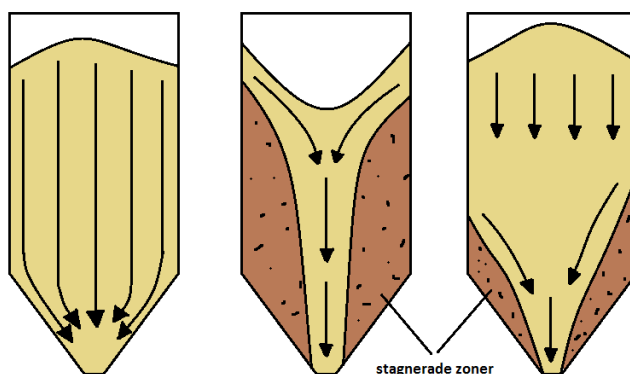
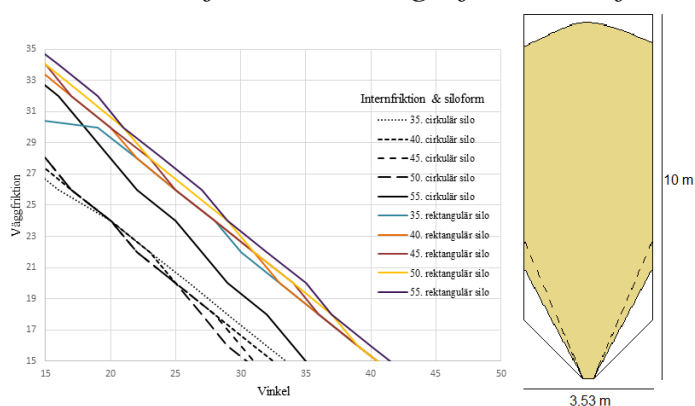


# Riktlinjer för silodesign för massflöde

## Guidelines for silo design for mass flow



Frida Mellgren

Arbetsrapport 4 2014  
Master thesis 30hp A2E  
Master of Science in Forestry

Handledare:  
Sylvia Larsson



# Riktlinjer för silodesign för massflöde

*Guidelines for silo design for mass flow*

**Frida Mellgren**

Examensarbete vid institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Master of Science in Forestry

EX0772, Second cycle, A2E

Handledare: Sylvia Larsson, SLU, institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Examinator: Michael Finell, SLU, institutionen för skogens biomaterial och teknologi

---

Sveriges lantbruksuniversitet

Institutionen för skogliga biomaterial och teknologi

Utgivningsort: Umeå

Utgivningsår: 2014

Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

## **Förord**

Detta arbete är ett examensarbete, vilket ingår i studierna på jägmästarprogrammet vid SLU, Umeå. Examensarbetet motsvarar 30 högskolepoäng och har genomförts vid institutionen för skogens biomaterial och teknologi.

Det är många människor som har varit till ovärderlig hjälp under arbetets gång. I första hand vill jag tacka min handledare Sylvia Larsson som på ett engagerat sätt väglett mig och alltid varit mån om att finnas till hands när frågetecken dykt upp. Vidare vill jag tacka de personer jag varit i kontakt med för att få tillgång till information för de autentiska exemplen. De förblir dock anonyma i detta arbete. Till sist vill jag tacka min fästman Erik Mellgren som har varit ett stort stöd och ordnat så att jag fått all tid jag behövt för skrivandet.

## Sammanfattning

Det övergripande syftet med detta arbete var att skapa en övergripande sammanställning rörande ämnena flödesproblem och silodesign och specifikt ta fram riktlinjer för hur massflöde ska uppnås i silos för hantering av olika biobränslen. Dessutom syftade arbetet till att ta upp två autentiska exempel med flödesproblem och hur dessa kunde designas om för massflöde.

För att ta fram riktlinjer har arbetet utgått från värden framtagna av Wu, Schott & Lojdewijks (2011). Dessa har sedan bearbetats i programvaran Silo Stress Tool skapad av Dietmar Schulze (2013) för att utvinna gränsvärden för massflöde beroende av egenskaperna internfriktion, väggfriktion och vinkel på silons ficka.

Resultatet visar gränsvärden för massflöde för både cirkulära och rektangulära silos. Vidare visar resultatet att cirkulära silos kräver en brantare lutning på fickan för att bibehålla massflöde jämfört med rektangulära silos. Analys av de autentiska exemplen visade att den nuvarande vinkeln på fickan på 45° bör designas om till högst 27° och 28° för att uppnå massflöde i silon. Arbetet klargjorde vikten av att göra arbetet med silodesign rätt från början för att undvika kostsamma ombyggnationer om flödesproblem uppstår. Där utgör väggfriktion och vinkeln på fickan kritiska parametrar för massflöde.

*Nyckelord:* Silodesign, flödesproblem, massflöde, tunnelflöde, Silo Stress Tool

## Summary

The overall purpose of this study was to create a general overview on the topics flow problems and silo design and specifically develop guidelines for how mass flow is to be achieved in silos for handling with various biofuels. In addition, the work was intended to present two authentic examples with flow problems and how they could be redesigned for mass flow.

To develop guidelines, work has been based on values produced by Wu, Schott & Lojdewijks (2011). These values were then processed in the software Silo Stress Tool created by Dietmar Schulze (2013) in order to extract the mass flow boundaries dependent on the properties internal friction, wall friction and the angle of the hopper.

The results show mass flow boundaries for both circular and rectangular silos. Furthermore, the results show that circular silos requires a steeper slope of the hopper to maintain mass flow compared to rectangular silos. Analysis of the authentic examples showed that the current angle of the hopper of 45° should be redesigned to a maximum of 27° and 28° to achieve mass flow in the silo. The work clarified the importance of doing silo design right from the beginning to avoid costly reconstruction if flow problems should occur. Therein constitutes wall friction and the angle of the hopper critical parameters for mass flow.

*Keywords:* Silo design, flow problems, mass flow, funnel flow, Silo Stress Tool

# Innehåll

Inledning .....	8
<i>Syfte</i> .....	8
<i>Teori</i> .....	8
Massflöde och tunnelflöde .....	8
Flödesproblem.....	10
Design för massflöde.....	11
Tryck i silo .....	17
Material och metod .....	20
<i>Silo Stress Tool</i> .....	20
<i>Materialegenskaper</i> .....	28
<i>Exempel 1</i> .....	28
<i>Exempel 2</i> .....	29
Resultat.....	30
<i>Riktlinjer för silodesign</i> .....	30
<i>Autentiska exempel</i> .....	36
Diskussion.....	38
<i>Slutsats</i> .....	39
Källförteckning .....	41

# Inledning

## *Syfte*

Flödesproblem är ett relativt vanligt industriellt problem, inte minst när det gäller lagring och flöde i silos. En av de vanligaste anledningarna till sådana problem är att silos inte är optimalt designade för det bulkmaterial som skall hanteras. Detta kan leda till oönskade effekter som tillfälliga produktionsstopp eller kvalitetsförsämringar hos produkten (Schulze, 2008).

Flödesproblem hanteras oftast utifrån erfarenheter och genom så kallat "trial and error" där egna lösningar appliceras. Kunskap kring hur flödesproblem ska hanteras och framförallt hur de ska förebyggas är mer ekonomiskt hur alla synvinklar.

Det saknas lättillgänglig litteratur på svenska i ämnena silodesign och bulkhantering. Syftet med detta arbete är därför att skapa en översiktlig sammanfattning av flöde i silos och design samt att specifikt arbeta fram riktlinjer för silodesign för att uppnå massflöde i silos för hantering av olika typer av bränslepellets. Dessutom ges några autentiska exempel på dåligt fungerande silos för bränslepellets och hur dessa kan designas om för att uppnå massflöde.

## *Teori*

Det finns idag en rad studier kring silodesign där Jenike (1964) var en av de första att utveckla en procedur för silodesign. Efter detta har fler designutföranden utvecklats men för biomaterial som pellets är Jenikes design fortfarande den lämpligaste och mest tillämpbara (Khan, Bradley & Berry, 2013). Dietmar Schulze har gjort omfattande forskning kring ämnet flöde och lagring i silos och karaktärisering av bulkmaterial (Schulze, 2008). Han har också utvecklat en programvara för simulering av flöde och beräkning av tryckförhållanden i silos (Dietmar Schulze, 2013) Det finns även idag en rad företag som bland annat arbetar med konsultering för att undkomma flödesproblem.

Arbetet är begränsat till silos som hanterar bibränslen och förädlade bibränslen i form av pellets, torrifierad pellets och träflis. I första hand diskuteras cirkulära silos men arbetet kommer även kortfattat ta upp rektangulära silos.

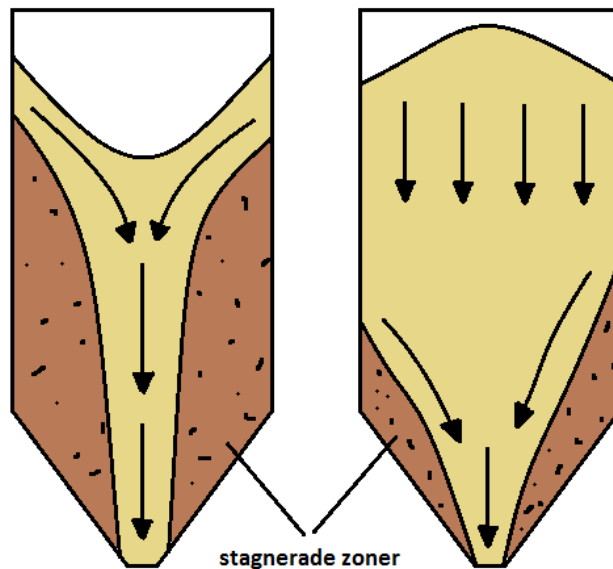
### **Massflöde och tunnelflöde**

Flödet ur en silo förekommer i två distinkta former: massflöde och tunnelflöde. Namnen för dessa typer av flöden grundar sig i hur materialet flödar i silon (Chase, 2004). Tunnelflöde är en egen översättning av begreppet "funnel flow", och får duga då ingen svensk standardterm finns för begreppet. "Häng" är ett annat vardagligt uttryck för tunnelflöde.

Tunnelflöde karaktäriseras av att bulkmaterialet i silon flödar i en kanal eller tunnel i centrum av silon. Det skapas vid utloppet då material som stagnerar växer vid ytan av



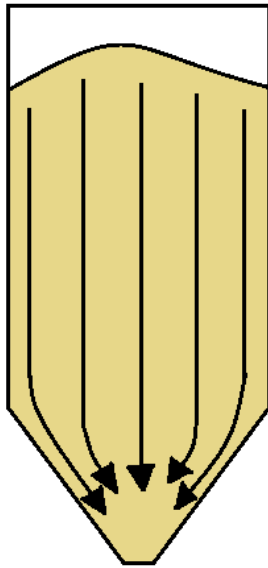
siloväggen. Den stagnerade zonen kan sträcka sig ända upp till inläppet och det hela leder till att en tunnel skapas, se Figur 1 (Schulze, 2008).



**Figur 1.** Flödesprofiler som visar tunnelflöde med olika utbredning av de stagnerade zonerna (Schulze, 2008).

*Figure 1. Flow profiles showing funnel flow with various propagation of the stagnant zones.*

Massflöde kännetecknas av att alla partiklar i bulkmaterialet rör sig vid uttömning av en silo, se Figur 2. För att massflöde ska vara möjligt krävs att väggen är brant eller att friktionen mot väggen är tillräckligt låg (Schulze, 2011). Hastigheten är däremot inte densamma genom hela silon utan det är högre hastighet i centrum och lägre hastighet vid silons väggar. Blir hastighetsvariationen för stor på grund av för svag lutning på väggen eller på grund av för hög väggfriktion så uppstår stagnerade zoner, tunnelflöde (Schulze, 2011).



**Figur 2.** Silo med massflöde, alla partiklar i bulkmaterialet rör sig vid uttömning (Schulze, 2008).  
*Figure 2.* Silo with mass flow, all particles in the bulk material moves at discharge.

Stora fördelar förs ofta fram med massflöde eftersom det är kopplat till få flödesproblem. Det finns emellertid också nackdelar med massflöde (Khan, Bradley och Berry, 2013):

- Högt vägstryck på silon.
- Förslitning på siloväggen.
- Eventuellt behov av en högre konstruktion av silon för att kompensera volymminskningen av en brantare lutning på den nedre fickan.

### **Flödesproblem**

Flödesproblem som uppstår i en silo är kopplat till designen av fickan. Flödesproblemen uppdelas sedan i två huvudgrupper, antingen så sker inte uttömningen önskvärt eller så segregerar materialet under flöde (Chase, 2004). Khan, Bradley & Berry (2013) redovisar mer specifikt vilka vanliga flödesproblem som förekommer:

- Stagnerade zoner, även känt som döda zoner.
- Lång och okänd uppehållstid för materialet i silon.
- Fraktionering av materialet vilket kan leda till varierad bulkdensitet.
- Stopp och svallningar av materialet.

