semena jsou pak dávkována vysévací hlavou, do níž semena padají ze zásobníku semen potrubím či hadicemi. Vysévací hlava má pak v sobě otvor, dávkování je řízeno otevíráním otvoru klapkou [4]. Pro menší velikost semen se často používají tryskové systémy [4]. Ty jsou tvořeny vibrační násypkou se semeny. Do této násypky přijíždí vysévací hlava s podtlakovými tryskami a pomocí podtlaku tryska odebere semeno z násypky. Vysévací hlava se následně přesune nad pěstební nádobu a uvolněním podtlaku a sepnutím vibrace trysky semeno padá do připraveného otvoru v substrátu. Kapacita těchto systémů je až 220 pěstebních nádob za hodinu.

Vyšších vysévacích kapacit (až 1000 pěstebních nádob za hodinu) se dosahuje pomocí bubnových vysévačů [5]. Nad pásovým dopravníkem, který dopravuje pěstební nádobu je umístěn rotující buben s nopky, které v substrátu předlisují otvory. Následuje další buben, který je vybaven otvory, do nichž jsou ze zásobníku odebírána semena, která následně otáčením bubnu padají do připravených otvorů v substrátu.

Obrázek 3: Detail válcového vysévače holandského výrobce VISSER [5]

2.5. Zasypání a kropení

Posledním krokem automatizované výrobní linky je zasypání pěstební nádoby slabou vrstvou substrátu (řešeno nejčastěji pomocí násypky s klapkou a začišťovacím kartáčem) a pokropení vodou, což je řešeno pomocí vodních trysek nad pásovým dopravníkem vysévacího stroje [5].

2.6. Systémy pro výsadbu sazenic

Účelem těchto systémů je příprava sazenice do kontejneru a její zapravení do substrátu. Takto připravené sazenice stromků jsou následně skladovány před vlastní výsadbou do požadované lokality.

Existují 3 typy systémů pro přípravu sazenic:

- Ruční kontejnerovací stanice
- Poloautomatické kontejnerovací stroje
- Automatické kontejnerovací stroje

2.7. Poloautomatické kontejnerovací stroje

Sadba sazenice do určeného kontejneru (květníku) probíhá zcela manuálně. Plnič pěstební nádoby zde představuje násypka se substrátem, z níž je pomocí korečkového dopravníku substrát dopravován do trysky. Pod tryskou je pak stůl krytý mříží. Substrát propadává skrze mříž zpět do násypky. Obsluha uchopí prázdný květník a umístí jej pod trysku, kde dochází k naplnění květníku substrátem. Následně je obsluhou utvořen důlek a zapravena sazenice. Alternativně obsluha naplní spodek květníku, umístí sazenici a doplní substrát [6].

Obrázek 4: Manuální plnění květníku [6]

2.8. Automatické kontejnerovací stroje

Automatický kontejnerovací stroj nejprve naplní pěstební nádobu (kontejner, květník) připraveným substrátem na automatické plnící stanici kontejnerovací linky. V dalším kroku je do substrátu zhotoven otvor (nejčastěji vyvrtáním), do něhož je buď ručně, nebo roboticky umístěna sazenice. Linka je většinou v buď lineárním nebo karuselovém uspořádání. V případě lineárního uspořádání jsou kontejnery dopravovány pásovým dopravníkem. Linka je často doplněna automatickým dávkovačem hnojiva a automatickou kropičkou pro zálivku hotové sazenice. Linka také může být vybavena automatickým vkladačem pěstebních nádob [6].

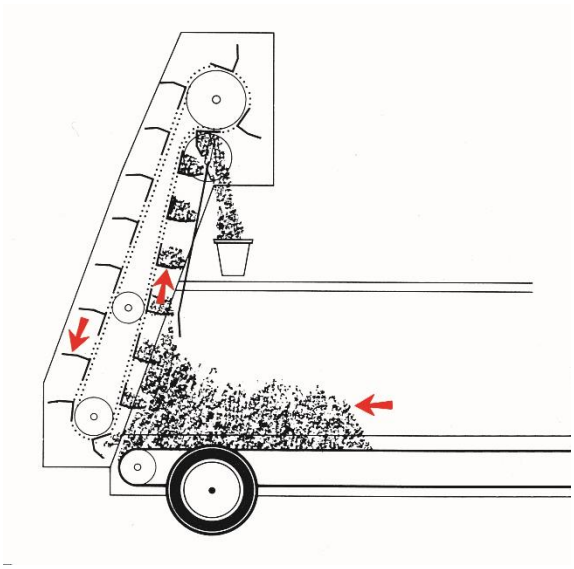
V současné době na trhu řada výrobců nabízí celou řadu poloautomatických a automatických strojů pro kontejnerování sazenic. Princip funkce je však podobný, jednotlivá řešení se liší více či méně jen v konstrukčních detailech.

1. Příjem květníku do stroje (ruční vložení na dopravník, případně robotizovaný vykladač květníku z přepravek)
2. Naplnění květníku substrátem (u všech řešení suchý substrát, nebo substrát s přirozenou vlhkostí)
3. Zhotovení otvoru pro sazenici (nejčastěji vyvrtáním)
4. Vpravení sazenice (manuální nebo robotické)
5. Alternativně dávkování hnojiva a zálivka
6. Odebírání výrobku z pásu (ruční nebo robotické).

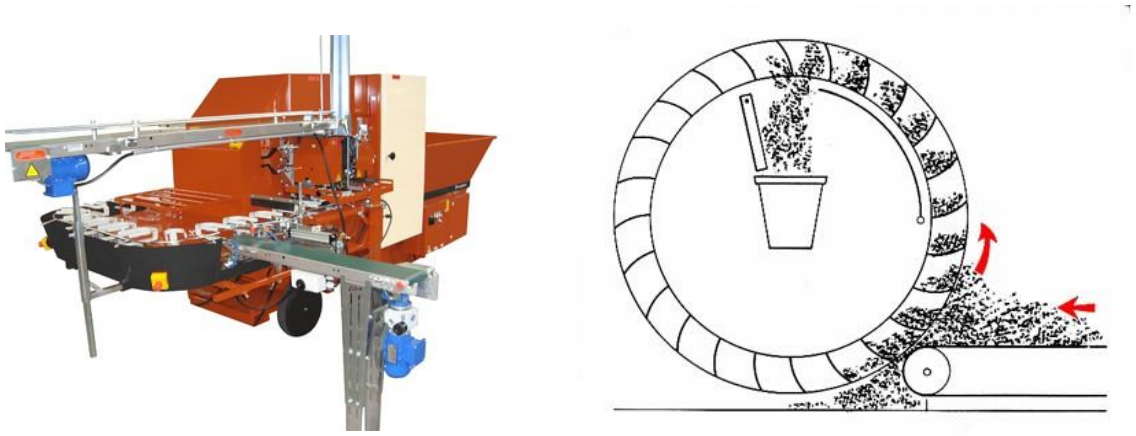
Automatizované linky jsou nejčastěji v lineárním uspořádání a jsou často sestavené z individuálních zařízení, která jsou řazena za sebou.

Plnění květníků substrátem je prakticky u všech výrobců velmi podobný. Je tvořen násypkou, z níž je substrát elevátorem dopravován do plnící hlavy. Plnění květníku je pak realizováno prostřednictvím turniketu, následuje soustava urovnávačů a případných pěchovačů. Holandská firma VISSER používá turniket s pryžovými lopatkami [3], plnič JAVO SUPER holandské firmy JAVO používá střižnou uzavírací klapku [7].

Způsob dopravy substrátu ze zásobníku do květníku je nejčastěji řešen korečkovými dopravníky, např. plnič JAVO STANDARD [8], u zařízení JAVO SUPER lopatkovým kolem. Zařízení JAVO SUPER dokáže plnit květníky o velikosti 5,5 až 24 cm s kapacitou až 3120 květníků za hodinu, u zařízení JAVO Standard je udávána kapacita až 900 až 8000 květníků za hodinu (dle velikosti květníku).



Obrázek 5: Nejčastější plnění korečkovým dopravníkem (na obr. Řešení firmy JAVO) [8]



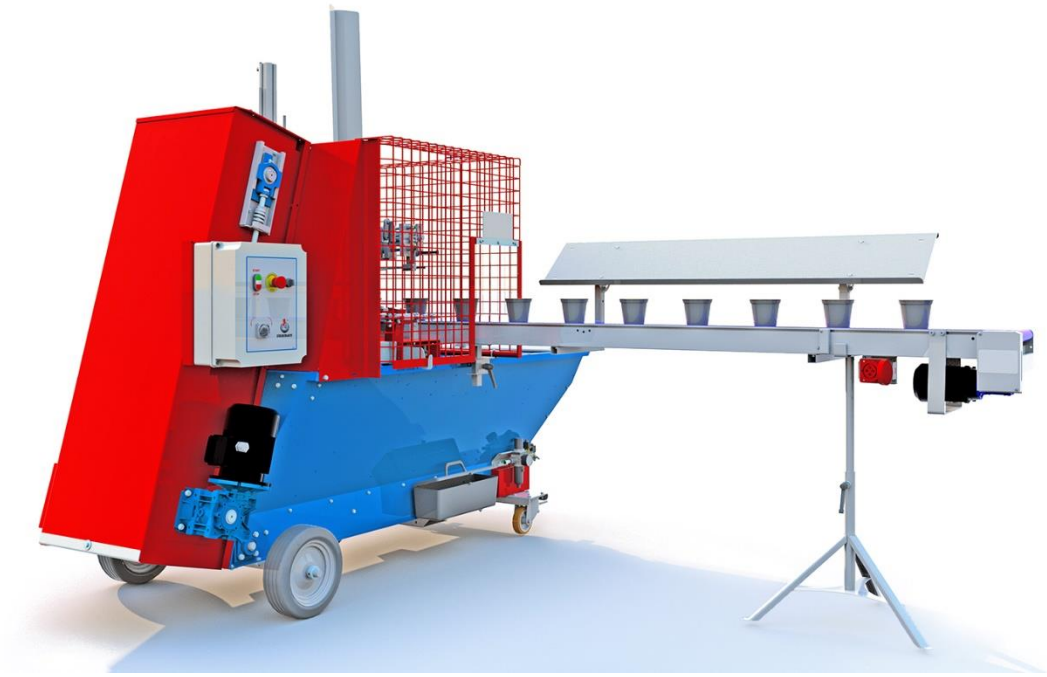
Obrázek 6: Plnič JAVO SUPER – vpravo způsob dávkování do květníku pomocí lopatkového kola [7]

Italská firma Mosa Green [9] má vlastní řešení plniče v karuselovém uspořádání a udává kapacitu 500 až 2500 květníků za hodinu.

Obrázek 7: Plnič italské firmy Mosa Green v karuselovém uspořádání [9]

Zařízení americké firmy Bouldin&Lawson [10] kombinuje lineární a karuselové řešení plniče, zařízení je dále vybaveno vrtací hlavou pro zhotovení otvoru pro sazenici. Udávaná produkce je dle typu 70 až 100 květníků za minutu. Obdobně je řešen také plnič italské firmy URBINATI řady IA2400 a IA2500 [11] s kapacitou 2400 až 3500 květníků za hodinu.

Obrázek 8: Vlevo plnič Bouldin&Lawson, vpravo detail vrtací jednotky plniče [10]

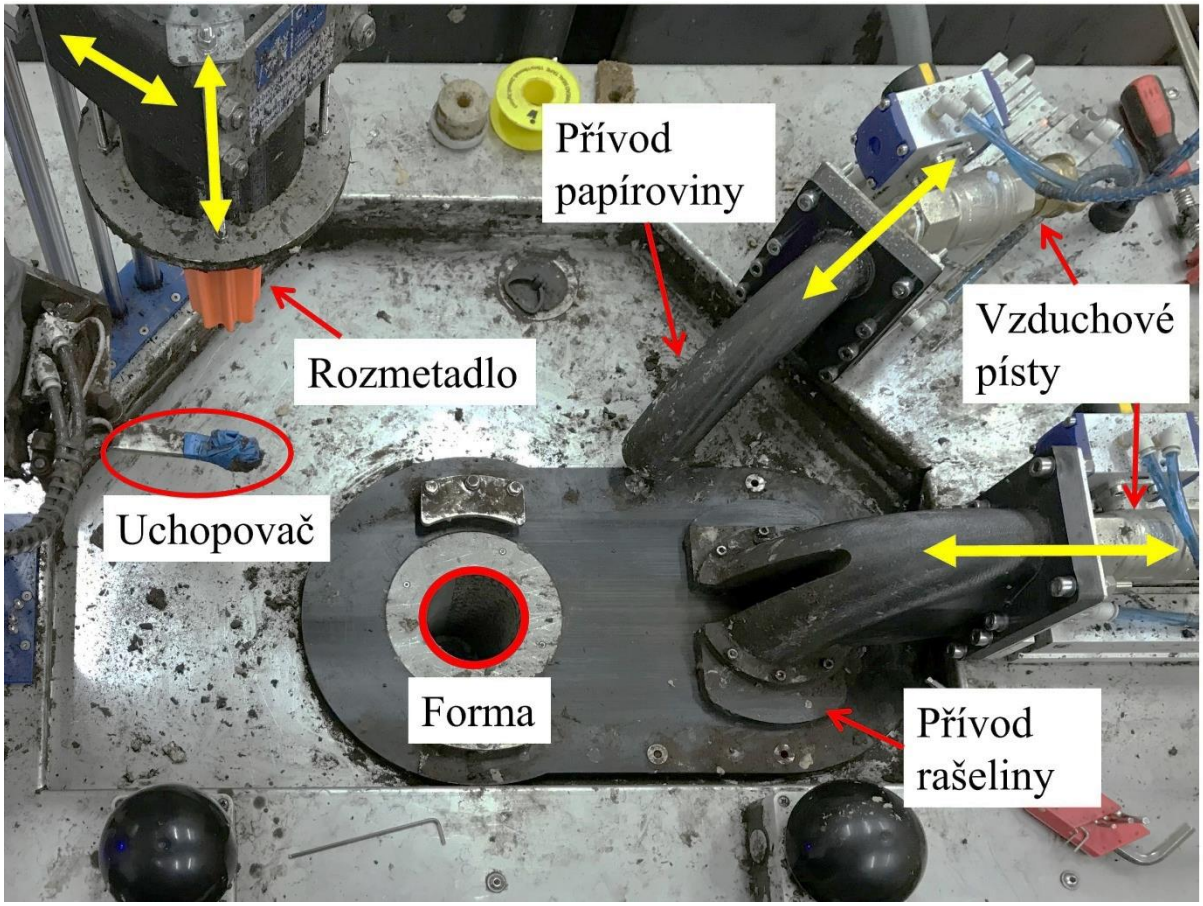


Obrázek 9: Plnič IA2500 firmy URBINATI (Itálie) [11]

3. Jak funguje stroj vyvinutý na Fakultě strojní ČVUT

Stroje pro automatizovanou výrobu sazenic prezentované v předchozí kapitole pracují tak, že je nejprve nutné vložit květník (může být plastový, ale i biodegradovatelný), který je v plniči naplněn substrátem (stroje většinou pracují se suchým, případně s přirozeně vlhkým substrátem), následně je vyvrtán otvor, vpravena sazenice a květník zavlažen.

