



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R34:1977**

(311) 992

# **Silotryck — skador av silotryck**

**Byggnadsstatik**

**Åke Holmberg**

TEKNISKA HÖRSKOLEN I LUND  
SÄMNINGEN FÖR VÄG- OCH VÄTTEK  
KÄNDET

**Byggforskningen**

R34:1977

Silotryck - skador av silotryck

Åke Holmberg

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 760640-7 från  
Statens råd för byggnadsforskning till Centerlöf & Holmberg AB,  
Lund.

Nyckelord:

Silor  
Dimensionering  
Beräkningsmetoder  
Konferenser

UDK 624.953  
061.3

R34:1977  
Statens råd för byggnadsforskning  
ISBN 91-540-2696-2

INNEHÅLL

Förord . . . . .	4
Nomenklatur . . . . .	5
Beteckningar . . . . .	6
Inledning . . . . .	7
Fyllningstryck . . . . .	8
Tömningsstryck . . . . .	10
Silobotten och byggd tratt . . . . .	12
Dimensionering . . . . .	13
Vad sen . . . . .	14
Refereande litteraturförteckning . . . . .	16

## FÖRORD

Statens råd för byggnadsforskning har genom sitt anslag 760640-7 bidragit till att möjliggöra en begränsad litteraturstudie rörande silolaster med tyngdpunkten förskjuten åt laster härledda ur pålitliga mätningar och sådana erhållna ur analyserade haverier. Resultatet framläggs här.

Begränsningen svarar mot rådets uttalade önskan. Den må vara berättigad; jag har för tillfället inte någon klar uppfattning i den frågan. Granskning, kontroll, samordning, justering och ett försök att teckna något mål har fått sitta mellan. Å andra sidan har på detta sätt en möjlighet till val i eftertanke och utan press av något a priori uppställt handlingsmål blivit given. Av det enkla skälet att studien har blottat okunnighetens vida fält - kända förr men sällan klar utpekade - finns det nämligen god anledning att söka något mål, något delområde, och att sträva mot detta.

Det delvis oredigerade materialet framläggs här med hemställan om förståelse för begränsningens villkor och innebörd. Litteraturlistan är dess viktigaste del. Den är inte fullständig; mycket övrigt intressant kan saknas däri. Med referenser i referenserna här utpekas emellertid mera än vad som alls kan benämnas som intressant.

En biprodukt har studien bidragit till att ge, beskedet att svenska bibliotek äro ytterst torftigt utrustade. Den beklagliga sanningen uttrycks lämpligen så, att Sverige befinner sig i en kulturskugga, dit ljuset av böcker och tidskrifter sällan når. Till "sällan" kan det kvantifierande beskedet ges, att i ofta upprepade långa serier hälften av det för lån begärda alls har kunnat uppletas.

Lund i februari 1977

Åke Holmberg

## NOMENKLATUR

En SILO, i den bemärkelse vari ordet här används, är en behållare med huvudsakligen vertikal utsträckning avsedd för någon FYLLMASSA bestående av korn, stora eller små, likstora eller olikstora. Fyllmassan kan tänkas beskriven som ett Coulomb-material med INRE FRIKTION och KOHESION, där dessa båda kunna åskådliggöras genom MOHR-ENVELOPENS lutning och dess avskärning på skärpåkänningsaxeln. Fyllmassan kan också tänkas beskriven som en osorterad PARTIKELHOP karakteriserad bl a av sitt PORTAL, som för en utvald del av det fyllda utrymmet är dennas porvolym dividerad med den fasta fasens volym inom samma utvalda del.

Silon fylls ovanifrån och töms helt eller delvis på någon lägre nivå genom en TRATT, som kan vara BYGGD eller SPONTAN. För att i fyllmassan utbilda en spontan tratt erfordras en TRATTBILDNINGSKRAFT. I ett vanligt men inte allmängiltigt fall sker tömningen enligt två samtidigt rådande mönster. Överst rör sig hela massan neråt under GLIDTÖMNING. Längre ner, i tratten, ombildas massan så att den under RINNTÖMNING lämnar silon. Tömningen kan vara CENTRISK eller EXCENTRISK.

