



NOVÉ POZNATKY V EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI NA SVISLÝCH SKLADOVACÍCH SYSTÉMECH SYPKÝCH HMOT

Robert Brázda¹

Klíčová slova: horizontální tlak, vertikální tlak, sypká hmota, provzdušňování, zásobník

Abstrakt:

Mnoho důležitých průmyslových procesů spoléhá na kontakt mezi plynem a sypkou hmotou. Tyto procesy jsou rozmanité od sušení zrní, přes složité chemické procesy (fluidní spalování), až po dopravu fluidní vrstvou či provzdušňování problematických míst při skladování a dopravě sypkých materiálů. Provzdušňování je jedním ze způsobů, jak řešit problémy s kontinuitou toku ve svislých skladovacích systémech sypkých hmot (zásobnících) a dopravních zařízeních. Provzdušňovací zařízení pomocí přesně mířených dávek tlakového vzduchu rozrušují klenby, odstraňují nálepy či zvyšují tekutost skladovaného či dopravovaného sypkého materiálu.

1. Úvod

Problematika návrhu a efektivního provozu provzdušňovacího zařízení je rozčleněna do několika oblastí. Především otázka optimální lokace daného zařízení do míst se vznikem tokových poruch a otázka vstupního tlaku a množství potřebného upraveného tlakového vzduchu. Další otázkou je vliv provzdušňovacího zařízení na mechanicko-fyzikální vlastnosti sypkých hmot, především na stěnové (horizontální) a vertikální tlaky sypké hmoty v zásobníku sypkých hmot, a tím pádem vliv na vlastní konstrukci zásobníku. Výsledná měření tlaků byla porovnána s výpočtovými a návrhovými normami ČSN 73 5570 a DIN 1055 [2, 3].

2. Experimentální část měření

Experimentální činností bylo snímání vertikálních a horizontálních tlaků v zásobníku sypkých hmot při procesu řízeného provzdušňování sypkých hmot a bez provzdušňování, tedy při procesu relaxace. Ze získaných výsledků z experimentální části byla provedena analýza úhlu vnitřního tření a analýza napjatosti v sypkých hmotách. Veškerá experimentální činnost byla provedena na zařízeních Laboratoře sypkých hmot (LSH[®]) Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

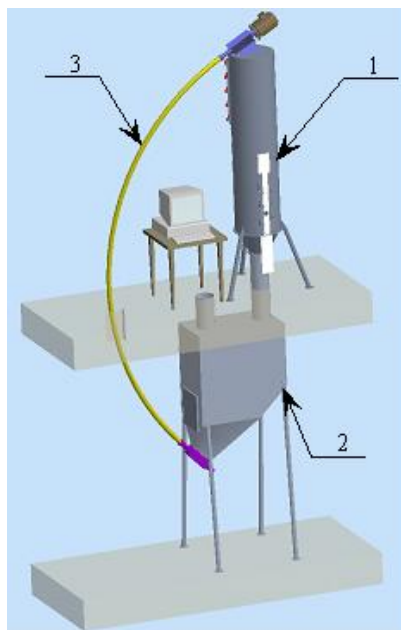
2.1 Horizontální tlaky σ_2

Měření horizontálních tlaků σ_2 sypké hmoty v zásobníku bylo provedeno pomocí tří měřících posuvných desek osazených tenzometrickými snímači (viz Obr. 1). Principiálně šlo o snímání tlaku na kruhový element měřící posuvné desky, který vychýlil z původní polohy tenzometrický snímač, což vyvolalo změnu odporu v měřícím můstku. Tato změna byla snímána a zaznamenávána přes AD kartu speciálně upraveným programem, který vyvolané změně udávané v milivoltech přisoudil hodnotu tlaku v pascálech.

K vytvoření závislosti horizontálního tlaku σ_2 na výšce materiálu v zásobníku, byly posuvné desky s tenzometry umístovány při každém měření do jasně definovaných hloubek a zároveň byla měřena volná hladina sypké hmoty v zásobníku. Při každém měření byly současně snímány horizontální tlaky σ_2 ve třech bodech zásobníku s cílem proměřit celou výšku válcové části. Měření se skládalo z následujících fází:

