

**Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta bezpečnostního inženýrství**

**Katedra bezpečnosti práce a procesů**

**Vliv zrnitosti sladu na výbuchové parametry  
ve vybraných dopravních systémech**

**Influence of malt grain size on  
explosion indices in selected transport systems**

**Student:**

**Bc. Marek Bukovan**

**Vedoucí diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Štroch PhD.**

**Studijní obor:**

**Bezpečnostní inženýrství**

**Termín odevzdání diplomové práce:**

**18. 4. 2014**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta bezpečnostního inženýrství  
Katedru bezpečnosti práce a procesů

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Bukovan**

Studijní program: N3908 Požární ochrana a průmyslová bezpečnost

Studijní obor: 3908T002 Bezpečnostní inženýrství

Téma: **Vliv zrnitosti sladu na výbuchové parametry ve vybraných dopravních systémech**  
**Influence of Malt Grain Size on Explosion Indices in Selected Transport Systems**

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Cílem práce je poukázat na riziko výbuchu v dopravních systémech pro přepravu sypkých hmot. Provést měření velikosti středního zrna vzorků sladu z vybraných technologických míst dopravních systémů, dále dolní meze výbušnosti LEL ve vztahu k hodnotám středního zrna sladu i výbuchových parametrů a navrhnout stanovení výbušné atmosféry a zařídění do zón ve vztahu k provedeným měřením.

Charakteristika práce:

Seznámení se s problematikou dopravních systémů sypkých hmot. Seznámení se s metodikami pro stanovení výbuchových parametrů. Porovnání legislativních požadavků s praxí. Vyhodnocení a srovnání naměřených výsledků. Návrh na opatření ve vztahu k protivýbuchové prevenci.

Seznam doporučené odborné literatury:

ŠTROCH, P.: Procesy hoření a výbuchů. EDIS vydavatelství ŽU, Žilina 2010, ISBN 978-80-554-0187-4.

ŠTROCH, P.: Riziko výbuchu prašných směsí a možnosti prevence. 1. vyd. Praha. AMOS repro, spol. s r.o., 2007, ISBN: 978-807362-515-3.

Bartknecht, W. Explosionsschutz-Grundlagen und Anwendung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1993.

ČSN EN 1127-1


Nařízení vlády č. 406/2004 Sb., o bližších požadavcích na na zajištění BOZP v prostředí s nebezpečím výbuchu

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Štroch, Ph.D.**

Datum zadání: 01.07.2013

Datum odevzdání: 18.04.2014



---

doc. Dr. Ing. Aleš Bernatík  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Pavel Poledňák, PhD.  
*děkan fakulty*



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou 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;
- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 1);
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava (dále jen VŠB – TUO), dostupná k prezenčnímu nahlédnutí;
- beru na vědomí, že VŠB – TUO má právo nevydělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít v souladu s § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má právo VŠB – TUO 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 práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého VŠB – TUO nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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.

**Jméno, příjmení:** Marek Bukovan

**Adresa:** Dobrá 244; 739 51

**Dne:** 18. 4. 2014

**Podpis:**  .....

*1) 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.*

*2) 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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).*

*3) 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 výdělku 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 výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

### **Místopřísežné prohlášení**

*Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.*

V Ostravě dne 18. dubna 2014

Bc. Marek Bukovan



### **Poděkování**

*„Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Petru Štrochovi PhD. za zájem, připomínky a čas, který věnoval mé práci, dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Ligotskému za spolupráci a ochotu při zajišťování vzorků.“*

## **Anotace diplomové práce**

BUKOVAN, M., *Vliv zrnitosti sladu na výbuchové parametry ve vybraných dopravních systémech*, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014, 56 stran. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Petr Štroch PhD.

Tato práce se zabývá rizikem výbuchu v korečkovém dopravníku. V úvodní části diplomové práce popisují, co to jsou výbuchové parametry a dále jsou zde shrnuty všechny požadavky jak na výrobce tak provozovatele korečkových dopravníků, ale zmiňují zde i způsoby řešení rizika výbuchu u korečkových dopravníků v Německu či Spojených státech. V dalších částech práce pak popisují dopravní systémy určené pro přepravu sypkých hmot a sladovací proces, který má vliv na výbuchové parametry sladu. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky měření a popisují zde i navržený algoritmus pro stanovení zón v korečkových dopravnících.

*Klíčová slova:* korečkový dopravník, riziko výbuchu, výbuchové charakteristiky, zóny, dolní mez výbušnosti,

## **Annotation of the thesis**

BUKOVAN, M., *Influence of malt grain size on explosion indices in selected transport systems*, Faculty of safety engineering, VSB – Technical University of Ostrava, 2014, 56 pages. Thesis, Supervisor: doc. Ing. Petr Štroch PhD.

This work deals with the risk of explosion in bucket elevators. In the first part of the thesis, describes concepts such as explosion parameters and all the requirements on both the manufacturer and the operator of bucket elevators are summarized. Further, there are mentioned methods dealing with the risk of explosion in bucket elevators in Germany or the United States. The next section describes transport systems with the focus on bucket elevators, and the malting process that affects the explosion parameters of malt. In the final part of the paper, the measurement results are evaluated and the proposed algorithm for the determination of zones in the bucket elevator is described.

*Keywords:* bucket conveyor, the risk of explosion, explosive characteristics, zones, lower explosive limit,

## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Výbuchové parametry .....	4
2.1	Výbuchové charakteristiky rozvířeného prachu.....	6
2.2	Maximální výbuchový tlak a maximální rychlost nárůstů výbuchového tlaku.....	7
2.3	Dolní mez výbušnosti.....	10
3	Legislativní a normativní požadavky .....	13
3.1	Povinnosti výrobce a dodavatele zařízení .....	14
3.2	Povinnosti provozovatele zařízení.....	15
3.2.1	Obsah dokumentace o ochraně před výbuchem podle § 6 .....	16
3.2.2	Klasifikace prostorů.....	17
3.3	Normativní požadavky .....	18
3.4	Přístup k problematice rizika výbuchu za hranicemi ČR .....	19
3.4.1	VDI 2263 část 8 a 8.1 .....	20
3.4.2	NFPA 61 .....	21
4	Dopravní systémy.....	22
4.1	Mechanické vlastnosti sypkého materiálu v protivýbuchové ochraně .....	23
4.2	Rozdělení dopravních a manipulačních zařízení.....	24
4.3	Korečkové elevátory.....	25
5	Popis technologie skladování.....	29
5.1	Příjem, čištění a skladování ječmene.....	29
5.2	Máčení ječmene.....	31
5.3	Klíčení ječmene .....	31
5.4	Sušení a hvozdění zeleného sladu .....	31
5.5	Úprava odsušeného sladu, skladování a expedice.....	32



6	Praktická část .....	34
6.1	Odběr vzorků z vybraných míst dopravních tras.....	34
6.2	Provedená měření .....	36
6.3	Zhodnocení naměřených výsledků .....	39
6.4	Algoritmus pro návrh zóny v elevátoru.....	44
6.5	Návrh zóny v posuzovaných dopravnících.....	46
7	Obecně možné řešení protivýbuchové ochrany .....	48
7.1	Algoritmus pro vyhodnocení iniciačních zdrojů a návrh opatření .....	52
8	Závěr .....	55
	Seznam použité literatury.....	57
	Seznam obrázků .....	59
	Seznam tabulek a grafů .....	60
	Seznam příloh.....	61

## Seznam zkratek

Zkratka	anglický význam	český význam
vzpp		ve znění pozdějších předpisů
EU	European union	Evropská unie
NV		nařízení vlády
$K_{st}$		kubická konstanta pro prachovzduchové směsi
$p_{max}$	maximum explosionpressure	maximální výbuchový tlak
$p_{ex}$	explosionpressure	výbuchový tlak
$(dp/dt)_{ex}$	rateofpressurerise	rychlost nárůstu výbuchového. tlaku
$(dp/dt)_{max}$	maximum rateofpressurerise	maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku
H/C	H/C ratio	poměr vodíku k uhlíku
LEL	lowexplosion limit	dolní mez výbušnosti
PVC	polyvinyl chloride	polyvinyl chlorid
$D_s$		střední velikost zrna (částic)
$n_{D<100}$		procentuální počet částic menších než 100 $\mu m$
HRD	HighRateDischarge	systemy potlačení exploze

# 1 Úvod

Pro zpracování a uskladňování obilných produktů se v zemědělství používají různé dopravní systémy. Při každé manipulaci s hořlavými sypkými hmotami, za což můžeme považovat i obiloviny, včetně sladu, dochází k oteru částic a vznikají jemnější frakce. Od určité velikosti se tyto částice stávají výbušnými, a tudíž sebou nesou riziko výbuchu.

Toto riziko se vyskytuje i v dopravních systémech, což je ostatně cílem této práce, poukázat na existenci rizika výbuchu v dopravních systémech pro přepravu sypkých hořlavých hmot. Bohužel toto riziko není v České republice dostatečně doceněno a ne každý výrobce nebo dodavatel dopravníků si jej uvědomuje, což vyplývá i z emailové komunikace, kterou jsem vedl s některými výrobci korečkových dopravníků (viz příloha 1). Existují u nás totiž stále výrobci, kteří tvrdí věty typu „*během své praxe jsem se nikdy nesetkal s případem, že by došlo v korečkovém dopravníku k explozi*“ a podobně.

Jiní výrobci si zase ne zcela přesně vykládají legislativu a tvrdí, že provozovatel je povinen je informovat do jakého prostředí bude dopravník instalován. To sice pravda je, ale výrobce musí na trh uvádět pouze bezpečné výrobky, takže pokud budoucí provozovatel zadá požadavek na jakékoliv strojní zařízení (např. korečkový dopravník), tak povinností výrobce je dodat takové zařízení, které je bezpečné. Mezi další cíle této práce patří provést měření, která by potvrdila existenci rizika výbuchu ve vybraných dopravních systémech a na základě naměřených údajů navrhnout zónu pro posuzovaný dopravník.

Příkladů výbuchů prachů v dopravních systémech známe z historie mnoho. Záznamy o explozích v dopravních určených pro přepravu obilovin jsou staré více jak 120 let. První případy nastaly prakticky ihned s rozvojem dopravníku pro přepravu velkého množství obilovin. V prosinci roku 1977 došlo během jednoho měsíce k výbuchu 5 dopravníků na území Spojených států, což si vyžádalo 59 mrtvých a 49 zraněných. Tato událost vyvolala znepokojení ve Spojených státech a na pokyn vlády se tímto problémem začala zabývat Národní akademie věd Spojených států amerických [6].

Nemusíme ovšem chodit daleko do historie. Poslední velký výbuch se stal 7. února 2008 v továrně ImperialSugarFactory ve Spojených státech. Příčinou výbuchu bylo pravděpodobně přehřátí ložiska v dopravníku pod síly s uskladněným cukrem. Došlo k iniciaci nahromaděného cukrového prachu a následnému přenesení výbuchu v dopravním systému do celého objektu. Výbuch si vyžádal 14 obětí na životech a 38 zraněných, z toho 14 osob bylo zraněno těžce. Samozřejmě zde byly také značné materiální škody, což dokládá obrázek 1[8].



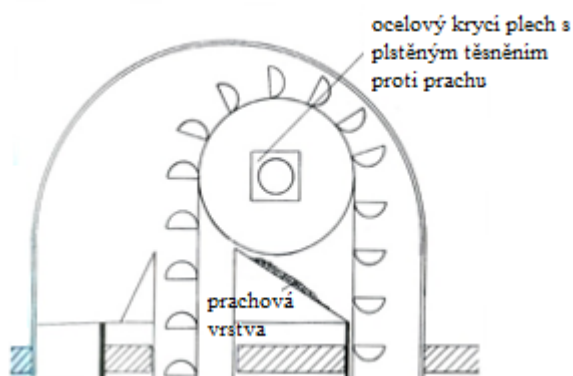
**Obrázek 1: ImperialSugarFactory po explozi v roce 2008[8]**

Bohužel událostem, které jsou podobné těm ve Spojených státech, se nevyhnula ani Evropa. Například v roce 1978 došlo k explozi obilného prachu v mlýnu Roland v Brémach v Německu. Výbuch byl tak mohutný, že došlo k totální destrukci mlýnu a stavební dílce a úlomky byly rozmetány až do vzdálenosti 1,5 km. I tato exploze si vyžádala ztráty na lidských životech. Při havárii bylo usmrceno 14 osob a 17 jich bylo zraněno těžce. Tyto havárie provázejí také rozsáhlé materiální škody[22].

V Norsku byl také zaznamenán jeden případ, který však nedopadl nikterak tragicky, jelikož korečkový elevátor, ve kterém došlo k výbuchu, byl vybaven odlehčovacími otvory a došlo k účinnému odlehčení. U tohoto případu se podařilo identifikovat řetězec události, který vedl k tomuto výbuchu a tento incident ukazuje, že pokud se aplikuje správné opatření pro zmírnění výbuchu, tak může být velice účinné [4].

Výbuch nastal v hlavě elevátoru prakticky okamžitě po ukončení přepravy pšenice mezi dvěma síly. V okamžik exploze nebylo v dopravním systému již žádné zrní. Korečkový dopravník byl instalován venku, podél zdi hlavní budovy. Podél

šachtykorečkového elevátoru byly umístěny odlehčovací otvory. Otvory, které byly zasaženy explozí, byly protržené, což bezpochyby přispělo ke snížení rozsahu výbuchu. Nebyly zde žádné významné škody, způsobené teplem nebo tlakem. Obrázek 2 ilustruje hlavu korečkového dopravníku, ve které nastala exploze. Kvůli mírnému odsazení se ocelový krycí plech řemenice s plstěným těsněním proti prachu začal během provozu zahřívat třením. Horký ocelový plech pak zapálil plstěné těsnění, ze kterého začaly odpadat žhnoucí části, a ty dopadaly na vrstvu usazeného pšeničného prachu. To způsobilo iniciaci usazené vrstvy prachu, která pak začala doutnat. V okamžiku, kdy došlo k zastavení dopravníku, bylo pravděpodobně uvnitř ještě dostatek rozvířeného prachu a ten byl iniciován doutnajícím prachem. Jiná varianta říká, že doutnajícím usazený prach mohl sklouznout dolů, kde došlo k jeho rozptýlení a vytvoření výbušné koncentrace, která následně explodovala[4].



Obrázek 2: Hlava elevátoru s usazeným prachem[4]

## 2 Výbuchové parametry

K tomu abychom porozuměli následujícím kapitolám, je potřeba nejprve objasnit co to jsou výbuchové parametry. Tato kapitola vychází z překladu knihy *Handbook of Explosion Prevention and Protection* a objasňuje problematiku stanovení výbuchových parametrů a dolní meze výbušnosti[7].

Vlastnosti hořlavých prachů, které jsou rozhodující pro protivýbuchovou ochranu, jsou popsány bezpečnostními charakteristikami, jako jsou například mezní hodnoty důležitých vlastností látek, při jejichž manipulaci může nastat určité nebezpečí. Tyto hodnoty jsou určovány v laboratoři podle definovaných testovacích metod ve speciálních testovacích zařízeních, s cílem získat porovnatelné rozhodující kritéria pro situace, které mohou nastat v praxi. Tohoto cíle nelze dosáhnout vždy jednoduchým způsobem s uspokojivým výsledkem. Pouze ve velmi omezených případech bezpečnostní charakteristiky představují opravdové vlastnosti látek. To proto, že jsou vždy vztaženy k jednotlivým případům z praxe a ve velmi širokém smyslu slouží k definování provozních podmínek, které připouštějí bezpečnou manipulaci s nebezpečnými látkami. S pomocí bezpečnostních charakteristik lze klasifikovat látky podle specifických vlastností nebo je lze porovnat s ohledem na riziko, které představují v dané situaci.

Pro prachy rozlišujeme:

- vlastnosti usazeného prachu
- vlastnosti pyrolyzních plynů z usazeného prachu při tepelném namáhání
- vlastnosti směsi vzduch – prach

Ve většině případů je zjišťování vlastností u prachu podstatně obtížnější než u plynů a par, neboť prachy, jako pevné částice, mají navíc vlastnosti, díky nimž je jejich hodnocení mnohem obtížnější. Mezi tyto vlastnosti patří:

- různá velikost částic nebo různé rozložení částic stejného typu prachu
- vlastnost stárnutí prachů
- různý obsah vlhkosti
- velmi rozdílná hustota různých druhů prachů
- obtížné rozvíření a udržení prachového oblaku s trvalou lokální koncentrací

Vzhledem k vlivu těchto vlastností může být reaktivita prachu, dokonce i ze stejného vzorku, velice odlišná. Obzvláště nastává problém s určováním charakteristik prachového oblaku.

Protože prachové částice v pracho-vzduchové směsi mohou být udrženy v rozvířeném stavu pouze po krátkou dobu (v důsledku gravitace), podléhá prachová koncentrace těchto směsí, na rozdíl od plyno-vzduchových směsí, místním a časovým změnám. K vytvoření prachového oblaku je nezbytné udělit prachové částici zrychlení, které se na krátkou dobu vyrovná tíhovému zrychlení. Z tohoto důvodu prakticky ve všech uznávaných metodách pro určování bezpečnostních charakteristik prachového oblaku, je prach rozptýlen intenzivním proudem tlakového vzduchu.

Opakovatelnost takového postupu není zcela uspokojivá, což také komplikuje časově se měnící turbulence prachového oblaku, která silně ovlivňuje průběh iniciačního a hořícího procesu. Na rozdíl od plynů, které jsou nehybné, se iniciace nikdy nešíří v uzavřené plamenné frontě, kterou lze přiměřeně popsat matematickými modely. Tato nevyzpytatelnost vede k situacím, že bezpečnostní charakteristiky prachů, obzvláště rozvířeného prachu, jsou mnohem méně napodobitelné než ty ve směsi plyn-vzduch (v nepohyblivém prostředí). Jsou také mnohem více závislé na zařízení, které se používá k měření, než v případě plynů.

Tento problém ovšem nevzniká při určování vlastnosti usazeného prachu. Nesmí být však přehlíženo, že přechod mezi usazeným prachem a rozvířeným prachem je v průmyslové praxi možný vždy.

Rychlost reakce směsi pevná látka-plyn, která nastává, když usazený prach hoří nebo rozptýlený prach přejde v explozivní hoření, závisí na povrchu plochy pevného materiálu, který je přístupný atmosférickému kyslíku. Proto hořící reakce u prachů, které mají velký povrch, díky velkému množství jednotlivých částic, postupuje řádově rychleji než u rozměrných materiálů a v rozptýleném prachu může mít za následek dokonce explozi. Menší prachové částice reagují daleko prudčeji, což znamená, že jsou více nebezpečné. Další významnou vlastností usazeného prachu je jeho výborná tepelná izolace, která souvisí s výskytem vzduchu mezi jednotlivými prachovými zrny.

Získání porovnatelných výsledků bezpečnostních charakteristik hořlavých prachů je podmíněno reprezentativními a jasně definovanými vzorky získanými po předběžné úpravě, které ho přizpůsobí testovací metodě. Toto předběžné zpracování obsahuje obvykle opatrné sušení a získání zrna o definované velikosti buď mletím, nebo proséváním. Pokud není testovací metodou stanoveno jinak, jsou tyto testy prováděny za běžné teploty, tlaku a vlhkosti.

## 2.1 Výbuchové charakteristiky rozvířeného prachu

V průmyslových odvětvích, která používají procesy nebo transportují hořlavý prach, je vhodné mít přesné znalosti o riziku výbuchu. Od roku 1980 byly publikovány různé knihy věnované problematice rizika výbuchu prachů a prášků. Exploze je následkem prudké oxidační reakce hořlavého materiálu, která vede k náhlému nárůstu teploty a tlaku. K tomu, aby došlo k výbuchu prachu, musí být splněno několik požadavků, jako je rozptýlení hořlavého prachu ve vzduchu s koncentrací nad dolní mezi výbušnosti a přítomnost dostatečně silného energetického iniciačního zdroje.