Trycket mot siloväggen utöver trattbildningskraften är SILOTRYCKET, ofta med skilda värden vid fyllning och tömning, FYLLNINGSTRYCK och TÖMNINGSTRYCK.

Silotrycket bestäms av bl a silons form, som i dessa sammanhang bestäms av dess höjd och av HYDRAULISKA RADIEN, som är arean dividerad med omkretsen. Därutöver verka hållfasthetsparametrarna och fyllmassans TUNGHET, dess tyngd per volymenhet.

## BETECKNINGAR

A	silocellens area
G	tyngden av fyllmaterialet i tratten
$Q_v$	$q_v A$
d	diameter
$f_c$	kohesion
h	höjd
q	silotryck
$q_h$	horisontellt silotryck
$q_v$	vertikalt tryck i fyllmassan
r	hydraulisk radie
t	väggtjocklek
z	vertikalkoordinat mätt från fyllmassans medelöveryta
$\alpha$	friktionsvinkelns reduktionsfaktor
$\beta$	kohesionens reduktionsfaktor
$\gamma$	fyllmassans tunghet
$\epsilon$	portal
$\theta$	trattgeneratrisens lutningsvinkel mot horisontalplanet
$\kappa$	horisontellt silotryck/vertikalt silotryck
$\phi$	fyllmassans inre friktionsvinkel
$\psi$	vinkelkoordinat
$\emptyset$	"runt", diameter



## INLEDNING

Litteraturen om silor, lasten i och på silor, silors utformning och utförande och allt vad till detta hör är olikformig. Vissa avsnitt äro fylligt behandlade andra äro det mera knapphändigt. Den svenska litteraturen är knapphändig över hela området.

Detta senare förhållande i synnerhet har givit anledning till denna studie. Kompletterande har varit en önskan att visa hur närbelägna kunskapens gränser äro och hur angeläget det därför är att flytta ut dem i vad som nu är okunnighetens fält.

En följd av den svenska litteraturens knapphändighet är att någon fullständig svensk nomenklatur inte finns. Ett förslag till sådan innefattas därför i denna rapport. Beteckningarna äro konsekvent utformade enligt ISO 3898 och äro förtecknade separat.

Beträffande materialet i övrigt utöver litteraturförteckningen har det delats upp efter de skilda lastmomenten och inte enligt skilda hypotesområden. Det senare kunde ha varit bra men valet föll utan något starkt motiv på det förra. I avsnittet VAD SEN få hypoteserna sitt.

Den litteraturförteckning, som är och har varit studiens huvudsyfte har gjorts refererande med författarnamnen primärt i bokstavsordning. Referaten ha inte blivit likvärda men kunna förhoppningsvis bli till nytta ändå för dem, som önska för någon detalj gå till källorna.

## FYLLNINGSTRYCK

I botten på all diskussion om silotryck ligger ännu mestadels H A Janssens teori [1895], experimentellt verifierad vid fyllning utan någon tanke på att tömning skulle medföra några beaktansvärda ändringar. Ur ett studium av jämvikten hos ett horisontellt element  $A \times dz$  av fyllmassan, belastat ovanifrån med den konstanta intensiteten  $q_{v,z}$  och buret av  $q_{v,z} + dq_{v,z}$  jämte  $q_{h,z} \times \tan \alpha \phi \times dz$  verkande över hela periferin. Lösningen förutsätter att man känner  $\kappa = q_h/q_v$ . Janssen tillämpade  $\kappa = 0,65$ . Senare författare, bl a C Forssell [1920] och B Jakobson [1958] ha påvisat att  $\kappa$  varierar med  $\alpha$  och  $\phi$  där  $\alpha$  inte med nödvändighet har samma talvärde vid fyllning som vid tömning. Också silons geometriska utformning kan förmodas ha betydelse.