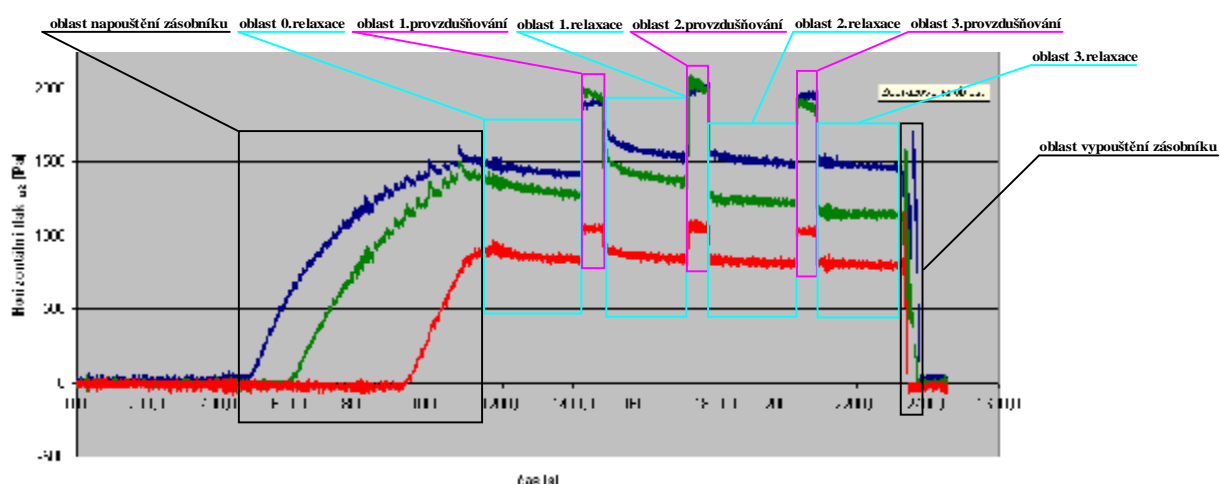
¹ Ing. Robert Brázda, Ph.D., Fakulta strojní VŠB - TU Ostrava, Institut dopravy, Laboratoř sypkých hmot, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava, Česká republika, Tel.: +420 59 732 52 08, Fax: +420 59 699 43 30, e-mail: robert.brazda@vsb.cz

- 1) napouštění zásobníku
- 2) 0. relaxace – doba trvání 240s
- 3) 1. provzdušňování – doba trvání 60s
- 4) 1. relaxace – doba trvání 240s
- 5) 2. provzdušňování – doba trvání 60s
- 6) 2. relaxace – doba trvání 240s
- 7) 3. provzdušňování – doba trvání 60s
- 8) 3. relaxace – doba trvání 240s
- 9) vypouštění zásobníku.



Obr. 1 Experimentální zařízení

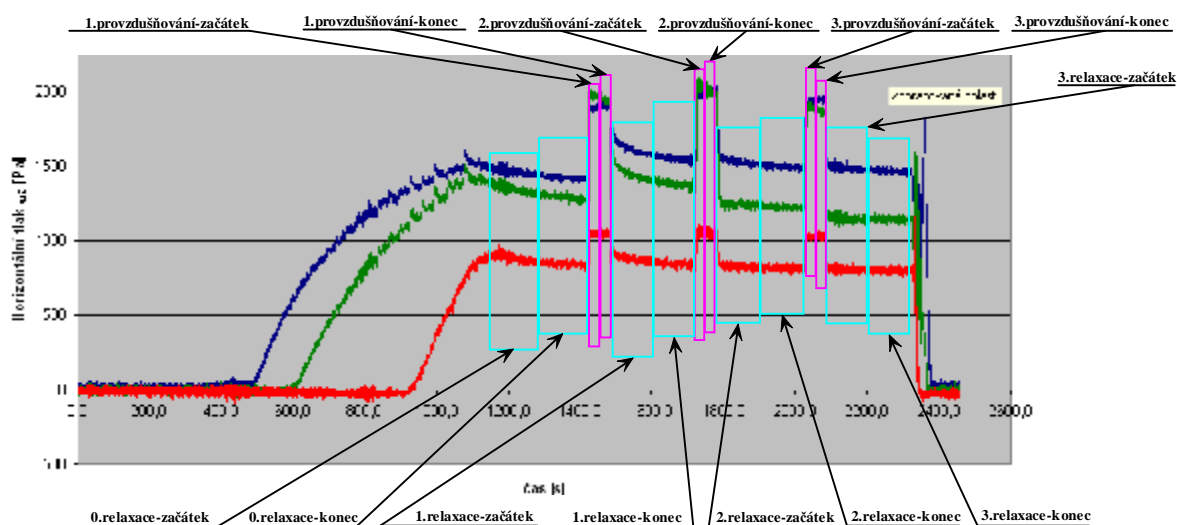
Čas napouštění zásobníku se pohyboval průměrně na hodnotě 600 sekund. Okamžitě po napuštění zásobníku sypkou hmotou začala fáze 0. relaxace, kdy se čekalo na ustálení měřících křivek. Tato fáze trvala 240 sekund. V dalších fázích docházelo k pravidelnému střídání fáze provzdušňování sypké hmoty a fáze relaxace. Doba provzdušňování za pomoci provzdušňovacího systému byla na základě možností stanovena na 60 sekund. Jmenované dvě fáze, provzdušňování a relaxace, se vystřídaly celkem třikrát. Po 3. relaxaci byl otevřen výpustný otvor a zásobník byl vyprázdněn.