Rozsah účinku výbuchu závisí na rychlosti uvolňování energie chemické reakce ve vztahu k míře prostorového omezení (uzavřený prostor) a tepelným ztrátám. Rychlost uvolňování energie iniciované prachovzduchové směsí nezávisí pouze na chemických nebo fyzikálních vlastnostech prachu (spalné teplo, aktivační energie spalovací reakce, rozdělení velikosti zrna, schopnost pyrolýzy), ale docela významně také na přestupu tepla a materiálu tvořící výbušný oblak.

Proto podmínky proudění (stav turbulence před a během hoření) v prachovzduchové směsí mají rozhodující význam. Vliv podmínek proudění na výbuch prachu je však stále předmětem současného výzkumu. Tyto úvahy však v metodách, používaných k určení charakteristik týkajících se prachové exploze, hrají vedlejší roli.

Tvar a velikost částic jsou rovněž důležitými body v hodnocení schopnosti prachu vybuchnout, v případě jeho rozvíření ve vzduchu. Obecně platí:

- Zrno s větší povrchovou plochou bude reagovat mnohem prudčeji a bude tak více nebezpečné.
- Jemnozrnné prachy jsou mnohem reaktivnější než hrubozrnné prachy.



Mechanismus šíření plamenů pro mnoho prachů je takový, že dochází nejprve ke spalování pyrolyzních plynů uvolněných částicemi, a to v blízkosti bodu iniciace energií iniciačního zdroje. Ostatní prachy (například kovové) mohou šířit plamen přímou oxidací na povrchu částic.

Publikovaná data o výbušnosti prachů mohou poskytnout informace o nebezpečí spojené s konkrétním typem prachu. Je však upřednostňováno určení těchto výbuchových charakteristik testovacími metodami, protože publikovaná data jsou pro konkrétní distribuci částic, které se zpravidla liší případ od případů.

## **2.2 Maximální výbuchový tlak a maximální rychlost nárůstů výbuchového tlaku**

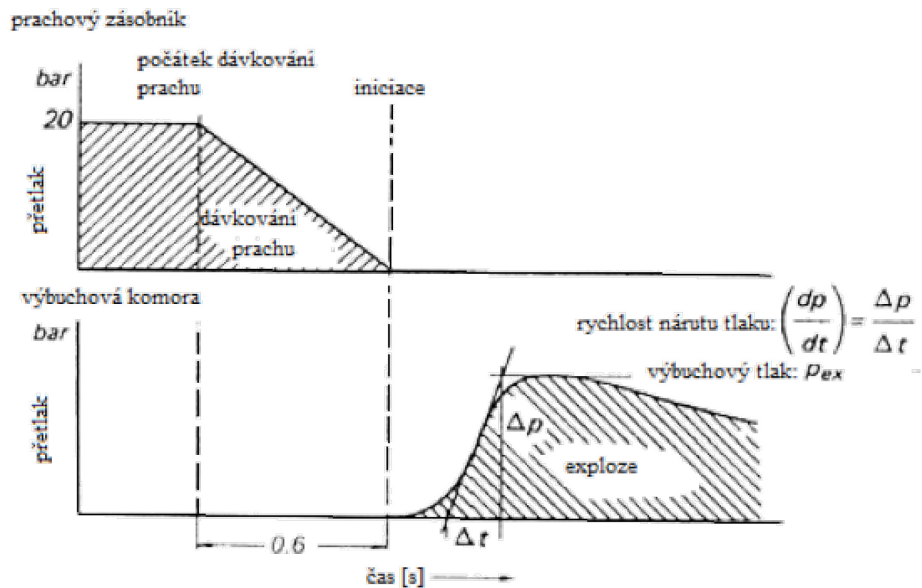
Nárůst tlaku během exploze prachovzduchové směsi je v současné době popsán dvěma charakteristickými vlastnostmi: maximálním výbuchovým tlakem  $p_{max}$  a maximální rychlosti nárůstů výbuchového tlaku  $(dp/dt)_{max}$ . Obě tyto charakteristiky jsou určovány současně za definovaných podmínek v uzavřené nádobě ve stejné sérii měření.

Maximální výbuchový tlak  $p_{max}$  prachu s chemicky definovaným složením lze také stanovit za určitých zjednodušujících předpokladů pomocí termodynamických údajů reaktantů a produktů, které se účastní reakce. Srovnání výsledků ukazuje, že výpočtem získáme obecně trochu vyšší hodnotu  $p_{max}$ , než která vychází experimentálním měřením. To proto, že některé ze zjednodušujících předpokladů platí pouze přibližně (například adiabatický průběh reakce). Experimentální určování hodnoty  $p_{max}$  je prováděno sérií měření v uzavřené nádobě se systematickou odchylkou koncentrace prachu. Prach je rozptýlen proudem vzduchu a iniciován pyrotechnickými iniciátory. Průběh tlaku je zaznamenáván pomocí tlakových snímačů. Výsledné hodnoty určování  $p_{max}$  závisí do jisté míry pouze na použité metodě a jsou uspokojivým způsobem opakovatelné.

Maximální nárůst výbuchového tlaku  $(dp/dt)_{max}$  prachovzduchové směsi o optimální koncentraci, určeného ze stejné série měření v nádobě o objemu 1 m<sup>3</sup> nebo standardizované nádobě o objemu 20 dm<sup>3</sup>, se nazývá hodnota  $K_{st}$ . Tato hodnota velmi závisí na zvolené testovací metodě, protože kromě kinetiky chemické reakce, je silně ovlivněna prouděním vzduchu, jenž zvyšuje prudkost výbuchu.

Všechny obtíže ve vývoji vhodných metod pro experimentální zjišťování hodnoty  $p_{max}$  nebo  $K_{st}$  byly pospány v úvodu této kapitoly. Potíže, jež musí být vzaty v úvahu, se vztahují k tvorbě prachovzduchových směsí. Jmenovitě se jedná o špatnou znalost rovnoměrnosti distribuce prachu ve zkušební nádobě a o nedostatečné znalosti o stavu proudění směsi kolem rozšiřovače. V současné době je považován postup na 1 m<sup>3</sup> zkušební nádobě podle ČSN EN 14034-1 a 2 (v Německu také podle VDI 3673) za standardní metodu. V této metodě, je prach vložen do prachového zásobníku o objemu 5 l pod tlakem 20 bar. Zásobník je uzavřen ventilem, který je ovládán rozbuškou. Po otevření ventilu vžene stlačený vzduch prach přes rozvířovač do prostoru 1m<sup>3</sup> zkušební nádoby. Po zpoždění 0,6 s je iniciována rozbuška. Prach by měl být za tuto dobu již kompletně rozptýlen uvnitř nádoby. Časové zpoždění 0,6 s odpovídá jistému, ale ne přesně definovanému, turbulentnímu stavu prachovzduchové směsi, který lze opakovat. Iniciace je způsobena dvěma pyrotechnickými iniciátory umístěnými uprostřed s celkovou energií odpovídající 10 kJ. Vedle 1 m<sup>3</sup> nádoby lze použít pro stanovení výbuchových parametrů i nádobu o objemu 20 l.

Graf 1 popisuje závislost tlaku na čase při vyprazdňování zásobníku s prachem (vrchní graf) a průběh exploze v nádobě (spodní graf). Maximum křivky popisující závislost tlaku na čase se nazývá výbuchový tlak  $p_{ex}$  a určuje se pro každý jednotlivý výbuch. Sklon tangenty úhlu v inflexním bodě se nazývá maximální rychlost nárůstu tlaku příslušného jednotlivého experimentu  $(dp/dt)_{ex}$ , to znamená  $(dp/dt)_{ex} = \Delta p / \Delta t$ . Experimenty s nižším časovým zpožděním iniciace (za jinak stejných podmínek) povedou ke zvýšení hodnoty  $(dp/dt)_{ex}$ , protože vzroste turbulence směsi navzdory menšímu množství prachu. Naopak zvýšíme-li časové zpoždění iniciace, získáme menší hodnotu  $(dp/dt)_{ex}$ , protože turbulence klesá v čase.

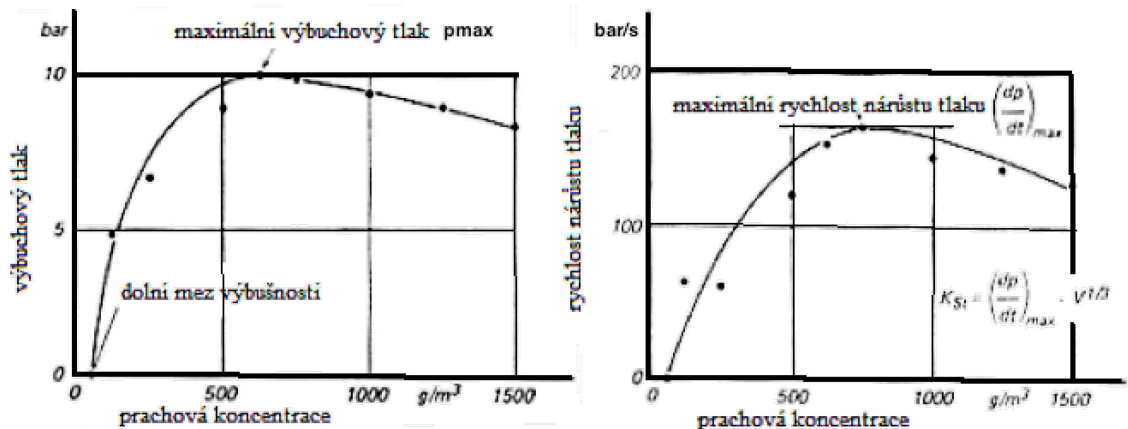


Graf 1: Křivky závislosti tlaku na čase[7]

Pro stanovení  $p_{max}$  a  $(dp/dt)_{max}$  je potřeba provést celou řadu měření v širokém rozsahu koncentrací. Tyto maximální hodnoty obou veličin  $p_{ex}$  a  $(dp/dt)_{ex}$  pak vytvoří křivky, jenž popisuje graf 2. Maximální hodnoty  $p_{max}$  a  $(dp/dt)_{max}$  leží běžně mezi dvojnásobkem až trojnásobkem stechiometrické koncentrace prachovzduchové směsi. Hodnota  $(dp/dt)_{max}$  určená na zkušební nádobě o objemu  $1 \text{ m}^3$  odpovídá přímo hodnotě  $K_{st}$ . Pokud ovšem bude tato hodnota určena na jiném zařízení, než bylo uvedeno, musí se přepočítat podle „kubického zákona“ (1), který poskytuje určité zjednodušení.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} \cdot V^{\frac{1}{3}} \approx konst. = K_{st} \quad (1)$$

Hodnota  $K_{st}$  se běžně vyjadřuje v jednotkách  $\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , tlak v barech a objem  $V$  v  $\text{m}^3$ . Hodnota  $K_{st}$  je nezbytně nutná pro seriózní návrh konstrukční protivýbuchové ochrany.



Graf 2: Maximální výbuchový tlak a rychlost nárůstu výbuchového tlaku [4]

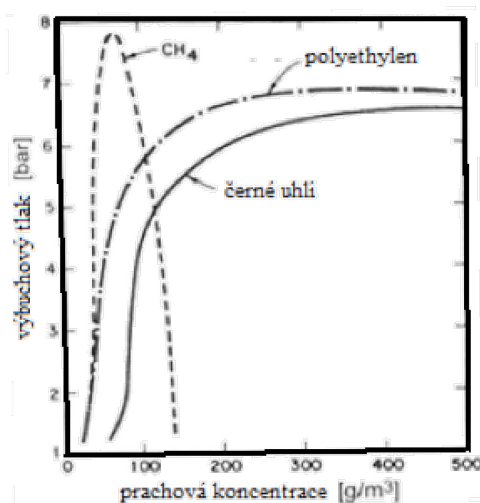
Prachy jsou klasifikovány na základě jejich hodnoty  $K_{st}$  do tří tříd výbušnosti:

- St 1:  $0 < K_{st} \leq 200 \text{ bar.m.s}^{-1}$
- St 2:  $200 < K_{st} \leq 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$
- St 3:  $K_{st} > 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$

## 2.3 Dolní mez výbušnosti

Dolní mez výbušnosti prachovzduchové směsi je nejnižší koncentrace rozvřeného prachu v oblaku, pod níž i přes působení dostatečně silného iniciačního zdroje, již není možné šíření plamene ani výbuchu. Dolní mez výbušnosti se určuje podle normy ČSN EN 14034-3 ve 20 l nebo 1 m<sup>3</sup> zkušební nádobě.

V této metodě se však neměří koncentrace prachu v nádobě, místo toho se zde předpokládá, že navážený prach je rovnoměrně rozptýlen ve zkušební nádobě. Avšak, při pohledu na diskuzi výše zjistíme, že tento předpoklad je nereálný. Graf 3 ukazuje příklad křivek výbuchového tlaku v závislosti na koncentraci uhelného a polyethylenového prachu měřeného ve 20 l zkušební nádobě. Tyto křivky se velmi odlišují od křivky hořlavého plynu (v tomto případě metanu), který je zde zahrnutý pro srovnání. Křivky obou prachů mají podobný tvar, avšak polyethylen má nižší dolní mez výbušnosti a o něco vyšší maximální výbuchový tlak. To je způsobeno skutečností, že polyethylen se odpaří ze 100 %, zatímco uhelný prach má pouze 37 % těkavých složek a také proto, že polyethylen má vyšší podíl H/C než uhlí. Polyethylen má stejnou LEL jako methan. Důvod proč tomu tak je, že nízké koncentrace zcela odpařeného polyethylenu reagují podobně jako metan.



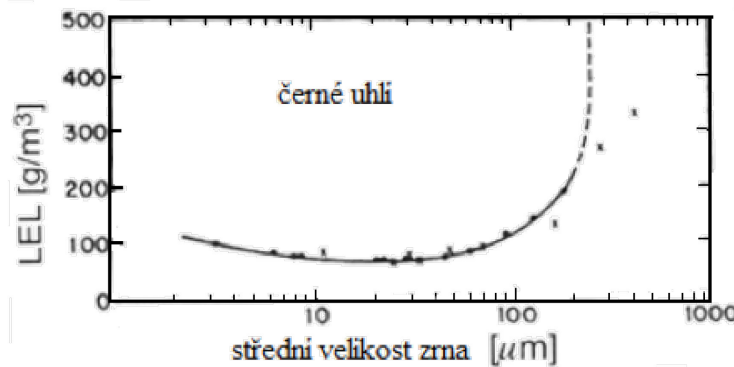
Graf 3: Vliv koncentrace hořlavé látky na výbuchový tlak pro dva prachy a jeden plyn [4]

Metan vykazuje velmi nízkou horní mez výbušnosti, což je koncentrace, za kterou již nemůže dojít k výbuchu (je charakteristická nedostatkem oxidačního prostředku). Takováto horní mez výbušnosti je obvykle pozorovaná u směsí hořlavých plynů se vzduchem. U prachovzduchových směsí však neexistuje. Možné vysvětlení pro toto chování u mnoha prachů je, že pevná fáze, předtím než může hořet ve směsi se vzduchem, musí být nejprve zplyněna. Vytvoří-li se dostatečné množství těkavých hořlavých složek s koncentrací nad LEL, pak se může plamen šířit směsí tak rychle, že budou vznikat další těkavé složky, které budou podporovat proces hoření bez ohledu na stávající přebytek prachu. Mimo jiné je právě toto důvod, proč u prachů, na rozdíl od plynů jako je metan, neexistuje horní mez výbušnosti.

Kvůli velkým místním a časovým odchylkám od prachové koncentrace (sedimentace a znovu rozvření prachu) nemá LEL obecně stejně velký význam v bezpečnostních technologiích jako je tomu u plynů. Jedinou výjimkou jsou technické procesy, ve kterých je neustále udržována trvalá koncentrace prachu. Jako příklad lze uvést elektrostatické práškové lakování, tedy procesy, které v poslední době rostou na významu.

Pro experimentální určení dolní meze výbušnosti se používá stejné zařízení a metoda, jako při určování hodnot  $p_{max}$  a  $K_{st}$ . Pro zkušební zařízení 20 l se používá iniciátor o energii 1 – 2 kJ. Na 20 l zkušebním zařízení se obecně používá standardní iniciátor s energií 10 kJ, pro účely stanovení LEL je to však velmi mnoho. Stanovení se

začíná s výbušnou koncentrací, která se posupně snižuje do doby, než vymizí exploze. V případě, že k iniciaci již nedojde, provedou se 3 další měření se stejnou koncentrací, aby se vyloučily náhodné odchylky koncentrace prachu. Vyhodnocení toho zda došlo, či nedošlo k iniciaci, se provede na základě tlakového rozdílu (v případě že exploze nastane, je  $\Delta p > 0,5$  bar; v případě, že nenastane, je  $\Delta p \leq 0,5$  bar). Koncentrace prachu v  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , kterou již nebylo možné iniciovat touto metodou, se nazývá dolní mez výbušnosti. Rozptyl experimentálních metod na určení LEL, je spíše větší z důvodu obtížného vytvoření opakovatelného homogenního rozptýlení prachu ve zkušebním zařízení. Proto je měření zatíženo systematickou chybou.



Graf 4: Závislost LEL na střední velikosti zrna [4]

Jak lze vidět na grafu 4, je u částic menších než  $100\mu\text{m}$  téměř konstantní mez výbušnosti. Prachový oblak tvořený částicemi se střední velikostí zrna větších než  $500\mu\text{m}$  je prakticky nevýbušný. Na dolní mez výbušnosti má také vliv počáteční teplota a tlak. S rostoucí teplotou LEL klesá, naopak s rostoucím tlakem stoupá.

### 3 Legislativní a normativní požadavky

V této kapitole je snahou charakterizovat právní předpisy, které se vztahují k problematice rizika výbuchu v dopravních systémech určených pro přepravu sypkých hořlavých hmot, a také zde uvádím způsoby, jakými se přistupuje k řešení rizika výbuchu v dopravních systémech ve vybraných státech, jako je Německo či Spojené státy americké.

Česká republika se po vstupu do Evropské unie, zavázala k přijetí řady norem, zákonů a nařízení, které následně implementovala do svých národních předpisů. Na úrovni Evropské unie vznikly dva předpisy, které se vztahují k explozivnímu prostředí.

Tím prvním je Směrnice Evropského parlamentu a Rady 94/9/ES, z 23. března 1994 o sblížení právních předpisů členských států pro zařízení a ochranné systémy určené k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu [20]. Toto nařízení se tedy týká zařízení a ochranných systémů určených pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu a je známé také pod označením ATEX 95 nebo ATEX 100, přičemž jsou zde stanoveny požadavky na výrobce zařízení. Požadavky ATEXu 95 byly u nás implementovány do nařízení vlády č. 23/2003 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu ve znění pozdějších předpisů (dále jen vzpp) [11].

Druhým předpisem, který vznikl na úrovni Evropské unie, je Směrnice Evropského parlamentu a Rady EU 1999/92 ze dne 16. prosince 1991 o minimálních požadavcích na zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců vystavených prostředí s nebezpečím výbuchu, která se označuje jako ATEX 137 [21]. V tomto nařízení jsou stanoveny požadavky na provozovatele zařízení a u nás vstoupilo v platnost nařízením vlády č. 406/2004 Sb., o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu vzpp[12].

Je zde ovšem nutno také zmínit Směrnici Evropského parlamentu a Rady 2006/42/ES ze dne 17. Května 2006 o strojních nařízeních [19], která v České republice vyšla pod nařízením vlády č. 176/2008 Sb., o technických požadavcích na strojní zařízení vzpp[10].

### 3.1 Povinnosti výrobce a dodavatele zařízení

Podle § 4 NV 176/2008 Sb., o technických požadavcích na strojní zařízení vzpp, může být zařízení uvedeno na trh, pouze tehdy, bude-li k dispozici technická dokumentace podle oddílu A přílohy č. 7 k tomuto nařízení a jen tehdy, je-li zařízení provedeno tak, aby za předpokladu, že je řádně instalováno, udržováno a používáno pro účely, ke kterým je určeno, a za podmínek, které lze důvodně předvídat, neohrožovalo zdraví a bezpečnost osob a případně domácí zvířata a majetek, a pokud tak stanoví toto nařízení ani životní prostředí.