Med avvikande förutsättningar och beräkningsteknik ha flera givit sig på det trots allt principiellt elementära problemet med fyllningstryck, t ex W Airy [1898] och M Reimbert [1956]. Forskning och erfarenhet ha emellertid visat de stora problemen ligga just däri att tömningen medför beaktansvärda ändringar. Dessa problem ha hittills visat sig vara i det närmaste oöverstigliga. Man tar sig fram med empiriska eller halvempiriska korrektioner till Janssens formel

$$q_h = \frac{\gamma r}{\tan \alpha \phi} \left[ 1 - \exp \left( - \kappa \frac{z}{r} \tan \alpha \phi \right) \right] \quad (1)$$

ofta helt enkelt ersatt med asymptoten

$$q_h = \frac{\gamma r}{\tan \alpha \phi} \quad (2)$$

Bakom denna formel, som stundtals ger grovt oriktiga resultat men har använts genom decennier, visserligen inte utan s k oförklarliga haverier, se t ex B Broms [1975], B Hellström [1976], A Holmberg [1976], R E Rowe [1959], O F Theimer [1969, 2 st], O F Theimer [1973] och S Wigram [1976], ligger uttalad bl a förutsättningen att fyllmassan saknar kohesion och inte adhererar till siloväggen. Sådan förekommer emellertid ofta helt uppenbart och ger till formeln för asymptoten den modifierade formeln

$$q_h = \frac{\gamma r - \beta f_c}{\tan \alpha \phi} \quad (3)$$

Häri kan måhända förklaringen till mångas lycka ligga.  
Om termen  $\beta f_c$  försummas ger formeln för höga värden  $q_h$ ,  
tömningen tillgodo.

## TÖMNINGSTRYCK

Tämligen snart efter det att Janssen hade publicerat sin metod att förutsäga silotryck spred sig uppfattningen att förutsägelseerna passade sämre för tömnings- än för fyllningstryck. Se t ex A Caquot [1957], N Nanninga [1956] och en sammanställning gjord av M Turitzin [1963], som också understryker hur till synes slumpartat hela företeelsen uppträder. Att diskussionen fick fart under en begränsad tidrymd omkring år 1960 kan förmodas vara en följd av dels ett ökat antal byggda silor och därmed silohaverier dels en utveckling mot större silor med större känslighet för momentskapande laster och dels en allmän utveckling mot en mera intensiv materialutnyttjning, varvid bärförmågan till förfång för lasten fick överta något av dennas säkerhetsfaktor.

Perioden kan sägas ha blivit i princip men ej till sin verkan avslutad med K Pieper och F Wenzel [1964], som sammanfattade vetandet och systematiserade sökandet efter en förmodad inverkan av excentrisk tömning. Detta sökande har där efter fortgått utan avbrott till våra dagar. Se t ex U Motzkus [1974] och J Ravenet [1976]. Dess resultat har i något mellan skede blivit kodifierat som DIN.

Inverkan av tömning, ej endast av excentrisk tömning, kan vara en avsevärd tryckstegring inom trattbildningskraftens ringa verkningsområde, lagrad över en allmän tryckstegring av storleksordning upp till ca 50 % relativt fyllningstrycket men inte sällan påtagligt lägre. När tömningen sker excentriskt blir också trattbildningskraften excentrisk med verkan såväl mitt för tömningshålet som rakt över detsamma men på skilda nivåer. Denna lokala kraft kan ge betydande moment, som nästan undantagslöst bli negligerade och inte sällan, men då mestadels under mångfald upprepad, måhända förstora verkan, kan leda till lokal kollaps.

Vid centrisk tömning uppträda med stor sannolikhet laster av samma storlek men nu på samma nivå och utan att orsaka moment i något horisontellt, cirkulärt silosnitt. Se t ex Å Holmberg

[1976]. Deras inverkan döljs då ordinärt för en betongsilo inom någon säkerhetsfaktor och yttrar sig endast i stor sprickbredd, för vilken tåligheten med åren har blivit ganska stor.

Så länge Janssens metod, uttryckt i t ex (1) eller (2) betraktas som en lämplig basmetod med någon eller några korrekationer återstår att finna baskorrektionen för tömning, för trattbildningskraften med storlek och utbredning och för trattbildningskraftens läge.

Baskorrektionen kan med ett försök till förklaring knytas till  $\alpha$  och ges värdet 0,5 av fyllningstrycket. På denna punkt är litteraturen oprecis och oengagerad.