Graf 1 Průběh jednoho měření [6]

Na Grafu 1 je znázorněn typický průběh jedné sady měření, kde modrá křivka reprezentuje nejnižše umístěný snímač, zelená křivka reprezentuje prostřední snímač a červená nevyšše umístěný snímač. Jednotlivé fáze měření jsou pro lepší orientaci v barevných rámečcích s popisem dané fáze. Fáze napouštění a vypouštění jsou v černých rámečcích, relaxační oblast je ve světle modrých a provzdušňovací oblast je ve fialových rámečcích.

Pro experimentální měření byla použita data pouze z fáze 2 až fáze 8. Oblast napouštění a vypouštění zásobníku (fáze 1 a fáze 9) byla pouze sledována.



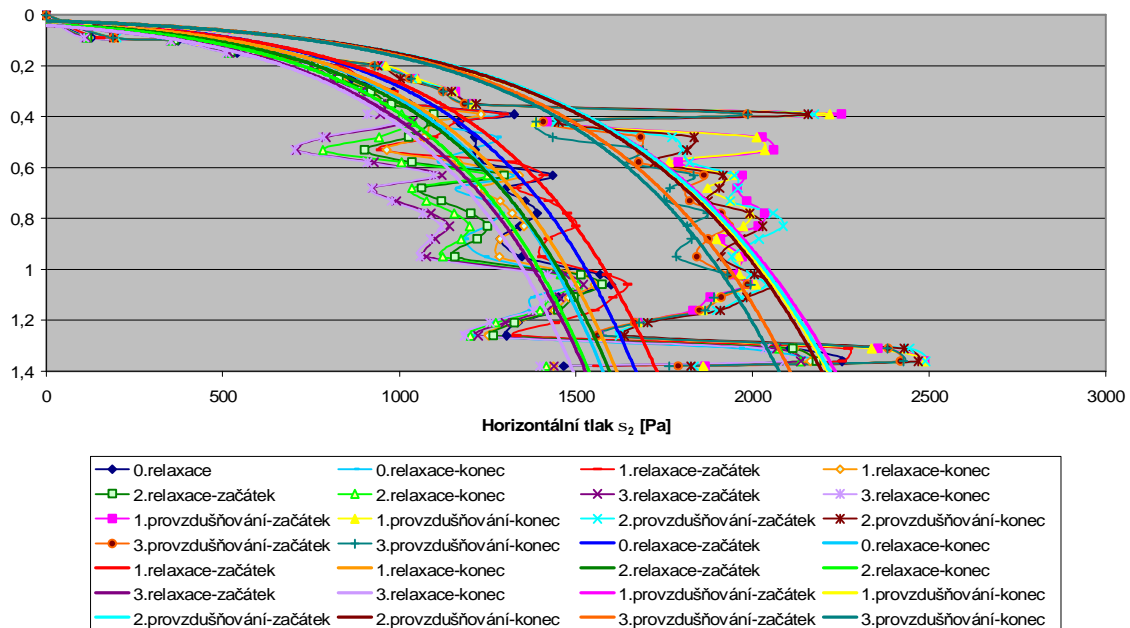
Graf 2 Sledované sekce měření [6]