Problemen är starkt kopplade till tunnelflöde och kan därför undkommas om silon designas för massflöde (Khan, Bradley & Berry, 2013).

Vid massflöde kvarstår emellertid risk för stopp av flödet genom att materialet valvar sig (Schulze, 2008). Valvning avser spontan bildning av en båglignande stagnerad zon som bildas vid utloppet av fickan (Drescher, Waters & Rhoades, 1995). Det är en sammankoppling av partiklarna i bulkmaterialet som skapar en blockering. Risken för att

valvbildning ska uppstå ökar om partiklarna i ett bulkmaterial är stora i relation till fickans utsläpp (Khan, Bradley & Berry, 2013).

I kommande delar behandlas ämnet design för massflöde och hur flödesproblem kan förebyggas.

### **Design för massflöde**

Den mest tillämpbara metoden för silodesign är framtagen av Jenike (1964).

Designmetoden beräknar de två avgörande faktorerna för massflöde: fickans lutning och storleken på utloppet (Schulze, 2008).

Fickans lutning avser den maximala lutning där massflöde fortfarande råder och det inte uppstår några stagnerade zoner. Direkt kopplat till detta är siloväggens friktion gentemot bulkmaterialiet (väggfriktion) eftersom den påverkar flödet.

Storleken på utloppet påverkar såväl flödet som risken för att bulkmaterialiet välver sig över utloppet och bildar en brygga.

Ett lättillgängligt verktyg för silodesign är ”Silo stress tool” - <http://www.dietmar-schulze.de/fre.html> - en gratis programvara utvecklad av Dietmar Schulze (2011).

Programmet beräknar tryck i silos med enkel geometri, dvs silos med en vertikal sektion plus en nedre ficka. Mer specifikt beräknar programmet det vertikala normaltrycket som materialet utsätts för och det normala väggtryck som agerar på olika höjdnivåer i silon (Dietmar Schulze, 2011). Resultatet kan sedan visa vilket tryck materialet utsätts för under flöde och lagring. Resultatet visar även på vilket typ av flöde som bildas utifrån de material- och siloegenskaper som valts.

Mått som karakteriserar flödesegenskaperna för bulkmaterial måste vara kända för att kunna använda Jenikes design, samt även Silo stress tool. Dessa är: bulkdensitet, effektiv vinkel för internfriktion, väggfriktion och ”unconfined yield strength” (Schulze, 2008). De tre förstnämnda parametrarna plus metoden för att beräkna dessa presenteras nedan:

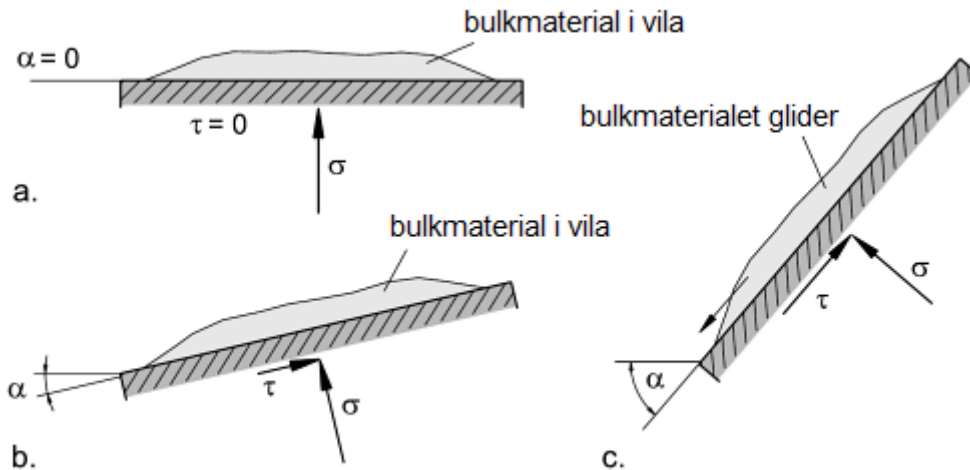
#### Internfriktion

Den effektiva vinkeln för internfriktion karakteriserar den interna friktionen i bulkmaterialiet (Wu, Schott & Lodewijks, 2011). Viktigt att påpeka är att den effektiva vinkeln för internfriktion inte i verkligheten är en vinkel. Snarare är det ett mått på kvoten mellan skjuvande krafter och normalkrafter som agerar mot materialet (Schulze, 2008).

#### Väggfriktion

Friktionen mellan en yta, ex. väggen på en silo, och ett fast bulkmaterial är det som definierar väggfriktion. Vid beräkningar med väggfriktion benämns väggfriktion som koefficienten av väggfriktion eller vinkeln av väggfriktion (Schulze, 2011). Närmre innebär detta kvoten mellan den skjuvande kraften och den normalkraft som agerar mot väggen. Storleken på skjuvtrycket är beroende av friktionen mellan materialet och ytan. En grov yta ger upphov till större skjuvtryck än en slät yta och en grov yta skulle därför även

leda till större vinkel för väggfriktion, se Figur 3. Väggfriktion beror även ofta av partikelstorleken och med detta innebär att desto finkornigare bulkmaterial desto större vinkel för väggfriktion (Schulze, 2008).



**Figur 3.** Olika exempel på skjuvtryck där  $\tau$  är den skjuvande kraften,  $\sigma$  är normalkraften och  $\alpha$  visar på vinkeln (Schulze, 2008).

**Figure 3.** Various examples of shear stresses, where  $\tau$  is the shear force,  $\sigma$  is the normal force and  $\alpha$  shows the angle.

Väggfriktion har stor betydelse vid beräkningar av silodesign (Schulze, 2008). Vinkeln för väggfriktion påvisar hur situationen ser ut när fasta bulkmaterial är i kontakt med olika väggmaterial (Wu, Schott & Lodewijks, 2011). En känd väggfriktion ger också möjlighet att fatta beslut om förbättring av ytan för att förbättra flödesbarheten. Förbättringar kan i detta fall innebära polering av väggen eller användning av liner (Schulze, 2011).

Resultat visar att vinkeln av väggfriktion för stålplåt ökar med ökad fukthalt. Denna ökning sker enbart till en början för att sedan bli konstant mellan 5 % och 10 % fukthalt.

Anledningen till en ökning beror förmodligen främst på adhesiva krafter som bildas mellan partiklar och väggen. Ett resultat tvärtemot detta fås om väggytan består av exempelvis plast. Vinkeln av väggfriktion minskar här med ökad fukthalt och detta beror nog främst på att ytan inte blötläggs i lika stor utsträckning och att det troligtvis bildas en vätskeyta runt varje partikel (Schulze, 2008).

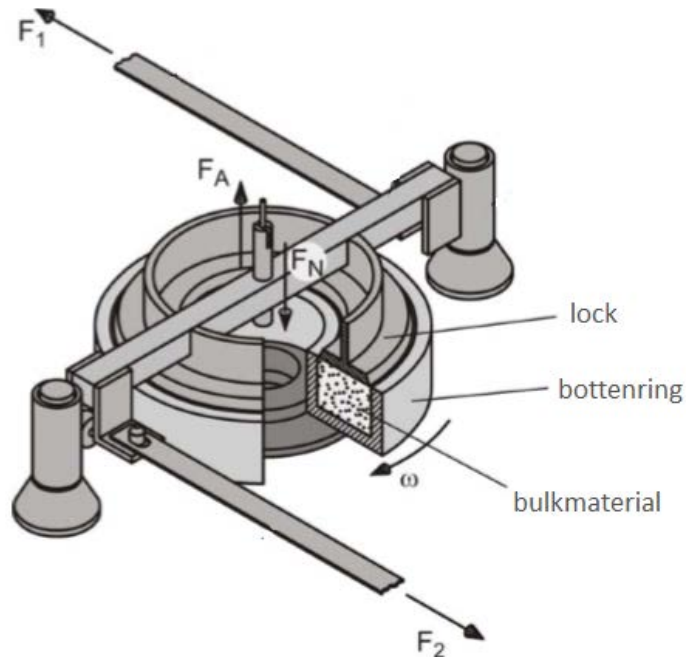
### Bulkdensitet

Bulkdensiteten definieras som massan (kg) genom volymen ( $m^3$ ) och beror av partikeldensiteten och porvolymen (Oberberger & Thek, 2010). Bulkdensiteten påverkar flödet genom att en större gravitationskraft agerar på ett bulkmaterial med högre bulkdensitet (Schulze, 2011).

I väldigt stora silos utsätts bulkmaterialen för kompaktering. Denna kompaktering har visat sig kunna leda till en ökning av densiteten upp till 12 % (Ravenet, 1981).

## Skjuvtest

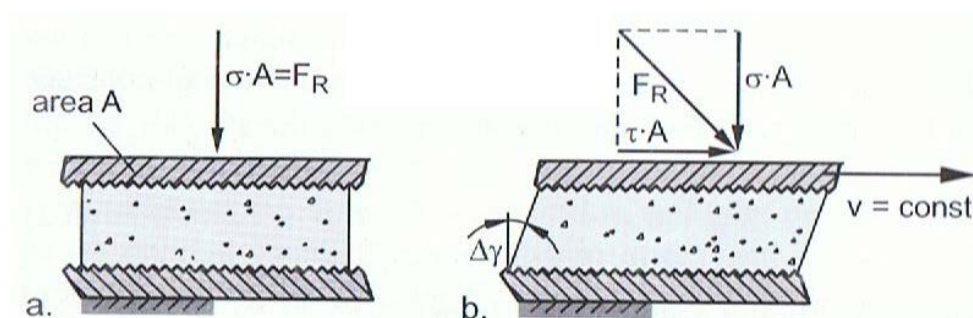
Skjuvtestning är den metod som används för att mäta flödesegenskaper hos fasta bulkmaterial och för att göra detta används en skjuvtestare, se Figur 4 (Schulze, 2008).



**Figur 4.** Ringskjuvtestare (Schulze, 2008).

*Figure 4.* Ring shear tester.

Vid ett skjuvtest utsätts provmaterialet för ett vertikalt normaltryck samtidigt som provmaterialet skjuvas horisontellt, se Figur 5 (Wu, Schott & Lodewijks, 2011). Detta ger upphov till ett horisontellt skjuvtryck (Schulze, 2008). Upprepas denna procedur flera gånger vid olika vertikala normaltryck utvinns en graf där vinkeln för internfriktion kan beräknas.

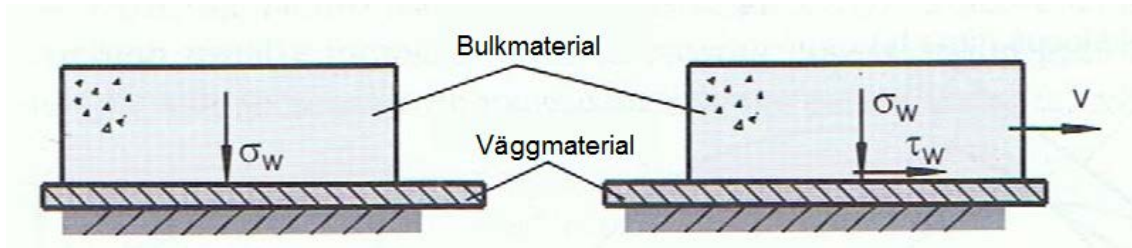


**Figur 5.** a. Provmaterialet utsätts för ett vertikalt normaltryck,  $\sigma$ ; b. skjuvning av provmaterialet med en konstant hastighet,  $v$  (Schulze, 2008).

*Figure 5.* a. The test specimen is subjected to a vertical normal pressure,  $\sigma$ ; b. shearing of the test specimen at a constant velocity,  $v$ .

Även vinkeln för väggfriktion bestäms med hjälp av ett skjuvtest. Principen för ett väggfriktionstest kan ses i Figur 6. Bulkmaterial placeras ovanpå det väggmaterial som ska undersökas och sedan utsätts materialet för ett vertikalt tryck. Det uppstår då ett motsvarande normaltryck mellan bulk- och väggmaterialet. Bulkmaterial skjuvas sedan

med en konstant hastighet mot väggmaterialet och skjuvtrycket mellan materialet och väggen uppmäts. Denna procedur upprepas med olika vertikala tryck där testet startar med ett högt tryck som sedan trappas ned. Precis som för skjuvtestet för internfriktion utvinns en graf där vinkeln för väggfriktion kan beräknas (Schulze, 2011).

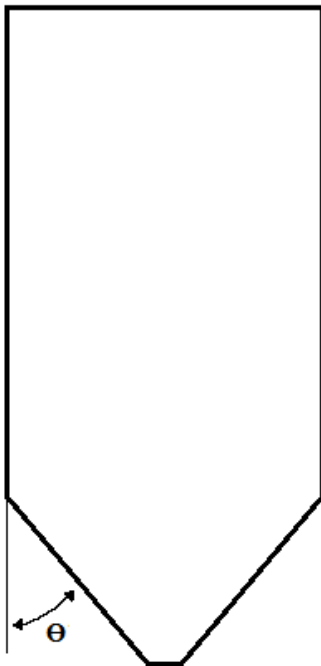


**Figur 6.** Princip för test av väggfriktion. Provmaterialet skjuvas mot ett väggmaterial med konstant hastighet,  $v$  (Schulze, 2008).