Beträffande trattbildningskraftens storlek finnas flera bud med  $5/3$  av fyllningstrycket jämte baskorrektionen (= 0,5 därav), givet av G P Deutsch och L C Schmidt [1969] som ett av de högsta, totalt 4 ggr fyllningstrycket. De flesta stanna på  $1/3$  med fyllningstrycket således fördubblat. Anmärkningsvärt är emellertid att de höga värdena äro knutna till sand, vilket anges också av K Pieper och F Wenzel [1964]. Sådan må ha någon egenskap, som merparten av andra gängse fyllmassor sakna.

Beträffande trattbildningskraftens läge är förvirringen i dag fullständig. Iakttagelser finnas för stöd åt hypotesen att den inträffar mellan  $20r$  och  $r$  över tömningsöppningen. Stöd finnes också för hypotesen att med  $\tan \theta \gtrsim 2$  någon trattbildningskraft inte inträffar över den byggda tratten. Se t ex Å Holmberg [1976] och A W Jenike [1961].

## SILOBOTTEN OCH BYGGD TRATT

Problemet rörande silotrycket på en byggd tratt är inte okomplicerat. Det behandlas av flera forskare, i vissa fall med inriktning också på att finna utformningens inverkan på tömningsförloppet, företrädesvis - hastigheten. Se t ex Jenike [1961], Jenike [1964], Jenike et al [1969], Johanson [1969], Motzkus [1974], som påpekar bl a att för tratten någon pålitlig beräkningsmetod inte är given, Peschl [1969] och Walker [1967].

För silor med en plan botten, över vilken den eventuella tratten skall utbildas spontant, är problemet mindre komplicerat. Lasten på botten fås elementärt ur jämviktsvillkoren. Det bör emellertid ihågkommas att tidigare fyllningsskeden med fyllmassorna släppta från stor höjd kunna vara avgörande.

I dessa frågor görs här ej något försök till sammanställning; litteraturställena få svara för sig själva. Se t ex D M Walker [1966] och [1967].

## DIMENSIONERING

Mera anmärkningsvärt än mycket annat inom detta område är att litteraturen rörande silors dimensionering är så ringa.

Reimbert [1956] med bl a en senare till tyska översatt version är en bland få.

Ämnet hör inte hit i vidare mån än vad som gäller silotryckets fördelning och där är i det närmaste inte någon ledning given. Några av mina egna funderingar må ersätta det icke funna. De riktas uteslutande mot cirkulära siloceller men kunna analogivis tillämpas också på t ex kvadratiska.

Trattbildningskraften per längdenhet kan vid centrisk tömning rimligen antas vara jämnt fördelad över periferin. Den lokala trattbildningskraften vid excentrisk tömning, mitt för och mitt över öppningen kan antas variera över  $\pm \pi/2$  med  $\cos \psi$  där  $\psi$  mäts från symmetriplanet. Dess fördelning i höjddled kan vara över en sträcka i vertikalled  $\approx 1,5 r$ . Dess medelintensitet i symmetriplanet skulle kunna vara  $0,75 q_h r$ , lokalt adderad till det jämnt fördelade trycket med värdet  $0,75 q_h r/1,5 r = 0,5 q_h$ . Med dessa data blir det att söka lasteffekterna och att dimensionera konstruktionen för dem. Stor förenkling i vad det gäller bl a generatrisstrimlornas medverkan blir därvid närmast nödvändig i all synnehet som slumpvis spruckna betongsilor liksom silor av korrugerad plåt inte ha någon för beskrivning lämpad styvhet.

VAD SEN

Silolaster gå inte att förutsäga mera än mycket grovt - av flera skäl. Vi ha inte någon pålitlig teori och vi ha inte lärt oss vilka parametrar, som bestämma fyllmassans beteende. Som det ser ut kan man väl tänka sig att någon väsentlig parameter är helt bortglömd.

Men vi ha metoder att reducera silotryck. Se t ex M Reimbert [1957] och A M Turitzin [1963].

Mycken lärd möda har av främst A W Jenike och gruppen kring honom blivit ägnad åt problemet att beräkna tömningstrycket innefattande trattbildningskraften. Resultaten äro emellertid inte höjda över diskussion bl a emedan de med en svårsmält argumentering se bort från eventuell kohesion - se t ex W S Housels kritik av A W Jenike et al [1960] - och emedan de vila på något äventyrliga tilläggsantaganden i energibetraktelserna. Deras otillräcklighet blir belyst av att de inte ge någon anvisning rörande trattbildningskraftens läge.

