



## RELACE MEZI VLASTNOSTMI SYPKÉ HMOTY A PRINCIPEM DOPRAVNÍHO ZAŘÍZENÍ

*Jan Nečas<sup>1</sup>, Jiří Zegzulka<sup>2</sup>*

**Klíčová slova:** logistika, sypké hmoty, skupenství, doprava, přeprava

### **Abstrakt:**

V technických vědách je poměrně časté interpretovat slovo logistika v různých významech a v podobě různých definic, nebo definic kritérií optimalizačních funkcí. V neposlední řadě je to logistika jednotlivých dílčích oborů v širším slova smyslu všeobecné optimalizace jak technické a ekonomické, tak dopravních i informačních technologií. Optimalizace se ve většině případů zaměřuje na studii dopravních cest, materiálových, informačních, energetických a finančních toků. Vznikající obor Logistika v sypkých hmotách vyjadřuje logistické pojmy podobnými způsoby jako ostatní. V tomto příspěvku je stanoveno optimalizační kritérium optimální dopravy z hlediska zabezpečování vlastní funkce dopravy jako výchozího kritéria mechanicko fyzikálních vlastností, nebo obráceně volba optimálního dopravníku z hlediska mechanicko-fyzikálních vlastností dopravované sypké hmoty. Těžiště správné funkce technologie a dopravy tkví v nastavení optimálních vlastností dopravovaného sypkého materiálu vzhledem k technologií a dopravní trase, nebo zkonstruování zařízení a dopravní trasy tak, aby vše vyhovovalo vlastnostem neupraveného materiálu. Optimalizační kritérium je stanoveno v podobě volby optimálního dopravníku pro konkrétní sypkou hmotu, nebo nastavení mechanicko fyzikálních vlastností vyjádřených v podobě úhlu vnitřního tření tak, aby došlo k optimální funkci dopravního, nebo technologického zařízení. Doplnkem je nastavení mechanicko fyzikálních parametrů sypké hmoty tak, aby došlo k optimální spotřebě energie při dopravě sypké hmoty.

### **1. Úvod**

Firemní přístup k řešení tohoto problému se dá charakterizovat z hlediska stavby firmy, výrobního programu a strategických cílů. Podle těchto kritérií se dají dělit firmy do tří typů:

#### **1.1. Firma zabývající se monotónní výrobou jednoho typu dopravníku**

Tato firma v zájmu prodeje svých výrobků zpravidla jde na vyšší míru rizika a nasazuje svůj produkt i do oblastí dopravy sypkých hmot, kde se už ani nehodí s tím, že vzniklé problémy budou řešeny dodatečně další pokračující zakázkou. Tak se pak postupným upravováním a dovybavováním původní dodávky zařízení postupně zprovožňuje až na únosnou hranici nákladů v relaci s požadovanou funkcí zařízení.

#### **1.2. Firma vyrábějící sortiment výrobků zaměřených na určitý typ technologií, nebo sypkých hmot - dopravníky, technologická zařízení, obslužná zařízení**

Tyto úzce specializované firmy řeší zpravidla opakované typické úlohy určitého průmyslového odvětví. Úzce se specializují na typ dopravovaného materiálu (uhlí, mouka, cukr) a typ technologie (doprava, míchání, zdobňování). Postupně nabývá firma značné „know-how“ potřebné k řešení praktických průmyslových potřeb, aniž by byla nutně známa podstata jevů a podstata probíhajících

<sup>1</sup> Ing. Jan Nečas, Laboratoř sypkých hmot, Ústav dopravních a úpravnických zařízení, Institut dopravy, Fakulta strojní, VŠB - TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava–Poruba, CZ, Tel.:00420 59 699 3127, Fax: 00420 59 699 4330, e-mail: [jan.necas@vsb.cz](mailto:jan.necas@vsb.cz), [www.lsh.vsb.cz](http://www.lsh.vsb.cz)

<sup>2</sup> Doc. Ing. Jiří Zegzulka, CSc., Laboratoř sypkých hmot, Ústav dopravních a úpravnických zařízení, Institut dopravy, Fakulta strojní, VŠB - TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava–Poruba, CZ, Tel.:00420 59 699 4379, Fax: 00420 59 699 4330, e-mail: [jiri.zegzulka@vsb.cz](mailto:jiri.zegzulka@vsb.cz), [www.lsh.vsb.cz](http://www.lsh.vsb.cz)

zákonitostí. Tato dobová výhoda rozkrytím a popisem zákonitostí odpadá, stává se přístupná každému a tím ztrácí svou hodnotu. Dobově vznikají nové aktuální příležitosti zpracování jiných druhů sypkých hmot, například biomasa, jinak vytvořené směsi komponent, zpracování nanočástic atd.