*Figure 6.* Principle for measuring wall friction. The test specimen is sheared against a wall material with constant velocity,  $v$ .

### Fickans lutning

För att uppnå massflöde är fickans lutning en av de viktigaste parametrarna. Lutningen anges av vinkeln på fickan och definieras av  $\Theta$  enligt Figur 7.



**Figur 7.** Vinkeln,  $\Theta$ , definierar lutningen på fickan hos en silo (Jenike, 1964).

*Figure 7.* The angle,  $\Theta$ , defines the slope of the hopper.

Den erforderliga vinkeln på fickan beror av den effektiva vinkeln för internfriktion och vinkeln för väggfriktion. Ökar dessa värden resulterar det i att en lägre vinkel på fickan krävs för att bibehålla massflöde. Vinkeln kan minskas till den punkt då massflöde inte

längre går att uppnå (Jenike, 1964). Vinkeln på fickan för att uppnå massflöde varierar oftast mellan  $40^\circ$  till  $0^\circ$  (Chase, 2004).

*Vid beräkning av fickans lutning utifrån Jenike's design bör en säkerhetsmarginal på  $3^\circ$  till  $5^\circ$  subtraheras från den beräknade maximala vinkeln eftersom massflöde har beräknats utifrån ideala förhållanden (Schulze, 2008).*

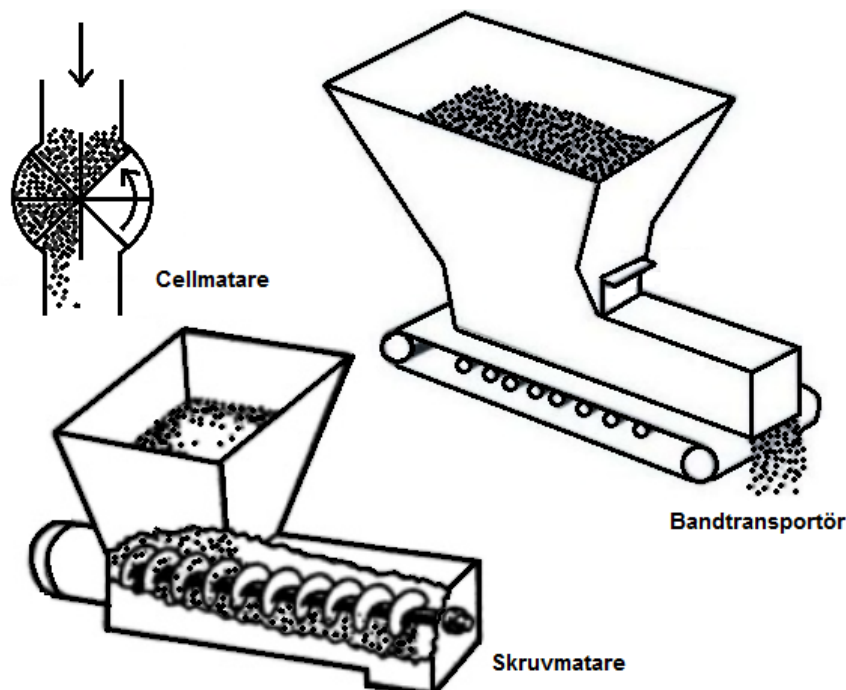
### Utloppstorlek

Allt material flödar om fickan är korrekt designad för massflöde, men då krävs att materialet också börjar flöda. Därför är det också viktigt med ett korrekt designat utlopp för att undvika valvbildning (Jenike, 1964; Drescher, Waters & Rhoades, 1995). För en cirkulär silo bör diametern på utloppet vara minst 6 till 8 gånger större än den maximala partikelstorleken. För en rektangulär silo gäller i stället att bredden på utloppet bör vara 3 till 4 gånger större än den maximala partikelstorleken. För att detta villkor ska gälla måste utloppet vara minst tre gång så långt som brett. (Maynard, 2004).

### Anordning för utmatning

Även en silo korrekt designad för massflöde kan ha problem med utmatning som orsakas av den anordning för utmatning som är kopplad i direkt anslutning till silons utlopp.

I de flesta fall där man vill åstadkomma en kontrollerad utmatning krävs någon form av matare eller transportör som är lämpad för användningsområdet. Exempel på dessa ses i Figur 8.



**Figur 8.** Olika varianter av anordning för utmatning. I figuren ses cellmatare, bandtransportör och skruvmatare (Physics101, 2011).

*Figure 8. Different types of device for discharge. Figure shows rotary valve/feeder, belt feeder and screw feeder.*

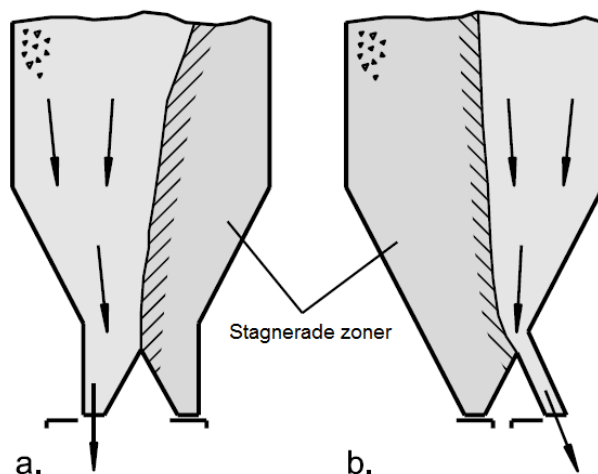
Om massflöde ska vara möjligt tillkommer krav på anordningar för utmatning och det är två regler som återfinns i boken *Powders and Bulk Solids* av Schulze (2008) som måste följas:

1. Designen måste vara utförd så att alla ytor som är i kontakt med bulkmaterialiet är tillräckligt branta för att undvika bildningen av stagnerade zoner.
2. Anordningen måste kunna tömma ut bulkmaterialiet från hela öppningen av utloppet för att undvika bildningen av stagnerade zoner.

### Flera utlopp

Ibland kan det vara önskvärt att ha en flexibel silo med flera utlopp. Det kan vara en silo som möjliggör bulkutlastning samtidigt som det finns utlopp i sidan av fickan som leder till andra separata enheter, exempelvis säckning av pellets.

Trots bekvämligheten med flera utlopp finns en stor nackdel med detta system: enbart om det flödar i alla utlopp kan massflöde uppnås i silon. Sker flöde från endast ett av utloppet är risken stor att det bildas stagnerade zoner, se Figur 9 (Schulze, 2011). Flera utlopp bör undvikas om problem med segregering och tidskonsolidering av materialet upplevs (Schulze, 2011).



**Figur 9.** a. Silo med flera utlopp där flöde sker från ett av utloppen; b. Silo där flöde sker från ett extra sidoutlopp (Schulze, 2008).

*Figure 9. a. Silo with multiple outlets where flow occurs from one of the outlets; b. Silo where flow occurs from a additional lateral outlet.*

Finns krav för flera utlopp kan det vara en idé att fördela flödet utanför silon för att undvika risken för tunnelflöde (Carson & Holmes, 2003).

### Tidskonsolidering

Tidskonsolidering är ett fenomen som kan uppstå om ett bulkmaterial lagras under en längre period i en silo. Det som sker är att partiklarna i ett bulkmaterial omdirigeras och packas tätare med tiden vilket ger upphov till ett mer svårflödat material som i sin tur kan leda till tunnelflöde eller valvbildning (Chase, 2004).

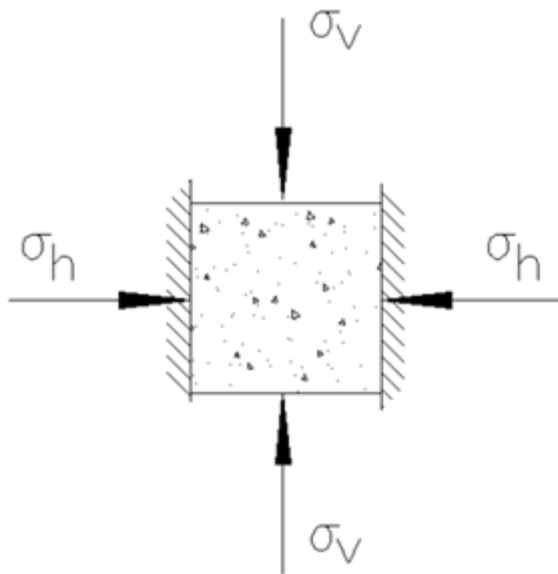


När en silo är ämnad att hantera ett dåligt flödande material som tenderar att konsolidera med tid är det viktigt att silon designas för massflöde med fokus på ett korrekt designat utlopp (Schulze, 2008).

### Tryck i silo

Det är av betydelse att ha kunskap om det tryck som uppstår i en silo eftersom det är viktigt vid många applikationer som exempelvis silodesign för styrka, silodesign för flöde och belastning på anordning för utmatare och eventuella insatser (Dietmar Schulze, 2006).

På ett element av fast bulkmaterial, se Figur 10, agerar ett vertikalt och ett horisontellt tryck. För detta element antas det friktionsfria väggar. Det horisontella trycket,  $\sigma_h$ , är mindre än det vertikala trycket och är också ett direkt resultat av det vertikala trycket,  $\sigma_v$ . Kvoten mellan dessa tryck kallas för tryckkvot, K (Schulze, 2008). Att finna värdet för tryckkvoten är svårt, men det finns olika beräkningar för att göra detta. Vid grova antagningar är ett värde på 0,4 för K lämpligt.



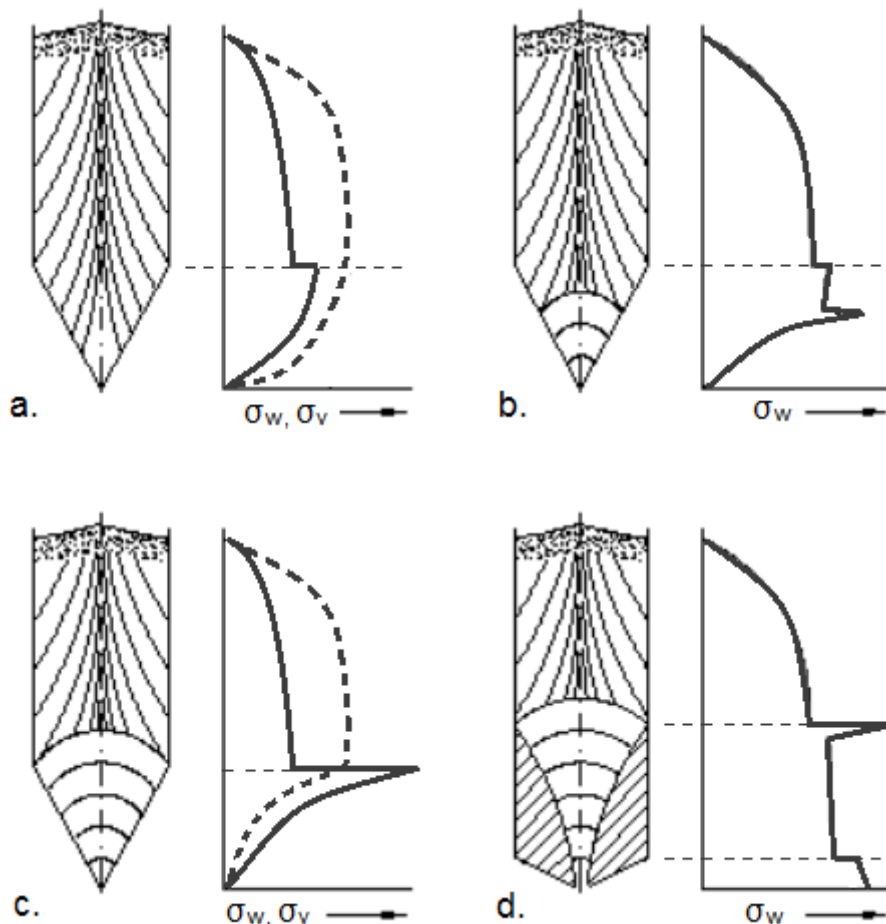
**Figur 10.** Ett element av bulkmaterial som utsätts för vertikalt tryck,  $\sigma_v$ , och horisontellt tryck,  $\sigma_h$  (Dietmar Schulze, 2006).

**Figure 10.** An element of bulk material subjected to vertical stress,  $\sigma_v$ , and horizontal stress,  $\sigma_h$ .

