

# Návrh pneumatické dopravy písku na výrobu jader

Ondřej Prajs

---

Bakalářská práce  
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2018/2019

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Prajs**  
Osobní číslo: **T16034**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh pneumatické dopravy písku pro výrobu jader**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii a analýzu současného stavu**
- 2. Navrhněte technologii pneumatické dopravy písku pro 20t písku za den.**
- 3. Vypracujte technickou dokumentaci.**
- 4. Proveďte ekonomické zhodnocení**

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**  
Rozsah příloh:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Kemka, V, Barták, J, Milčák P, Žitek, P. : Stavba a provoz strojů, stroje a zařízení, Informatorium, Praha, 2009, ISBN 978-80-7333-075-0**
2. **Lukovics, I, Sýkorová, L, Volek, F : Části a mechanismy strojů, Skripta, ES VUT Brno, 2000, ISBN 80 - 214 - 1566 - 5,**
3. **Volek, F, : Základy konstruování a části strojů - mechanismy strojů, Skripta, UTB ve Zlíně, 2003, ISBN 80-7318 - 111 - 8,**
4. **Bolek, A, Kochman, J. a kol. : Části strojů, 2. svazek. SNTL Praha, 1990**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Volek, CSc.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 18. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: .....

Obor: .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem bakalářské práce je popsat rozdělení systémů pneumatické dopravy. Práce se dále zaměřuje na systémy, které se využívají ve slévárenství k dopravě abrazivních písků. Na základě teoretických poznatků a dat z měření porovnává bakalářská práce stávající pneumatickou dopravu, která ostřivo dopravuje dynamickým tlakem vzduchu a impulsní pneumatickou dopravou, která dopravuje zátky materiálu při nízkých rychlostech. V závěru práce je shrnuta kalkulace úspor za energii, za materiál na obnovu dopravní trasy při opotřebení, pořizovací ceny impulsní dopravy pro daný provoz a z toho vyplývající předpokládána návratnost investice.

Klíčová slova: pneumatická doprava, doprava křemenného písku, podavač materiálu,

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to describe different types of pneumatic transport. This thesis is further focusing on systems which are used in foundry industry to transport abrasive sands. Based on the theoretical knowledge and data from the measurements is compared the standing pneumatic transport, which uses dynamic air pressure and pulse pneumatic transport which transports plugs of material with low speeds. The conclusion of this thesis summarizes the calculation of energy savings, material savings for the renewal of worn piping, purchasing costs of impulse transport for production and predicted return of investment.

Keywords: pneumatic transport, transport of silicate sand, material feeder

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Františku Volkovi Csc. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Dále bych rád poděkoval technickému oddělení firmy Draxton Brno, za umožnění přístupu k jejich vybavení a zapůjčení nezbytných měřících přístrojů.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a elektronická verze bakalářské práce nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 PNEUMATICKÁ DOPRAVA</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ SYSTÉMU PNEUMATICKÉ DOPRAVY .....	12
1.2 ROZDĚLENÍ PODLE TLAKU V POTRUBÍ .....	13
1.2.1 Přetlakový systém .....	13
1.2.2 Podtlakový systém .....	13
1.2.3 Smíšený systém .....	14
1.3 ROZDĚLENÍ PODLE VELIKOSTI TLAKOVÉ ZTRÁTY V POTRUBÍ.....	14
1.3.1 Nízkotlakový systém .....	15
1.3.2 Středotlakový systém .....	15
1.3.3 Vysokotlakový systém .....	15
1.4 ROZDĚLENÍ PODLE KONSTRUKCE SYSTÉMU .....	15
1.4.1 Otevřený systém.....	15
1.4.2 Uzavřený systém .....	15
1.5 ROZDĚLENÍ PODLE ČASOVÉHO PROVOZU .....	16
1.5.1 Kontinuální systém.....	16
1.5.2 Diskontinuální systém .....	16
<b>2 VLASTNOSTI DOPRAVOVANÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 VLASTNOSTI DOPRAVOVANÝCH PÍSKŮ VE SLÉVÁRENSTVÍ.....	17
2.2 ROZDĚLENÍ SLÉVÁRENSKÝCH, PNEUMATICKY DOPRAVOVANÝCH LÁTEK, DLE JEJICH TRANSPORTNÍCH VLASTNOSTÍ.....	17
2.2.1 Práškové materiály .....	17
2.2.2 Zrnité materiály .....	18
2.2.3 Odpadová směs .....	18
<b>3 PODAVAČE MATERIÁLU</b> .....	<b>19</b>
3.1 PODAVAČE PRÁŠKOVÝCH MATERIÁLŮ .....	19
3.1.1 Šnekový podavač .....	19
3.1.2 Turniketový podavač.....	20
3.1.3 Komorový podavač s horním vyprazdňováním .....	20
3.2 PODAVAČE ZRNITÝCH MATERIÁLŮ .....	21
3.2.1 Dávkový komorový podavač se spodním vyprazdňováním. ....	22
3.2.2 Kontinuální impulsní pneumatický podavač.....	23
3.2.3 Porovnání dávkového a impulsního pneumatického podavače .....	25
<b>4 STROJE NA DOPRAVU A STLAČOVÁNÍ VZDUCHU</b> .....	<b>27</b>
4.1 ROZDĚLENÍ STROJŮ NA DOPRAVU A STLAČOVÁNÍ VZDUŠNIN.....	27
4.1.1 Pneumostatické .....	27
4.1.2 Pneumodynamické: .....	27
4.2 VENTILÁTORY .....	28
4.3 DMYCHADLA.....	29
4.4 KOMPRESORY.....	31
<b>5 POTRUBNÍ TRASA</b> .....	<b>33</b>



5.1	VOLBA PRŮMĚRU POTRUBÍ .....	35
<b>6</b>	<b>ODLUČOVACÍ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>SKLADOVÁNÍ PÍSKŮ V SILECH.....</b>	<b>38</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI .....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU.....</b>	<b>42</b>
9.1	KONCEPT STÁVAJÍCÍ PNEUMATICKÉ DOPRAVY .....	42
9.1.1	Plnicí část .....	43
9.1.2	Rozvodná část .....	44
9.1.3	Odlučovací část .....	47
9.2	URČENÍ PARAMETRŮ STÁVAJÍCÍ PNEUMATICKÉ DOPRAVY .....	47
9.2.1	Určení tlakové ztráty .....	47
9.2.2	Směšovací poměr .....	48
9.3	DEVALVACE ZRNA VLIVEM DOPRAVY DYNAMICKÝM PROUDEM VZDUCHU .....	50
9.3.1	Porovnání granulometrie písku dodaného producentem s granulometrií písku, který prošel stávající dopravní trasou .....	50
<b>10</b>	<b>NÁVRH NOVÉHO SYSTÉMU PNEUMATICKÉ DOPRAVY.....</b>	<b>52</b>
10.1	KONCEPT.....	52
10.2	URČENÍ PARAMETRŮ IMPULSNÍ PNEUMATICKÉ DOPRAVY .....	53
10.2.1	Měření tlakové ztráty .....	53
10.2.2	Směšovací poměr .....	54
10.3	DEVALVACE ZRNA VLIVEM IMPULSNÍ PNEUMATICKÉ DOPRAVY .....	55
10.3.1	Porovnání granulometrie písku dodaného producentem s granulometrií písku, který prošel dopravní trasou impulsního systému pneumatické dopravy.....	56
<b>11</b>	<b>OPOTŘEBENÍ DOPRAVNÍ TRASY .....</b>	<b>57</b>
<b>12</b>	<b>EKONOMIKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>59</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>68</b>

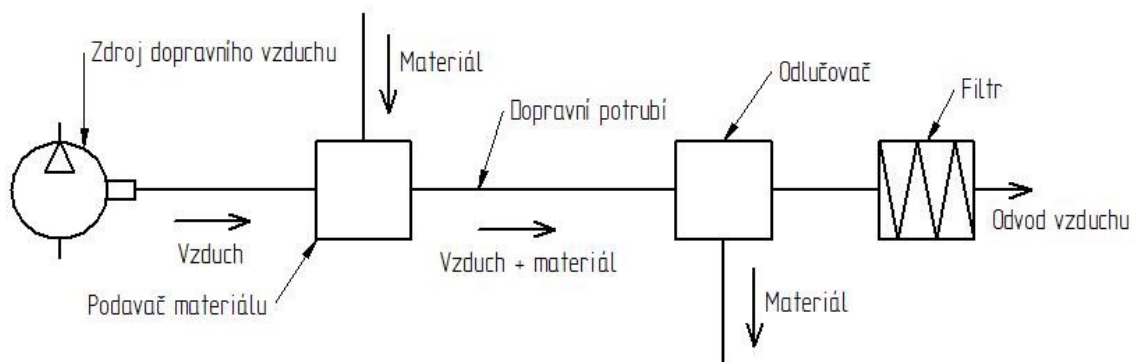
## ÚVOD

Pneumatická doprava historicky vznikla jako alternativa k dopravě mechanické. Tento způsob dopravy materiálů si našel uplatnění v mnoha odvětvích strojího průmyslu, v energetice, potravinářství, zemědělství a ve výrobních podnicích zejména ve slévárnách na což se ve své práci zaměřím.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 PNEUMATICKÁ DOPRAVA

Pneumatický dopravní systém slouží k dopravování práškových a zrnitých materiálů, nebo také odpadové směsi na delší vzdálenosti. Koncept pneumatické dopravy se skládá ze zásobníku materiálu, zdroje dopravního vzduchu, podavače dopravovaného materiálu, potrubní trasy, odlučovače a zásobníku, do kterého chceme daný materiál dopravit. Mezi zásadní výhody pneumatické dopravy patří její prostorová nenáročnost, snížení objemu prašných podílů ve výrobní hale, díky čemuž se prodlužuje životnost filtračního zařízení a také se významně sníží jeho potřebný výkon, v neposlední řadě pořizovací náklady bývají obvykle nižší než pořizovací náklady dopravy mechanické. Nevýhodou je větší spotřeba energie a fakt, že můžeme dopravovat pouze materiály určitých fyzikálních vlastností. Z hlediska údržby není péče o pneumatický systém náročnější než péče o dopravu mechanickou, ale díky elektropneumatickému systému řízení jsou kladeny větší nároky na odbornost zaměstnanců údržby. [3]



Obr. 1 Schéma pneumatické dopravy

### 1.1 Rozdělení systému pneumatické dopravy

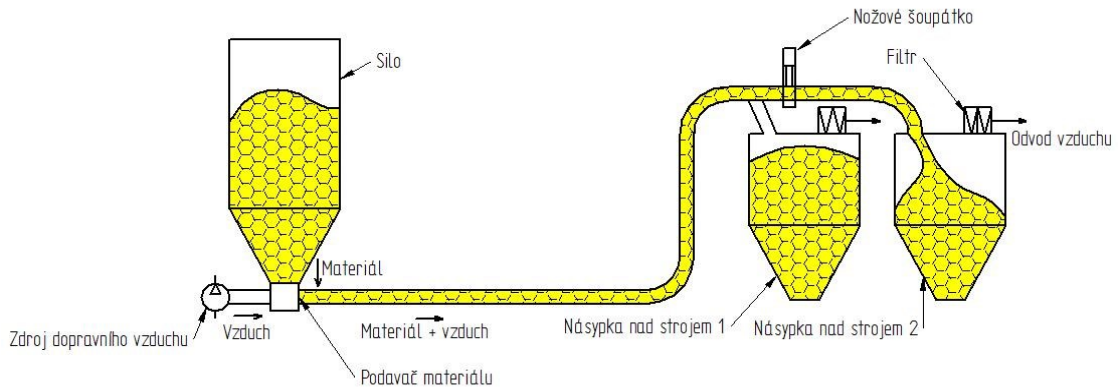
Systémy pneumatické dopravy je možné dělit dle mnoha různých hledisek. Především podle druhu dopravovaného materiálu, dopravovaného objemu daného materiálu a délky dopravní trasy. K dopravování materiálu můžeme využít podtlak, přetlak nebo jejich kombinaci. Můžeme dopravovat kontinuálně či diskontinuálně. Dále se dají systémy dělit dle velikosti tlakové ztráty. Rozdělujeme je na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké. Ve slévárenství se běžně používají dva základní systémy. Doprava materiálu v proudu vzduchu a doprava zátek zrnitého materiálu.

## 1.2 Rozdělení podle tlaku v potrubí

Dle tlaku v potrubí dopravní trasy vůči atmosférickému tlaku okolí dělíme pneumatickou dopravu na tři systémy. Přetlakový, podtlakový a smíšený systém.

### 1.2.1 Přetlakový systém

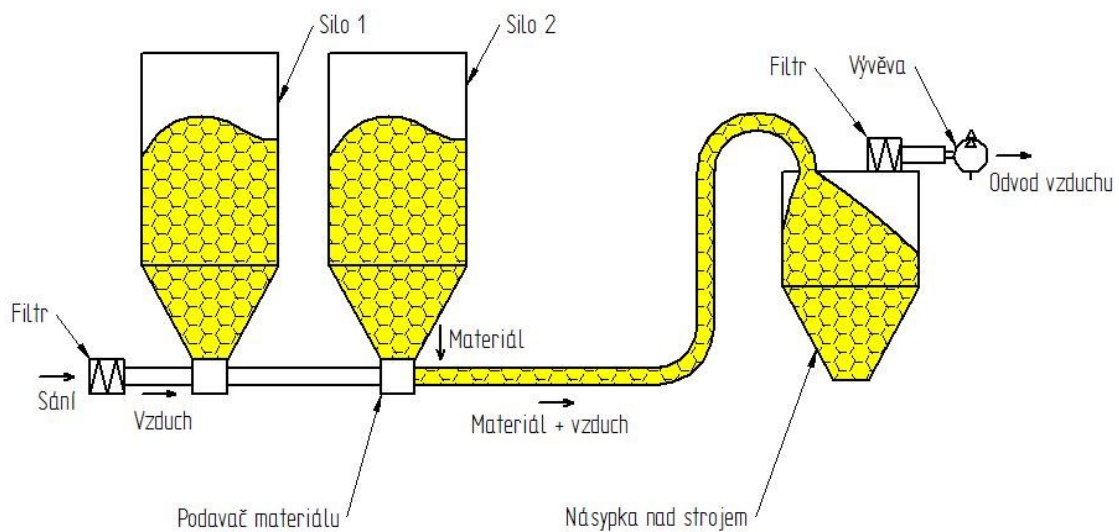
Přetlakový systém je nejběžnější systém, který se používá pro pneumatický transport. Podle velikosti přetlaku v potrubí se jako zdroj dopravního vzduchu používá kompresor, dmychadlo nebo ventilátor. Zdroj dopravního vzduchu se umísťuje na začátek dopravní trasy. Výhoda tohoto systému je možnost dopravovat materiál jedním zdrojem dopravního vzduchu do více násypek. Nevýhodou přetlakového systému je složitější konstrukce podavače materiálu. [1]



Obr. 2 Schéma pneumatické přetlakové dopravy

### 1.2.2 Podtlakový systém

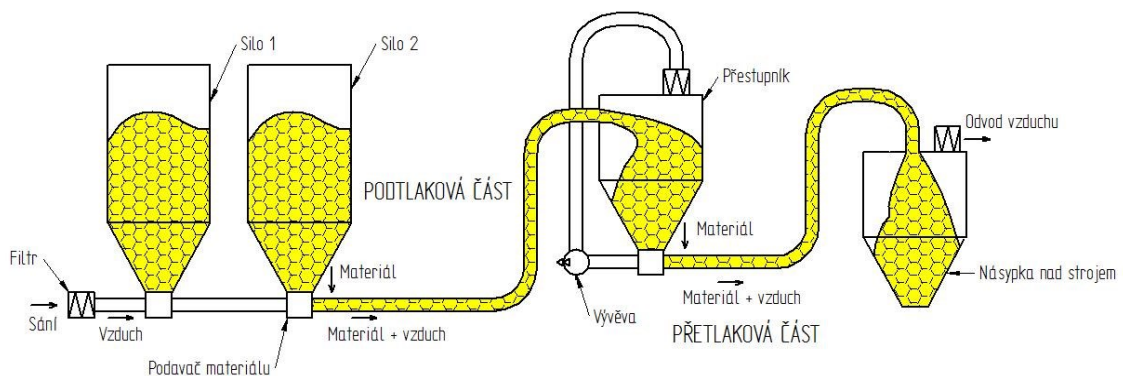
Na rozdíl od přetlakového systému se u podtlakové pneumatické dopravy umísťuje zdroj sání na konec dopravní trasy. Jako zdroj sání se používá vývěva, která vytváří v celé trase potrubí podtlak. Tento koncept je vhodné použít tam, kde se dopravují škodlivé materiály, jejichž únik by mohl být nebezpečný. Vlivem podtlaku v potrubí nehrozí únik materiálu vlivem netěsností. Výhodou tohoto systému je jeho schopnost dopravit materiál z více míst do jednoho zásobníku a jeho plynulé podávání materiálu do potrubní trasy. Nevýhodou je jeho omezený dosažitelný tlakový spád. [2]



Obr. 3 Schéma podtlakové pneumatické dopravy

### 1.2.3 Smíšený systém

Tento systém je kombinací systému podtlakového a přetlakového. Zdroj dopravního tlaku se nachází uprostřed dopravní trasy. Sání zdroje slouží v podtlakové části k vytvoření podtlaku a nasává materiál do tzv. přestupníku. V druhé části zdroj vytváří přetlak a dopravuje materiál dynamickým tlakem vzduchu do násypky. Výhodou tohoto systému je možnost dopravování materiálu z více zásobníků do více násypek. [3]



Obr. 4 Schéma smíšeného systému pneumatické dopravy

## 1.3 Rozdělení podle velikosti tlakové ztráty v potrubí

Při proudění skutečných tekutin vzniká tření o povrch dopravní trasy i tření uvnitř tekutiny (tzv. vnitřní tření). Třením tekutina ztrácí kinetickou energii. Aby protekla potrubím požadovanou rychlostí, musí získat kinetickou energii poklesem tlaku na druhé straně potrubí,

tím vzniká tlaková ztráta  $\Delta p_z$  [Pa]. Z tohoto hlediska dělíme systémy na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké.