Där inte kravet på fullständig omsättning av fyllmassan, även vid ofullständig tömning och serier av fyllning, innebär ett krav på glidötömning finns god anledning att reducera silotrycket under någon påtvungen rinntömning. Den förutsättningen är ofta uppfylld och redan fyllningstrycket blir då ett intressant studieobjekt.

Om fyllningstrycket vet man att det någorlunda motsvarar det av t e x Janssen förutsagda om en sannolik kohesion negligeras. Ekvation (3) antyder att en korrektion kan bli betydande stor och N W McLeod [1950] jämförd med t ex C Forssell [1920] och B Jakobson [1958] antyder att också problemets teoretiska sida kan bjuda något arbete. I vart fall bör materialinsamling sättas igång.

Andra sidor av saken blottas emellertid om man i likhet med flera författare ifrågasätter hela friktionsteorin. Några exempel äro W S Housel [1937], M J Hvorslev [1937], T Mogami et al [1969 m fl]. Hit må också räknas C A G Weymouth [1933], som har studerat partikelinterferensens inverkan på rörlig-



heten i kornhopar. Problemet antyds fortlöpande i litteraturen men inte någon tycks vara beredd att ge sig i kast därmed inom dess totala område.

## REFERERANDE LITTERATURFÖRTECKNING

Airy, W, The Pressure of Grain, Proc Inst Civil Eng, Vol CXXXI, London, 1898

Under antagande om plana glidytor och med vissa förenklingar härleder författaren uttryck för silotrycket i rektangulära silor. Han bestämmer experimentellt värden  $\alpha$ , som ligger anmärkningsvärt högt: ca 0,60 för ärter mot stål och ca 0,95 för vete mot betong. I polemik mot Janssen hävdar han att trycket mot bottnen bör vara ännu större i en cirkulär silo än i en rektangulär med samma area och fyllningshöjd än vad Janssens teori visar.

Härtill finns en efterskrift i Proc Inst Civil Eng, Vol CXXXVI, London, 1899.

Blair-Fish, P M, Bransby, P L, Flow, Patterns and Wall Stresses in a Mass-Flow Bunker, Trans ASME, J Engng for Industry, Febr 1973.

Uppsatsen behandlar försök att med röntgenfoton av blyhagel placerade i en sandfylld silomodell detaljstudera rörelserna vid tömning. Man finner huruledes vid glid tömning zoner med stark deformation avlösa varandra och tror sig ur fortsatt studium härav kunna finna vad som bestämmer glid- och rinntömning.

Broms, B, Skador på behållare för järnmalmsslig vid Tokadeh, Liberia, Opublicerad, 1975

Vid centrisk tömning av cirkulära celler med invändig diameter 8,5 m och höjd 32,5 m iaktogs ca 9 r över bottnen stora sprickor, som tydde på höga silotryck.

För olika slag av järnmalmsslig uppmättes  $\phi = 31^\circ$  och  $\phi = 28,5^\circ$ . Den genomsnittliga kornstorleken varierade i det aktuella fallet mellan 0,25 och 0,35 mm.

Caquot, A, La Pression dans les Silos, Proc 4th Intern Conf Soil Mech Found Engng II, London 1957

I ett försök att finna metoder att beräkna silotryck prövas hypotesen att vid tömning glidning mot cellväggen alls ej inträffar. Resultatet blir ett relativt högt tömningstryck; någon pålitlig verifikation ges emellertid inte.

Deutsch, G P, Schmidt, L C, Pressures on Silo Walls, Trans ASME, J Engng for Industry, May 1969

Modellförsök på en sandfylld plastsilo ger tömningstryck upp till 4 ggr fyllningstrycket med maximipunkten varierande inom det område, där trattbildningen sker. Något påtagligt försöksfel är svårt att finna.