Automatický stroj na výrobu sazenic zkonstruovaný na Fakultě strojní ČVUT v Praze pracuje na odlišném principu a vytváří rozložitelné kelímky z papíroviny naplněné substrátem a zasazenou sazenicí. Celý proces výroby je složen z pěti kroků.



Obrázek 10: Popis pracovního prostoru stroje

Nejprve je do perforované formy přičerpána papírovina. Jedná se o směs recyklované hladké lepenky a vody. Vzduchový píst přisune potrubí vedoucí ze zásobníku papíroviny nad formu a čerpadlo dodá potřebný objem papírové vlákniny.

Dále se do formy vsune utvářeč (rozmetadlo) (obrázek 10), které rotačním pohybem natlačí směs na stěny perforované formy. Kolem formy je pomocí vývěvy vytvořen podtlak, který odsaje přebytečnou vodu skrze perforaci na stěnách formy, čímž se papírovina zpevní a dojde k vytvoření kelímku.

Do připraveného kelímku je dále uchopovačem vložena sazenice. Podobně jako u papíroviny je přívod rašeliny vzduchovým pístem přisunut nad formu. Tento přívod je speciálně tvarovaný tak, aby nedošlo ke kolizi s uchopovačem, který přidržuje sazenici v kelímku (obrázek 10). Rašelina ve formě rozplavené vodní suspenze je čerpána ze zásobníku vřetenovým čerpadlem. Následuje druhý proces odsávání vody a vyhození sazenice z formy.

Výhodou tohoto řešení oproti komerčně dostupným strojům je, že u sazenice nedochází k ohnutí kořenového systému nahoru. Během konečného odsávání vody ze substrátu se dostávají částečky substrátu s živinami také do papírové hmoty kelímku a sazenice papírový květník lépe prorůstá.

Obrázek 11: Čerstvě vyrobený kelímek (bez sazenice)

4. Dopravování rašeliny v suspenzi s vodou

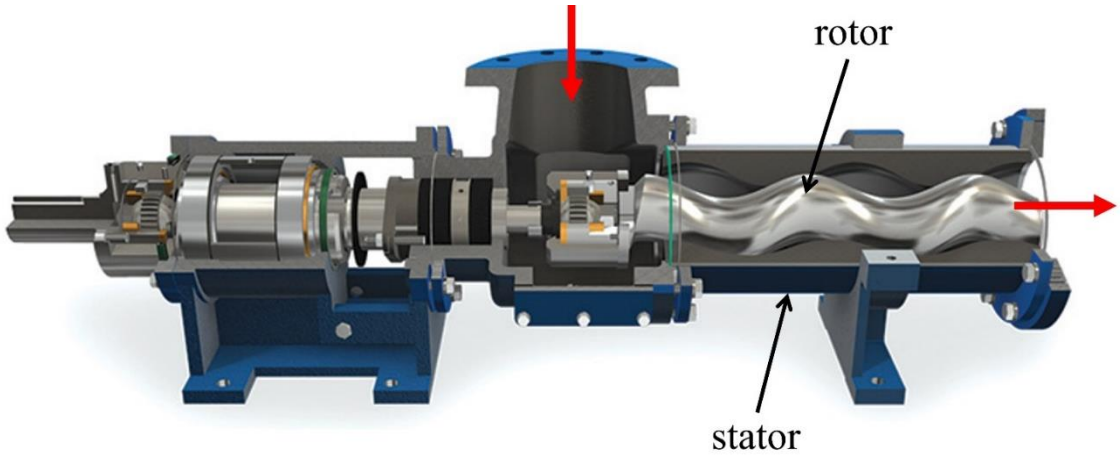
V případě, že má být substrát dopravován do pracovního prostoru ve formě suspenze s vodou (řešení použité u stroje ČVUT), je zapotřebí použít čerpadla. Vlastnosti směsi substrátu s vodou závisí na koncentraci, obecně ale lze říct, že velikost částic pevné látky v této suspenzi se pohybuje v řádu milimetrů. Není vyloučen ani výskyt částic větších než jeden centimetr (např. kusy dřeva).

Hydrodynamická čerpadla nejsou pro tuto aplikaci vhodná. „V současnosti lze považovat za experimentálně prokázanou skutečnost nelineární pokles měrné energie a účinnosti čerpadla s rostoucí koncentrací suspenze a s rostoucí velikostí částic [12, s. 102].“ Snížení účinnosti je následkem zvýšení hydraulických ztrát při průtoku čerpadlem.

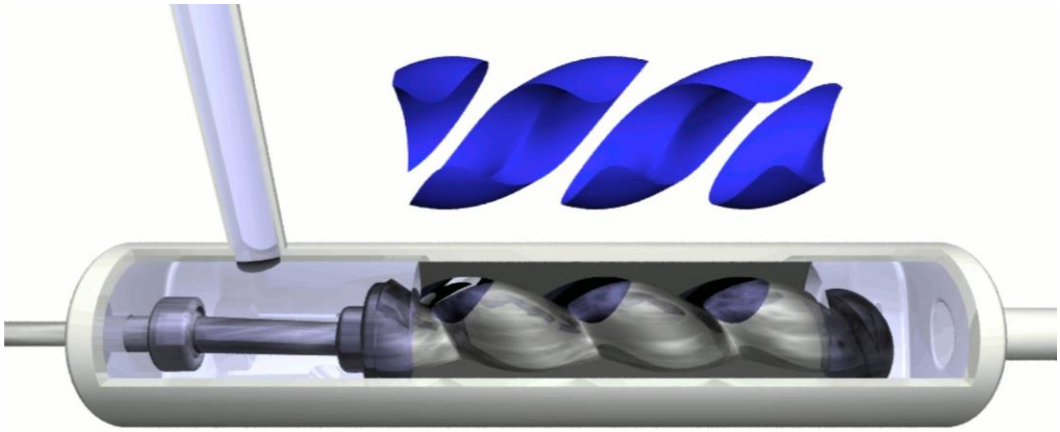
Nabízí se tedy použití čerpadel hydrostatických. U těch je dopravování zajištěno působením pracovního prvku v přímém kontaktu s médiem, které je přemisťováno v pracovním prostoru o určitém objemu. Z toho důvodu jsou v některých publikacích nazývána objemová čerpadla.

4.1. Vřetenové čerpadlo

Šnekové (také vřetenové či progresivní dutinové [13]) čerpadlo je typ hydrostatického čerpadla s jedním excentricky rotujícím prvkem – vřetenem (šnekem). Toto čerpadlo má specifický tvar rotoru, který má „oblý“ závit a pružného statoru, který má profilovanou vnitřní plochu [12].



Obrázek 12: Řez vřetenovým čerpadlem [14]



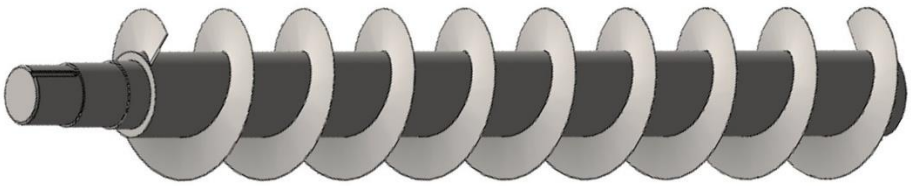
Obrázek 13: Tvar dutin mezi rotorem a statorem [15]

Díky závitům na rotoru a jeho těsnému uložení ve statoru vznikají pohyblivé oddělené dutiny, kterými je unášeno dopravované médium. Všechny dutiny mají stejný rozměr, při každém otočení rotoru se tedy přečerpá dané množství média. To lze využít pro přesné dávkování [13].

Šnekové čerpadlo se používá k dopravě jak řídkých (např. benzin), tak velmi viskózních médií (např. sirupy), kapalin s příměsí vláknitých nebo abrazivních pevných částic (např. směs vody a substrátu).

4.2. Šroubové čerpadlo

Šroubové čerpadlo se od šnekového čerpadla liší tvarem rotoru a statoru, nicméně princip činnosti je velmi podobný. Rotorem je závitové vřeteno s jednochodým až tříchodým závitem ve tvaru šroubové plochy, které je umístěno ve válcové dutině statoru [12]. Médium zde není dopravováno oddělenými dutinami jako u šnekového čerpadla, ale po šroubovici vedoucí po celé délce čerpadla. Tato čerpadla jsou konstrukčně jednoduchá, zpravidla pracují při nízkých otáčkách (řádově desítky za minutu).



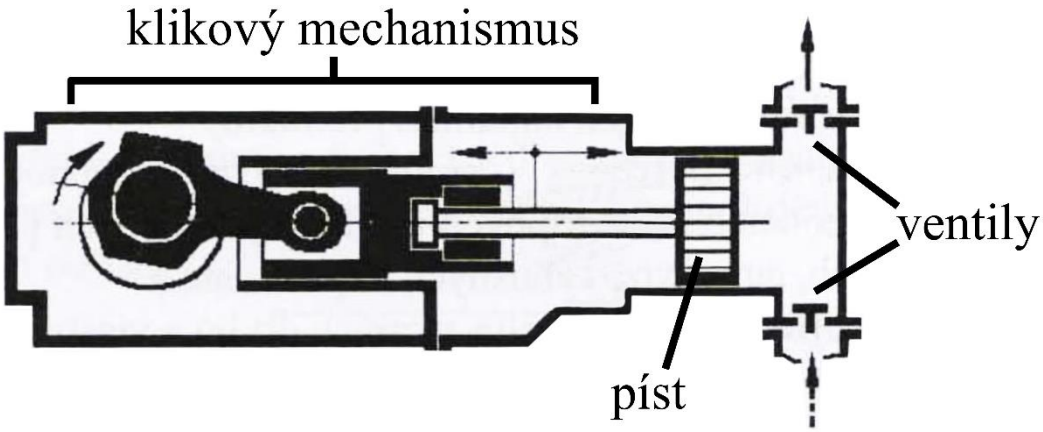
Obrázek 14: Rotor šroubového čerpadla s jednochodým závitem [16]

4.3. Pístové čerpadlo

Základní částí jednoduchého axiálního pístového čerpadla je píst, vykonávající přímočarý vratný pohyb pomocí klikového mechanismu. Píst může být jednočinný, dvojčinný nebo diferenciální. Jednočinný píst může mít tvar dlouhého štíhlého válce, označovaného jako plunžr, který zároveň plní funkci pístní tyče [12].

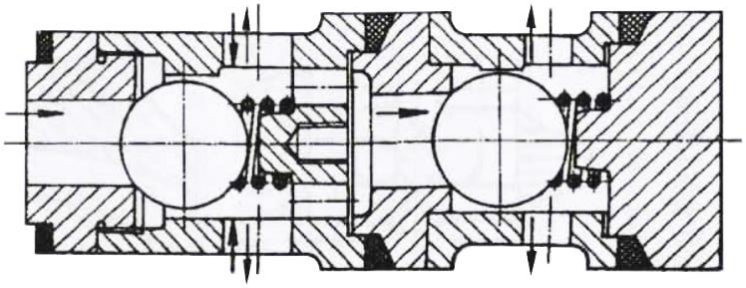
Při čerpání nemazivých, abrazivních kapalin, ke kterým patří i směs substrátu a vody, musí být hydraulická část oddělena od části mechanické, aby médium neprosakovalo do prostoru s mazacím olejem a nedošlo ke snížení životnosti čerpadla [12].

Průtok čerpadla je dán geometrickým objemem válců, tj. součin počtu válců, plochy hlavy pístu a výšky zdvihu, a otáčkami. Regulace průtoku lze docílit vyřazením určitého počtu válců, změnou zdvihu či změnou počtu otáček.