I en silo uppstår två helt olika tryckförhållanden. Under fyllning är det huvudsakliga trycket riktat nedåt i vertikal riktning. I Figur 11.a illustreras detta med linjer som även kallas aktivt tryckfält. Vid axeln riktar sig det huvudsakliga trycket vertikalt men det avviker sedan mer mot siloväggen (Dietmar Schulze, 2006). Aktivt tryckfält karaktäriseras av att den enda kraft som påverkar materialet är dess egen vikt (Schwedes & Hermann, 1995). Så fort tömning sker pressas materialet horisontellt mot väggarna och expanderar vertikalt. På grund av detta uppstår ett passivt tryckfält och det huvudsakliga trycket är

riktat horisontellt. Detta illustreras i Figur 11.b och Figur 11.c i form av horisontella linjer i fickan (Schulze, 2008).

Fylls en tömd silo med material fås ett tryckförhållande som kan ses i Figur 11.a. Både väggtrycket,  $\sigma_w$ , och det vertikala trycket,  $\sigma_v$ , ökar med djupet i den vertikala delen av silon. Kvoten mellan dessa ges av den tidigare nämnda tryckkvoten,  $K$ . Vid övergången från den vertikala delen till den nedre fickan så sker en ökning av väggtrycket orsakat av den plötsliga förändringen i väggens lutning. Därefter minskar både väggtrycket och det vertikala trycket tills de båda går mot noll (Schulze, 2008).



**Figur 11.** Fördelning av väggtryck,  $\sigma_w$ , och vertikalt tryck,  $\sigma_v$ , och riktning av det huvudsakliga trycket,  $\sigma_1$  (visas som linjer i silon). a. Förhållande som uppstår vid fyllning av en tom silo; b. Förhållande som uppstår i den nedre delen av fickan vid påbörjad tömning av silo; c. Förhållande som uppstår i hela fickan efter tömning av silo; d. Förhållande som uppstår vid tömning av silo med tunnelflöde (Dietmar Schulze, 2006).

**Figure 11.** Distribution of wall stress,  $\sigma_w$ , and vertical stress,  $\sigma_v$ , and direction of the major principal stress,  $\sigma_1$  (shown as lines in the silo). a. Condition that occurs when filling an empty silo; b. Condition that occurs in the lower part of the hopper at the start of discharging; c. Condition that occurs in the entire hopper after discharging; d. Condition that occurs when discharging a silo with funnel flow.

När tömning sker och allt material börjar röra sig nedåt förändras stressförhållandena. Som ett resultat av att det huvudsakliga trycket breder ut sig horisontellt i fickan blir

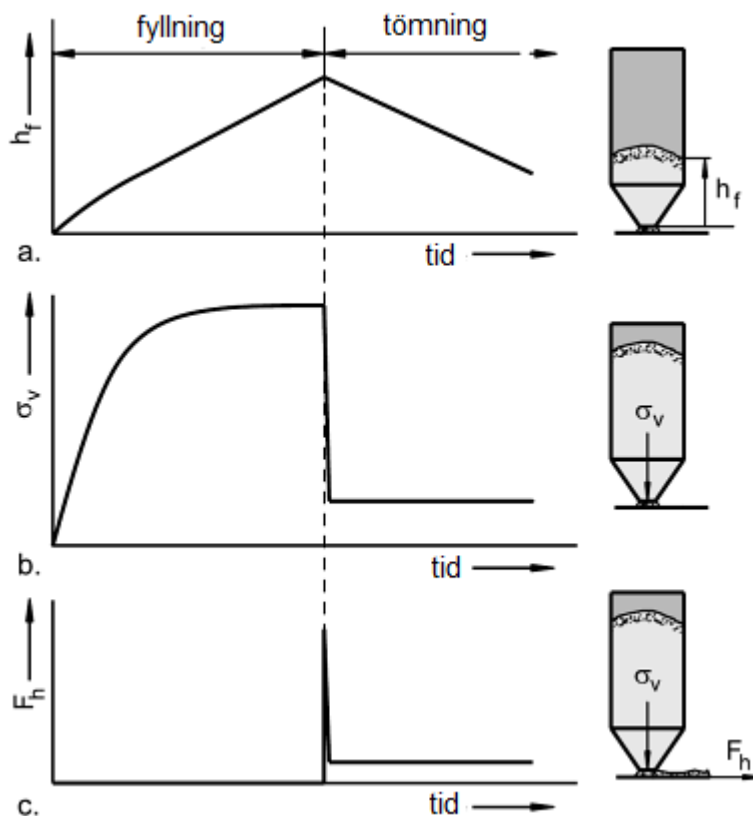
väggtrycket större än det vertikala trycket. En drastisk ökning av väggtrycket sker vid övergången till fickan och denna ökning kallas för ”stress peak”, vilket tydligt kan ses i Figur 11.c (Dietmar Schulze, 2006).

### Vertikalt tryck vid utlopp

Det vertikala trycket är högre vid fyllning av en silo än vid tömning. Studier har visat att trycket kan vara 5 till 10 gånger så mycket högre vid fyllning. Detta ställer höga krav på eventuella matningsanordningar som kan vara monterade vid silons utlopp.

Matningsanordningen måste klara av både själva belastningen som skapas från materialet i silon och att kunna förflytta materialet genom utloppet (Schulze, 2008).

I Figur 12.a illustreras hur fyllhöjden förändras med tid under fyllning och sedan tömning. Under fyllningen ökar det vertikala trycket Figur 12.b för att sedan minska vid uttömning då ett passivt tryckfält uppstår. En eventuell mataranordning måste sedan kunna förflytta materialet trots det höga vertikala trycket den utsätts för. Detta kräver stort moment vilket tydligt framgår i Figur 12.c. Momentet som krävs för att förflytta materialet sjunker omgående då det passiva tryckfältet uppstår direkt efter att materialet börja flöda nedåt (Dietmar Schulze, 2006).



**Figur 12.** Fyllhöjd,  $h_f$ , vertikalt tryck vid utloppet,  $\sigma_v$ , och moment,  $F_h$ , under fyllning och senare tömning av en silo (Schulze, 2008)

**Figure 12.** Filling height,  $h_f$ , vertical stress at the outlet,  $\sigma_v$ , and feeding force,  $F_h$ , during discharging of a silo.

Nedanstående åtgärder kan vidtas för att undkomma problem relaterade till högt vertikalt tryck (Schulze, 2008):

- Samtidig fyllning och tömning av material för att skapa ett passivt tryckfält.
- Undvika att tömma silon helt på material. Det material som finns kvar i silon bibehåller det passiva tryckfältet och därmed blir inte ökningen av det vertikala trycket lika stort vid ytterligare påfyllning. Ytterligare en fördel är att förslitningen på matningsanordningen minskar då material inte faller direkt på anordningen vid fyllning.
- Med en lämplig insats, exempelvis en konformad, i fickan kan det vertikala trycket minskas. Denna insats måste dock designas korrekt för att bibehålla massflöde i silon.
- En grind kan monteras ovanför mataranordningen som hålls stängd vid fyllning. Öppnas grinden precis innan mataren startas hinner ett passivt tryckfält skapas då materialet flödar nedåt och detta reducerar det vertikala trycket på matningsanordningen.

#### ”Stress peak” vid övergång

Det är viktigt att ha kunskap om väggens kapacitet för kunna motstå extra belastning som kan uppstå vid förändrat tryckförhållande. Med förändring innebär i detta fall den topp av väggtrycket som uppstår vid övergången till fickan när det går från fyllning till tömning av en silo. Det kan krävas extra förstärkning av siloväggen i övergångspunkten och särskilt stor betydelse har det om en silo med tunnelflöde byggs om till en silo med massflöde. Anledningen till det är att denna topp av väggtrycket generellt är högre i en silo med massflöde (Robert Berry, 2013).

I en silo utan flödesproblem uppstår alltid toppen av väggtrycket vid övergången till fickan. Finns det däremot stagnerade zoner i silon uppstår en liten topp av väggtrycket där de stagnerade zonerna börjar (Figur 11.d). Det är svårt att avgöra hur långt de stagnerade zonerna sträcker sig i en silo och därmed också svårt att avgöra vart en topp för väggtrycket uppstår. Att göra en punktförstärkning av siloväggen för ett specifikt område blir därför svårt utan en eventuell förstärkning kan komma att beröra hela silon (Schulze, 2008).

## **Material och metod**

### ***Materialens egenskaper***

Uppgifter om materialets egenskaper, dvs vinkel för internfriktion, vinkel för väggfriktion och bulkdensitet, som användes i detta arbete är tagna från en studie som återfinns i en rapport av Wu, Schott & Lojzewijks (2011). Robert Berry, Wolfson Centre, UK, ansåg det rimligt att använda värdena från denna rapport. Roberts egna erfarenheter efter att ha arbetat med olika typer av pelletsprover är att bulkdensiteten varierar mellan 650 till 800

kg/m<sup>3</sup>, att den effektiva vinkeln på internfriktionen varierar mellan 35° till 45° och att vinkeln för väggfriktion varierar mellan 20° till 30° vilket överensstämmer bra med värdena i rapporten.

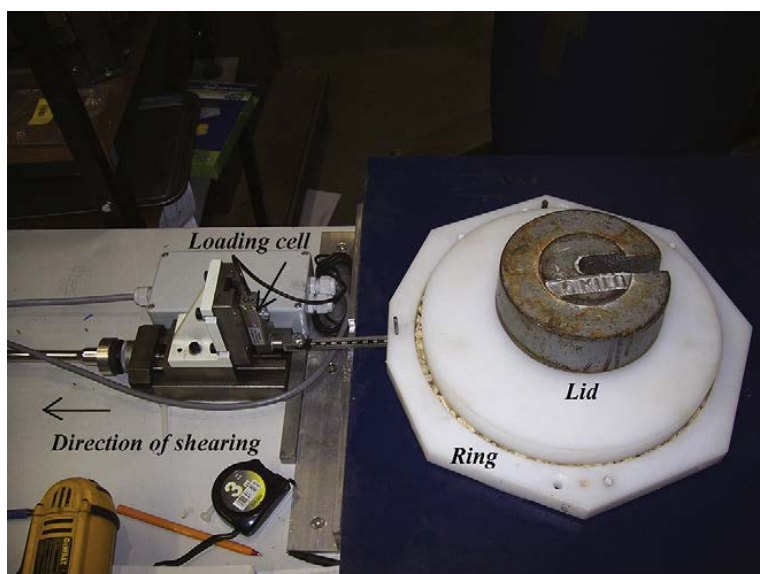
Friktionsparametrarna i rapporten av Wu, Schott & Lojdewijks (2011) togs fram med hjälp av en storskalig ringformad skjuvtestare, se Figur 13. Skjuvtestare på marknaden idag är främst utformade för att hantera finkorniga bulkmaterial och därför inte lämpade för pellets eller träflis. Proceduren för skjuvtestet utfördes enligt en standard för Jenike's skjuvtest (Schulze, 2008).



**Figur 13.** Storskalig ringformad skjuvtestare på Wolfson Centre, Greenwich University, UK (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011).

*Figure 13. Large-scale annular shear tester at Wolfson Centre. Greenwich University, UK.*

Även väggfriktionstesterna gjordes med en modifierad apparat (Figur 14) speciellt utformad för material med större partiklar. Väggmaterialen som undersöktes var UHMWPE, betong, rostfritt stål och stålplåt. UHMWPE står för Ultra High Molecular Weight Polyethylene och är ett plastmaterial för konstruktionsändamål där de ställs högre krav på prestanda (PlasticsEurope, 2014).



**Figur 14.** Apparat för väggfriktionstest på Wolfson Centre, Greenwich University, UK (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011).

*Figure 14.* Apparatus for wall friction test at Wolfson Centre. Greenwich University, UK.

De värden för effektiv vinkel för internfriktion och vinkel för väggfriktion som använts i simuleringarna redovisas i Tabell 1, 2, 3, 4 och 5.