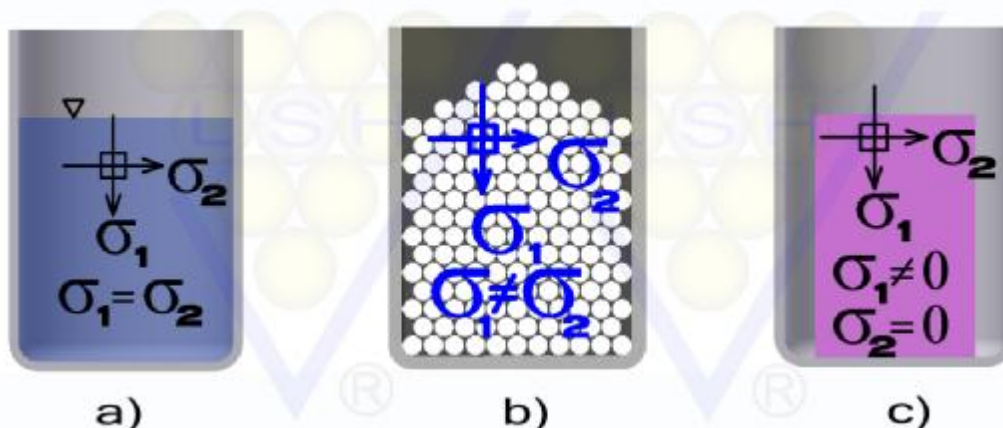
### 1.3. Firma zaměřená na dodávky investičních celků

Firmy zaměřené na dodávky investičních celků nejsou zpravidla omezeny na svou vlastní výrobu omezeného sortimentu dopravníků, případně vlastní výrobní technologie a ani na určitý typ technologií. Mají možnost „šít“ řešení optimálně na potřebu zákazníka, pokud jsou známy zákonitosti dějů. Pro významné projekty jsou prováděny měření vlastností sypkých hmot, modelování procesů a dopravy, případně simulování možných havarijních situací, včetně výbuchu.

## 2. Logistika v sypkých hmotách z hlediska sypké hmoty a dílčích parametrů

V technické praxi je obvyklé hledat optimalizaci toků sypkých hmot v konstrukcích, pohonu, tvaru dopravní cesty, délky dopravy, aplikovaných materiálech zařízení, rychlostech, dynamice dopravy. Méně obvyklé, nadějnější, ale relativně mnohem náročnější z hlediska deficitu informací je optimalizovat zařízení a jeho funkci z hlediska mechanicko-fyzikálních vlastností sypké hmoty. Komplexní vyjádření je poměrně náročné, ale většina veličin se dá s vědomou mírou omezení zahrnout do obecnější veličiny, kterou je úhel vnitřního tření. Sledujeme-li stav hmoty v intervalu možných úhlu vnitřního tření  $\varphi \in (0^\circ, 90^\circ)$  prochází tato hmota od kapalného skupenství, přes oblast sypkých hmot do oblasti skupenství pevného. Na tuto skutečnost reagují i principy dopravy, skladování a procesů pracující v té které specifické oblasti úhlů vnitřního tření. Posuzuje-li se volba principu dopravy sypkých hmot z hlediska úhlu vnitřního tření, vzniká velmi silné kritérium optimalizace konstrukce dopravní trasy, skladovacích a manipulačních principů a v důsledku i ekonomičnosti záměru.

Zásadní rozdíl mezi skupenstvími je patrný z Obr. 1 [6]. První nádoba je naplněna tekutinou a tlaky jsou v ní v určité hloubce stejné a nezávislé na směru. Platí, že svislý tlak  $\sigma_{1\downarrow}$  je roven vodorovnému tlaku  $\sigma_{2\rightarrow}$ ,  $\sigma_{1\downarrow} = \sigma_{2\rightarrow}$ . V nádobě naplněné sypkou hmotou je  $\sigma_{1\downarrow} \neq \sigma_{2\rightarrow}$ , pro aktivní stav napjatosti platí  $\sigma_{1\downarrow} \geq \sigma_{2\rightarrow}$ , pro pasivní stav napjatosti  $\sigma_{1\downarrow} < \sigma_{2\rightarrow}$ . Tlaky na stěnu v nádobě zaplněné pevnou hmotou jsou  $\sigma_{1\downarrow} > 0$  a  $\sigma_{2\rightarrow}$  je vždy nulový, pokud se těleso nedotýká stěny.