Zkráceně se dá říci, že na trh může být uvedeno pouze zařízení, které neohroží životy, zdraví a majetek – jinými slovy – bezpečné zařízení. Takovéto zařízení musí být viditelně, čitelně a nesmazatelně opatřeno označením CE.

Podle přílohy 1 tohoto nařízení je výrobce nebo jeho zplnomocněný zástupce povinen zajistit posouzení rizika s cílem jeho snížení a určit požadavky na ochranu zdraví a bezpečnosti, které platí pro strojní zařízení. Strojní zařízení musí být navrženo a konstruováno s přihlédnutím k výsledkům posouzení rizika.

Jedním z rizik, kterým se musí každý výrobce zabývat, je i riziko výbuchu. Zařízení musí být navrženo a konstruováno tak, aby se zabránilo jakémukoli nebezpečí výbuchu způsobenému samotným strojním zařízením nebo plyny, kapalinami, prachem, párami nebo jinými látkami vznikajícími nebo používanými ve strojním zařízení a musí splňovat požadavky, které jsou vedeny v NV 23/2003 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu [10].

Podle § 1 odst. 2 písm. a NV 23/2003 Sb., se za zařízení považují stroje, které jsou samostatně nebo ve spojení určeny pro výrobu, přenos, uskladňování, měření, regulaci a přeměnu energie nebo pro zpracování materiálů a které jsou schopny způsobit výbuch v důsledku svých vlastních potenciálních zdrojů iniciace [11]. Za takovýto stroj lze považovat i korečkový dopravník, jelikož, jak bude doloženo v teoretické části, vyskytuje se v něm výbušná atmosféra.

Podrobné požadavky jsou popsány v příloze 2 tohoto nařízení. Uvedu zde pouze základní obecné požadavky, které musí výrobce nebo dodavatel přijmout. Těmi požadavky jsou:



- a) především, pokud je to možné, zabránit vzniku výbušné atmosféry, která by mohla být vytvářena nebo uvolňována samotným zařízením nebo ochranným systémem,
- b) zabránit iniciaci výbušné atmosféry při zohlednění vlastností všech elektrických a neelektrických zdrojů iniciace,
- c) kde je přesto pravděpodobný vznik výbuchu, který by mohl přímo nebo nepřímo ohrozit osoby, popřípadě též domácí a hospodářská zvířata nebo majetek, zajistit okamžité potlačení výbuchu nebo omezit rozsah účinku plamenů výbuchu a výbuchového tlaku na dostatečnou úroveň bezpečnosti [11].

### 3.2 Povinnosti provozovatele zařízení

Tak jako na výrobce, tak i na provozovatele jsou kladeny požadavky v oblasti zajištění bezpečného provozu strojních zařízení. Pokud provozovatel zaměstnává osoby v pracovněprávních vztazích, vztahuje se také na něj ustanovení § 102 odst. 1, zákoníku práce č. 262/2006 Sb., vzpp, kde je uvedeno, že zaměstnavatel je povinen vytvářet bezpečné a zdraví neohrožující pracovní prostředí a pracovní podmínky vhodnou organizací bezpečnosti a ochrany zdraví při práci a přijímáním opatření k předcházení rizikům [28]. To se týká i provozu strojů a zařízení.

Bližší požadavky na provozovatele zařízení však klade, již zmiňované, nařízení vlády č. 406/2004 Sb., o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu vzpp. V tomto nařízení se však místo provozovatele používá termín zaměstnavatel. Obdobně jako je tomu u výrobce zařízení tak i zaměstnavatel posuzuje rizika a přijímá opatření. Podle § 2 odst. 1 tohoto nařízení, přijímá technická nebo organizační opatření přiměřená povaze provozu v souladu se zásadami, které uplatňuje podle charakteru činností v následujícím pořadí

- a) předchází vzniku výbušné atmosféry,
- b) zabránění iniciace výbušné atmosféry
- c) snížení škodlivých účinků výbuchu tak, aby bylo zajištěno zdraví a bezpečnost zaměstnanců [12].

Technická nebo organizační opatření může zaměstnavatel v případě potřeby kombinovat, či případně doplňovat dalšími opatřeními, které zamezují šíření výbuchu.

Zaměstnavatel je povinen tyto opatření pravidelně, v určených intervalech, přehodnocovat při každé změně, která je významná z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví při práci.

Zaměstnavatel posuzuje rizika výbuchu komplexně se zřetelem na všechny okolnosti práce v prostředí s nebezpečím výbuchu zejména se zřetelem na:

- a) pravděpodobnost výskytu výbušné atmosféry a její trvání
- b) pravděpodobnost výskytu zdrojů iniciace, včetně možných výbojů statické elektřiny a na pravděpodobnost, zda jsou aktivní a účinné,
- c) používaná zařízení včetně instalace, látky, technologické procesy, pracovní postupy a jejich možné vzájemné působení,
- d) rozsah předpokládaných účinků výbuchu [12].

Při posuzování rizika výbuchu však nesmí zapomenout i na prostory, do nichž může výbušná atmosféra proniknout otvory nebo jinými cestami.

Jakmile zaměstnavatel provede technické nebo organizační opatření a posoudí rizika, provede klasifikaci prostorů a stanoví prostory s nebezpečím výbuchu a prostoru bez nebezpečí výbuchu. Dále zabezpečí plnění dalších požadavků, které jsou uvedeny v příloze č. 2 k NV 406/2004 Sb., vzpp, jako jsou organizační opatření týkající se školení zaměstnanců, písemných pokynů a příkazů k provedení prací, opatření k ochraně před výbuchy, a označí místa vstupů do prostoru s nebezpečím výbuchu bezpečnostními značkami výstrahy s černými písmeny EX. Zaměstnavatel má také povinnost vypracovat písemnou dokumentaci o ochraně před výbuchem a udržovat ji v souladu se skutečným stavem [12].

Veškeré tyto požadavky platí i na provozovatele zařízení, která byla uvedena do provozu a používání přede dnem nabytí účinnosti NV 406/2004 Sb., vzpp. Existovalo přechodné období, které však skončilo 30. červnem 2006.

### **3.2.1 Obsah dokumentace o ochraně před výbuchem podle § 6**

Tato dokumentace musí být vypracována ještě před zahájením výkonu práce. Při změně pracoviště, zařízení nebo organizace práce, které jsou významné z hlediska zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci musí být aktualizována.

Písemná dokumentace se zpracovává v návaznosti na výsledky posuzování rizika výbuchu a musí obsahovat:

- a) provedení identifikace nebezpečí a specifikace ohrožení a posouzení rizika výbuchu,
- b) přijetí preventivních a ochranných opatření
- c) klasifikaci prostorů podle bodu 2.2.2
- d) určení prostorů a zařízení, u nichž budou uplatňovány požadavky podle přílohy č. 2 k nařízení vlády č. 406/2004 Sb., vzpp
- e) zřízení, používání a udržování pracoviště včetně technického vybavení, stejně jako instalace, uvedení do provozu, provoz, údržba zařízení včetně monitorovacích a výstražných zařízení
- f) v případech, kdy na jednom pracovišti pracují zaměstnanci dvou a více zaměstnavatelů, vymezí pravidla jejich spolupráce, jakož i opatření a postupy k jejich uskutečňování [12].

### **3.2.2 Klasifikace prostorů**

Podle přílohy č. 1 k NV 406/2006 Sb., vzpp se prostory klasifikují na prostory s nebezpečím výbuchu a prostory bez nebezpečí výbuchu.

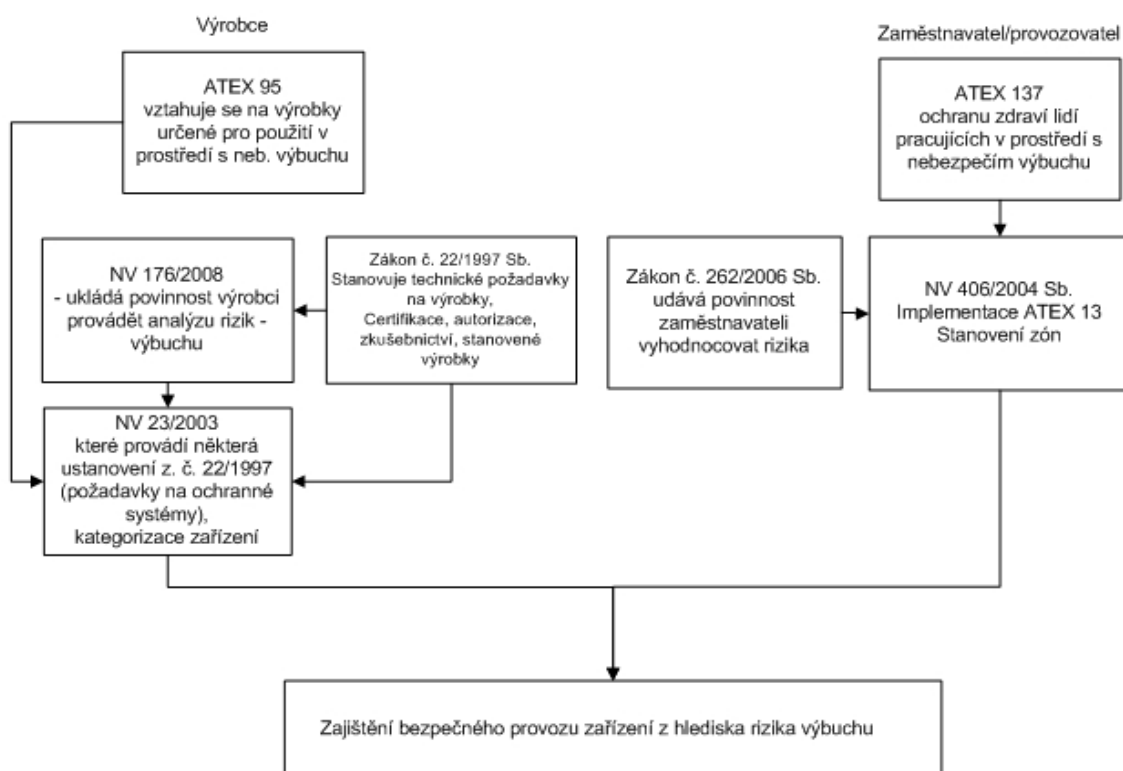
Za prostor s nebezpečím výbuchu se podle tohoto nařízení považuje prostor, ve kterém se výbušná atmosféra může vyskytnout v množství vyžadující opatření k zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců. Naopak prostor, ve kterém se nepředpokládá výskyt výbušné atmosféry v množství vyžadujícím opatření k zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců, je považován za prostor bez nebezpečí výbuchu.

V případě dopravníků pro přepravu sypkých hořlavých hmot existuje riziko vytvoření převážně prachovzduchových směsí. Podle míry pravděpodobnosti trvání výbušné atmosféry se prostory s nebezpečím výbuchu dělí na:

- Zóna 20 – je prostor, ve kterém je výbušná atmosféra tvořena oblakem zvířeného hořlavého prachu ve vzduchu přítomná trvale nebo po dlouhou dobu nebo často.
- Zóna 21 – je prostor, ve kterém je občasný vznik výbušné atmosféry tvořené oblakem zvířeného hořlavého prachu ve vzduchu pravděpodobný.

- Zóna 22 – je prostor, ve kterém vznik výbušné atmosféry tvořené oblakem zvířeného hořlavého prachu ve vzduchu není pravděpodobný, a pokud výbušná atmosféra vznikne, bude přítomná pouze výjimečně a pouze po krátký časový úsek.

Za zdroj, který může vytvářet výbušnou atmosféru, se považují vrstvy, usazeniny a hromady hořlavého prachu. Podle § 4 odst. 2, písm. c, zákona č. 133/1985 Sb., o požární ochraně vzpp., se za takovou to vrstvu považuje souvislá vrstva už od tloušťky 1 mm [27]. Obrázek 3 zobrazuje schéma legislativního rámce, který má zajistit bezpečný provoz zařízení ať už ze strany výrobce či provozovatele.



Obrázek 3: Schéma legislativního rámce

### 3.3 Normativní požadavky

Mimo požadavky právních předpisů, podle kterých by měl postupovat každý výrobce nebo provozovatel zařízení, existují také požadavky norem, které se vztahují k riziku výbuchu u strojních zařízení a včetně protivýbuchové ochrany. Bohužel dodnes však v České republice neexistuje žádná norma, která by se blíže zabývala rizikem výbuchu v dopravních systémech a řešila tento problém komplexněji, což vede k roztržitému požadavku do celé řady norem, které jsou poměrně obecné a ne vždy je lze

zcela aplikovat na korečkový dopravník. Výrobce nebo provozovatel zařízení se tak musí orientovat v celé řadě norem a měl by postupovat při řešení problematiky rizika výbuchu podle následujících norem:

- ČSN EN ISO 12100-1: Bezpečnost strojních zařízení - Základní pojmy, všeobecné zásady pro konstrukci - Část 1: Základní terminologie, metodologie
- ČSN EN ISO 12100-2: Bezpečnost strojních zařízení - Základní pojmy, všeobecné zásady pro konstrukci - Část 2: Technické zásady
- ČSN EN 1127-1: Výbušná prostředí – Zamezení a ochrana proti výbuchu – Část 1: Základní pojmy a metodologie
- ČSN EN 13237: Prostředí s nebezpečím výbuchu - Termíny a definice pro zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu
- ČSN EN 60079-10-2: Výbušné atmosféry - Část 10-2: Určování nebezpečných prostorů - Výbušné atmosféry s hořlavým prachem
- ČSN EN 14373: Systémy pro potlačení výbuchu
- ČSN EN 14491: Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu prachu
- ČSN EN 15089: Systémy pro oddělení výbuchu
- ČSN 127040: Vzduchotechnická zařízení. Odsávání škodlivin od strojů a technických zařízení. Všeobecná ustanovení.

Navíc jak ukázaly výsledky experimentu, postup podle některých těchto norem není zcela optimální z důvodu speciálního geometrického tvaru dopravníku a instalace uvnitř elevátoru, čímž jsou myšleny jednotlivé korečky [17].

### **3.4 Přístup k problematice rizika výbuchu za hranicemi ČR**

Například v Německu nebo Spojených státech amerických, je situace poněkud lepší v tom smyslu, že tyto země zde mají předpisy, které se přímo vztahují k problematice protivýbuchové ochrany u korečkových dopravníků.

V Německu existuje směrnice VDI 2263, které má 9 částí. Část 8 a 8.1 se pak přímo zabývá požární a výbuchovou ochranou korečkových dopravníků. Obdobně jako v Německu, tak i ve Spojených státech existuje norma, která se zabývá požární a výbuchovou ochranou korečkových dopravníků. Tato norma byla vydána organizací

NFPA pod označením 61 a týká se prevence požárů a výbuchu v zemědělských a potravinářských provozech.

### 3.4.1 VDI 2263 část 8 a 8.1

V části 8 této směrnice je popsáno jakým způsobem vyhodnotit riziko požáru a výbuchu korečkových dopravníků. Podle materiálů, ze kterých je korečkový dopravník (pásy, korečky apod.) vyroben a podle třídy hořlavosti přepravovaného materiálu (třída hořlavosti prachu se stanovuje na základě směrnice VDI 2263 část 1), se stanovují požadavky na úroveň požární ochrany korečkového dopravníku [24].

Při určování rizika výbuchu u elevátorů se vychází zejména z požárně-technických charakteristik přepravovaného materiálu. Pro riziko výbuchu je nejdůležitější stanovení dolní meze výbušnosti (ČSN EN 14034-3), maximálního výbuchového tlaku (ČSN EN 14034-1) a maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku (ČSN EN 14034-2). Na základě dolní meze výbušnosti se stanoví, jestli může nastat v korečkovém dopravníku výbušná atmosféra a podle doby trvání této atmosféry se určí příslušná zóna (viz. kapitola 3.2.2). Poté co se stanoví příslušná zóna, se provede vyhodnocení účinných zdrojů iniciace. Vyhodnocují se iniciační zdroje, které mohou vzejít z provozu zařízení (horký povrch, tření apod.), iniciační zdroje, které mohou být zaneseny do zařízení z vnějšku (např. kovová matice – byla odebrána z paty příjmového elevátoru společně s ječným prachem, viz obrázek 4) a iniciační zdroje, které mohou představovat i samotný přepravovaný materiál (samovznícení). V normě jsou uvedeny i ochranná opatření, jak proti požáru, tak proti výbuchu [24].



Obrázek 4: Matice z příjmového elevátoru

V části 8.1 jsou uvedeny příklady preventivní protivýbuchové ochrany u korečkových dopravníků, způsob dimenzování odlehčovacích otvorů, použití bezplamenných odlehčovacích zařízení (tzv. flameless) nebo výfukového potrubí a jsou zde také formuláře, podle kterých lze postupovat při provádění analýzy rizik [25].

### **3.4.2 NFPA 61**

Ve Spojených státech platí norma NFPA 61, která se zabývá prevencí požárů a výbuchů prachů v zemědělských a potravinářských provozech. Jedna z částí této normy se týká přímo korečkových dopravníků, kde jsou stanoveny požadavky na korečkový elevátor z pohledu protivýbuchové ochrany. Obdobně jako v Německé VDI 2263 část 8 a 8.1 jsou i zde stanoveny požadavky na nehořlavost materiálů, ze kterých je dopravník vyroben. Musí zde být například inspekční otvory, které umožní čištění jak hlavy, tak i paty elevátoru. Každý elevátor musí být opatřený detektorem pohybu, který vypne napájení motoru v případě, že pás zpomalí na 80 % své normální provozní rychlosti a zároveň musí být zastaven přísun přepravovaného materiálu. Pásky elevátoru a kryty řemenic musí být odolné proti ohni a nesmí mít povrchový odpor větší než  $100 \text{ M}\Omega/\text{m}^2$ . Všechny nově instalované elevátory musí být ve stanovených intervalech opatřeny minimálně membránami pro odlehčení výbuchu, přičemž odlehčení výbuchu není přípustné uvnitř budov [13].

## 4 Dopravní systémy

Prakticky každý technologický proces je spojeny s manipulací materiálu. K tomuto účelu se používají různé dopravní systémy, které usnadňují a urychlují manipulaci s přepravovaným materiálem, ale také zvyšují její bezpečnost. Bohužel i dopravní systémy sebou nesou určitá rizika, na která by měl každý zodpovědný výrobce nebo provozovatel brát ohledy. V této kapitole jsou popsány základní druhy dopravních a manipulačních zařízení, přičemž největší pozornost je zde věnována korečkovým dopravníkům, jelikož jsou to nejčastěji používané dopravníky pro vertikální přepravu a veškeré měření, které jsem prováděl, se vztahují právě k tomuto typu dopravníku.

Přepravovaný materiál má výrazný vliv na výběr vhodné manipulační metody a tedy i na volbu použitých prostředků. Během technologického procesu změní materiál několikrát své vlastnosti a charakteristické znaky. Mezi vlastnosti, které mají velký význam pro techniky, konstruktéry či provozovatele dopravních zařízení patří:

- a) zrnitost
- b) vlhkost
- c) měrná, objemová a sypná hmotnost
- d) sypný úhel
- e) úhel vnitřního a vnějšího tření
- f) soudržné napětí
- g) napěťový stav sypkého tělesa [14]

Pro stanovení rizika výbuchu jsou důležité zejména první dvě vlastnosti, kterými jsou zrnitost materiálů a jeho vlhkost.

Z pohledu protivýbuchové ochrany patří mezi důležité charakteristické vlastnosti přepravovaného materiálu také prašnost. Tedy vlastnost popisující tendenci tvořit prachový oblak. V České republice však žádný dokument, který by stanovoval, jakým způsobem tuto vlastnost měřit neexistuje, a proto se ani neměří. Existuje však v Německu pod označením VDI 2263 část 9, ve kterém je stanoven způsob určování prašnosti u sypkých materiálů. Tato vlastnost pak hraje důležitou roli při určování zón [26]. Tyto vlastnosti označujeme jako mechanické vlastnosti sypkého materiálu.