**Tabell 1.** Värden för vinkel av internfriktion (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011)

*Table 1.* Values of angle of internal friction

<b>Material</b>	<b>Max (°)</b>	<b>Min (°)</b>	<b>Medel (°)</b>
Torrefierad pellets	56	44	49
Pellets 6 mm	42	39	40
Pellets 8 mm	45	41	43
Pellets 12 mm	42	40	41
Träflis 0-12 mm	54	51	53
Träflis 0-40 mm	53	50	51
Träflis 0-100 mm	51	44	48

**Tabell 2.** Värderna för vinkel av väggfriktion för UHMWPE (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011)  
*Table 2. Values of angle of wall friction for UHMWPE*

Material	UHMWPE		
	Max (°)	Min (°)	Medel (°)
Torrefierad pellets	12	12	12
Pellets 6 mm	15	11	13
Pellets 8 mm	13	10	11
Pellets 12 mm	13	9	11
Träflis 0-12 mm	28	19	22
Träflis 0-40 mm	27	18	22
Träflis 0-100 mm	20	14	17

**Tabell 3.** Värderna för vinkel av väggfriktion för betong (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011)  
*Table 3. Values of angle of wall friction for concrete*

Material	Betong		
	Max (°)	Min (°)	Medel (°)
Torrefierad pellets	31	27	29
Pellets 6 mm	32	30	31
Pellets 8 mm	35	31	33
Pellets 12 mm	31	29	30
Träflis 0-12 mm	34	33	33
Träflis 0-40 mm	33	30	31
Träflis 0-100 mm	37	35	35

**Tabell 4.** Värderna för vinkel av väggfriktion för rostfri plåt (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011)  
**Table 4.** Values of angle of wall friction for stainless steel

Material	Rostfritt stål		
	Max (°)	Min (°)	Medel (°)
Torrefierad pellets	26	23	31
Pellets 6 mm	19	18	29
Pellets 8 mm	21	18	31
Pellets 12 mm	20	17	18
Träflis 0-12 mm	35	30	19
Träflis 0-40 mm	31	28	19
Träflis 0-100 mm	33	30	25

**Tabell 5.** Värderna för väggfriktion för stålplåt (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011)  
**Table 5.** Values of angle of wall friction for mild steel

Material	Stålplåt		
	Max (°)	Min (°)	Medel (°)
Torrefierad pellets	18	15	16
Pellets 6 mm	20	16	18
Pellets 8 mm	22	15	18
Pellets 12 mm	20	17	18
Träflis 0-12 mm	33	28	30
Träflis 0-40 mm	31	25	27
Träflis 0-100 mm	33	29	31



Värden för bulkdensitet är också tagna från Wu, Schott och Lodewijks (2011), se Tabell 6.

**Tabell 6.** Värden för bulkdensitet (Wu, Schott & Lojdewijks, 2011)

*Table 6. Values of bulk density*

<b>Material</b>	<b>Max (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Min (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Medel (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Torrefierad pellets	668	610	642
Pellets 6 mm	629	583	609
Pellets 8 mm	649	588	621
Pellets 12 mm	528	498	510
Träflis 0-12 mm	250	209	228
Träflis 0-40 mm	273	230	256
Träflis 0-100 mm	261	249	256

Antaganden har gjorts gällande materialegenskaperna:

- All pellets av samma diameter antogs ha liknande egenskaper vad gäller internfriktion och väggfriktion. Detsamma gällde för träflis och torrefierad pellets.
- Andelen fines ansågs inte påverka flödet. Tester utförda vid Wolfson Centre, visar att 35 % finmaterial ger högst bulkdensitet då finmaterialet fyller hålrummen mellan pelleten. Däremot påverkades inte internfriktionen och väggfriktionen i sådan utsträckning att det ansågs vara signifikant (Robert Berry, 2013). 35 % finmaterial vid slutlagring i en silo är ett högt värde då många pelletsproducenter har krav på maximalt 1 % finmaterial i den färdiga produkten. I och med detta antogs det att andelen finmaterial inte har någon betydande inverkan för hur materialet kommer flöda.

### ***Silo Stress Tool***

Till hjälp för att visualisera flödet och beräkna de tryck som uppstår i silon användes ”Silo Stress Tool” utvecklad av Dietmar Schulze (2013). I programmet kan både siloegenskaper och materialegenskaper varieras och hur sidan för detta ser ut kan ses i Figur 15.

Variablerna som går att variera är:

- Bulkdensitet (konstant eller min – och maxvärde)
- Internfriktion
- Tryckkvoten, K
- Visa fyllning eller tömning
- Cirkulär eller rektangulär silo

- Belastning ovanifrån
- Fyllhöjd
- Höjd
- Bredd
- Väggfriktion
- Fickans vinkel
- Utloppets storlek

The screenshot shows the 'Parameters' window of the 'Silo Stress Tool'. It is divided into several sections for parameter input:

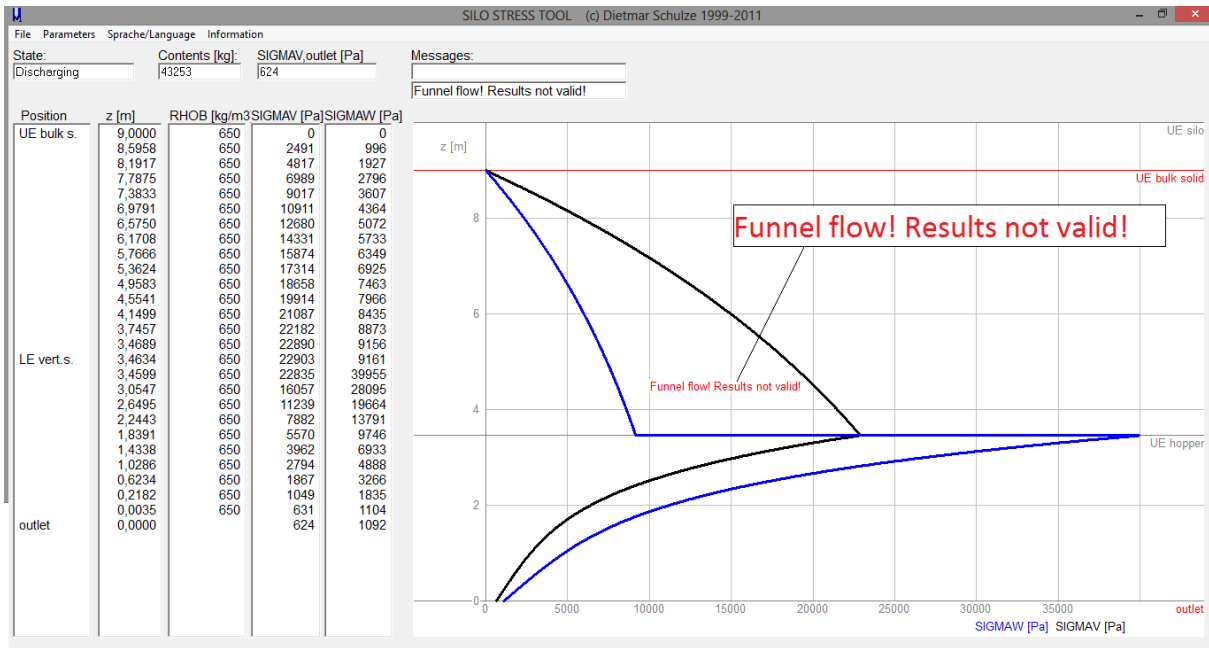
- Bulk density:** constant (selected), RHOMIN [kg/m<sup>3</sup>] = 650, RHOMAX [kg/m<sup>3</sup>] = 2800, SIGMA0 [Pa] = 50000.
- Stress state:** Discharging (selected).
- Silo cross-section:** circular (selected).
- Load on top surface:** no (selected).
- Internal friction:** PHIE [°] = 35.
- Ratio K:** 0.4 (selected).
- Vertical section:** Yes (checked), Height [m] = 6.54, PHIX [°] = 20.5.
- Below hopper:** Vert. section (unchecked), Height [m] = 0, PHIX [°] = 30.
- Vert. sect./Trans.:** Diameter/ Width [m] = 3.53, Length [m] = 6.
- Hopper:** Yes (checked), Wall slope against vertical [°] = 25, Outlet width/diameter [m] = 0.3, PHIX [°] = 20.5, PHIX [°] at end walls = 30.
- Filling height:** meas. from outlet incl. heap [m] = 9, meas. from outlet excl. heap [m] = 9.
- Calculated:** Silo height [m] = 10.003379, Hopper height [m] = 3.4633787, Bulk solid volume [m<sup>3</sup>] = 66.525866, Silo volume [m<sup>3</sup>] = 76.345701.

Buttons for 'OK' and 'CANCEL' are visible at the bottom right of the parameter area.

**Figur 15.** Den sida i "Silo Stress Tool" där önskade variabler kan varieras  
*Figure 15. The page in "Silo Stress Tool" where desired variables can be varied.*

Utifrån valda variabler fås sedan ett resultat i form av värden för:

- Total silohöjd
- Höjd på fickan
- Bulkvolym
- Silovolym
- Total bulkmängd i kg
- Tryckförhållanden genom hela silon och en visuell bild av detta, se Figur 16
- Vertikalt tryck vid utlopp
- Massflöde eller tunnelflöde, se Figur 16



**Figur 16.** Resultat i "Silo Stress Tool" i form av värden för vertikalt tryck och väggtryck genom hela silon och en visuell bild av tryckförhållandet. Här ses även det felmeddelande som visas om de valda variablerna leder till tunnelflöde (Funnel flow).

*Figure 16. Results in "Silo Stress Tool" in the form of values for vertical stress and wall stress throughout the silo and a visual image of the stress distribution. Here is also seen the error message that appears if the selected variables lead to funnel flow.*

Programmet användes här för att fastställa flödestyp (massflöde eller tunnelflöde). Variabler som varierades var: vinkel, väggfriktion och internfriktion. Beräkningarna gjordes både för en cirkulär och en rektangulär silo och dimensionen hölls konstant med en totalhöjd på 10 m, en diameter på 3,53 m och en storlek på utloppet på 0,3 m i diameter. Tryckkvoten, K, sattes till 0,4 (Schulze, 2008).

Resultatet redovisades i form av gränsvärden för massflöde för både cirkulära och rektangulära silos, vilket presenteras senare i Figur 17, 18 och 19. För detta utfördes analyser i "Silo Stress Tool" för att undersöka vilken vinkel på fickan som krävdes för att skapa massflöde för olika kombinationer av internfriktion och väggfriktion. Internfriktionerna som ingick i analysen låg i ett spann mellan 35 och 55 med ett intervall om 5. Detta kombinerades med väggfriktioner i ett spann mellan 0 och 46 med ett intervall om 2.

Det undersöktes även i "Silo Stress Tool" vilken vinkel på fickan som krävdes för att skapa massflöde med pellets, torrefierad pellets och träflis vid användning av väggmaterialen UHMWPE, betong, rostfritt stål och stålplåt. Detta utfördes enbart för cirkulära silos och resultatet redovisas i form av gränsvärden för massflöde och kan ses senare i Figur 20. Värden för internfriktion och väggfriktion är de värden representerade under "materialegenskaper" tagna från rapporten av Wu, Schott & Lojdewijks (2011). Internfriktionen beräknades utifrån medelvärden för 6 och 8 mm pellets, 6 mm torrefierad

pellets och för 0 till 100 mm träflis eftersom variationen i internfriktion var låg mellan materialen.

Kombinationerna av internfriktion och väggfriktion som undersöktes för att fastställa vinkeln på fickan som krävdes för massflöde kan ses i Tabell 7.

**Tabell 7.** Kombinationer av internfriktion och väggfriktion

*Table 7. Combinations of angle of internal friction and angle of wall friction*

<b>Internfriktion</b>	<b>Väggfriktion</b>	
41,5 (Pellets)	UHMWPE	12
	Stålblåt	18
	Rostfritt stål	19
	Betong	31
49 (Torrefierad pellets)	UHMWPE	12
	Stålblåt	16
	Rostfritt stål	25
	Betong	29
50,5 (Träflis)	UHMWPE	21
	Stålblåt	30
	Rostfritt stål	31
	Betong	34

### ***Exempel 1***

Det företag från vilket Exempel 1 är hämtat är en av Sveriges största producenter av träpellets. Företaget har två pelletssilos och tömning av pellets sker direkt till bulkbil. På grund av ineffektiv uttömning, med stora variationer i uppehållstid, samt stagnerade zoner, blir kvaliteten på pelleten varierande och vissa batcher har högre andel fines än de kvalitetskrav som ställs, vilket resulterar i missnöjda kunder.

Det material som hanteras i silon är 6 millimeter pellets. Företaget producerar även 8 millimeter pellets men då denna produkt inte hanteras i silon i dagsläget ingick den inte i beräkningarna.

Specifikationer för de två silos som ingår i beräkningarna kan ses i Tabell 8.

**Tabell 8.** Siloegenskaper för de två silos som ingår i Exempel 1  
*Table 8. Silo properties of the two silos included in Example 1*

<b>Egenskaper</b>	<b>Silo Exempel 1</b>
Form	Cirkulär
Totalhöjd (m)	10
Diameter (m)	3,53
Vinkel på ficka (°)	45
Diameter på utlopp (mm)	300
Material	Stålplåt
Påstått flöde	Tunnelflöde

Det fanns inga möjligheter att variera diametern på utloppet och därför förblev denna parameter konstant i beräkningarna. Variation av fickans lutning skedde på bekostnad av volymen då en ökning av silons höjd inte var ett alternativ. Målet var dock att åstadkomma en minimal volymminskning.