Vzhledem ke zřejmé časové závislosti u oblastí relaxace sypké hmoty v zásobníku byly sledované oblasti rozděleny na přibližné poloviny, aby bylo možno sledovat změny tlaku na začátku a na konci relaxace a provzdušňování. Upravené schéma měření je vidět na Grafu 2 a z toho vyplývající nové mezifáze:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1) 0. relaxace – začátek | 8) 2. provzdušňování – konec |
| 2) 0. relaxace – konec | 9) 2. relaxace – začátek |
| 3) 1. provzdušňování – začátek | 10) 2. relaxace – konec |
| 4) 1. provzdušňování – konec | 11) 3. provzdušňování – začátek |
| 5) 1. relaxace – začátek | 12) 3. provzdušňování – konec |
| 6) 1. relaxace – konec | 13) 3. relaxace – začátek |
| 7) 2. provzdušňování – začátek | 14) 3. relaxace – konec |

Tímto způsobem byla proměřená celá výška materiálu v experimentálním zásobníku. Soubor naměřených dat byl zpracován graficky (viz Graf 3) s využitím proložení naměřených hodnot exponenciální regresní křivkou. Křivka původních naměřených hodnot každého měřicího cyklu i její příslušná regrese mají stejnou barvu z důvodu lepší orientace. V grafu jsou patrné dvě dominantní oblasti, a to oblast při relaxaci sypké hmoty a při jejím provzdušňování.

Horizontální tlaky s_2 - naměřené hodnoty a regresní křivky při relaxaci a provzdušňování sypké hmoty

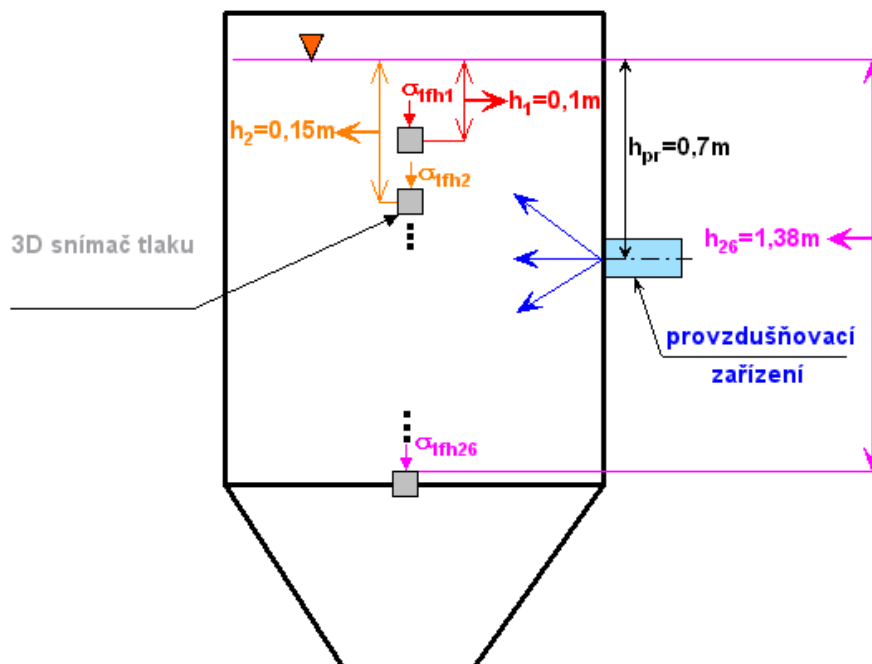


Graf 3 Naměřená a regresní křivkou proložená data [6]

2.2 Vertikální tlaky s_1

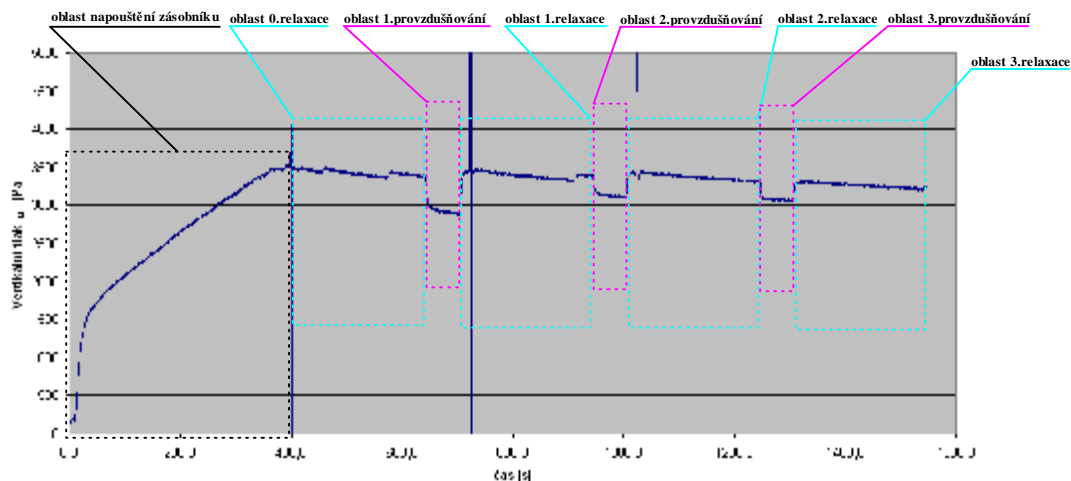
Měření vertikálních tlaků σ_1 sypké hmoty v zásobníku bylo provedeno pomocí 3D snímače [4]. Principiálně šlo o snímání tlaku na kruhový element osazený nalepeným tenzometrickým snímačem. Deformací tenzometrického snímače došlo ke změně odporu, a tato změna byla snímána a zaznamenávána přes AD kartu speciálně upraveným programem, který vyvolané změně udávané v milivoltech přiřadil hodnotu tlaku v pascálech.