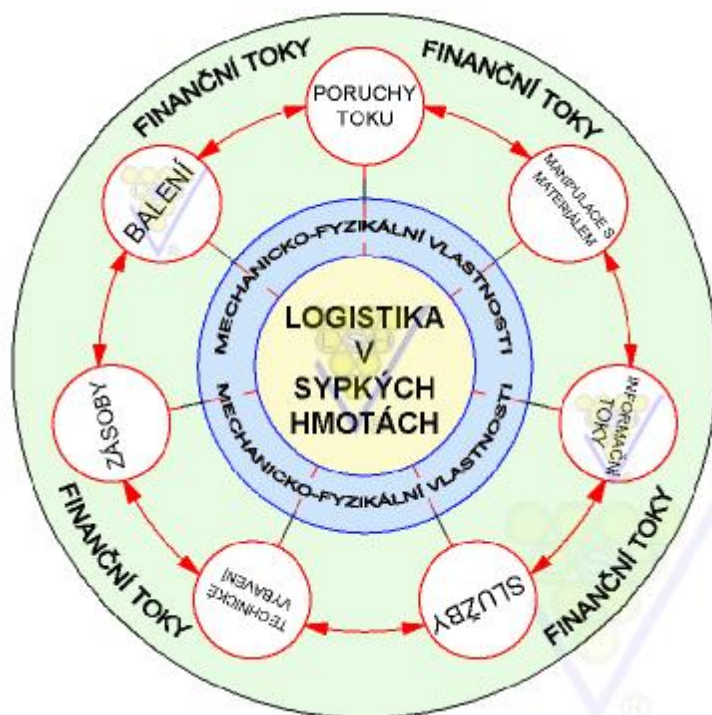


Obr. 1 Výchozí formy skupenství fluid (tekutina), sypká hmota, pevná hmota

Strategie, doprava, náklady, technologie jsou vázány na formu existence hmoty, chceme-li to vyjádřit jinak, tedy skupenství hmoty. O to více je logistika sypkých hmot vycházející ze studia materiálových toků závislá na okamžité formě existence hmoty obecně a v tomto případě sypké hmoty. Pokud je dopravovaná hmota v tekuté, nebo pevné podobě, má stabilizované nebo alespoň determinizované a tedy i se známou pravděpodobností stabilní a předpověditelně probíhající procesy. Míra rizika z hlediska možných změn vlastností je nízká. Jinak je tomu u sypkých hmot, kde je míra rizika z tohoto hlediska velmi velká. Jejich vlastnosti se zpravidla mění s polohou na dopravní trase, např. po pádu do zásobníku, po průchodu výsypkou, po technologické operaci, například průchodem drtičem, třídícím, v neposlední řadě mohou být závislé na čase, tlaku, vlhkosti atd.

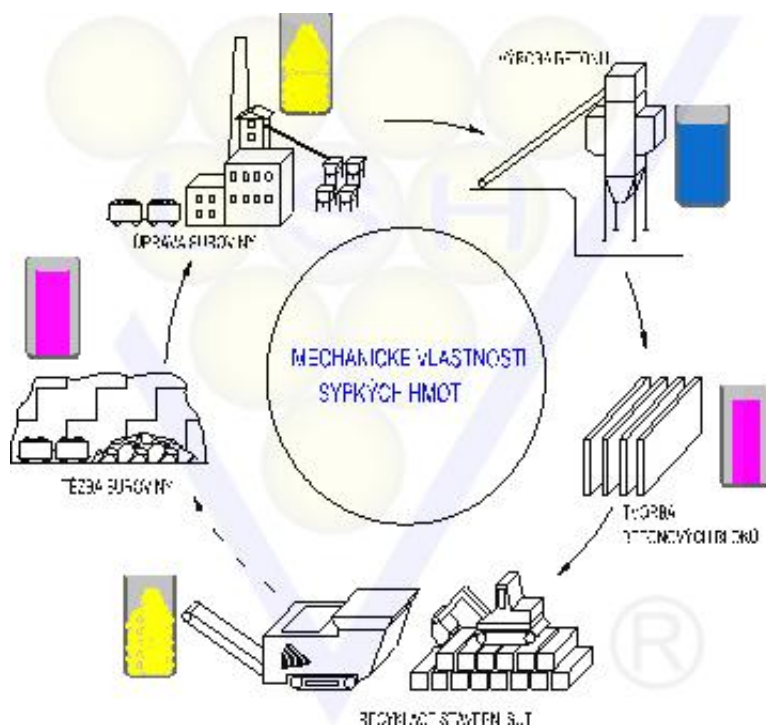
V podstatě se dá obecně říci, že mechanicko fyzikální vlastnosti sypké hmoty se zpravidla po dopravní trase mění, nejsou konstantní a zařízení je potřeba konstruovat většinou na možný rozsah změn. V tomto článku je za hodnotu charakterizující velikost vnitřních ztrátových prací v sypké hmotě volen úhel vnitřního tření a v závislosti na jeho změnách je doporučen i optimální princip aplikované dopravy, skladování v zásobníku i skládkování na hromadě. I když se na první pohled tyto souvislosti jeví jako zřejmé, převažující část provozních potíží a nehod je způsobena především neharmonickým vztahem vlastností sypké hmoty a technického zařízení, případně dopravy.