### ***Exempel 2***

Det företag från vilket Exempel 2 är hämtat är en annan av Sveriges största pellettproducenter. Företaget har fyra stycken silos varav en av dessa enbart är för bulkutlastning. De andra tre har även extra sidoutlopp monterade på sidan av fickan för utlastning till säckningen. I de tre silos med extra sidoutlopp uppstod det stagnerade zoner på grund av det faktum att bulkmaterialen matades ut via sidoutlopp. Utöver det upplevde de generellt inga flödesproblem i sina silos förutom att det ibland uppstod stagnerade zoner efter kondensering i silon eller efter längre lagring (mer än 14 dagar) av pelleten. I silon för enbart bulkutlastning fanns det däremot uppmätta värden på högre andel finmaterial vid enstaka tillfällen.

Materialen som hanteras är främst 8 millimeter pellets. Produktion av 6 millimeter pellets sker även i en mindre skala men denna pellets paketeras enbart i säck. Därför skedde beräkningar enbart på 8 millimeter pellets.

Beräkningar utfördes inte för de tre silos med extra sidoutlopp eftersom det inte går att uppnå massflöde i dessa med den utmatning som sker i dagsläget.

Specifikationer för silon med bulkutlastning kan ses i Tabell 9.

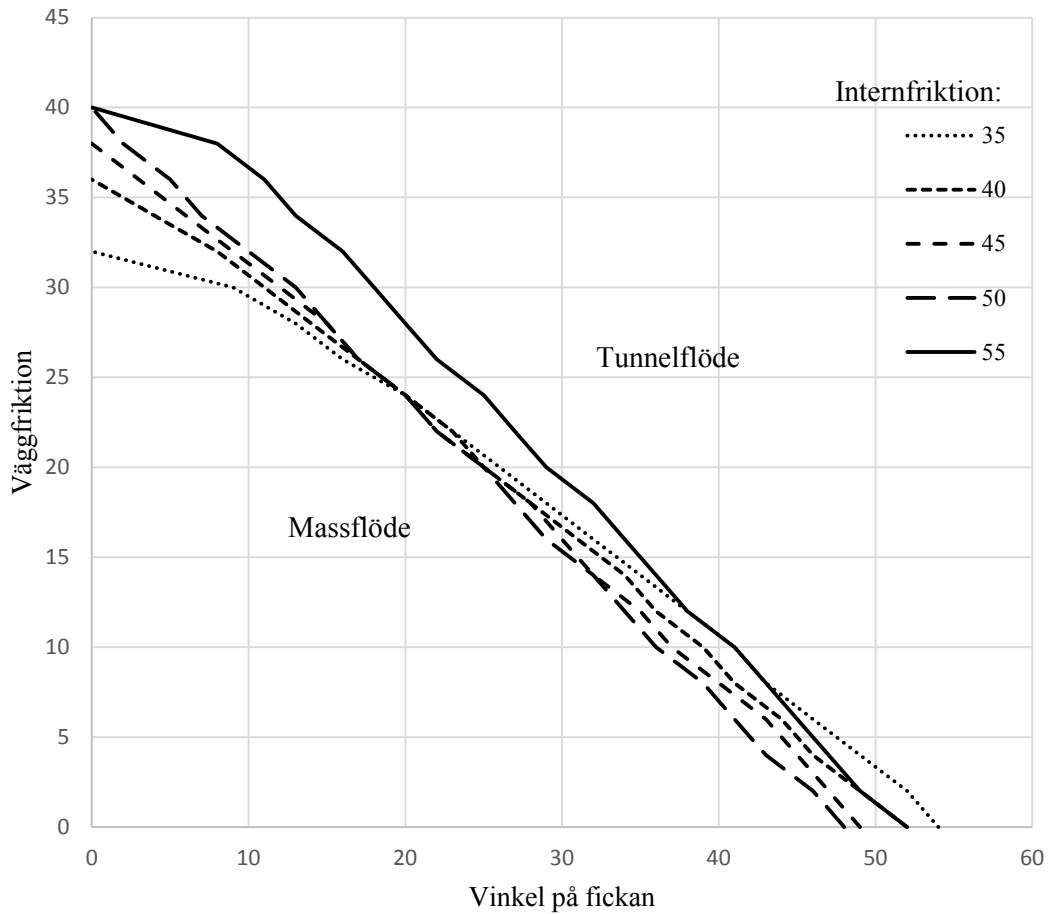
**Tabell 9.** Siloegenskaper för silon som ingår i Exempel 2  
*Table 9. Silo properties of the silo included in Example 2*

<b>Egenskaper</b>	<b>Silo Exempel 2</b>
Form	Cirkulär
Totalhöjd (m)	8,619
Diameter (m)	3,6
Vinkel på ficka (°)	45
Diameter på utlopp (mm)	300
Material	5 mm stålplåt (blanknött)
Påstått flöde	Massflöde

## **Resultat**

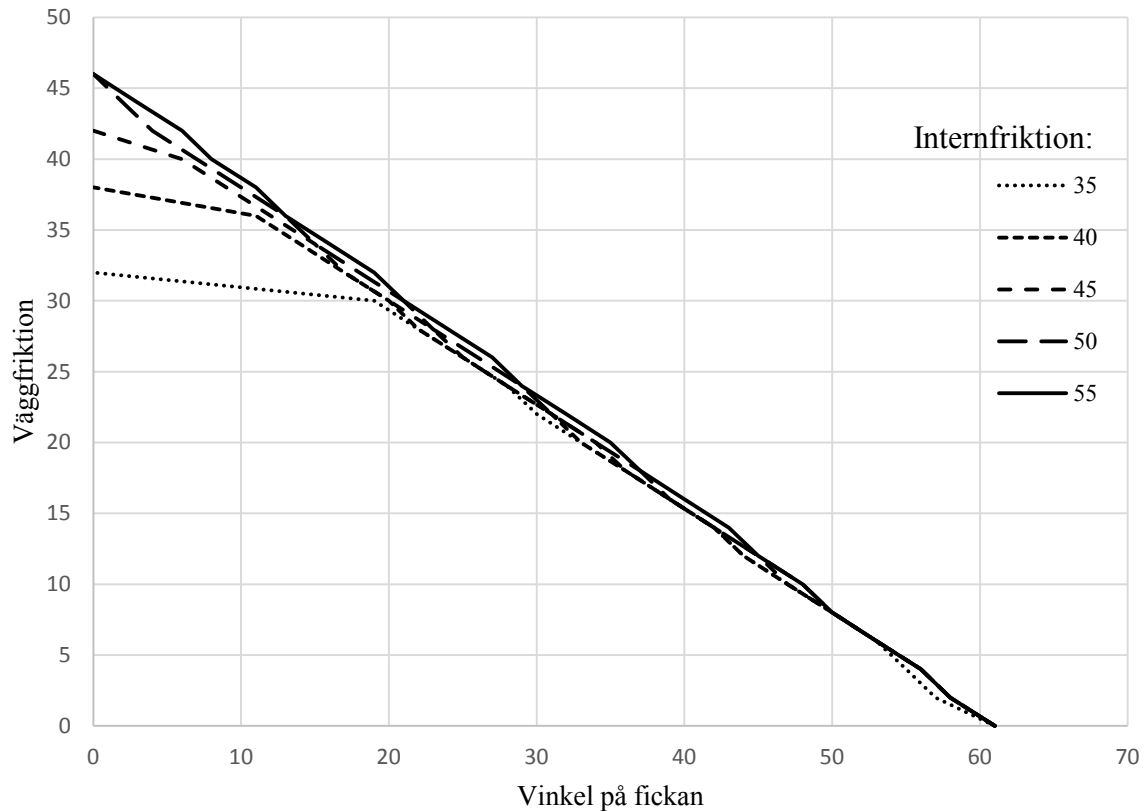
### ***Riktlinjer för silodesign***

Figur 17 visar gränsvärden för massflöde för en cirkulär formad silo och Figur 18 visar samma gränsvärden för en rektangulär formad silo. Dessa gränsvärden bildar ett område där massflöde råder och ett område där tunnelflöde råder. I figuren är väggfriktionen plottad mot vinkeln på fickan och varje linje representerar en specifik internfriktion för det bulkmaterial som hanteras i silon. Är både internfriktion och väggfriktion kända kan vinkeln som skapar massflöde bestämmas utifrån gränslinjerna.



**Figur 17.** Gränsvärden för massflöde för cirkulärt formade silos. Väggfriktion är plottat mot vinkel på fickan och linjerna representerar olika värden för internfriktion. Är materialegenskaperna väggfriktion och internfriktion givna kan vinkeln på fickan som krävs för att skapa massflöde bestämmas utifrån figuren. Området under linjerna för internfriktion visar på det område där massflöde kan uppnås med specifika kombinationer av värden för väggfriktion, internfriktion och vinkel på fickan.

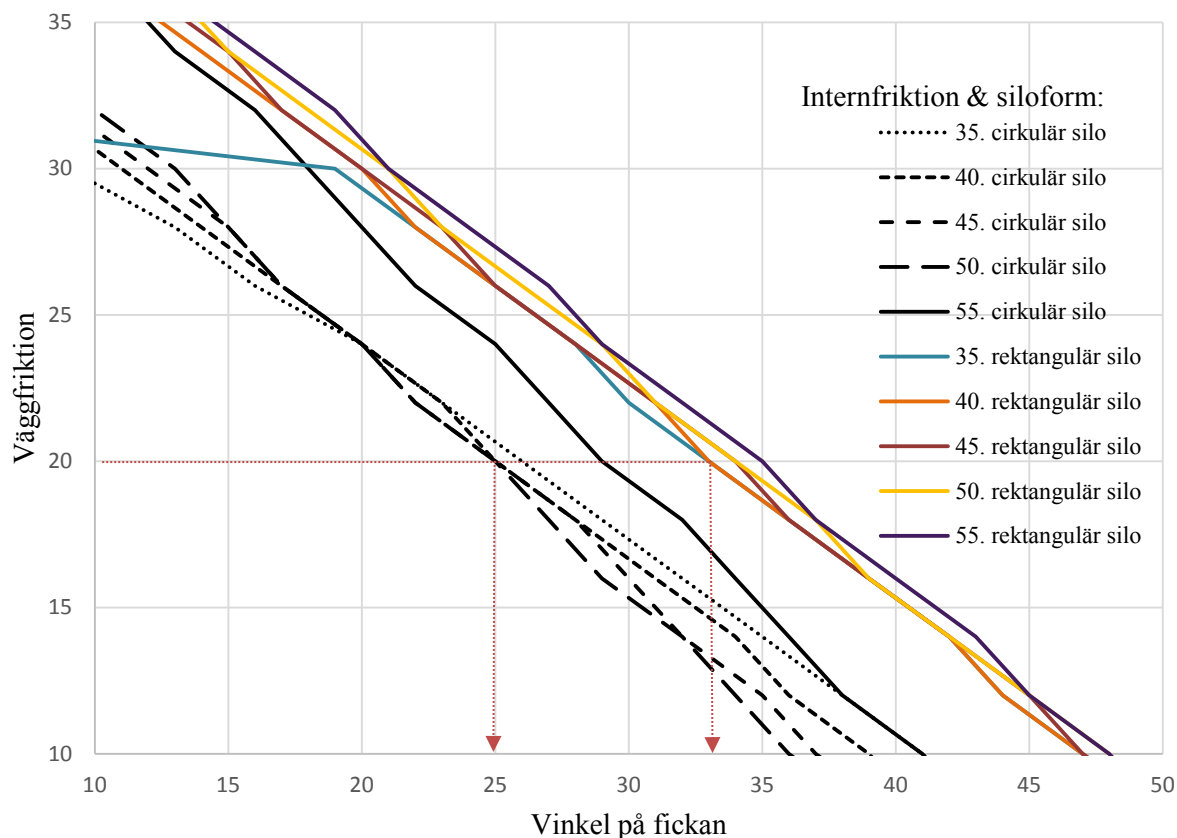
**Figure 17.** Mass flow boundaries for silo with conical shaped hopper. Wall friction is plotted against the angle of the hopper and the lines represent different values of internal friction. If the material properties wall friction and internal friction given can the angle of the hopper that creates mass flow be determined from the figure. The area under the lines for internal friction shows the area where mass flow can be achieved with specific combinations of values for wall friction, internal friction and the angle of the hopper.



**Figur 18.** Gränsvärden för massflöde för rektangulärt formade silos. Väggfriktion är plottat mot vinkel på fickan och linjerna representerar olika värden för internfriktion. Är materialegenskaperna väggfriktion och internfriktion givna kan vinkeln på fickan som krävs för att skapa massflöde bestämmas utifrån figuren. Området under linjerna för internfriktion visar på det område där massflöde kan uppnås med specifika kombinationer av värden för väggfriktion, internfriktion och vinkel på fickan.

**Figure 18.** Mass flow boundaries for silo with wedge shaped hopper. Wall friction is plotted against the angle of the hopper and the lines represent different values of internal friction. Is the material properties wall friction and internal friction given can the angle of the hopper that creates mass flow be determined from the figure. The area under the lines for internal friction shows the area where mass flow can be achieved with specific combinations of values for wall friction, internal friction and the angle of the hopper.