K vytvoření závislosti vertikálního tlaku σ_1 na výšce materiálu v zásobníku byl 3D snímač umísťován při každém měření do jasně definovaných hloubek (viz Obr. 2) a zároveň byla měřena volná hladina sypké hmoty v zásobníku. Tyto měřené hloubky byly identické s hloubkami při měření horizontálních tlaků σ_2 . Samotné měření se skládalo z následujících fází:



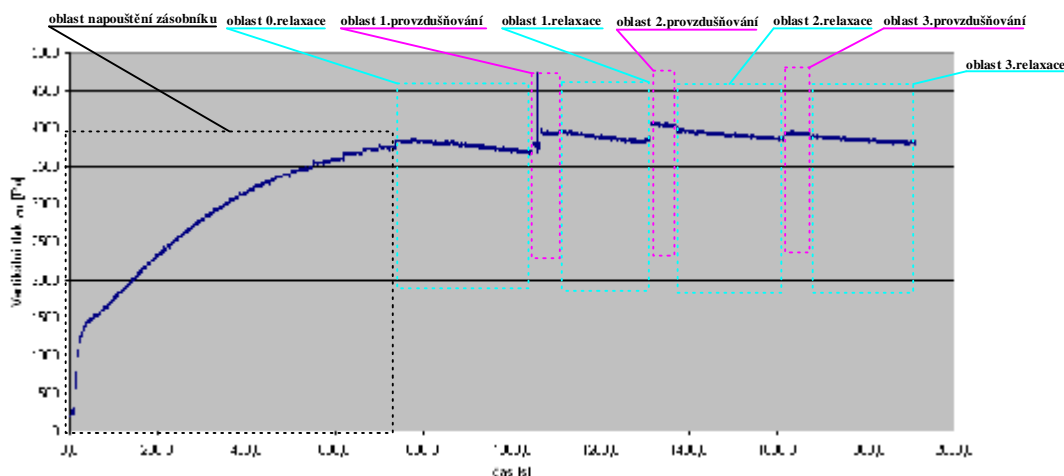
Obr. 2 Schéma měření [6]

- 1) napouštění zásobníku
- 2) 0. relaxace – doba trvání 240s
- 3) 1. provzdušňování – doba trvání 60s
- 4) 1. relaxace – doba trvání 240s
- 5) 2. provzdušňování – doba trvání 60s
- 6) 2. relaxace – doba trvání 240s
- 7) 3. provzdušňování – doba trvání 60s
- 8) 3. relaxace – doba trvání 240s
- 9) vypouštění zásobníku.



Graf 4 Snímání vertikálního tlaku 3D snímačem umístěným nad provzdušňovacím elementem [6]

Snímání veličin vertikálního tlaku σ_1 bylo obdobné jako při měření horizontálních tlaků σ_2 i s půlenými fázemi. Čas napouštění zásobníku byl variabilní a závisel na měřené hloubce materiálu nad 3D snímačem. Okamžitě po napouštění zásobníku sypkou hmotou začala fáze 0. relaxace, kdy se čekalo na ustálení měřících křivek. Tato fáze měla trvání 240 sekund. V dalších fázích docházelo k pravidelnému střídání fáze provzdušňování sytké hmoty a fáze relaxace. Doba provzdušňování za pomoci provzdušňovacího systému byla určena na 60 sekund. Tyto dvě fáze (provzdušňování a relaxace) se vystřídaly celkem třikrát. Po fázi 3. relaxace byl otevřen výpustný otvor a zásobník byl vyprázdněn. Vypouštění zásobníku již nebylo sledováno z bezpečnostních důvodů, neboť 3D snímač se v této fázi začal pohybovat spolu se sypkou hmotou směrem k výpustnému otvoru.