Klíč k řešení problémů je pak ve vlivu mechanicko-fyzikálních vlastností materiálů na volbu, vhodnost a funkčnost dopravních tras, náklady na odstraňování poruch, diskontinuity a havárií na dopravních trasách, finančních toků, výrobních nákladů atd. Nezanedbatelné jsou i náklady na informační toky a instalace snímačů zaručujících vysokou míru kvality informací. Volbou vhodné technologie pro konkrétní sypkou hmotu jsou vytvářeny i předpoklady pro ekonomicky výhodný a efektivní provoz celého řetězce vazeb.



**Obr. 2** Schéma výchozích vazeb v logistice sypkých hmot

Mechanicko-fyzikální vlastnosti sypké hmoty jsou určující pro stavbu zařízení a podmiňující pro informační a finanční toky. Stabilita a kontinuita hmotových toků je v podstatě závislá na okamžité formě hmoty, její nečekané, nebo nechtěné změny vlastností jsou většinou příčinou destrukce hmotových toků, informačních, finančních toků a kausálně i příčinou nárůstů nákladů a vzniku ztrát.



**Obr. 3** Příklad hmotového toku sypkých hmot a změn skupenství na příkladu toku stavebních hmot

Na příkladu materiálového toku ve stavebním průmyslu je zřejmé, že materiál při procesu toku přes technologická zařízení a po dopravních trasách stále mění své skupenství. Od pevného skupenství, v kterém probíhá těžba, přes balvanitou a sydkou hmotu, provzdušněnou sydkou hmotu, přes tekutinu (tekutý beton), přes opětovně pevnou hmotu betonových bloků, která se v procesu recyklace betonových panelů znovu přetváří na balvanitou sydkou hmotu, jejichž podrcením do podoby sydké hmoty, znovu nabytí tekuté formy a opětné přetvoření do užitného tvaru v podobě pevné hmoty. V tomto cyklu mění hmota na příkladu stavebnictví své skupenství z pevného na sydké, kapalné a znovu na pevné a sydké.

Tok po dopravní trase je možno brát z tohoto úhlu pohledu jako neustále se měnící skupenství hmoty na dopravních trasách s četnými oblastmi výskytu hmot v sydké podobě.

### 3. Všeobecná optimalizace volby zařízení

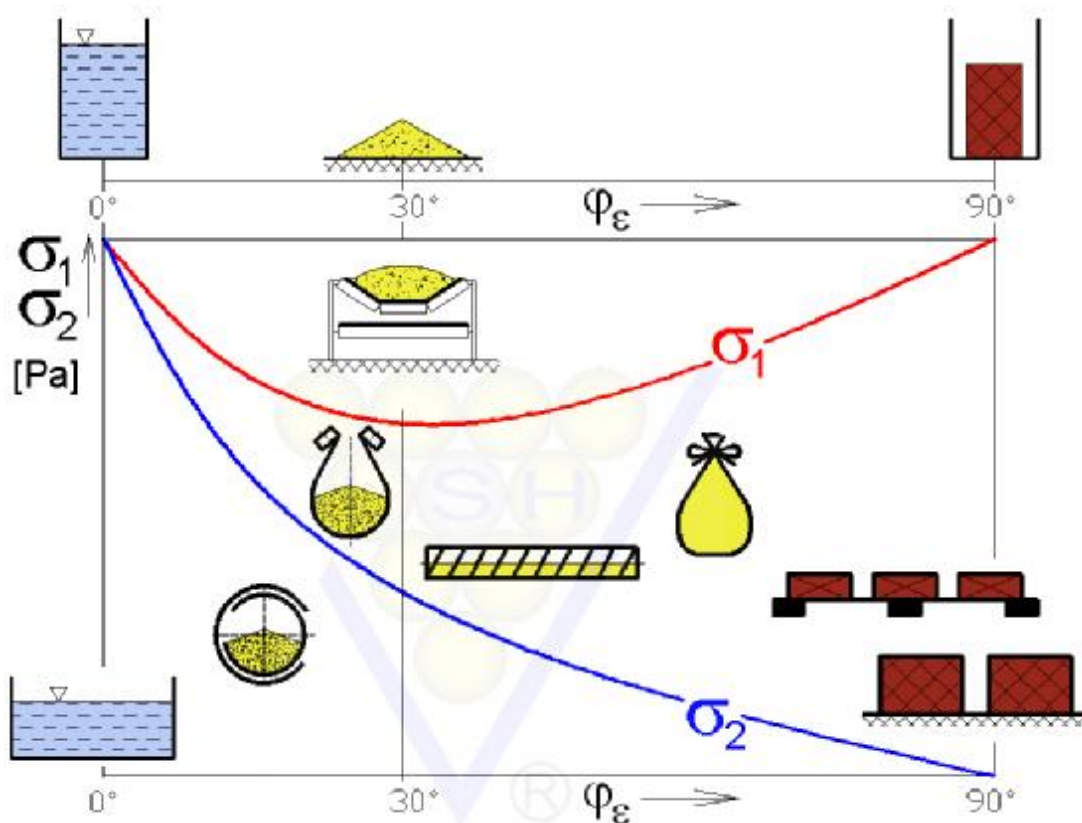
Uplatněním logistiky v sydkých hmotách dochází k aplikaci silného komplexního nástroje řešení vznikajících situací. V logistice sydkých hmot je pro všeobecnou optimalizaci funkce nutná správná volba harmonického vztahu mezi mechanickými a jinými vlastnosti sydké hmoty a vlastnostmi dopravních, procesních a skladovacích zařízení. Jedná se o relaci mezi tvarem, aplikovanými materiály, principem zařízení (dopravník pásový, hřeblový, trubkořetězový atd. ) a mechanicko-fyzikálními vlastnostmi sydkého materiálu.