## 4.1 Mechanické vlastnosti sypkého materiálu v protivýbuchové ochraně

### Zrnitost

Zrnitost je jedna z důležitých vlastností přepravovaného materiálu, která má rozhodující význam pro skutečnost, zda bude existovat riziko výbuchu či nikoliv. Za prachové částice považujeme částice, které mají střední velikost zrna menší než 500  $\mu\text{m}$ . Obecně platí, že menší prachové částice dosahují větších výbuchových parametrů a nižší hodnoty LEL.

U sypkého materiálu je velice obtížné stanovit velikost i jediného zrníčka vzorku, jelikož sypká hmota je tvořena různými velikostmi zrna různých tvarů. Nejčastěji se uvažuje největší rozměr zrna nebo největší rozměry ve dvou na sobě kolmých rovinách. Ke stanovení střední velikosti zrna se používá síťová analýza (síťový rozbor). Tento rozbor se provádí na soustavě konkrétních sít různé okatosti seřazených od nejmenší po největší okatost síta, které jsou umístěné na vibrujícím zařízení. [14].

Střední velikost zrna se určí podle následujícího vztahu (2):

$$d_{prům} = \frac{m_1 \cdot \frac{d_0 + d_1}{2} + m_2 \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} + \dots + m_{n-1} \cdot \frac{d_{n-2} + d_{n-1}}{2} + m_n \cdot \frac{d_{n-1}}{2}}{m_1 + m_2 + \dots + m_{n-1} + m_n} \quad (2)$$

- $d_{prům}$  ... střední velikost částic (mm),
- $m_1 \dots m_n$  ... hmotnosti podílů zachycených na jednotlivých sítích (g),
- $m_n$  ... hmotnost podílu zachyceného na misce (g),
- $d_0$  ... velikost ok síta pro předběžné třídění (mm)
- $d_1 \dots d_{n-1}$  ... velikost ok jednotlivých sít na prosévacím stroji (mm),

Během manipulace s přepravovaným materiálem dochází k otěru částic a jejich postupnému zmenšování, čímž vznikají jemnější frakce.

### Vlhkost

Druhou důležitou vlastností je vlhkost, která je definována jako obsah vody ve vzorku v procentech hmotnosti. Sypký materiál, který je schopen zadržovat určitý obsah

vody, nazýváme vlhkým materiálem. U takového materiálu ulpívá voda na zrnech. Vlhkost a nasákavost je důležitá k posouzení náchylnosti k nalepování a namrzání sypké hmoty na dopravních systémech, ale také k odhadnutí, jestli je daný materiál výbušný. Je nutno však podotknout, že obsah vody se během manipulace v čase mění. Největší rozsah výbušnosti má suchá směs. U prachů se s rostoucím obsahem vody posouvá dolní mez výbušnosti směrem k vyšším hodnotám. Pokud obsah vody přesáhne 20 hmotnostních %, prach se stává nevýbušným. Vlhkost neboli obsah vody, stejně tak jako obsah popele, obsah prchavé hořlaviny a obsah fixního uhlíku, se stanovuje základním chemickým rozbořem každého zkoušeného prachu [3][14].

## 4.2 Rozdělení dopravních a manipulačních zařízení

Dopravní a manipulační zařízení můžeme rozdělit podle skript *Dopravní a manipulační zařízení I* do několika kategorií [14]:

- a) z hlediska dráhy, po které se pohybuje dopravovaný materiál
  - a. s pohybem po volné dráze (nezdvihová zařízení)
  - b. s pohybem materiálu po vázané dráze (vedená zařízení)
  - c. s pohybem nezávislým na dráze
- b) podle úklonu dráhy
  - a. doprava vodorovná (horizontální) – do 2 °
  - b. doprava úklonná – od 2 ° do 45 °
  - c. doprava svislá (vertikální) – nad 45 °
- c) podle silového působení na dopravovaný materiál
  - a. gravitační (vlastní tíhou)
  - b. s mechanickým přenosem sil
  - c. doprava v pomocném médiu (hydraulická, pneumatická)
- d) podle manipulovaného materiálu
  - a. se sypkými hmotami
  - b. s kusovitým materiálem
  - c. s hromadným kusovitým materiálem
  - d. osob
- e) podle funkce a konstrukce
  - a. zdvihací zařízení

- b. zařízení plynulé dopravy
- c. prostředky přerušované dopravy

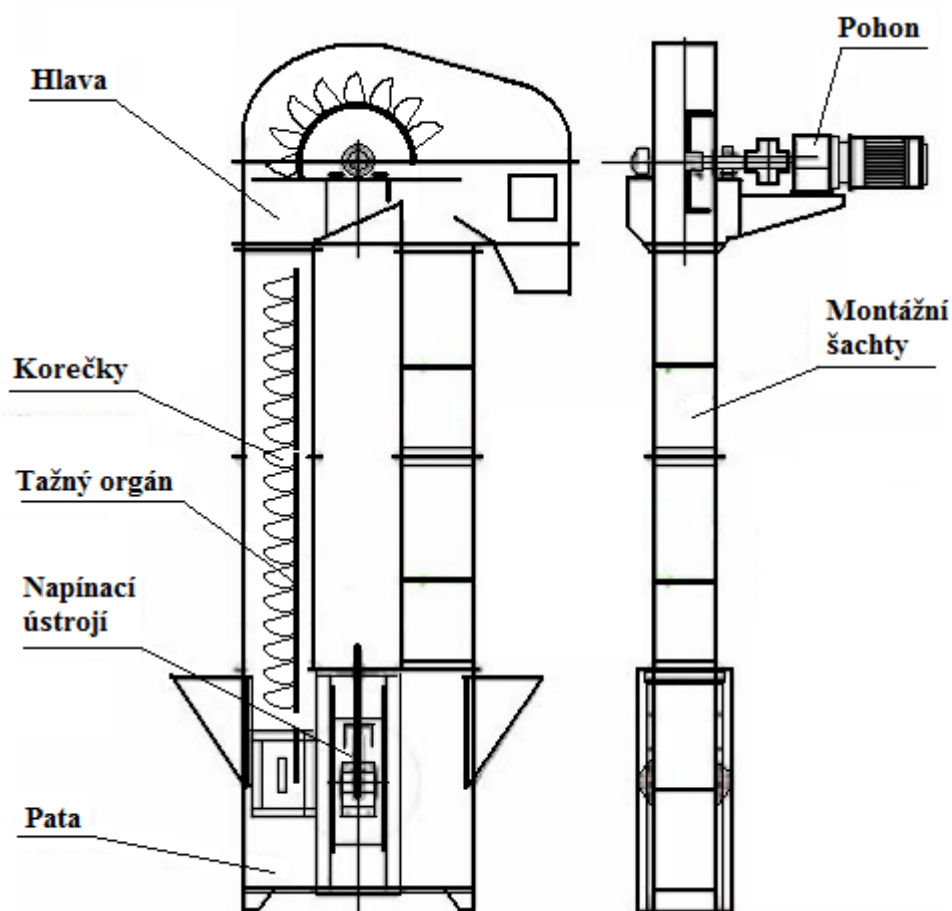
### 4.3 Korečkové elevátory

Jedná se o mechanický dopravník pro svislou nebo šikmou dopravu, jehož unášecím (tažným) prvkem je nekonečný dopravní pás, řetěz nebo dvojice řetězu s nosným prvkem - korečkem. Tento dopravník je určen pro svislou a úklonnou dopravu jemnozrnných a drobně kusovitých materiálů (cement, uhlí, písek, obiloviny, chemikálie atd.) se zrnitostí 0 až 60 mm s maximem zrn pod 10 mm, které mají malou vlhkost, při teplotách  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dopravní výška je limitována pouze pevností tažného prvku. Běžná dopravní výška pro malá a střední dopravní množství (do  $160\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ) se pohybuje kolem 40 m u dopravního pásu. Dopravní pás, jako tažný prvek, umožňuje dosáhnout vysokých rychlostí a díky tomu i vysokého dopravního výkonu až  $1000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Oproti tomu dosahují řetězové dopravníky menších rychlostí, ale můžou dopravovat do výšky až 200 m [9][15].

Stále častěji se tento dopravník využívá i v potravinářském či chemickém průmyslu nebo jako dopravník pro mezioperační manipulaci. Jeho výhody spočívají především v nízké spotřebě energie, malém vestavěném prostoru, relativně vysokém dopravním výkonu, spolehlivém provozu a u řetězových dopravníků je to navíc provoz v horkém prostředí.

Korečkové elevátory můžeme rozdělit na:

- Svislé
  - Gravitační
  - odstředivé
- šikmé
  - gravitační
  - odstředivé
- lomené



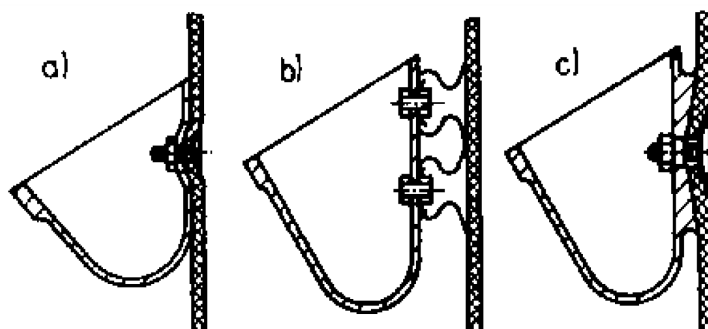
Obrázek 5: Hlavní části korečkového elevátoru[9]

Na obrázku 5 jsou popsány hlavní části korečkového elevátoru. V hlavě elevátoru je umístěná poháněcí stanice s pohonem. Pro menší výkony (cca do 12 kW) se používá převodových motorů. Pro větší výkony se spíše využívají asynchronní motory s kotvou nakrátko s neregulační hydrodynamickou spojkou nebo s pružnou spojkou. U tohoto typu dopravníku se nejčastěji používá mechanická jedno-rychlostní kuželočelní převodovka. Na první hřídeli převodovky bývá malý pomocný motor, který je dimenzovaný pouze na překonání odporů prázdného dopravníku. Využívá se hlavně při revizích, opravách apod. V poháněcí stanici je také uložena brzda, která udržuje tažný prvek v klidu.

Ve spodní části dopravníku je umístěná vratná a napínací stanice s napínacím ústrojím, která je vybavena stejným bubnem nebo řetězovým kolem, jako poháněcí stanice a způsobuje předpětí tažného prvku (orgánu). K předpětí však často stačí vlastní tíha dopravního pásu s korečky. Pokud nestačí, tak se tažný prvek napíná pomocí závaží nebo šroubů.

Rozlišujeme dva typy konstrukce elevátoru – otevřené a uzavřené. V prvním případě je nosná konstrukce elevátoru tvořena zpravidla příhradovou ocelovou konstrukcí. Ve druhém případě ji tvoří tzv. montážní šachta. Ta může buď stát a je přitom zakotvena na konstrukci vratné stanice anebo může být zavěšena na konstrukci poháněcí stanice.

Tažný prvek nebo také tažný orgán dopravníku je tvořen buď nekonečným pásem, nebo řetězem. Používají se buď gumové nebo polyvinyl chloridové (PVC) pásy. Ty gumové jsou vhodné pro teploty do 80 °C a PVC do 130 °C. Korečky se k pásu upevňují šrouby se zvětšenou kuželovou hlavou (obrázek 6). Zadní strana bývá buď prolisována, nebo jinak vhodně upravena, tak aby vnitřní strana pásu se šrouby byla rovná a umožnila tak hladný přechod korečků přes buben. Pokud nebude tažný prvek dostatečně napnut napínacím ústrojím, může dojít k jeho vychýlení a způsobit tak iniciaci horkým povrchem.



Obrázek 6: Způsob upevnění korečků šrouby k dopravnímu pásu[9]

V horkých provozech, v provozech kde je nutná doprava do větších výšek nebo při dopravě abrazivního materiálu se používá jako tažný prvek řetěz. Pro zvýšenou odolnost proti otěru se používají tepelně zpracované nebo vysokopevnostní článkové řetězy. Způsob upevnění korečků k řetězům demonstruje obrázek 7.



Obrázek 7: Způsob upevnění korečků k řetězu[9]

Nosným prvkem je koreček, který bývá vyroben z lisovaného nebo svařovaného plechu o tloušťce od 1 mm až po 8 mm. Korečky mívají různý tvar. V potravinářském a chemickém průmyslu se používají korečky vyrobené z umělých hmot, jako jsou nylon, uretan, HD polyethylen apod. Z pohledu protivýbuchové ochrany existuje riziko, že v případě nedostatečného napnutí tažného prvku, můžou kovové korečky narážet na stěnu šachty a zapříčinit tak iniciaci prachovzduchové směsi mechanickými jiskrami.

K přivádění materiálu do korečku slouží násypka. Zde je důležité zejména rovnoměrné plnění korečků, bez toho aniž by docházelo k jejich přeplňování. Korečky se plní nasypáváním, hrabáním nebo kombinovaným způsobem. Nejvhodnějším způsobem plnění, z hlediska energetické bilance a opotřebení korečků, je násypný způsob. Pro neabrazivní a lehké materiály, jako jsou potravinářské produkty, je vhodnější hrabavý způsob plnění korečků. Při nedokonalém násypném způsobu, kdy část materiálu propadáva kolem korečků do paty elevátoru, se používá kombinovaný způsob.

V hlavě elevátoru je umístěná výsypka, která slouží k odvádění materiálu z korečků. Korečky se mohou vyprazdňovat gravitačně, odstředivě, smíšeně nebo nuceně. U odstředivého vyprazdňování se materiál odvádí přes vnější hranu korečku působením odstředivé síly, na rozdíl od gravitačního vyprazdňování, kdy materiál odchází přes vnitřní hranu korečku působením tíhové síly. Nejvýhodnější z hlediska dopravního výkonu je ovšem smíšené vyprazdňování, které je kombinací obou předchozích variant vyprazdňování. Jak při nabírání, tak vyprazdňování materiálu dochází u sypkých směsí k rozvíření prachových částic. Zejména v patě a hlavě elevátoru. Při oddělování pásu od bubnu poháněcí stanice nebo od bubnu napínací stanice může vznikat statická elektřina, která může iniciovat vzniklou prachovzduchovou směs [15].

## 5 Popis technologie skladování

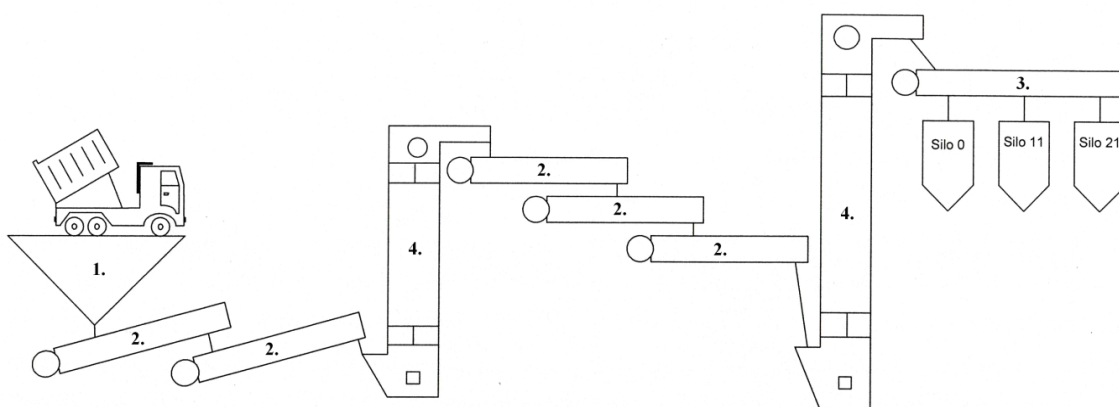
Měření, byla prováděna se vzorky odebranými ze sladovny pivovaru Radegast Nošovice a týkají se výhradně sladovnického ječmene a sladu. V této kapitole je popsán způsob výroby sladu ze sladovnického ječmene, jelikož přeměna ječmene na slad má vliv na nárůst výbuchových parametrů, což ostatně dokládají výsledky měření, které jsou uvedeny v následující kapitole. Důvodem tohoto nárůstu je skutečnost, že dochází ke změně chemické struktury ječmene.

Výrobu sladu můžeme rozdělit do pěti základních úseků:

- Příjem, čištění a skladování ječmene
- Máčení ječmene
- Klíčení ječmene
- Sušení a hvozdění zeleného sladu
- Úprava odsušeného sladu, skladování a expedice

### 5.1 Příjem, čištění a skladování ječmene

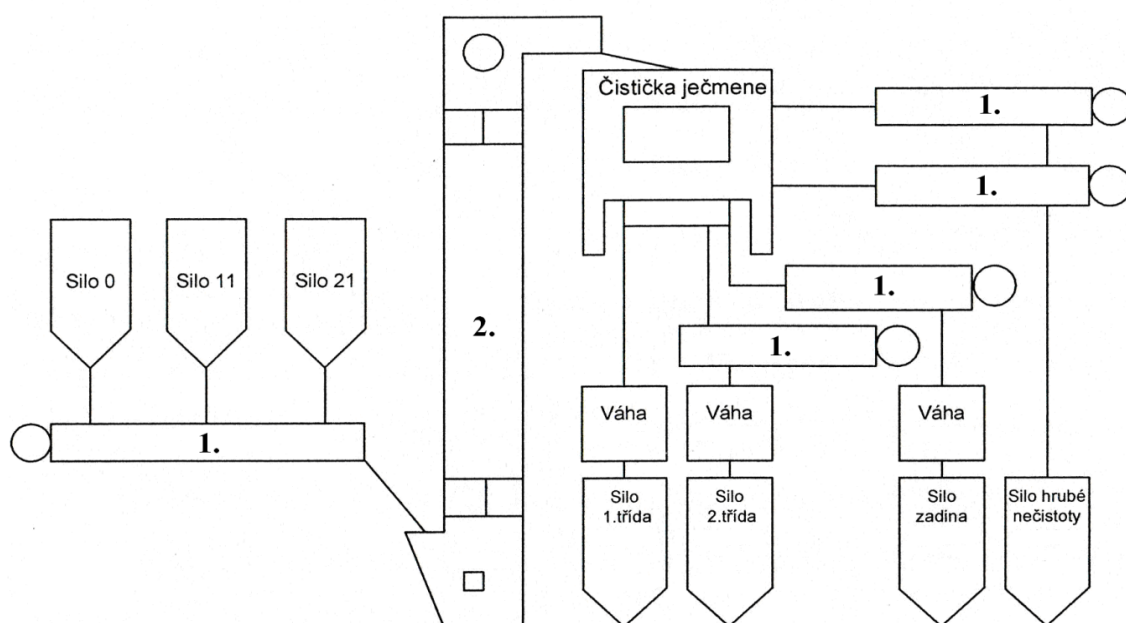
Příjem ječmene probíhá přes příjmový koš, do kterého se ječmen vsype, poté co byl zvážen. Pomocí dopravních systémů, jako jsou šnekové, redlerové a korečkové dopravníky, se ječmen uskladní v příjmových silech (obrázek 8).



Obrázek 8: Schéma příjmu ječmene

1. příjmový koš
2. redlerový dopravník
3. šnekový dopravník
4. korečkový dopravník (příjmový elevátor)

Z příjmových sil jde ječmen do čističky ječmene (obrázek 9), kde se foukáním na sítěch vytrídí pravidelná zrna stejné velikosti, odstraní ječný prach a nečistoty. Ječmen se roztřídí podle kvality do příslušných sil a nečistoty a prach jsou odvedeny do vlastního sila. V ječmeni musí proběhnout posklizňové dozrávání, které v závislosti na podmínkách trvá 6 až 8 týdnů, někdy i déle. Při uskladňování ječmene v silech je nutné sledovat teplotu v sile a pravidelně jej provzdušňovat, protože hrozí vznik plísní a rozmnožení mikroorganismů, ale existuje zde také nebezpečí samovznícení [18].