Graf 5 Snímání vertikálního tlaku 3D snímačem umístěným pod provzdušňovacím elementem [6]

Jak je patrné z obrázku (Obr. 2), tak provzdušňovací element byl stabilně umístěn v poloze 1,1 metru od horního okraje zásobníku. Jednotlivé fáze měření jsou pro lepší orientaci v barevných rámečcích s popisem dané fáze. Fáze napouštění je v černém rámečku, relaxační oblast je ve světle modrých a provzdušňovací oblast je ve fialových rámečcích.

Na výše zobrazených grafech, je zřejmé, že vertikální tlaky σ_1 snímané nad provzdušňovacím elementem byly tímto zařízením snižovány (viz Graf 4) a při umístění 3D snímače pod provzdušňovací element dochází ke zvyšování vertikálních tlaků σ_1 (viz Graf 5).

2.3 Určení úhlu vnitřního tření φ_e

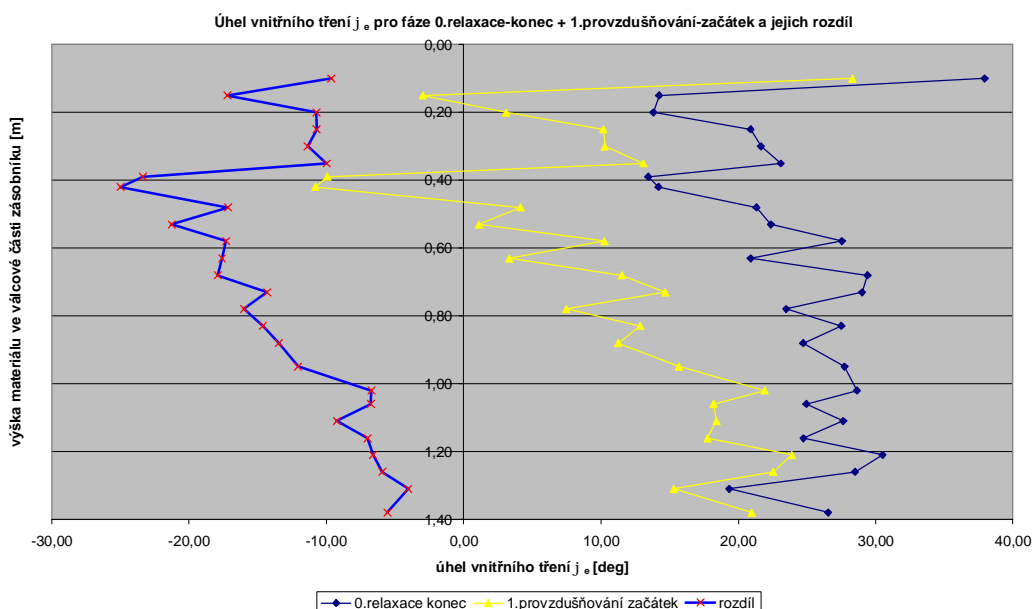
Cílem analýzy je určení vlivu provzdušňování a relaxace na změnu úhlu vnitřního tření φ_e . V první části byl použit vztah pro aktivní stav napjatosti k určení úhlu vnitřního tření φ_e za pomoci hlavních tlaků σ_1 a σ_2 [5]:

$$k_A = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1 - \sin(\varphi_e)}{1 + \sin(\varphi_e)} \quad (1)$$

Vztah (1) byl upraven do podoby [5]:

$$\varphi_e = \arcsin\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}\right) \quad (2)$$

Změřené vertikální tlaky σ_1 a horizontální tlaky σ_2 pro příslušné hloubky sytké hmoty jsou dosazeny do vztahu (2) a jsou vytvořeny příslušné grafy pro jednotlivé fáze měření.