Forssell, C, Jordtryck, Teknologernas Handelsförenings Publikationer N:r 41, Kompendier N:r 18, (Teknologernas Handelsförenings-Förlag) Stockholm 1920

Kompendiet behandlar bl a korrektionskoefficienten  $\kappa$  i Janssens formel och ger talvärden för denna liksom för tunghet och friktionsvinklar för några aktuella material.

Garg, R M, Maximum Pressures of Granular Materials in Silos, Indian Concrete Journal, Dec 1972 and March 1973.

Uppsatsen är enbart refererande. Den innehåller bl a en detaljerad framställning av den sovjetiska lastnormen för silor med horisontaltrycket för en spannmålssilo

$$p_h = \text{Koeff} \times 14,3 r \left[ 1 - \exp \left( -0,17 \frac{z}{r} \right) \right]$$

och Koeff varierande mellan 1 och 2,35 med 2 för de nedre 2/3 av cirkulära silor, 1 för den övre tredjedelen och 1 för hela höjden av en kvadratisk silo med sidan  $\leq 4$  m.

Hellström, B, Sprickbildning i siloanläggning silo 5, Kvarnholmen, CBI Rapport nr 7610, Opublicerad, 1976

I en silocell med inre diameter 11 m och inre höjd 30 m och med vägg tjocklek 0,2 m sker tömning genom två hål på samma diameter, vardera med avståndet  $r$  från ytterväggar. Mitt för det ena har väggen en markerad bula  $2r - 3,5r$  över bottenplattan.

Silocellen var något underdimensionerad, vilket underlättade observationen.

Holmberg, Å, Några analyserade skador och gjorda mätningar, som ge ledning vid val av silotryck, Rapport vid Byggforskningens symposium i Lund 1976-12-22 över "Silor, belastning och konstruktion", refuserad av tidskriften Byggmästaren 1977-01-31 som ointressant

Inträffade skador, en på en cirkulär betongcell och en på en cirkulär stålcell ge belysning åt förhållandet med stora lokala tryck under tömningen. Mätningar på betongcellen ge detaljer med tömningstrycket lokalt ca dubbelt så stort som Janssen-trycket oberoende av om tömningen sker centriskt eller excentriskt. Mätningar på en kvadratisk stålcell ge oväntat små tömningstryck, måhända som följd av att tömningstratten är tämligen brant.

Housel, W S, Internal Stability of Granular Materials, ASTM, Proc 39th Annual Meeting, Jan 1937

Hela frågan om kornhopars mekaniska egenskaper diskuteras med flera problem aktualiserade. Ett i detta sammanhang viktigt påpekande är att glidytor representera områden med ringa motstånd snarare än områden med maximala påkänningar.

Hvorslev, M J, <sup>II</sup>Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden, Ingeniørvidenskabelige Skrifter, 1937

Det visas hur för material med kohesion och inre friktion skär-

hållfastheten är en funktion av den effektiva normalpåkänningen och av portalet. En försökstolkning enligt Coulomb kan därför leda till en överskattning av den inre friktionen.

Jakobson, B, 1958, On Pressure in Silos, Brussels Conference 58, Proc Vol 1, Brüssel

Uppsatsen behandlar bl a korrektionskoefficienten  $\kappa$  i Janssens formel. Se också Forssell, C, 1920 och Bygg, Huvuddel 1 B, 1972, 175:7, Stockholm

Jaky, J, Pressure in Silos, Proc 2nd Int Conf Soil Mech and Found Eng, Vol 1, 1948

Författaren påpekar att Janssen (1895) utan verifikation har antagit en konstant friktionsvinkel motsvarande fullt utnyttjad friktion och härleder själv ett semiempiriskt uttryck för silotrycket. Dess beroende av fyllning och tömning behandlas inte.

Janssen, H A, Versuche über Getreidedruck in Silozellen, Zeitschrift VdI, August 1895

Författaren härleder sin välkända formel för silotryck och verifierar den experimentellt genom att mäta bottenstrycket i olika stora modellsilor av trä, fyllda med vete. Friktionskoefficienten bestämmer han experimentellt till ca 0,325 innebärande  $\alpha \phi = 18^\circ$  och  $\kappa$  till ca 0,65. Endast fyllningsfallet behandlas.