Obrázek 9: Schéma uskladnění ječmene

1. šnekový dopravník
2. korečkový dopravník (čistící elevátor)



## 5.2 Máčení ječmene

Máčení ječmene je považováno za nejdůležitější operaci při výrobě sladu. Jeho cílem je zvýšit obsah vody v ječném zrně z původních 12 – 15 % až na 42 – 48 %. Tím, že dojde ke zvýšení obsahu vody v zrně, se nastartují enzymatické pochody a zrno začne klíčit. Odstraní se také splavky a lehké nečistoty, zrno se umyje a vylouží se nežádoucí látky (barevné a hořké látky, kyselina křemičitá, bílkoviny z plich). Pokud je zrno dobře uskladněno, je činnost enzymů výrazně utlučená. Zvýšení obsahu vody však vede k zahájení projevů života (klíčení). Zrno se namáčí v náduvnících, což jsou kovové nádoby se spádovým kónusem dna 45°. To proto, aby ječmen mohl samovolně vytékat ven. Ječmen se máčí ve vodě asi dva dny a občas se provzdušní vzruchem. Nad namáčecím náduvníkem je zabudován zásobní koš, ve kterém je připravený vytríděný ječmen k namočení. Náduvník se naplní asi do poloviny vodou a ječmen ze zásobního koše se spustí do náduvníku. Namáčecí voda přitéká současně do náduvníku s ječmenem [18].

## 5.3 Klíčení ječmene

Podle typu sladovny se namáčené zrno uskladní buď v humnových nebo modernějších pneumatických sladovnách a nechá se klíčit zhruba jeden týden při teplotách okolo 18 °C. Vymočený ječmen má většinou nižší obsah vody, než který je potřebný pro průběh klíčení a k obvykle požadované vnitřní přeměně zrna. V humnových sladovnách se ječmen běžně vymáčí s obsahem vody okolo 44 % a v pneumatických okolo 42 %. Poté co ječmen oschne (cca po 24 hodinách) se ihned oschlá hromada pokropí a na humnech obrátí, což zaručuje jeho provzdušnění. Ve sladovnách, které používají pneumatický způsob, se kropí a obrací současně. Během klíčení začnou působit enzymy, které mění škrob na jednoduché cukry, zejména maltózu  $C_{12}H_{22}O_{11}$ . Během klíčení dochází v omezené míře ke spotřebování nízkomolekulárních produktů štěpení na výživu zárodku pro výstavu nových buněk, jako jsou kořínky a klíčky [18].

## 5.4 Sušení a hvozdění zeleného sladu

Jelikož se nedá zelený slad na rozdíl od hotového sladu skladovat, musí se nejprve vysušit a hvozdit. Cílem sušení a hvozdění je snížení obsahu vody pod 4 %, zastavení vegetačních pochodů při současném zachování požadované enzymové aktivity a vytvoření barevných, chuťových a oxidačně-redukčních látek, které tvoří charakter sladu.

Obsah vody se snižuje nejprve řízeným šetrným sušením vzduchem při teplotách v rozmezí 20 – 60 °C. V další fázi probíhá hvozdění, kdy se v závislosti na požadovaném druhu sladu slad profukuje horkým vzduchem při teplotách 60 – 80 °C u světlého a 60 – 105 °C u tmavého sladu.

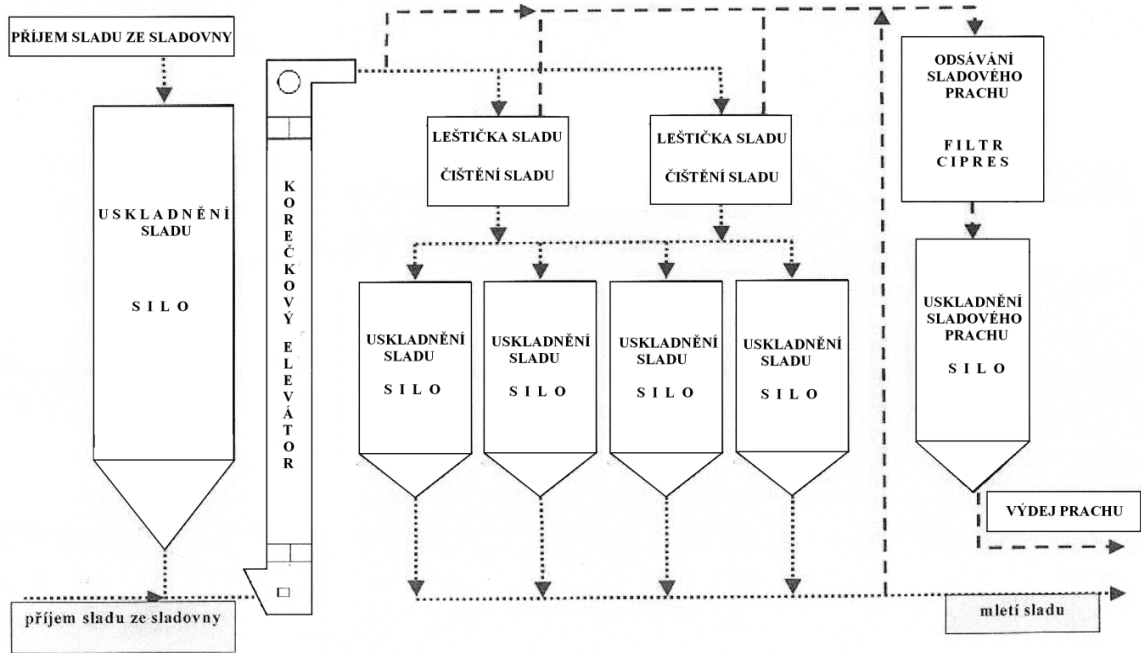
Z hlediska chemických a biochemických změn rozlišujeme při hvozdění a sušení tři fáze:

- **Růstová fáze** – v této fázi zrno obsahuje víc jak 20 % vody a při teplotě do 40 °C je schopno dále klíčit.
- **Enzymová fáze** – obsah vody poklesl již pod 20 % a při teplotách v rozmezí 40 – 60 °C již neprobíhají vegetační procesy, avšak enzymové reakce stále pokračují.
- **Chemická fáze** – v poslední fázi, kdy obsah vody klesl již pod 10 %, probíhá chemická reakce, při které dochází k tvorbě barevných a chuťových látek, přičemž enzymové reakce již neprobíhají.

Sušení a hvozdění zeleného sladu probíhá v zařízení zvaném hvozd. Hlavními konstrukčními prvky hvozdů jsou vyhřívací systém (topeniště, kalorifery, rekuperátory tepla), lísky (šachty), větrací systém, regulační a ovládací prvky [18].

## 5.5 Úprava odsušeného sladu, skladování a expedice

Po hvozdění sladu se slad uskladní v síle. Poté se korečkovým dopravníkem dopraví do odkličovačky kde následuje odkličování. Zde se zbaví slad kořínků, poškozených zrn a prachu a poté se znova uskladní do sladových sil. Odkličovačka je válec, ve kterém jsou na hřídeli upevněny růžice s odkličovacími perutěmi. Existují však také odkličovačky, které místo perutí mají upravený šnekový dopravník. Perutě nebo šnek mají dvě funkce. První funkcí je ulamování květu a druhou je doprava odkličovaného sladu k výpadu z odkličovačky. Sladový květ, rozdrčený slad a pluchy vypadávají perforovaným pláštěm do spodní části odkličovačky. V horní části odkličovačky se slad zbavuje prachu a zbytku kořínků pomocí odsávání [16].



Obrázek 10: Schéma čištění sladu na sladovně

Po odkličovací operaci následuje čištění a leštění sladu. Zde se zbaví slad posledních zbytků prachu, nečistot a oloupaných pluch. K čištění sladu se používá leštička, což je zařízení složené ze dvou třídících válců s vysévacími sítí. Síta se čistí po obvodě válců silonovými kartáči, které uvolní zbytky prachu, jenž ulpěl na sladových zrnech. Sladová krupice a jemné nečistoty propadávají do sběrných koryt. Na sítích zůstane rovnoměrně rozprostřený slad, který je pomocí odsávacího ventilátoru dokonale zbaven veškerého prachu. Vyčištěný a vyleštěný slad vypadá dvěma výpady, které jsou umístěné uprostřed stroje. Odtud je dopravován do expedičních sil, kde se uskladňuje. V silech se nechává dozrát ještě 4 až 6 týdnů a poté se teprve pomele a expeduje na varnu, kde se z něj vaří pivo [16]. Celý tento proces zobrazuje obrázek 10.

Sladový prach obsahuje kromě minerálních látek také sladovou moučku a pluchy. Veškeré nečistoty jsou odsávány odsávacím systémem. Ty se v cyklonu a filtru odloučí a poté se uskladňují v prachovém silu.

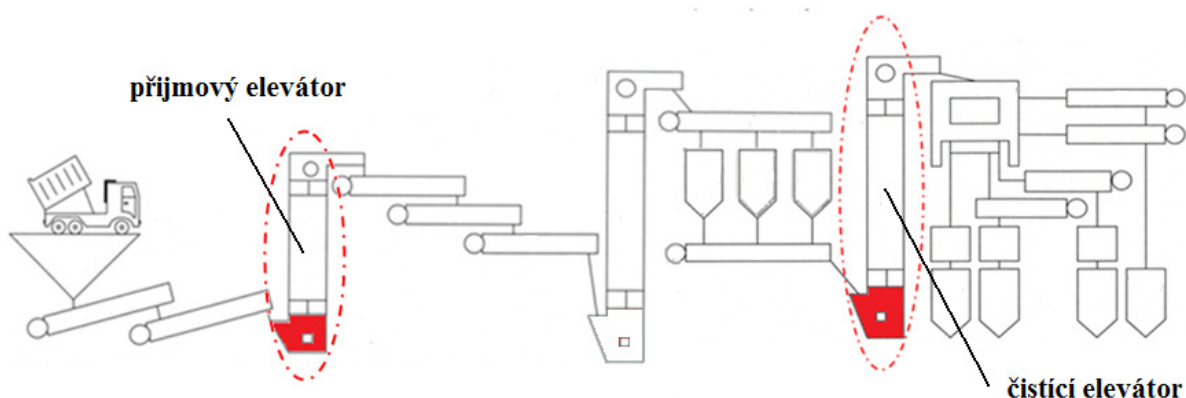
## 6 Praktická část

V této kapitole jsou popsána odběrná místa vzorků a jsou zde také shrnuty a okomentovány výsledky měření. V závěru kapitoly je navržen algoritmus pro stanovení zóny v elevátoru, který vychází z provedených měření a směrnice VDI 2263 část 8.

### 6.1 Odběr vzorků z vybraných míst dopravních tras

Pro měření jsem použil ječný a sladový prach z pivovaru Radegast Nošovice. Vzorky byly odebrány z paty elevátorů (ve schématech zaznačeno červeně), jelikož se jedná o místo, kde se nejvíce kumuluje a usazuje prach.

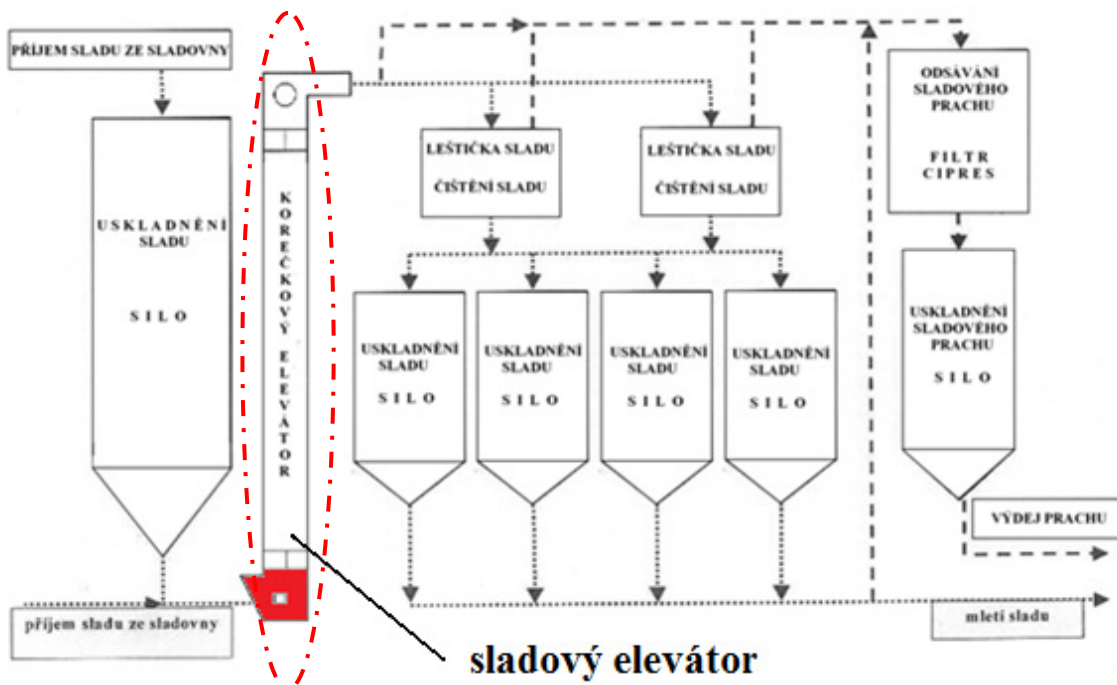
Prach jsem odebíral z různých míst dopravních tras sladovny. Vzorky ječného prachu jsem odebral z paty příjmového a čistícího elevátoru (obrázek 11). Vzorky sladového prachu jsem odebral z paty sladového elevátoru (obrázek 12 a 13).



Obrázek 11: Odběrná místa ječného prachu



Obrázek 12: Pata sladového elevátoru



Obrázek 13: Odběrné místo sladového prachu

## 6.2 Provedená měření

Pro další měření prováděná s ječným a sladovým prachem jsem vycházel ze dvou granulometrických stavů:

- částice menší než 1000  $\mu\text{m}$
- částice menší než 100  $\mu\text{m}$

Částice menší než 1000  $\mu\text{m}$  reprezentují reálné podmínky, které se mohou vyskytovat v korečkovém dopravníku během provozu, zatím co částice menší než 100  $\mu\text{m}$  představují nejhorší možný případ, který může v dopravníku nastat. Je nutno podotknout, že ve skutečnosti jsem prováděl měření s částicemi menšími než 106  $\mu\text{m}$ , jelikož jsem neměl k dispozici síto o rozměru 100  $\mu\text{m}$ . Pro potřeby této práce je však 6  $\mu\text{m}$  zanedbatelný rozměr, proto se v dalších částech této práce zmiňuji pouze o částicích menších než 100  $\mu\text{m}$ . S ohledem na časovou i finanční náročnost testů jsem prováděl úplnou sérii měření u ječného a sladového prachu pouze ze dvou odběrných míst (čisticí a sladový elevátor) s různou granulometrií. Mimo tyto měření jsem provedl i síťovou analýzu také u příjmového elevátoru, díky níž jsem získal přehled o distribuci částic v jednotlivých částech dopravního systému.

Před měřeními jsem nejprve oddělil hrubé nečistoty větší než 1 mm a poté jsem vzorky podrobil síťové analýze, na jejímž základě jsem stanovil střední velikost zrna. Pro demonstraci skutečného stavu jsem pouze u jednoho vzorku provedl nejprve síťovou analýzu bez předchozí úpravy. Přehled střední velikosti zrna a procentuálního obsahu částic menších než 100  $\mu\text{m}$ , zastoupených ve vzorku, zobrazuje tabulka 1. Ukázky vzorků jsou na obrázcích 14 a 15.

**ječný prach < 100  $\mu\text{m}$**



**ječný prach < 1000  $\mu\text{m}$**



Obrázek 14: Vzorky ječného prachu ve z čisticího elevátoru

**sladový prach < 100 μm****sladový prach < 1000μm****Obrázek 15: Vzorky sladového prachu ze sladového elevátoru****Tabulka 1: Střední velikost zrna a obsah částic pod 100 μm**

<b>DRUH PRACHU</b>	<b>MÍSTO ODBĚRU</b>	<b>Ds[μm]</b>	<b>n<sub>D&lt;100</sub> [%]</b>
<b>ječný prach 1000</b>	příjmový elevátor	357,9	19,42
<b>ječný prach 1000</b>	čistící elevátor	197,1	39,73
<b>ječný prach 100</b>	čistící elevátor	56,8	100,00
<b>sladový prach 1000</b>	sladový elevátor	285,8	29,49
<b>sladový prach 100</b>	sladový elevátor	60,9	100,00
<b>ječný prach*</b>	čistící elevátor	-	22,18

\* původní vzorek bez úpravy

Pro zadefinování vzorku bylo také potřeba provést základní chemický rozbor, který určil obsah vody ve vzorku, obsah prchavých látek, popelovin a obsah fixního uhlíku. Tento rozbor jsem provedl pouze u vzorků, které byly následně podrobeny zkouškám na výbuchovém autoklávu. Tabulka 2 přehledně uvádí naměřená data ze základního chemického rozboru.

Tabulka 2: Výsledky základního chemického rozboru

DRUH PRACHU	MÍSTO ODBĚRU	Obsah vody [%]	Obsah prchavin [%]	Obsah popelovin [%]	Obsah fixního uhlíku [%]
<b>ječný prach 1000</b>	čistící elevátor	8,8	54,3	24,6	12,3
<b>ječný prach 100</b>	čistící elevátor	6,3	44,0	41,2	8,5
<b>sladový prach 1000</b>	sladový elevátor	7,3	71,1	5,3	16,3
<b>sladový prach 100</b>	sladový elevátor	6,4	74,8	3,1	15,7

Na výbuchovém autoklávu jsem změřil dolní mez výbušnosti, maximální výbuchový tlak a maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Výbuchové parametry a dolní mez výbušnosti

DRUH PRACHU	MÍSTO ODBĚRU	LEL [g/m <sup>3</sup> ]	p <sub>max</sub> [bar]	(dp/dt) <sub>max</sub> [bar/s]	K <sub>max</sub> [m.bar/s]
<b>ječný prach 1000</b>	čistící elevátor	90	5,5	109	30
<b>ječný prach 100</b>	čistící elevátor	125	6,9	314	85
<b>sladový prach 1000</b>	sladový elevátor	40	6,3	317	86
<b>sladový prach 100</b>	sladový elevátor	50	7,0	459	125

Pro přehlednost jsem naměřená data shrnul do tabulky 4. Uvádím zde střední velikost zrna, procentuální zastoupení částic menších než 100 μm, obsah prchavých látek, dolní mez výbušnosti, maximální výbuchový tlak, maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku a hodnotu K<sub>st</sub>.