Graf 6 Změna úhlu vnitřního tření pro fáze 0.relaxace-konec versus 1.provzdušňování-začátek [6]

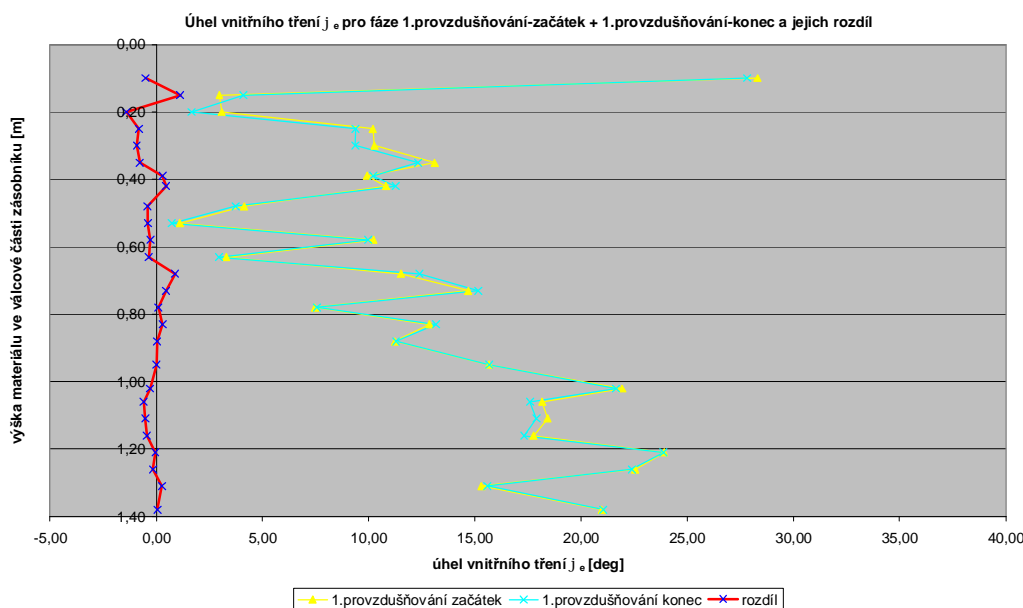
Jako příklad je uvedena analýza fáze relaxace-konec versus provzdušňování-začátek. Pro zobrazení výsledku výpočtu úhlu vnitřního tření φ_e byla vybrána fáze 0.relaxace-konec a 1.provzdušňování-začátek (viz Graf 2.6). Z grafu je zcela jasně patrné, že při provzdušňovací fázi dochází k výraznému poklesu hodnot úhlu vnitřního tření, který je nejpatrnější v oblasti nad 0,7 m hloubky sytké hmoty, což je prostor, kde byl umístěn provzdušňovací element. Vypočítaná střední hodnota úhlu vnitřního tření φ_e pro fázi 0.relaxace-konec má hodnotu 24,74° a střední hodnota úhlu vnitřního tření φ_e pro fázi 1.provzdušňování-začátek (viz žlutá křivka) má hodnotu 12,19°.

2.4 Vliv stavu napjatosti na úhel vnitřního tření j_e

Existuje předpoklad pasivního stavu napjatosti v místech experimentálního zásobníku, kde byl vypočítán záporný úhel vnitřního tření φ_e . Tento záporný úhel vnitřního tření φ_e byl detekován ve fázích 1., 2. a 3. provzdušňování a dále 2. a 3. relaxace v oblasti 0,2 m až 0,4 m hloubky sytké hmoty v experimentálním zásobníku. Při výpočtu úhlu vnitřního tření při pasivním stavu napjatosti se musí vzorec (2) upravit do podoby [5]:

$$\varphi_e = \arcsin\left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2}\right) \quad (3)$$

Při respektování stavu napjatosti je možno porovnat Graf 6, který má detekovány záporné úhly vnitřního tření, s Grafem 7, kde již byl pasivní stav respektován.



Graf 7 Úhel vnitřního tření pro fázi 1. provzdušňování při respektování stavu napjatosti [6]

3. Závěr

Závěrem lze konstatovat následující poznatky z analýzy horizontálních tlaků σ_2 :

- bylo potvrzeno, že provzdušňováním se zvyšují horizontální tlaky σ_2 ve válcové části experimentálního zásobníku, a tímto byl potvrzen předpoklad normy ČSN 73 5570.
- nebylo potvrzeno, že horizontální tlak σ_2 v místě provzdušňování vzrůstá o hodnotu přetlaku provzdušňovacího zařízení, jak je uvedeno v normě ČSN 73 5570.
- při provzdušňování nebylo indikováno snížení horizontálních tlaků σ_2 ve válcové části experimentálního zásobníku a toto případné snížení není rovno velikosti přetlaku provzdušňovacího zařízení, čímž byl vyvrácen předpoklad normy DIN 1055.
- velikost změny horizontálních tlaků σ_2 závisí na umístění provzdušňovacího elementu.
- provzdušňovacím elementem jsou ovlivněny i horizontální tlaky σ_2 v místě pod provzdušňovacím elementem, ačkoliv to normy ČSN 73 5570 a DIN 1055 neuvádějí a nijak neřeší.
- relaxací sypké hmoty dochází ke snižování horizontálních tlaků σ_2 .

Při měření vertikálních tlaků σ_1 pomocí 3D snímače se objevily dvě zóny. První zóna je oblast nad provzdušňovacím elementem a druhou zónou je oblast pod tímto zařízením. V těchto oblastech dochází k rozdílným vlivům provzdušňovacího zařízení na vertikální tlaky σ_1 .

Závěrem lze konstatovat následující poznatky z analýzy vertikálních tlaků σ_1 :

- v průběhu vlastní relaxační fáze dochází ke snižování vertikálních tlaků σ_1
- v průběhu vlastní provzdušňovací fáze dochází k méně výraznému snížení vertikálních tlaků σ_1
- cíleným provzdušňováním se snižovaly vertikální tlaky σ_1 od místa provzdušnění až k volné hladině naplněného zásobníku sypkou hmotou
- cíleným provzdušňováním se naopak zvyšovaly vertikální tlaky σ_1 od místa provzdušnění až k nejhlubšímu měřenému místu naplněného zásobníku sypkou hmotou
- umístění provzdušňovacího elementu má zásadní vliv na vertikální tlaky σ_1

Dosažením měřených hlavních tlaků do rovnice (2) dostaneme výsledky úhlu vnitřního tření φ_e pro jednotlivé měřené fáze. Z takto zobrazených a vyhodnocených měření vyplývá:

- v průběhu vlastní relaxační fáze (fáze relaxace-začátek v porovnání s fází relaxace-konec) dochází k mírnému (cca do $+5^\circ$) zvýšení úhlu vnitřního tření φ_e , pouze v oblasti 0,01 m až 0,02 m hloubky sypké hmoty ke snížení úhlu vnitřního tření φ_e .
- v průběhu vlastní provzdušňovací fáze (provzdušňování-začátek versus provzdušňování-konec) je zaznamenáno mírné zvýšení úhlu vnitřního tření (cca do $+5^\circ$) pouze v oblasti 0,5 m až 1 m hloubky sypké hmoty, které je zřejmě způsobeno

vlivem provzdušňovacího zařízení v hloubce 0,7 m sytké hmoty. V ostatních oblastech dochází ke snížení úhlu vnitřního tření φ_e cca o -4° v maximální hodnotě.

- cíleným provzdušňováním se výrazně snižoval úhel vnitřního tření φ_e pro fáze relaxace-konec versus provzdušňování-začátek průměrně o hodnotu $-12,13^\circ$ úhlu vnitřního tření φ_e
- relaxací sytké hmoty bezprostředně po fázi provzdušňování, přesněji porovnáním fází provzdušňování-konec versus relaxace-začátek je zjištěno zvýšení úhlu vnitřního tření φ_e o průměrnou hodnotu $11,61^\circ$ úhlu vnitřního tření φ_e sytké hmoty.
- dosažení záporných hodnot úhlu vnitřního tření φ_e sytké hmoty je zřejmě způsobeno pasivním stavem napjatosti v sytké hmotě a tudíž nutností použít výpočet vnitřního tření φ_e sytké hmoty dle vzorce (3).

Tento článek vznikl za podpory grantu Grantové agentury České republiky uvedeným pod číslem 101/09/P444 a grantu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky s číslem MSM 619 891 0016. Děkuji za podporu.

Literatura:

- [1] Janssen, H. A. Versuche über getreidedruck in silozellen, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Band XXXIX, No. 35, 31. August 1895, s. 1045-1049.
- [2] Norma ČSN 73 5570, Navrhování konstrukcí zásobníků, Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [3] Norma DIN 1055, teil 6, Lastannahmen für Bauten, Lasten in Silozellen, Berlin 1987.
- [4] Slíva, A. Sledování napětového stavu sytké hmoty pomocí 3Dimenzionálního (tříosového) snímače, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004, 109 stran, ISBN 80-248-0629-0.
- [5] Zegzulka, J. Mechanika sytkých hmot, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004, ISBN 80-248-0699-1.
- [6] LSH[®], www.lsh.vsb.cz

Recenzia/Review: Ing. Janka Šaderová, PhD.