Obrázek 15: Pístové čerpadlo [12]

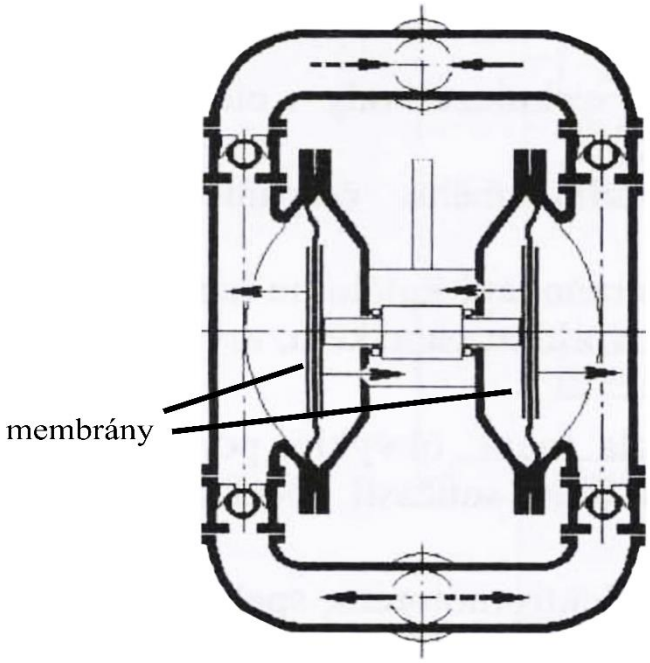
U čerpadel s vratným pohybem pracovního prvku (pístové, membránové) se používají samočinné ventily. Jsou to jednosměrné ventily, které při sání uzavírají odtokový otvor a otevírají sací otvor. Při čerpání kapalin s pevnými příměsemi jsou nejčastěji používány ventily kulové. V těch je na otvor pružinou přitlačována kulička, tím je otvor zavřený. Pokud tlak působící na kuličku přetlačí pružinu, otvor se otevře.



Obrázek 16: Kulový ventil [12]

4.4. Membránové čerpadlo

U membránových čerpadel se mění velikost pracovního prostoru průhybem membrány vyhotovené například z oceli, teflonu či pryže. Materiál membrány závisí na tlaku, teplotě a agresivitě čerpané kapaliny [12]. Membrána zároveň odděluje prostor s čerpaným médiem od mechanických částí. Využívají se pro čerpání kapalin s vyšší viskozitou nebo s obsahem částic pevné látky [12]. Velikost průtoku závisí na velikosti membrány, jejím průhybu a otáčkách čerpadla.



Obrázek 17: Membránové čerpadlo [12]

5. Používané metody pro charakterizování vlastností rašeliny/substrátu

5.1. Chemické vlastnosti

Stanovuje se zejména hodnota pH a elektrická vodivost ve vodním výluhu 1:5, kdy se k navážce odpovídající 60 ml vzorku přidá 300 ml vyluhovacího činidla. Dále se pak rozborem stanovuje obsah hlavních živin N, P, K, Mg a stopových živin Fe, Mn, Zn, Cu, B a Mo a obsah vápníku [17].

Základní zjišťované fyzikální vlastnosti substrátů a rašelin jsou objemová hmotnost, obsah sušiny, obsah spalitelných látek a podíl jednotlivých zrnitostí frakcí.

5.2. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost se stanovuje dle normy ČSN EN 12580, při laboratorním hodnocení pak dle normy ČSN EN 13040 a to na základě měření hmotnosti laboratorně zhutnělého vzorku substrátu v litrovém válci [17].

5.3. Granulometrie

Granulometrie je studie o statistickém rozložení velikosti částic ve vzorku. Nejjednodušší metodou je sítová analýza prováděná dle normy DIN 11540. Jde o prosévání vzorku skrze sérii sít od nejhrubších po nejjemnější (používají se síta o velikosti ok 16, 10, 5, 2, 1, 0,5 a 0,2 mm). Podle poměru hmotnosti celého vzorku a hmotnosti částic na jednotlivých sítech je určen poměr velikosti částic ve vzorku. Čím menší jsou rozdíly mezi po sobě jdoucími síty, tím menší jsou rozsahy velikostí, do kterých částice spadají [18].

5.4. Termogravimetrie (TGA)

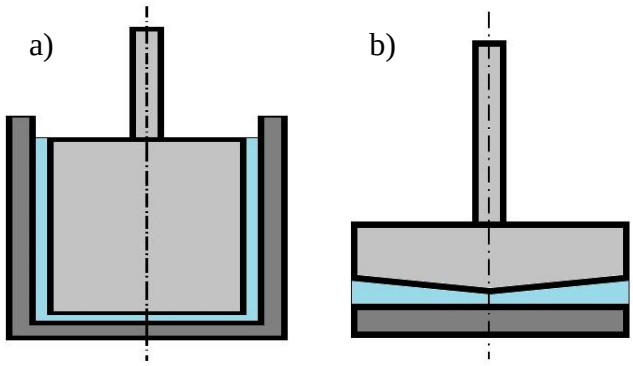
Jedná se o postupné zahřívání vzorku, při kterém je měřena ztráta hmotnosti a tím i množství vlhkosti v původním vzorku [18].

5.5. Obsah spalitelných (organických) látek

Stanovuje se dle ČSN EN 13039 z hmotnostního úbytku vysušeného vzorku po jeho spálení v peci při teplotě 450 °C do konstantní hmotnosti [17].

5.6. Reologie

Reologie se zabývá zkoumáním toku a deformačních vlastností látek. Reologické vlastnosti jsou měřeny v reometru. Zpravidla se jedná o nádobu, uvnitř které je rotující součást. Nejčastěji se používá válec či kužel (Obrázek 18). V průmyslových laboratořích se také používají míchadla (Obrázek 28). Základním principem je ovládání a měření frekvence otáček či kroutícího momentu rotující součásti. Z naměřených dat a se znalostmi geometrie soustavy jsou poté vyhodnocovány reologické vlastnosti měřené látky [19].



Obrázek 18: Schéma reometru a) s válcem b) s kuželem

5.6.1. Newtonské kapaliny

V knize „Principia“, publikované Isaacem Newtonem v roce 1687, se nachází hypotéza, že odpor kladený částicemi kapaliny kvůli nedostatku „kluzkosti“ (*ang. slipperiness*), je přímo úměrný rychlosti, kterou jsou tyto částice vzájemně oddělovány [20]. Nedostatkem kluzkosti je myšlena viskozita, kterou lze popsat také jako míru vnitřního tření mezi částicemi látky či míru odporu proti proudění. Kapaliny, které se řídí Newtonovým zákonem, se nazývají newtonovské kapaliny a jejich reologický model popsat rovnicí 1, kde τ (Pa) je smykové napětí, μ (Pa.s) dynamická viskozita a $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) smyková rychlost nebo rychlost smykové deformace [21]. Viskozita kapaliny většinou výrazně závisí na teplotě – s rostoucí teplotou klesá.

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \tag{1}$$

5.6.2. Nenewtonské kapaliny

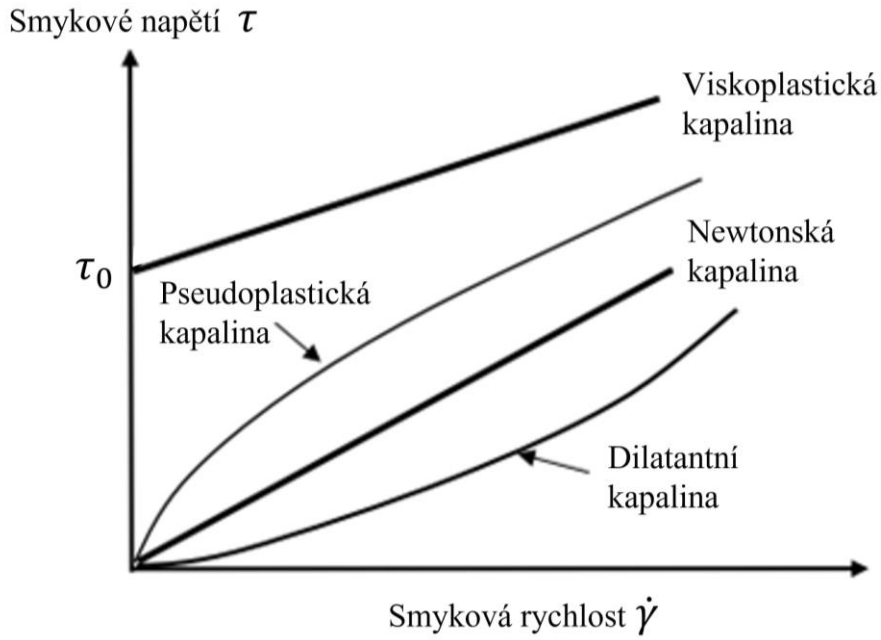
Reologické chování některých kapalin však nelze popsat Newtonovým zákonem. Takové kapaliny jsou souhrnně nazývány nenewtonské kapaliny. U nenewtonských kapalin se místo dynamické viskozity μ (Pa.s) používá nenewtonská nebo také zdánlivá viskozita η (Pa.s). Zdánlivá viskozita závisí na druhém invariantu tenzoru rychlosti deformace $\eta = \eta(\overline{II})$. Pro vyjádření této funkce se používají empirické rovnice [21].

Příklad modelu pro popis reologického chování čistě viskózní nenewtonské kapaliny je jednoduchý mocninový model 2, 3.

$$\eta = K\dot{\gamma}^{m-1} \tag{2}$$

$$\tau = K\dot{\gamma}^{m} \tag{3}$$

Konstanta K se nazývá koeficient konzistence, konstanta m index toku, podle kterého se rozlišují jednotlivé typy kapalin. Pokud je $m < 1$, zdánlivá viskozita klesá s rostoucí rychlostí deformace, kapalina vykazuje tzv. pseudoplastické chování. V opačném případě $m > 1$ se kapaliny nazývají dilatantní. Pro $m = 1$ jde o newtonskou kapalinu. Výhodou tohoto modelu je jednoduchost, protože obě konstanty (K a m) lze získat z experimentálně naměřených dat, jeho nevýhodou je, že popisuje reologické chování pouze v omezeném rozsahu [20], [21].



Obrázek 19: Typy newtonských a nenewtonských kapalin [22]

Na obrázku 20 jsou vyznačeny průběhy závislostí smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro různé typy látek. Je zde uveden další typ látky s tzv. viskoplastickým chováním. Viskoplastická kapalina se při malém zatížení chová jako pevná látka a teprve při zvýšení smykového napětí nad určitou mezní hodnotu se začne chovat jako kapalina. Jednoduchý model pro popis viskoplastického chování je např. binghamský model (rovnice 4 a 5).

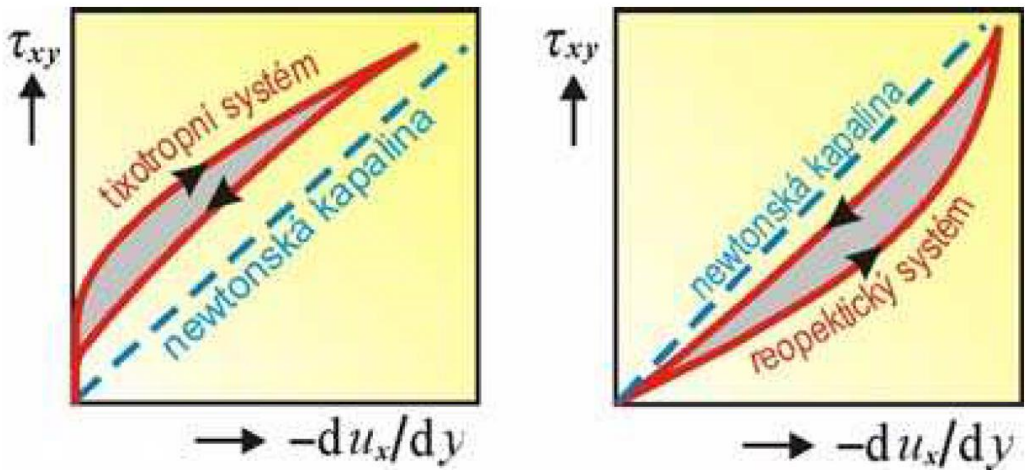
$$\tau = \tau_0 + \mu_p\dot{\gamma} \quad \text{pro } |\tau| > |\tau_0| \tag{4}$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{pro } |\tau| < |\tau_0| \tag{5}$$

Mezní hodnota smykového napětí je označena τ_0 (Pa). Binghamský model předpokládá při hodnotách napětí vyšších než τ_0 klesání zdánlivé viskozity až na hodnotu plastické viskozity μ_p (Pa.s) [21].