Tabulka 4: Přehled naměřených dat

DRUH PRACHU	MÍSTO ODBĚRU	Ds[ $\mu\text{m}$ ]	n <sub>D&lt;100</sub> [%]	Obsah prchavin [%]	LEL [g/m <sup>3</sup> ]	p <sub>max</sub> [bar]	(dp/dt) <sub>max</sub> [bar/s]	K <sub>max</sub> [m.bar/s]
ječný prach 1000	čistící elevátor	357,9	19,42	54,3	90	5,5	109	30
ječný prach 100	čistící elevátor	197,1	39,73	44,0	125	6,9	314	85
sladový prach 1000	sladový elevátor	56,8	100,00	71,1	40	6,3	317	86
sladový prach 100	sladový elevátor	285,8	29,49	74,8	50	7,0	459	125

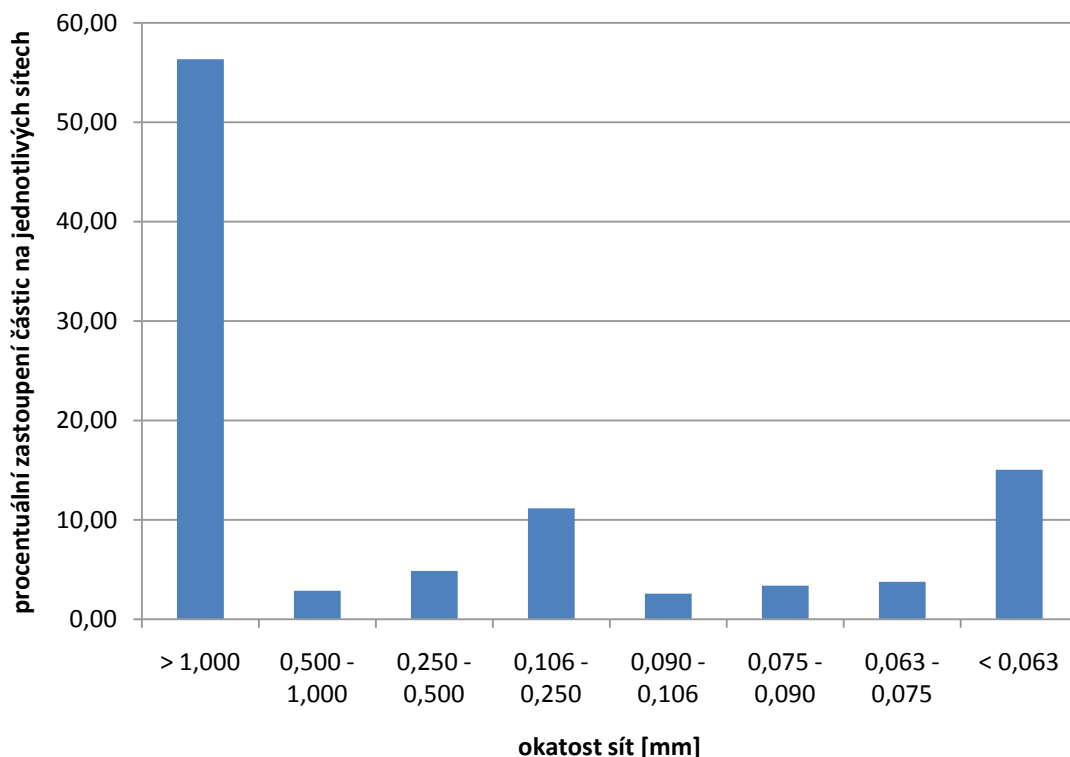
### 6.3 Zhodnocení naměřených výsledků

Jak lze vidět v tabulce 1, tak u vzorku ječného prachu bez předchozí úpravy, bylo i přes velký podíl hrubých částic, větších než 1000  $\mu\text{m}$ , více jak 22 % částic menších než 100  $\mu\text{m}$  (graf 5). Což je zajímavá informace zejména ve vztahu ke stanovení zón, jelikož jemný prach snadněji přechází do rozvířeného stavu a tudíž lze předpokládat, že během provozu elevátoru v něm bude existovat výbušná atmosféra.

Údaje ze základního chemického rozboru bezprostředně vztahují k výbušným parametrům a dolní mezí výbušnosti. Obecně lze říci, že látky, které mají vyšší obsah prchavých látek, dosahují vyšších výbušných parametrů a mají nižší dolní mez výbušnosti, protože jsou to právě prchaviny, které jako první vstupují do reakce s okolním kyslíkem. Na základě vyššího obsahu popelovin, lze naopak předpokládat, že látka bude mít vyšší hodnotu dolní meze výbušnosti.

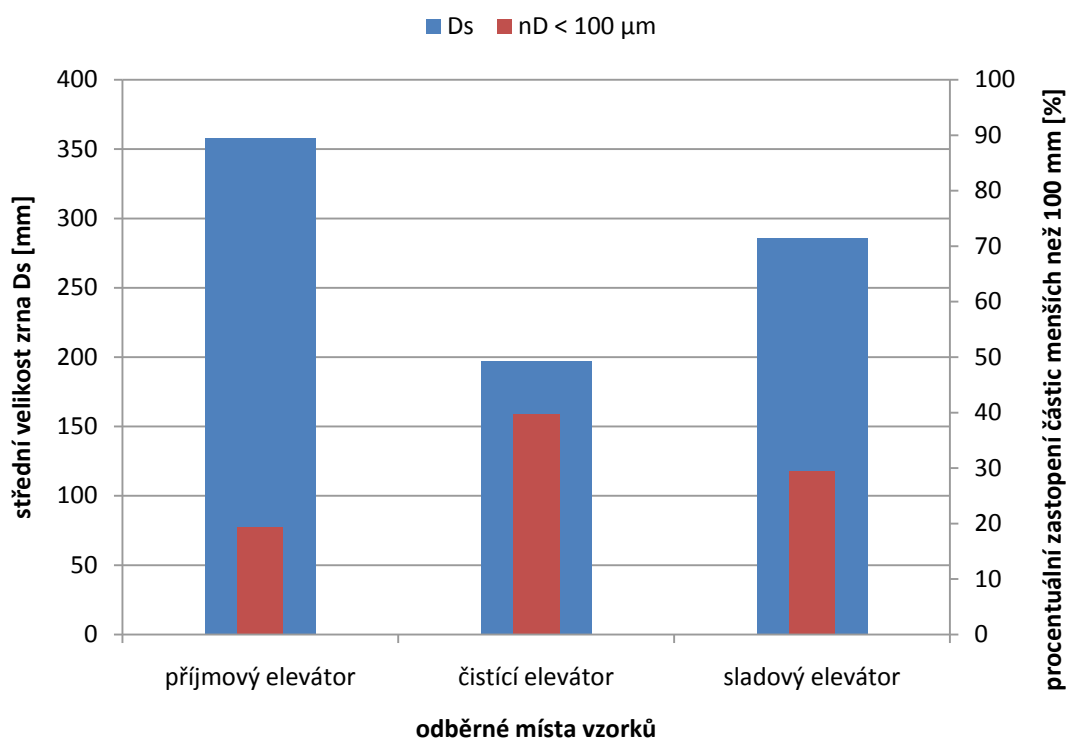
V tabulce 2 lze vidět, že sladový prach obsahuje zhruba o 20 % prchavých látek více než prach ječný. Toto si lze vysvětlit tak, že během sladovacího procesu dochází k chemické přeměně látek (viz. kapitola 5), kdy se v zrně zvýší obsah cukru, který má v konečném důsledku pozitivní vliv na nárůst výbušných parametrů.

Jak u sladového, tak i u ječného prachu jsem stanovil dolní mez výbušnosti a výbušné parametry. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3. Protokoly ze všech měření jsou obsaženy v přílohách 2 - 5.



**Graf 5: síťový rozbor z čistícího elevátoru (původní vzorek bez úpravy)**

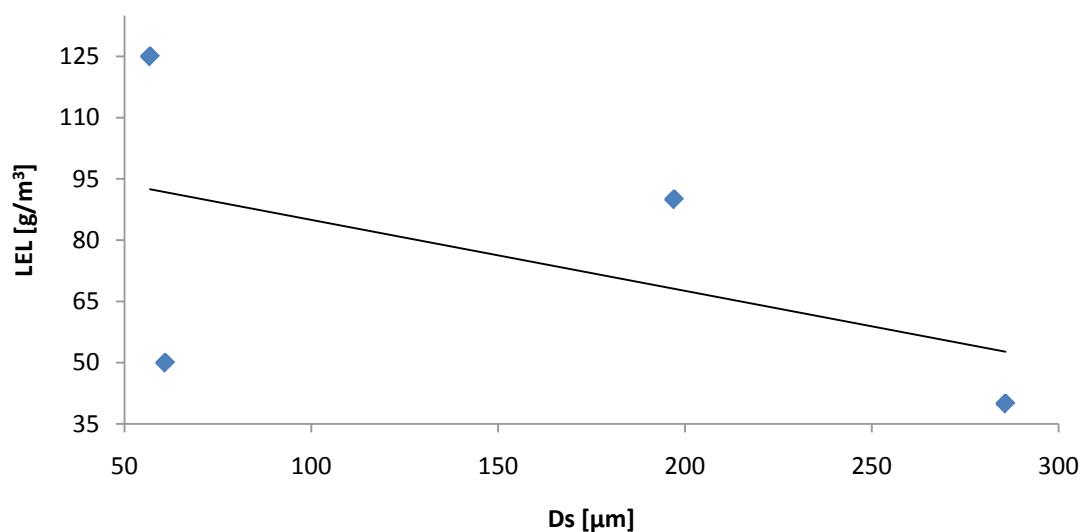
Z tabulky 2 lze vyčíst ještě jednu skutečnost, kterou demonstruje graf 6. Jak lze vidět u příjmového elevátoru, který je na počátku dopravního systému, byla naměřena největší střední velikost zrna a nejmenší podíl částic menších než 100  $\mu\text{m}$ . V čistícím elevátoru již tento podíl značně vzrostl, přičemž obsah jemných částic se téměř zdvojnásobil. U sladového elevátoru došlo opět k nárůstu střední velikosti částic a poklesu obsahu jemných částic, což je ovšem způsobeno čišťením ječmene a technologickým procesem, kterým se ječmen mění na slad.



Graf 6: Velikost částic v dopravním systému

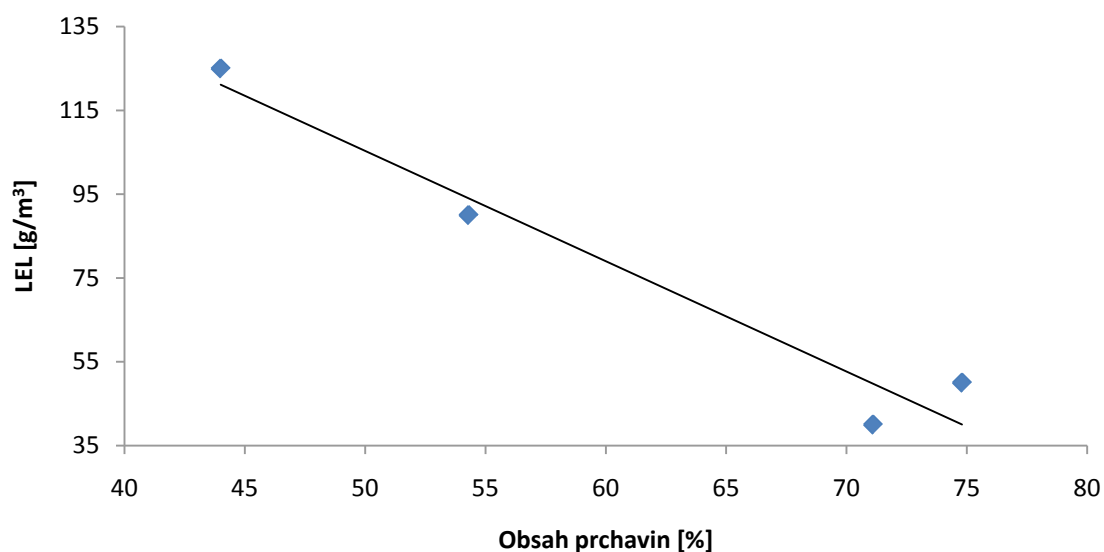
### Vliv velikosti částic na LEL na výbuchové parametry

Obecně známá teorie o vlivu střední velikosti částic na dolní mez výbušnosti se oproti očekávání nepotvrdila (viz. graf 7). S rostoucí velikostí částic by měla růst hodnota dolní meze výbušnosti, avšak tento jev nebyl pozorován. Střední velikost zrna se v tomto případě jeví jako ne zcela ideálním parametrem pro předběžný odhad nebezpečí výbuchu, protože tato hodnota neposkytuje žádnou informaci o skutečné distribuci částic ve vzorku. Z tohoto důvodu jsem v tabulce 4 zaznamenal i procentuální obsah částic menších než 100  $\mu\text{m}$ , jelikož obsah těchto částic společně s obsahem prchavých látek a odchylkou měření mohou vysvětlit odlišnost od teorie.



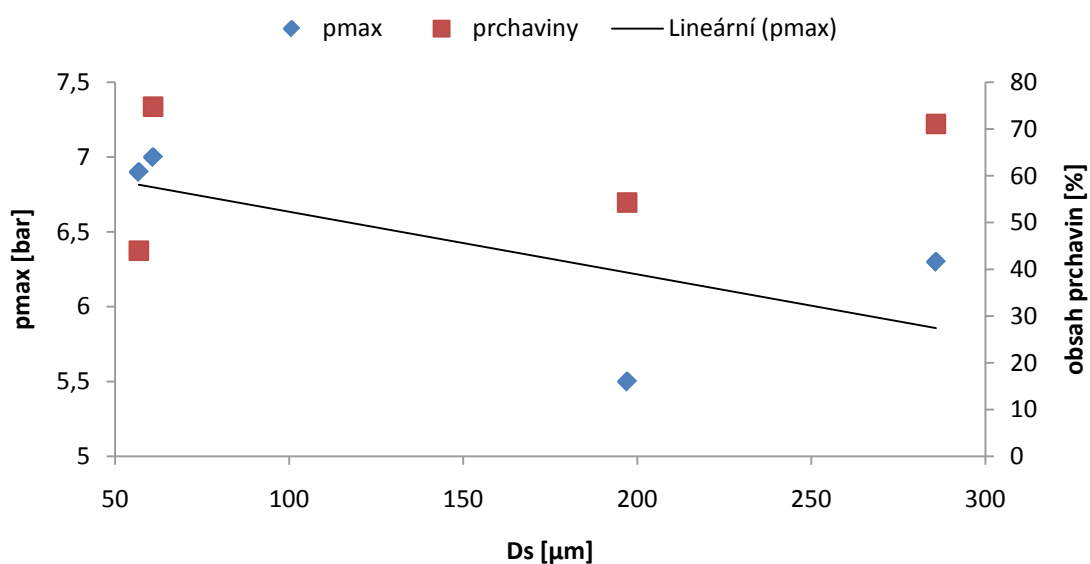
**Graf 7: Závislost dolní meze výbušnosti na střední velikosti částic**

Uvzorku sladového prachu, který měl střední velikost zrnepřes 285 μm, bylo obsaženo téměř 30 % jemných částic a dolní mez byla stanovena na hodnotu 40 g/m<sup>3</sup> s odchylkou ± 10%. Oproti tomu u vzorku označeného jako *ječný prach 100* (tzn. 100 % podíl částic menších než 100 μm), se střední velikostí zrna 56,8μm byla stanovena dolní mez výbušnosti na hodnotu 125 g/m<sup>3</sup> ± 10 %. V obou dvou případech sehrál výraznou roli zejména obsah prchavých látek. Na základě těchto pozorování by se dalo říci, že jedna-li se o prachy, které mají větší podíl jemných částic (pod 100 μm), nezávisí tak ani na hodnotě střední velikosti částic, jakožto na obsahu prchavých látek se kterým úzce souvisí hodnota dolní meze výbušnosti. Tuto závislost popisuje graf8.



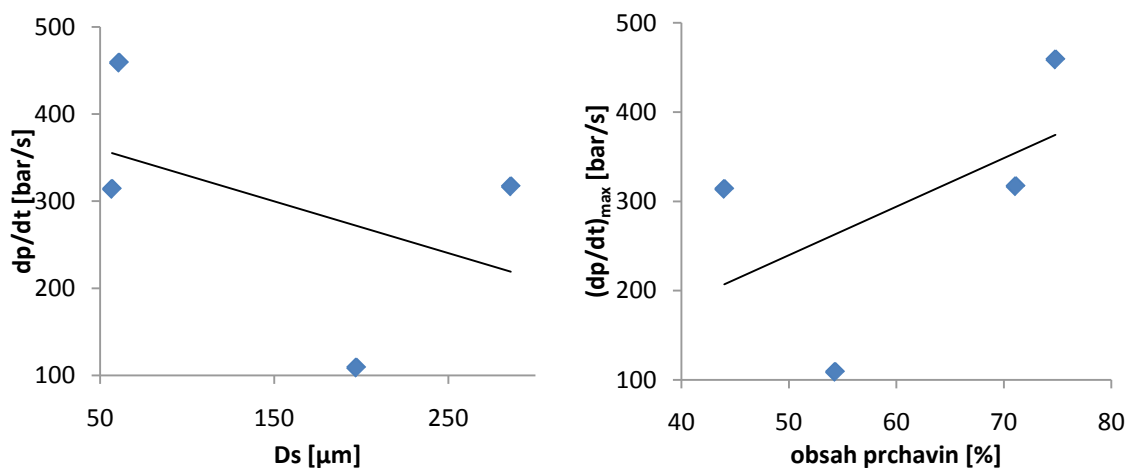
Graf 8: Závislost dolní meze výbušnosti na obsahu prchavých látek

Naopak se však potvrdila teorie, že s klesající velikostí částic roste maximální výbušový tlak, což dokládá graf 9. Obsah prchavých látek v tomto případě nehraje tak důležitou roli, jako v případě dolní meze výbušnosti. Pro představu jsem vynesl do grafu i obsah prchavých látek u jednotlivých vzorků. Prchaviny zobrazuje v grafu červený čtvereček, modrý kosočtverec zobrazuje hodnotu maximálního výbušového tlaku v závislosti na střední velikosti zrna.



Graf 9: Závislost maximálního výbušového tlaku na střední velikosti částic

Obdobná závislost jako u maximálního výbuchového tlaku platí i u maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku. Zde lze také konstatovat dvě věci. Zaprvé, že s klesající střední velikostí zrna roste rychlost nárůstu výbuchového tlaku a zadruhé, že s rostoucím obsahem prchavin roste brzance směsi. Graf 10, pak dokládá tyto závislosti. Vlevo popisuje závislost  $(dp/dt)_{max}$  na střední velikosti zrna a graf vpravo popisuje závislost  $(dp/dt)_{max}$  na obsahu prchavin.

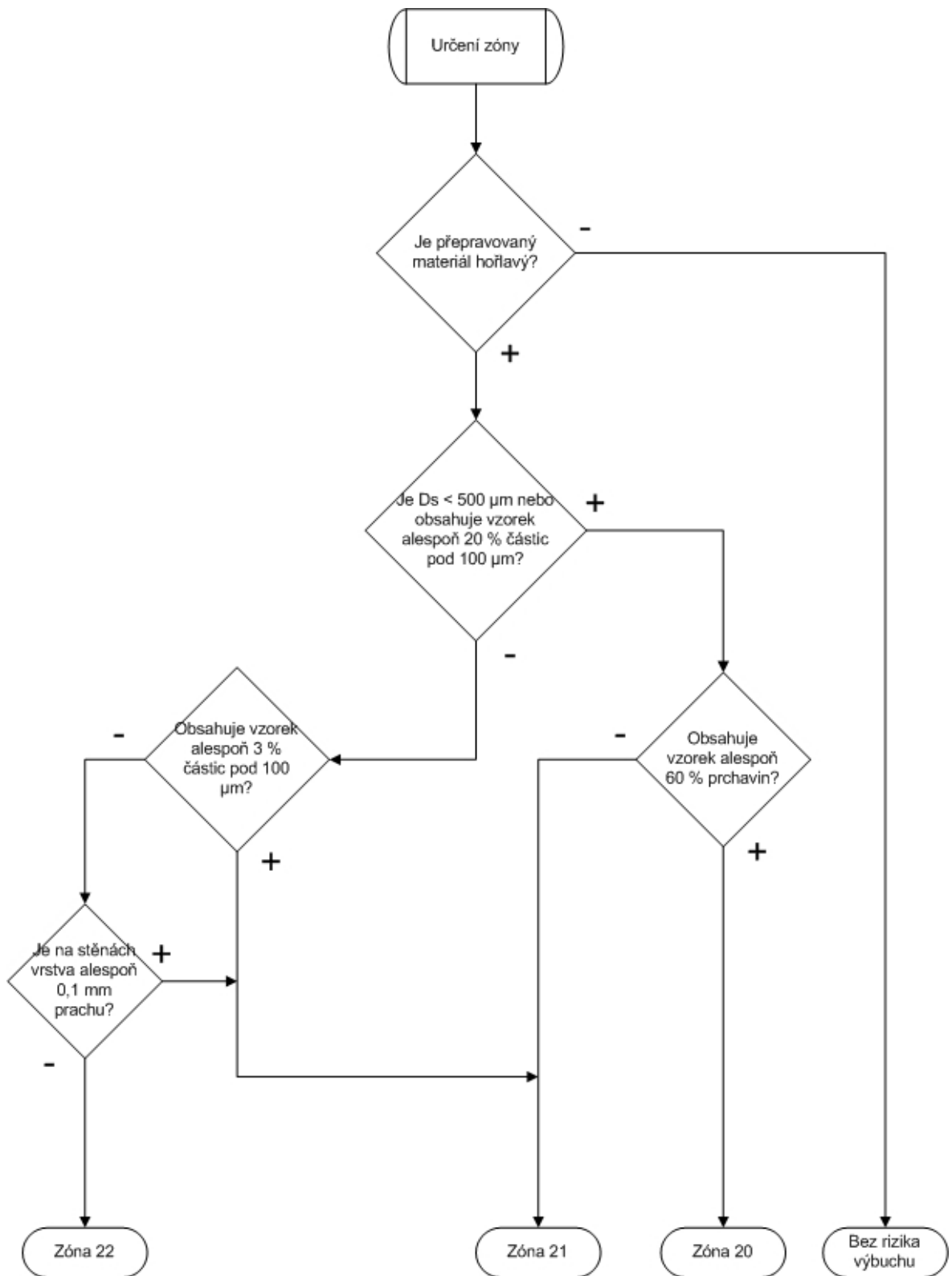


Graf 10: závislost  $dp/dt$  na střední velikosti zrna (vlevo) a obsahu prchavin (vpravo)

Poměrně velký rozptyl hodnot u provedených měření lze přisoudit problémům, které vznikají při rozvířování prachů. Každé měření je zatížené chybou a je stanoveno s určitou odchylkou, která se pohybuje kolem 10 %.

## 6.4 Algoritmus pro návrh zóny v elevátoru

Na základě provedených měření a poznatků německé směrnice VDI 2263 část 8 a 8.1 jsem sestavil algoritmus pro vyhodnocení rizika výbuchu v korečkových elevátorech. Pomocí algoritmu (obrázek 16) lze stanovit zónu v korečkovém elevátoru



Obrázek 16: Algoritmus pro stanovení zóny v korečkovém dopravníku

Na základě NV 406/2004 Sb., vzpp musí zaměstnavatel provést roztřídění prostorů na prostory s nebezpečím výbuchu a na prostory bez nebezpečí výbuchu. Řešit smysl rizika výbuchu má pouze u látek, které jsou hořlavé. Jak dokládá graf 6, dochází vlivem abraze ke vzniku jemnějších částic, které se stávají zhruba od velikosti 500  $\mu\text{m}$  výbušné. Výsledky měření ukázaly, že i v případech, kdy byla střední velikost zrna cca 286  $\mu\text{m}$  a obsah jemných částic byl zhruba 30 %, dosahovala dolní mez výbušnosti relativně malých hodnot. Svou roli zde sehrál i obsah prchavin, protože pokud se podíváme na ječný prach, který měl menší střední velikost zrna (cca 197  $\mu\text{m}$ ) naopak s větším obsahem jemných částic (cca 40 %), byla zde i přes tyto skutečnosti větší dolní mez výbušnosti, což přisuzují zejména obsahu prchavin, která dosahovala hodnot necelých 55 %.

Nicméně pro přesnější sestavení algoritmu by bylo vhodné provést ještě další měření, které by zkoumaly například vliv jemných částic (pod 100  $\mu\text{m}$ ) na dolní mez výbušnosti, se stejným obsahem prchavých látek. Toto by mohlo být námětem pro další diplomovou práci. Německá VDI 2263 část 8 se zmiňuje, že pokud se v elevátoru nachází alespoň 3 % jemných částic, bude se jednat o zónu 21. Často se také stává, že na skříni elevátoru ulpí prach, který se následkem vibrací nebo nárazu korečku do skříňe elevátoru, může rozvířit.

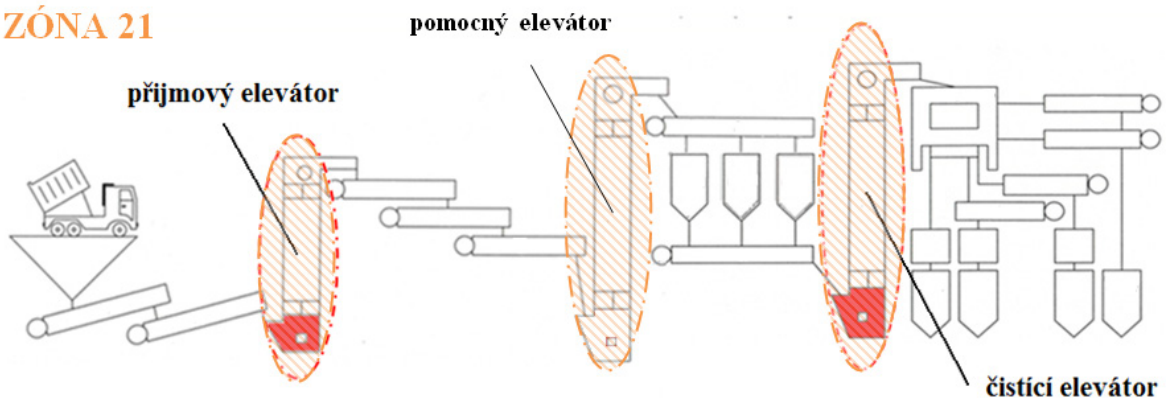
Pokud bychom uvažovali jednoduchý výpočet, kdy na skříni (pouze 3 stěnách) elevátoru, která má teoretické rozměry 1 x 1 x 1 m, ulpí vrstva prachu o tloušťce 0,1 mm s měrnou hustotou 360  $\text{kg}/\text{m}^3$ , pak v případě rozvíření by na každém metru vznikla koncentrace 108  $\text{g}/\text{m}^3$ . Což je hodnota, která odpovídá výbušné koncentraci. Příklad výpočtu je uveden v příloze 4.

## **6.5 Návrh zóny v posuzovaných dopravnících**

Vezmu-li v úvahu naměřená data z korečkových dopravníků, pak příjmový a čistící elevátor je zařazen, na základě algoritmu, do zóny 21 a sladový elevátor je zařazen do zóny 20. Mezi příjmovým a čistícím elevátorem se nachází ještě jeden pomocný elevátor, ve kterém lze na základě naměřených dat taktéž předpokládat zónu 21. Obrázky 17 a 18 graficky znázorňují zóny v elevátorech.

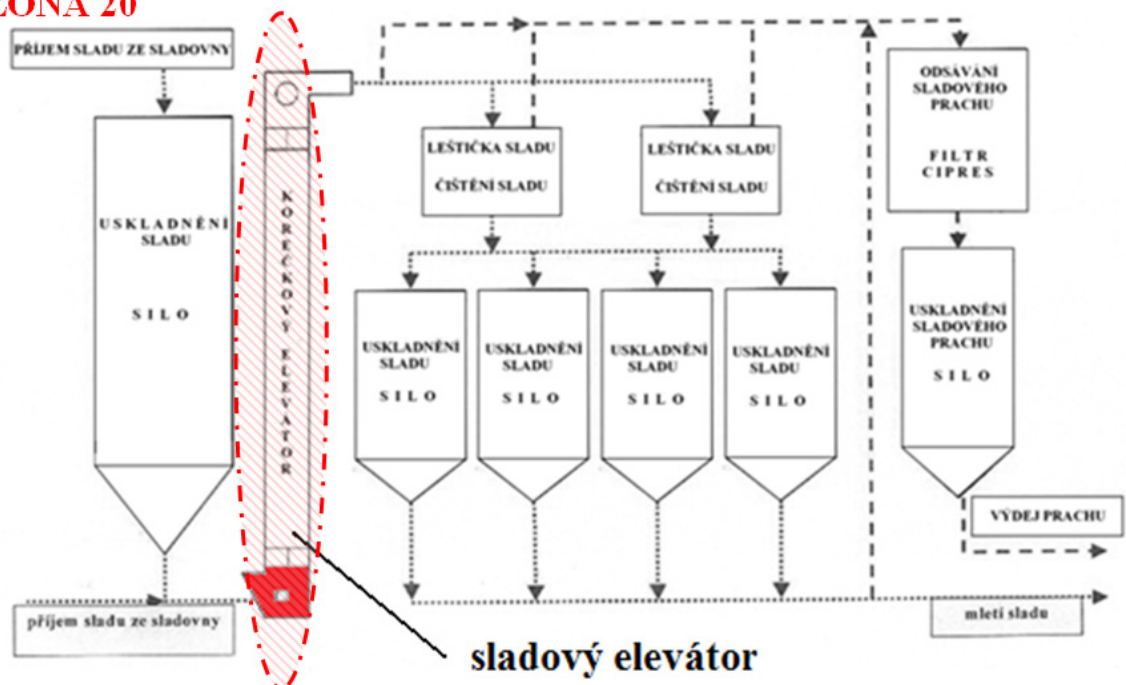


## ZÓNA 21



Obrázek 17: Návrh zóny pro přijmový, pomocný a čistící elevátor

## ZÓNA 20



Obrázek 18: Návrh zóny pro sludový elevátor

## 7 Obecně možné řešení protivýbuchové ochrany

Teorie dělí obecně protivýbuchovou ochranu do tří základních částí [3]:

- *Primární ochrana* se zaměřuje na zamezení vzniku výbušné atmosféry.

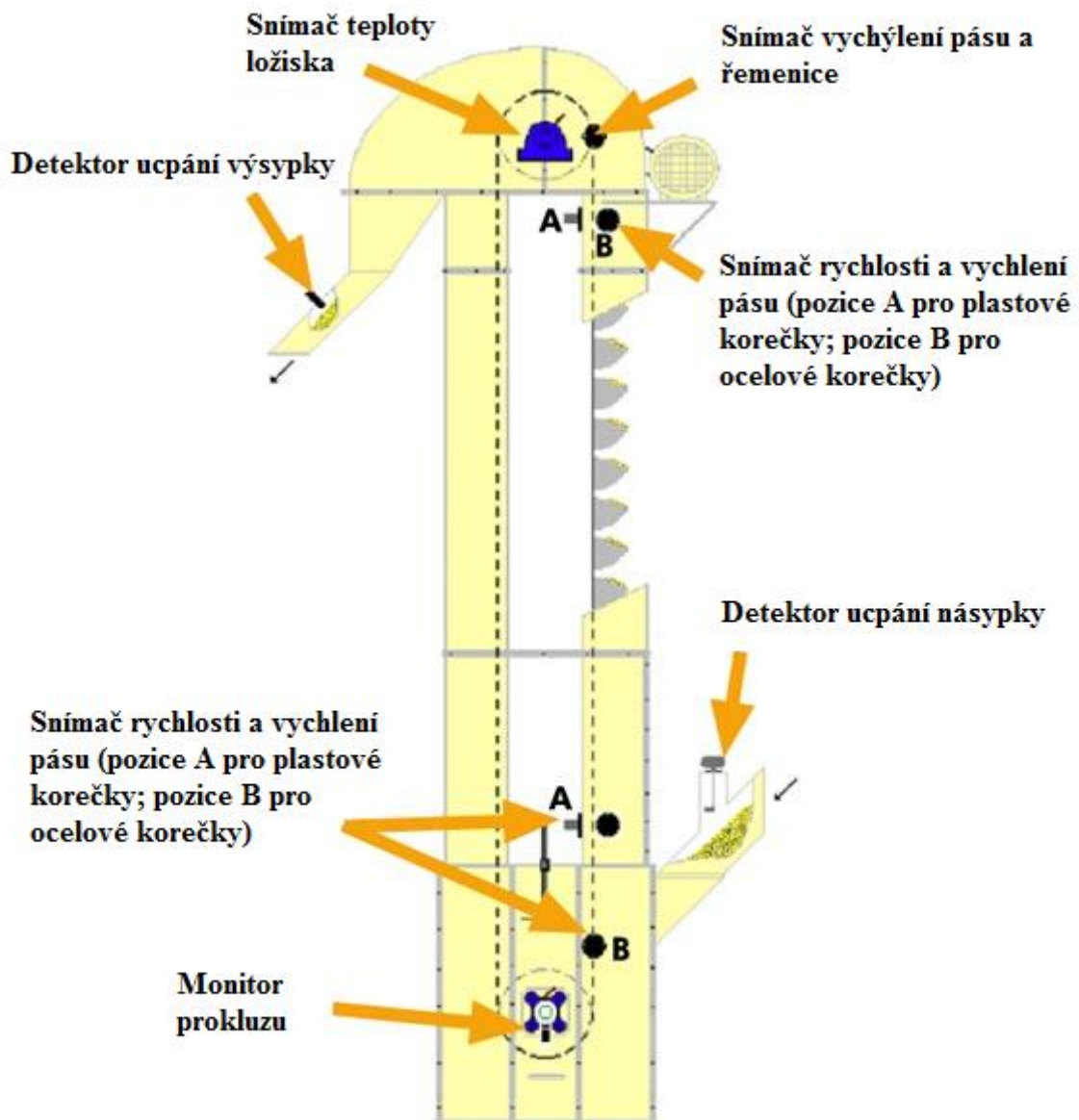
Tato ochrana zahrnuje úvahy například o záměně materiálu za méně nebezpečný či nevýbušný nebo o inertizaci. Záměna materiálu, při jeho přepravě, není dost dobře možná, neboť korečkový dopravník je prostředek, kterým právě daný materiál přepravujeme. Účelem inertizace je udržet přepravovaný materiál pod limitním obsahem kyslíku, což je hodnota, která udává nejvyšší koncentraci kyslíku ve směsi hořlavé látky, vzduchu a inertního plynu, při kterém nemůže dojít za určitých podmínek k výbuchu. Tato metoda je ovšem velice nákladná, jelikož je nutno zajistit, aby produkt byl neustále pod hodnotou limitního obsahu kyslíku, a to za všech okolností. Existuje možnost inertizace, přidáváním inertních prášků, nicméně tato možnost vede opět k výraznému navýšení ceny, jelikož je potřeba dodávat inertní prášek, který se pak musí někde oddělovat a navíc může nastat problém s kontaminací produktu, který přepravujeme, takže z tohoto důvodu se tato metoda jeví jako nereálná.

- *Sekundární ochrana* se týká vyloučení iniciačních zdrojů.

Při vyhodnocování iniciačních zdrojů se zkoumá jejich účinnost. To znamená, jestli budou mít dostatečnou energii způsobit iniciaci. Na tomto základě se vyhodnocuje pravděpodobnost výskytu takovýchto iniciačních zdrojů. V ČSN EN 1127 – 1 se uvádí 13 iniciačních zdrojů, které musí být vyhodnoceny. U korečkových dopravníků se nejčastěji můžeme setkat se zdroji typu *horký povrch*, *mechanické jiskry*, *statická elektřina*, *elektrické zařízení* apod., přičemž pravděpodobnost výskytu takovýchto zdrojů lze zredukovat technickými a organizačními opatřeními (např. pravidelná údržba).

Mezi technické opatření patří například monitorování výchylky pásu či monitorování prokluzu, sledování teploty ložisek apod. Problém nastává zejména s vyloučením iniciace způsobenou zavlečením z vnějšku. Všechny tyto opatření snižují pravděpodobnost výskytu účinného iniciačního zdroje, ale nikdy jej zcela nevyloučí. Navíc jsou tato opatření velice drahá, hlavně pokud se jedná již o instalovaný

dopravník. Obrázek 19 zobrazuje opatření proti některým iniciačním zdrojům na korečkovém dopravníku.



Obrázek 19: Opatření proti iniciačním zdrojům na korečkovém dopravníku[1]

- *Terciární ochrana* rozdíl od primární či sekundární již připouští výbuch.

Jedná se o konstrukční ochranu, která má za úkol zastavit či zmírnit dopady výbuchu. Tento způsob ochrany je v porovnání se třemi předešlými způsoby nejlevnější. Pro korečkové dopravníky se používají v zásadě tři způsoby ochrany.

- Uvolnění exploze pomocí membrány

- Uvolnění exploze pomocí bezplamenného odlehčovacího zařízení (flameless)
- Potlačení exploze pomocí HRD systému

Mimo tyto způsoby existují ještě nádoby odolné výbuchovým tlakům (to znamená, že nádoby se dimenzují na maximální výbuchový tlak, přičemž zde nejsou přípustné žádné deformace) nebo nádoby odolné výbuchovým rázům (obdobně jako u nádob dimenzovaných na výbuchový tlak, avšak zde jsou přípustné deformace, bez porušení těsnosti). S ohledem na cenu, se u korečkových elevátorů tyto opatření nerealizují.

Uvolnění exploze pomocí membrány způsobí z původně uzavřené nádoby, otevřenou nádobu a tím zabrání vzniku nedovoleného explozivního tlaku. Jedná se vůbec o nejlevnější opatření proti výbuchu, nicméně tento způsob nelze použít uvnitř budovy nebo při přepravě nebezpečných látek. Navíc se kolem elevátoru musí stanovit bezpečnostní zóna, do které se uvolňuje výbuch, což sebou nese větší prostorové nároky. Na podobném principu funguje i tzv. flameless, který lze ovšem použít i uvnitř budovy (obrázek 20), jelikož toto zařízení významným způsobem redukuje tlakové a plamenné účinky.



**Obrázek 20: Ukázka použití flameless na korečkovém elevátoru[5]**

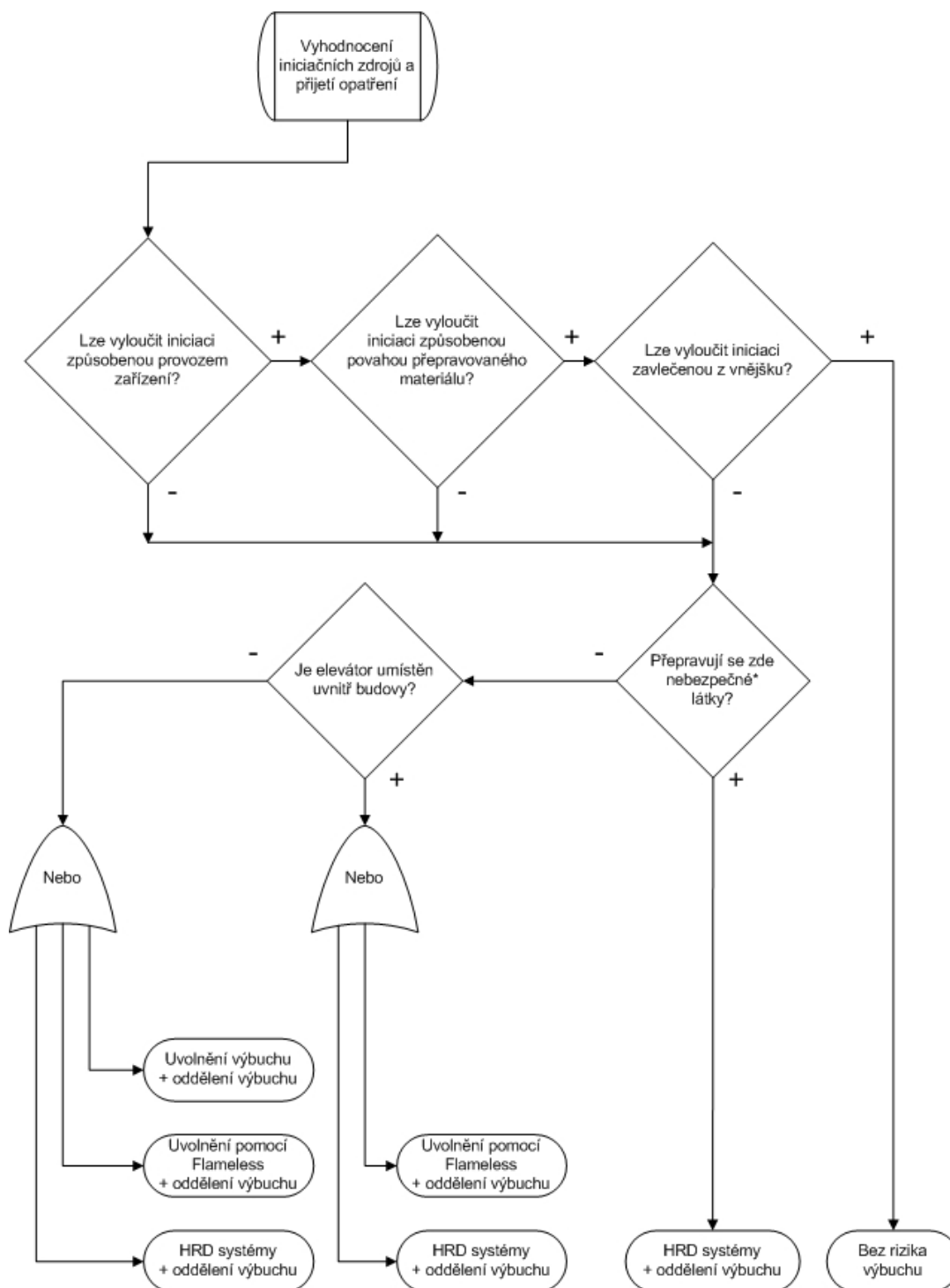
Třetí možnost, kterou lze aplikovat i v budově či při přepravě nebezpečných látek je použití HRD systémů. Tyto systémy detekují již v počáteční fázi explozivní chování pomocí detektorů, které dají povel ústředně a ta následně spustí akční členy (nádoby s hasivem), které za velice krátký čas vnesou hasivo do chráněného prostoru. Tím dojde k potlačení exploze a zabrání se tak vzniku nebezpečného výbuchového tlaku.

Existuje také možnost kombinace potlačení s odlehčením nebo odlehčení s potlačením exploze. První případ se používá v aplikacích, kdy pevnost technologického zařízení neumožňuje ochranu pouze samotným potlačením či odlehčením. Druhý případ se aplikuje na situace, kdy chceme zabránit vyšlehnutí plamene při odlehčení [22].

Ve všech případech je nutno zabránit šíření výbuchu do dalších technologických celků, jelikož sekundární výbuchy mají daleko horší dopady než ty primární. K tomuto účelu se používají hasící bariéry, rychlouzavírací šoupátka, rotační podavače anebo komíny na uvolnění tlaku [24]. U korečkových elevátorů se v praxi nejčastěji používá pro zamezení přenosu exploze HRD bariéra.

## 7.1 Algoritmus pro vyhodnocení iniciačních zdrojů a návrh opatření

Na základě poznatků německé směrnice VDI 2263 část 8 a normy ČSN EN 14491 jsem sestavil algoritmus (obrázek 21) pro vyhodnocení iniciačních zdrojů a návrhu opatřeníprotivýbuchové ochrany.



Obrázek 21: Vyhodnocení iniciačních zdrojů a návrh opatření

V případě zóny 20 a 21 je potřeba vyhodnotit možné zdroje iniciace. Ty se vyhodnocují ve vztahu k bezpečnostním charakteristikám přepravovaného materiálu.

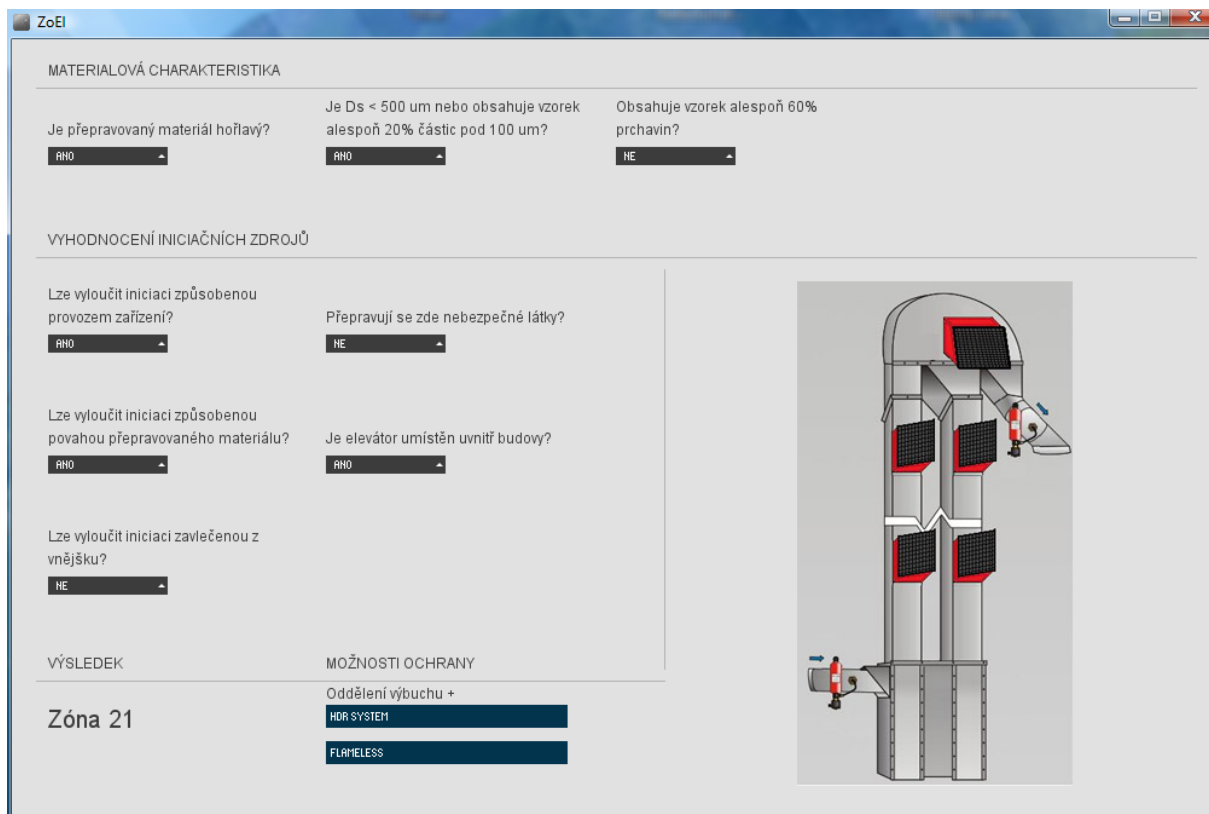
Nejprve musíme vyloučit iniciaci způsobenou zařízením. Zde se vyhodnocuje vznik horkých povrchů (tření pásu elevátoru o skříň, zadřené ložisko, prokluzování pásu apod.), mechanických jisker (nárazy korečků do stěny elevátoru), iniciace elektrickým zařízením a statickou elektřinou (náboj může vznikat v místě oddělování pásu od řemenice nebo při vyprazdňování korečku) [24].

Pokud vyloučíme iniciaci způsobenou provozem zařízení, pak musíme vyloučit také iniciaci způsobenou povahou přepravovaného materiálu. Jde především o riziko samovznícení či exotermického rozkladu. Exotermický rozklad hrozí zejména v případech, kdy materiál je přepravován za vysokých teplot. U organických materiálů jako jsou například obiloviny, může přílišná vlhkost působením mikroorganismů způsobit samovznícení. V patě elevátoru dochází ke kumulaci prachových částic (viz. odebrané vzorky). Jestliže je daný materiál náchylný k samovznícení, pak pravděpodobnost vznícení roste s rostoucí tloušťkou usazené vrstvy [24].

Poslední riziko, které je potřeba vyloučit jsou iniciační zdroje zavlečené do elevátoru z vnějšku. Jedná se o horké povrchy (např. žhavé kousky), plameny a horké plyny (žhnoucí částice, šířící se plamen z jiných zařízení apod.), mechanické jiskry (zavlečení cizího materiálu do elevátoru – např. kovová matice viz obrázek 5) a úder blesku (to se týká zejména instalací venku). Vyloučení těchto všech iniciačních zdrojů vyžaduje značné finanční náklady. Je ovšem nutno podotknout, že vyloučení všech iniciačních zdrojů je velice obtížné, v praxi spíše nereálné. Pokud se nepodaří vyloučit tyto zdroje, pak se musí přistoupit ke konstrukční protivýbuchové ochraně [24].

Pro řešení otázky konstrukční protivýbuchové ochrany je potřeba si nejprve odpovědět na otázky, které vyvstávají z normy ČSN EN 14491. První otázkou je zda přepravujeme v elevátoru nebezpečné látky (těmi jsou myšleny látky toxické, korozivní, dráždivé, karcinogenní, teratogenní nebo mutagenní). Druhá otázka se týká umístění elevátoru uvnitř budovy [2]. Na základě zodpovězení si těchto dvou otázek je možné přijmout příslušná opatření, která demonstruje algoritmus na obrázku 14.

Pomocí programu Processing a předdefinovaných schémat jsem přepsal oba algoritmy (obrázek 16 a 21) do programu, který jsem nazval ZoEl (Zone in Elevator)  
Ukázka grafického prostředí programu je na obrázku 22.



Obrázek 22: Program ZoEl



## 8 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo poukázat na riziko výbuchu v dopravních systémech pro přepravu sypkých hořlavých hmot, dále provést měření, která by podložila nebo vyvrátila existenci rizika výbuchu v dopravních systémech a na základě provedených měření navrhnout zónu v elevátorech. Lze konstatovat, že cíle této práce byly naplněny ve všech bodech.

Tuto práci jsem rozdělil do několika částí. V úvodní části se zmiňuji o nehodách, které se nějakým způsobem vztahují ke korečkovým dopravníkům. Jsou tam také uvedeny požadavky, které jsou kladeny jak na výrobce tak provozovatele zařízení. Uvádím zde i způsob jakým se řeší riziko výbuchu u korečkových dopravníků v Německu a Spojených státech amerických, jelikož v těchto dvou uvedených zemích mají pro tyto případy přímo národní předpisy.

Jak již jsem psal v úvodu, někteří výrobci v České republice si dostatečně neuvědomují riziko, které vyvstává z provozu korečkových dopravníků určených pro přepravu sypkých hořlavých hmot, což je pravděpodobně důsledkem absence normy, která by tento postup upravovala. Měření, která jsem provedl, dokládají, že během přepravy dochází ke vzniku jemnějších částic a v případě rozvíření může nastat uvnitř elevátoru výbuch, jehož výsledkem může být tlak až 7 barů. Tato hodnota byla stanovená v kubické nádobě. Protože v případě korečkového elevátoru se ovšem nejedná o kubickou nádobu, ale spíše o podlouhlou nádobu, může ve skutečnosti tlak dosahovat daleko větších hodnot. Z těchto důvodů je potřeba korečkový dopravník chránit proti explozi odpovídajícím způsobem.

V kapitole 7 jsou okomentované výsledky měření včetně vlivu střední velikosti částic na výbuchové parametry a na dolní mez výbušnosti. Oproti očekávání se nepotvrdila teze, že s rostoucí střední velikostí zrna roste dolní mez výbušnosti. To je zapříčiněno zejména obsahem prchavých látek, který byl u sladového prachu daleko větší než v případě ječného prachu a v kombinaci s odchylkou měření a velkým podílem částic pod 100  $\mu\text{m}$ , došlo k této odlišnosti.

Na základě naměřených dat jsem navrhnul algoritmus pro stanovení zón v korečkových dopravnících. Ten jsem následně přepsal pomocí programu

Processinga předdefinovaných schémat do programu, který jsem nazval ZoEl. Budu-li vycházet z tohoto algoritmu, pak korečkové dopravníky, ze kterých jsem odebíral vzorky, jsou zařazeny v zóně 20 a 21. Bylo by ovšem vhodné provést další sérii měření za účelem zpřesnění mého algoritmu. S ohledem na velkou časovou a finanční náročnost testů jsem provedl pouze měření z paty příjmového, čistícího a sladového elevátoru. Pro pokračování této práce by však bylo vhodné zkoumat vliv procentuálního podílu částic menších než 100  $\mu\text{m}$  na dolní mez výbušnosti.

Přínos této práce spočívá v navrženém algoritmu pro stanovení zóny v korečkovém elevátoru, adále v potvrzení existence rizika výbuchu v dopravních systémech, jelikož výsledky měření a havárie z minulosti nám jasně ukazují, že riziko exploze v korečkových dopravnících je reálné a je potřeba se touto otázkou reálně zabývat. Z toho důvodu se věty typu „*nikdy jsem se nesetkal s explozí v korečkovém dopravníku, takže proto se tím nezabýváme*“ jeví jako zcela neopodstatněné. Dnes již máme to štěstí, že máme zkušenost, za kterou však zaplatilo mnoho lidí životem, a víme, co se může stát při provozu korečkových dopravníků.

## Seznam použité literatury

- [1] BucketElevators. *ComponentsforBucketElevators and Conveyors* [online]. 2013 [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.go4b.co.uk/uk/bucket-elevators.php>
- [2] ČSN EN 14491 Ochranné systémy pro odlehčení výbuchu prachu
- [3] DAMEC, JAROSLAV. *Protivýbuchová prevence*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 188 s. ISBN 80-861-1121-0.
- [4] ECKHOFF, ROLF K. *DustExplosions in theProcessIndustries*. 3. vyd. Amsterdam: Gulf Professional Pub., 2003. ISBN: 9780123958532.
- [5] FlamelessExplosionVenting. *MGH engineering and control* [online]. 2011 [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.mgheng.com/epflameless.html>
- [6] Grain Handling: DeBruce Grain ElevatorExplosion - Report. *OccupationalSafety&HealthAdministration*[online]. 2013 [cit. 2014-01-12]. Dostupné z: <https://www.osha.gov/SLTC/grainhandling/geeit/>
- [7] HATTWIG, MARTIN.:*Handbook ofexplosionprevention and protection*. WeinheimWiley-VCH, 2004. ISBN: 978-352730-718-0
- [8] ImperialSugarCompanyDustExplosion and Fire. *ChemicalSafetyBoard* [online]. 2008 [cit. 2014-01-12]. Dostupné z: <http://www.csb.gov/imperial-sugar-company-dust-explosion-and-fire/>
- [9] KUNERT, TOMÁŠ. *Korečkový elevátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 52 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Špička, CSc.
- [10] Nařízení vlády č. 176/2008 Sb., o technických požadavcích na strojní zařízení ve znění pozdějších předpisů.
- [11] Nařízení vlády č. 23/2003 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu ve znění pozdějších předpisů.
- [12] Nařízení vlády č. 406/2004 Sb., o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu ve znění pozdějších předpisů.
- [13] NFPA 61: Standard fortheventionoffires and dustexplosions in agricultural and food processingfacilities.

- [14] POLÁK, JAROMÍR, ALEŠ SLÍVA. *Dopravní a manipulační zařízení I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001, 99 s. ISBN 80-248-0043-8.
- [15] POLÁK, JAROMÍR. *Dopravní a manipulační zařízení II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0493-X.
- [16] PROKEŠ, JOSEF. Odkličování a skladování sladu. *Výzkumný ústav pivovarský a sladařský* [online]. 2012 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: [http://www.beerresearch.cz/index.php?option=com\\_rubberdoc&view=doc&id=142&format=raw&Itemid=159&lang=cs](http://www.beerresearch.cz/index.php?option=com_rubberdoc&view=doc&id=142&format=raw&Itemid=159&lang=cs)
- [17] SIWEK RICHARD., *New VDI-guideline on fire and explosionprotection on elevators, chemicalengineeringtranssaction*, 2012, 26, 393-398 DOI: 10.3303/CET 1226066
- [18] SLADAŘSTVÍ: Sladařství – sylabus k předmětu. *VŠCHT* [online]. 2004 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/kch/download/sylaby/sladarstvi.pdf>
- [19] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/42/ES ze dne 17. Května 2006 o strojních nařízeních.
- [20] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 94/9/ES, z 23. března 1994 o sblížení právních předpisů členských států pro zařízení a ochranné systémy určené k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu.
- [21] Směrnice Evropského parlamentu a Rady EU 1999/92 ze dne 16. prosince 1991 o minimálních požadavcích na zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců vystavených prostředí s nebezpečím výbuchu.
- [22] ŠTROCH, PETR.: *Riziko výbuchu prašných směsí a možnosti prevence*. 1. vyd. Praha. AMOS repro, spol. s.r.o., 2007. ISBN: 978-807362-515-3.
- [23] VDI 2263 Part 1 Test methodsforthedeterminationofthesafetycharacteristicsofdust.
- [24] VDI 2263 Part 8 Fire and explosionprotection in elevators.
- [25] VDI 2263 Part 8.1 Fire and explosionprotection in elevators.
- [26] VDI 2263 Part 9 Determinationofdustinessofbulkmaterials.
- [27] Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně, ve znění pozdějších předpisů.
- [28] Zákon č. 262/2006 Sb., zákoník práce, ve znění pozdějších předpisů.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Imperial Sugar Factory po explozi v roce 2008 .....	2
Obrázek 2: Hlava elevátoru s usazeným prachem .....	3
Obrázek 3: Schéma legislativního rámce .....	18
Obrázek 4: Matice z příjmového elevátoru .....	20
Obrázek 5: Hlavní části korečkového elevátoru .....	26
Obrázek 6: Způsob upevnění korečků šrouby k dopravnímu pásu .....	27
Obrázek 7: Způsob upevnění korečků k řetězu .....	27
Obrázek 8: Schéma příjmu ječmene .....	29
Obrázek 9: Schéma uskladnění ječmene .....	30
Obrázek 10: Schéma čištění sladu na sladovně .....	33
Obrázek 11: Odběrná místa ječného prachu .....	34
Obrázek 12: Pata sladového elevátoru .....	35
Obrázek 13: Odběrné místo sladového prachu .....	35
Obrázek 14: Vzorčky ječného prachu ve z čistícího elevátoru .....	36
Obrázek 15: Vzorčky sladového prachu ze sladového elevátoru .....	37
Obrázek 16: Algoritmus pro stanovení zóny v korečkovém dopravníku .....	45
Obrázek 17: Návrh zóny pro příjmový a čistící elevátor .....	47
Obrázek 18: Návrh zóny pro sladový elevátor .....	47
Obrázek 19: Opatření proti iniciačním zdrojům na korečkovém dopravníku .....	49
Obrázek 20: Ukázka použití flameless na korečkovém elevátoru .....	50
Obrázek 21: Vyhodnocení iniciačních zdrojů a návrh opatření .....	52
Obrázek 22: Program ZoEl .....	54

## Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1: Střední velikost zrna a obsah částic pod 100 $\mu\text{m}$ .....	37
Tabulka 2: Výsledky základního chemického rozboru.....	38
Tabulka 3: Výbuchové parametry a dolní mez výbušnosti.....	38
Tabulka 4: Přehled naměřených dat.....	39
Graf 1: Křivky závislosti tlaku na čase.....	9
Graf 2: Maximální výbuchový tlak a rychlost nárůstu výbuchového tlaku.....	10
Graf 3: Vliv koncentrace hořlavé látky na výbuchový tlak pro dva prachy a jeden plyn ...	11
Graf 4: Závislost LEL na střední velikosti zrna.....	12
Graf 5: síťový rozbor z čistícího elevátoru (původní vzorek bez úpravy) .....	40
Graf 6: Velikost částic v dopravním systému .....	41
Graf 7: Závislost dolní meze výbušnosti na střední velikosti částic.....	42
Graf 8: Závislost dolní meze výbušnosti na obsahu prchavých látek.....	43
Graf 9: Závislost maximálního výbuchového tlaku na střední velikosti částic .....	43
Graf 10: závislost $dp/dt$ na střední velikosti zrna (vlevo) a obsahu prchavin (vpravo) .....	44

## Seznam příloh

Příloha 1: Emailová komunikace s firmami ze dne 11. a 16. 12. 2013 .....	I
Příloha 2: Protokol č. 1 o provedených zkouškách – ječný prach 106 .....	II
Příloha 3: Protokol č. 2 o provedených zkouškách – ječný prach 1000 .....	VI
Příloha 4: Protokol č. 3 o provedených zkouškách – sladový prach 106 .....	X
Příloha 5: Protokol č. 4 o provedených zkouškách – sladový prach 1000 .....	XIV
Příloha 6: Výpočet vzniku výbušné koncentrace rozvířením ulpělého prachu .....	XVII