### 1.3.1 Nízkotlaký systém

U nízkotlakého systému není rozdíl tlaků v dopravním potrubí větší než 0,1 bar. Jako zdroj nosného plynu se používá převážně ventilátor. Nízkotlaký systém může být podtlakový i přetlakový. [4]

### 1.3.2 Středotlaký systém

U středotlakého systému se pohybuje velikost tlakové ztráty od 0,1 bar do 0,5 bar. Jako zdroj nosného plynu se používá převážně dmychadlo. Stejně jako nízkotlaký systém může být podtlakový i přetlakový. [5]

### 1.3.3 Vysokotlaký systém

U vysokotlakého systému se velikost tlakové ztráty pohybuje nad 0,5 bar. Jako zdroj nosného plynu o tlaku do 1 baru se používá dmychadlo. Pro generování nosného plynu o tlaku nad 1 bar se používá kompresor. Vysokotlaký systém může být pouze přetlakový. [6]

## 1.4 Rozdělení podle konstrukce systému

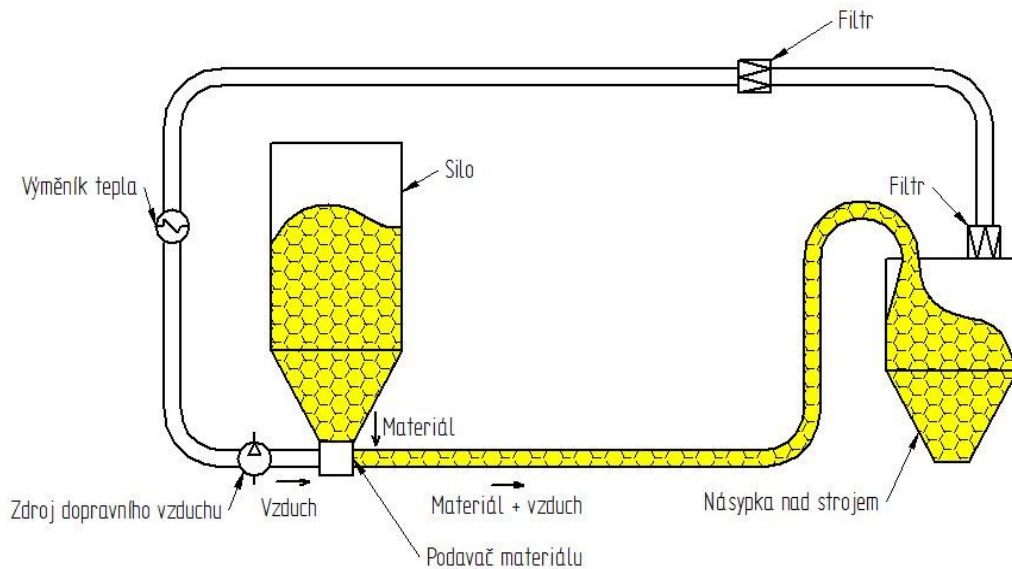
Systémy jsou rozlišeny dle nakládání s nosným plynem.

### 1.4.1 Otevřený systém

Tento systém využíváme pro dopravu většiny druhů materiálu. Nosný plyn, který je na začátku trasy nasán zdrojem se v cílové násypce oddělí od dopravovaného materiálu odlučovačem a je vypouštěn do okolí.

### 1.4.2 Uzavřený systém

Tento systém využíváme v provozech pro transport nebezpečných materiálů. Jedná se především o radioaktivní, nebo hořlavé materiály. Jako nosný plyn se u tohoto systému nevyužívá vzduch ale netečné plyny, převážně se využívá dusík.



Obr. 5 Schéma uzavřeného systému pneumatické dopravy

## 1.5 Rozdělení podle časového provozu

Z hlediska časového provozu dělíme systémy pneumatické dopravy na kontinuální a diskontinuální. Kontinuální systém dopravuje nepřetržitě konstantní množství. Jsou ovšem technologie, při kterých potřebujeme dopravovat materiál v určitých intervalech, takový systém nazýváme diskontinuální.

### 1.5.1 Kontinuální systém

Za kontinuální systém pneumatické dopravy můžeme považovat každý systém, jehož podavač kontinuálně dopravuje konstantní množství. Jedná se především o systémy na dopravu práškových materiálů, tedy pneumatické dopravy s turniketovým nebo šnekovým podavačem. Kontinuální systém se používá tam, kde je tok materiálu přibližně stejný po celou dobu výroby. Jako příklad uvádím dopravu popílku z odlučovače v teplárnách, nebo dopravu prachových podílů z filtračních zařízení. Pro kontinuální dopravu zrnitých materiálů se používá impulsivní pneumatický podavač, jehož výhodou je vysoká efektivita.

### 1.5.2 Diskontinuální systém

Diskontinuální systém pneumatické dopravy je takový systém, u kterého je jen část taktu určena k dopravě. Jedná se o systémy, které využívají komorových podavačů. Pro práškové materiály je to komorový podavač s horním vyprazdňováním, pro zrnité materiály komorový podavač se spodním vyprazdňováním.



## 2 VLASTNOSTI DOPRAVOVANÝCH MATERIÁLŮ

Vlastnosti dopravovaného materiálu zásadně ovlivňují volbu systému, jeho provoz a životnost. Pneumatickou dopravou lze dopravovat pouze materiály určitých vlastností. Významný vliv má například velikost zrna, tvrdost a vlhkost materiálu.

Na velikosti zrna dopravovaného materiálu závisí rychlost vznosu částice. Při dopravování jemných podílů nám hrozí, že se materiál bude v potrubí zanášet a může dojít k ucpání trasy. Při dopravování zrnitých materiálů při vyšších rychlostech může naopak docházet k drcení zrna a tím k devalvaci jeho kvality.

Při dopravě materiálů s vysokou tvrdostí dochází k vyšší abrazi dopravního potrubí, obzvláště v místech, kde trasa mění svůj směr. Rychlost částice v potrubí zásadně ovlivňuje životnost potrubí a je třeba to mít na paměti při navrhování vhodného typu pneumatické dopravy.

Vlhkost materiálů má také zásadní vliv. Platí, že materiály s obsahem vody nad 3% není možné dopravovat pomocí pneumatické dopravy. Vlhkost způsobuje lepivost materiálu v podavači, potrubní trase i v samotné násypce a hrozí tak ucpávání.

### 2.1 Vlastnosti dopravovaných písků ve slévárenství

Podmínkou pneumatické dopravy je technicky vysušený písek. Na dopravu má největší vliv velikost dopravovaných částic (zrnitost), celkový obsah jemných podílů a ztráta žíháním. Ztráta žíháním je tvořena obsahem vody ve směsi a množstvím spáleného pojiva. Pro dopravování křemenného písku se požaduje ztráta žíháním do 0,1% a množství vyplatitelných látek do 0,3%. [2]

### 2.2 Rozdělení slévárenských, pneumaticky dopravovaných látek, dle jejich transportních vlastností.

Doprovované látky rozdělujeme dle velikosti zrna na základní tři skupiny: práškové materiály, zrnité materiály a odpadovou směs. [2]

#### 2.2.1 Práškové materiály

Jedná se o materiály, které jsou sypké, málo prodyšné a mají široké spektrum zrnitosti do velikosti 0,1mm. Do této skupiny patří bentonit, práškový uhlík nebo prach z filtrů. Tuto

skupinu materiálů dopravujeme slabým až hustým proudem vzduchu, částice jsou unášeny dynamickým tlakem vzduchu. [2]

### **2.2.2 Zrnité materiály**

Jsou to materiály, které jsou sypké, porézní, s úzkým spektrem zrnitosti, kde se velikost zrna pohybuje od 0,1mm do 0,7mm. Do této skupiny patří křemený písek a regenerát. Pro tento typ materiálů se využívá impulsní doprava, tedy doprava zátek zrnitého materiálu. [2]

### **2.2.3 Odpadová směs**

Jsou to materiály, které mají široké spektrum zrnitosti, jedná se o kombinaci výše zmíněných skupin, tedy materiál, který obsahuje částice zrnité i práškové. Do této skupiny patří suchá vratná směs, odpadový písek nebo vratná směs z tryskače. Pro tento typ materiálu se používá impulsní doprava. [2]

### 3 PODAVAČE MATERIÁLU

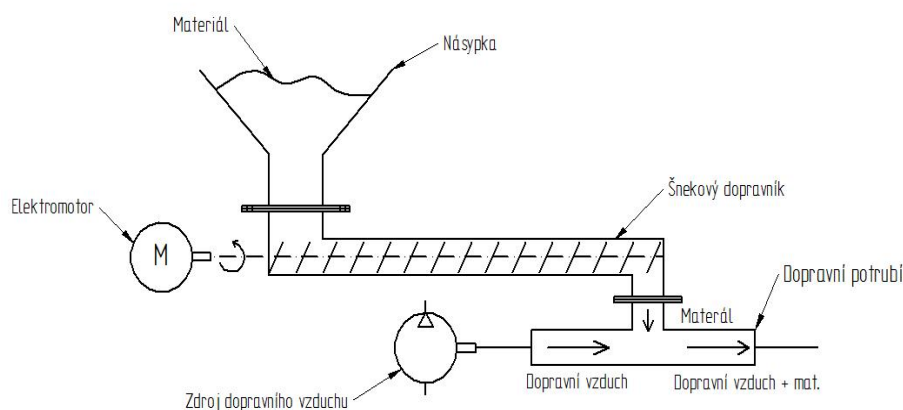
Podavač materiálu slouží k dopravování materiálu do potrubí. Je zapotřebí zvolit vhodný podavač vzhledem k dopravovanému materiálu. U přetlakového systému je nutné si uvědomit, že každý podavač musí zároveň sloužit jako tlakový uzávěr, který musí odolat přetlaku v potrubí. Z důvodu překonání tlaku v potrubí dochází u každého podavače k energetickým ztrátám. Podavače můžeme dělit dle časového provozu, tedy na kontinuální a diskontinuální, nebo dle dopravovaného materiálu, tedy na podavače pro zrnité materiály, které dopravují zátky materiálu při nízkých rychlostech a podavače pro práškové materiály, které dopravují materiál dynamickým tlakem vzduchu při vysokých rychlostech.

#### 3.1 Podavače práškových materiálů

Tyto látky se dopravují slabým, nebo hustým proudem vzduchu. Rychlost vzduchu se na začátku potrubí pohybuje okolo 10 m/s, rychlost vzduchu na konci potrubí dosahuje rychlosti až 30 m/s. Jednotlivé částičky materiálů se nacházejí v potrubí relativně daleko od sebe. Rychlost vzduchu se vzdáleností roste, oproti tomu tlak vzduchu lineárně klesá. Vlivem malé hmotnosti prachových částic nedochází k masivní abrazi i při vysokých dopravních rychlostech. [2]

##### 3.1.1 Šnekový podavač

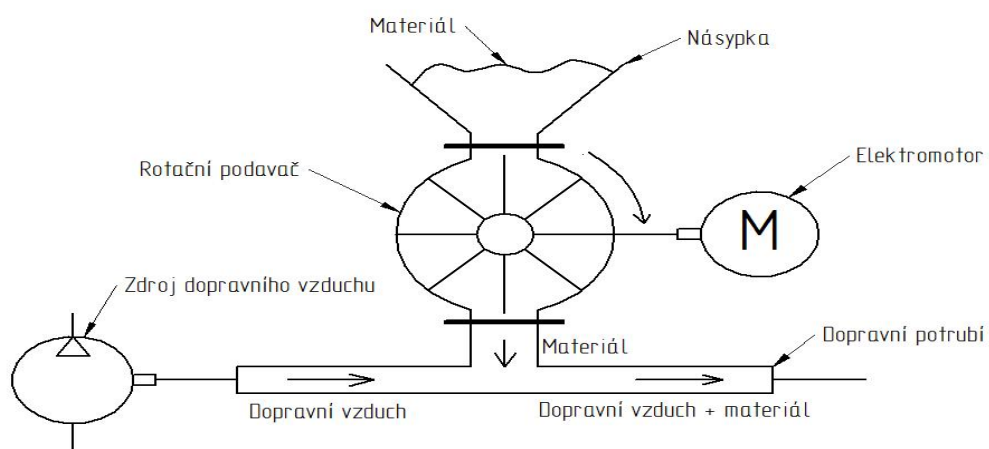
Šnekový podavač dopravuje materiál do proudu vzduchu v potrubí. Šnekový podavač se skládá z násypky, pohonu, šnekového hřídele a válce šnekového hřídele. Dopravováním materiálu, vzniká ve šneku materiálová zátka, která slouží jako tlakový uzávěr. Při překonávání odporu materiálu a tlaku vzduchu šnekovou hřídelí dochází k energetické ztrátě.



Obr. 6 Schéma šnekového podavače materiálu

### 3.1.2 Turniketový podavač

Turniketový podavač také dopravuje materiál do proudu vzduchu v potrubí. Turniketový podavač se skládá z pohonu, těla (statoru) a hřídele (rotoru), která je opatřena několika lopatkami. Materiál je přiváděn do podavače, který rotuje. Mezi lopatkami a tělem podavače je dopravován materiál, který ve spodní části padá do dopravního potrubí. Pro zachování funkčnosti zařízení musí lopatky těsnit, tedy musí doléhat k tělu podavače. Energetická ztráta pro vytvoření tlakového uzávěru, je u tohoto typu podavače tvořena energií potřebnou pro pohon rotoru.

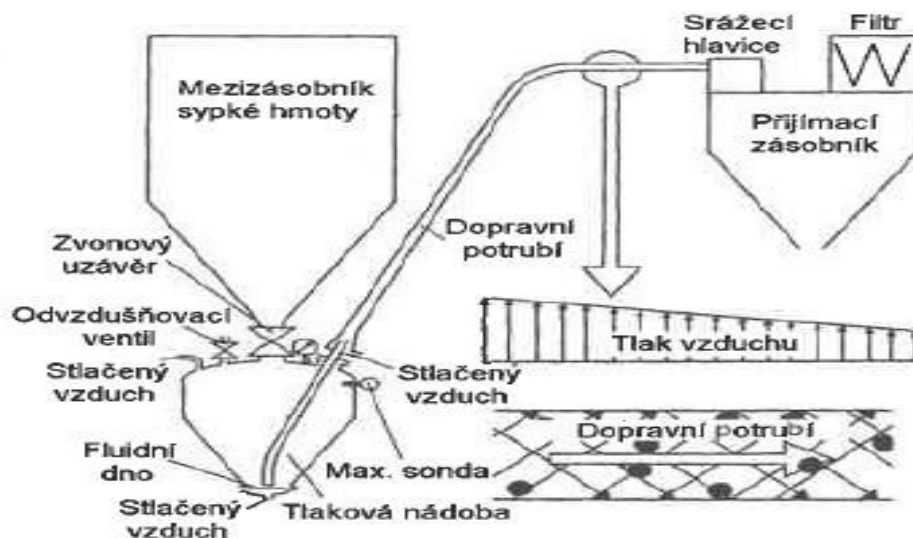


Obr. 7 Schéma turniketového podavače

### 3.1.3 Komorový podavač s horním vyprazdňováním

Podavač se skládá ze vstupní části se zvonovým uzávěrem, odvzdušňovacího ventilu, přívodu vzduchu, dopravního potrubí, tlakové komory, porézního přepážky a ovládacích snímačů, které řídí cykly plnění a dopravování. Tyto snímače současně kontrolují úroveň hladiny písku. Podavač má spodní část dvojí. Nad vlastním dnem je porézní přepážka (silonová tkanina, jemné kovové síto). Do tohoto prostoru je zaústěn hlavní přívod dopravního vzduchu. Porézní přepážka stejnosměrně po své ploše rozvádí vzduch do podavače, ale je tak jemná, že nedochází k propuštění písku do prostoru pod ní. Je-li podavač naplněn materiálem a pod porézní přepážku proudí vzduch, dochází k provzdušnění a materiál se stává fluidním. To znamená, že se materiál promísí se vzduchem a tím se zvýší jeho schopnost k dopravě. Vedlejší přívod vzduchu je přiveden do dopravního potrubí a urychluje tak pohyb částic v potrubí. Doba vyprazdňování je závislá na objemu tlakové komory, délce potrubí a na druhu materiálu. Je-li podavač přímo pod silem, doba plnění se pohybuje okolo jedné

minuty. Dříve se tento systém používal i na dopravu křemených písků, kde doba vyprazdňování mohla dosáhnout až 30 min, s koncentrací 10 kg písku na 50 kg vzduchu. Při dopravě bentonitu se doba vyprazdňování pohybuje v řádu minut. Dopravní koncentrace pro bentonit je 30 kg bentonitu na 40 kg vzduchu, přičemž za normálních podmínek má jeden kubický metr vzduchu hmotnost 1,2 kg. Při údržbě je nutné se zaměřit na kontrolu porézní přepážky, protože je velice náchylná k zalepování, zejména když není vzduch z kompresorovny dostatečně vysušen. Po naplnění komory podavače je nutné materiál co nejdříve dostat z podavače do potrubí z důvodů zalepování porézní přepážky. Dnes se vyrábí velká spousta řad a typů podavačů s různými objemy komor od 0,5 až do 15 m<sup>3</sup>. Jedná se o diskontinuální druh dopravy. Energetická ztráta je zde tvořena ztrátou tlakového vzduchu, při odvzdušnění tlakové komory, před plněním. [2,3]

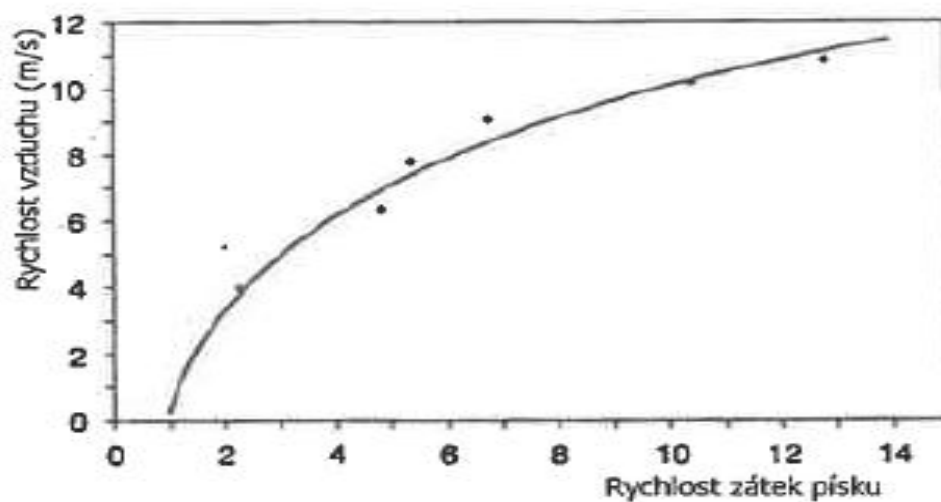


Obr. 8 Komorový podavač s horním vyprazdňováním [2]

### 3.2 Podavače zrnitých materiálů

Při transportu zrnitých materiálů vysokými rychlostmi dochází vlivem tvrdosti a vysoké hmotnosti zrn ke značnému opotřebení potrubí. Opotřebení je nejvíce patrné v obloucích dopravní trasy a na povrchu zrn. To vede k přerušování provozu, nákladům na obnovu potrubní trasy, vytěžování zaměstnanců údržby a v důsledku deformace zrna i k ovlivnění kvality produktu. Opotřebením zrn se zvyšují jemné podíly ve směsi, mění se zrnitost směsi a tím se zvyšuje spotřeba pojiv, což se opět projeví na nákladech.

Z těchto důvodů se musí zrnité materiály dopravovat šetrně. Zrnité materiály se vyznačují vysokou prodyšností. Stlačený vzduch proudí systémem v potrubí, kde se samovolně vytvářejí pískové zátky, které se pomalu pohybují směrem k násypce. Vzduch proudí z jednoho do předchozího vzduchového polštáře přes pískovou zátku a uvolňuje ji tak, že se může snadno přesouvat. Potřebný dynamický tlak, pro dopravu písku, vytváří vzduch, který proudí v pórech mezi zrny. Maximální rychlost přesunu zátek je 5 m/s, přičemž zátky ostřiva dosahují zhruba poloviční rychlosti vzduchu (viz. Obr. 9). Spotřeba vzduchu a s tím spojená energetická spotřeba vzrůstá exponenciálně s růstem rychlosti vzduchu. Opotřebení potrubí také roste exponenciálně s rychlostí vzduchu, proto je vhodné pro velké objemy materiálu volit velké průřezy dopravního potrubí a zachovat nízkou rychlost vzduchu, tím dosáhneme efektivního využití. Lépe se dopravují okrouhlá zrna než zrna s drsným povrchem. Hospodárného provozu využijeme tak, že využijeme tlak a na minimum snížíme množství vzduchu. [2]

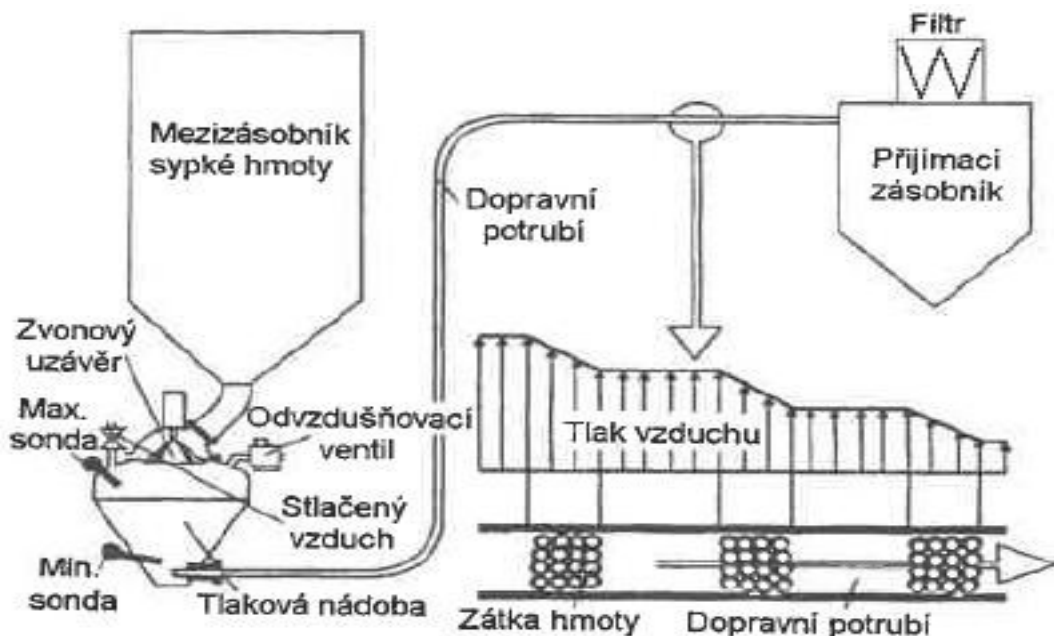


Obr. 9 Závislost rychlosti pohybu zátek písku na rychlosti hnacího vzduchu [2]

### 3.2.1 Dávkový komorový podavač se spodním vyprazdňováním.

Podavač se skládá z tlakové nádoby, zvonového uzávěru, přívodu vzduchu, odvzdušňovacího ventilu, hladinových sond a výstupní části. Ostřivo vstupuje ze sila do tlakové nádoby přes zvonový uzávěr až po úroveň maximální hladiny, kterou snímá sonda. Následně se podavač uzavře a do nádoby začne proudit stlačený vzduch. V potrubí jsou ještě zátky z předchozího cyklu. Vzduch proudí ostřivem v podavači do potrubí a přes zátky až do násypky

nad strojem. Jestliže na konci trasy vypadne zátka do násypky nad strojem, je tlak v komorovém podavači větší než tlak potřebný k dopravování zátek, které se nacházejí v potrubí, proto se zátka budou pohybovat v potrubí směrem k násypce nad strojem a vzduch bude unášet ostrívo z podavače do potrubí, kde se budou tvořit nové zátka. Tento postup se opakuje, dokud hladina písku nedosáhne minimální úrovně hladinové sondy. Následně se otevře odvzdušňovací ventil a podavač se znovu naplní a cyklus se opakuje. Při plnění se pohyb v potrubí zastaví a než se znovu začne dopravovat, musí vzduch proniknout zbylými zátkami v potrubní trase pod předchozím taktu. Bylo by nevhodné po každém cyklu profouknout trasu a dopravit tak písek do násypky nad strojem, zároveň by se zvýšilo opotřebení trasy. Z popisu cyklu tedy vyplývá, že se jedná o diskontinuální dopravu, kde je jen určitá část cyklu vyhrazena k dopravě. Energetická ztráta je zde tvořena ztrátou tlakového vzduchu při odvzdušnění tlakové komory před plněním. Tento způsob dopravy umožňuje dopravovat křemenné písky až na vzdálenost 150 m. Dopravní koncentrace pro křemenný písek se pohybuje okolo 50 kg vzduchu na 20 kg písku. K nevýhodám diskontinuální impulsní dopravy patří vyšší spotřeba energie a vyšší opotřebení potrubí. [2,3]

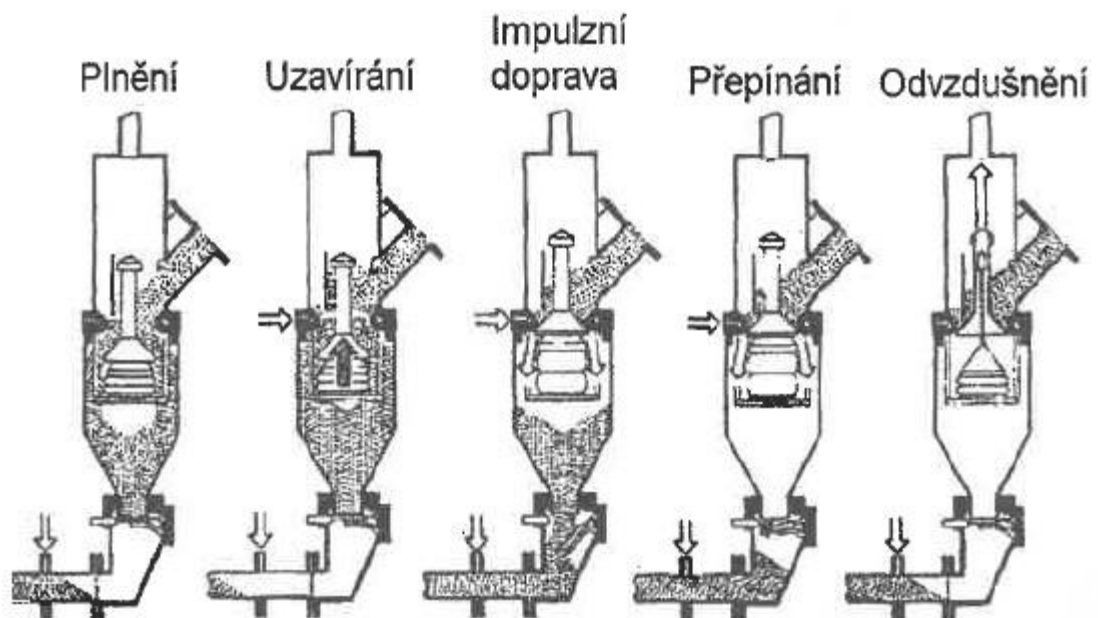


Obr. 10 Dávkový komorový podavač se spodním vyprazdňováním [2]

### 3.2.2 Kontinuální impulsní pneumatický podavač

Kontinuální impulsivní pneumatický podavač odstraňuje nevýhody dávkové pneumatické dopravy, která používá komorový podavač se spodním vyprazdňováním. K zásadním výhodám kontinuální dopravy patří její plynulost, nižší spotřeba vzduchu, nižší dopravní rychlost

a s tím spojené menší opotřebení dopravního potrubí. Menší rozměry podavače je možné využít k relativně přesnému sledování množství dopravovaného písku za jednotku času. Tento druh pneumatické dopravy odebírá dávky písku ze sila a podává ho kontinuálně do násypky nad strojem. Cyklus tohoto podavače se skládá z pěti fází: plnění, uzavírání, dopravě, přepínání a odvzdušnění, následně se cyklus opakuje. Při plnění se otevře zvonový uzávěr a písek nateče do podavače, přičemž výstupní klapka je k těsnění dotlačena pružinou a působením tlaku dopravního vzduchu. Plnění je časově řízeno. Po uplynutí doby plnění se dosedací plocha zvonového uzávěru očistí vzduchem, který proudí ze vzduchových trysek, které jsou uspořádány do prstence, a zvonový uzávěr se těsně uzavře. Výstupní klapka je stále uzavřená a do potrubí proudí vzduch, který dopravuje zátky. Následně se do tlakové nádoby přivede stlačený vzduch, jakmile dojde v nádobě k překročení tlaku v potrubí, otevře se výstupní klapka a písek se převede do potrubí. Jakmile se tlaková nádoba vyprázdní, zvedne se pružina výstupní klapky a přitlačí klapku na těsnění dosedací plochy, sepne se minimální hladinová sonda, vzduch v nádobě očistí sedlo výstupní klapky, přeruší se přívod stlačeného vzduchu do nádoby, odvzdušní se měch vstupního zvonového uzávěru a otevře se odvzdušňovací ventil nádoby. Současně se vlastní hmotností otevře zvonový uzávěr a nádoba se gravitačně naplní pískem. [2]



Obr. 11 Jednotlivé fáze cyklu kontinuálního impulsního pneumického podavače

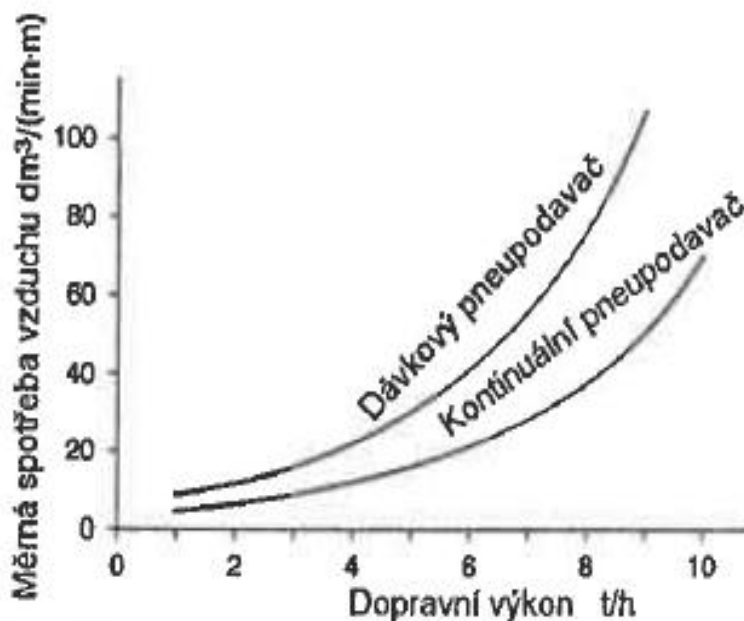
[2]



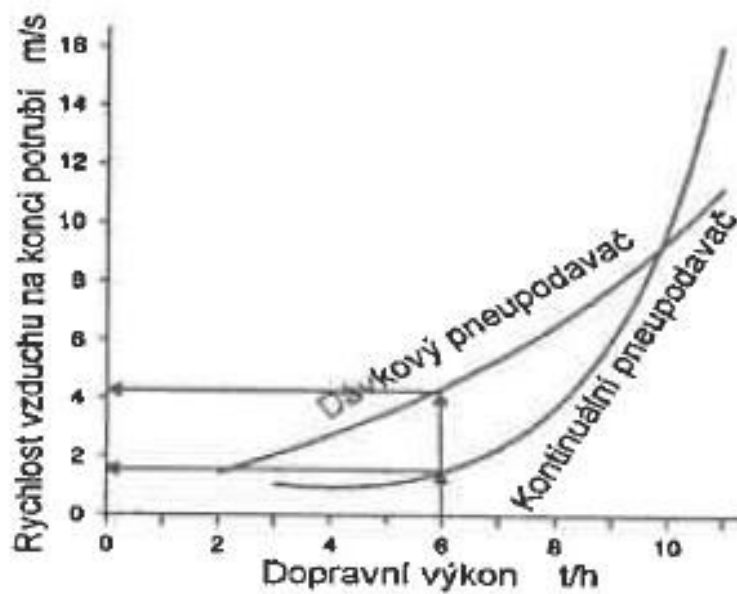
### 3.2.3 Porovnání dávkového a impulsního pneumatického podavače

Na níže uvedených obrázcích (Obr. 12, 13) můžeme vidět závislost měrné spotřeby vzduchu a rychlosti proudění vzduchu dle dopraveného množství materiálu. Z obr. 12 je patrné, že kontinuální impulsní pneupodavač dopraví stejné množství materiálu při poloviční spotřebě vzduchu, ve srovnání s dávkovým pneumatickým podavačem. Z obr. 13 plyne, že kontinuální impulsní pneupodavač dokáže při nižších dopravovaných objemech vygenerovat stejný dopravní výkon jako dávkový podavač, ale při dvojnásobně menší dopravní rychlosti.

Z daného porovnání se jeví impulsní pneumatický podavač jako výhodnější při použití v praxi. Tato zjištění se projeví nižší spotřebou energie, menším opotřebením dopravní trasy, tzn. nižší náklady na opravy a obnovu dopravního potrubí.



Obr. 12 Závislost měrné spotřeby vzduchu na dopravovaném množství materiálu pro dávkový a kontinuální pneupodavač [2]



Obr. 13 Závislost rychlosti proudění vzduchu na koci potrubí a dopravovaného množství materiálu pro dávkový a kontinuální pneupodavač [2]

## 4 STROJE NA DOPRAVU A STLAČOVÁNÍ VZDUCHU

Pro vytvoření potřebného tlakového spádu, při určitém množství dopravního plynu, se využívá různých zdrojů. Pro výběr vhodného zdroje jsou zásadní tato hlediska: charakteristika zdroje, příkon zdroje, závislost zdroje na zatížení a zahřátí plynu při průchodu zdrojem. [4]

### 4.1 Rozdělení strojů na dopravu a stlačování vzdušnin

Stroje se rozdělují dle způsobu přeměny energie

#### 4.1.1 Pneumostatické

Tyto stroje se také nazývají objemové. Mechanická energie pohonu se zde transformuje na tlakovou energii dopravního plynu. Plyn se přemísťuje pomocí výtlačného tělesa. Toto těleso může být membrána, šroub, lamela a píst. Dle hodnot tlaku výtlačného  $p_v$  a tlaku sacího  $p_s$  dělíme pneumostatické stroje:

- Kompresory – hodnota  $p_v$  je vyšší než 3 bar. Používají se výhradě pro přetlakový systém.
- Dmychadla – hodnota  $p_v$  se pohybuje mezi 1-3 bar. U podtlakového systému generuje dmychadlo podtlak v rozsahu 0,15-0,5 bar.
- Vývěvy – hodnota  $p_s$  je nižší než 1 bar, tedy je nižší než atmosférický tlak. Vývěva dokáže vygenerovat podtlak o velikosti 0,9 bar.

#### 4.1.2 Pneumodynamické:

Tyto stroje se také nazývají rychlostní. Mechanická energie pohonu se pomocí oběžných kol s lopatkami nejdříve přemění na kinematickou energii vzduchu a následně až v další části se částečně přemění na tlakovou energii.

- Ventilátory – rozdíl mezi tlaky  $p_s$  a  $p_v$  je do 0,1 bar. Používají se jak u přetlakového i podtlakového systému.
- Turbodmychadla – rozdíl mezi tlaky  $p_s$  a  $p_v$  je nad 0,1 bar. Výtlačný tlak se pohybuje ve stejném rozmezí jako u dmychadel. Jsou to stroje radiální jednostupňové, nebo vícestupňové bez mezistupňových chladičů.

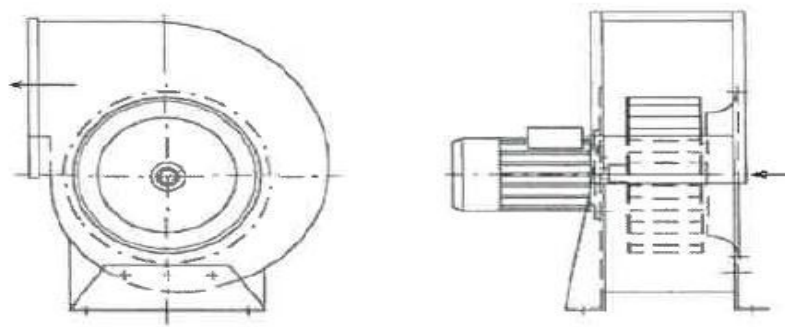
- Turbokompresory – rozdíl mezi tlaky  $p_s$  a  $p_v$  je nad 1 bar. Výtlačný tlak se pohybuje ve stejném rozmezí jako u kompresorů. Tyto stroje jsou vždy více-  
stupňové. Za turbokompresory považujeme všechny axiální vícestupňové  
stroje, nebo stroje radiální s mezistupňovými chladiči.

Z rozdělení je patrné, že stroje pneumostatické se používají v aplikacích, kde jde především o změnu tlaku, stroje pneumodynamické se používají tam, kde je potřeba vygenerovat určité dopravované množství. Stroje pracují tak, že tlak ve stroji, kam se nasává plyn je nižší než je atmosférický tlak okolí, z kterého je plyn nasáván. Následně se tlak ve stroji zvýší natolik, aby vzdušina mohla vystupovat ze stroje s vyšší energií. U stlačované látky se mění její kinetická, tlaková a tepelná energie.[5]

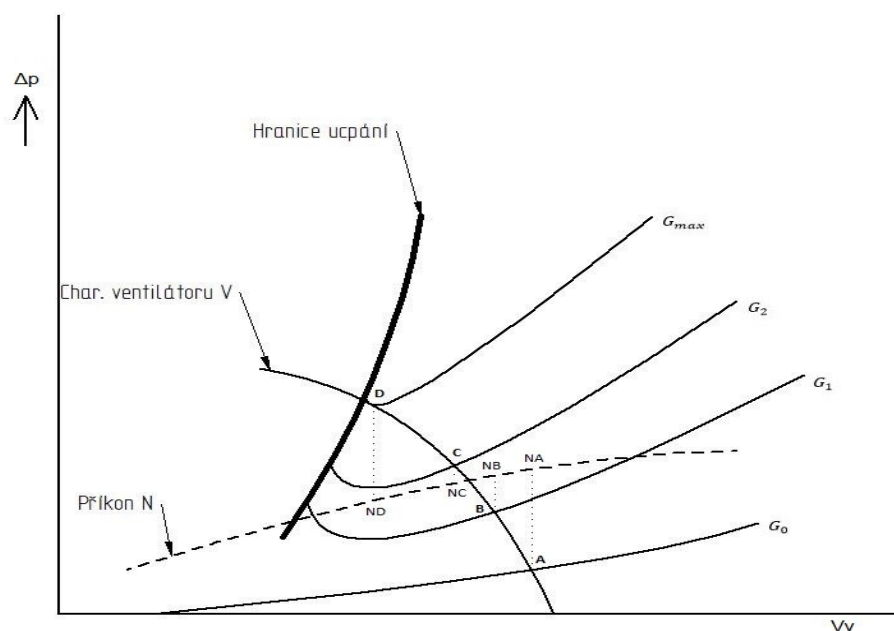
## 4.2 Ventilátory

Pro nízkotlaký systém pneumatické dopravy se používá jako zdroj dopravního vzduchu ventilátor a to jak pro přetlakový tak pro podtlakový systém pneumatické dopravy. Ventilátory můžeme dělit na axiální a radiální. Charakteristika ventilátoru udávající závislost tlaku na dodávaném objemu dopravního plynu je na obr. 15. Do diagramu jsou zakresleny charakteristiky určitých dopravovaných množství materiálu. Provozní bod je průsečík charakteristiky ventilátoru a charakteristiky dopravovaného množství materiálu. Při chodu ventilátoru na prázdno, tedy v době, kdy podavač materiálu nedodává žádné množství  $G_0$  je provozní bod v bodě A. Při dopravě určitého množství materiálu  $G_1$  je provozní bod v bodě B. Zvýší-li se množství na  $G_2$ , posune se provozní bod do bodu C. Maximální dopravní výkon znázorňuje charakteristika  $G_{max}$  na jejímž průsečíku s charakteristikou ventilátoru se nachází bod D. Už při malém navýšení dopravovaného množství se systém ucpe. Je tedy nutné nastavit podavač materiálu tak, aby dodával množství dosti vzdálené od charakteristiky  $G_{max}$ . Do grafu je dále vyznačen průběh příkonu pohonu ventilátoru. Z grafu plyne, že největší příkon ventilátoru je při chodu na prázdno. Je proto nutné dimenzovat motor na stav v bodě A. Příkon pohonu pro určitý provozní bod se vypočítá dle rovnice (1). [4]

$$N = \frac{V_v \Delta p}{102 \eta_v} \text{ [N]} \quad (1)$$



Obr. 14 Radiální ventilátor se spirálovou skříní [5]



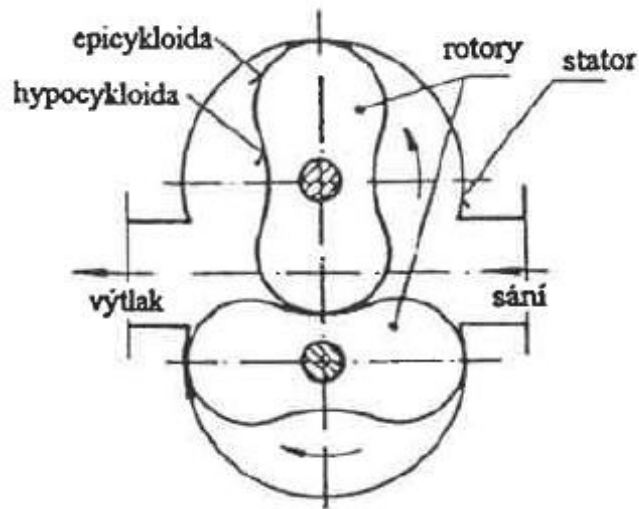
Obr. 15 Charakteristika ventilátoru [4]

### 4.3 Dmyhadla

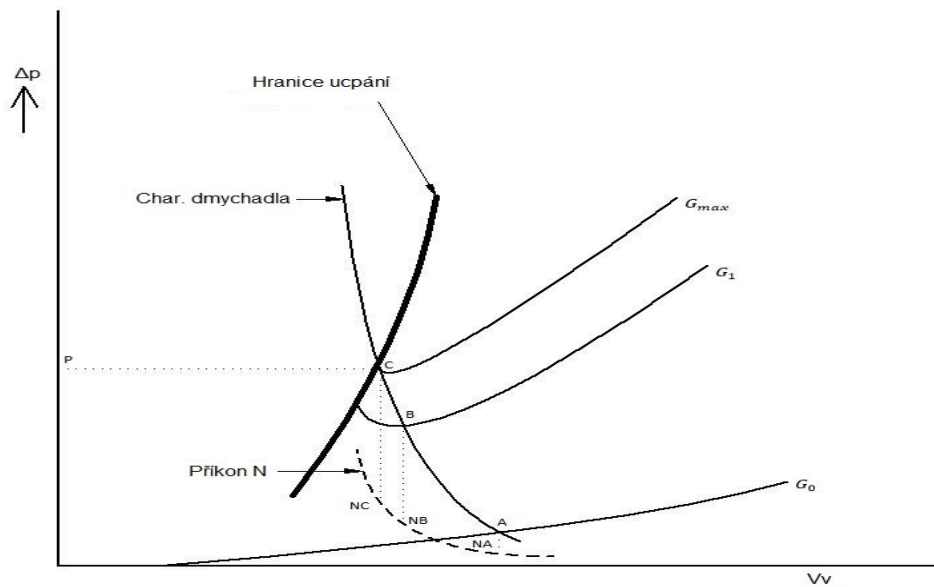
Pro středotlaký systém se v praxi osvědčily dmyhadla s rotačními písky systému Roots. Mezi výhody dmyhadla typu Roots patří jeho malý rozměr, malá váha a možnost napojit dmyhadlo přímo na pohon. Nevýhodou je vysoká citlivost na nečistoty. Teoretická charakteristika dmyhadla by měla být přímka. Ovšem vlivem netěsností mezi rotorem a statorem klesá dopravní objem vzdušiny s rostoucím tlakovým rozdílem. Charakteristika Rootsova dmyhadla udávající závislost tlaku na dodávaném objemu dopravního plynu je na obr. 17. Na obrázku jsou zároveň vyznačeny charakteristiky určitých dopravovaných objemů a průběh příkonu obdobně jako u ventilátorů. Z charakteristiky vyplývá, že při rostoucím dopravovaném objemu materiálu roste strmě i příkon dmyhadla, z toho důvodu při ucpání trasy

může dojít k přetížení motoru. Přetížení a následnému spálení motoru předejdeme tak, že do výtlaku zabudujeme pojišťovací ventil. Průsčik charakteristiky dmyhadla a pojišťovacího ventilu P by se měl nacházet co neblíže bodu C, tedy aby tlak v bodě C byl shodný s tlakem, kdy se otevře pojišťovací ventil, na tento provozní bod se dimenzuje motor dmyhadla. Příkon pohonu pro určitý provozní bod se vypočítá dle rovnice (2). [4]

$$N = \frac{V_v \Delta p}{102 \eta_d} \text{ [N]} \quad (2)$$



Obr. 16 Rootsovo dmyhadlo [5]



Obr. 17 Charakteristika dmyhadla [4]

## 4.4 Kompresory

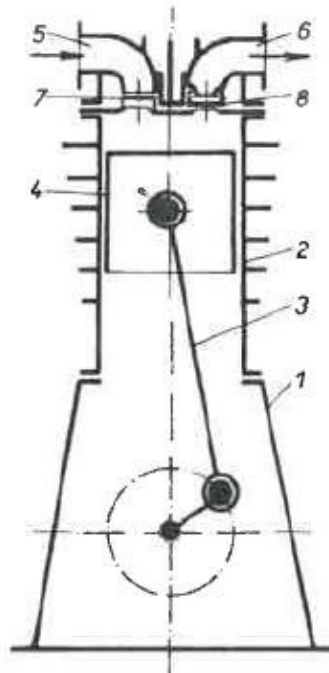
Kompresory se používají jako zdroje dopravního vzduchu pro vysokotlaký systém pneumatické dopravy. V praxi se osvědčily kompresory pístové, dají se ovšem použít i kompresory lamelové a vodokružné. Pístové kompresory mohou být stojaté a ležaté. Ležaté kompresory jsou větší a mají malou střední pístovou rychlost, proto se musí kompresor pohánět přes převody, výhodou je jejich odolnost proti opotřebení, zejména v prašném prostředí. Stojaté kompresory mají rychlejší pohyb pístů, proto je můžeme napojit přímo na elektropohon, výhodou je jejich malý rozměr. Nevýhodou je jejich vysoká citlivost na opotřebení, z toho důvodu musíme dbát, aby nasávaný vzduch byl dostatečně čistý. Pro tlaky, do 5 bar se používají kompresory jednostupňové, pro tlaky od 5 bar do 8 bar se používá kompresorův dvou-  
stupňových. Při použití vícestupňového kompresoru se dopravní plyn při přechodu z jednoho stupně do druhého musí chladit. Díky chlazení se snižuje práce potřebná na stlačení 1  $m^3$  plynu. Jako chladicí médium se používá pro malé výkony vzduch a pro větší výkony se používá voda. Příkon pohonu pro vzduchem chlazený kompresor se vypočítá dle rovnice (3). Pro pohon chlazený vodou se použije rovnice (5). Charakteristika pístového kompresoru je na obr. 19. Opět jako u dmychadel platí, že teoretická charakteristika kompresoru je přímkou, ovšem vlivem netěsností v okolí pístu klesá dopravovaný objem plynu s rostoucím tlakovým rozdílem. V grafu je vyznačen průběh příkonu pohonu. Z grafu je patrné, že příkon strmě vzrůstá, kdežto objem plynu se moc nemění. Z toho plyne, že strmá charakteristika kompresoru se vyznačuje stabilitou dopravy. Opět jako u dmychadel musíme pohon dimenzovat na krajní provozní bod B. Na tento provozní bod se nastaví i otevírání pojišťovacího ventilu. [4]

$$N = \frac{V_v L_{ad}}{102 \eta_{adsp}} \text{ [N]} \quad (3)$$

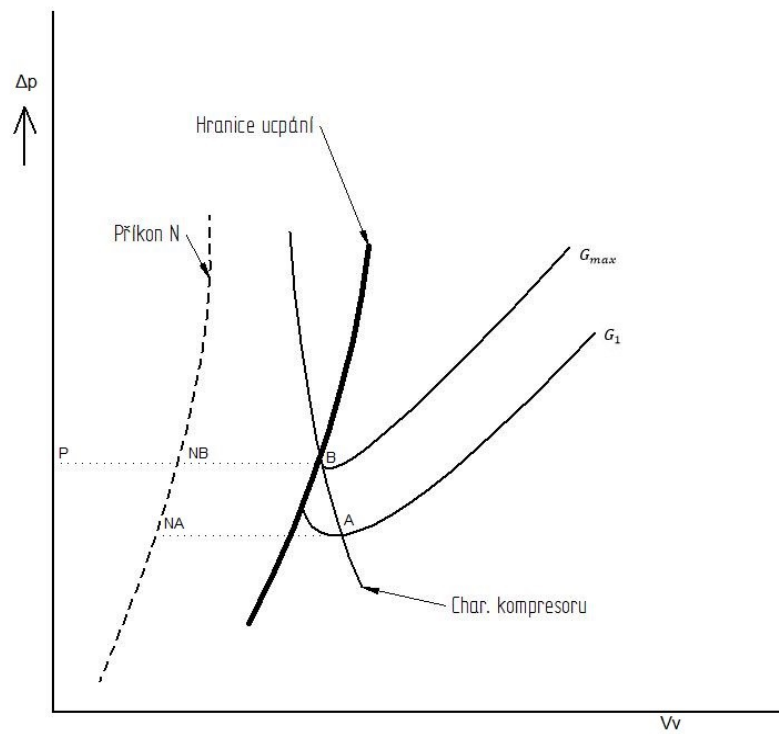
$$L_{ad} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \left[ \frac{kgm}{m^3} \right] \quad (4)$$

$$N = \frac{V_v L_{is}}{102 \eta_{issp}} \text{ [N]} \quad (5)$$

$$L_{is} = p_1 \lg \frac{p_2}{p_1} \left[ \frac{kgm}{m^3} \right] \quad (6)$$



Obr. 18 Pístový kompresor; 1/ kliková hřídel; 2/ válec; 3/ ojnice; 4/ píst; 5/ sací hrdlo; 6/ výtlačné hrdlo; 7/ sací ventil; 8/ výtlačný ventil [5]



Obr. 19 Charakteristika kompresoru [4]

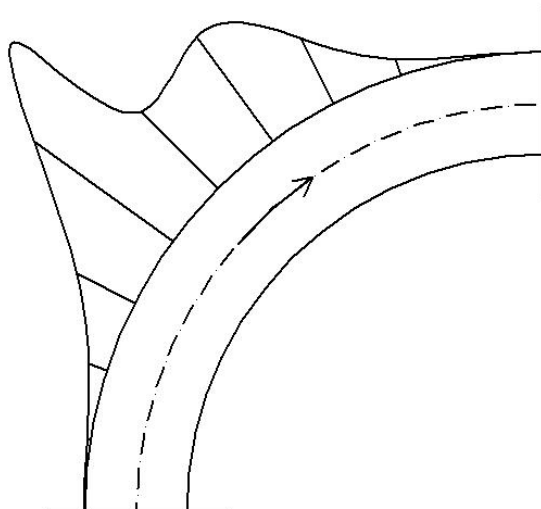


## 5 POTRUBNÍ TRASA

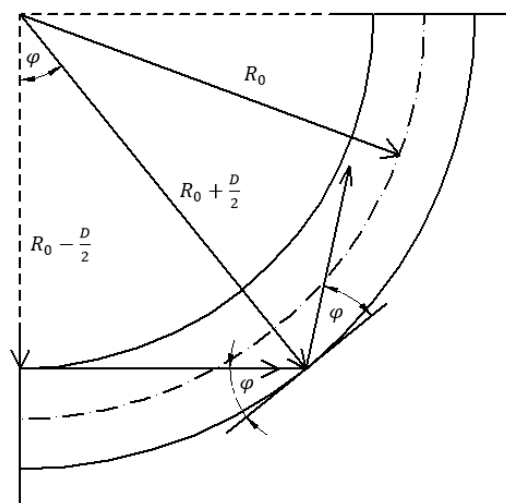
Dopravní potrubí je částí pneumatické dopravy, která umožňuje přemístit směs dopravního plynu a materiálu na požadované místo. Trasa může být přímá, nebo složená z oblouků a rozboček, může být vertikální, horizontální, nebo skloněná pod libovolným úhlem. Na výrobě potrubí se převážně používá ocelových bezešvých trubek s navařenými přírubami. Vzhledem k montáži je vhodné na jedné straně daného segmentu navařit přírubu na pevně a na druhé straně použít varný kroužek. Příruba se nasune na potrubí a je volná, následně se nasune kroužek, který se zavaří. Díky tomuto řešení vznikne možnost natáčet přírubu a nehrozí tak problém při sešroubování dvou přilehlých segmentů. Tloušťka stěny se volí dle dopravovaného materiálu, používají se trubky se stěnou 1-10mm. Potrubí musí být dimenzováno na tlak v potrubí a musí být řádně uloženo. V potrubí vlivem proudění částic materiálu dochází k abrazi. U přímého potrubí působí abraze nejvíce v místech přírubových spojů a to zejména není-li spoj hladký. Dalším důvodem zvýšené abraze v přírubových spojích je způsobeno vyžiháním materiálu v okolí sváru.

Zvláštní pozornost si zaslouhují oblouky dopravní trasy. V těchto obloucích dochází k největší takové ztrátě a k největšímu opotřebení. Průběh opotřebení oblouku je uveden na obr. 20. Opotřebení v obloucích vzniká díky odstředivým silám. Opotřebení probíhá vlivem nárazu částice na stěnu a vlivem pohybu po stěně. Na začátku oblouku je rychlost částice větší, proto zde dochází k největšímu opotřebení. Prostředků k omezení opotřebení je spousta. Nejvíce namáhané části oblouku můžeme zesílit, udělat je vyměnitelné nebo ze speciálních odolných materiálů. Odolné materiály proti abrazi jsou např. čedič a keramika, z kterých se dělají malé segmenty, kterými se vyloží vnitřní průměr oblouku a zvýší se tak jeho životnost. Je ovšem nutné si uvědomit, že tyto křehké materiály odolávají nárazům jen při dopadu pod určitým úhlem, je proto nutné správně navolit poloměr oblouku dle obr. 21. Minimální rádius se vypočítá dle vztahu (7). Další způsob jak prodloužit životnost oblouku je navařit na oblouk U profil a vylit ho betonem.

Aby bylo možné dopravovat materiál do více míst, vkládají se do trasy dvoucestné odbočky. Při požadavku plnění určitou trasou se vždy musí jedna trasa na odbočce zavřít a druhá otevřít, proto jsou na odbočkách namontované např. nožové šoupátka s pneumatickým pohonem. [4]



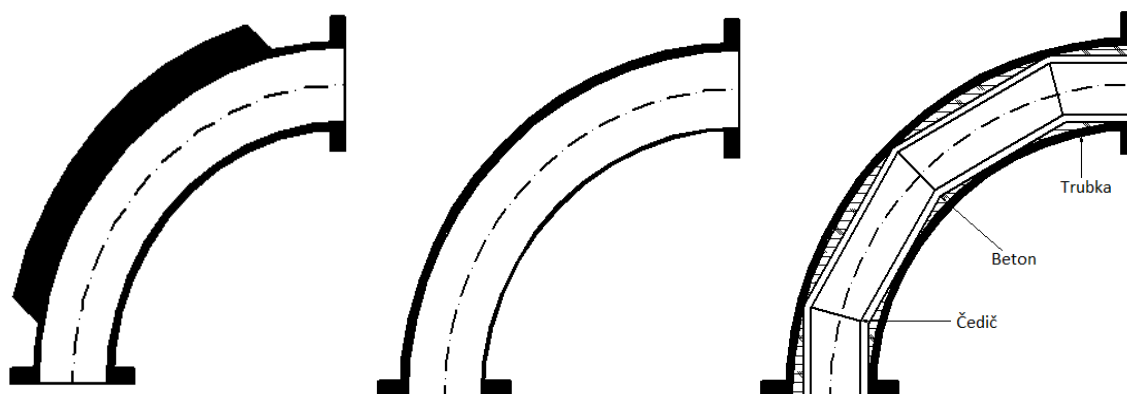
Obr. 20 Opotřebení oblouku [4]



Obr. 21 Volba rádiusu oblouku [4]

$$R_{0 \min} = \frac{D}{2} \frac{1 + \cos \varphi}{1 - \cos \varphi}$$

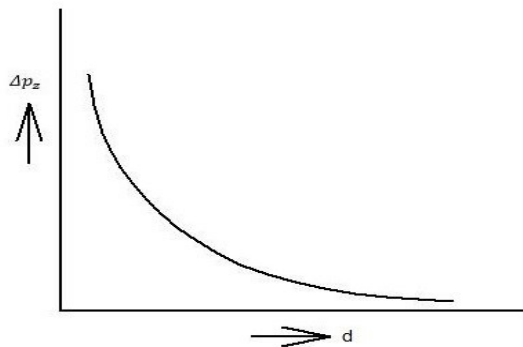
(7)



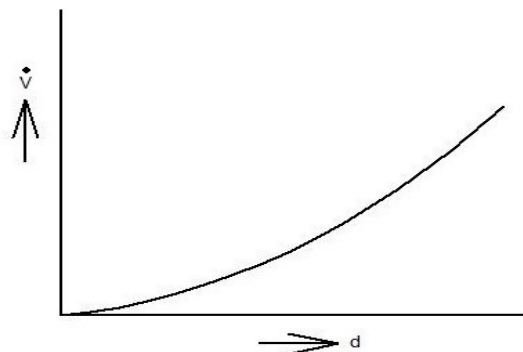
Obr. 22 Prostředky k prodloužení životnosti oblouků [4]

## 5.1 Volba průměru potrubí

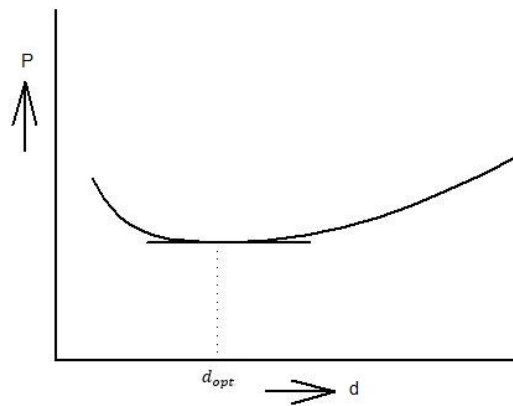
Mezi hlavní parametry při projektování pneumatické dopravy patří vhodné zvolení vnitřního průměru potrubí  $d$  [m]. Je možné pro dopravu materiálu o hmotnostním toku  $\dot{M}$  [kg/s] navolit různý průměr, ovšem je nutné si uvědomit, že při snižování vnitřního průměru potrubí dochází k růstu tlakové ztráty  $\Delta p_z$  [Pa] vlivem zvýšeného tření materiálu o potrubí (viz. Obr. 23). Z grafu závislosti objemového průtoku  $\dot{V}$  [ $m^3/s$ ] dopravního plynu na průměru potrubí při zachování hodnoty rychlosti plynu je patrné, že se zmenšujícím se průměrem objemový průtok klesá (viz. Obr. 24). Provozní náklady pneumatické dopravy jsou tvořeny náklady na pohon zdrojů dopravního plynu. Příkon motoru roste s rostoucí hodnotou tlakové ztráty  $\Delta p_z$  i objemového průtoku  $\dot{V}$ . Ke stanovení optimálního vnitřního průměru potrubí  $d_{opt}$  [m] slouží součin  $\Delta p_z \dot{V} = f(d)$ , který představuje výkon zdroje  $P$  [kW]. Lokální minimum závislosti výkonu na průměru potrubí je náš hledaný optimální průměr (viz. Obr. 25). [1]



Obr. 23 Závislost tlakové ztráty na průměru [1]



Obr. 24 Závislost objemového průtoku na průměru [1]



Obr. 25 Volba optimálního průměru ze závislosti výkonu stroje na průměru [1]

Přibližný průměr potrubí se dá vypočítat z hmotnostního průtoku (8), z objemového průtoku (9) a také z tlakové ztráty (10).

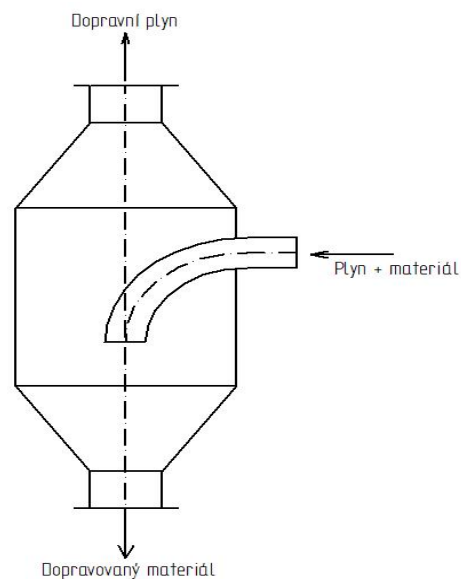
$$d = \sqrt{\frac{4M}{\pi w \rho}} \text{ [m]} \quad (8)$$

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi w}} \text{ [m]} \quad (9)$$

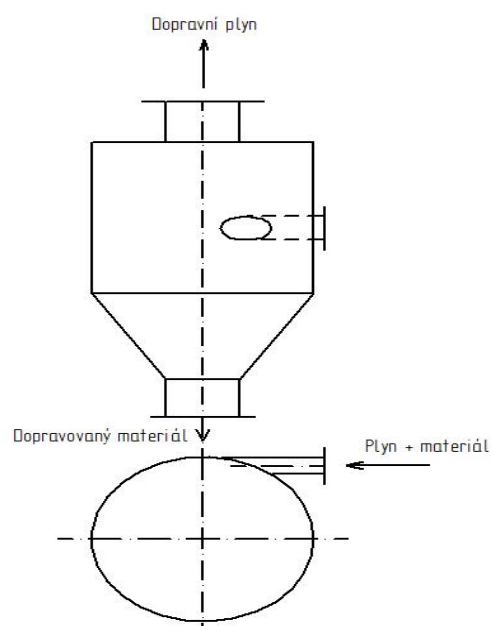
$$d = \sqrt{\frac{8\lambda l V^2 \rho}{\pi^2 \Delta p z}} \text{ [m]} \quad (10)$$

## 6 ODLUČOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Odlučovací zařízení slouží k odloučení dopravovaného materiálu od dopravního plynu. Velké zrno o značné hmotnosti způsobuje velké opotřebení odlučovače. O volbě odlučovače rozhoduje zrnitost a koncentrace plynu k materiálu. Pro zrnité materiály s velkým zrnem se používá usazovacích komor (viz. Obr. 26). Pro hrubší práškové materiály se používá cyklon. (viz. Obr. 27). Průměr cyklonu se zvětšuje s rostoucím průměrem zrna. Pro odloučení nejmenějších částic se používá látkových nebo mokrých filtrů. [4]



Obr. 26 Usazovací komora [4]



Obr. 27 Cyklon [4]

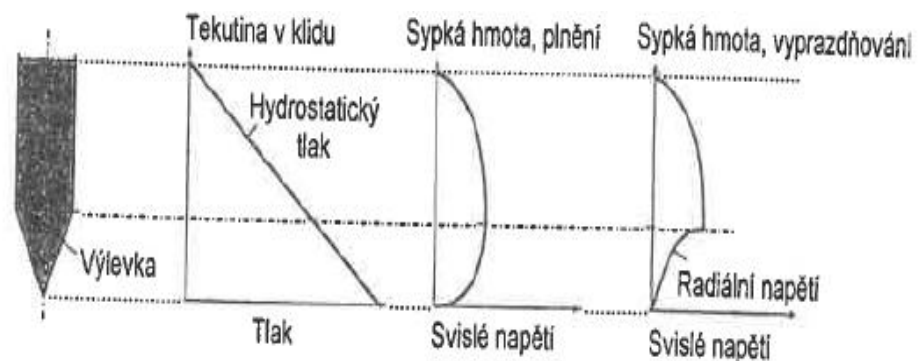
## 7 SKLADOVÁNÍ PÍSKŮ V SILECH

Práškové či zrnité materiály se skladují v silech. Při navrhování sil je nutné správně dimenzovat geometrii sila na základě vlastností materiálu. Na obr. 28 je průběh tlaku a napětí v sile. Při plnění sila tekutinou roste tlak směrem ke dnu nezávisle na průřezu či sklonu stěn. Na-prosto jiná situace nastává, pokud naplníme silo sypkým materiálem. Při naplnění sila sypkým materiálem se zvyšuje svislé napětí směrem dolů stále pozvolněji, až do doby kdy dosáhne konstantního svislého napětí. Tato závislost vzniká díky tření mezi materiálem a stěnami sila. Na obrázku je vidět, jak se mění stav napětí ve výlevce při vyprazdňování.

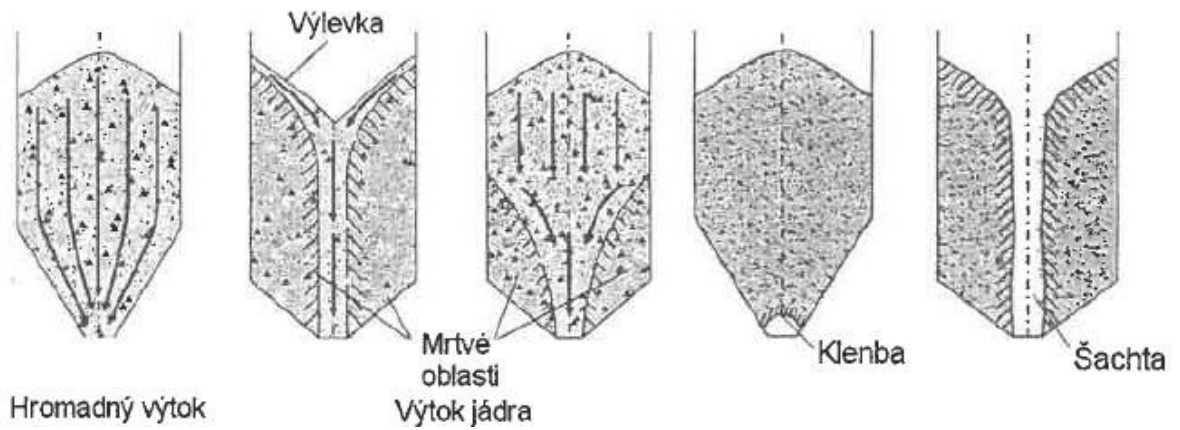
Při vyprazdňování sila může nastat hromadný vtok nebo výtok jádra. U hromadného výtoku je celý obsah sila při vyprazdňování v pohybu a nastává pouze tehdy, když je stěna výlevky dostatečně hladká a strmá. V opačném případě dochází k výtoku jádra, při kterém je v pohybu pouze sypký materiál nad oblastí výpustného otvoru. V okrajových oblastech se vytváří mrtvé místa, které se vysypou až při úplném vyprázdnění sila. Mrtvé oblasti mohou sahát až k vrchní hladině materiálu. Na obr. 29 je znázorněný rozdíl mezi hromadným vtokem a výtokem jádra.

Sklon stěny výlevky k dosažení hromadného výtoku se určuje na základě třecího úhlu o stěny  $\varphi_x$ . K zamezení vytvoření klenby se musí stanovit minimální průměr výpustného otvoru. K tomu potřebujeme znát vaznost materiálu  $\sigma_c$ , kterou zjistíme jednoosou tlakovou zkouškou. Hranici mezi hromadným vtokem a výtokem jádra můžeme vidět na obr. 30, kde je zobrazena závislost úhlu tření o stěny na sklonu stěny vůči svislici  $\theta_{ax}$  pro kónickou a klínovou výlevkou. Parametrem hraničních křivek je účinný třecí úhel  $\varphi_e$ , který se měří na stříhovém přístroji. Jestliže známe úhel tření o stěny a vnitřní tření materiálu, můžeme odvodit úhel sklonu stěny vůči vertikále, který povede k hromadnému vtoku. Z grafu je patrné, že čím je větší úhel tření, tím musí být stěny strmější.

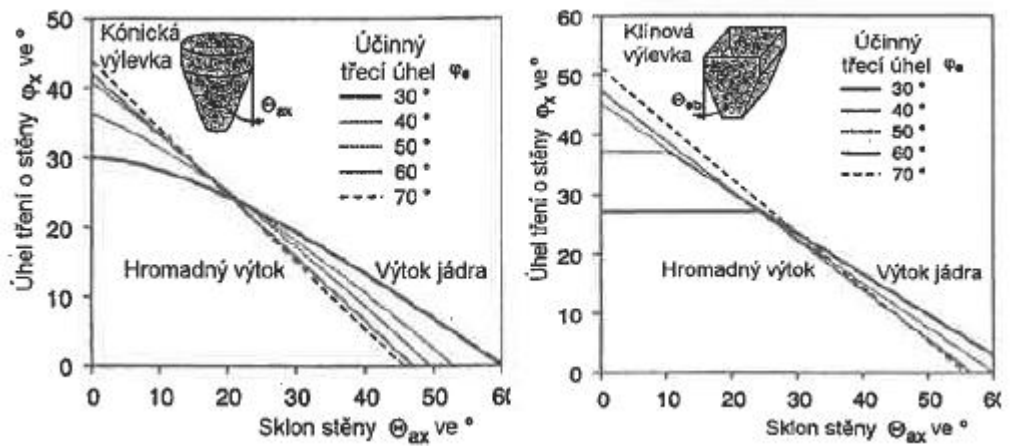
Existují různé tvary výlevek, na obr. 31 jsou znázorněné konstrukce, které se používají. [2]



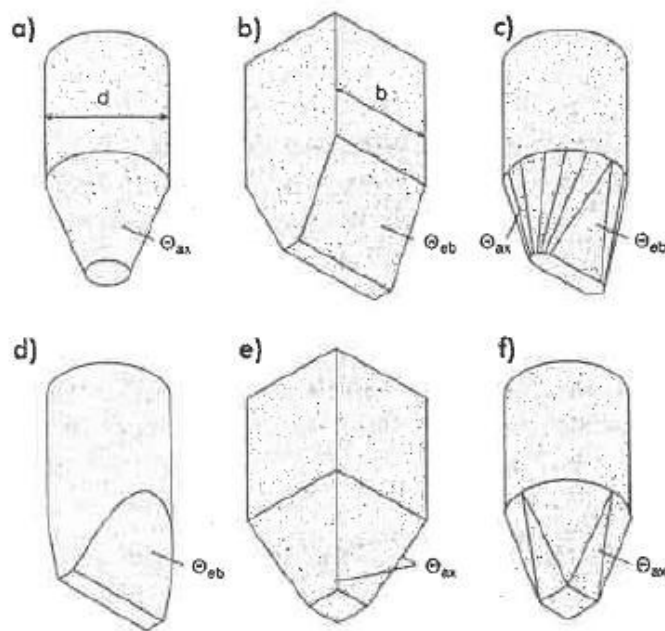
Obr. 28 Průběh tlaku a napětí v sile [2]



Obr. 29 Vtokové profily sypkého materiálu [2]



Obr. 30 Hromadného výtoku sypkých materiálů z kónického a klínového zásobníku [2]



Obr. 31 Tvary výlevek zásobníku [2]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

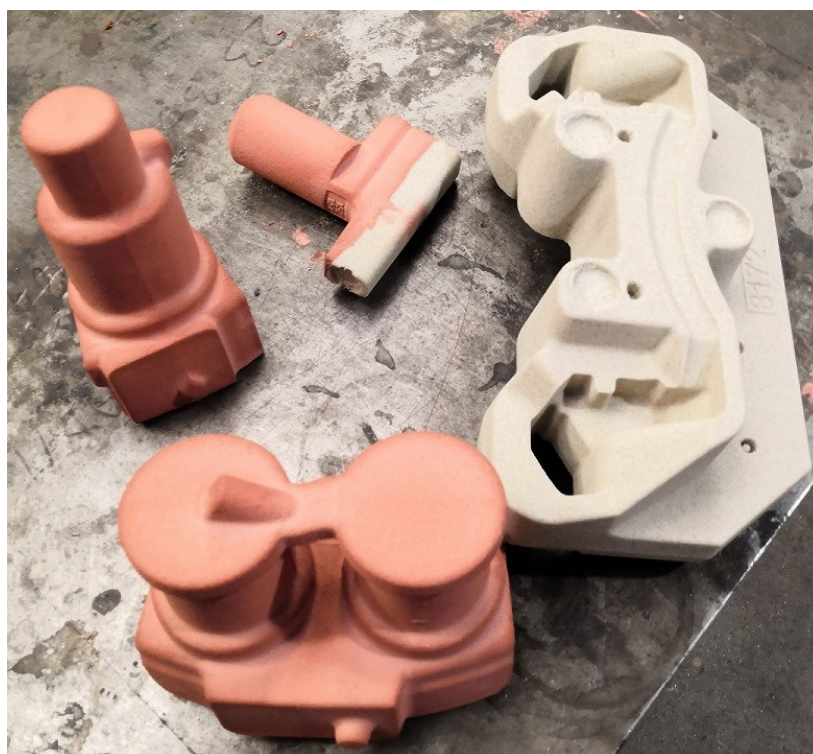


## 8 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této práce je analyzovat současný systém pneumatické dopravy, navrhnout efektivnější technologii pro daný proces, porovnat naměřené hodnoty obou systémů a ekonomicky zhodnotit případnou implementaci nové pneumatické dopravy do výroby.

## 9 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

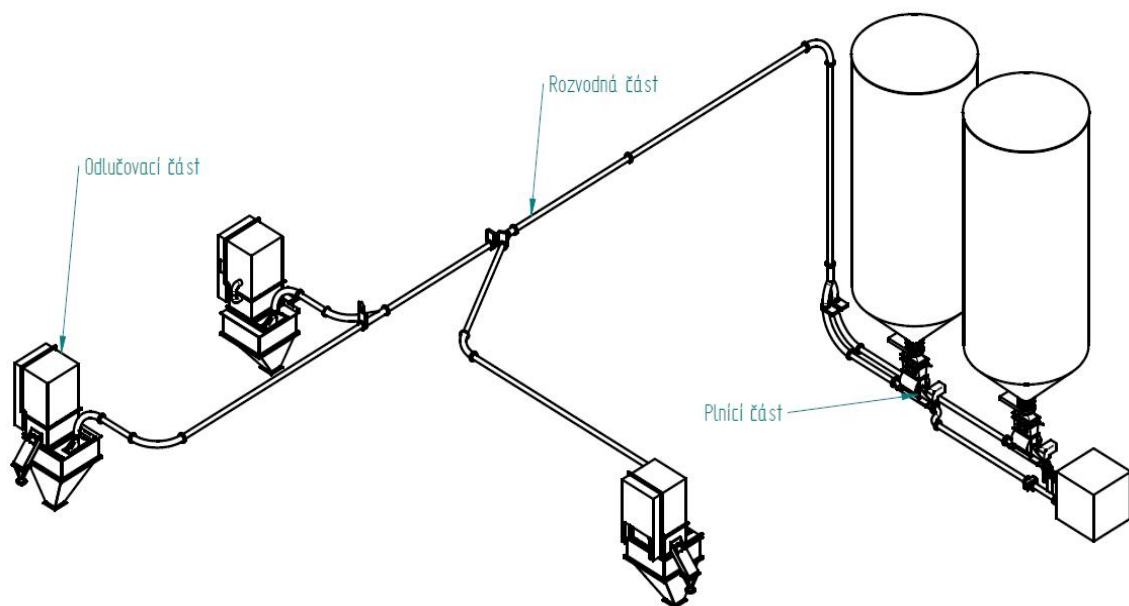
Ve slévárně tvárné litiny pro automobilový průmysl se používá pneumatická doprava na dopravu křemenného písku z venkovních sil do násypek nad stroji ve výrobní hale. Dále se písek v určitých cyklech dávkuje do mísiče, kde se ve správném poměru smíchá s fenol-formaldehydovými pryskyřicemi. Dále se směs dopraví do vstřelovacího válce a následně se pod tlakem vstřelí do jaderníku. Jaderníkem se prožene reakční činidlo, které reaguje s pryskyřicemi a během chvíle vytvrdí jádro na požadovanou pevnost. Této technologii se říká metoda Cold Box.



Obr. 32 Jádra

### 9.1 Koncept stávající pneumatické dopravy

Současná pneumatickou dopravou se dopravuje křemenný písek z dvou venkovních sil o objemu 40 m<sup>3</sup> do násypek nad třemi stroji ve výrobní hale. Každá z těchto násypek má dva hladinové senzory, které dávají signál k automatickému doplňování. Jakmile klesne hladina písku v násypce pod spodní senzor, systém se automaticky spustí a pneumatická doprava začne dávkovat písek do násypky. Plnění pokračuje až do doby, než hladina dosáhne horního senzoru. Z konstrukčního hlediska můžeme pneumatickou dopravu rozdělit na tři části (viz. Obr. 33). Jedná se o část plnicí, rozvodnou a část odlučovací.



Obr. 33 Koncept stávající pneumatické dopravy

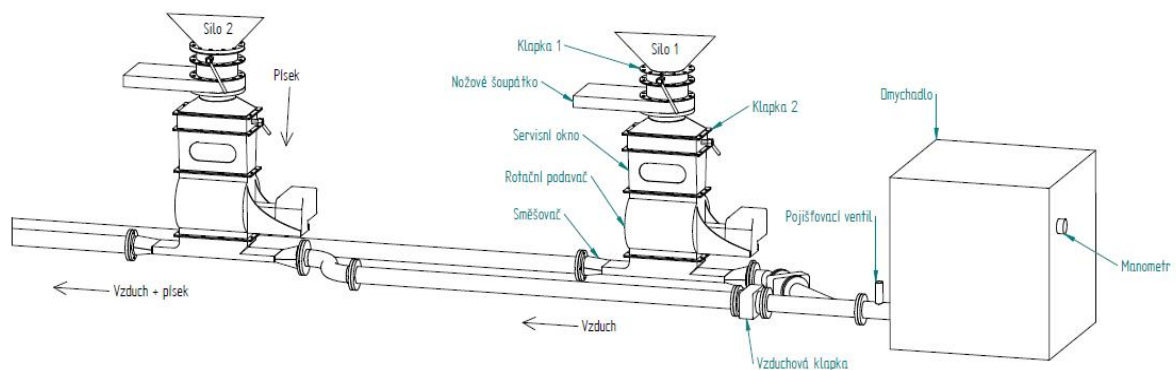
### 9.1.1 Plnicí část

V této části se generuje dopravní vzduch, který se následně v určitém poměru smíchá s pískem a dynamicky se dopravuje potrubní trasou do násypek. Na ovládacím panelu pneumatické dopravy se volí silo, z kterého se bude dávkovat. Při vyprázdnění jedné z násypek nad strojem se automaticky spustí cyklus plnění. Jako první se spustí dmyhadlo, které začne generovat dopravní vzduch. Následně začne pracovat rotační podavač, který zatím nedodává žádný písek do systému. V poslední fázi se otevře nožové šoupátko a do rotačního podavače začne padat písek. Podavač dodá materiál do směšovače, kde se smísí s dopravním vzduchem.

Dále tato část obsahuje dvě regulační klapky. 1. klapka reguluje množství písku, které bude propadávat přes nožové šoupátko. 2. klapka reguluje množství písku, které bude propadávat do rotačního podavače. Správné nastavení těchto klapek je zásadní, zvláště klapky, která reguluje množství nad rotačním podavačem. Když je klapka otevřena na maximum dochází k zahlcení trasy, dmyhadlo tak nezvládá množství dopravovat, vlivem odporu v potrubí se zvýší tlak, jakmile tlak přeroste hranici 0,5 bar, otevře se pojišťovací ventil, který zabrání poškození motoru a trasa se zahlčí. Naopak když je klapka příliš zavřená,

klesá směšovací poměr písek/vzduch. Do systému proudí stále konstantní objem dopravního vzduchu, ale písku padá příliš málo. Sníží se tak směšovací poměr a klesne efektivita dopravy. Pokles tlaku v potrubí můžeme sledovat na manometru dmyhadla a na základě hodnot polohovat klapky tak, aby tlak na manometru byl v rozmezí od 0,18bar do 0,25bar. Toto tlakové rozmezí vychází z doporučení výrobce pneumatické dopravy.

Při plnění dochází ke kolísání tlaku. Děje se tak vlivem nerovnoměrného dávkování písků do směšovače. V síle se vytvoří klenba, díky které se do podavače nedostane žádný materiál. Aby nedocházelo k tvoření klenby, jsou na kónické části síla přidělané trysky, které v určitém intervalu profouknou materiál. Materiál se tak uvede do pohybu a klenba se rozpadne. V okolí trysek dochází k nadměrné abrazi vlivem víření materiálu. Na obr. 34 je znázorněný koncept plnicí části.



Obr. 34 *Koncept plnicí části*

### 9.1.2 Rozvodná část

Rozvodná část se skládá z potrubní trasy a nožových šoupátek, které zajistí, aby se materiál dávkoval vždy pouze do jedné násypky. Ovládání šoupátek je řízeno automaticky na základě signálu z hladinových senzorů, které jsou instalovány na násypkách nad stroji. Nožové šoupátka mají dvě polohy otevřeno a zavřeno, tyto polohy ovládá pneumatický válec. Aby pneumatická doprava správně fungovala, musí nožové šoupátka těsnit, aby tak nedocházelo k nárůstu tlakové ztráty.

Potrubí je konstruováno tak, že z jedné strany je příruba přivařená na pevně a z druhé strany je příruba pouze nasazená a před ní je navařený kroužek. Toto řešení způsobí, že jedna příruba je vždy otočná a nedochází k problémům při montáži.

Rozvodnou část můžeme rozdělit na dvě části. První část se nachází přímo za dmychadlem a proudí v ní pouze vzduch. Potrubí, kterým proudí pouze vzduch, není vystaveno vlivu materiálu, proto je vyrobeno z trubek obvyklých jakostí.

Díly rozvodné části, kde proudí pouze vzduch:

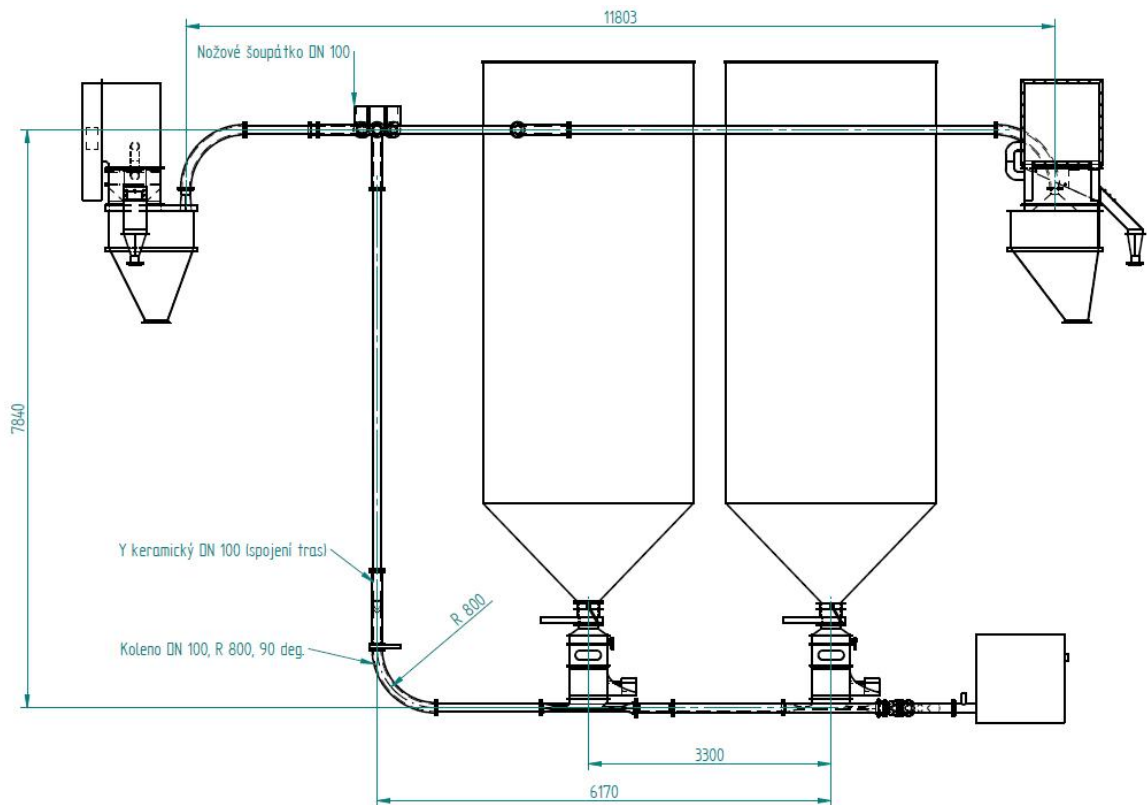
Trubka bezešvá, ČSN 42 5715.01 rozměr 114x6,3	3m
“Y“ na vzduch, trubka bezešvá, ČSN 42 5715.01 rozměr 114x6,3	1ks
“S“ na vzduch, trubka bezešvá, ČSN 42 5715.01 rozměr 114x6,3	1ks
Příruba DN 150, PN 6, ČSN 131222.6, DIN 2573	8ks
Grafitové mezi přírubové těsnění DN 100	8ks

Ve zbylé části rozvodné trasy proudí spolu se vzduchem i materiál. Vlivem dopravy dynamickým proudem vzduchu dochází k mohutné abrazi. Z tohoto důvodu se na výrobu potrubí používá bezešvá trubka indukčně kalená ABRATUBE 600. Tato trubka má až 9 krát delší životnost, než trubka klasická. Vlivem indukčního kalení je tvrdost vnitřního průměru 600HB. Veškeré komponenty rozvodné části, v kterých dochází ke změně směru materiálu, jsou na vnitřním průměru vyloženy keramickými segmenty. Jedná se o kolena a odbočky.

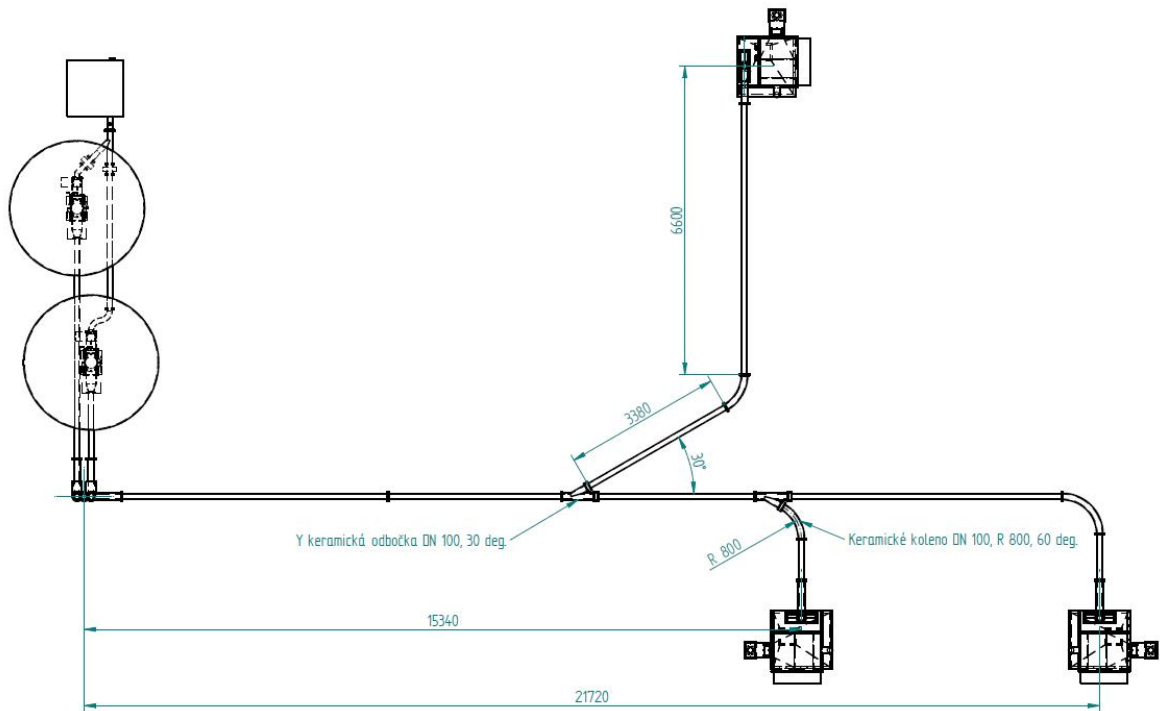
Díly rozvodné části, kde proudí materiál:

ABRATUBE 600 rozměr 114,8x8	37m
Nožové šoupátko DN 100 s pneumatickým pohonem.	6ks
Keramické koleno DN 100, R 800, 90 deg.	6ks
Keramické koleno DN 100, R 800, 60 deg.	2ks
“Y“ keramická odbočka DN 100, 30 deg.	2ks
“Y“ keramický DN 100. (zajišťuje spojení dvou tras do jedné)	1ks
Příruba DN 100, PN 6, ČSN 131222.6, DIN 2573	20ks
Grafitové mezi přírubové těsnění DN 100	34ks

Na obr 35 a 36 je znázorněna trasa a její rozměry.



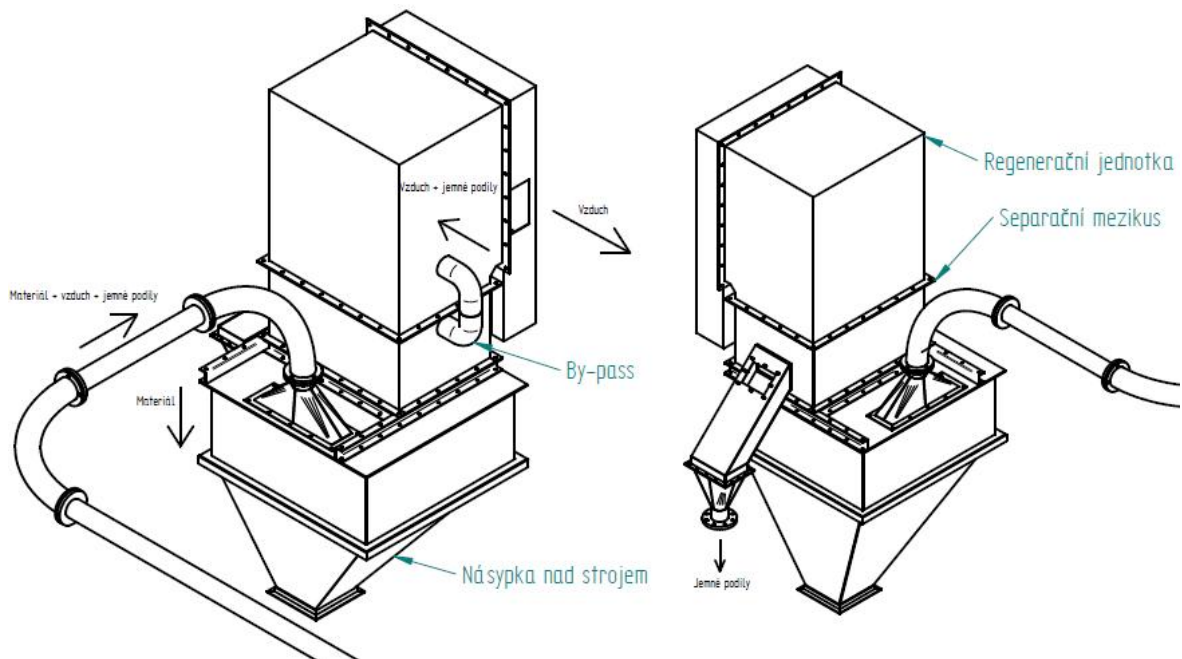
Obr. 35 Dopravní trasa a její rozměry, přední pohled



Obr. 36 Dopravní trasa a její rozměry, půdorys

### 9.1.3 Odlučovací část

V této části pneumatické dopravy se odděluje písek od vzduchu a separují se jemné podíly, které ve směsi nechceme. Tato část se skládá z násypky, regenerační jednotky a separačního mezikusu. Při plnění násypky se vlivem gravitace a rozdílných hmotností částic oddělí písek od vzduchu. Písek spadne do násypky a jemné podíly spolu se vzduchem proudí přes by-pass do regenerační jednotky. Regenerační jednotka se skládá z filtračních vaků, kterými pronikne pouze vzduch, který se dále volně vypouští do výrobní haly. Jemné podíly zůstávají nabalené na vnějším povrchu filtračních pytlů. Jednou za určitý časový cyklus dochází k regeneraci vlivem profuku regeneračních pytlů. Jemné podíly se tak dostanou do separačního mezikusu, odkud jsou dále dopravovány do kontejneru, který slouží jako dočasný sklad odpadního materiálu. Na obr. 37 je tato část znázorněna a popsána.



Obr. 37 Odlučovací část

## 9.2 určení parametrů stávající pneumatické dopravy

U stávající pneumatické dopravy jsem určil dva parametry, tlakovou ztrátu ( $\Delta p_z$ ) a směšovací poměr ( $\delta$ ).

### 9.2.1 Určení tlakové ztráty

Při dopravě materiálu jsem simultánně změřil tlak za dmychadlem a tlak na konci trasy před vyústěním do násypky nad strojem. Tlak za dmychadlem jsem určil pomocí manometru,

který je umístěný přímo na dmychadle. Tlak na konci trasy jsem změřil pomocí digitálního diferenčního manometru, TESTO.

Tlakovou ztrátu při dopravě materiálu ( $\Delta p_z$ ) jsem vypočítal jako rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$ .

Číslo měření	$p_1$ za dmychadlem (bar)	$p_2$ na konci trasy (bar)	$\Delta p_{z1}$ (bar)
1	0,210	0,013	0,197
2	0,180	0,010	0,170
3	0,250	0,018	0,232
4	0,203	0,012	0,191
5	0,240	0,013	0,227
6	0,182	0,010	0,172
7	0,181	0,012	0,169
8	0,207	0,010	0,197
9	0,192	0,011	0,181
10	0,204	0,017	0,187

Tab. 1 Určení tlakové ztráty při dopravě materiálu

Na základě hodnoty tlakové ztráty při dopravě materiálu ( $\Delta p_z$ ) můžeme naši stávající pneumatickou dopravu zařadit jako středotlaký systém, u kterých se tlaková ztráta pohybuje v rozmezí 0,1 – 0,5 bar.

### 9.2.2 Směšovací poměr

Směšovací poměr ( $\delta$ ) vyjadřuje poměr dopravovaného materiálu k průtočnému množství vzduchu. Jeho hodnoty závisí na druhu dopravovaného materiálu a na rovnoměrnosti podávání.

Směšovací poměr jsem vypočítal podle rovnice:

$$\delta = \frac{Q_V \cdot \rho}{V_V \cdot \rho_{VZ}} \quad (11)$$

Určení dopravovaného množství materiálu  $Q_V$  [ $\text{m}^3/\text{hod}$ ]:

Dopravované množství materiálu jsem určil jako podíl objemu násypky nad strojem ( $V_N$ ) a času ( $t_D$ ), který byl na naplnění násypky potřebný. Objem násypky jsem zjistil vytvořením jejího 3D modelu v programu Solid Edge. Objem je  $0,52 \text{ m}^3$ . Čas potřebný na naplnění násypky jsem zjistil tak, že jsem pomocí stopky změřil interval mezi začátkem dávkování písku do potrubí a sepnutím horního hladinového senzoru, který signalizuje naplnění násypky. Dobu plnění násypky jsem změřil celkem 10 krát.



Číslo měření	Čas plnění násypky (s)	Čas plnění násypky (hod)
1	1329	0,37
2	1415	0,39
3	1442	0,40
4	1374	0,38
5	1330	0,37
6	1364	0,38
7	1335	0,37
8	1410	0,39
9	1404	0,39
10	1377	0,38

Tab. 2 Měření doby plnění násypky

Ve výpočtech jsem dále používal čas vypočítaný jako průměr z 10 měření. Tato hodnota je, 0,38 hod. Průtok dopravovaného materiálu pak bude:

$$Q_V = \frac{V_N}{t_D} = \frac{0,52 \text{ m}^3}{0,38 \text{ hod}} = 1,37 \text{ m}^3/\text{hod} \quad (12)$$

Ostatní parametry pro výpočet směšovacího poměru jsem určil následovně:

Sypnou objemovou hmotnost slévárenského písku GL 27 jsem zjistil z granulometrického rozboru dodavatele,  $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ .

Průtočné množství vzduchu jsem zjistil z technického list dmychadla KV800. 2AC. Průtočné množství vzduchu je  $839 \text{ m}^3/\text{hod}$ .

Hustotu vzduchu jsem určil z tabulek při  $20^\circ\text{C}$ , je to  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

Z těchto hodnot jsem následně vypočítal směšovací poměr stávající pneumatické dopravy:

$$\delta = \frac{Q_V \cdot \rho}{V_V \cdot \rho_{VZ}} = \frac{1,37 \text{ m}^3/\text{hod} \cdot 1500 \text{ kg/m}^3}{839 \text{ m}^3/\text{hod} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3} = 2,04 \quad (13)$$

Z vypočítaného směšovacího poměru vyplývá, že stávající pneumatická doprava přepraví v průměru 2 kg křemenného písku na jeden kilogram vzduchu. Z výsledku plyne, že stávající systém je vysoce neefektivní. U středotlakých systémů dosahuje směšovací poměr až hodnoty 30.

### 9.3 Devalvace zrna vlivem dopravy dynamickým proudem vzduchu

Dobrá granulometrie písku je jedním z nejdůležitějších parametrů pro výrobu slévárenských jader. Při míchání písku s pryskyřicí se jednotlivá zrnka pryskyřicí obalí a menší zrnka vyplní prostory mezi většími. Tím se po vytvrzení jádra dosáhne hladký a celistvý povrch. Písek s určitým granulometrickým složením od výrobce ale podléhá změnám vlivem abraze v pneumatické dopravě. Čím je potrubní trasa delší a složitější a dopravní rychlost vyšší, tím vyšší je i abraze zrn písku. Abrází vznikají jemné práškové podíly. Tyto podíly mají negativní vliv na pevnost jader a způsobují nadměrnou spotřebu pojiv. Z těchto důvodů se instalují regenerační jednotky pro odstranění jemných podílů. Správně navrženou pneumatickou dopravou je možné dosáhnout minimální devalvace zrna.

#### 9.3.1 Porovnání granulometrie písku dodaného producentem s granulometrií písku, který prošel stávající dopravní trasou

Granulometrie jsem porovnal na základě síťových rozborů. Písek se přeseje přes několik sít s přesně určenou velikostí oka, zváží se množství jednotlivých podílů a určí se jejich procentuální podíl. Za jemné podíly se považuje velikost zrna pod 0,1 mm.

Granulometrie dodaného písku		Granulometrie písku po přechodu dopravou	
Síta (mm)	Zbytek (%)	Síta (mm)	Zbytek (%)
0,630	0,00	0,710	0,02
0,400	2,20	0,500	0,16
0,315	15,80	0,355	6,37
0,200	63,80	0,250	36,52
0,160	12,80	0,180	31,40
0,100	5,20	0,125	15,62
0,071	<b>0,20</b>	0,090	<b>6,79</b>
0,056	<b>0,00</b>	0,063	<b>1,68</b>
0,020	<b>0,00</b>	0,010	<b>1,45</b>

Tab. 3 Porovnání síťových rozborů písku před a po průchodu pneumatickou dopravou

Z tab. 3 je patrné, že dodaný písek obsahuje jen 0,2 % jemných podílů. Písek, který prošel potrubním systémem pneumatické dopravy, obsahuje přibližně 10 % jemných podílů. Můžeme tedy s určitostí říct, že stávající systém pneumatické dopravy má negativní vliv na kvalitu zrna.

Právě kvůli vysokému obsahu jemných podílů jsem byl nucen instalovat separační mezikus, který zabráni spadnutí jemných podílů z regenerační jednotky zpátky do násypky stroje. Odstranění jemných podílů se projevilo na snížení zmetkovitosti jader, která klesla z 12 % na 3%. Při zachování stejného poměru pojiva k písku došlo k zvýšení mechanické pevnosti jader z 2 MPa na 2,5 MPa. Vidíme tedy, že kvalita materiálu má zásadní vliv na kvalitu finálního výrobku.

## 10 NÁVRH NOVÉHO SYSTÉMU PNEUMATICKÉ DOPRAVY

Navrhují nahradit stávající podavač materiálu za impulsní pneumatický podavač SGTF 30, který dopravuje zátky zrnitého materiálu.

Technické parametry podavače SGTF 30:

dopravní výkon: max. 7 t/h

provozní tlak: 3 bar

smontovaná výška: 1310 mm

vstup: DN 150

výstup: DN100

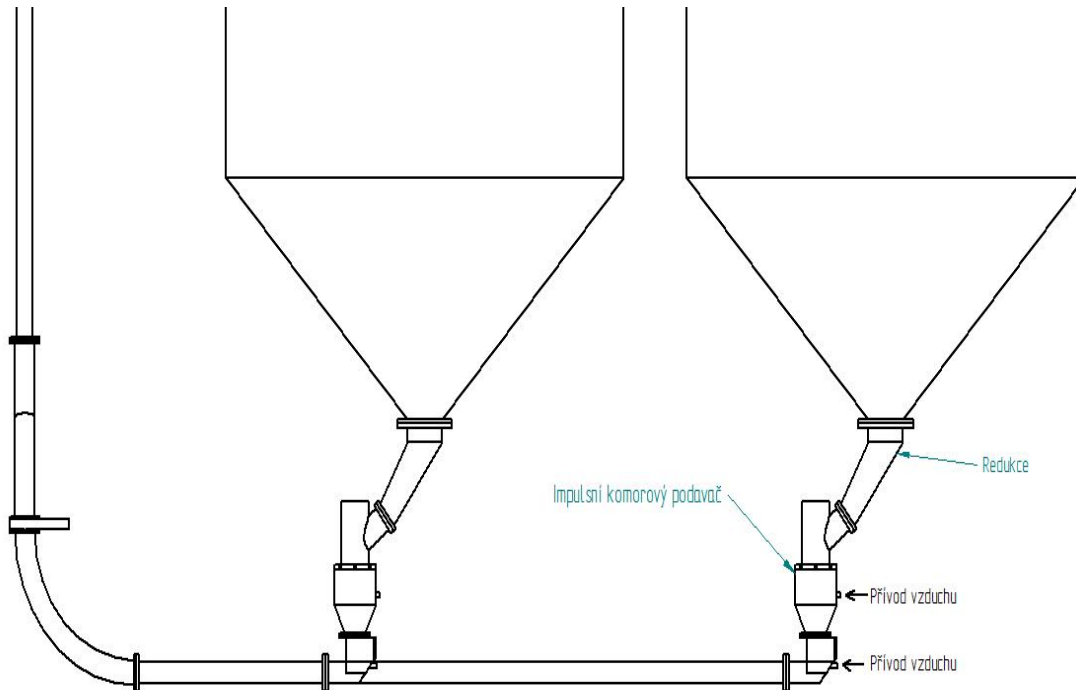


*Obr. 38 Impulsní pneumatický podavač*

### 10.1 Koncept

Bude nutné odstranit celou plnicí sestavu, která se nahradí impulsním podavačem, bude nutné vyrobít redukci ze sila na vstupní část podavače. Následně se odstraní dmyhadlo a nahradí se přívodem stlačeného vzduchu z kompresorovny. Rozvodná část může díky stej-

nému průměru potrubí zůstat zachována, ovšem nebude nutné nadále používat indukčně kalené trubky. Rozvodná část bude složená z bezešvé trubky obvyklých jakostí. Změna v plnicí části je znázorněna na obr. 39.



Obr. 39 Koncept plnicí části s impulsním pneumatickým podavačem

## 10.2 Určení parametrů impulsní pneumatické dopravy

Měření proběhlo v sesterské slévárně, kde pro dopravu křemenného písku využívají impulsní systém pneumatické dopravy. Dopravní trasa se trochu liší, avšak pro zjednodušení tuto diferenci zanedbávám.

### 10.2.1 Měření tlakové ztráty

Tlak na začátku potrubní trasy ( $p_1$ ) jsem určil jako tlak na přívodu do komorového podavače, tlakový vzduch do podavače je dodáván z kompresorovny.

Tlak na konci dopravní trasy ( $p_2$ ) jsem zjistil pomocí tlakového snímače, který je namontovaný na posledním segmentu trasy.

Tlakovou ztrátu ( $\Delta p_z$ ) jsem vypočítal jako rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$ .

Číslo měření	p1 tlak na přívodu do komorového podavače (bar)	p2 tlak na konci trasy (bar)	tlaková ztráta $\Delta p_z$ (bar)
1	3,00	1,60	1,40
2	3,00	1,62	1,38
3	3,00	1,52	1,48
4	3,00	1,36	1,64
5	3,00	1,42	1,58
6	3,00	1,63	1,37
7	3,00	1,55	1,45
8	3,00	1,55	1,45
9	3,00	1,63	1,37
10	3,00	1,54	1,46

Tab. 4 Tlaková ztráta impulsní pneumatické dopravy

Dle hodnot tlakové ztráty ( $\Delta p_z$ ) lze tento systém zařadit mezi vysokotlakové systémy pneumatické dopravy, což odpovídá i zdroji stlačeného vzduchu. U těchto systémů je tlaková ztráta nad 0,5 bar.

### 10.2.2 Směšovací poměr

Směšovací poměr jsem opět vypočítal podle rovnice (11). Jednotlivé parametry pro výpočet směšovacího poměru ( $\delta$ ) jsem určil následovně:

Určení dopravovaného množství materiálu  $Q_V$  [ $m^3/hod$ ]:

Doprovázané množství materiálu jsem určil jako podíl objemu násypky nad strojem ( $V_N$ ) a času ( $t_D$ ), který byl na naplnění násypky potřebný. Objem násypky jsem zjistil vytvořením jejího 3D modelu programu Solid Edge. Objem je  $0,95 m^3$ . Čas potřebný na naplnění násypky jsem zjistil tak, že jsem pomocí stopky změřil interval mezi začátkem dávkování písku do potrubí a sepnutím horního hladinového senzoru, který signalizuje naplnění násypky. Dobu plnění násypky jsem změřil celkem 10 krát.

Číslo měření	Čas plnění ná-sypky (s)	Čas plnění ná-sypky (hod)
1	990	0,28
2	1062	0,30
3	1027	0,29
4	1019	0,28
5	1006	0,28
6	1026	0,29
7	1008	0,28
8	991	0,28
9	992	0,28
10	1002	0,28

Tab. 5 Měření doby plnění ná-sypky impulsní pneumatickou dopravou

Ve výpočtech jsem dále používal čas vypočítaný jako průměr z 10 měření. Tato hodnota je, 0,28 hod. Průtok dopravovaného materiálu pak bude:

$$Q_V = \frac{V_N}{t_D} = \frac{0,95 \text{ m}^3}{0,28 \text{ hod}} = 3,39 \text{ m}^3/\text{hod} \quad (14)$$

Ostatní parametry pro výpočet směšovacího poměru jsem určil následovně:

Sypnou objemovou hmotnost slévárenského písku GL 27 jsem zjistil z granulometrického rozboru dodavatele,  $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ .

Průtočné množství vzduchu jsem zjistil odečtením hodnot z průtokoměru ALUP, který je instalovaný na přívodu stlačeného vzduchu do podavače. Průtok vzduchu do podavače ( $V_V$ ) je v průměru  $45 \text{ m}^3/\text{hod}$ .

Hustotu vzduchu jsem určil z tabulek při  $20^\circ\text{C}$ , je to  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

Z těchto hodnot jsem následně vypočítal směšovací poměr impulsní pneumatické dopravy:

$$\delta = \frac{Q_V \cdot \rho}{V_V \cdot \rho_{VZ}} = \frac{3,39 \text{ m}^3/\text{hod} \cdot 1500 \text{ kg/m}^3}{45 \text{ m}^3/\text{hod} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3} = 94,2 \quad (15)$$

Z vypočítaného směšovacího poměru vyplývá, že impulsní pneumatická doprava přepraví v průměru 94,2 kg křemenného písku na jeden kilogram vzduchu. Tato hodnota se blíží hodnotě směšovacího poměru 100, kterou udává výrobce.

### 10.3 Devalvace zrna vlivem impulsní pneumatické dopravy

Při nižší dopravní rychlosti v systému impulsní pneumatické dopravy dochází k podstatně menšímu oděru zrn písku.

### 10.3.1 Porovnání granulometrie písku dodaného producentem s granulometrií písku, který prošel dopravní trasou impulsního systému pneumatické dopravy

Granulometrie jsem porovnal na základě síťových rozborů. Naše sesterská společnost odebírá písek stejné kvality od stejného dodavatele. Proto jsem k porovnání použil stejný síťový rozbor od dodavatele jako u stávající pneumatické dopravy. Síťový rozbor písku jsem udělal ze vzoru písku, který prošel dopravní trasou impulsního systému pneumatické dopravy.

Granulometrie dodaného písku		Granulometrie písku po přechodu dopravou	
Síta (mm)	Zbytek (%)	Síta (mm)	Zbytek (%)
0,630	0,00	0,710	2,24
0,400	2,20	0,500	6,98
0,315	15,80	0,355	19,18
0,200	63,80	0,250	29,87
0,160	12,80	0,180	24,24
0,100	5,20	0,125	14,88
0,071	<b>0,20</b>	0,090	<b>1,77</b>
0,056	<b>0,00</b>	0,063	<b>0,53</b>
0,020	<b>0,00</b>	0,010	<b>0,32</b>

Tab. 6 Porovnání síťových rozborů písku před a po průchodu impulsní pneumatickou dopravou

Z tab. 6 je patrné, že dodaný písek obsahuje jen 0,2 % jemných podílů. Písek, který prošel potrubním systémem impulsní pneumatické dopravy, obsahuje pouze 2,6 % jemných podílů. Objem jemných podílů je tedy 3 krát nižší než u stávající pneumatické dopravy.



## 11 OPOTŘEBENÍ DOPRAVNÍ TRASY

Vlivem dynamické dopravy zrnitého materiálu vysokými rychlostmi dochází k abrazi potrubního systému. Nejvíce se opotřebovávají kolena, odbočky a potrubí v oblasti příruby, která je přidělena právě k tvarovým částem trasy. Příruby jsou k potrubí přivařené, vlivem svařování dochází k vyžhání oblasti v okolí sváru a to má za následek snížení životnosti potrubí. Po relativně krátké době dochází vlivem abraze k opotřebení lamel na rotačním podavači, což vede ke ztrátě funkce tlakového uzávěru. Tlak, který proniká nad rotační podavač způsobuje opotřebení servisního okénka, klapky, těla nožového šoupátka atd.

Vlivem opotřebení potrubní trasy dochází k velké spotřebě materiálu na jeho obnovu, k prostojům výrobních strojů, k zbytečnému vytěžování pracovníku údržby, k únikům tlakového vzduchu a v neposlední řadě k spotřebě písku, který uniká mimo dopravní systém. To vše je velice nákladné a má to za následek nehospodárnost výroby, což se projeví na konečné ceně produktu.

Zásadní vliv na opotřebení potrubní trasy má rychlost pohybu částice v potrubí. Abych mohl vypočítat rychlost proudící částice ( $v$ ), musel jsem určit měrnou hmotnost směsi písek/vzduch ( $\rho_s$ ).

Výpočet měrné hmotnosti směsi písek/vzduch pro stávající systém pneumatické dopravy:

$$\rho_{S,1} = \frac{1}{\frac{w_P}{\rho_P} + \frac{w_{VZ}}{\rho_{VZ}}} = \frac{1}{\frac{0,67}{1500 \text{ kg/m}^3} + \frac{0,33}{1,2 \text{ kg/m}^3}} = 3,63 \text{ kg/m}^3 \quad (16)$$

Výpočet měrné hmotnosti směsi písek/vzduch pro systém impulsní pneumatické dopravy:

$$\rho_{S,2} = \frac{1}{\frac{w_P}{\rho_P} + \frac{w_{VZ}}{\rho_{VZ}}} = \frac{1}{\frac{0,99}{1500 \text{ kg/m}^3} + \frac{0,01}{1,2 \text{ kg/m}^3}} = 111,19 \text{ kg/m}^3 \quad (17)$$

Výpočet rychlosti proudící částice v potrubí stávajícího systému pneumatické dopravy:

$$v_1 = \frac{Q_1}{\rho_{S,1} \cdot A_1} = \frac{3061,8 \text{ kg/h}}{3,63 \text{ kg/m}^3 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 107448,54 \text{ m/h} = 29,84 \text{ m/s} \quad (18)$$

Výpočet rychlosti proudící částice v potrubí systému impulsní pneumatické dopravy:

$$v_2 = \frac{Q_2}{\rho_{S,2} \cdot A_2} = \frac{5139 \text{ kg/h}}{111,19 \text{ kg/m}^3 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 5887,66 \text{ m/h} = 1,63 \text{ m/s} \quad (19)$$

Z praktických zkušeností několika projekčních firem byl odvozen empirický vztah pro určení specifické eroze [7]:

$$E_S = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{2,65} \quad (20)$$

Hodnota specifické eroze umožňuje na základě poměru rychlostí dopravy ve dvou systémech určit, kolikanásobně bude větší opotřebení potrubní trasy v systému s vyšší rychlostí. Když srovnáme náš stávající systém pneumatické dopravy a navrhovaný systém impulsní pneumatické dopravy, dostaneme specifickou erozi:

$$E_S = \left( \frac{29,84 \text{ m/s}}{1,63 \text{ m/s}} \right)^{2,65} = 2217 \quad (21)$$

Z výsledku je patrné, že opotřebení dopravní trasy u stávající pneumatické dopravy je víc než 2200 krát vyšší než u impulsní pneumatické dopravy. V praxi to znamená, že úbytku 1 g materiálu potrubní trasy u impulsního systému pneumatické dopravy odpovídá úbytek až 2 kg materiálu u pneumatického systému, který dopravuje dynamickým proudem vzduchu.

## 12 EKONOMIKÉ ZHODNOCENÍ

Abych mohl určit předpokládanou návratnost investice, musel jsem nejdříve spočítat náklady na údržbu stávající pneumatikové dopravy. Vycházel jsem přitom z nákladů na obnovu trasy z let 2016-2018. Tyto náklady jsou shrnuty v tab. 7.

2016	
Materiál	Kč
Indukčně kalené trubky	203000
Příruby + těsnění	8000
Keramický směšovač	62000
Keramické koleno 30 deg.	39000
Keramické koleno 90 deg.	74000
Keramický Y kus	142000
Keramické potrubí 1000 mm	15000
<b>Celkem</b>	<b>543000</b>

2017	
Materiál	Kč
Příruby + těsnění	7000
Keramický směšovač	62000
Keramické koleno 90 deg.	148000
Keramický Y kus	42000
<b>Celkem</b>	<b>259000</b>

2018	
Materiál	Kč
Rotační podavač + lamely	68000
Příruby + těsnění	12000
Keramické koleno 90 deg.	74000
<b>Celkem</b>	<b>154000</b>

Tab. 7 Náklady na obnovu trasy stávající pneumatikové dopravy 2016-2018

Z výše uvedené tabulky jsem určil průměrné roční náklady na obnovu trasy stávající pneumatikové dopravy. Jedná se o 318 667 Kč.

U impulsní pneumatikové dopravy mi výrobce garantoval životnost potrubí 5 let. Potrubní trasa je složená z běžných trubek, jejichž cena není vysoká, proto ji ve svých výpočtech zanedbávám.

Požizovací cena nové pneumatikové dopravy je 1 530 000 Kč. Tato cena zahrnuje dva impulsní podavače SGTF 30, kompletní rozvodnou trasu (dle kapitoly 9.1.2), skříňový rozvaděč s řídicí jednotkou a vizualizační řídicí panel s dotykovým displejem.

Dále jsem musel vypočítat provozní náklady obou systémů. Vycházel jsem z průměrné denní spotřeby písku v naší výrobě. Průměrná spotřeba písku denně je 20 t. U stávajícího

systemu, jsem určil příkon motoru 1LG4 183-2AA6, který pohání dmychadlo. U impulsního systému jsem musel stanovit průměrnou cenu výroby 1 m<sup>3</sup> stlačeného vzduchu. Cenu 1 m<sup>3</sup> stlačeného vzduchu jsem stanovil 0,5 Kč [8]. Provozní náklady pro stávající pneumatickou dopravu jsou uvedeny v tab. 8. Provozní náklady pro impulsní pneumatickou dopravu jsou uvedeny v tab. 9.

Parametr	Hodnota	Jednotky
Dopravní výkon	2055	kg/h
Dopravované množství	20	t/den
Čas na přepravu 20 t	9,73	hod
Příkon motoru dmychadla	24,4	kW
Spotřeba el. Na přepravu 20 t	237,47	kWh
Cena 1 kWh el. Energie	1,5	Kč
Počet pracovních dní	336	den
Cena spotřebované el. Energie	356	Kč/den
Roční náklady na el. Energii	119685	Kč/rok

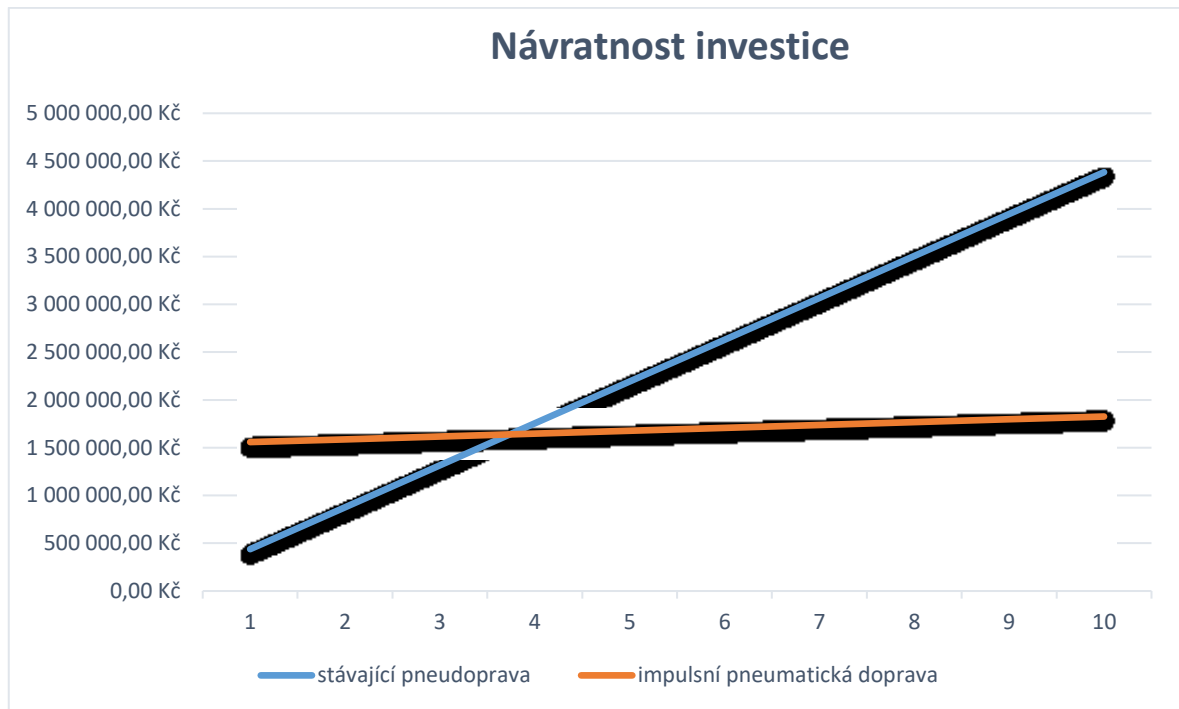
Tab. 8 Provozní náklady stávající pneumatické dopravy

Parametr	Hodnota	Jednotky
Dopravované množství	20	t/den
Spotřeba vzduchu na dopravu 1 t písku	8,84	m <sup>3</sup> /t
Spotřeba vzduchu za den	176,8	m <sup>3</sup> /den
Cena stlačeného vzduchu	0,5	Kč/m <sup>3</sup>
Počet pracovních dní	336	den
Roční spotřeba vzduchu	59404,8	m <sup>3</sup> /rok
Roční náklady na stlačený vzduch	29702	Kč/rok

Tab. 9 Provozní náklady impulsní pneumatické dopravy

Z výše uvedených tabulek vyplývá, že roční provozní náklady impulsní pneumatické dopravy jsou méně než třetinové oproti stávajícímu systému.

Na základě pořizovací ceny impulsní pneumatické dopravy, nákladů na provoz obou systémů a nákladů na údržbu stávající pneumatické dopravy jsem stanovil předpokládanou návratnost investice, která je zobrazena na obr. 40.



Obr 40. Návratnost investice

Z grafu je patrné, že implementace nového systému pneumatické dopravy má smysl a v horizontu několika let se investice vyplatí. Průsečík křivek, který reprezentuje tuto návratnost investice, vychází zhruba na 4. rok provozu impulsní pneumatické dopravy.

## ZÁVĚR

Stanovené cíle bakalářské práce byly splněny. Byla navržena nová technologie na dopravu abrazivního písku. Návrhu předcházely výsledky měření. Následně jsem ekonomicky zhodnotil případnou implementaci nového systému do provozu. Výsledky vychází velice příznivě, investice by se měla vrátit během 4. roku provozu impulsního pneumatického systému.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HEMERKA, J.: Teoretické základy pneumatické dopravy, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2017
- [2] CHRÁST, Jaroslav. Slévárenská zařízení. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-456-7.
- [3] ŠIROKICH, Jiří. Zařízení sléváren: učebnice pro 4. roč. denního studia a 5. roč. studia při zaměstnání oboru slévárenství na stř. prům. školách hutnických a slévárenských. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968. Řada strojírenské literatury.
- [4] URBAN, Jaroslav. Pneumatická doprava: určeno pro projektanty, konstruktéry, provozní techniky a studenty odborných a vysokých škol. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Řada strojírenské literatury.
- [5] DOSTÁL, Pavel. Stroje a zařízení: čerpadla, stroje na dopravu a stlačování vzdušnin, energetika. Ostrava: Ostravská univerzita, 2014. ISBN 978-80-7464-526-6.
- [6] JANALÍK, Jaroslav. Potrubní hydraulická a pneumatická doprava. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. ISBN 80-7078-595-0.
- [7] BHATIA, A. Pneumatic Conveying Systems. [online]. 9 Greyridge Farm Court: Continuing Education and Development, 2018 [cit. 2019-05-19].  
Dostupné z: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Pneumatic%20Conveying%20Systems.pdf>
- [8] AIR Consult CZ s.r.o. Kolik vás stojí stlačený vzduch?. [online]. Frýdlant: limex-technik, 2018 [cit. 2019-05-19].  
Dostupné z: <http://www.limex-technik.cz/blog/90-kolik-vas-stoji-stlaceny-vzduch>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Název
$\Delta p_z$	[Pa]	Tlaková ztráta
$p_v$	[Pa]	Tlak výtlačný
$p_s$	[Pa]	Tlak sací
N	[N]	Příkon
$V_v$	[m <sup>3</sup> /s]	Průtočný objem dopravního plynu
$\Delta p_z$	[Pa]	Rozdíl tlaků
$\eta_v$	[%]	Účinnost ventilátoru
$\eta_d$	[%]	Účinnost dmyhadla
L <sub>ad</sub>	[kgm/m <sup>3</sup> ]	Práce potřebná k stlačení metru kubického plynu
$\eta_{issp}$	[%]	Izotermická účinnost na spojce kompresoru
$\eta_{adsp}$	[%]	Adiabatická účinnost na spojce kompresoru
x	[-]	Exponent adiabatické komprese (pro vzduch x = 1,41)
R <sub>0</sub>	[m]	Rádus
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Objemový průtok
d <sub>opt</sub>	[m]	Optimální vnitřní průměr potrubí
$\dot{M}$	[kg/s]	Hmotnostní průtok
w	[m/s]	Rychlost proudění
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost
l	[m]	Délka přímé části potrubí
$\lambda$	[-]	Součinitel tření
$\varphi_x$	[°]	Úhel tření o stěny
$\sigma_c$	?	Vaznost materiálu
$\theta_{ax}$	[°]	Sklon stěny
$\varphi_e$	[°]	Účinný třecí úhel
Q <sub>v</sub>	[m <sup>3</sup> /h]	Množství dopravovaného materiálu
$\delta$	[-]	Směšovací poměr
V <sub>N</sub>	[m <sup>3</sup> ]	Objem násypky nad strojem
T <sub>D</sub>	[s]	Čas potřebný k naplnění násypky
p <sub>1</sub>	[Pa]	Tlak na přívodu trasy
p <sub>2</sub>	[Pa]	Tlak na konci trasy
v	[m/s]	Rychlost proudící částice
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost směsi písek/vzuch
E <sub>s</sub>	[-]	Specifická eroze
A	[m <sup>2</sup> ]	Plocha vnitřního průměru potrubí



## SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<i>Obr. 1 Schéma pneumatické dopravy</i> .....	12
<i>Obr. 2 Schéma pneumatické přetlakové dopravy</i> .....	13
<i>Obr. 3 Schéma podtlakové pneumatické dopravy</i> .....	14
<i>Obr. 4 Schéma smíšeného systému pneumatické dopravy</i> .....	14
<i>Obr. 5 Schéma uzavřeného systému pneumatické dopravy</i> .....	16
<i>Obr. 6 Schéma šnekového podavače materiálu</i> .....	19
<i>Obr. 7 Schéma turniketového podavače</i> .....	20
<i>Obr. 8 Komorový podavač s horním vyprazdňováním [2]</i> .....	21
<i>Obr. 9 Závislost rychlosti pohybu zátek písku na rychlosti hnacího vzduchu [2]</i> .....	22
<i>Obr. 10 Dávkový komorový podavač se spodním vyprazdňováním [2]</i> .....	23
<i>Obr. 11 Jednotlivé fáze cyklu kontinuálního impulsního pneumatického podavače [2]</i> .....	24
<i>Obr. 12 Závislost měrné spotřeby vzduchu na dopravovaném množství materiálu pro dávkový a kontinuální pneupodavač [2]</i> .....	25
<i>Obr. 13 Závislost rychlosti proudění vzduchu na koci potrubí a dopravovaného množství materiálu pro dávkový a kontinuální pneupodavač [2]</i> .....	26
<i>Obr. 14 Radiální ventilátor se spirálovou skříní [5]</i> .....	29
<i>Obr. 15 Charakteristika ventilátoru [4]</i> .....	29
<i>Obr. 16 Rootsovo dmyhadlo [5]</i> .....	30
<i>Obr. 17 Charakteristika dmyhadla [4]</i> .....	30
<i>Obr. 18 Pístový kompresor; 1/ kliková hřídel; 2/ válec; 3/ ojnice; 4/ píst; 5/ sací hrdlo; 6/ výtlačné hrdlo; 7/ sací ventil; 8/ výtlačný ventil [5]</i> .....	32
<i>Obr. 19 Charakteristika kompresoru [4]</i> .....	32
<i>Obr. 20 Opatření oblouku [4]</i> .....	34
<i>Obr. 21 Volba rádiusu oblouku [4]</i> .....	34
<i>Obr. 22 Prostředky k prodloužení životnosti oblouků [4]</i> .....	34
<i>Obr. 23 Závislost tlakové ztráty na průměru [1]</i> .....	35
<i>Obr. 24 Závislost objemového průtoku na průměru [1]</i> .....	35
<i>Obr. 25 Volba optimálního průměru ze závislosti výkonu stroje na průměru [1]</i> .....	36
<i>Obr. 26 Usazovací komora [4]</i> .....	37
<i>Obr. 27 Cyklon [4]</i> .....	37
<i>Obr. 28 Průběh tlaku a napětí v síle [2]</i> .....	38
<i>Obr. 29 Vtokové profily sypkého materiálu [2]</i> .....	39

---

<i>Obr. 30 Hromadného výtoku sypkých materiálů z kónického a klínového zásobníku [2] ...</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 31 Tvary výlevek zásobníku [2] .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 32 Jádra.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 33 Koncept stávající pneumatické dopravy .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 34 Koncept plnicí části .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 35 Dopravní trasa a její rozměry, přední pohled .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 36 Dopravní trasa a její rozměry, půdorys .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 37 Odlučovací část .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 38 Impulsní pneumatický podavač .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 39 Koncept plnicí části s impulsním pneumatickým podavačem .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 40 Návratnost investice.....</i>	<i>61</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Určení tlakové ztráty při dopravě materiálu .....</i>	48
<i>Tab. 2 Měření doby plnění násypky .....</i>	49
<i>Tab. 3 Porovnání síťových rozborů písku před a po průchodu pneumatickou dopravou.....</i>	50
<i>Tab. 4 Tlaková ztráta impulsní pneumatické dopravy .....</i>	54
<i>Tab. 5 Měření doby plnění násypky impulsní pneumatickou dopravou .....</i>	55
<i>Tab. 6 Porovnání síťových rozborů písku před a po průchodu impulsní pneumatickou dopravou.....</i>	56
<i>Tab. 7 Náklady na obnovu trasy stávající pneumatické dopravy 2016-2018.....</i>	59
<i>Tab. 8 Provozní náklady stávající pneumatické dopravy .....</i>	60
<i>Tab. 9 Provozní náklady impulsní pneumatické dopravy .....</i>	60

## SEZNAM PŘÍLOH

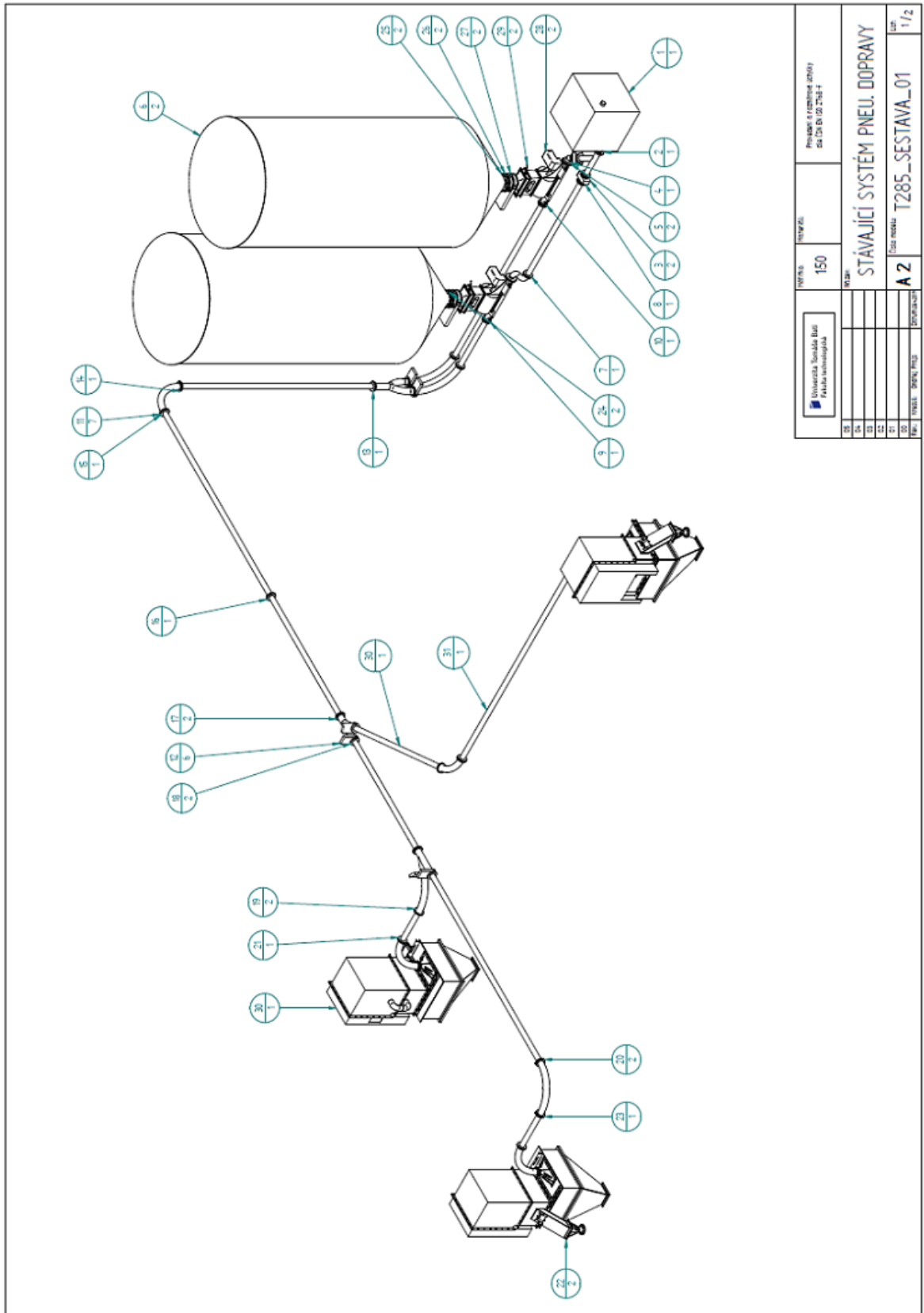
PI

Výkres sestavy stávajícího systému

PII

Kusovník

# PŘÍLOHA P I: VÝKRES SESTAVY STÁVAJÍCÍHO SYSTÉMU



## PŘÍLOHA P II: KUSOVNÍK

Item Number	File Name	Dimension (mm)	Quantity
1	Dmychadlo KV800	-	1
2	"Y" kus na vzduch	-	1
3	Mezipřírubová klapka	-	2
4	Odbočka 45 deg. DN 100	-	1
5	Směšovač	-	2
6	Silo	-	2
7	"S" kus na vzduch	-	1
8	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	2880	1
9	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	1420	1
10	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	4720	1
11	Keramické koleno 90 deg. R 800 DN 100	-	7
12	Nožové šoupátko DN 100	-	6
13	Keramický "Y" DN 100x60 deg.	-	1
14	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	5180	1
15	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	5705	1
16	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	3705	1
17	Odbočka 30 deg. DN 100	-	2
18	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	3390	2
19	Keramické koleno 60 deg. R 800 DN 100	-	2
20	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	5800	2
21	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	885	1
22	Násypka s regenerační jednotkou	-	3
23	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	998	1
24	Příruba DN 250	-	2
25	Klapka DN 250	-	2
26	Redukce		2
27	Nožové šoupátko DN 250		2
28	rotační podavač		2
29	Servisní okénko s klapkou		2
30	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	3380	1
31	Potrubní segment ABRATUBE 600 114,8x8	5800	1