5.6.3. Působení času

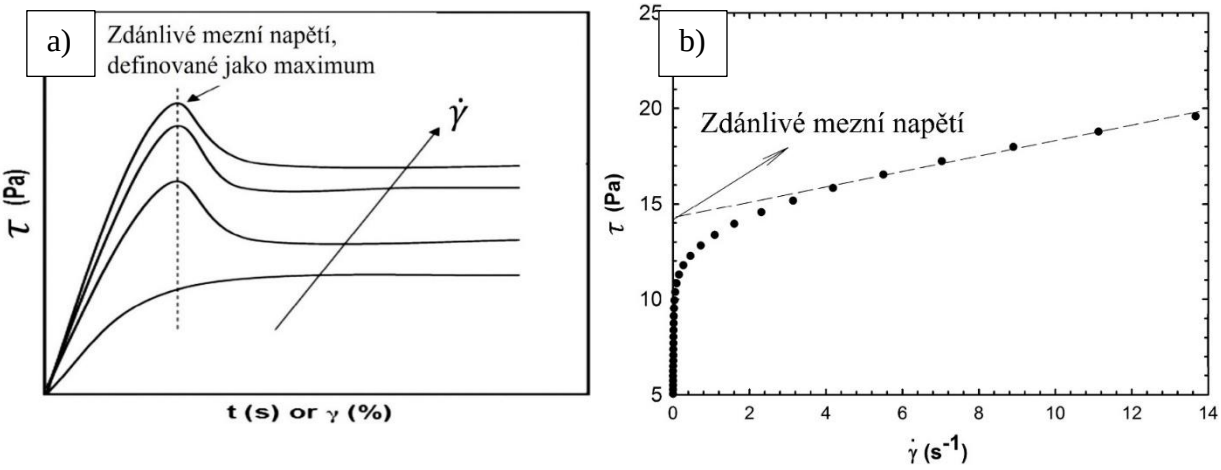
Doposud existoval předpoklad, že daná rychlost deformace vyvolá odpovídající smykové napětí, které zůstává konstantní a změní se až při změně rychlosti deformace. To často neodpovídá skutečnosti. Naměřené smykové napětí se může u některých látek měnit podle doby zatěžování smykovými silami. Postupný pokles viskozity při namáhání se nazývá tixotropie. Opačné chování se nazývá reopexie [20]. Na obrázku 20 je naznačen průběh tixotropního a reopektického systému. Popis vodorovné osy $\left(-\frac{du_x}{dy}\right)$ je jiný tvar zápisu smykové deformace $\dot{\gamma}$.



Obrázek 20: Tokové křivky pro tixotropní a reopektický systém ve srovnání s newtonskou kapalinou [23]

5.6.4. Reologie vláknitých suspenzí

Autoři [24] uvádějí, že určování reologických vlastností vláknitých suspenzí je komplexní problematika. U těchto suspenzí hraje roli historie zatěžování a doba, po kterou jsou vlákna namáhána, ovlivňující jejich velikost a tím i pevnost. Při měření se často v okolí stěn nádoby vytváří vrstva, způsobená pohybem vláken ven z prostoru míchadla v reometru a tím se měření komplikuje. Za nejdůležitější vlastnost suspenze považují mezní napětí (také mez kluzu, *anglicky yield stress*). Existuje více definicí a způsobů měření. Jak je již zmíněno u binghamské kapaliny, je to napětí potřebné pro zahájení newtonského proudění. Nicméně nenewtonské kapaliny často nevykazují žádné jasné vymezení jako u binghamské kapaliny. Proto se často stanovuje „zdánlivé mezní napětí". Jeden ze způsobů měření zdánlivého mezního napětí je podle maximální dosažené hodnoty napětí před zahájením průtoku, po kterém se napětí snižuje (obrázek 21 a)). Další způsob vyhodnocení je extrapolací ustáleného lineárního průběhu do nulové rychlosti smykové deformace (obrázek 21 b)).



Obrázek 21: Určení zdánlivého mezního napětí a) podle maximální hodnoty smykového napětí b) extrapolací ustáleného průběhu smykového napětí

6. Praktická část

Praktická část této práce je zaměřena na testování vlivu doby míchání suspenze substrátu s vodou na vlastnosti připravených kelímků. Předpokládá se, že smykové síly působící na rašelinu uvnitř vřetenového čerpadla mezi stěnou a rotorem mají výrazný vliv na strukturu směsi.

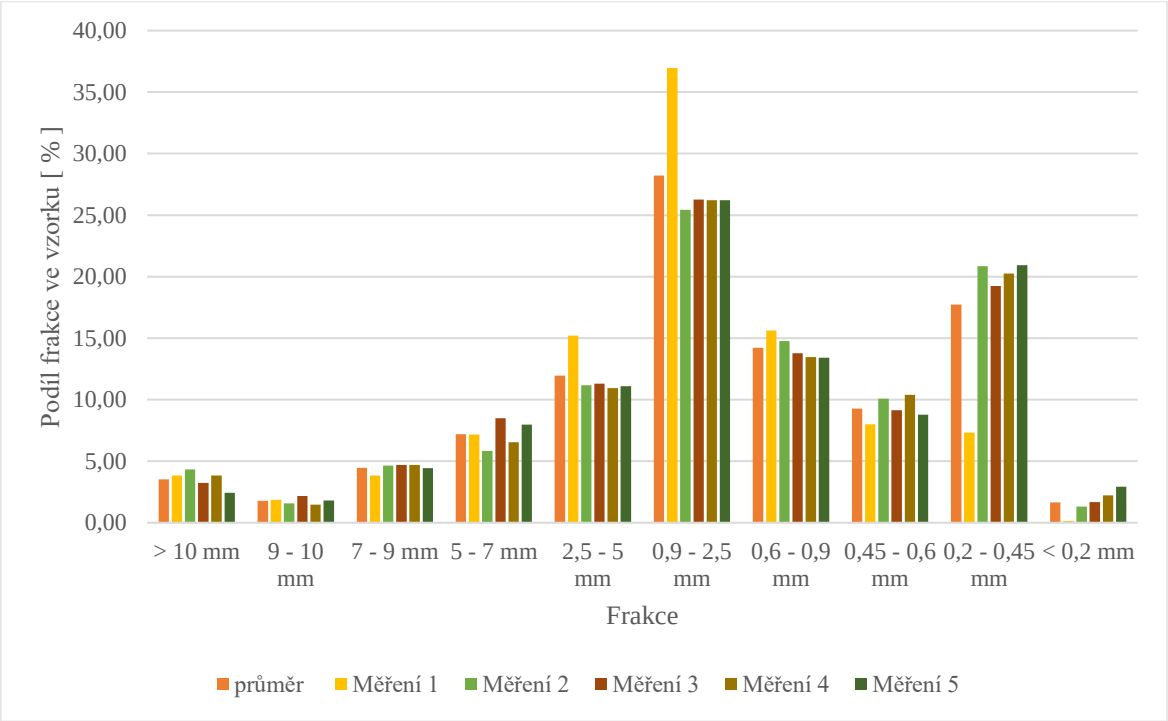
6.1. Stanovení rozložení velikosti částic substrátu

Pro charakterizaci použitého substrátu bylo provedeno měření rozložení velikosti částic sítovou analýzou. Byla použita síta hrubá (10 mm, 9 mm, 7 mm, 5 mm, 2,5 mm) a jemná (0,9 mm, 0,6 mm, 0,45 mm, 0,2 mm). Doba prosévání 200 g rašeliny byla 10 minut pro hrubá síta a 15 minut pro jemná síta.

Tabulka 1 shrnuje zjištěné rozložení velikosti částic. Je vidět, že největší počet částic je v rozmezí 0,9 – 2,5 mm (28 %), dále pak 0,2 – 0,45 mm (18 %) a 0,6 – 0,9 mm (14 %). Rozložení velikosti je srovnáno i na obrázku 22.

Tabulka 1: Stanovení rozložení velikosti částic testovaného vzorku rašeliny

Velikost částic	**Měření 1**	**Měření 2**	**Měření 3**	**Měření 4**	**Měření 5**	**Průměr**
	[%]	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**
> 10 mm	3,84	4,33	3,23	3,83	2,42	3,53
9 - 10 mm	1,87	1,56	2,17	1,46	1,82	1,78
7 - 9 mm	3,84	4,63	4,70	4,69	4,44	4,46
5 - 7 mm	7,18	5,84	8,48	6,55	7,97	7,21
2,5 - 5 mm	15,22	11,18	11,31	10,94	11,09	11,95
0,9 - 2,5 mm	36,96	25,44	26,26	26,21	26,22	**28,22**
0,6 - 0,9 mm	15,62	14,76	13,79	13,46	13,41	**14,21**
0,45 - 0,6 mm	7,99	10,08	9,14	10,38	8,77	9,27
0,2 - 0,45 mm	7,33	20,86	19,24	20,26	20,93	**17,72**
< 0,2 mm	0,15	1,31	1,67	2,22	2,92	1,65



Obrázek 22: Stanovení rozložení velikosti částic testovaného vzorku rašeliny

6.2. Příprava vzorků

Bylo připraveno 6 vzorků s různými dobami míchání při různých otáčkách (viz tabulka 2). Poměr rašeliny a vody je ve všech vzorcích 1 : 2,5. Každý vzorek byl připraven smísením 3 kg hnědé zahradnické rašeliny odebrané z pytle (obsah vlhkosti 46 %) a 7,5 kg vody. Směs byla nejprve ručně smíchána a poté přenesena do míchací nádoby a mechanicky zatěžována pásovým míchadlem na míchací stanici. Obsah vlhkosti vzorku po smísení byl 83 %.

Obsah vlhkosti byl stanovován z rozdílu hmotnosti vzorku před sušením a po jeho vysušení. Sušení vzorků bylo prováděno v komorové sušárně BINDER při teplotě 105 °C po dobu 24 h.

Tabulka 2: Specifikace vzorků

Číslo vzorku	**Otáčky [min^{-1}]**	**Doba míchání [min]**
1	100	1
2	140	5
3	380	5
4	380	10
5	380	15
6	380	25

Z každého vzorku bylo vytvořeno deset kelímků, které byly dále vysušeny během 8 týdnů v laboratoři. Pro zkušební vzorky nebyly do kelímků vkládány sazenice, jelikož jejich vliv na vlastnosti substrátu je považován za zanedbatelný.

Obrázek 23: Série vyrobených vzorků v mokrém stavu

Při výrobě kelímků bylo zřejmé, že více namáhané vzorky (4,5,6) byly výrazně rozmělněny až do „blátivé“ konzistence. Výroba z těchto vzorků byla náročnější, neboť kelímky byly méně soudržné a při vyhazování z formy často docházelo k deformaci. Na obrázcích 24, 25 je porovnání kelímků z a) druhého a b) šestého vzorku.

Obrázek 24: Kelímek z druhého vzorku

Obrázek 25: Kelímek z šestého vzorku

6.3. Měření pevnosti substrátu

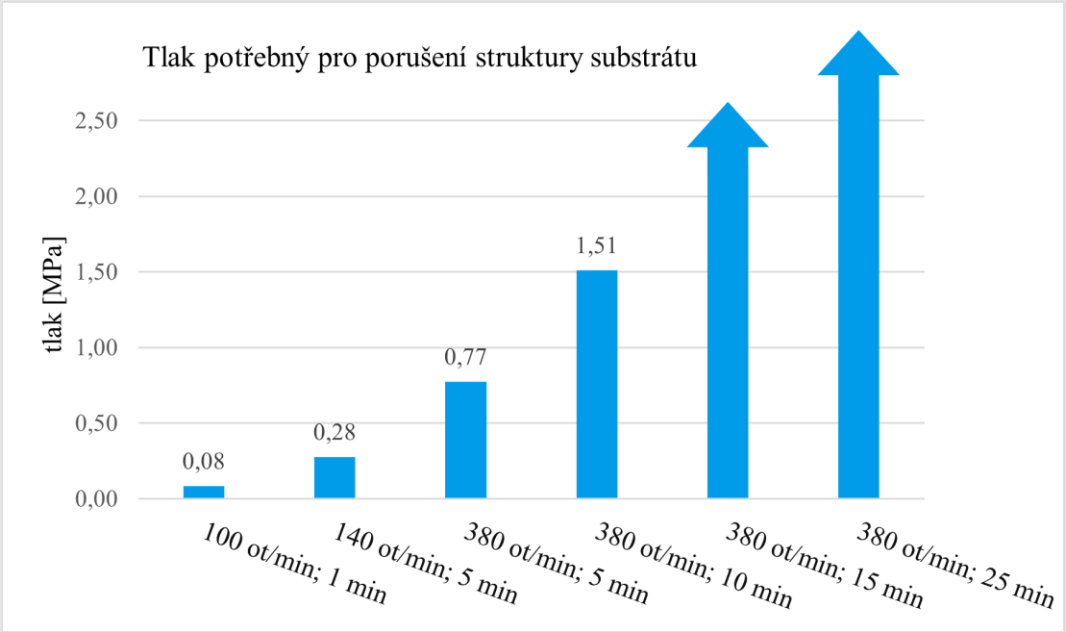
Po vysušení bylo provedeno měření mechanických vlastností substrátu, kdy byl zjišťován tlak potřebný pro vnik měřícího tělíska půdního penetrometru do substrátu. Pro měření byl použit penetrometr 16-T0163 od společnosti Controls. Penetrometry jsou běžně používány geotechniky, geology či agronomy pro rychlé a jednoduché určení přibližné hodnoty pevnosti zemin. Tento kapesní penetrometr funguje podobně jako pružinový siloměr. Tělo penetrometru je složeno z dvou válců. Při průniku menšího spodního válce do zeminy je uvnitř většího válce stlačována pružina. Výsledný tlak, potřebný pro porušení struktury substrátu, je zaznamenán na stupnici. Rozsah stupnice je 0 až 2 MPa.

Naměřené hodnoty pevnosti jsou v tabulce 3, průměry hodnot pro jednotlivé vzorky jsou poté na obrázku 27.

Obrázek 26: Měření tlaku potřebného pro vnik měřicího tělíska penetrometru do substrátu

Tabulka 3: Naměřené hodnoty tlaku potřebného pro vnik měřicího tělíska penetrometru do substrátu

Otáčky; doba míchání		**Číslo měření**										
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	průměr
100 ot/min; 1 min	tlak [MPa]	0,10	0,08	0,08	0,10	0,10	0,05	0,09	0,06	0,10	0,08	0,08
140 ot/min; 5 min		0,28	0,30	0,15	0,28	0,35	0,36	0,28	0,30	0,18	0,28	0,28
380 ot/min; 5 min		0,80	0,85	0,75	0,70	0,75	0,75	0,87	1,00	0,62	0,65	0,77
380 ot/min; 10 min		1,72	1,12	1,66	1,94	1,60	1,50	1,10	1,20	1,70	1,56	1,51
380 ot/min; 15 min		nelze proniknout										
380 ot/min; 25 min		nelze proniknout										



Obrázek 27: Tlak potřebný pro porušení struktury substrátu

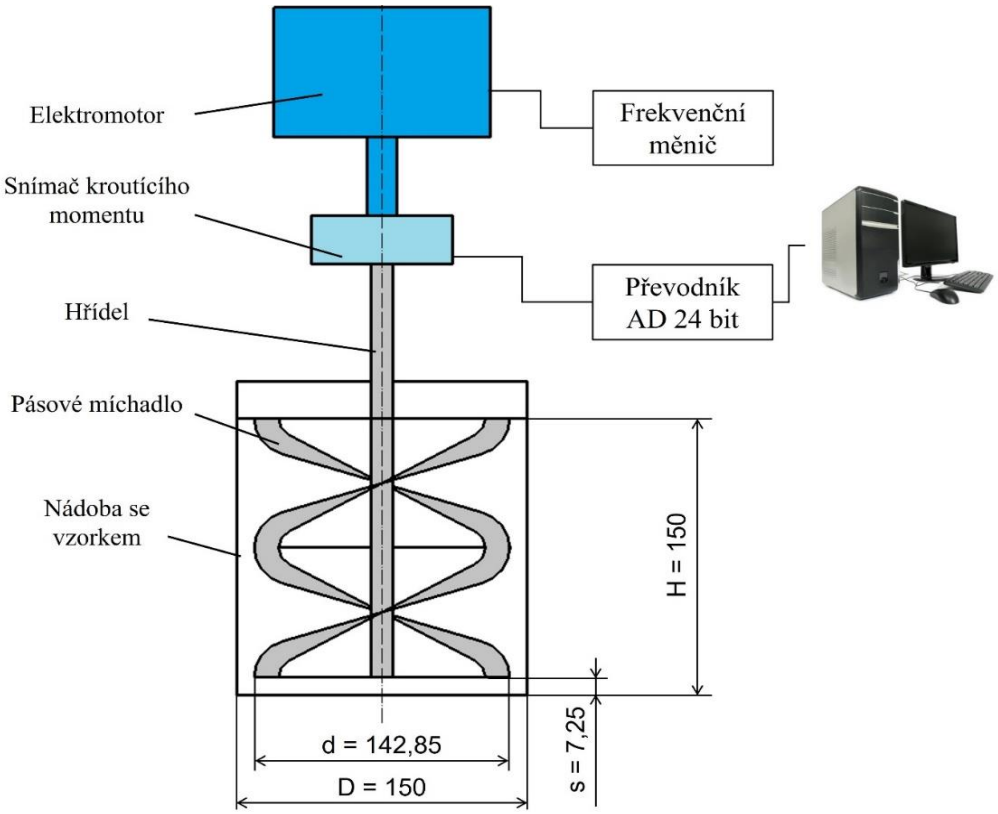
Z obrázku 27 je patrné, že tvrdost vysušeného substrátu se s množstvím disipované energie během míchání zvyšuje. Tvrdost pátého a šestého vzorku už byla vyšší než maximální hodnota na stupnici penetrometru. Pravděpodobně není stanovena maximální hodnota pevnosti substrátu, kterým jsou kořeny sazenice schopny prorůst, ale lehčí a vzdušnější substrát bude nepochybně lepší, protože bude kořenovému systému klást menší odpor a bude vzdušnější. Kompaktnější substrát také limituje pronikání vody do jádra kelímku, kvůli malé pórovitosti. Pevnost čtvrtého vzorku sice byla v měřitelném rozsahu, ale stále příliš vysoká. Za hraniční z hlediska pevnosti můžeme považovat třetí vzorek.

Provedená testovací série na obalovacím stroji a následné měření tvrdosti substrátu potvrdila velkou citlivost rašeliny k vystavení smykovému namáhání. Čím větší množství energie je vlivem smykového namáhání do rašeliny disipováno, tím horší vlastnosti má pak hotový výrobek. Míchání rašeliny by tedy mělo být co možná nejšetrnější a při čerpání je nutné minimalizovat počet průchodů skrz čerpadlo.

6.4. Měření reologických vlastností

Úkolem tohoto měření bylo zkoumat závislost mezi reologickými vlastnostmi směsi a příkonem, vloženým do suspenze rašeliny s vodou. Změna teploty byla během měření kontrolována, prakticky však nedocházelo během měření k významnějšímu nárustu.

Měření probíhalo na míchací stanici, bylo použito pásové míchadlo CVS 69 1029, umístěné centricky ve skleněné nádobě, geometrie je patrna ze schématu na obrázku 28. Každý připravený vzorek (viz Tabulka 1) byl zatěžován při proměnné frekvenci otáčení míchadla při současném měření krouticího momentu na hřídeli míchadla. Otáčky byly nejprve zvyšovány z 0,5 na 50 otáček za minutu a zpět. Celý proces byl poté ještě dvakrát zopakován.



Obrázek 28: Schéma míchací stanice s centricky umístěným pásovým míchadlem

Obrázek 29: Míchací stanice

Pozorovanými veličinami byly kroutící moment na hřídeli míchadla a počet otáček za minutu. Kroutící moment byl měřen pomocí snímače kroutícího momentu. Otáčky byly odečítány z displeje řídící jednotky elektromotoru. Kroutící moment byl v každém měřeném bodě měřen po dobu 20 s, pro vyhodnocení měření byla použita průměrná hodnota z cca 630 zaznamenaných hodnot. Naměřené hodnoty kroutícího momentu byly dále korigovány zjištěným kroutícím momentem „na prázdno“ změřeným bez vsádky v nádobě.

6.4.1. Vyhodnocení reologických vlastností

Pro určení příkonu míchadla bylo nejprve určeno bezrozměrné příkonové číslo Po (-)

$$Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5} \quad , \tag{6}$$

kde P (W) je příkon, ρ (kg.m^{-3}) hustota míchané směsi, n (s^{-1}) počet otáček míchadla za sekundu a d (m) je průměr míchadla. Příkon míchadla lze vyjádřit jako

$$P = \omega M_k = 2\pi n M_k \quad , \tag{7}$$

kde M_k (N.m) je naměřený kroutící moment na hřídeli míchadla a ω (s^{-1}) úhlová rychlost míchadla. Příkonové číslo lze tedy přepsat jako

$$Po = \frac{2\pi M_k}{\rho n^2 d^5} \quad . \tag{8}$$

Pro oblast plouživého proudění je příkonové číslo funkcí Reynoldsova čísla Re (-). Inspekční analýzou (viz [25], kap. 9.5.) lze dojít ke vztahu

$$Po = A \cdot Re^{-1} \quad . \tag{9}$$

A (-) je konstanta a závisí na geometrickém uspořádání systému. Pro naše pásové míchadlo je $A = 296$ [25]. Pro vyhodnocení Reynoldsova čísla se použije vztah modifikovaný Metznerem a Ottem

$$Re = \frac{n d^2 \rho}{\eta} \quad , \tag{10}$$

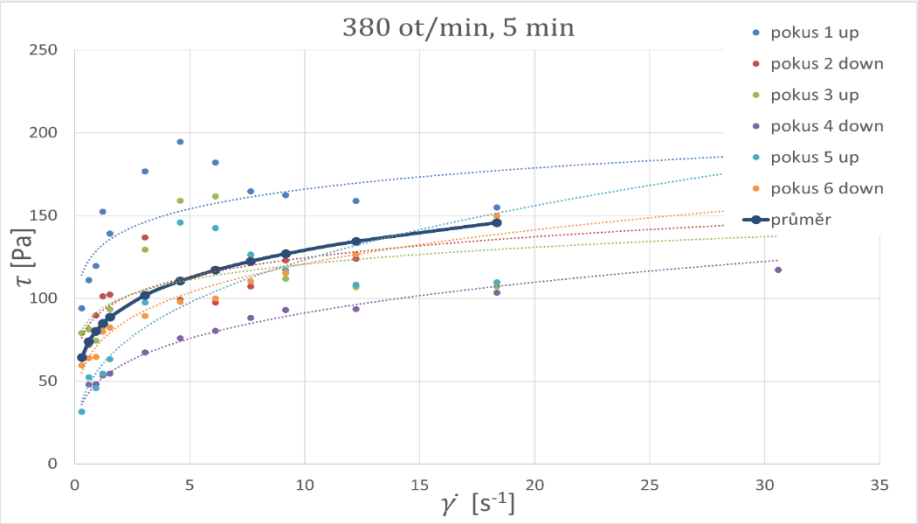
kde η (Pa.s) je efektivní zdánlivá viskozita při dané efektivní rychlosti smykové deformace $\dot{\gamma}$ (s^{-1}), o které výše zmínění autoři předpokládali, že je pro dané geometrické uspořádání přímo úměrná otáčkám míchadla n a lze ji určit ze vztahu

$$\dot{\gamma} = k \cdot n \quad , \tag{11}$$

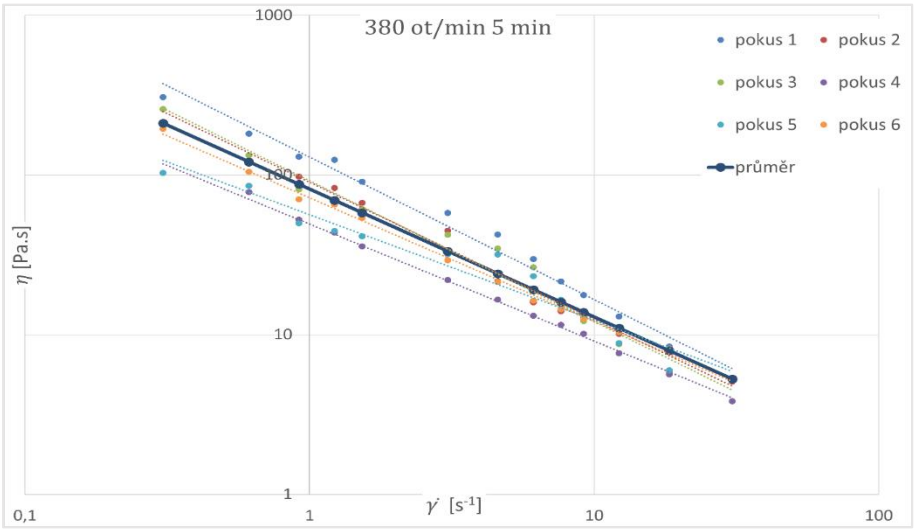
kde Metznerova konstanta k (-) závisí na typu míchadla a geometrickém uspořádání systému. Pro naše pásové míchadlo je $k = 36{,}7$.

Při vyhodnocení bylo z naměřeného kroutícího momentu na hřídeli M_k, otáček míchadla n, hustoty směsi ρ a průměru míchadla d určeno příkonové číslo Po. Dále bylo se znalostí geometrické konstanty A ze vztahu 9 vypočítáno Reynoldsovo číslo Re. Z modifikovaného Reynoldsova čísla (rovnice 10) byla vyjádřena efektivní zdánlivá viskozita η, pomocí které bylo společně s efektivní rychlostí smykové deformace $\dot{\gamma}$ z 11 vypočteno smykové napětí τ (1).

Takto vyhodnocené parametry byly vyneseny do grafu v MS Excel, kde byly jednotlivé průběhy (celkem šest – třikrát vzrůstající a třikrát klesající otáčky) proloženy mocninnými křivkami, pro které byly zároveň zjištěny konstanty mocninového modelu, tj. koeficienty konzistence K a indexy toku m. V námi měřeném rozsahu rychlostí smykové deformace použitý mocninový model celkem dobře popisuje naměřená data. Z aritmetického průměru těchto konstant byl určen průměrný průběh závislosti smykového napětí na smykové deformaci (viz obrázek 30). Podobně byla do grafu vynesena závislost zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace, ale v tomto případě byly použity logaritmické stupnice pro obě osy, proto se mocninná funkce jeví jako přímka (obrázek 31).

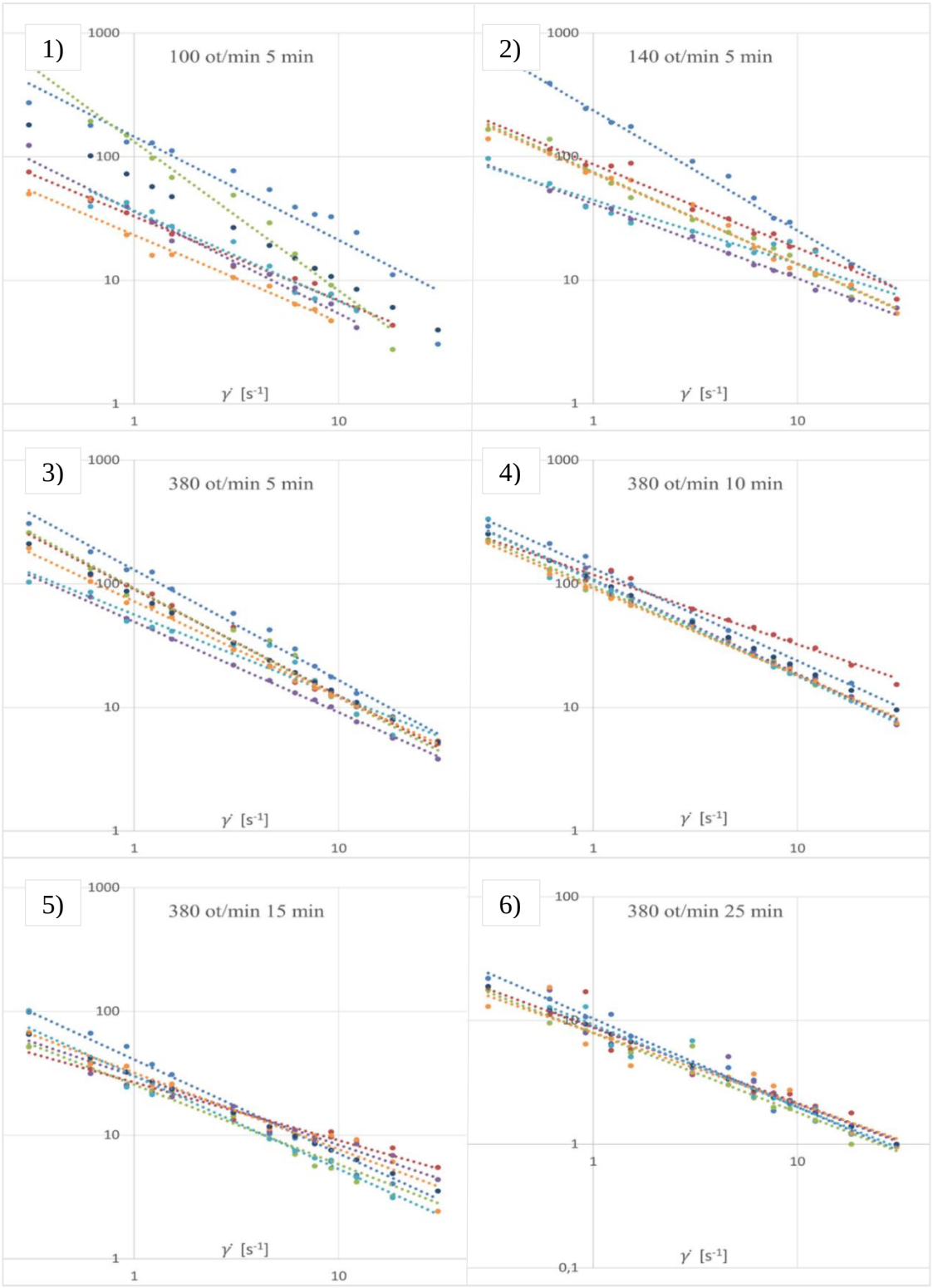


Obrázek 30: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro vzorek 380 ot/min, 5 min



Obrázek 31: Závislost zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace pro vzorek 380 ot/min, 5 min

Na obrázku 32 je prezentována zjištěná závislost zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace pro jednotlivé testované vzorky. Porovnáním jednotlivých průběhů je vidět, že s rostoucím množstvím disipované energie, a tedy i rostoucí homogenitou suspenze se snižoval rozptyl naměřených hodnot zdánlivé viskozity.

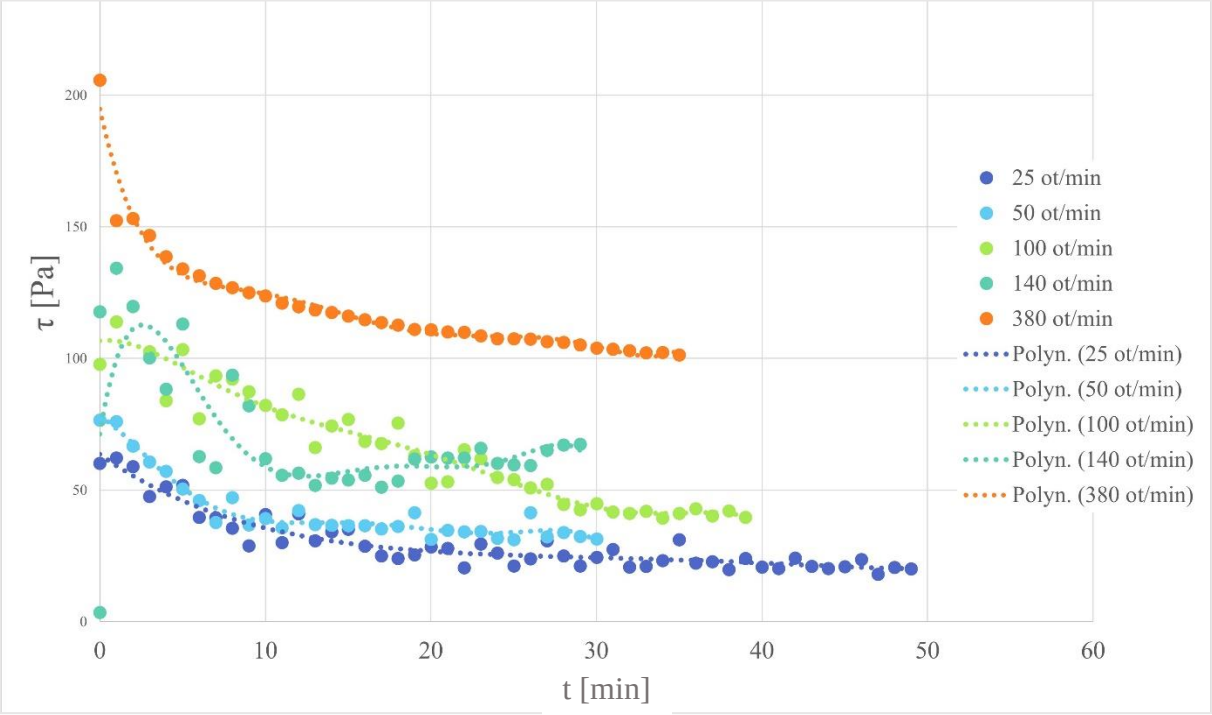


Obrázek 32: Porovnání rozptylu průběhů závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace jednotlivých vzorků

Lepší opakovatelnost u více namáhaných vzorků byla pozorována i při měření průběhu smykového napětí při konstantních otáčkách.

Čerstvě namíchaná směs byla vždy co nejrychleji přesunuta do míchací stanice, aby byla zajištěna stejná konzistence u všech vzorků. Každá směs byla namáhána při konstantních otáčkách (25 ot/min, 50 ot/min, 100 ot/min, 140 ot/min, 380 ot/min). Byla pozorována změna kroutícího momentu na hřídeli míchadla s časem. Z naměřeného kroutícího momentu bylo poté určeno smykové napětí viz předchozí kapitola.

Cílem měření bylo vyhodnocení zdánlivého mezního napětí podle maximální hodnoty napětí při konstantních otáčkách (kapitola 5.6.4). Naměřené průběhy smykového napětí jsou vidět na obrázku 33. Hodnoty byly proloženy polynomem 6. stupně pro lepší viditelnost.



Obrázek 33: Měření změny smykového napětí s časem při konstantních otáčkách

Tabulka 4: Maximální hodnota napětí při konstantní frekvenci otáček

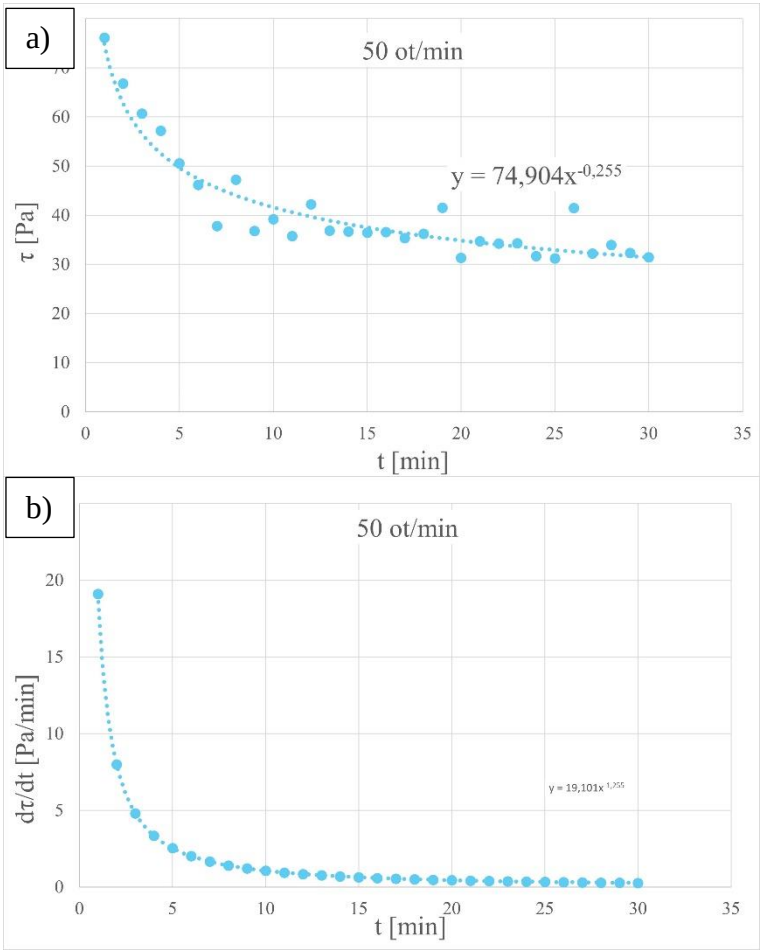
Frekvence otáček	25 ot/min	50 ot/min	100 ot/min	140 ot/min	380 ot/min
Maximální napětí	62,3 Pa	76,6 Pa	119,7 Pa	134,3 Pa	205,7 Pa

Maximální hodnoty napětí pro jednotlivé frekvence otáček jsou v tabulce 4. Teoreticky se jedná o hodnotu, které je třeba dosáhnout, aby začala suspenze proudit.

Pro nás je ale významnější sledování průběhu napětí. Pokles z počáteční hodnoty a následné ustálení vypovídá o tom, jak rychle je směs homogenizována – tzn. jak rychle dojde k destrukci struktury. Po odstranění nulových počátečních hodnot lze body proložit mocninnou křivkou, jejíž derivace zvýrazní změny v průběhu napětí za čas. Na obrázku 34 a) je pro vzorek 50 ot/min vynesen průběh smykového napětí a obrázku 34 b) derivace smykového napětí v závislosti na čase. V tabulce 5 je vidět doba, po které se hodnota smykového napětí přestala výrazně měnit.

Tabulka 5: Doba ustálení napětí pro jednotlivé vzorky

Vzorek	**Doba ustálení [min]**
25 ot/min	20 – 30
50 ot/min	15 – 20
100 ot/min	15 – 20
140 ot/min	10 – 15
380 ot/min	10 – 12

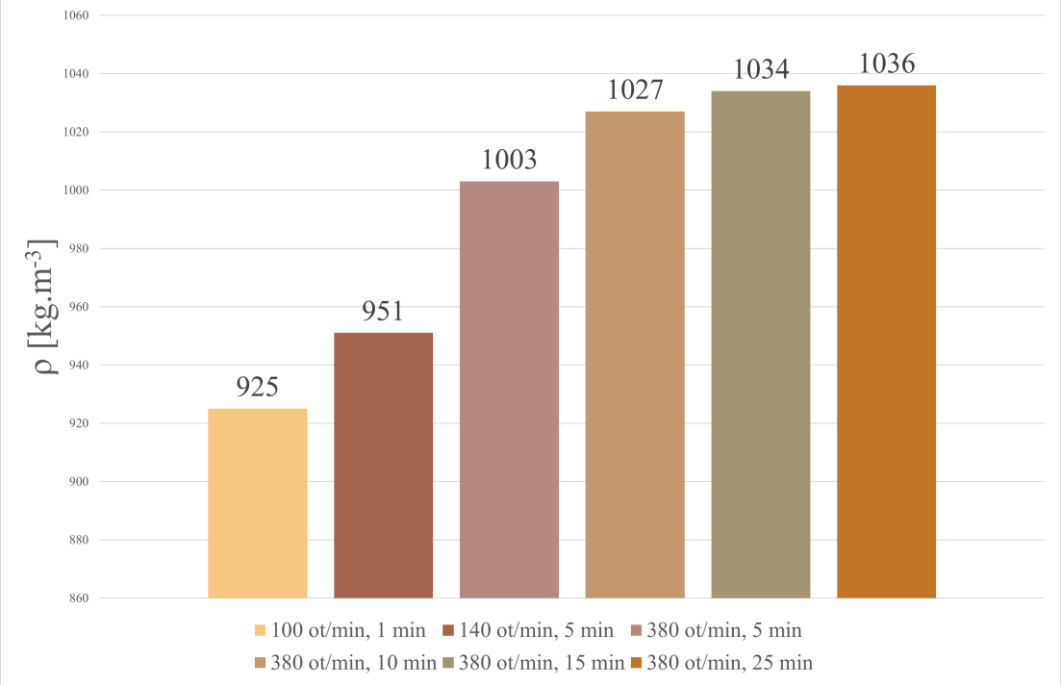


Obrázek 34: a) průběh smykového napětí a b) jeho derivace podle času, vzorek 50 ot/min

6.5. Měření hustoty

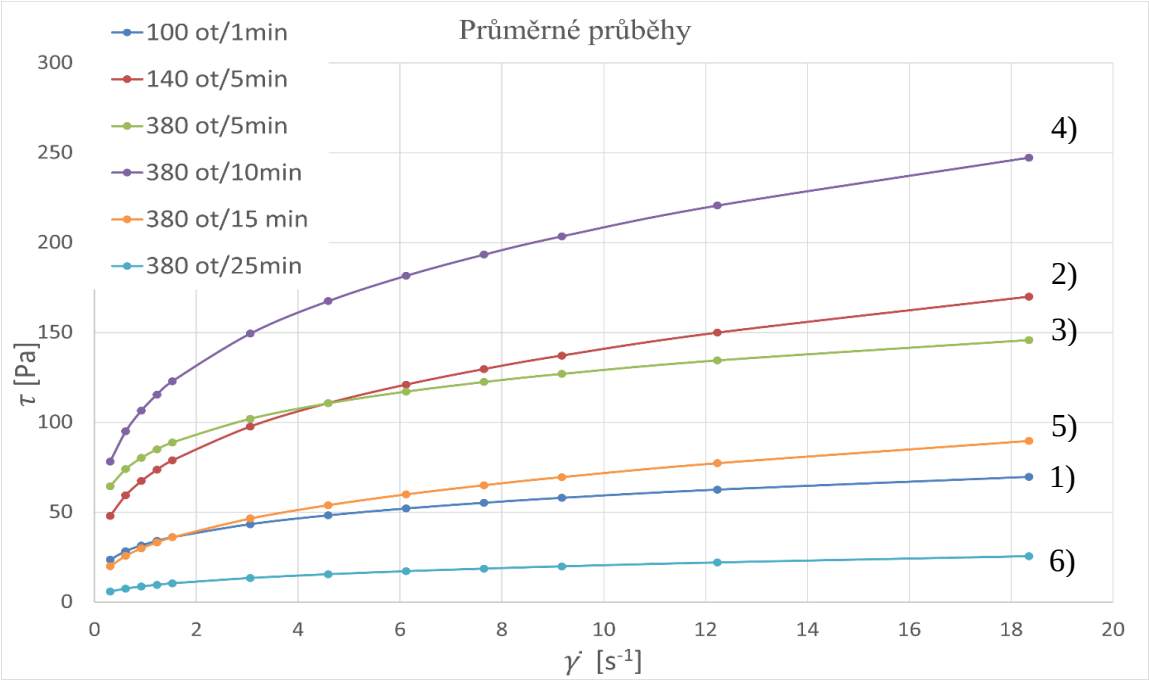
Po přípravě byl z každého vzorku třikrát odebrán a zvážen jeden litr směsi. Z naměřených parametrů byla vypočtena hustota jednotlivých vzorků. Z průměrných hodnot na obrázku 35 je patrný nárust hustoty s množstvím disipované energie. Při porovnání vzorků 2 (140 ot/min, 5 min) a 3 (380 ot/min, 5 min) je zřejmé, že hustota nezávisí pouze na době míchání, ale i frekvenci otáček. To může být způsobeno většími smykovými silami při vyšších otáčkách, což vede k jemnější struktuře a tím i většímu povrchu, kterým se může voda vsakovat do částic.

Zdá se, že se hustota blíží k limitní hodnotě, tedy maximu vody, kterou je substrát schopen pojmout.

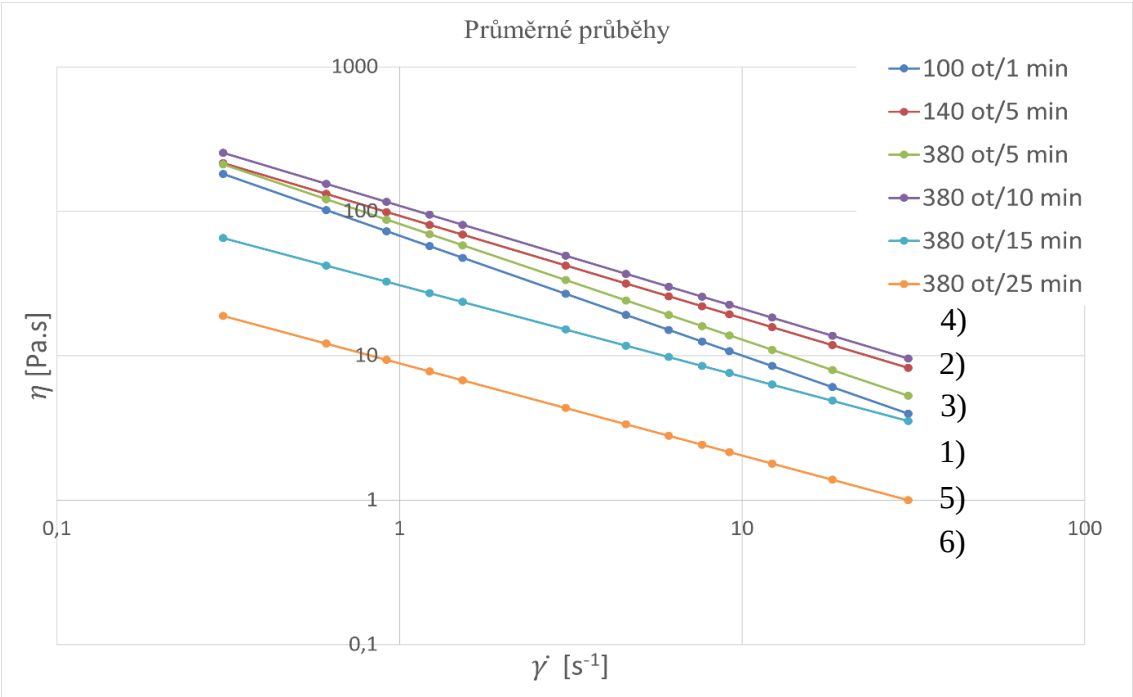


Obrázek 35: Průměrné naměřené hustoty jednotlivých vzorků

Na následujících obrázcích je srovnání průměrných průběhů závislosti smykového napětí a zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace pro jednotlivé vzorky.



Obrázek 36: Srovnání průměrných průběhů závislostí smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro jednotlivé vzorky



Obrázek 37: Srovnání průměrných průběhů závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace pro jednotlivé vzorky

6.6. Závěr z měření tokových vlastností substrátu

Hodnota indexu toku m byla pro všechny vzorky menší než jedna, naznačující pseudoplastické chování. Je však nutné si uvědomit, že část poklesu viskozity je důsledkem změny struktury substrátu. Vláknité částice se během měření rozmělňují, čímž vzniká více homogenní struktura, kladoucí menší odpor proti míchání.

Bylo přepokládáno, že viskozita směsi bude klesat s rostoucím množstvím disipované energie během míchání. Naměřené hodnoty však tento předpoklad nesplnily. Maximální viskozita byla naměřena u čtvrtého vzorku.

Nepřesnost měření může být způsobena tím, že se při míchání nehomogenní vláknité struktury substrát „nabalil“ na míchadlo, které pak pouze klouzalo po vrstvě substrátu mezi míchadlem a stěnou nádoby, podobně jako je popsáno v kapitole o měření reologických vlastností vláknitých struktur. Čtvrtý vzorek byl tedy dostatečně homogenizován na to, aby míchadlo promíchávalo celý objem nádoby, ale ne tolik, aby substrát nekladl téměř žádný odpor proti míchání.

Obecně byla u substrátu velmi špatná opakovatelnost měření, přestože byl pro všechna měření použit substrát se stejné šarže.

7. Návrh úpravy dávkovače substrátu

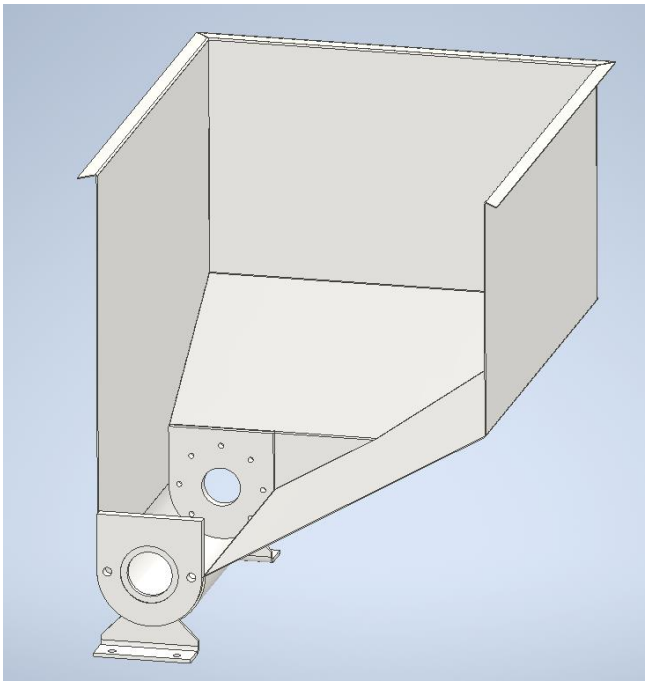
Při návrhu úprav dopravování substrátu do pracovního prostoru stroje se vycházelo z poznatků získaných při měření jeho vlastností. Hlavní body, podle kterých byl návrh vyhotovován byly:

Zachování způsobu dopravy substrátu, tedy v suspenzi s vodou pro lepší zatékání substrátu mezi kořeny vsazené sazenice uvnitř hotového kelímku.

Zajistit, aby měl dopravovaný substrát stále stejnou konzistenci. V původním řešení byl šroubový dopravník umístěn na dně násypky s mokrým substrátem, který přihrnoval substrát do vřetenového čerpadla. Problém spočíval v tom, že se okolo šroubu vytvořila kavita, do které pouze zatékala voda, ale substrát nikoliv. Tomuto problému se dá částečně předejít větším naředěním substrátu, což na druhou stranu prodlužuje dobu nutného odsávání vody ve formě stroje. Další možností je zajištění stálého míchání substrátu v násypce stroje (v zásobníku substrátu). To bylo původně zajištěno hydraulickým mícháním, kdy byl substrát neustále přečerpáván v uzavřeném okruhu, pouze při dávkování do formy byl otevřen pneumaticky ovládaný kulový kohout pro načerpání potřebné dávky do formy. Neustálým průchodem substrátu skrz vřetenové čerpadlo však docházelo k postupnému narušení struktury substrátu (rozmělnění vláken) a substrát tak ztratil požadovanou vzdušnost což mělo negativní vliv na kvalitu výrobku. Navíc se substrát postupně silně zahříval. Proto bylo od tohoto postupu upuštěno a čerpadlo se spíná těsně před požadavkem dávky substrátu. V tomto okamžiku však směs není promíchávána a dochází k oddělování vody, která se drží v prostoru šnekového přihrnovače. Dalším zjištěným problémem, na který upozornili pracovníci, kteří testují stroj v provozních podmínkách, je značná variabilita dávky substrátu.

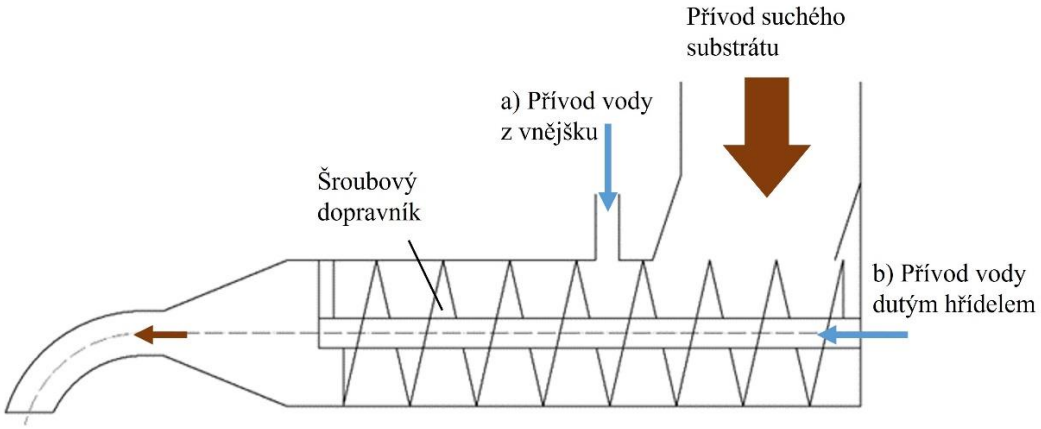
Nejméně komplikovaným řešením výše uvedených problémů by bylo dovybavit stávající zásobník substrátu mechanickým míchadlem, které by zajišťovalo promíchávání substrátu a zabránilo tak oddělování vody ze směsi. Míchání zároveň nesmí být příliš intenzivní, aby se co nejlépe zachovala struktura substrátu. Řešením by bylo horizontální míchadlo, které by bylo tvořeno horizontálním hřídelem, na němž by byly umístěny lopatky. Toto míchadlo by pracovalo s velmi nízkými otáčkami.

Vzhledem k ne příliš vhodnému tvaru zásobníku je však realizace takového míchadla velmi problematická, bylo by nutné pravděpodobně zkonstruovat zcela nový zásobník příhodnějšího tvaru. Problematickým místem je však nadále spodní žlab, kde je umístěn šnek přihrnovače k vřetenovému čerpadlu – zde by nedocházelo k míchání a voda by měla tendenci stále stékat do tohoto prostoru. Toto řešení navíc nevyřeší problém variabilní dávky substrátu do formy.



Obrázek 38: Aktuální zásobník na rašelinu (bez přední stěny pro lepší pohled dovnitř)

Návrh zcela jiného koncepčního řešení dávkovače je šnekový dopravník, do kterého je vsázen suchý substrát. Smíchání substrátu s vodou probíhá až uvnitř dávkovače. Dávkovač by byl tvořen menší násypkou, do které by byl buď manuálně, nebo pomocí korečkového dopravníku dopravován „suchý“ substrát. Na násypku by navazovala trubka, v níž je umístěn šnek. Substrát z pracovní násypky je šnekem odebírán do prostoru trubky. Do tohoto prostoru je vstřikována voda, substrát je namočen a v trubce promíchán. Následně je šnekem dopravován do dávkovací hubice.



Obrázek 39: Schéma návrhu úpravy dopravování rašeliny do pracovního prostoru automatického stroje na výrobu sazenic

Přívod vody do substrátu může být řešena dvěma různými způsoby:

a) Jedním či více přívody, rozmístěnými po vnějším povrchu dopravníku.
b) Skrze otvory v dutém hřídeli rotoru

Způsob a) je jednodušší, mohlo by ale dojít ke špatné distribuci vody do celého objemu. Spolehlivější bude pravděpodobně způsob b), případně kombinace obou způsobů. Výhodou tohoto řešení je i možnost řízení množství vody přiváděné do substrátu.

Určitým problémem tohoto konceptu dávkovače je nebezpečí destrukce struktury substrátu a tím ztráta jeho vzdušnosti. Šnek také nesmí substrát příliš stlačovat (lisovat), ale také musí zajistit dostatečný přetlak pro plnění formy. Tyto aspekty bude nutné brát do úvahy při návrhu šneku. Možným řešením by bylo zajištění dostatečné vůle mezi stěnou trubky a šnekem a také místo plného šneku použít šnek otevřený, který by byl tvořen pouze pásovinou (obdoba pásového míchadla).

Nevýhoda tohoto způsobu je, že dávkovač musí být umístěn na úrovní pracovního prostoru stroje. Tím pádem musí být výše i násypka na substrát, čímž dojde ke zvýšení náročnosti doplňování substrátu, bude-li doplňován ručně.

Závěr

Rešeršní část této práce se zabývá stroji na automatickou přípravu sazenic v květnících, zejména pak jakým způsobem je vyřešeno dávkování substrátu do pracovního prostoru stroje. Dále je představen automatický stroj na výrobu sazenic vyvinutý na Fakultě strojní ČVUT, ve kterém je substrát dávkován v suspenzi s vodou vřetenovým čerpadlem, jsou tedy hledána další čerpadla vhodná pro tuto aplikaci. Na konci rešeršní části jsou uvedeny metody pro charakterizování vlastností substrátu, přičemž hlavním zaměřením je reologie vláknitých suspenzí.

Další část práce se pak zabývá testováním vzorků vodní suspenze rašeliny, do kterých bylo pomocí míchání disipováno různé množství energie. Tyto vzorky pak byly otestovány na automatickém stroji pro výrobu sazenic a vyhodnoceny. Praktická část práce se pak dále zabývá měřením reologických vlastností, ve které jsou na míchací stanici prováděna měření reologických vlastností suspenze substrátu s vodou. Pomocí programu Excel jsou naměřená data převedena do grafů, podle který je prováděno vyhodnocování vlastností jako je závislost viskozity na frekvenci otáček míchadla či vliv množství disipované energie během míchání na strukturu suspenze. Experimentálně tak byla potvrzena značná citlivost vodní suspenze substrátu na působení smykových sil.

V závěru práce je navrženo zcela jiné koncepční řešení dávkovače substrátu ve fakultním stroji, které by mělo eliminovat problémy spojené se strukturou suspenze.

Seznam použitých symbolů

Znak	Název veličiny	Jednotka
d	průměr míchadla	[m]
k	Metznerova konstanta	[1]
K	koeficient konzistence	[Pa.s^m]
m	index toku	[1]
M_k	kroutící moment	[N.m]
n	frekvence otáček	[min^{-1}]
t	čas	[s]
P	příkon	[W]
Po	příkonové číslo	[1]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
$\overline{II}$	druhý invariant tenzoru rychlosti deformace	[s^{-2}]
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace	[s^{-1}]
η	zdánlivá viskozita	[Pa.s]
μ	dynamická viskozita	[Pa.s]
μ_p	plastická viskozita	[Pa.s]
ρ	hustota	[kg.m^{-3}]
τ	smykové napětí	[Pa]
τ_0	mezní hodnota smykového napětí	[Pa]
ω	úhlová rychlost	[s^{-1}]

Použité zdroje a literatura

[1] Rašelina a vše co o ní potřebujete vědět. In: *CANNA* [online]. [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.canna-cz.com/articles/raselina-vse-co-o-ni-potrebujete-vedet

[2] Seeder SA-10 – Seeder Machine. In: *VISSER horti systems* [online]. 2015 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.visser.eu/seeding-machines/seeder-sa-10/

[3] Quick Filler. In: *VISSER horti systems* [online]. 2015 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.visser.eu/filling-machines-potting-machines/quick-filler/

[4] Auto Seeder Granuplate. In: *VISSER horti systems* [online]. 2015 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.visser.eu/seeding-machines/auto-seeder-granuplate/

[5] Auto Seeder Roulette. In: *VISSER horti systems* [online]. 2015 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.visser.eu/seeding-machines/auto-seeder-roulette-ssl/

[6] CHEN, Aaron. Which type of pot-filling machine suits your nursery the best?. In: *Cmac* [online]. Austrálie [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.cmac.com.au/blog/which-type-poting-machine-suit-your-nursery-the-best

[7] Javo Super. In: *JAVO* [online]. 2022 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: http://www.javo.eu/en/products/javo-potting-machines/javo-super.html

[8] Javo Standard 2.0. In: *JAVO* [online]. 2022 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: http://www.javo.eu/en/products/javo-potting-machines/javo-standard-2.0.html

[9] Automatic potting machine CLASSIC MG. In: *AgriEXPO* [online]. 2022 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.agriexpo.online/prod/mosa-green/product-175536-49546.html

[10] CM III & CM X Potting Machines. In: *Bouldin&Lawson* [online]. 2015 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://bouldinlawson.com/cm-iii-cm-x-potting-machines/

[11] AUTOMATIC POTTING MACHINES IA2500 – IA2400. In: *URBINATI Nursery Technology* [online]. 2022 [cit. 2022-06-09]. Dostupné z: https://www.urbinati.com/en/product/automatic-potting-machines/

[12] MELICHAR, Jan. *Hydraulické a pneumatické stroje: část čerpadla*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04383-7.

[13] KARASSIK, Igor J. *Pump handbook*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-146044-6.

[14] ELSEY, Jim. A cutaway of a progressive cavity pump. In: *Pumps & Systems* [online]. USA: Summit Pump Inc., 2017 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.pumpsandsystems.com/sites/default/files/0617/CommonMistakes-Image-1.jpg

[15] AIMONEN, Petteri. File:Progressive cavity pump animation.gif. In: *Wikimedia Commons* [online]. Wikimedia Commons, 2020 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Progressive_cavity_pump_animation.gif&oldid=487803876

[16] KAYNAK, Faruk. Archimedes Screw. In: *GrabCAD* [online]. 2020 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: https://grabcad.com/library/archimedes-screw-12

[17] DUBOVSKÝ, Martin, František ŠRÁMEK, Václav NÁROVEC, Jarmila NÁROVCOVÁ a Ivan SUCHARA. *Rašelinové substráty s podílem tmavé rašeliny - jejich vlastnosti a použití*. 1. Průhonice: VÝZKUMNÝ ÚSTAV SILVA TAROUCY PRO KRAJINU A OKRASNÉ ZAHRADNICTVÍ, v. v. i., 2016. ISBN 978-80-87674-19-2.

[18] GARCÍA-VILLÉN, Fátima, Rita SÁNCHEZ-ESPEJO, Esperanza CARAZO, Ana BORREGO-SÁNCHEZ, Carola AGUZZI, Pilar CEREZO a César VISERAS. Characterisation of Andalusian peats for skin health care formulations. *Applied Clay Science*. 2018, **160**, 201-205. ISSN 0169-1317. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.017

[19] MEZGER, T G. *The Rheology Handbook: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers*. Vincentz Network, 2006. ISBN 9783878701743. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=N9Fdn0MEIDIC

[20] BARNES, H., J. HUTTON a Ken WALTERS. *An introduction to rheology*. Amsterdam: Elsevier, 1989. Rheology series. ISBN 0-444-87140-3.

[21] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-02933-6.

[22] NGUYEN, Quoc-Hung a Ngoc-Diep NGUYEN. Incompressible Non-Newtonian Fluid Flows. *Continuum Mechanics - Progress in Fundamentals and Engineering Applications* [online]. Londýn: IntechOpen, 2012, Ch. 3 [cit. 2022-06-10]. Dostupné z: doi:10.5772/26091

[23] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2022-05-23]. ISBN 80-7080-579-X. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-579-X/pages-pdf/143.html

[24] DERAKHSHANDEH, B., R.J. KEREKES, S.G. HATZIKIRIAKOS a C.P.J. BENNINGTON. Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review. *Chemical Engineering Science*. 2011, **66**(15), 3460-3470. ISSN 0009-2509. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.04.017

[25] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03302-3.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vlevo – celkový pohled na poloautomatický vysévač, vpravo detail vysévací hlavy stroje [2] 2
Obrázek 2: Vlevo – plnič pěstebních nádob, vpravo detail rotoru s gumovými klapkami plniče pěstebních nádob Quick Filler firmy VISSER, Holandsko [3] 3
Obrázek 3: Detail válcového vysévače holandského výrobce VISSER [5] 4
Obrázek 4: Manuální plnění květníku [6] 5
Obrázek 5: Nejčastější plnění korečkovým dopravníkem (na obr. Řešení firmy JAVO) [8] 7
Obrázek 6: Plnič JAVO SUPER – vpravo způsob dávkování do květníku pomocí lopatkového kola [7] .. 7
Obrázek 7: Plnič italské firmy Mosa Green v karuselovém uspořádání [9] 8
Obrázek 8: Vlevo plnič Bouldin&Lawson, vpravo detail vrtací jednotky plniče [10] 8
Obrázek 9: Plnič IA2500 firmy URBINATI (Itálie) [11] 9
Obrázek 10: Popis pracovního prostoru stroje 10
Obrázek 11: Čerstvě vyrobený kelímek (bez sazenice) 11
Obrázek 12: Řez vřetenovým čerpadlem [14] 12

Obrázek 13: Tvar dutin mezi rotorem a statorem [15] 12
Obrázek 14: Rotor šroubového čerpadla s jednochodým závitem [16] 13
Obrázek 15: Pístové čerpadlo [12] 14
Obrázek 16: Kulový ventil [12] 14
Obrázek 17: Membránové čerpadlo [12] 15
Obrázek 18: Schéma reometru a) s válcem b) s kuželem 17
Obrázek 19: Typy newtonských a nenewtonských kapalin [22] 18
Obrázek 20: Tokové křivky pro tixotropní a reopektický systém ve srovnání s newtonskou kapalinou [23] 19
Obrázek 21: Určení zdánlivého mezního napětí a) podle maximální hodnoty smykového napětí b) extrapolací ustáleného průběhu smykového napětí 20
Obrázek 22: Stanovení rozložení velikosti částic testovaného vzorku rašeliny 22
Obrázek 23: Série vyrobených vzorků v mokrém stavu 23
Obrázek 24: Kelímek z druhého vzorku 23
Obrázek 25: Kelímek z šestého vzorku 23
Obrázek 26: Měření tlaku potřebného pro vnik měřicího tělíska penetrometru do substrátu 24
Obrázek 27: Tlak potřebný pro porušení struktury substrátu 25
Obrázek 28: Schéma míchací stanice s centricky umístěným pásovým míchadlem 26
Obrázek 29: Míchací stanice 27
Obrázek 30: Závislost smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro vzorek 380 ot/min, 5 min 29
Obrázek 31: Závislost zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace pro vzorek 380 ot/min, 5 min 29
Obrázek 32: Porovnání rozptylu průběhů závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace jednotlivých vzorků 30
Obrázek 33: Měření změny smykového napětí s časem při konstantních otáčkách 31
Obrázek 34: a) průběh smykového napětí a b) jeho derivace podle času, vzorek 50 ot/min 32
Obrázek 35: Průměrné naměřené hustoty jednotlivých vzorků 33
Obrázek 36: Srovnání průměrných průběhů závislostí smykového napětí na rychlosti smykové deformace pro jednotlivé vzorky 34
Obrázek 37: Srovnání průměrných průběhů závislosti zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace pro jednotlivé vzorky 34
Obrázek 38: Aktuální zásobník na rašelinu (bez přední stěny pro lepší pohled dovnitř) 37
Obrázek 39: Schéma návrhu úpravy dopravování rašeliny do pracovního prostoru automatického stroje na výrobu sazenic 37

Seznam tabulek

Tabulka 1: Stanovení rozložení velikosti částic testovaného vzorku rašeliny 21
Tabulka 2: Specifikace vzorků 22
Tabulka 3: Naměřené hodnoty tlaku potřebného pro vnik měřicího tělíska penetrometru do substrátu 24
Tabulka 4: Maximální hodnota napětí při konstantní frekvenci otáček 31
Tabulka 5: Doba ustálení napětí pro jednotlivé vzorky 32