Tímto postupem dochází k minimalizaci nákladů na stavbu (investice), provozních nákladů a v neposlední řadě nákladů vyplývajících z krytí výpadků výroby v důsledku kvalitativních a kvantitativních poruch toku sydké hmoty (klenbování, komínování, segregace, atd.)

Harmonizaci je možno hledat z hlediska zařízení v optimalizaci velikostních relací zařízení, optimalizaci třecích úhlů u konstrukčních materiálů, optimalizaci odolnosti proti abrazivitě, rychlosti probíhajících procesů (míchání, třídění, dělení, doprava, atd.). Velmi významná jsou i ekologická hlediska a hlediska bezpečnosti práce.

#### 3.1. Volba typu a principu dopravníků sydkých hmot jako funkce úhlu vnitřního tření $f(\varphi)$

Volba principu dopravníku a strategie přepravy zásadně ovlivňuje její funkčnost a ekonomičnost. Z hlediska úhlu vnitřního tření je vhodné volit i typ dopravníku, který je přiřazen konkrétní sydké hmotě Obr. 4. Předpokladem ovšem je známá hodnota úhlu vnitřního tření a jeho relativní stabilita v určité oblasti.

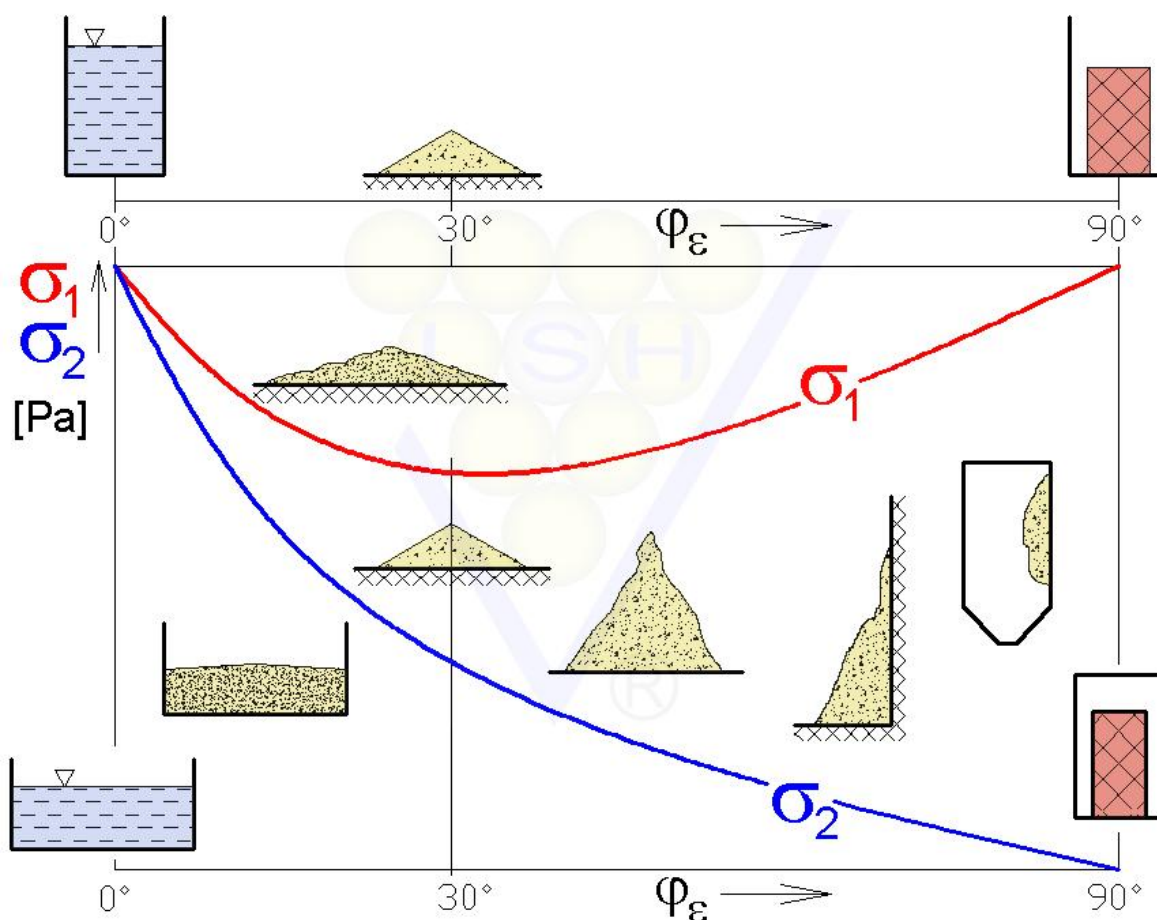


Obr. 4 Optimalizace přiřazení principu dopravy sydké hmoty z hlediska úhlu vnitřního tření a průběhů vertikálních  $\sigma_1$  a horizontálních  $\sigma_2 \rightarrow$  tlaků jako funkce úhlu vnitřního tření  $\varphi$  ( $0^\circ, 90^\circ$ )