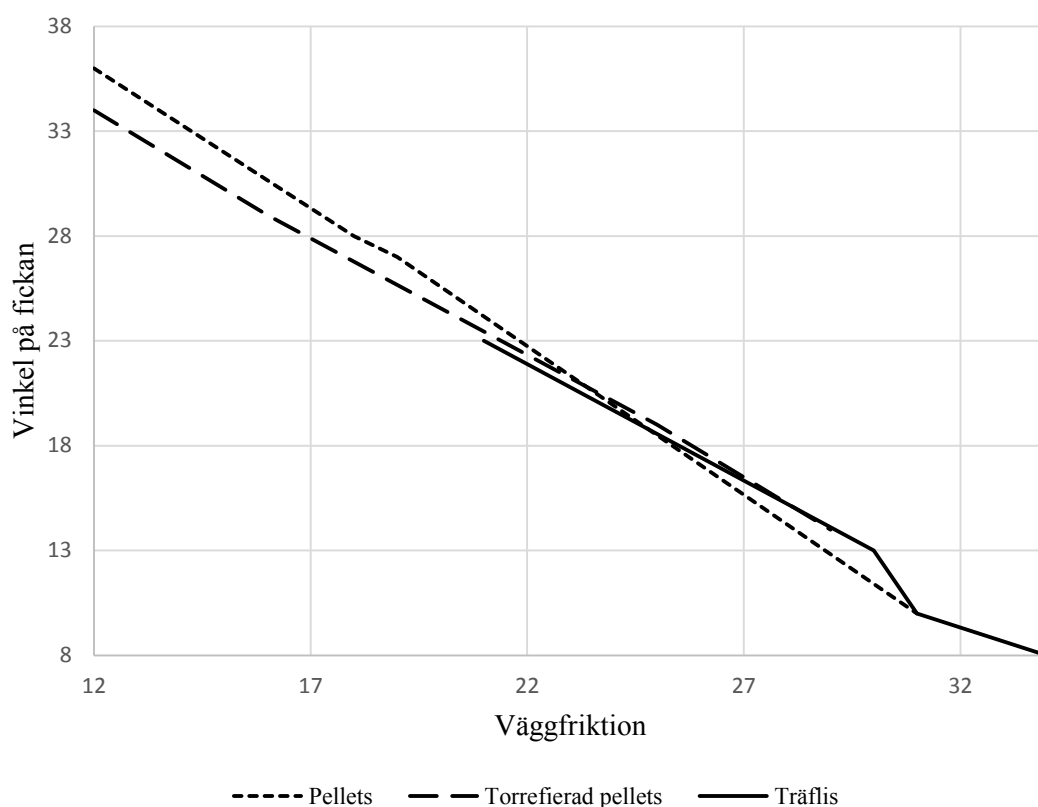




**Figur 119.** Gränsvärden för massflöde för cirkulärt och rektangulärt formade silos. Väggfriktion är plottat mot vinkel på fickan och linjerna representerar olika värden för internfriktion och olika typer av siloform. De svarta linjerna representerar cirkulära silos och de färgade linjerna representerar rektangulära silos. De två pilarna visar på att en rektangulär silo kan hålla en högre vinkel på fickan jämfört med en cirkulär silo för samma materialegenskaper och fortfarande bibehålla massflöde.

*Figure 19. Mass flow boundaries for both silo with conical shaped hopper and silo with wedge shaped hopper. Wall friction is plotted against the angle of the hopper and the lines represent different values of internal friction and different types of silo shapes. The black lines represent circular silos and the coloured lines represent rectangular silos. The two arrows shows that a rectangular silo can hold a higher hopper angle compared to a circular silo for the same material properties and still maintain mass flow.*

Figur 19 visar gränsvärden för massflöde för cirkulärt och rektangulärt formade silos med högre upplösning för de väggfriktioner och vinklar relevanta för hantering av biobränslen. För identiska materialegenskaper vad gäller internfriktion och väggfriktion kan vinkeln på fickans väggar vara högre för en rektangulär silo utifrån gränsvärdena för massflöde enligt Figur 19. Ett exempel på detta är att ett material med en internfriktion på 40° och en väggfriktion på 20° kräver för en cirkulär silo en lutning på 25° rektangulär silo en lutning på 33° på fickan för att skapa massflöde. 7



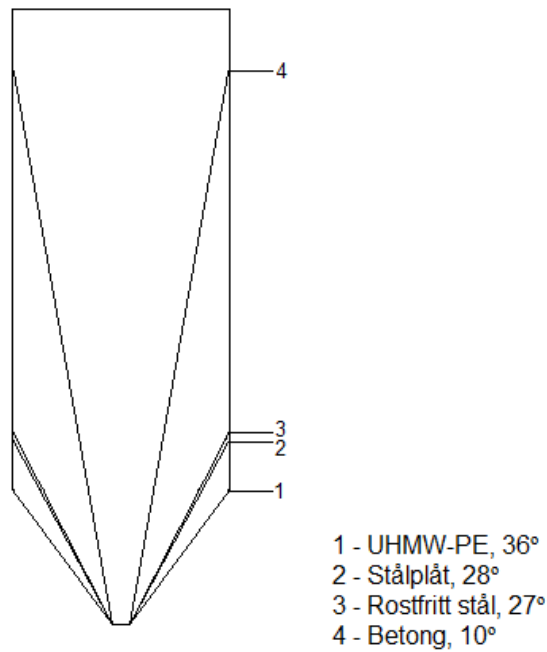
**Figur 20.** Hur vinkeln för att skapa massflöde för olika material i en cirkulär formad silo påverkas av olika väggfriktioner.

*Figure 20. How the angle to create mass flow for different materials in a conical shaped hopper is affected by various wall frictions.*

Figur 20 visar gränsvärdena för massflöde för tre specifika material, pellets, torrefierad pellets och träflis. Figuren visar också tydligt hur vinkeln på fickan för en cirkulär silo sjunker med ökad väggfriktion. Detta avspeglar situationen om olika väggmaterial skulle användas i en silo och hur vinkeln skulle påverkas för att bibehålla massflöde.

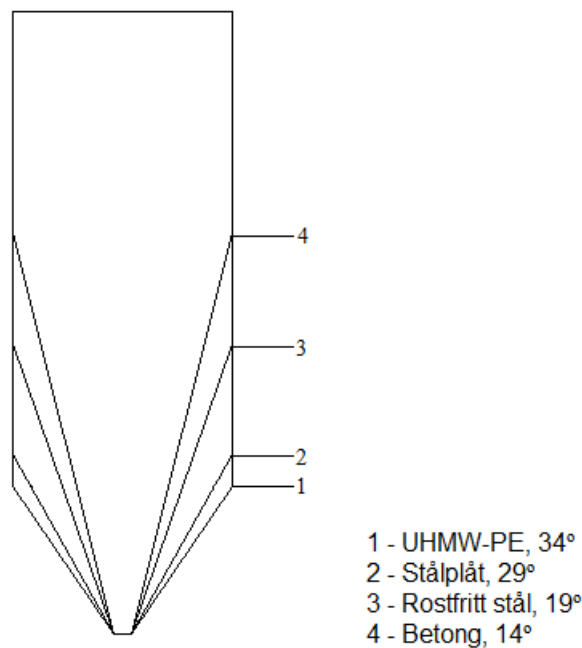
Hur de olika väggmaterialen, betong, rostfritt stål, stålplåt och UHMWPE påverkar silodesignen för olika typer av pellets visas i Figur 21. I Figur 22 redovisas motsvarande för torrefierad pellets och i Figur 23 för träflis. Ser man till alla tre biomaterial kräver betongvägg den brantaste lutningen på fickan för att skapa massflöde. Därefter följer rostfritt stål och stålplåt, medan och UHMWPE är det väggmaterial som bibehåller massflöde vid den högsta vinkeln.

Då träflis hanteras i silo krävs brant lutning på fickan för att uppnå massflöde och det innebär högre byggnation av silon för att skapa godtycklig silovolym. Därtill tillkommer flödesproblem när plattlika och oregelbundet formade partiklar utsätts för höga tryck. Det har visat sig att denna typ av partikelform kompakteras vid utloppet vid höga tryck som vidare bidrar till valvning (Schulze, 2008).



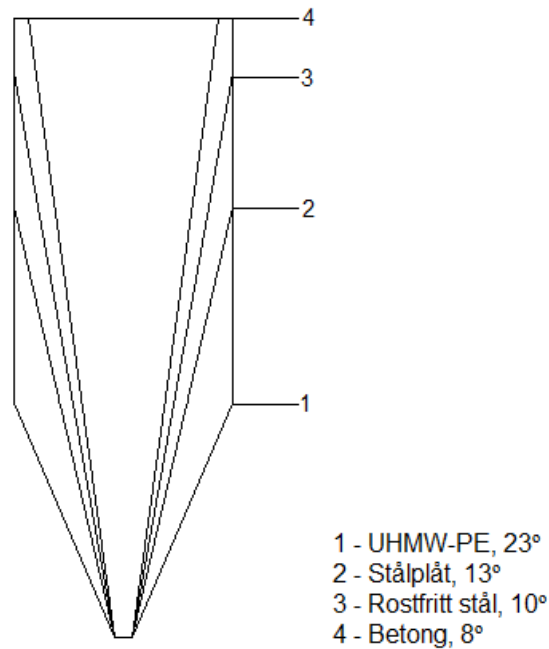
**Figur 21.** Lutning på fickan som krävs för att skapa massflöde i silos med träpellets (6 mm, 8 mm och 12 mm) för olika väggmaterial.

*Figure 21.* Slope of the hopper that is required to create mass flow in silos with wood pellets (6 mm, 8 mm and 12 mm) for different wall materials.



**Figur 22.** Lutning på fickan som krävs för att skapa massflöde med torrefierad pellets (6 mm) för olika väggmaterial.

*Figure 22.* Slope of the hopper that is required to create mass flow in silos with torrefied pellets (6 mm) for different wall materials.

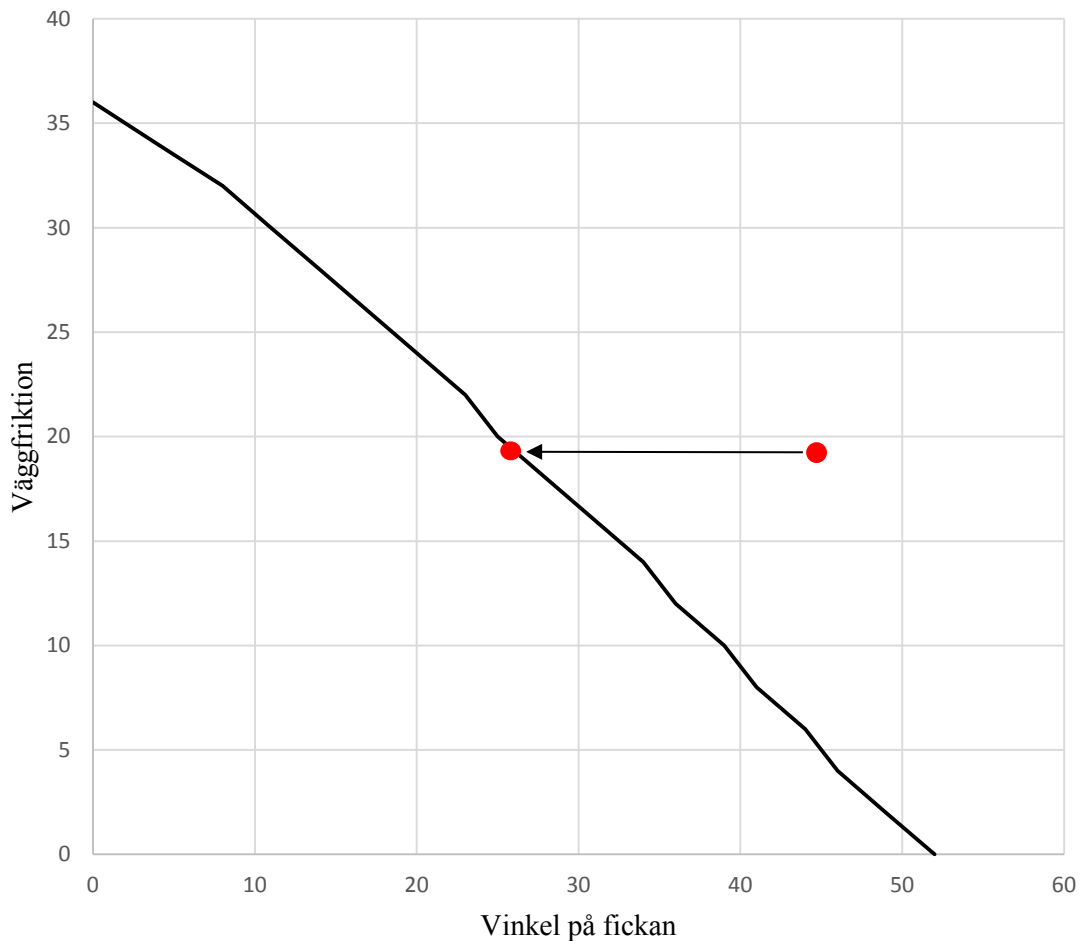


**Figur 23.** Lutning på fickan som krävs för att skapa massflöde med träflis (0-100 mm) för olika väggmaterial.

**Figure 23.** Slope of the hopper that is required to create mass flow in silos with wood chips (0-100 mm) for different wall materials.