Jenike, A W, Gravity Flow of Bulk Solids, Utah Engng Exp Station, Bull No 108, Salt Lake City, 1961

För ett homogent friktionsmaterial med krökta Mohr-enveloper studeras flytbetingelserna under vissa kompletterande antaganden. Betingelserna för valvbildning och för övergång från glid tömning till rinntömning diskuteras. Den senare främjas

av att materialets hållfasthet växer vid konsolidering.

Metoder att mäta materialdata diskuteras med påståendet att geoteknikens gängse metoder ordinärt inte äro tillämpliga på material med låg kohesion.

För trattens generatris föreslås  $\theta \geq 35 + 0,5 \phi$ . Också i övrigt ges förslag till utformningsregler och till lastantaganden.

Jenike, A W, Storage and Flow of Solids, Utah Eng Exp Station, Bull No 123, Salt Lake City, 1964

Publikationen fortsätter Jenike 1961 med detaljstudier av villkoren för att materialet alls på önskat sätt skall rinna ur den därför avsedda öppningen.

Jenike, A W, Elsey, P J, Woolley, R H, Flow Properties of Bulk Solids, ASTM, Proc 1960, Diskussion

Publikatione är nära sammanhängande med Jenike 1961 och delvis sammanfallande därmed.

I diskussionen framhåller Housel, W S, oklarhet på flera punkter i framställningen och påpekar speciellt, att den krökta Mohr-envelopen inte är förenlig med Coulombs brottkriterium.

Jenike, A W, Johanson, J R, Bin Loads, Proc ASCE, Journal Struct Div, April 1968

I uppsatsen görs ett försök att härleda de lokala krafter, som uppstå: där fyllningsmassan övergår från aktivt tillstånd (närmast vertikala påkänningar och töjningar) i de övre delarna till passivt tillstånd (närmast horisontella påkänningar och stukningar) i de lägre delarna. I relativt låga silor kan passivt tillstånd råda över hela höjden, varvid rinntömning sker.

Jenike, A W, Johanson, J R, On The Theory on Bin Loads,  
Trans ASME, J Engng for Industry, May 1969

Uppsatsen behandlar väsentligen detsamma som den av samma författare april 1968. Ett räkneexempel illustrerar.

Förekommande vibrationer under glid tömning förklaras av växlingar mellan vilo- och rörelsefriktion.

Höga tryck i tömningstratten kan följa på fyllning efter avbruten tömning.

Jenike, A W, Johanson, J R, Carson, J W, Bin Loads, Trans ASME, J Engng for Industry, Febr 1973

I tre uppsatser fullföljs Jenike, A W, Johanson, J R, 1968. Med någon approximation tillämpas principen om den inre energins minimum och därur härleds uttryck för silotryck vid tömning i tratten och i cylinderdelen vid såväl glid tömning som rinntömning. Någon kohesion beaktas inte och endast fullt symmetriska fall behandlas.

Jämförelse med försöksresultat visar rimlig överensstämmelse.

Jenike, A W, Shield, R T, On the Plastic Flow of Coulomb Solids Beyond Original Failure, J Appl Mech, Dec 1959

Utredningen, tidig i Jenikes produktion, antyder en formell anknytning till Mogami 1969, som uppenbarligen ingendera senare har observerat.

Johanson, J P, Effect on Initial Pressures on Flowability of Bins, Trans ASME, J Engng for Industry, May 1969

Uppsatsen gäller inverkan av ursprungligt tryck i en silo samt silons och speciellt trattens form på tömningsförloppet.

Den bygger till stor del på Walker.

Lenczner, D, An Investigation into the Behaviour of Sand in a Model Silo, The Struct Eng, Dec 1963

Författaren påvisar genom försök med finsand att vid fyllning Janssens formel alltid genom anpassning av  $\kappa$  kan bringas att ge noggranna resultat. Han demonstrerar också hur vid i övrigt lika förhållanden någon ringa skillnad i kornformen innebärande ca 2° större friktionsvinkel kan reducera den spontana trattens längd från 5' (fullständig rinntömning) till ca 2'  $\approx$  10 r.

McLeod, N W, A Rational Approach to the Design of Bituminous Paving Mixtures, Proc Ass Asphalt Paving Technologists, St. Louis, