



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## NÁVRH ZÁSOBNÍKU NA SYPKÝ VÁPENNÝ HYDRÁT

PROJECT OF SILO FOR POWDERY LIVE HYDRATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MAREK PERNA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MALÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2009





## Anotace

Tato diplomová práce řeší návrh hlubokého zásobníku na sypký vápenný hydrát pro technologická zařízení čistíren odpadních vod. Je zde proveden rozbor volby typu a konstrukce zásobníku, návrh rozměrů a pevnostní výpočet zásobníku. Je zde popsána možnost vzniku klenby při vyprazdňování a její potlačení pomocí aktivních a pasivních prvků napomáhající toku. Popis aktivních a pasivních stavů napjatosti materiálu v zásobníku.

FAKULTA  
STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

## Anotation

This diploma thesis is solving systems design of silo for a powdery lime hydrate for technology equipment in a sewage works. There is analysis of type choice and silo construction, dimension design and silo strength calculation. There is described possibility of empty space creation during the emptying and how to reduce them with the aid of active and passive elements conducive to flow. Description of active and passive cases of stress in silo material.



VYSOKÉ  
UCENÍ  
TECHNICKÉ  
V BRNĚ

FAKULTA  
STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

### **Bibliografická citace**

PERNA, M. *Návrh zásobníku na sypký vápenný hydrát*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.



VYSOKÉ  
UCENÍ  
TECHNICKÉ  
V BRNĚ

FAKULTA  
STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Jiřího Maláška, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne .....

.....

podpis



VYSOKÉ  
UCENÍ  
TECHNICKÉ  
V BRNĚ

FAKULTA  
STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

### **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Doc. Ing. Jiřímu Maláškovi, Ph.D. za odpovědné vedení, cenná doporučení a připomínky, které mi pomohly při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu během mého studia.

## Obsah

1.	Úvod .....	9
2.	Způsoby skladování sypkých hmot .....	9
3.	Rozdělení zásobníků .....	10
3.1.	Rozdělení zásobníků dle tvaru komor .....	10
3.1.1.	Pravoúhlé zásobníky .....	11
3.1.2.	Válcové zásobníky .....	11
3.1.3.	Kombinované zásobníky .....	12
3.2.	Rozdělení zásobníků dle ČSN 735570 .....	13
3.2.1.	Bunkr .....	13
3.2.2.	Sila .....	13
4.	Plnění zásobníku .....	14
4.1.	Způsoby plnění zásobníku .....	14
4.2.	Problémy s plněním zásobníku .....	14
4.2.1.	Pád částice s určité výšky – volný pád .....	15
4.2.2.	Pohyb částice po vytvořeném kuželu .....	15
4.3.	Pneumatická doprava .....	17
4.3.1.	Pneumatická doprava podtlaková .....	17
4.3.2.	Pneumatická doprava přetlaková .....	18
4.3.3.	Pneumatická doprava smíšená .....	19
4.4.	Pojistné ústrojí .....	19
5.	Vyprazdňování zásobníku .....	21
5.1.	Velikost výpustného otvoru .....	21
5.2.	Doba výtoku materiálu ze zásobníku .....	22
5.2.1.	Výtoková rychlost .....	25
5.3.	Uzavírací komponenty výpustného otvoru .....	26
5.4.	Uzavírací komponenty plnicího potrubí .....	29
5.5.	Tlaky na vertikální válcové stěny zásobníků při vyprazdňování .....	29
6.	Výpočet zásobníku .....	34
6.1.	Výpočet hlavních rozměrů .....	34
6.1.1.	Výpočet sypného úhlu .....	34
6.1.2.	Výpočet úhlu sklonu kuželové výsyvky .....	34
6.1.3.	Výpočet výšky hlavní komory .....	35
6.1.4.	Výpočet výšky kuželové výsyvky .....	36
6.2.	Výpočet objemu zásobníku .....	36
6.2.1.	Výpočet objemu hlavní komory .....	36
6.2.2.	Výpočet objemu kuželové výsyvky .....	36

6.2.3.	Celkový objem zásobníku .....	37
6.3.	Tlakové poměry v hlubinných silech .....	37
6.4.	Tloušťka stěny zásobníku .....	43
6.4.1.	Výpočet sil zatěžující zásobník .....	45
6.4.2.	Tloušťka stěny .....	46
6.5.	Kontrolní výpočet vzpěrné stability nohy .....	46
6.6.	Kontrola svarových spojů .....	49
6.6.1.	Kontrola svarů závěsných ok .....	49
6.6.2.	Kontrola svarů mezi kuželovou výsypkou a hlavní komorou .....	50
6.6.3.	Kontrola svarů mezi nohou a zásobníkem .....	50
6.6.4.	Kontrola svarů pláště zásobníku .....	51
7.	Kinematika toku materiálu při vyprazdňování zásobníku .....	52
7.1.	Zásobníky s jádrovým tokem .....	53
7.2.	Zásobníky s hmotovým tokem .....	55
7.3.	Zásobníky s kombinovaným tokem .....	56
8.	Přídavná zařízení pomáhající toku materiálu .....	56
8.1.	Aktivní prvky .....	57
8.2.	Pasivní prvky .....	58
9.	Vznik vzpěrné klenby .....	58
10.	Závěr .....	62
11.	Seznam použitých veličin .....	63
12.	Seznam použité literatury .....	65
13.	Seznam internetových zdrojů .....	66
14.	Seznam výkresové dokumentace .....	67



## 1. Úvod

Skladování, právě tak jako doprava, je nevyhnutelným průvodním jevem každého výrobního procesu v chemickém, potravinářském a zpracovatelském průmyslu. Skladování zvyšuje výrobní náklady, aniž by přispěly ke zvýšení hodnoty výrobku. Jedinou výjimku tvoří tzv. technologické sklady (procesní), kdy během skladování dochází k určitým technologickým procesům, při kterých se mění vlastnost skladovaného materiálu např. zrání produktu v potravinářském průmyslu. Z největší části je však, ale zásadním požadavkem každého skladování, aby nedocházelo ke změně vlastnosti skladovaného materiálu. Zvláště pak u skladování sypkých materiálů.

Skladování se provádí v prostých zásobnících pevných látek. Jsou to zařízení bez pohyblivých součástí, přesto však problematika jejich provozování je dosti složitá a to nejen pokud jde o konstrukci vlastního zásobníku, ale i navazujících zařízení.

Zásobník sypkých hmot je možno obecně definovat jako účelně ohraničený prostor, sloužící k přechodnému uložení nebo uskladnění sypkých látek.

## 2. Způsoby skladování sypkých hmot

Sypké hmoty (partikulární látky) skladujeme:

v jednotkových obalech

- pytle
- bedny
- sudy
- krabice

Lze využít všude tam, kde se z materiálem velmi často manipuluje a je potřeba velmi snadná manipulace. Při tomto skladování je potřeba zautomatizovat dávkování i manipulaci s obaly, je to z důvodu, aby tento způsob skladování byl ekonomicky výhodný. Je to jediný možný způsob skladování sypkých materiálů pro distribuci do spotřební sítě (potravinářský průmysl). Kde obaly bývají opatřeny čárovým kódem, nejčastěji kód EAN (European Article Number), který přesně definuje prodávaný předmět. Ke čtení těchto kódů se používají čtecí zařízení, které jsou připojeny k počítači. Vhodný software zpracovávající data čtecích zařízení výrazně přispívá k racionalizaci skladování, chodu a vazeb na průmysl dle lit.[1].

### **Hromadně volně loženého materiálu (extenzivní způsob)**

- tam kde je pohyb materiálu poměrně malý

**Skládka** – je prostor, geometricky omezený základnou, jejíž tvar je dán způsobem odběru skladovaného materiálu a ostatními plochami, buď zcela volnými nebo uměle ohraničenými. Tvar volných ploch je dán sypaným kuzelem daného materiálu, nebo se dodatečně upravuje do požadovaného tvaru. Skládky jsou buď volné nebo kryté, určené pro materiály, kde je vyžadována ochrana proti povětrnostním vlivům. U tohoto způsobu skladování je potřeba velké skladovací plochy, protože výška skladovaného materiálu nemůže být obvykle příliš vysoká.

**Polobunkry** – představuje kombinaci zásobníku a skládky. Užívá se pro skladování značných objemů materiálu, přičemž zajišťuje i částečnou homogenizaci materiálu. Materiál je zde nasypáván volně.

### **Hromadné skladování v zásobnících (intenzivní způsob)**

Při intenzivním skladování dosahujeme podstatně vyššího využití skladovací plochy. Je to dáno tím, že vrstva skladovaného materiálu je podstatně vyšší než u obvyklých volných skládek. Pro tento způsob skladování se využívají zásobníky pro dlouhodobé skladování materiálu.

**Zásobník** – je podle ČSN 735570 prostorová konstrukce, sloužící k uskladnění zrnitých, prachových i částečně vláknitých materiálů. Zásobníky jsou zařízení investičně nákladná, proto se jejich uplatnění musí ekonomicky zvážit. V zásadě by se neměl v zásobníku skladovat materiál, který může být volně ložen v polobunkru či skládce. Zásobník dostatečně ochrání materiál, který je náchylný na změnu svých vlastností vlivem počasí.

## **3. Rozdělení zásobníků**

### **3.1. Rozdělení zásobníků dle tvaru komor**

#### **Zásobníky s průřezem komory pravoúhlým**

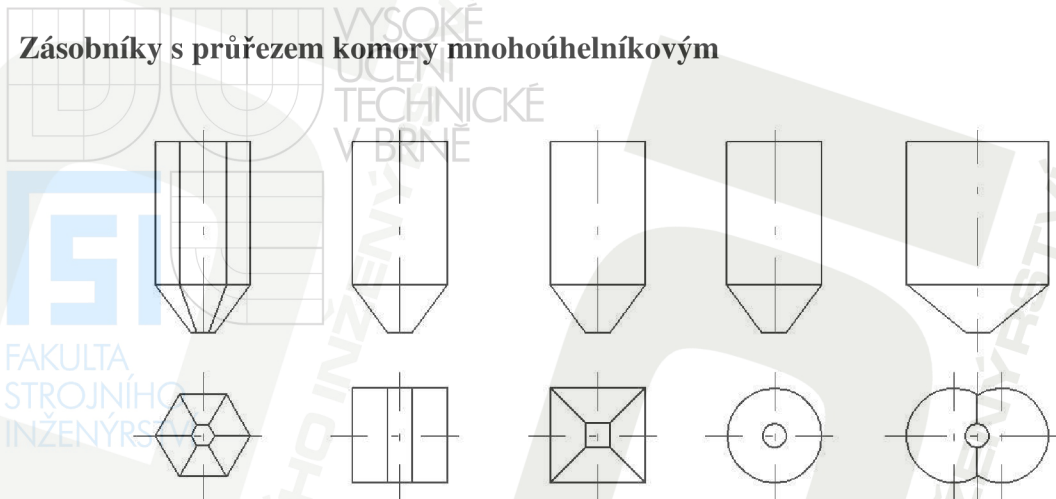
- čtvercové
- obdélníkové

#### **Zásobníky s průřezem komory kruhovým**

- válcové zásobníky



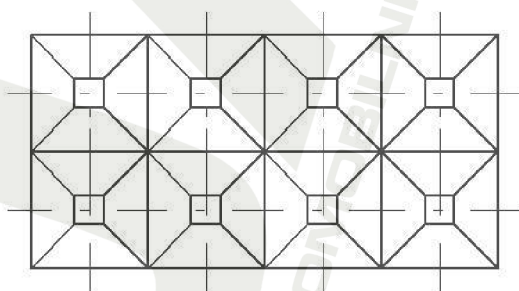
### Zásobníky s průřezem komory mnohoúhelníkovým



Obr. 3.1 Průřezy komor a výsypek

#### 3.1.1. Pravoúhlé zásobníky

Používají se většinou pro menší skladovací kapacity vzhledem k tomu, že tvar zásobníku není vhodný z hlediska namáhání stěn zásobníku. Určitým problémem je i vyřešení výsypky, která u tohoto typu zásobníku může být po celé délce jedné hrany – štěrbinová výpusť, nebo tvar výsypky je komolý jehlan, průřez výpustního otvoru je pak čtverec nebo obdélník. U těchto typů zásobníků jsou výraznější tendence pro vznikání tzv. mrtvých koutů, ze kterých se materiál velmi obtížně vyprazdňuje. Z geometrie zásobníku je zřejmé, že úhel stěny výsypky  $\alpha'$ , což může být někdy i příčinou poruch při vyprazdňování. Určitou výhodou je lepší využití zastavěného prostoru při vytváření skupin zásobníků obr. 3.2.

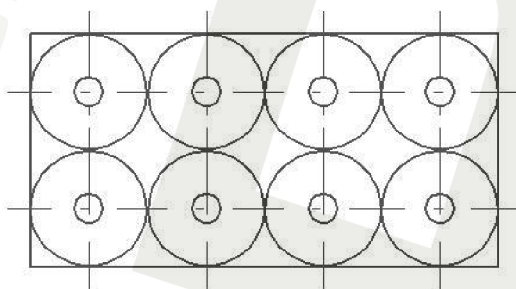


Obr. 3.2 Využití zastavěné plochy při vytváření skupin pravoúhlých zásobníků

#### 3.1.2. Válcové zásobníky

Jsou výhodné jak z hlediska výrobního, tak i z hlediska namáhání pláště zásobníku. Určitou nevýhodou je jejich menší skladovací kapacita při vytváření skupin zásobníků. Využití zastavěné plochy je menší než u pravoúhlých zásobníků obr 3.3.

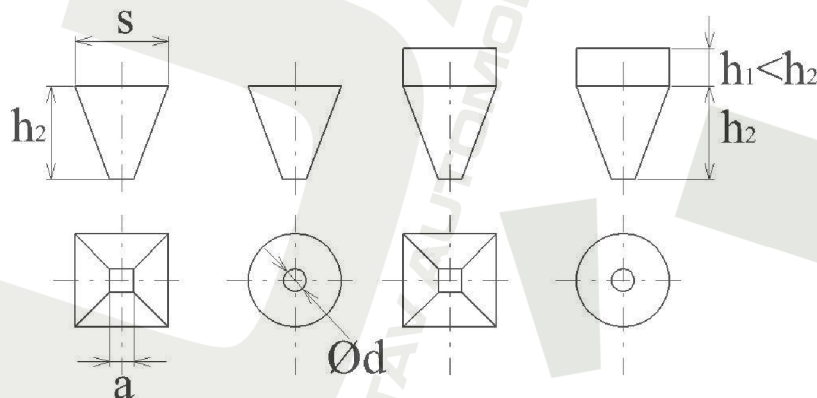
Válcové zásobníky jsou většinou opatřeny kuželovou výpustí, která má zaručit plynulé a dokonalé vyprázdnění celého objemu zásobníku. Vzhledem k osové symetrii zásobníku, je úhel výsypky v každém řezu stejný. Problém je v návrhu správného úhlu výsypky tak, aby nebylo zapotřebí přídavné zařízení pro vyprazdňování. Správnou volbou úhlu výsypky lze také ovlivnit skladovací kapacitu zásobníku dle lit.[3].



Obr. 3.3 Využití zastavěné plochy při vytváření skupin válcových zásobníků

### 3.1.3. Kombinované zásobníky

V některých případech lze řešit zásobníky i tak, že prakticky nemají komoru a tvar zásobníku je pak kužel nebo jehlan (u čtvercového průřezu) – lepší vyprazdňování zásobníku. Těchto typu zásobníků lze využít pro skladování materiálu málo sypkého a soudržného. Použití těchto zásobníků musí být technologicky a ekonomicky zdůvodněné, protože jejich užitečný objem k zastavěné ploše bude menší. Za jehlancovité a kuželovité zásobníky se považují i takové jejichž výška válcové části je menší než výška výsypky, takové zásobníky se nazývají kombinované.



Obr. 3.4 Kombinované zásobníky

### 3.2. Rozdělení zásobníků dle ČSN 735570

- Bunkry (nehluboké zásobníky)
- Sila (hluboké zásobníky, hlubinná sila)

#### 3.2.1. Bunkr

- je skladovací zařízení, pro které platí:

$$h \leq 1,5\sqrt{A} \quad (1)$$

**Kde:**

h – výška komory

A – příčný průřez zásobníku

- pro kruhové průřezy komory

$$h \leq 1,33d \quad (2)$$

**Kde:**

h – výška komory

d – vnitřní průměr komory

- přímka vedená pod úhlem vnitřního tření  $\varphi$  z průsečíku komory neprotíná boční stěnu

#### 3.2.2. Sila

- je skladovací zařízení, pro které platí:

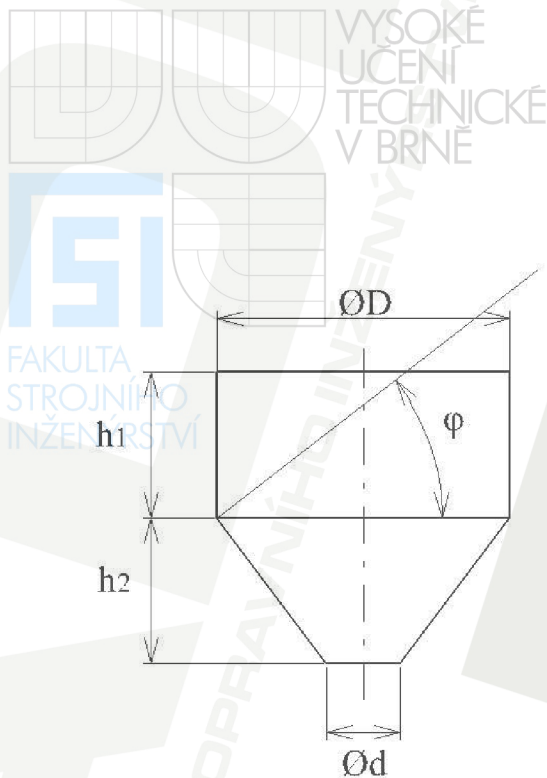
$$h > 1,5\sqrt{A} \quad (3)$$

**Kde:**

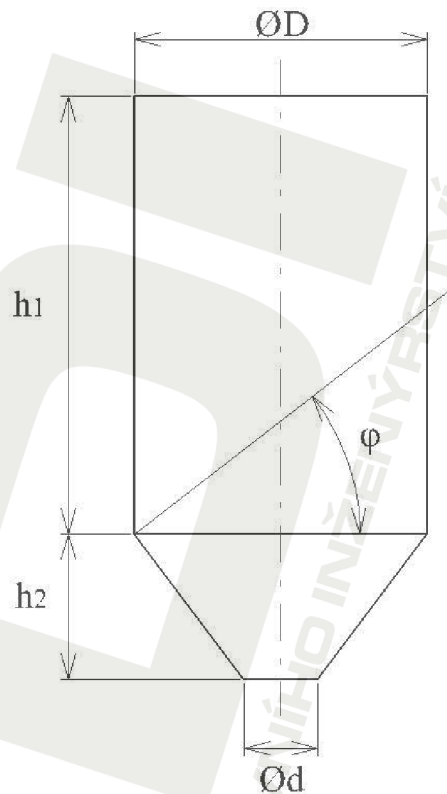
h – výška komory

A – příčný průřez zásobníku

- přímka vedená pod úhlem vnitřního tření  $\varphi$  z průsečíku komory protíná boční stěnu



Obr. 3.5 Bunkr



Obr. 3.6 Silo

## 4. Plnění zásobníku

### 4.1. Způsoby plnění zásobníku

**Mechanicky** – na střeše zásobníku je otvor s poklopem, který je otevírací, jímž jde zásobník plnit pomocí pásovým nebo šnekovým dopravníkem.

**Pneumaticky** – materiál je do zásobníku dopravován pomocí plnicího potrubí, které je připevněno vně zásobníku na jeho plášti, vyústění je těsně pod střešou zásobníku a připojovací konec plnicího potrubí s připojovacím hrdlem je asi 1,5 m nad zemí.

### 4.2. Problémy s plněním zásobníku

Způsob plnění zásobníku má rovněž vliv na další provoz zásobníku. Při plnění se projeví segregace částic, v případě, že směs je polydisperzní. Mechanismus samotřídění lze objasnit i při prostém sypání sypkého materiálu na hromadu. Pokud materiál padá (teoreticky z bodového místa) z určité výšky na vodorovnou plochu, vytvoří se kužel, jehož velikost a tvar jsou dány množstvím a vlastnostmi materiálu. Působením vnějších sil může dojít



k deformaci kužele. Pokud však nepůsobí vnější síly, měl by být kužel symetrický. Při volně sypaném materiálu vznikají dvě fáze pohybu částic dle lit.[1].

- **pád částice s určité výšky – volný pád**

- **pohyb částice po vytvořeném kuželu**

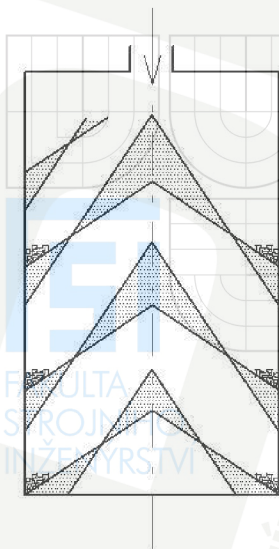
#### **4.2.1. Pád částice s určité výšky – volný pád**

O rychlosti volného pádu rozhoduje velikost částice a její tvar (odpor prostředí). Rychlost pohybu je pak definována rovnováhou sil, které na částici působí (hmotnostní, odporové síly). O kinetické energii při dopadu na kužel materiálu rozhoduje výsledná konečná rychlost.

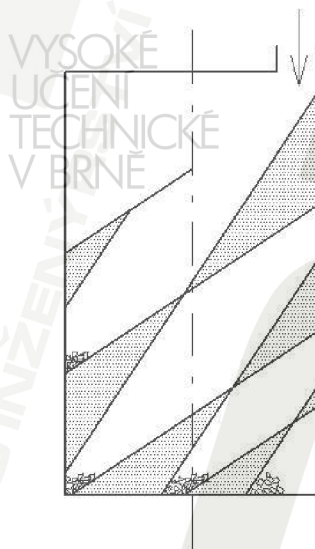
#### **4.2.2. Pohyb částice po vytvořeném kuželu**

Při pohybu částice po vytvořeném kuželu jsou částice brzděny. Malé částice mají malou kinetickou energii a nestačí překonávat odpory, proto zůstávají v blízkosti vrcholu kužele. Malé částice začínou vyplňovat prostory mezer velkých částic, které jim neumožňují další pohyb, popřípadě je částečně unáší při svém pohybu. Jelikož velké částice mají velkou kinetickou energii mnohem lépe se pohybují a tak se dostávají snáze až k patě kužele. Při těchto fázích dochází k rozvrstvení částic, kdy u základny kužele budou částice s velkou hmotností (velké tvary částic nebo s větší měrnou hmotností) s optimálním kulovým tvarem a hladkým povrchem. Naopak částice menší, prachové, s drsným nebo nevhodným tvarem (lupénky, desky) budou kolem vrcholu kužele. Na okrajích obou fází se budou nacházet smíšené částice.

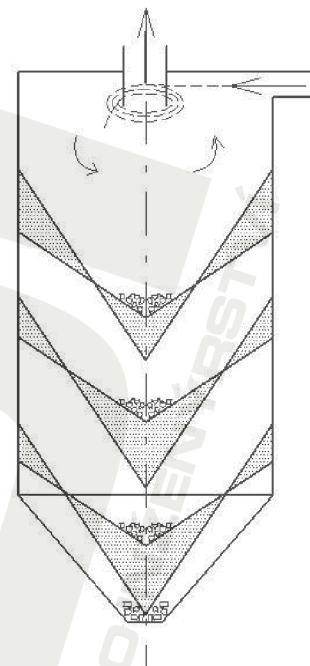
Vytváření sypného kužele se neděje většinou plynule, ale spíše přerušovaně. Zprvu se vytvoří kužel materiálu kolem středu (vrcholu), drobné a ploché částice se do sebe zaklíní a vrcholový úhel se začne zmenšovat, v tomto případě bude sypný úhel  $\varphi$  maximální. Prachové, hladké a ploché částice mají větší úhel vnitřního tření. V okamžiku, kdy vrcholový úhel sypného kužele  $\beta$  bude menší než sypný úhel  $\varphi$  dojde k posunu materiálu. Pokud je materiál volně sypán tak se jednotlivé fáze neustále prodlužují (množství sypaného materiálu je za čas stále stejný), je to dáno tím, že základna kužele se stále rozšiřuje. U zásobníku, kde je plocha omezena stěnami se jednotlivé fáze naprosto pravidelně střídají. Způsob plnění zásobníku velmi ovlivňuje složení materiálu.



Obr. 4.1 Plnění zásobníku středem



Obr.4.2 Plnění zásobníku na straně

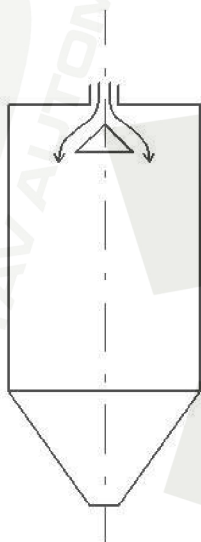


Obr. 4.3 Plnění pneumatické

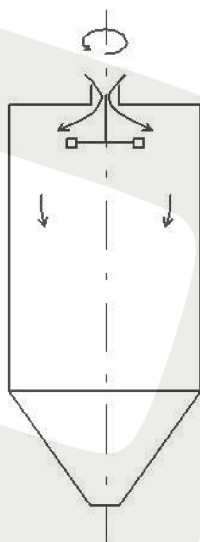
Pokud je vyprazdňovací otvor umístěn uprostřed a zásobník bude mít navíc jádrový tok, bude podle způsobu plnění vytékat postupně materiál o různé velikosti částic.

Při plnění zásobníku středem budou nejprve vytékat malá množství velkých částic a pak všechny jemné částice. Pokud by byl výtok materiálu realizován více otvory, bude složení materiálu rovnoměrnější – může docházet k promísení materiálu (hmotový tok), proto je nutné zvažovat jak plnění tak i vyprazdňování zásobníku.

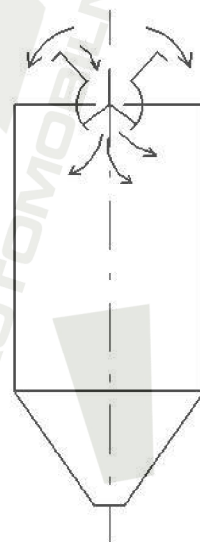
Pokud chceme aby se v maximální míře zabránilo k samotřídění materiálu je potřeba násypku konstrukčně upravit viz obr.4.4-7.



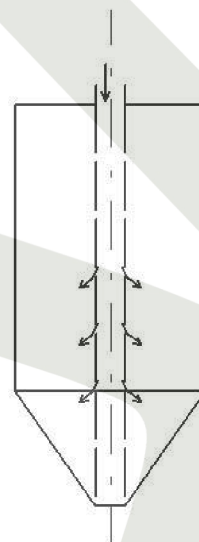
Obr. 4.4



Obr. 4.5



Obr. 4.6



Obr. 4.7

Obr. 4.4 – pevný rozhazovací kužel

Obr. 4.5 – otočné rozhazovací zařízení

Obr. 4.6 – kyvné zařízení

Obr. 4.7 – trubka s výpadovými otvory

### 4.3. Pneumatická doprava

Pneumatická doprava využívá k pohybu pevných částic účinků proudícího vzduchu (obecně jakéhokoliv plynu). Účinky se dělí na přímé nebo nepřímé dle lit.[1].

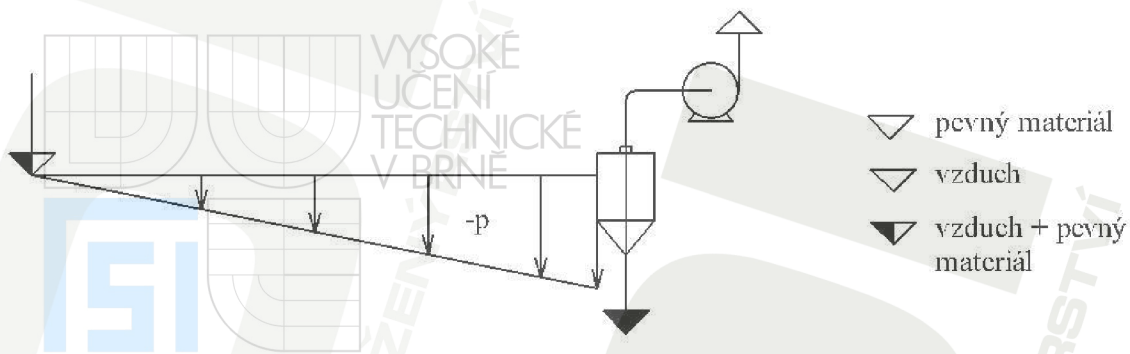
- 1) **Přímé účinky proudícího vzduchu** – využívají se v pneumatické dopravě v potrubí. Na povrch částice dopravovaného materiálu působí přímo síly tlakové, tečné a vztlakové, které umožňují částici sypkého materiálu se dopravovat ve vznosu. Dopravu v potrubí lze realizovat v prakticky libovolném směru.
- 2) **Nepřímé účinky** – materiál během dopravování je provzdušňován, což způsobuje jeho značnou mezerovitost a vytváří se tzv. fluidní vrstva. Její vlastnosti se velmi blíží vlastnosti kapaliny. Pokud bude dopravní potrubí nakloněno, pak materiál v tomto stavu bude „téct“ jako kapalina vlivem gravitační síly do směru pohybu. Realizace pneumatické dopravy je možná pouze tzv. samospádem, sklon potrubí může být i relativně malý 1-2°.

Pneumatická doprava v potrubí – tato doprava je velmi vhodná pro sypké materiály s malou měrnou hmotností. Velmi těžce se dopravují materiály, které jsou mokré, těžké, lepivé a které obsahují velké částice. Pro dopravu je potřeba vyvodit tlakový spád. Podle způsobu vyvození tlakového spádu je možno pneumatickou dopravu v potrubí rozdělit:

- pneumatická doprava podtlaková
- pneumatická doprava přetlaková
- pneumatická doprava smíšená

#### 4.3.1. Pneumatická doprava podtlaková

Materiál vstupuje do potrubí při normálním barometrickém tlaku a bezproblémově. Jelikož možnost vzniku podtlaku je omezena, který dosahuje maximální hodnoty 0,1 MPa. Využití tento způsob dopravy najde tam, kde je potřeba do zásobníku dopravit materiál z více míst. Z hlediska kapacity se bude jednat o menší jednotky.



Obr. 4.8 Pneumatická doprava podtlaková

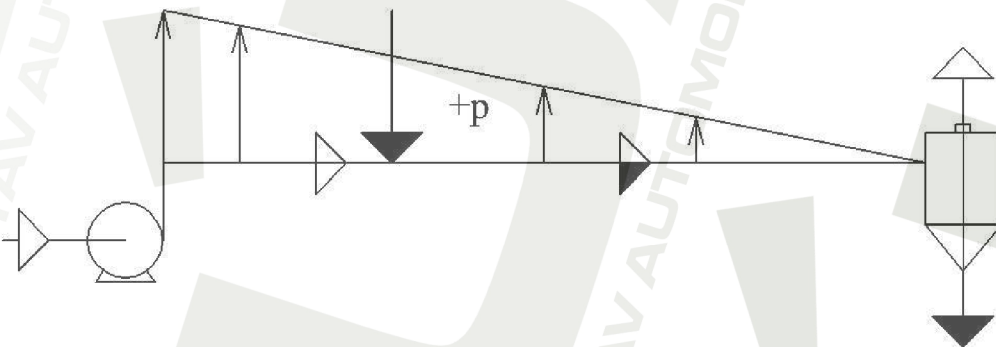
### 4.3.2. Pneumatická doprava přetlaková

U tohoto způsobu pneumatické dopravy může být tlakový spád větší než v předchozím případě. K vyvození tlakového spádu můžeme využít ventilátor, kompresor, dmýchadlo. Díky těmto vysokým tlakovým spádům můžeme materiál dopravovat do velkých vzdáleností, při vysokých kapacitách. Při vstupu materiálu do potrubí je potřeba zajistit, aby nedošlo k uniku tlakového vzduchu z potrubí.

**Přetlakovou dopravu můžeme rozdělit na :**

- nízkotlaká s přetlakem do 0,02 MPa (tlakový zdroj – ventilátor)
- středotlaká s přetlakem 0,02 – 0,1 MPa (tlakový zdroj – dmýchadlo)
- vysokotlaká s přetlakem větším než 0,1 MPa (tlakový zdroj – kompresor)

Toto rozdělení je jen orientační, jednotlivé hranice tlaků se mohou překrývat. Tato doprava se využívá např. tam, kde je potřeba zajistit dopravování materiálu z jednoho zdroje do více míst.



Obr. 4.9 Pneumatická doprava přetlaková



### 4.3.3. Pneumatická doprava smíšená

Tato doprava využívá výhod obou předchozích doprav, tj. snadného vstupu materiálu do potrubí a využití vysokých kapacit a velkých vzdáleností. Dopravovaný materiál prochází ventilátorem, což často z provozních nebo bezpečnostních důvodů není možné a proto se navrhuje jiné způsoby řešení, což je ale velmi složité. Velká výhoda je, že dopravovaný materiál může být dopravován z více zdrojů do více míst.

#### Výhody pneumatické dopravy:

- velmi dobrá možnost přizpůsobivosti k dopravní trase – můžeme vést vodorovně, horizontálně i šikmě prakticky jako vodovod
- zařízení je kompaktní – skládá se z podavače materiálu, odlučovače materiálu (cyklony), potrubí a tlakového zdroje (podtlakového zdroje)
- ve vlastní potrubní trase je minimum pohyblivých součástí, prakticky jen ve zdroji tlaku (podavači) – velmi dobrá provozní spolehlivost
- pneumatická doprava je maximálně hygienická. Pokud potrubí splňuje podmínku dokonalé těsnosti, odpadá problém s prašností. V podtlakové dopravě můžeme zajistit, aby látky jedovaté nebo jinak nebezpečné nemohly odcházet do atmosféry. Je možno i dopravovat v proudu jiného plynu, který lze recirkulovat.
- během dopravy lze i zajistit chlazení, ohřev, okysličení, chemické reakce atd.
- doprava je ekologická
- nízké pořizovací náklady

#### Nevýhody pneumatické dopravy

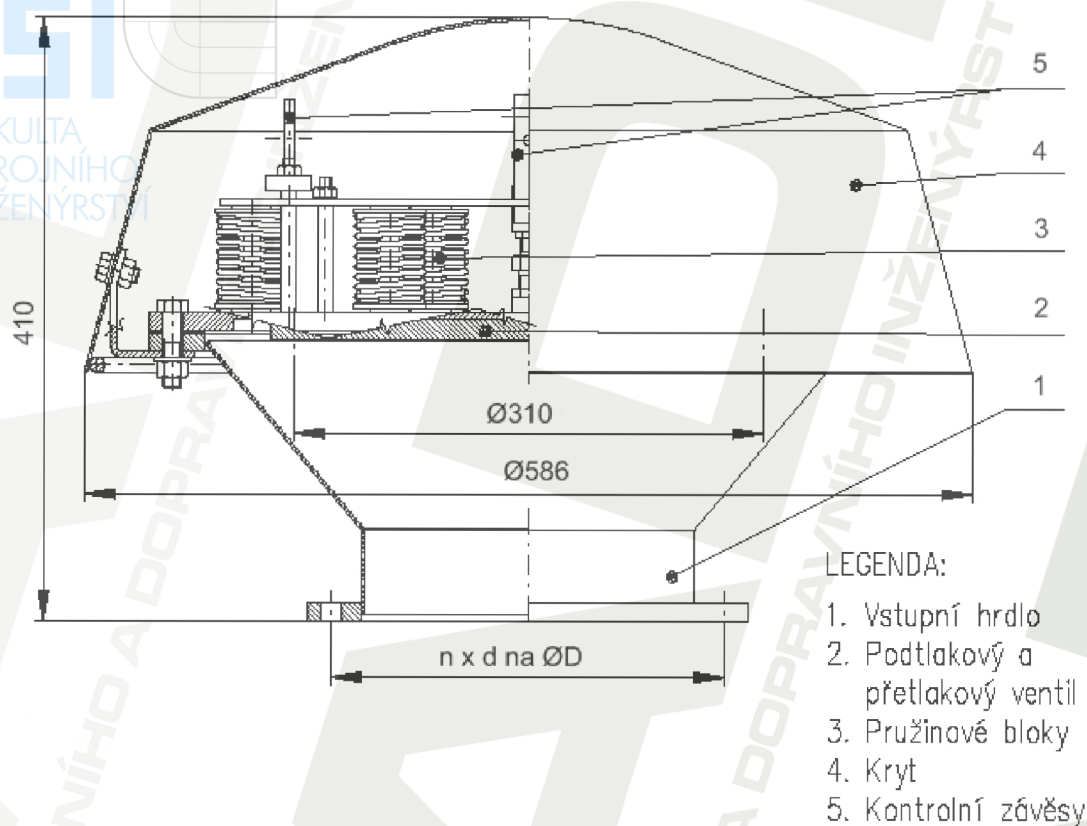
- většinou jednoúčelové s malou možností změny dopravovaného média
- větší spotřeba měrné energie oproti jiným druhům dopravy
- při vysokých dopravních rychlostech může dojít k rozpojování materiálu, zvláště pak v kolenech a obloucích

### 4.4. Pojistné ústrojí

Pojistné ústrojí zajišťuje koncový prvek zařízení pneumatické dopravy, konstrukci zásobníku před nadměrným přetlakem nebo podtlakem vzduchu při pneumatickém plnění zásobníku práškovým nebo jemně zrnitým materiálem nebo při jeho vyprazdňování. Při dosažení otevíracího přetlaku nebo podtlaku síla propojí jištěný prostor s okolním ovzduším. Při dosažení jisticího tlakového spádu (přetlak nebo podtlak) je ventil plně otevřen.

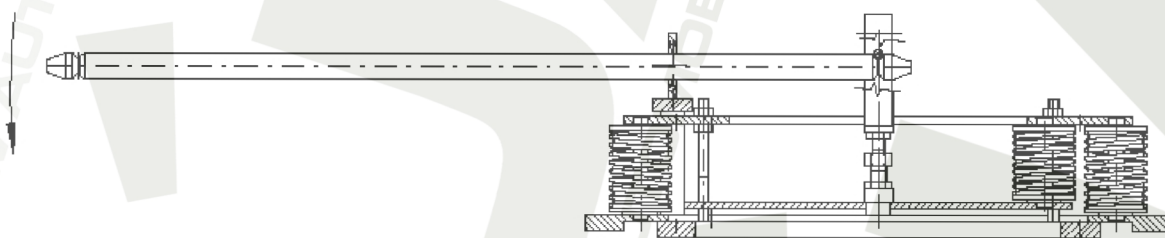
Pojistné ústrojí je provedeno z ocelového materiálu konstrukční jakosti. Díly pojistného ústrojí přicházející do styku s agresivním materiálem jsou vyrobeny z ocelí tř.17. Podstatou

pojistného ústrojí je kombinovaný přetlakový a podtlakový talířový ventil zatěžovaný soustavou ocelových pružin, který je uložen v ocelovém pouzdře opatřeném vstupním hrdlem a krytem dle [15].



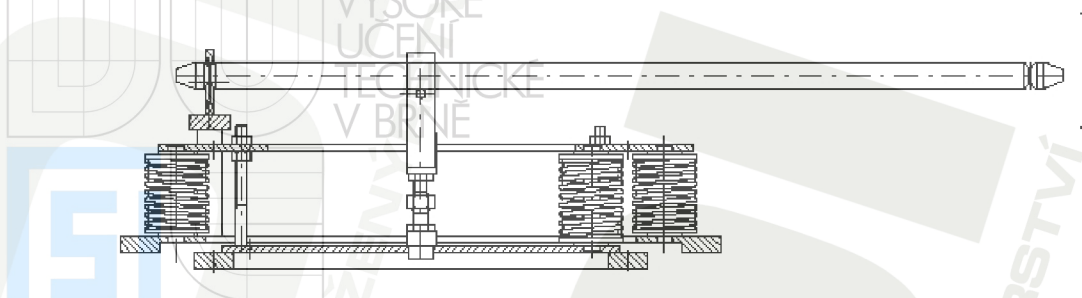
Obr. 4.10 Pojistné ústrojí PU 310

Poloha A – zdvih přetlakového ventilu



Obr. 4.10a Pojistné ústrojí PU 310

Poloha B – zdvih podtlakového ventilu



Obr. 4.10b Pojistné ústrojí PU 310



Obr. 4.11 Bezpečnostní přetlakový a podtlakový ventil VHS a VCP dle [14]

## 5. Vyprazdňování zásobníku

### 5.1. Velikost výpustného otvoru

Aby se předešlo vytváření vzpěrné klenby, musí mít zásobník dostatečně dimenzovaný výpustný otvor. Velikost výpustného otvoru se většinou navrhuje v určitém poměru k velikosti částic skladovaného materiálu, zvláště pokud jde o hrubozrnné materiály. Z praxe je dáno, aby minimální průřez čtvercového výpustného odpovídá vztahu dle lit[1]:

$$S \geq (5d)^2 \quad [\text{m}^2] \quad (4)$$

Při stejném ekvivalentním průměru může být tvar zrn velmi nepravidelný a rozdílný, zavádí se součinitel bezpečnosti  $k$ , který dosahuje hodnot 1,4.

$$S = k \cdot (5d)^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (5)$$

Při výpočtu kruhového otvoru lze použít stejný vztah zmenšený o 15 %, jelikož kruhové výpustné otvory jsou z hlediska materiálu účinnější.

$$S = 0,85 \cdot k \cdot (5d)^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6)$$

Závislost mezi velikostí ekvivalentního zrna a velikostí plochy výpustného otvoru se někdy vyjadřuje vztahem, ve kterém je zahrnuta vlastnost materiálu - součinitel vnitřního tření

$$a = k_1 \cdot (d + 80) \cdot \text{tg}\varphi \text{ [mm]} \quad (7)$$

**Kde:**

a - rozměr strany čtvercové výpusti nebo průměr kruhového otvoru výpusti

d – ekvivalentní průměr zrna

$\varphi$  – součinitel vnitřního tření

k – bezpečnostní součinitel (1,4)

$k_1$  – bezpečnostní součinitel ( 2,4 ÷ 2,6)

- tohoto vztahu lze využít pro materiál s velikostí zrn 0 - 300 mm a součinitel vnitřního tření  $\varphi = 30 - 50^\circ$

Užívá se i vyjádření závislosti vycházející z praxe, kdy se uvádí, že délka strany čtvercového výpustného otvoru má být šestinásobkem největšího rozměru zrna.

V našem případě se jedná o skladovaný vápenný hydrát, jeho zrnitost se pohybuje mezi 50-300  $\mu\text{m}$ , proto výpustný otvor navrhují dle parametrů, jako je přípojovací rozměr uzávěrů, klapek, dávkovacího zařízení. Návrh výpustného otvoru je  $\text{Ø}d = 200 \text{ mm}$ .

## 5.2. Doba výtoku materiálu ze zásobníku

Pokud má být správně dimenzováno dopravní zařízení, je zapotřebí znát pro odvod materiálu ze zásobníku rychlost výtoku materiálu, respektive dobu výtoku materiálu. Pohyb zrnitého prostředí je značně odlišný od kapaliny. U kapalin platí známý Torricelli vztah pro rychlost ve výpustném otvoru dle lit [1].



$$v_{\text{výt}} = \sqrt{2gh} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (8)$$

Rychlost výtoku je především úměrná hydrostatickému tlaku, který reprezentuje výška kapalné náplně  $h$ . Snadno lze stanovit pro kruhový otvor

$$v_{\text{výt}} = \frac{Q \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot D_o^2} = \sqrt{2gh} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (9)$$

Z uvedené rovnice lze sestavit bezrozměrné kritérium ve tvaru

$$\frac{Q}{\rho \cdot D_o^2 \cdot \sqrt{2gh}} = \text{konst} \quad (10)$$

Z odvozených vztahů vyplývá, že rychlost průtoku při vyprazdňování kapaliny bude záviset na hydrostatické výšce, která je proměnná s časem. Proto i rychlost kapaliny ve výpustném otvoru bude s časem proměnná.

Úplně jiná situace nastane při vyprazdňování sypkého zrnitého materiálu ze zásobníku. Hnací silou bude opět gravitační síla. Z průběhu tlaku v hlubinném zásobníku však víme, že od určité výšky (hloubky) se tlak v zásobníku bude měnit jen minimálně. Na rozdíl od kapaliny bude významnou veličinou velikost částic, vedle fyzikálních vlastností. Přesné matematické řešení by bylo velmi obtížné vzhledem k nahodilému charakteru vrstvy materiálu. V takových případech je obvyklé využít rozměrové analýzy, abychom získali alespoň kvalitativní názor.

Uvažujme výtok suchého sypkého materiálu kruhovým otvorem o  $\text{Ø}D_o$  z hlubinného síla. Objemová (sypná) hmotnost  $\rho'$ . Hnací silou pro výtok materiálu je gravitační síla. Hmotnostní průtok v čase je  $Q'$ . Materiál je monodisperzní a má velikost částic  $d$ . Pro řešení uvažujeme, že materiál se chová jako ideálně sypký – neuvažujeme tření mezi částicemi, slepování částic apod.. Pomocí rozměrové analýzy chceme nalézt vztah mezi proměnnými

$$f(D_o, d, \rho', g, Q') = 0 \quad (11)$$

**Kde:**

$D_o$  – průměr výpustného otvoru [m]

$d$  – velikost částic materiálu [m]

$\rho'$  – objemová hmotnost materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

$Q'$  – hmotnostní průtok materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

- řešení funkční závislosti budeme hledat ve tvaru

$$D_o^a \cdot d^b \cdot \rho^c \cdot g^e \cdot Q^f = \text{konst} \quad (12)$$

Při nezávislosti rovnic rozměrů bychom pro řešení problému potřebovali pět rovnic (pět proměnných). Pokud můžeme problém vyjádřit pomocí tří základních rozměrů (kg, m, s), bude dvěma bezrozměrnými argumenty. Aby řešení systému rovnic bylo možné, je zřejmé, že dvě proměnné musíme vhodně zvolit. Protože nás zajímá hmotnostní průtok  $Q'$ , volíme exponent  $f = 1$ . Pro další řešení pak dále volíme  $b = 0$ . Řešením dostaneme bezrozměrné kritérium ve tvaru:

$$\frac{Q'}{\rho \cdot g^{0.5} \cdot D_o^{2.5}} = f\left(\frac{d}{D_o}\right) \quad (13)$$

- velikost částic je oproti velikosti výpustného otvoru velmi malý. Navíc je pro konkrétní řešení poměr  $d/D_o = \text{konst.}$ , lze psát

$$Q' = k \cdot \rho \cdot g^{0.5} \cdot D_o^{2.5} = k \cdot \rho \cdot g^{0.5} \cdot D_o^{0.5} \cdot D_o^{2.0} \quad (14)$$

- rovnice po úpravě vypadá následovně

$$\frac{Q'}{\rho \cdot D_o^2} = k \cdot \sqrt{g \cdot D_o} \quad (15)$$

- výraz na levé straně rovnice představuje rychlost výtoku, výraz na pravé straně je pro dané uspořádání konstantní a platí:

$$v_{\text{výt.,sypké}} = \text{konst} \quad (16)$$

Vyprazdňování zásobníku bude probíhat přibližně konstantní výtokovou rychlostí. Hodnotu konstanty lze stanovit experimentálně na modelu při dodržení podmínek podobnosti. Z analýzy získaného vztahu plyne další důležitý závěr, že vytékající množství  $Q'$  materiálu z otvoru o  $\varnothing D$  bude vzrůstat s  $D_o^{2.5}$ , to znamená rychleji než je úměrnost s plochou ( $D_o^2$ ). Pro známou rychlost výtoku a průměr výpustného otvoru lze tedy navrhnout i kapacitu dopravního zařízení. Odvozené vztahy platí pro ustálený stav. Při otevření výpustného otvoru

bude okamžitá rychlost materiálu rovna nule a bude se postupně zvyšovat. V této fázi není pochopitelně výtoková rychlost konstantní.

Pro výpočet rychlosti výtoku materiálu ze zásobníku lze také použít další empirické vztahy ve tvaru např.:

$$v_{\text{výt}} = \sqrt{\frac{g \cdot R_{\text{Hv}}}{f}} \quad [\text{m/s}] \quad (17)$$

### 5.2.1. Výtoková rychlost

**Příčný průřez výpustného otvoru**

$$A_v = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,1^2 = 0,0314 \text{ m}^2 \quad (18)$$

**Kde:**

$$r = 0,1 \text{ m} \quad \text{dle návrhu výpustného otvoru}$$

**Vnitřní obvod výpustného otvoru**

$$O_v = \pi \cdot d = \pi \cdot 0,2 = 0,628 \text{ m} \quad (19)$$

**Kde:**

$$d = 0,2 \text{ m} \quad \text{dle návrhu výpustného otvoru}$$

**Hydraulický poloměr výpustného otvoru**

$$R_{\text{Hv}} = \frac{A_v}{O_v} = \frac{0,0314}{0,628} = 0,05 \text{ m} \quad (20)$$

**Kde:**

$$A_v = 0,0314 \text{ m}^2 \quad \text{dle rov. (18)}$$

$$O_v = 0,628 \text{ m} \quad \text{dle rov. (19)}$$

## Výtoková rychlost

$$v_{\text{výt}} = \sqrt{\frac{g \cdot R_{\text{Hv}}}{f}} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 0,05}{0,3}} = 1,28 \text{ ms}^{-1} \quad (21)$$

Kde:

$$R_{\text{Hv}} = 0,05 \text{ m}$$

$$f = 0,3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

dle rov. (20)

dle zadání

### 5.3. Uzavírací komponenty výpustného otvoru

#### Šoupátkové uzávěry

- ručně ovládané
- pneumaticky ovládané
- elektromotoricky ovládané

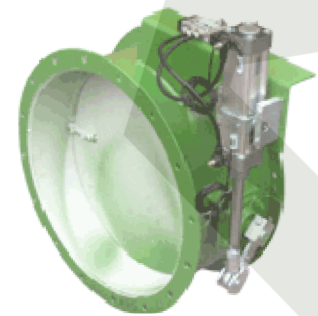


Obr. 5.1 Šoupátkové uzávěry dle [13]



### Uzavírací klapky

- ručně ovládané – jednopákové, dvoupákové
- pneumaticky ovládané
- elektromotoricky ovládané



Obr. 5.2 Uzavírací klapky dle [14]

### Dvoucestné klapky

- pneumaticky ovládané
- elektromotoricky ovládané

### Motýlové klapky

- vyznačují se robustní konstrukcí, jednoduchou a rychlou montáží a univerzálností pro montáž na různá hrdla sil dle [14].

- ručně ovládané
- pneumaticky ovládané
- elektromotoricky ovládané



Obr. 5.3 Motýlová klapka VFF



Obr. 5.4 Motýlová klapka VFS

### Kulové uzávěry

- kulový uzávěr VSS je určen pro uzavírání toku sypkých materiálů ze sil, zásobníků či dopravníků. Konstrukce těchto uzávěrů zabezpečuje volný tok materiálu při otevření ventilu a snadné otevření i při vysokém sloupci materiálu nad ventilem dle [14].

- ručně ovládané
- pneumaticky ovládané
- elektromotoricky ovládané



Obr. 5.5 Kulový uzávěr VSS

#### 5.4. Uzavírací komponenty plnicího potrubí

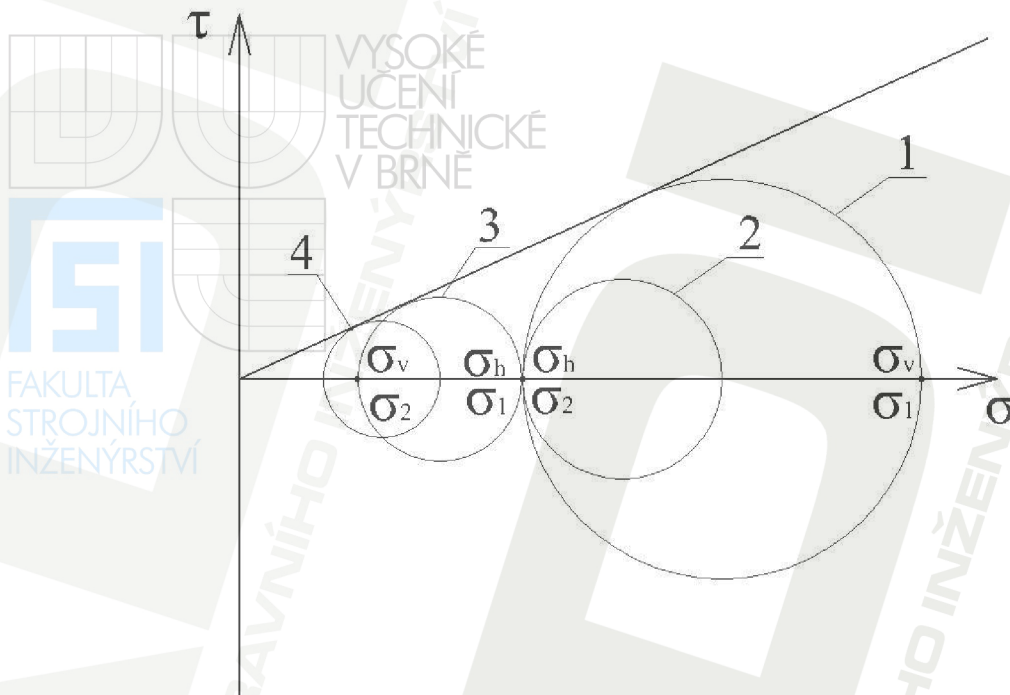


Obr. 5.6 Bajonetové přípojky plnicího potrubí dle [16]

#### 5.5. Tlaky na vertikální válcové stěny zásobníků při vyprazdňování

Zásobníky a sila se v minulosti stavěly podle Janssenových rovnic. Některé zásobníky vyhovovaly, avšak některé zásobníky havarovaly, tj. praskly. Proto se problémy stěnových tlaků začaly podrobněji zkoumat. Při proměřování stěnových tlaků se zjistilo, že u některých materiálů při výtoku se stěnové tlaky výrazně zvýší, někdy na dvoj až trojnásobek a že tyto tlaky výrazně pulzují (přetlak, podtlak), vznikají tak velmi silné tlakové rázy a hrozí nebezpečí vzniku klenby. Proto je na mnohých pracovištích ve světě zaměřen výzkum k objasnění těchto jevů.

Pomocí Janssenovy rovnice lze vystihnout stěnové tlaky při plnění zásobníku, když se za koeficient  $k$  bere koeficient bočního tlaku  $k_{BA} = \sigma_2/\sigma_1$  pro aktivní stav napětí. Aktivní stav vznikne, když Mohrovy kružnice se vytvářejí zvětšováním při mezním stavu napětí. Postupně, jak se sypký materiál plní do zásobníku, tlak sypké hmoty v nižších vrstvách roste a v důsledku toho se Mohrovy kružnice zvětšují obr. 5.13.



Obr. 5.13 Mohrovy kružnice

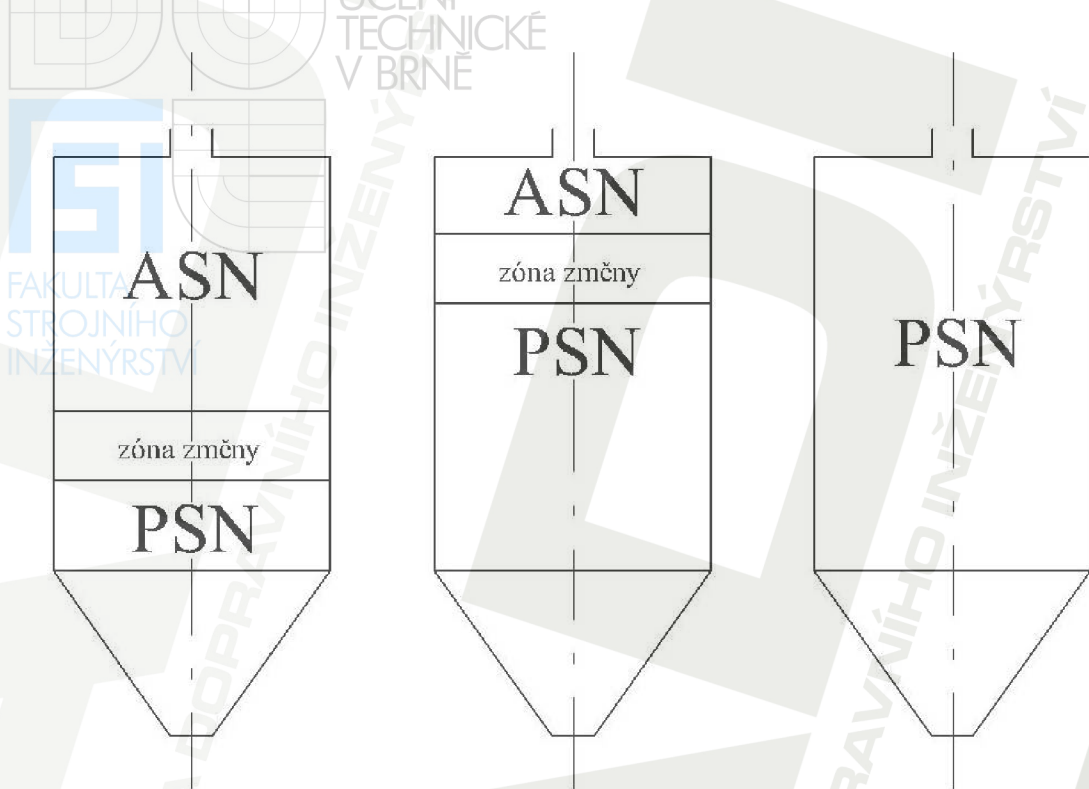
Po naplnění je napětí v sypkém materiálu nad výpustním otvorem dáno mezní Mohrovou kružnicí 1, kdy v ose zásobníku  $\sigma_v = \sigma_1$  a  $\sigma_H = \sigma_2$ . Při otevření výpustně začne klesat vertikální tlak nad výpustním otvorem a tím se zmenší Mohrova kružnice na pozici 2. Aby sypký materiál mohl vytékat musí být v mezním stavu. To se uskuteční tehdy, když vertikální tlak klesne tak, že napětí nad výpustním otvorem je dáno Mohrovou kružnicí 3, kdy  $\sigma_v = \sigma_2$ . Při tom  $\sigma_H$  zůstává konstantní a začne klesat teprve až  $\sigma_v$  ještě dále klesne jak je znázorněno Mohrovou kružnicí 4. Mohrovy kružnice 3 a 4 již odpovídají pasivnímu stavu napětí, neboť se vytvářejí zmenšováním Mohrovy kružnice. Postupně jak se sypký materiál v zásobníku od spodu dostává do pohybu, přeměňuje se aktivní stav napětí v pasivní stav v celém zásobníku. Pro pasivní stav napětí platí:

$$K_{BP} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (22)$$

V podstatě dojde ke změně hlavních napětí. S touto změnou se změní i hodnota součinitele aktivního tlaku  $k$  (převrácená hodnota). Mechanismus změny však neprobíhá tak, že by se aktivní stav měnil v pasivní plynule v celém zásobníku, ale pouze v tzv. zóně změny, která se však při vyprazdňování může velmi rychle posouvat od výpustného otvoru směrem vzhůru. V podstatě si lze učinit představu, že uvolněním materiálu ve výpustném otvoru dojde k fluorizaci určité vrstvy, o které však lze předpokládat, že její vlastnosti se budou blížit vlastnostem fiktivní kapaliny. Pro kapaliny však platí jiné tlakové zákonitosti než pro syké



hmoty, proto musí v zóně změny dojít ke zvýšení tlaku. Při pohybu zóny změny směrem vzhůru dochází k odpovídajícím změnám tlaku.



Obr. 5.14 Přechod z ASN na PSN

- pro zónu změny lze vypočítat silovou bilanci

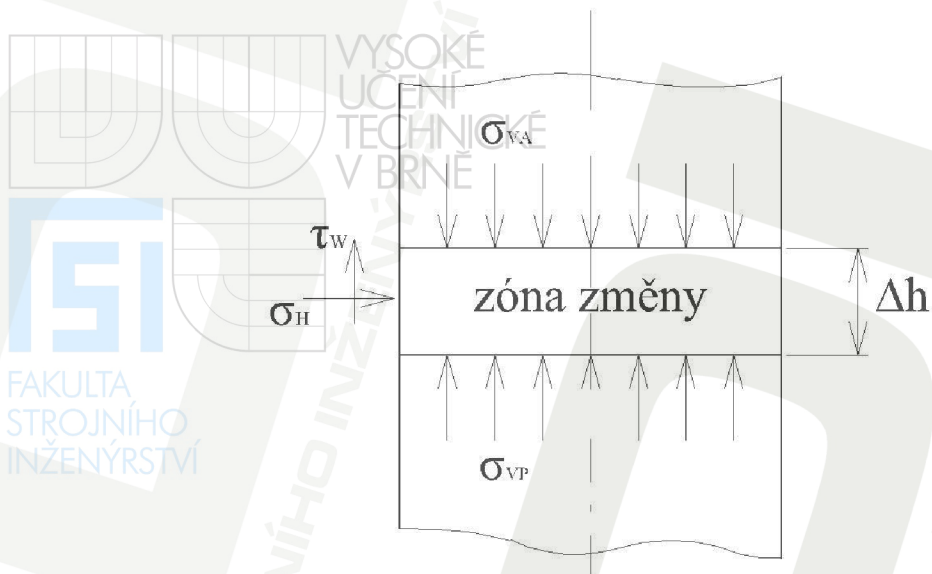
$$\sigma_{VA} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \Delta h \rho' g = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \sigma_{VP} + \pi D \Delta h \cdot \tau_w \quad (23)$$

- po úpravě

$$\sigma_{VA} + \Delta h \rho' g = \sigma_{VP} + \frac{4}{D} \Delta h \cdot \tau_w \quad (24)$$

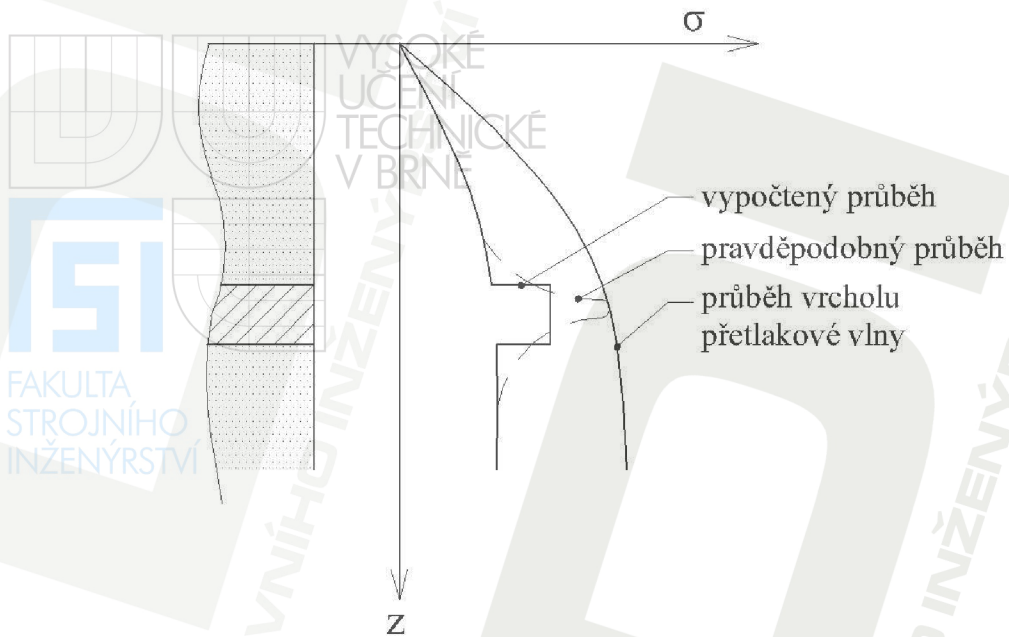
- pro smykové napětí na stěně platí  $\tau_w = f_w \cdot \sigma_H$  po dosazení dostáváme vztah

$$\sigma_H = \frac{D}{4 \cdot f_w} \left[ \frac{\sigma_{VA} - \sigma_{VP}}{\Delta h} + \rho' g \right] \quad (25)$$



Obr. 5.15 Zóna změny

Tato rovnice popisuje horizontální tlak v zóně změny. Pokud bychom měli k dispozici potřebné údaje a rovnici vyčíslili a stanovili její grafický průběh, našli bychom, že shora působící síly budou řádově vyšší než síly působící na zónu změny ze spodní části. Protože vlastnosti materiálu se nezmění  $f_w$  – zůstává konstantní, abychom zajistili rovnováhu, musí se významně zvýšit smykové napětí na stěnách a toho dosáhneme jen při zvýšení horizontálního napětí  $\sigma_H$ . Při pohybu zóny změny směrem nahoru proběhne celým zásobníkem tlaková vlna, tyto tlaky jsou statické a v zásobníku budou působit i když vyprazdňování materiálu přeručíme. Může nastat i opačná situace, kdy v zásobníku se přemění pasivní stav napjatosti na aktivní stav napjatosti. Při této situaci vertikální tlak klesá až na nulovou hodnotu, ale horizontální tlak má stále velmi vysokou hodnotu. V zásobníku pak dochází k situaci při které vzniká tzv. fiktivní klenba. Tuto situaci lze matematicky vyjádřit za zjednodušujících podmínek, kdy zásobníkem proběhne vlna menších tlaků, než které byly vypočteny pomocí Janssenovy teorie. I tyto hodnoty podtlaků mají charakter tlaků statických, při přerušení vyprazdňování stále působí. Je známo, že hodnoty tlakových vln přesahují hodnoty vypočtené podle Janssenovy teorie dle lit. [1] a [4].



Obr. 5.16 Tlaková vlna

V zásobníku mohou také vznikat dynamické tlaky, např. vznikají tzv. dynamické (nestabilní) klenby, které se vytvářejí a opět hroučí. Tento jev lze jen těžko předvídat, ale pro praktické účely je možno počítat s tím, že stěnové přetlaky běžně mohou dosahovat až dvojnásobných hodnot Janssenova aktivního stěnového tlaku a maxima pulzů mohou dosahovat až trojnásobku aktivního Janssenova stěnového tlaku. Tento jev potlačujeme zvýšením bezpečnosti, pokud je zásobník správně navržen a materiál nemění po dobu skladování vlastnosti, neměly by tyto jevy nastat.

## 6. Výpočet zásobníku

### 6.1. Výpočet hlavních rozměrů



FAKULTA  
STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

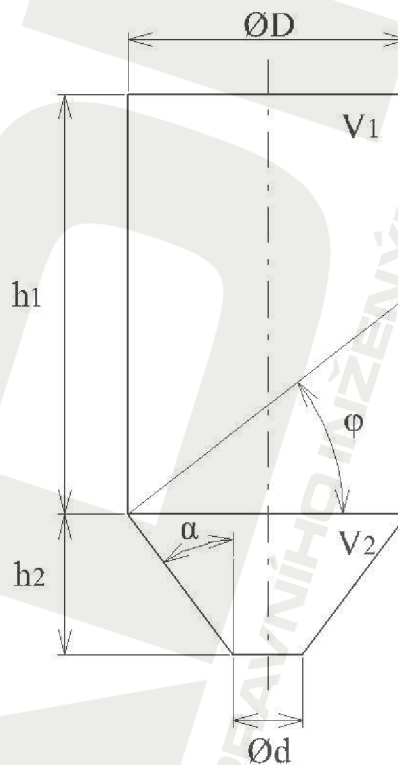
$$\varnothing D = 2,5 \text{ m}$$

$$\varnothing d = 0,2 \text{ m}$$

$$h_1 = 6,5 \text{ m}$$

$$h_2 = 2,36 \text{ m}$$

$$\alpha = 26^\circ$$



Obr. 6.1 Hlavní rozměry zásobníku

#### 6.1.1. Výpočet sypného úhlu

$$f = \operatorname{tg} \varphi$$

(26)

$$\varphi = \operatorname{arctg} f = \operatorname{arctg} 0,34 = 18,77^\circ$$

Kde:

$$f = 0,34$$

dle zadání

#### 6.1.2. Výpočet úhlu sklonu kuželové výsypky

- doporučený úhel sklonu stěny  $\alpha = \varphi + (5^\circ \div 10^\circ)$

(27)

$$\alpha = \varphi + (5^\circ \div 10^\circ) = 18,77 + (5^\circ \div 10^\circ) = 23,77^\circ \div 28,77^\circ \quad - \text{volím } \alpha = 26^\circ$$

Kde:

$$\varphi = 18,77^\circ$$

dle rov. (26)



### 6.1.3. Výpočet výšky hlavní komory



Obr. 6.2 Výška hlavní komory

#### Výška sypaného kužele

$$h_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{3} \cdot \frac{2,5}{2} \cdot \operatorname{tg} 18,77^\circ = 0,142 \text{ m} \quad (28)$$

#### Kde:

$$D = 2,5 \text{ m}$$

dle návrhu

$$\varphi = 18,77^\circ$$

dle rov. (26)

- pokud je materiál do zásobníku volně nasypán, vytvoří se na povrchu sypaný kužel, který v podstatě zvýší výšku náplně.

#### Teoretická výška hlavní komory

$$l = 6,278 \text{ m} \quad (29)$$

- teoretická výška hlavní komory, při kterém bude splněn požadovaný objem zásobníku, není zde zohledněn sypaný kužel

#### Konstrukční rezerva

$$h_r = 0,08 \text{ m} \quad (30)$$

### Výška hlavní komory

$$h_1 = h_v + l + h_r = 0,142 + 6,278 + 0,08 \approx 6,5 \text{ m} \quad (31)$$

Kde:

$$h_v = 0,142 \text{ m}$$

dle rov. (28)

$$l = 6,278 \text{ m}$$

dle rov. (29)

$$h_r = 0,08 \text{ m}$$

dle rov. (30)

### 6.1.4. Výpočet výšky kuželové výsypky

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{D-d}{2}}{h_2} \Rightarrow h_2 = \frac{\frac{D-d}{2}}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\frac{2,5-0,2}{2}}{\operatorname{tg} 26^\circ} = 2,36 \text{ m} \quad (32)$$

Kde:

$$D = 2,5 \text{ m}$$

dle návrhu

$$d = 1,25 \text{ m}$$

dle návrhu

$$\alpha = 26^\circ$$

dle rov. (27)

## 6.2. Výpočet objemu zásobníku

### 6.2.1. Výpočet objemu hlavní komory

$$V_1 = \pi \cdot R^2 \cdot h_1 = \pi \cdot 1,25^2 \cdot 6,5 = 31,90 \text{ m}^3 \quad (33)$$

Kde:

$$R = 1,25 \text{ m}$$

dle návrhu

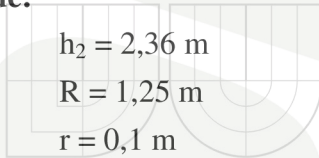
$$h_1 = 6,5 \text{ m}$$

dle návrhu

### 6.2.2. Výpočet objemu kuželové výsypky

$$V_2 = \frac{\pi \cdot h_2}{3} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2) = \frac{\pi \cdot 2,36}{3} \cdot (1,25^2 + 1,25 \cdot 0,1 + 0,1^2) = 4,195 \text{ m}^3 \quad (34)$$

Kde:



$$h_2 = 2,36 \text{ m}$$

dle rov. (32)

$$R = 1,25 \text{ m}$$

dle návrhu

$$r = 0,1 \text{ m}$$

dle návrhu

### 6.2.3. Celkový objem zásobníku

$$V_c = V_1 + V_2 = 31,90 + 4,195 = 36,095 \text{ m}^3$$

(35)

Kde:

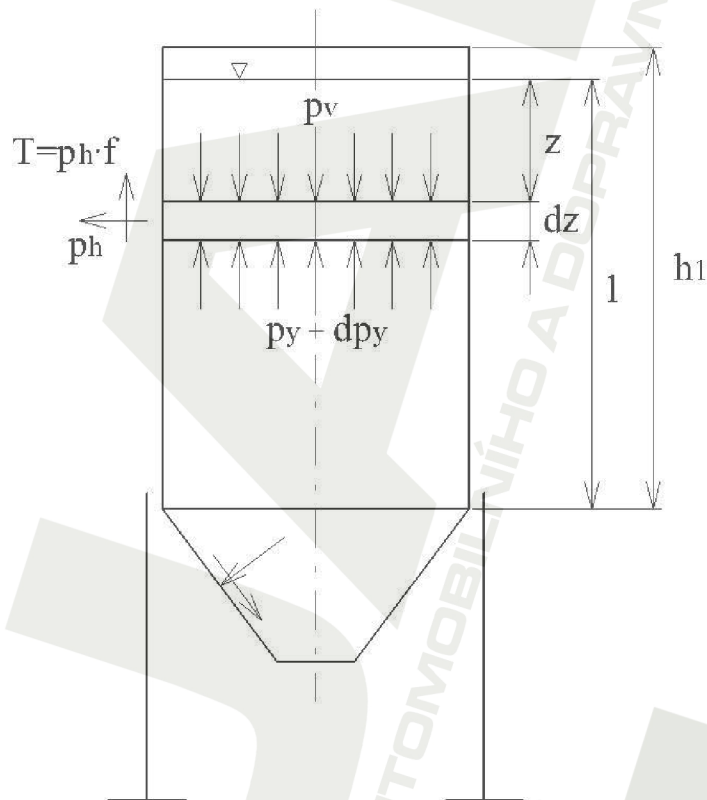
$$V_1 = 31,90 \text{ m}^3$$

dle rov. (33)

$$V_2 = 4,195 \text{ m}^3$$

dle rov. (34)

### 6.3. Tlakové poměry v hlubinných silech



Obr. 6.3 Tlakové poměry

Rovnováha sil na element v hloubce bude:

$$p_v \cdot A \cdot A dz \cdot \rho \cdot g = (p_v + dp_v) \cdot A + O \cdot dz p_H \cdot f$$

(36)

**Kde:**

A – příčný průřez zásobníku

O – vnitřní obvod pláště

f – součinitel tření mezi materiálem a stěnou zásobníku

$\rho'$  – sypná objemová hmotnost

g – gravitační zrychlení

$p_v$  – vertikální tlak

$p_h$  – horizontální tlak

z – vzdálenost od horního okraje

- pro další řešení zavedeme předpoklady:

- objemová tíha náplně bude konstantní po celé hloubce zásobníku

- součinitel aktivního tlaku  $k = \text{konst.}$  což je splněno za předpokladu  $\varphi = \text{konst.}$  pro celý objem náplně zásobníku

- horizontální napětí je v celém průřezu konstantní

- na stěně zásobníku je právě mezní stav napjatosti

- pro zavedené předpoklady platí:

$$p_H = p_v \cdot k = \gamma \cdot z \cdot k \quad (37)$$

- po úpravě

$$p_v \cdot dz \cdot \gamma = (p_v + dp_v) \cdot k \cdot p_v \frac{O}{A} dz \cdot f \quad (38)$$

- za výrazy  $\frac{A}{O}$  zavedeme hydraulický poloměr

$$\frac{A}{f \cdot O \cdot k} = \frac{R_H}{f \cdot k} = a \quad (39)$$

$$p_v + dz \cdot \gamma = p_v + dp_v + \frac{dz \cdot p_v}{a} \quad (40)$$

- separací proměnných dostaneme

$$dz = \frac{a}{a \cdot \gamma - p_v} \cdot dp_v \quad (41)$$

- řešení je možné nalézt ve tvaru

$$z = -a \cdot \ln(\gamma \cdot a - p_v) + c \quad (42)$$

- pro partikulární řešení je nutno zavést okrajové podmínky, platí pro  $z = 0$ ,  $p_v = 0$

$$z = -a \cdot \ln(\gamma \cdot a - p_v) + \ln \gamma \cdot a \quad (43)$$

- další úpravou dostaneme

$$p_v = \gamma \cdot a \left( 1 - e^{-\frac{z}{a}} \right) \quad (44)$$

#### Vertikální tlak

$$p_v = \frac{\gamma \cdot R_H}{f \cdot k} \left( 1 - e^{-\frac{z}{a}} \right) = \frac{\gamma \cdot R_H}{f \cdot k} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{-z \cdot f \cdot k}{R_H}} \right) \quad (45)$$

#### Horizontální tlak

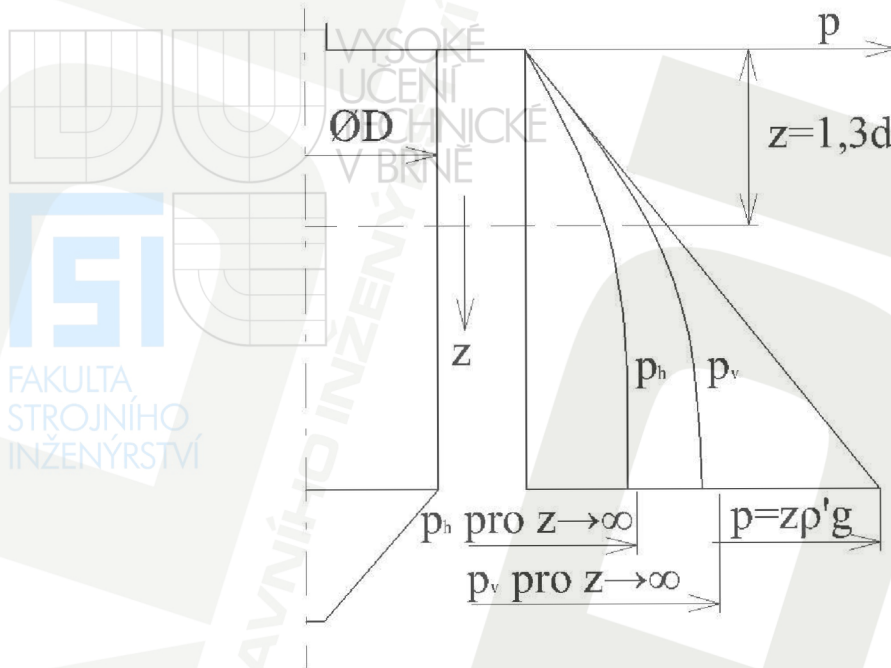
$$p_H = p_v \cdot k = \frac{\gamma \cdot R_H}{f} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{-z \cdot f \cdot k}{R_H}} \right) \quad (46)$$

Poslední dvě uvedené rovnice umožňují vypočítat hodnoty tlaků  $p_v$  a  $p_H$  pro libovolnou hloubku. Z rovnice je také zřejmé, že se tlak bude asymptoticky blížit určité mezní hodnotě, které bude dosaženo  $z \rightarrow \infty$  pak platí:

$$p_v = \frac{\gamma \cdot R_H}{f \cdot k} = \text{konst} \quad (47)$$

$$p_H = \frac{\gamma \cdot R_H}{f} = \text{konst} \quad (48)$$





Obr. 6.4 Průběh tlaků v zásobníku

#### Příčný průřez komory zásobníku

$$A = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 1,25^2 = 4,91 \text{ m}^2 \quad (49)$$

Kde:

$$R = 1,25 \text{ m} \quad \text{dle návrhu}$$

#### Vnitřní obvod komory zásobníku

$$O = \pi \cdot D = \pi \cdot 2,5 = 7,85 \text{ m} \quad (50)$$

Kde:

$$D = 2,5 \text{ m} \quad \text{dle návrhu}$$

#### Hydraulický poloměr

$$R_H = \frac{A}{O} = \frac{4,91}{7,85} = 0,625 \text{ m} \quad (51)$$

Kde:

$$A = 4,91 \text{ m}^2 \quad \text{dle rov. (49)}$$

$$O = 7,85 \text{ m} \quad \text{dle rov. (50)}$$

### Součinitel aktivního tlaku

$$k = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} = \frac{1 - \left(\cos\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{1 + \left(\cos\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{18,77}{2}\right) = 0,513 \quad (52)$$

Kde:

$$\varphi = 18,77^\circ$$

dle rov (26)

### Objemová tíha náplně

$$\gamma = \rho' \cdot g = 600 \cdot 9,81 = 5886 \text{ Nm}^3 \quad (53)$$

Kde:

$$\rho' = 600 \text{ kg/m}^3$$

dle zadání

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

### Vertikální tlak

$$p_v = \frac{\gamma \cdot R_H}{f \cdot k} \left(1 - e^{-\frac{z}{a}}\right) = \frac{\gamma \cdot R_H}{f \cdot k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-z \cdot f \cdot k}{R_H}}\right) = \quad (54)$$
$$= \frac{5886 \cdot 0,625}{0,3 \cdot 0,513} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-6,5 \cdot 0,3 \cdot 0,513}{0,625}}\right) = 19080,18 \text{ Pa}$$

Kde:

$$\gamma = 5886 \text{ N/m}^3 \quad \text{dle rov. (53)}$$

$$R_H = 0,625 \text{ m} \quad \text{dle rov. (51)}$$

$$f = 0,3 \quad \text{dle zadání}$$

$$k = 0,513 \quad \text{dle rov. (52)}$$

$$z = h_1 = 6,5 \text{ m} \quad \text{dle rov. (31)}$$

### Horizontální tlak

$$p_H = p_v \cdot k = \frac{\gamma \cdot R_H}{f} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-z \cdot f \cdot k}{R_H}}\right) = \frac{5886 \cdot 0,625}{0,3} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-6,5 \cdot 0,3 \cdot 0,513}{0,625}}\right) = 9788,13 \text{ Pa} \quad (55)$$

Kde:

$$\gamma = 5886 \text{ N.m}^3$$

dle rov. (53)

$$R_H = 0,625 \text{ m}$$

dle rov. (51)

$$f = 0,3$$

dle zadání

$$z = h_1 = 6,5 \text{ m}$$

dle rov. (31)

**Tlaky na kuželové výsypce**

**-normálový tlak**

$$\begin{aligned} p_N &= \frac{p_H + p_V}{2} + \frac{p_V - p_H}{2} \cos 2 \cdot \beta = \\ &= \frac{9788,13 + 19080,18}{2} + \frac{19080,18 - 9788,13}{2} \cos 2 \cdot 64^\circ = 11577 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (56)$$

**- tečný tlak**

$$p_T = \frac{p_H + p_V}{2} \sin 2\beta = \frac{9788,13 + 19080,18}{2} \sin 2 \cdot 64^\circ = 11374,27 \text{ Pa} \quad (57)$$

Kde:

$$p_V = 19080,18 \text{ Pa}$$

dle rov. (54)

$$p_H = 9788,13 \text{ Pa}$$

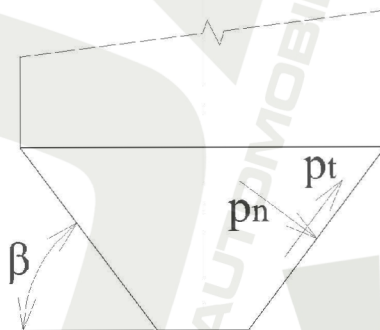
dle rov. (55)

$$\beta = 64^\circ$$

dle rov. ( $\beta = 90 - \alpha$ )

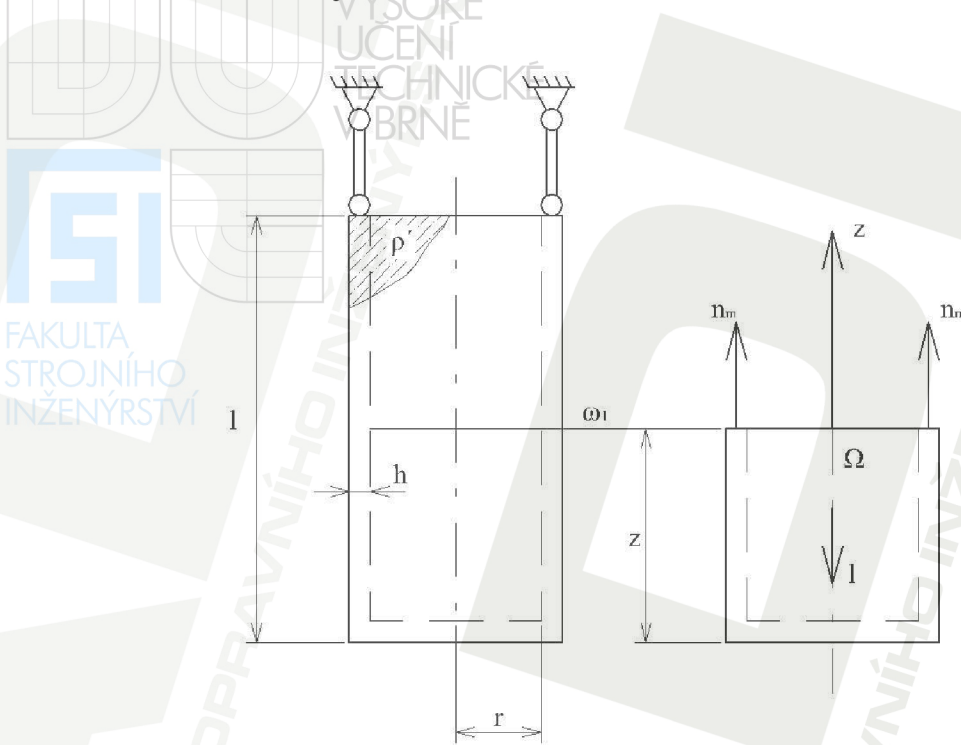
$$\alpha = 26^\circ$$

dle rov. (27)



Obr. 6.5 Tlaky na kuželové výsypce

## 6.4. Tloušťka stěny zásobníku



Obr. 6.6 Skořepina

### Obvodové napětí $\sigma_t$

$$\frac{p_H(z)}{h} = \frac{\sigma_m(z)}{r_m(z)} + \frac{\sigma_t(z)}{r_t(z)} \quad \text{Laplaceova rovnice} \quad (58)$$

Pro válcovou skořepinu je  $r_m = \infty$ , takže v Laplaceově rovnici (58) platí  $\frac{\sigma_m}{r_m} = 0$  a tuto rovnici lze přímo použít pro určení  $\sigma_t$  dle lit. [8] a [9].

$$\sigma_t = p_H \cdot \frac{r_t}{h} \quad (59)$$

### Meridiánové napětí $\sigma_m$

- stanovíme u podmínky rovnováhy sil prvku  $\Omega_1$  dle lit. [8] a [9].

$$\sum F_z = 0: \eta_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot r - F_z = 0 \Rightarrow \sigma_m \cdot h \cdot 2 \cdot \pi \cdot r - F_z = 0 \quad (60)$$

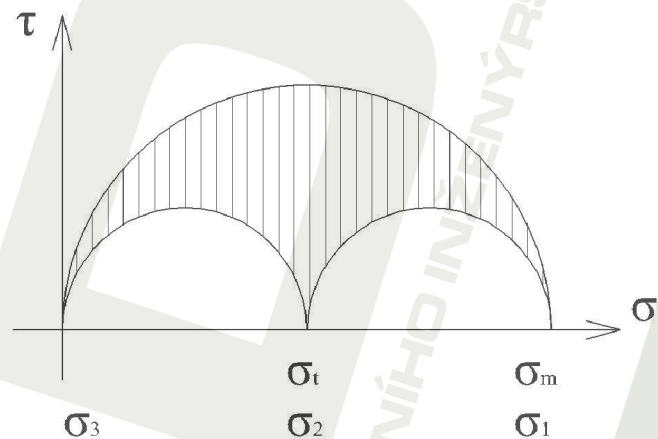
$$\sigma_m = \frac{F_z}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} \quad (61)$$

Kde  $F_z$  je zatížení prvku  $Q1$  ve směru osy z (hmotnosti pláště skořepiny a náplně) v dostatečné vzdálenosti ode dna a od horního okraje vzniká rovinná napjatost obr. 6.7.

$$\sigma_{red} = \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_m - \sigma_t \quad (62)$$

$$\sigma_{red} \leq \sigma_D \quad (63)$$

$$\sigma_D = \frac{\sigma_k}{k_k} \quad (64)$$



Obr. 6.7 Rovinná napjatost

- dosazení do rovnice (62), rov. (61) a rov.(59)

$$\sigma_{red} = \frac{F_z}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} - p_H \cdot \frac{r_t}{h} \quad (65)$$

- po úpravě

$$\sigma_{red} = \frac{F_z - 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot p_H}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} \quad (66)$$

- dosazení do rovnice (63), rov. (64) a rov. (66)

$$\frac{\sigma_k}{k_k} \geq \frac{F_z - 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot p_H}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h} \quad (67)$$

- vyjádření h z rov. (67)

$$\sigma_k \cdot 2\pi r h \geq (F_z - 2\pi r^2 \cdot p_H) \cdot k_k \quad (68)$$



$$h \geq \frac{(F_z - 2\pi r^2 \cdot p_H) \cdot k_k}{\sigma_k \cdot 2\pi r} \quad (69)$$

#### 6.4.1. Výpočet sil zatěžující zásobník

Síla od hmotnosti pláště zásobníku  $F_{pl}$

$$F_{pl} = \pi \cdot (R_{pl}^2 - R^2) \cdot z \cdot \rho_{oc} \cdot g = \pi \cdot (1,255^2 - 1,25^2) \cdot 6,5 \cdot 7850 \cdot 9,81 = 23644,72 \text{ N} \quad (70)$$

Kde:

$R_{pl} = 1,255 \text{ m}$	dle návrhu
$R = 1,25 \text{ m}$	dle návrhu
$z = h_1 = 6,5 \text{ m}$	dle rov. (31)
$\rho_{oc} = 7850 \text{ kg/m}^3$	
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	

Síla od hmotnosti náplně zásobníku  $F_{náp}$

$$F_{náp} = \rho' \cdot V \cdot g = 600 \cdot 35 \cdot 9,81 = 206010 \text{ N} \quad (71)$$

Kde:

$\rho' = 600 \text{ kg/m}^3$	dle zadání
$V = 35 \text{ m}^3$	dle zadání
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	

Síla od působení tlaku  $p_v$  v zásobníku  $F_{pv}$

$$F_{pv} = p_v \cdot \pi \cdot R^2 = 19080,18 \cdot \pi \cdot 1,25^2 = 93659,59 \text{ N} \quad (72)$$

Kde:

$p_v = 19080,18 \text{ Pa}$	dle rov. (54)
$R = 1,25 \text{ m}$	dle návrhu

Výpočet síly  $F_z$

$$F_z = F_{pl} + F_{náp} + F_{pv} = 19696 + 206010 + 93659,59 = 319365,66 \text{ N} \quad (73)$$

Kde:

$$F_{pl} = 19696 \text{ N} \quad \text{dle rov. (70)}$$

$$F_{náp} = 206010 \text{ N} \quad \text{dle rov. (71)}$$

$$F_{pv} = 93659,9 \text{ N} \quad \text{dle rov. (72)}$$

#### 6.4.2. Tloušťka stěny

$$h \geq \frac{(F_z - 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot p_H) \cdot k_k}{\sigma_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{(319365,66 - 2 \cdot \pi \cdot 1,25^2 \cdot 9788,13) \cdot 2}{345 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1,25} = 1,647 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cong 0,17 \text{ mm} \quad (74)$$

Kde:

$$F_z = 319365,66 \text{ N} \quad \text{dle rov. (73)}$$

$$R = 1,25 \text{ m} \quad \text{dle návrhu}$$

$$p_H = 9788,13 \text{ Pa} \quad \text{dle rov. (55)}$$

$$k_k = 2$$

$$\sigma_k = 345 \text{ MPa} \quad \text{dle materiálu 11 523}$$

Volím 5 mm – zvýší se tak několikanásobně bezpečnost, ale tím zásobník bude odolávat dynamickým rázům při vyprazdňování.

#### 6.5. Kontrolní výpočet vzpěrné stability nohy

Parametry nohy zásobníku:

$$D_t = 133 \text{ mm}$$

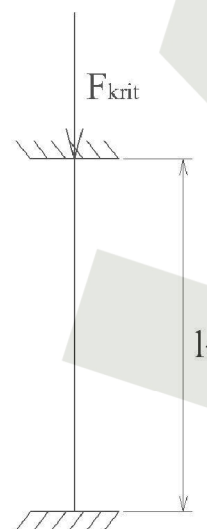
$$d_t = 123 \text{ mm}$$

$$l_t = 3600 \text{ mm}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

Materiál 11 353

$$\sigma_k = 235 \text{ Mpa}$$



Obr. 6.8 Schéma nohy zásobníku

### Kvadratický moment

$$J_{\min} = \frac{\pi}{64} \cdot (D_t^4 - d_t^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (133^4 - 123^4) = 4124031,51 \text{ mm}^4 \quad (75)$$

Kde:

$$D_t = 133 \text{ mm}$$

dle návrhu

$$d_t = 123 \text{ mm}$$

dle návrhu

### Průřez nohy zásobníku

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_t^2 - d_t^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (133^2 - 123^2) = 2010,62 \text{ mm}^2 \quad (76)$$

Kde:

$$D_t = 133 \text{ mm}$$

dle návrhu

$$d_t = 123 \text{ mm}$$

dle návrhu

### Kritická síla při které dojde ke ztrátě stability

$$F_{\text{krit}} = \frac{\alpha^2 \cdot J_{\min} \cdot E}{l_t^2} = \frac{\pi^2}{2^2} \cdot \frac{4124031,51 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{3600^2} = 164883,05 \text{ N} \quad (77)$$

Kde:

$$J_{\min} = 4124031,51 \text{ mm}^4 \quad \text{dle rov. (75)}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$l_t = 3600 \text{ mm} \quad \text{dle návrhu}$$

### Poloměr kvadratického momentu

$$i = \sqrt{\frac{J_{\min}}{S}} = \sqrt{\frac{4124031,51}{2010,62}} = 45,29 \text{ mm} \quad (78)$$

Kde:

$$J_{\min} = 4124031,51 \text{ mm}^4 \quad \text{dle rov. (75)}$$

$$S = 2010,62 \text{ mm}^2 \quad \text{dle rov. (76)}$$

### Štíhlost prutu

$$\lambda = \frac{l_t}{i} = \frac{3600}{45,29} = 79,48$$

Kde:

$$l_t = 3600 \text{ mm}$$

$$i = 45,29 \text{ mm}$$

dle návrhu  
dle rov. (78)

### Kritická štíhlost

$$\lambda_{\text{krit}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{230}} = 46,96 \quad (78)$$

Kde:

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_k = 230 \text{ MPa}$$

dle materiálu 11 353

### Podmínka bezpečnosti

$$\lambda \geq \lambda_k \quad 79,48 \geq 46,96 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (79)$$

Kde:

$$\lambda = 79,48$$

dle rov. (77)

$$\lambda_k = 46,96$$

dle rov. (78)

### Celková síla od hmotnosti zásobníku včetně náplně a příslušenství

$$F_{\text{zás}} = F_{\text{náp}} + F_{\text{pl}} + F_{\text{př}} = 206010 + 19696 + 10000 = 235706 \text{ N} \quad (80)$$

Kde:

$$F_{\text{náp}} = 206010 \text{ N}$$

dle rov. (71)

$$F_{\text{pl}} = 19696 \text{ N}$$

dle rov. (70)

$$F_{\text{př}} = 10000 \text{ N}$$

dle návrhu

Síla působící na jednu nohu

$$F_{\text{Inohy}} = \frac{F_{\text{zás}}}{4} = \frac{235706}{4} = 58926,5 \text{ N} \quad (81)$$

Kde:

$$F_{\text{zás}} = 235706 \text{ N} \quad \text{dle rov. (80)}$$

Bezpečnost

$$k_k = \frac{F_{\text{krit}}}{F_{\text{Inohy}}} = \frac{164883,05}{58926,5} = 2,8 \quad (82)$$

Kde:

$$F_{\text{krit}} = 164883,05 \text{ N} \quad \text{dle rov. (77)}$$

$$F_{\text{Inohy}} = 58926,5 \text{ N} \quad \text{dle rov. (81)}$$

## 6.6. Kontrola svarových spojů

- dle lit. [11]

### 6.6.1. Kontrola svarů závěsných ok

Tyto oka slouží k manipulaci se zásobníkem, přivařena jsou koutovým svarem.

- materiál 11373
- dovolené napětí 91 MPa
- převodní součinitel tvarového spoje  $\alpha_{tII} = 0,65$
- hmotnost prázdného zásobníku 3364 kg

$$F_{\text{pZ}} = m_{\text{pZ}} \cdot g = 3364 \cdot 9,81 = 33000,84 \text{ N} \quad (83)$$

$$\tau = \frac{F_{\text{pZ}}}{2 \cdot s \cdot (b - 2s)} = \frac{33000,84}{2 \cdot 3,5 \cdot (320 - 2 \cdot 3,5)} = 15,06 \text{ MPa} \quad (84)$$

$$\tau_{\text{sv}} = 0,65 \cdot \tau_D = 0,65 \cdot 91 = 59,15 \text{ MPa} \quad (85)$$

$$\tau \leq \tau_{\text{sv}}$$



$$15,06 \text{ MPa} \leq 59,15 \text{ MPa} \quad (86)$$

**Kontrola svaru vyhovuje,** je zde počítáno se zatížením na jedno závěsné oko, ale při manipulaci se zásobníkem slouží čtyři závěsná oka, do kterých se napětí rozloží.

### 6.6.2. Kontrola svarů mezi kuželovou výsypkou a hlavní komorou

Hlavní části zásobníku (kuželová výsypka a hlavní komora) jsou přivařena koutovým obvodovým svarem.

- materiál 11523
- dovolené napětí 146 MPa
- převodní součinitel tvarového spoje  $\alpha_{\perp} = 0,85$
- hmotnost prázdného zásobníku 3364 kg
- hmotnost náplně zásobníku 20610 kg

$$F_{PZ+Náp} = (m_{PZ} + m_{Náp}) \cdot g = (3364 + 20610) \cdot 9,81 = 235184,94 \text{ N} \quad (87)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{PZ+Náp}}{s \cdot (\pi D - 2s)} = \frac{235184,94}{3,5 \cdot (\pi \cdot 2500 - 2 \cdot 3,5)} = 8,56 \text{ MPa} \quad (88)$$

$$\sigma_{\perp sv} = 0,65 \cdot \sigma_{\perp D} = 0,85 \cdot 146 = 124,1 \text{ MPa} \quad (89)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\perp} &\leq \sigma_{\perp sv} \\ 8,56 \text{ MPa} &\leq 124,1 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (90)$$

**Kontrola svaru vyhovuje.**

### 6.6.3. Kontrola svarů mezi nohou a zásobníkem

Jedná se o koutový obvodový svar, který spojuje nohy zásobníku se zásobníkem.

- materiál 11373
- dovolené napětí 91 MPa
- převodní součinitel tvarového spoje  $\alpha_{\perp} = 0,85$
- hmotnost prázdného zásobníku 3364 kg
- hmotnost náplně zásobníku 20610 kg

$$F_{PZ+Náp} = (m_{PZ} + m_{Náp}) \cdot g = (3364 + 20610) \cdot 9,81 = 235184,94 \text{ N} \quad (91)$$

$$F_1 = \frac{F_{PZ+Náp}}{4} = \frac{235184,94}{4} = 58796,24 \text{ N} \quad (92)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_1}{s \cdot (\pi \cdot D_t - 2s)} = \frac{58796,24}{3,5 \cdot (\pi \cdot 133 - 2 \cdot 3,5)} = 40,89 \text{ MPa} \quad (93)$$

$$\sigma_{\perp sv} = 0,85 \cdot \sigma_{\perp D} = 0,85 \cdot 91 = 78,26 \text{ MPa} \quad (94)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \sigma_{\perp sv} \\ 40,89 \text{ MPa} \leq 78,26 \text{ MPa} \quad (95)$$

**Kontrola svaru vyhovuje.**

#### 6.6.4. Kontrola svarů pláště zásobníku

Jedná se o svar typu „I“ s převýšením, který spojuje jednotlivé části hlavní komory zásobníku.

- materiál 11523
- dovolené napětí 146 MPa
- převodní součinitel tvarového spoje  $\alpha_{\perp} = 0,85$
- napětí rovnoběžné se směrem svaru  $\sigma_{\parallel} = 19,08 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$
- napětí kolmé na směr svaru  $\sigma_{\perp} = 9,79 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$

$$\sigma_D = 146 \text{ MPa} \quad (96)$$

$$\sigma_{\parallel} \leq \sigma_D \\ 19,08 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \leq 146 \text{ MPa} \quad (97)$$

**Kontrola svaru vyhovuje.**

$$\sigma_{\perp sv} = 0,65 \cdot \sigma_{\perp D} = 0,85 \cdot 146 = 124,1 \text{ MPa} \quad (98)$$



VYSOKÉ  
UCENÍ  
TECHNICKÉ  
V BRNĚ

$$\sigma_{\perp} \leq \sigma_{\perp sv}$$

$$9,79 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \leq 124,1 \text{ MPa}$$

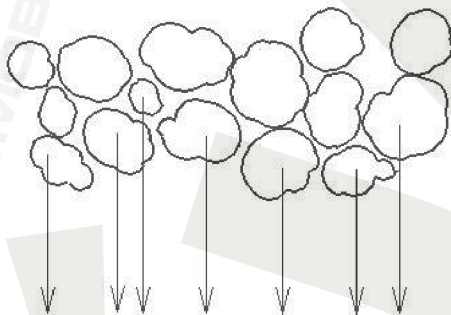
(99)

Kontrola svaru vyhovuje.

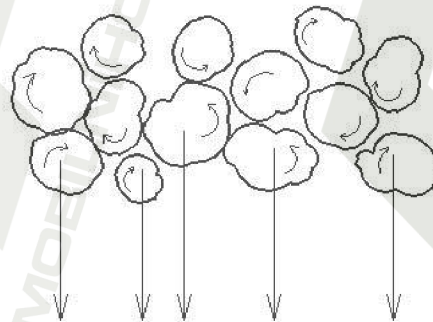
## 7. Kinematika toku materiálu při vyprazdňování zásobníku

Při vyprazdňování zásobníku dochází současně ke dvěma základním pohybům materiálu dle lit. [1]

- **primární pohyb materiálu**, jednotlivá zrna se pohybují dolů ve směru svislé osy zásobníku působením gravitační síly a nemění směr pohybu (do stran). Dochází zde k nakypření materiálu, zvětší se mezerovitost a dochází ke zlepšení toku materiálu v zásobníku obr. 7.1.
- **sekundární pohyb materiálu**, zrna při postupném pohybu dolů ve směru svislé osy mají ještě svůj vlastní pohyb, kdy se otáčejí, překlápají a nebo vychylují ze svého směru. Tento pohyb je charakteristický tím, že sousedící zrna, i když se ovlivňují, tak konají sekundární pohyb navzájem odlišný. Tento pohyb vede k tomu, že se v materiálu může změnit mezerovitost a to jak ke zvětšení, tak i ke zmenšení obr. 7.2.



Obr.7.1 Primární pohyb materiálu



Obr. 7.2 Sekundární pohyb materiálu

Zrna kusovitého materiálu konají převážně pohyb primární, zrna sypkého materiálu konají oba pohyby, tedy jak primární tak i sekundární, zvláště pak v místech výsycky zásobníku. Sekundární pohyb sypkého materiálu pak umožňuje plynulý tok zrn v zásobníku i výsycky, i když se zde podstatně redukuje tok materiálu zúžením průtočného průřezu.

Při primárním i sekundárním pohybu zrn se vlivem sekundárního pohybu mění i rychlost primárního pohybu v daném směru. Při úplném vyprazdňování zásobníku se pak mění rychlost i směr primárního pohybu i vlivem zešikmení stěn výsypky. Jestliže částice skladovaného materiálu v zásobníku přestanou mít možnost sekundárního pohybu (např. vlivem vlhkosti, lepivosti), ustane výtok materiálu ze zásobníku a nad výpustným otvorem se vytvoří vzpěrná klenba.

Kinematika primárního toku materiálu v zásobníku – v průmyslových odvětvích se neustále zvyšuje využití zásobníku a hlubokých sil. Přesto se v praxi stále využívá zásobníků, které nejsou dobře navrhnuté a při jejich provozování dochází ke značným potížím, zvláště při otevření výpustného otvoru, kde nedochází k plynulému toku materiálu a nad výpustným otvorem se vytváří klenba, případně kanály, které úplně znemožní výtok materiálu a je velmi obtížné po té obnovit jejich provoz.

Podle typu toku materiálu dělíme zásobníky na:

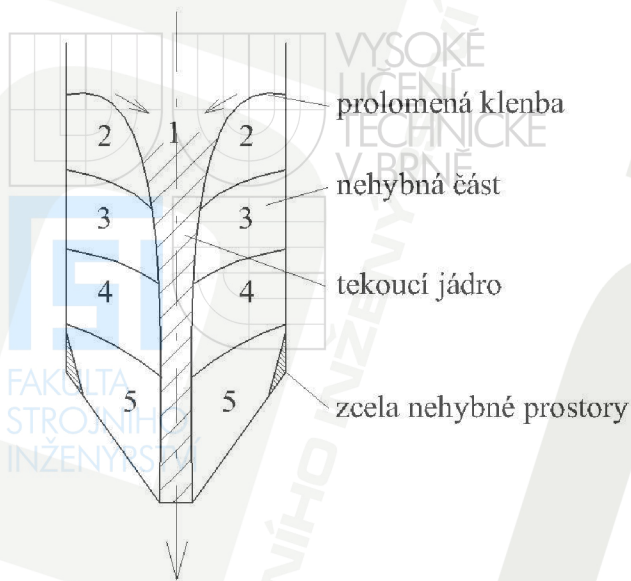
- zásobníky s jádrovým tokem
- zásobníky s hmotovým (objemovým) tokem
- zásobníky s kombinovaným tokem

### 7.1. Zásobníky s jádrovým tokem

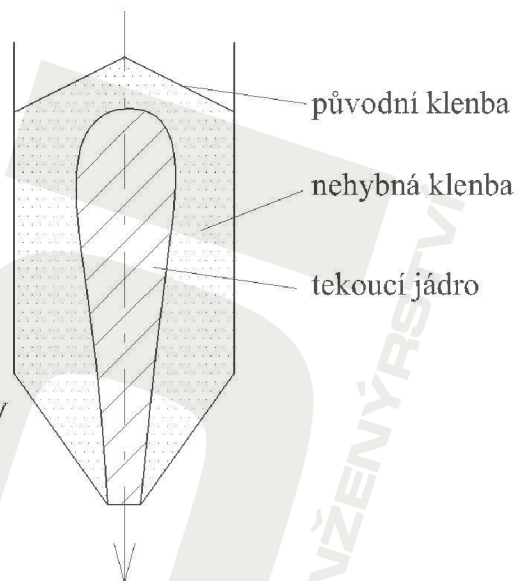
U těchto zásobníků dochází k toku pouze v jádru, přičemž materiál vně jádra je nehybný. Částička, která se nachází vně jádra se uvede do pohybu teprve až se k ní přiblíží hladina, kdy sklouzne po povrchu do středu zásobníku a pak tekoucím jádrem se dostane do výtoku obr.7.3 a obr. 7.4.

Zásobníky s jádrovým tokem mají značné nevýhody. Materiál, který je nasypan do zásobníku jako první a nachází se na vně jádra, vytéká ze zásobníku jako poslední a může docházet ke značné segregaci při výtoku. Nevyprazdňuje-li se celý zásobník během provozu, může se stát, že některý materiál setrvává v zásobníku nepřiměřeně dlouho a může dojít během této doby ke spékání materiálu nebo jinému znehodnocení. Při dalším doplnění nového materiálu se zaplní nejprve jádro a u podstatné části objemu zásobníku vůbec nedojde k pohybu. Vzhledem k neprůhlednosti stěn zásobníku není možná optická kontrola. Stanovení oblasti tekoucího materiálu nad výpustným otvorem v závislosti na geometrii zásobníku může značně ovlivnit konstrukci zásobníku (počet výpustných otvorů, jejich tvar, velikost). Při navrhování by se mělo přihlížet i k problému mrtvých koutů, kde materiál zůstává a tím snižuje kapacitu zásobníku. Jádrový tok vzniká především u zásobníku s plochým dnem nebo výsypkou, která má velký úhel rozevření. Velikost výpustného otvoru  $d$  je základní charakteristikou těchto zásobníků, velikost je udávána vztahem mezi velikostí jádra a výpustným otvorem obr. 7.5.

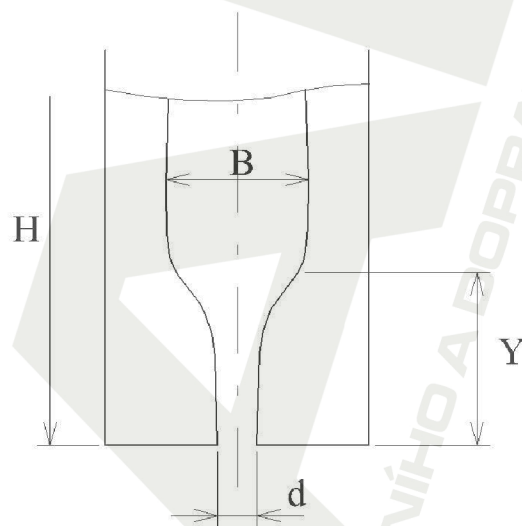




Obr. 7.3 Zásobník s jádrovým tokem



Obr. 7.4 Tekoucí jádro



Obr. 7.5 Velikost jádra

$$\frac{B}{d} = 1,55 \left( \frac{Y}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (100)$$

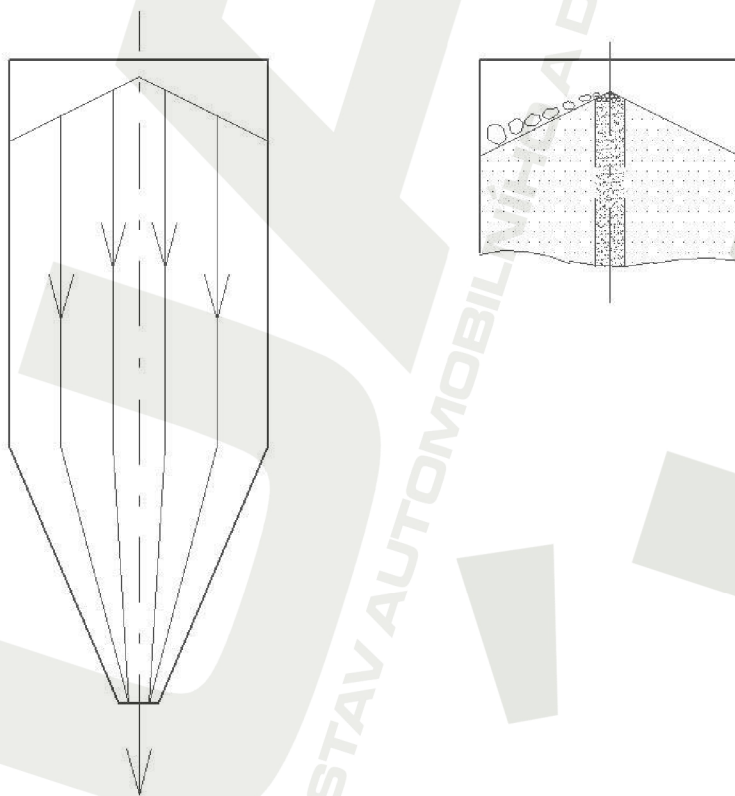
Abychom jádrovému toku zamezili, musí být výpustný otvor dostatečně velký. Většinou se výpustný otvor u zásobníku s jádrovým tokem odhaduje – poddimenzování, neboť velikosti výpustních otvorů neklenbujících zásobníků s jádrovým tokem jsou dosti velké. V důsledku poddimenzování dochází u těchto zásobníků často ke tvorbě klenby nebo kanálů. Zhroucení případné klenby může způsobit velké rázy v zásobníku a může zapříčinit havárii. Přes



nevýhody těchto typů zásobníků se v průmyslu nachází značná většina pro jejich zdánlivě větší kapacitu.

## 7.2. Zásobníky s hmotovým tokem

Ke hmotovému toku dochází jen tehdy pokud je sklon výsypky a velikost výpustného otvoru správně navržen. Po otevření výpustného otvoru dochází k tzv. hmotovému toku materiálu. Materiál po otevření výpustného otvoru se uvede do pohybu a začne klouzat po stěnách zásobníku. Název je odvozen z toho, že veškerá hmota materiálu se uvede do pohybu. Ale nejedná se o pístový tok s konstantní rychlostí v celém průřezu. V zásobníku s hmotovým tokem má materiál ve střední části větší rychlost než u stěn, nevzniká ale jádro. Tyto zásobníky mají navrženou strmou výsypku se sklonem 15-25°, to vede k menší kapacitě zásobníku při stejné spotřebě materiálu. Velká výhoda těchto zásobníků je, že materiál který je nasypán do zásobníku první také první zásobník opouští, poté až materiál, který byl do zásobníku nasypán později. Pokud u těchto zásobníků dochází při nasypávání k segregaci materiálu vlivem sypného kužele, dochází při vypouštění k tomu, že materiál je během vypouštění velmi dobře promíchán. Pokud je výpustný otvor správně navržen nedochází zde k vytvoření klenby nebo kanálků. Tyto zásobníky mají výpustný otvor mnohem menší než-li zásobníky s jádrovým tokem. Celková konstrukční výška zásobníku vzhledem k tvaru výsypky narůstá. I přes veškeré výhody nejsou tyto typy zásobníků všeobecně používány, podíl na tom má velmi obtížný a správný návrh.

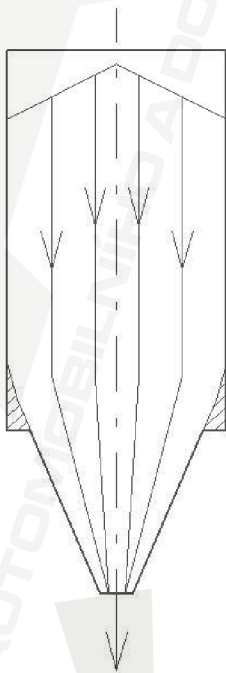


Obr. 7.6 Hmotový tok

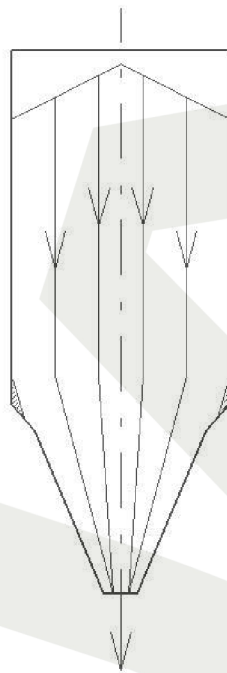
### 7.3. Zásobníky s kombinovaným tokem

Tyto zásobníky jsou navrhovány tak, aby částečně odstranily nevýhody zásobníků s jádrovým tokem, u kterých je potřeba velkých výpustných otvorů se špatnou regulací malých průtoků a zásobníků s hmotovým tokem, u kterých je zase problém se strmou výsypkou a jejich celkovou výškou. Tyto zásobníky mají řešenou spodní část ve tvaru zásobníku s hmotovým tokem. Výška je řešena tak, aby na horním konci nedocházelo ke tvorbě klenby – průměr neklenbujícího otvoru. Horní část (komora) má pak tvar normální, pokud není podmínka úplného vyprázdnění zásobníku, může mít tato část rovné dno. Pokud je podmínka úplného vyprázdnění zásobníku musí být mezi těmito částmi (výsypka, komora) vhodný kuželový přechod nebo vyprazdňování více otvory. V okolí dna je však zóna s minimálním pohybem materiálu.

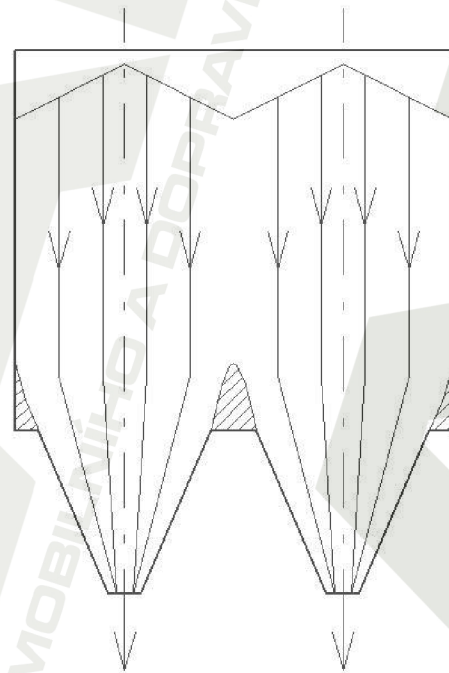
Pro správný návrh zásobníku musí být výsypka správně konstrukčně navržena a musí mít správný tvar tj. správný úhel sklonu a velikost výpustného otvoru, u materiálu, který je skladován, jsou to vlastnosti jako úhel vnitřního tření a úhel stěnového tření.



Obr. 7.7 Rovné dno



Obr. 7.8 Kuželový přechod



Obr. 7.9 Více výpustí

### 8. Přídavná zařízení pomáhající toku materiálu

Tyto zařízení rozdělujeme do dvou hlavních skupin a to na aktivní prvky a pasivní prvky. Aktivní prvky do zásobníku vnášejí energii a pasivní prvky energii jen usměřují a transformují ji.

## 8.1. Aktivní prvky

Zvyšují využití potencionální energie k přeměně na kinetickou energii, která je potřeba pro tok materiálu v zásobníku. Tyto prvky zásobují energeticky oblasti zásobníku, kde je tok materiálu problematický. Za aktivní prvky označujeme pouze ty, které do zásobníku přinášejí energii zvenčí. Lze je rozdělit na:

### Vibrační

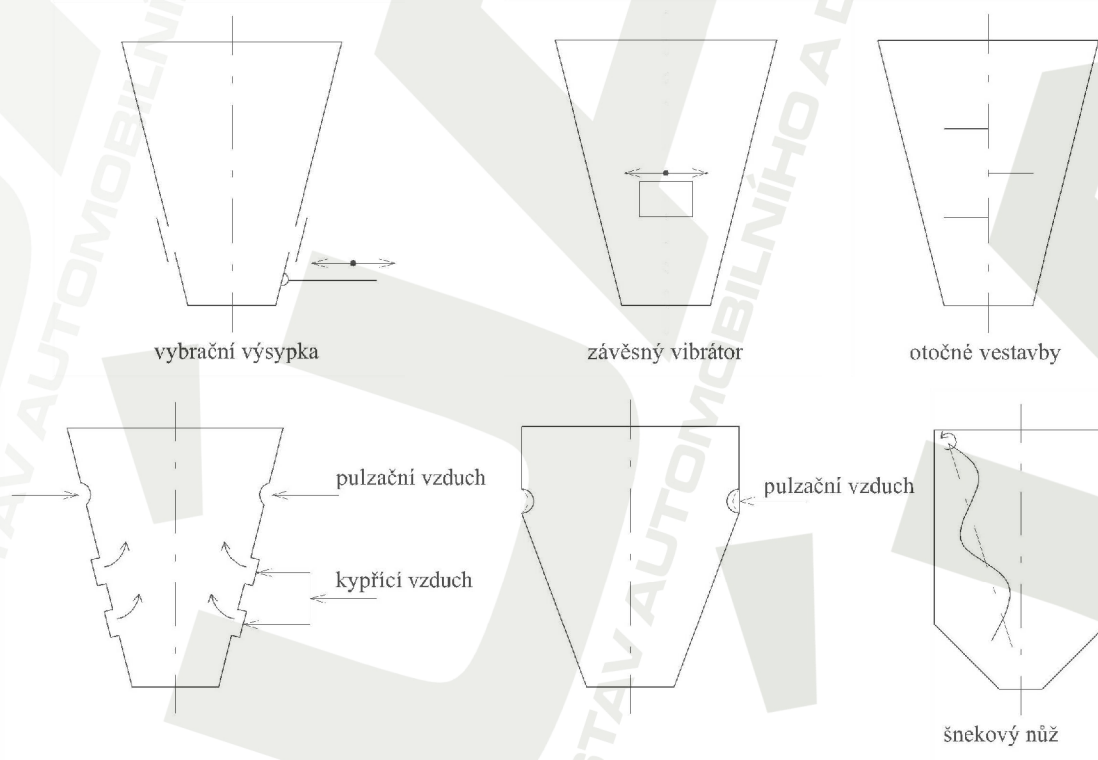
- jsou nevhodná z hlediska hlučnosti a namáhání výsypky zásobníku

### Mechanické

- **otočné vestavby** – materiál je jimi zkyprěn a dochází ke změně objemu a proto při použití těchto aktivních prvků, musíme dbát na to, aby zásobník nebyl plný
- **šnekový nůž** – velmi vhodný pro materiál náchylný ke zkyprování, velmi účinný a otáčkami 20-25 ot/min

### Pneumatické

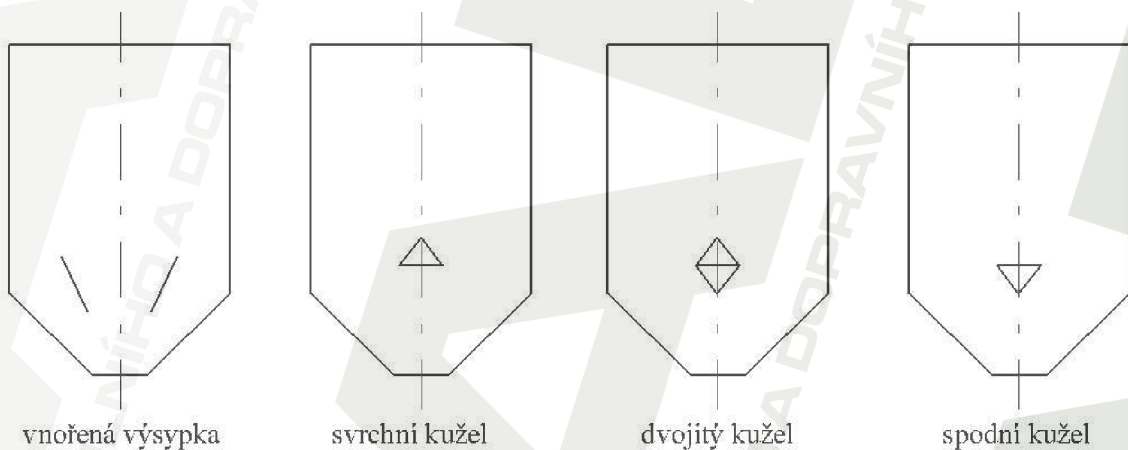
- přiváděný vzduch zfluidizuje vrstvu materiálu, tím se změny vlastnosti náplně, blíží se vlastnostem kapaliny a je tu riziko zvýšení tlaku a porušení zásobníku.



Obr. 8.1 Aktivní prvky

## 8.2. Pasivní prvky

Tyto prvky velmi ovlivňují potenciální energií pro plynulost a bezpečnost toku materiálu. Svým tvarem usměrňují či pohlcují tok materiálu v zásobníku. Umisťují se do oblasti toku. Působení pasivních prvků hlavně ovlivňuje jejich geometrie tvaru a jejich umístění v zásobníku. Vhodná kombinace geometrie a umístění lze dosáhnout bezpečného hmotového toku i v zásobnících, které mají výsypky se sklonem výrazně nižším než je potřeba pro hmotový tok. Velká výhoda těchto prvků je, že umožňují u rekonstrukce zásobníku zvětšit sklon výsypky. Přidáním těchto prvků se také mění rozložení tlaků – zachytávají část vertikálních tlaků. Horizontální tlaky se, ale zvýší a je potřeba použití obkladových materiálů, které dobře odolávají abrazivním účinkům. Tyto prvky mají i funkci ochrany, kdy chrání uzávěr před působením tlaku materiálu, ale i proti padajícímu materiálu při plnění.



Obr. 8.2 Pasivní prvky

## 9. Vznik vzpěrné klenby

Nejzásadnější nepříznivý jev, který se u hlubinných zásobníků projevuje, je vytvoření vzpěrné klenby, která bývá většinou tvarově složitá. Odstraňování bývá většinou složité a hlavně nebezpečné. Tyto klenby se velmi často samovolně a náhle uvolní a následuje zahlcení zařízení umístěného pod zásobníkem. Klenby také ovlivňují plynulý tok materiálu při vyprazdňování, může také dojít k přerušení toku materiálu. Klenba vzniká jak při materiálech kusových, tak i sypkých dle lit. [1].



### **Klenba – kusového materiálu**

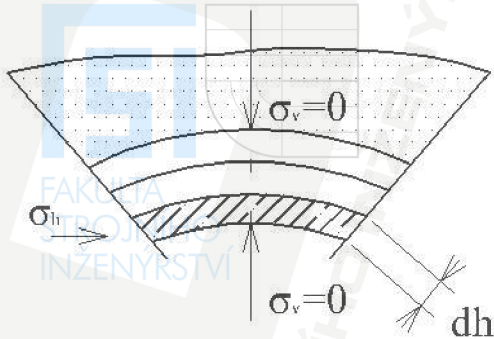
U kusových materiálu vznikají tak, že jednotlivé kusy se opírají vzájemně o sebe v jednom nebo více bodech, přičemž krajní vrstvy se opírají o zešikmené stěny zásobníku. Klenba se tak může vytvořit libovolně vysoko nad výpustí zásobníku. Nejpravděpodobněji se, ale klenba vytvoří v nejužší části zásobníku tj. v kuželové výsypce těsně nad výpustním otvorem. Vytvoření klenby je ovlivněno délkou stěn kuželové výsypky, jejím sklonem, tlakem shora, úhlem vnitřního tření materiálu, třením materiálu o stěny zásobníku, pevnosti skladovaného materiálu.

### **Klenba – sypkého materiálu**

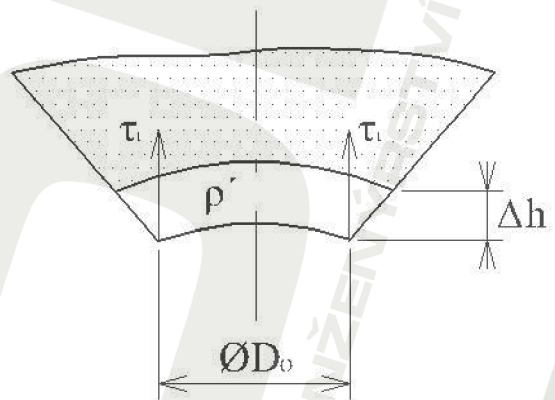
U sypkých, zrnitých materiálu vzniká klenba tehdy, jestliže tento nesoudržný materiál změní tuto svou vlastnost za částečnou, mnohdy i značnou soudržnost vlivem vlhkosti, zrání materiálu nebo chemické reakce. Na jejím vytvoření hlavně u jemnozrnných sypkých materiálů se podílí jednak tlak vrchní části náplně (vnější síly), jednak určité množství vody, která jako tenká obalová vrstvička pokryje povrch zrn a váže je mezi sebou tahem povrchových napětí. Tím vzniká tzv. nepravá soudržnost sypkých hornin. Na vytvoření nepravé soudržnosti se obvykle podílí oba součinitelé současně.

Při vyprazdňování zásobníku vzniká možnost přechodu z aktivního stavu napjatosti sypkého materiálu do pasivního stavu napjatosti především v okolí výpustného otvoru. Při otevření výpustného otvoru začne materiál vytékat a tím začne v bezprostředně navazující vrstvě materiálu klesat hlavní napětí  $\sigma_1$  (vertikální napětí). V okamžiku, kdy se napětí vyrovnají  $\sigma_1 = \sigma_2$  přejde aktivní stav napjatosti v pasivní stav napjatosti, který ale způsobí zvýšení horizontálního napětí. Při této změně může dojít k novému uspořádání textury vrstvy částic, případně až k plastické deformaci částic. V blízkosti výpustného otvoru při vypouštění částic ze zásobníku dochází k vytvoření určité fluidní vrstvy, v této vrstvě dochází k větší pohyblivosti materiálu a tím i ke zvýšení bočního tlaku. Podmínkou pro vznik klenby je, aby vertikální napětí  $\sigma_v = 0$ . Klenba má tu vlastnost, že vlastní hmotnost sypkého materiálu se přenáší do stěn výsypky a žádná síla se nepřenáší do spodních vrstev (po jejich odstranění vzpěrná klenba drží. Pokud si pomyslně rozdělíme klenbu na tři samostatné klenby nad sebou. Každá klenba přenáší svou vlastní hmotnost do stěn výsypky, ale nepůsobí na klenbu pod sebou žádnou silou. Z tohoto předpokladu vyplývá, že na nejspodnější klenbu nepůsobí žádné síly od vrchní klenby a je tedy možnost sestavení rovnováhy sil ve vertikálním směru. Ve svislém průřezu klenby po jejím obvodu vznikne smykové napětí  $\tau_s$ , tato hodnota musí být právě taková, aby udržela hmotnost klenby a materiál nebude padat.





Obr. 9.1 Fluidní vrstvy



Obr. 9.2 Element pro sestavení rovnic

$$\frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \cdot \Delta h \cdot \rho' \cdot g = \pi \cdot D_o \cdot \Delta h \cdot \tau_s \quad (101)$$

- odtud stanovíme

$$D_o = \frac{4 \cdot \tau_s}{\rho' \cdot g} \quad (102)$$

- rovnice pro minimální velikost výpustného otvoru, kdy je možnost vzniku vzpěrné klenby

Problém, ale je při stanovení smykového napětí  $\tau_s$ . Při řešení využijeme Mohrovy kružnice stavů napjatosti. Základní předpoklad je, že ve spodní ploše klenby (volný povrch) je nulové i smykové napětí. Z toho vyplývá, že jeden bod Mohrovy kružnice bude ležet v počátku souřadného systému  $\tau - \sigma$ . Pokud máme k dispozici mezní křivku materiálu, musí se jí příslušná Mohrova kružnice dotýkat. Problém je tedy sestavit Mohrovu kružnici, která má jeden bod, který prochází počátkem a zároveň byla tečnou mezní křivky.  $\tau_o$   $\varphi$  jsou charakteristiky materiálu, které se stanovují pomocí smykového přístroje.

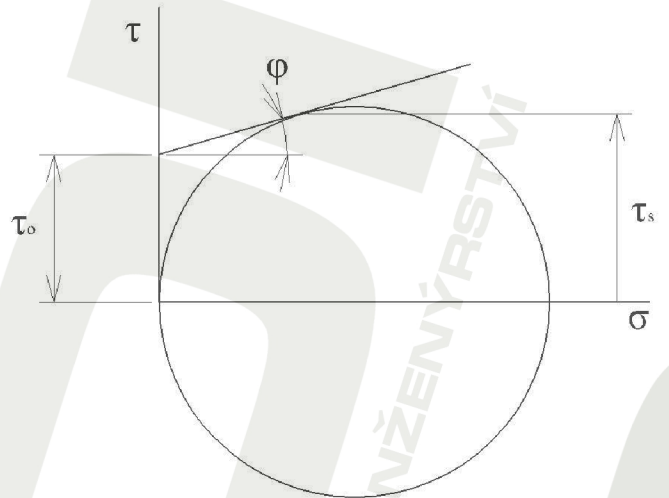


VYSOKÉ  
UCENÍ  
TECHNICKÉ  
V BRNĚ

Platí:

$$\tau_s = \tau_o + \tau_o \cdot \sin \varphi = \tau_o (1 + \sin \varphi) \quad (103)$$

$$D_o = 4 \cdot \tau_o \frac{(1 + \sin \varphi)}{\rho \cdot g} \quad (104)$$



Obr. 9.3 Mohrova kružnice

Tento vztah platí jen tehdy, pokud je klenba v mezním stavu. To znamená, že existují smykové plochy, na kterých by došlo k prokluzu materiálu, kdyby se mezní stav překročil. Z toho vyplývá, že zde na těchto smykových plochách působí mezní smykové napětí  $\tau_s$ . Odpovídající bod Mohrovy kružnice se tedy musí dotýkat mezní přímky. Hodnota  $\tau_s$  je velmi blízká hodnotě  $\tau_{\max}$  dané Mohrovou kružnicí. Proto si můžeme dovolit pro dané řešení nahradit  $\tau_s$  poloviční hodnotou hlavního normálního napětí (hodnota velikosti poloměru Mohrovy kružnice), aniž by jsme se dopustili nějaké velké chyby. Toto odvození je, ale velmi zjednodušené. Při přesném řešení musíme brát v úvahu i sklon výsypky a stěnový úhel tření.

## 10. Závěr

V této diplomové práci jsem řešil návrh zásobníku na sypký vápenný hydrát pro technologická zařízení čistíren odpadních vod. Provedl jsem návrh typu a konstrukci, výpočet hlavních rozměrů a pevnostní výpočet. Zásobník bude hluboký, válcový s kuželovou výsypkou, bude plněn pneumaticky přívodním potrubím, pro bezpečnost zásobníku proti tlakovým výkyvům je zde namontováno pojistné tlakové ústrojí PU 310. Pro jednodušší údržbu je zde namontován žebřík s ochranným zábradlím, tím je zajištěna předepsaná bezpečnost. Je zde proveden rozbor aktivních a pasivních stavů v zásobníku, popsána možnost vzniku vzpěrné klenby a její potlačení pomocí aktivních a pasivních prvků. Přílohou této diplomové práce je sestavný výkres zásobníku dle výpočtů hlavních rozměrů a důležité výrobní výkresy.

## 11. Seznam použitých veličin

Symbol	Jednotka	Definice
A	[m <sup>2</sup> ]	Příčný průřez zásobníku
A <sub>v</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Příčný průřez výpustného otvoru
b	[mm]	Délka svaru
B	[m]	Průměr jádra
D	[m]	Průměr zásobníku
D <sub>t</sub>	[mm]	Průměr trubky (nohy zásobníku)
d	[m]	Průměr výtokové části
d <sub>t</sub>	[mm]	Vnitřní průměr trubky (nohy zásobníku)
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
f	[-]	Součinitel tření mezi materiálem a stěnou zásobníku
F <sub>pl</sub>	[N]	Síla od hmotnosti pláště zásobníku
F <sub>nápl</sub>	[N]	Síla od hmotnosti náplně zásobníku
F <sub>pv</sub>	[N]	Síla od působení tlaku p <sub>v</sub>
F <sub>z</sub>	[N]	Síla od hmotnosti pláště, skořepiny a náplně (váp. hydrátu)
F <sub>krit</sub>	[N]	Kritická síla při které dojde ke ztrátě stability
F <sub>př</sub>	[N]	Síla od hmotnosti příslušenství
F <sub>zás</sub>	[N]	Celková síla od hmotnosti zásobníku včetně náplně a příslušenství
F <sub>1nohy</sub>	[N]	Síla působící na jednu nohu
F <sub>PZ</sub>	[N]	Síla od hmotnosti prázdného zásobníku
g	[m.s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení
h	[mm]	Tloušťka stěny zásobníku
h <sub>1</sub>	[m]	Výška válcové části zásobníku
h <sub>2</sub>	[m]	Výška kuželové části zásobníku
h <sub>r</sub>	[m]	Konstrukční rezerva
h <sub>v</sub>	[m]	Výška nasypávaného kužele
i	[mm]	Poloměr kvadratického momentu
J <sub>min</sub>	[mm <sup>4</sup> ]	Kvadratický moment
k	[-]	Součinitel aktivního tlaku
k	[-]	Součinitel bezpečnosti výpustného otvoru
k <sub>k</sub>	[-]	Součinitel bezpečnosti
l	[m]	Teoretická výška zásobníku
l <sub>t</sub>	[mm]	Výška nohy zásobníku
m <sub>PZ</sub>	[kg]	Hmotnost prázdného zásobníku
O	[m]	Vnitřní obvod pláště
O <sub>v</sub>	[m]	Vnitřní obvod výpustného otvoru
p <sub>N</sub>	[Pa]	Normálový tlak ve výsypce

$p_T$	[Pa]	Tečný tlak ve výsypce
$p_V$	[Pa]	Vertikální tlak
$p_H$	[Pa]	Horizontální tlak
$R$	[m]	Vnitřní poloměr zásobníku
$R_{pl}$	[m]	Vnější poloměr zásobníku
$r$	[m]	Poloměr výpustného otvoru
$R_H$	[m]	Hydraulický poloměr zásobníku
$R_{Hv}$	[m]	Hydraulický poloměr výpustného otvoru
$s$	[mm]	Tloušťka svaru
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez nohy zásobníku
$v_{výt}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Výtoková rychlost
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem zásobníku
$V_c$	[m <sup>3</sup> ]	Celkový objem
$V_1$	[m <sup>3</sup> ]	Objem hlavní komory
$V_2$	[m <sup>3</sup> ]	Objem kuželové části
$z$	[m]	Vzdálenost od horního okraje
$\alpha$	[°]	Úhel jenž svírá stěna výsypky se svislicí
$\alpha_{  }$	[-]	Převodní součinitel tvarového spoje
$\alpha_{\perp}$	[-]	Převodní součinitel tvarového spoje
$\beta$	[°]	Úhel jenž svírá stěna výsypky s horizontálou
$\varphi$	[-]	Součinitel vnitřního tření
$\rho'$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Sypná objemová hmotnost
$\rho_{oc}$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota oceli
$\gamma$	[Nm <sup>3</sup> ]	Objemová tíha náplně
$\sigma_m$	[MPa]	Meridiánové napětí
$\sigma_{red}$	[MPa]	Redukované napětí
$\sigma_1$	[MPa]	Větší hlavní napětí
$\sigma_2$	[MPa]	Menší hlavní napětí
$\sigma_v$	[Pa]	Vertikální napětí
$\sigma_h$	[Pa]	Horizontální napětí
$\sigma_k$	[MPa]	Dovolené napětí
$\sigma_{  }$	[MPa]	Napětí rovnoběžné se směrem svaru
$\sigma_{\perp}$	[MPa]	Napětí kolmé na směr svaru
$\lambda$	[-]	Štíhlost prutu
$\lambda_{krit}$	[-]	Kritická štíhlost prutu
$\tau$	[MPa]	Smykové napětí



## 12. Seznam použité literatury

- [1] MEDEK, J.: Mechanické pochody, PC DIR s.r.o., Brno, 1998
- [2] MALÁŠEK, J.: Stroje pro výrobu stavebních materiálů a stavebních dílců
- [3] PACAS, B. A KOL.: Teorie stavebních strojů, ES VUT Brno, 1993
- [4] NOVOSAD, J.: Mechanika sypaných hmot, VŠCHT Praha, 1983
- [5] SVOBODA, P., BRANDEJS, J., PROKEŠ, F.: Základy konstruování, CERM, Brno, 2007
- [6] SVOBODA, P., BRANDEJS, J., PROKEŠ, F.: Výběry z norem pro konstrukční cvičení, CERM, Brno, 2007
- [7] SOBEK, E., Brandejs, J., Dvořáček, J., Mazal, P., Svoboda, F.: Základy konstruování – návody pro konstrukční cvičení, CERM, Brno, 2004
- [8] JANÍČEK, P., PETRUŠKA, J.: Úlohy z pružnosti a pevnosti II., VUT Brno, 1991
- [9] ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., JANÍČEK, P., BURŠA, J.: Mechanika těles – pružnost a pevnost II, CERM, Brno, 2006
- [10] LEINVEBER, J. – ŘASA, J. – VÁVRA, P.: Strojnické tabulky, vydala Scientia, spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, v roce 1998
- [11] KLIMEŠ, P.: Části a mechanismy strojů I., Brno, 2002

### 13. Seznam internetových zdrojů

- [12] [www.ferona.cz](http://www.ferona.cz) – velkoobchod s hutním materiálem
- [13] [www.silosystem.cz](http://www.silosystem.cz) – výroba a renovace sil
- [14] [www.has.cz](http://www.has.cz) – míchání a transport materiálů
- [15] [www.zking.cz](http://www.zking.cz) – skladování, dávkování
- [16] [www.rayman.cz](http://www.rayman.cz) – pneumatická doprava

## 14. Seznam výkresové dokumentace

Zásobník na váp. hydrát

0 - 5033 - 01/00

K-4 - 5033 - 01/00

Výsypka

4-5033-01/02

Výpust

4-5033-01/03

Noha

4-5033-01/05

Plnicí potrubí

4-5033-01/06

Žebřík

4-5033-01/07

Tyč zábradlí

4-5033-01/08

Závěsné oko

4-5033-01/09

Víko

4-5033-01/10

Šroub víka

4-5033-01/11

Držák plnicího potrubí

4-5033-01/12

Mezikruží

4-5033-01/14

Vzpěra

4-5033-01/15