### ***Autentiska exempel***

I Figur 24 visas gränsvärden för massflöde när det gäller pellets och cirkulärt formade silos. De röda punkterna visar på förändringen som måste ske för att skapa massflöde i silon för Exempel 1 och 2. Det nuvarande läget med en ficka med 45° lutning och en väggfriktion på 18° placerar punkten långt ut i området för tunnelflöde. För att punkten ska hamna inom värden för massflöde och därmed under den heldragna linjen tillåts en maximal lutning på 28° för exempel 1 och 27° för exempel 2.



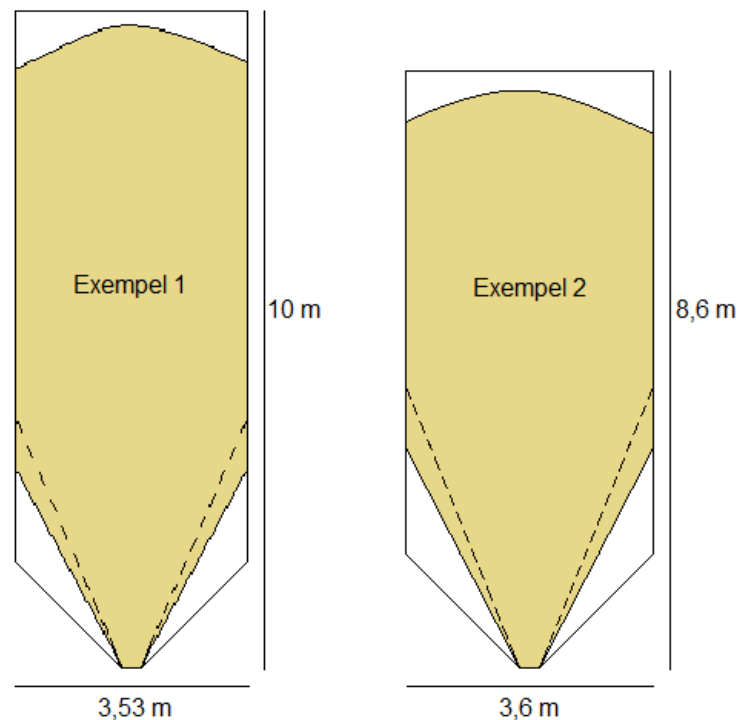
**Figur 24.** Gränsvärden för massflöde för cirkulär formad silo med träpellets. De röda punkterna visar på den förändring av fickans vinkel som måste ske för både Exempel 1 och 2 utifrån de givna materialegenskaperna med en väggfriktion på 18° och en internfriktion på 40°.

*Figure 24. Mass flow boundaries for silo with conical shaped hopper handling wood pellets. The red dots shows the change in the hopper angle that is necessary for both Example 1 and 2 based on the given material properties with a wall friction of 18° and an internal friction of 40°.*

En illustration av siloförändringar för både exempel 1 och 2 kan ses i Figur 25. Det färgade områdena visar på massflöde. För exempel 1 är den absolut maximala vinkeln för att bibehålla massflöde 28° och med en säkerhetsmarginal på 5° blir det 23°. För exempel 2 blir samma värden 27°, respektive 22°.

Eftersom en ökning av silons höjd inte var ett alternativ skapas en volymförlust i silon orsakat av brantare vinkel på fickan. I silon för exempel 1 innebär det en volymförlust på cirka 10 % och med säkerhetsmarginalen på 5° fås en volymförlust på cirka 16 %. Silon i exempel 2 får en volymförlust med cirka 13 % och med säkerhetsmarginalen blir volymförlusten cirka 20 %.

För att undvika volymminskning i båda fall skulle det innebära en ökning av silohöjden med ca 1 m vid det fall utan säkerhetsmarginal.



**Figur 25. Illustration av den förändring av fickans lutning som krävs för att skapa massflöde. Det färgade områdena visar på massflöde och den sträckade linjen visar vinkel på fickan med en säkerhetsmarginal på 5°.**  
**Figure 25. Illustration of the change of the hopper slope required to generate mass flow. The colored areas indicate mass flow and the dashed line shows the angle of the hopper with a safety margin of 5°.**

## Diskussion

Resultatet syftar inte till att fungera som ett underlag för silodesign i det enskilda fallet utan visar på samband mellan olika parametrar som påverkar massflöde i en silo. Sambanden mellan väggfriktion, internfriktion och fickans vinkel kan dock användas som en fingervisning när det kommer till silodesign och flödesproblem. Beräkningarna i Silo Stress Tool som ligger bakom resultaten är uppbyggt på några av de beräkningsteorier för tryckförhållanden som är väl kända och använda inom silodesign (Schulze, 2008).

Programvaran Silo Stress Tool är ett lättmanövrerat program och ger tydliga resultat i både siffror och visuella bilder.

Begränsningar med programmet är att det inte är utformat för silodesign med hänsyn till hållfasthet och dimensionering. Programmet tar inte heller hänsyn till valvning som kan uppstå i fickan (Schulze, 2014).

Innan användning av Silo Stress Tool krävs att användaren har grundläggande kunskaper kring olika flödesegenskaper för att förstå hur dessa påverkar det flöde som bildas. Kunskaper kring tryckförhållanden i en silo är även ett krav för att kunna tolka resultatet. Beteckningar för både siloparametrar och materialparametrar finns angivet i programmet.

Ytterligare en förutsättning för att använda programmet är bra ingångsdata som kan mätas med hjälp av skjuvtest (Schulze, 2008). För material som exempelvis pellets finns det inte tillgång till lämpliga skjuvtestare på marknaden (Wu, Schott & Lodewijks, 2011) men då kan redan uppmätta resultat användas om dessa väl överensstämmer med det egna specifika fallet. Värden redovisade i denna rapport kan mycket väl vara applicerbara. Redovisade värden för väggfriktion bör dock användas med försiktighet eftersom det är flera parametrar som spelar roll, exempelvis typ av väggmaterial, ytans skick, fukthalten i bulkmaterialiet m.m. (Marinelli & Carson, 1992). När väggmaterialiet formas till en ficka vid byggnation av en silo kan också ytstrukturen förändras och orsaka en ökning i väggfriktionen (Schulze, 2008). Detta innebär att det kan finnas stor variation mellan liknande material. Däremot ger värdena i rapporten en bra fingervisning för hur situationen kan se ut.

Utifrån resultaten blev det tydligt att träflis inte är ett alternativ för att hantera i silos. Hantering av träflis i silo skulle kräva en hög silo med brant ficka eller en silo som enbart består av en hög och brant ficka. Därför bör andra lagringseinheter väljas.

I de autentiska exemplen var alla silos dimensionerade med en ficka på 45° vilket enligt Silo Stress Tool leder till tunnelflöde utifrån angivna material – och siloparametrar. Enbart i Exempel 1 finns uttalade flödesproblem och det leder till funderingar om det är mer än enbart silodimensionering som påverkar flödet. Silon i Exempel 2 är en relativt nybyggd silo och det finns bevis på högre andel finmaterial i bulkmaterialiet vid enstaka tillfällen. Det har dock inte undersökts vad detta beror på men det kan tyda på eventuella flödesproblem vilket bekräftas av resultatet. De andra tre silos i Exempel 2 går inte att utvärdera då dessa har extra sidoutlopp för tömning som direkt leder till stagnerade zoner.

Företaget i Exempel 2 förklarade att dimensioneringen av silon styrdes av mängden kubikmeter som skulle hanteras i silon. Lämplig silohöjd -volym styrde därmed silodesignen, istället för att utgå ifrån den lutning på fickan som krävs för att uppnå ett stabilt flöde. Detta tankesätt innebär emellertid långsiktiga problem och fördyringar i form av ofullständig tömning som i sin tur leder till batchvisa ökningar av andelen fines och missnöjda kunder.

### *Slutsats*

- Väggfriktion och vinkel på fickan är de kritiska parametrarna för att uppnå massflöde.
- Viktigt att göra ett grundligt förarbete och analys av den egna situationen innan silobyggnation för att undvika senare flödesproblem och eventuell ombyggnation.

- Programvaran ”Silo Stress Tool” fungerar som ett bra och användarvänligt hjälpmedel för att analysera och synliggöra flödesförhållanden.
- Alla material, exempelvis träflis, är inte lämpade för att hanteras i silo.



## Källförteckning

Berry, R.J. (2013). E-mail. University of Greenwich: The Wolfson Centre for Bulk Solids Handling Technology

Carson, J.W., Holmes, T. (2003). Silo Failures: Why do they happen? *Task quarterly*, vol. 7, nr. 4, ss. 499-512. Tillgänglig: <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/silos/TQ407B-G.pdf> [2014-02-01]

Chase, G.G. (2004) Solids Notes 10: Hopper Design. Kurs 4200: 461/561. Solids Processing, The University of Akron.

Dietmar Schulze (2006-06-07). *Stresses in silos*. <http://www.dietmar-schulze.de/fre.html> [2013-11-05]

Dietmar Schulze (2011-06-03). *Silo Stress Tool*. <http://www.dietmar-schulze.de/fre.html> [2014-02-03]

Drescher, A., Waters, A.J. & Rhoades, C.A. (1995). Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties. *Powder Technology*, nr. 84, ss. 165-176.

Jenike, A.W. (1964) Storage and flow of solids. Utah: University of Utah (Engineering experiment station, bulletin, no. 123)

Khan, NS. Bradley, MSA. & Berry, RJ. (2013). *Best Practice Guide for Handling of Biomass Fuels and Coal-Biomass Mixes*. Chatham: University of Greenwich.

Nielsen, J. (1998). Pressures from flowing granular solids in silos. *The royal society A*, vol 356 no. 1747, ss. 2667-2684.

Marinelli, J., Carson, J.W. (1992). Solve Solids Flow Problems in Bins, Hoppers, and Feeders. *Chemical Engineering Progress*, nr. 88, ss. 22-28. Tillgänglig: <http://rdptech.com/technical-resources/biosolids-storage-and-conveying-systems/solids-flow-bins-hoppers-feeders-marinelli.pdf> [2014-02-02]

Maynard, E.P. (2004). Practical solutions for solving bulk solids flow problems. *Cement Industry Technical conference*, Chattanooga 25-30 april, 2004, USA. ss. 139-147. Tillgänglig: [http://www.asocem.org.pe/bivi/sa/dit/icem/MAYNARD\\_PRACTICAL%20SOLUTIONS.pdf](http://www.asocem.org.pe/bivi/sa/dit/icem/MAYNARD_PRACTICAL%20SOLUTIONS.pdf) [2014-02-02]

Obernberger, I, Thek, G. (2010). *The Pellet handbook*. London: Eartscan. (978-1-84407-631-4)

Physics101. (2011) Storage bins and hoppers. *Slideshare* [Forum]. 29 juni. <http://www.slideshare.net/physics101/storage-bins-and-hoppers> [2014-01-16]

PlasticsEurope. (2014). *UHMWPE*. Tillgänglig: <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/engineering-plastics/uhmwpe.aspx> [2014-03-06]

Ravenet, J. (1981). Silo Problems. *Bulk Solids handling*, vol. 1, nr. 2, ss. 667-679.

Tillgänglig:

[http://www.mvt.ovgu.de/mvt\\_media/Vorlesungen/VO\\_PM\\_SGT/SiloProblems-p-1704.pdf](http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/VO_PM_SGT/SiloProblems-p-1704.pdf)  
[2014-02-01]

Schulze, D. (2014). E-mail. VD, Dr. Dietmar Schulze Schüttgutmesstechnik. Wolfenbüttel, Tyskland

Schulze, D. (2008). *Powders and Bulk Solids. Behavior, Characterization, Storage and Flow*. New York: Springer- Verlag Berlin Heidelberg.

Schulze, D. (2011) *Flow Properties of Powders and Bulk Solids*. Wolfenbüttel, Germany:

Ostfalia University of Applied Sciences. Tillgänglig: <http://www.dietmar-schulze.de/grdle1.pdf> [2013-10-07]

Schwedes, J. Hermann, F. (1995). Modelling of Pressures and Flow in Silos. *Chemical Engineering & Technology*. Vol. 18 (2). ss. 96-109. Tillgänglig:

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.270180204/pdf> [2013-10-07]

Wu, M.R., Schott, D.L., Lodewijks, G. (2011). Physical properties of solid biomass.

*Biomass and Bioenergy*, vol. 35 (5), ss. 2093-2105. Tillgänglig:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341100095X> [2013-11-05]