Opakovaně se však v technické praxi setkáváme s volbou pásového, nebo šnekového dopravníku pro sytký materiál, u kterého kolísá úhel vnitřního tření důsledkem procesních operací mezi  $0^\circ$  až  $30^\circ$ . Tato relace může být přirovnána k použití pásového dopravníku k dopravě vody a současně říčního písku, což je situace značně rozdílná.

### 3.2. Volba typu a optimalizace funkce uzavřeného zásobníku v závislosti na stavu sytké hmoty $f(\varphi)$

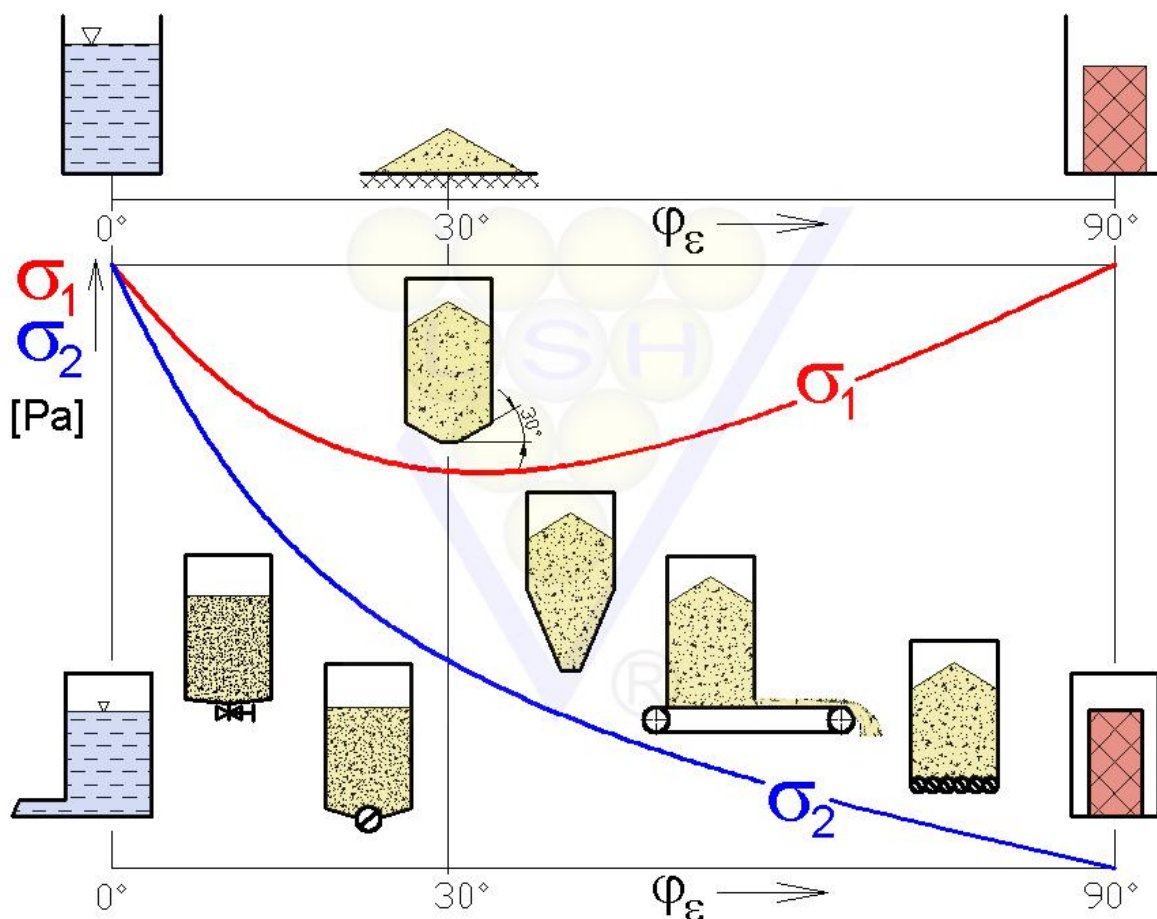
Konkrétní sytké hmotě je z hlediska úhlu vnitřního tření poměrně jednoznačně přiřazen tvar zásobníků, ve kterém je schopna téci hmotovým mechanismem toku. Podmínka požadovaného hmotového toku (Obr. 5) je dnes provozovateli standardně považována za nutnou pro plynulý chod procesů a dopravy. Splnění podmínky vzniku hmotového toku sytké hmoty ze zásobníku je závislé na tvaru zásobníku, sklonu stěn, materiálu stěn zásobníků a především úhlu vnitřního tření skladované hmoty. Pro menší úhly vnitřního tření je možné aplikovat menší úhly sklonu zásobníku a naopak. Pro vyšší hodnoty úhlu vnitřního tření je naopak vhodné aplikovat zásobník s celkovým aktivním dnem a svislými stěnami, nebo dokonce se stěnami se záporným úhlem jejich sklonu.



**Obr. 5** Optimalizace konstrukční stavby zásobníků sytkých hmot pro průběh tlaků  $\sigma_1 \downarrow$ ,  $\sigma_2 \rightarrow$  jako funkce úhlu vnitřního tření  $\varphi_I$  ( $0^\circ, 90^\circ$ )

### 3.3. Volba typu otevřené skládky v závislosti na stavu sytké hmoty $f(\varphi)$

U otevřených skládek je kapacita systému a nákladnost vybudování skládky dominantně závislá na úhlu vnitřního tření a průběhu tlaků  $\sigma_1 \downarrow$ ,  $\sigma_2 \rightarrow$ . U otevřených skládek dochází navíc ke změnám úhlu vnitřního tření důsledkem povětrnostních vlivů, případně důsledkem segregace při nasypávání na skládku. Tyto vlivy se dají eliminovat dočasným zpevněním (zhuštění) skládky a jejím dodatečným rozvolněním skládkovým strojem. Na Obr. 6 je znázorněna relace mezi úhlem sklonu svahu skládky a úhlem vnitřního tření sytké hmoty.



**Obr. 6** Tvar hromady pro skladování sypkých hmot v závislosti na úhlu vnitřního tření  $\varphi$  a průběhu tlaků  $\sigma_1 \downarrow$ ,  $\sigma_2 \rightarrow$ , jako funkce úhlu vnitřního tření  $\varphi_I$  ( $0^\circ, 90^\circ$ )

#### 4. Vlivy na změny úhlu vnitřního tření

Stav a vlastnosti sypkých hmot podléhají celé řadě vlivů. Mezi nejvýznamnější vlivy působící na úhel vnitřního tření je možno uvést mechanismy toku částic, geometrické tvary částic, mechanické, chemické, elektrostatické a jiné vazby mezi částicemi vzájemně, nebo mezi částicemi a tělesem zásobníku, nebo obecného zařízení. Se zmenšující se velikostí částic v mikro- a nanooblasti nabývají dominantní role vazby mezi částicemi.

Z hlediska provozovatele je možno vlivy dělit :

- Provozní podmínky – aplikované provozní stroje, drtiče, třídiče, konstrukce dopravních tras, regulační a řídicí prvky
- Změny vlastností sypkých hmot – stupeň zdrobnění, oddělování velikostních frakcí a tvarů částic, zhutňování hmoty na dopravní trase, pádem, časem, vznik vazeb, provzdušňování, případně kolísání vlhkosti
- Vnější podmínky – klimatické změny v ročních obdobích, teplota, vlhkost, situování zásobníku
- Změny receptur procesů a změny technologií – jiné granulometrické složení, záměny principů zdrobnění, změny intenzity dopravních toků

#### 5. Závěr

Logistika v sypkých hmotách řeší v oblasti provozů sypkých hmot vyváženě a komplexně ekonomičnost v relaci k funkční stabilitě procesů sypkých (výroba, skladování a doprava sypkých hmot) hmot ze dvou úhlů pohledů na řešený úkol :

První cestou vedoucí k dosažení funkční stability dopravních cest a ekonomičnosti dopravní trasy je navrhnout taková opatření, aby úhel vnitřního tření (ve smyslu vícerozměrné funkce vyjadřující ztrátové práce) byl konstantní po celé dopravní trase. Takto pojaté řešení je poměrně technicky a informačně náročné, proto dostačuje znalost úhlu vnitřního tření v konkrétních, někdy kritických místech dopravní trasy, případně jeho kolísání. Tato úloha vede na řízení úhlu vnitřního tření a jeho stabilizaci do relativně malého intervalu.

Druhou cestou řešení funkční stability a ekonomičnosti dopravní trasy je navržení dopravní trasy tak, aby geometrické tvary a rozměry (napouštěcí a vypouštěcí otvory, pádové výšky, typy

dopravníků, úhly změn směru dopravy, atd.) vždy respektovaly okamžitý úhel vnitřního tření příslušející konkrétním místům dopravní trasy a respektovaly principy kontinuity toku. Tato úloha vede na optimalizaci geometrických tvarů dopravní trasy, optimalizaci volby konstrukčních materiálů a rychlosti pohybu sypké hmoty. Tento postup řešení dopravních tras je obvyklejší než postup podle první cesty.

V praxi se většinou vyskytuje postup navržení dopravní trasy na předpokládané fiktivní vlastnosti sypké hmoty a celkový projekt je pak ožíván postupným přibližováním se očekávanému optimálnímu funkčnímu stavu dodatečnými úpravami dopravní trasy. Tento postup vyplývá z určité nepřístupnosti informací a neznalosti konkrétních mechanicko-fyzikálních vlastností sypkých materiálů ve vztahu k dopravní trase, ale i snahy projektantů realizovat dopravní trasu v nejméně nákladném provedení. Pak se často stává že je potřeba dopravní trasu dodatečně upravovat a postupným dovybavováním většinou nákladnými komponenty ožívovat.

Je pozoruhodné, že při návrhu dopravníku a technologických tras sypkých hmot se jen zřídka vychází ze skutečných mechanicko-fyzikálních parametrů sypké hmoty, jako výchozích parametrů. Tato skutečnost je ještě více zdůrazněna při dopravě nehomogenních surovin (například směsi dřeva a fosilního paliva) z hlediska chemického a granulometrického složení. Řešení většinou vychází z fiktivních hodnot o dopravovaných hmotách a z analogií, u které navíc nejsou plně známá kritéria podobnosti.

*Práce vznikla za podpory grantu č. 103/09/P510 Grantové agentury České republiky a také za podpory projektu (MSM 6198910016) - poskytovatel MŠMT ČR.*

#### **Literatura :**

- [1] Zegzulka Jiří: Pulsation beim Fließem von Schüttgütern. Schüttgut, r. 4, 1995, č. 1, s. 619-621.
- [2] Zegzulka, Jiří: An Ideal Bulk Material. Bulk Solids Handling. Trans Tech Publications. 2002, vol.22/No 3. p. 214-221, ISSN 0173-9980.
- [3] Zegzulka, Jiří, Hradil, Roman: Ideal Bulk Material. Ideální sypká hmota. Doprava a Logistika, Transport and Logistics, mezinárodní časopis, toto číslo vydal: BERG Košice, vydavatel: Faculty of Mechanical Engineering, Belgrad, p.11-17, 2002, ISSN 1451-107X.
- [4] Zegzulka, Jiří: Pressure Peaks in Bulk Material Flow – The Angle of Energy Slope. Trans Tech Publications. 2002, vol.22/No 6. ISSN 0173-9980.
- [5] Zegzulka, Jiří: Vliv mechanicko-fyzikálních vlastností sypkých hmot na konstrukci dopravních a úpravnických zařízení, Habilitační práce, VŠB-TU Ostrava, 1999.
- [6] Zegzulka, Jiří: Granular States of Material Aggregation – A Comparison of Ideal Bulk Material with Ideal Fluid and Ideal Solid Matter. Bulk Solids Handling, vol 23/2003, číslo 3, 162-167, ISSN 0173-9980.

**Recenzia/Review:** *doc. Ing. Gabriel Fedorko, PhD.*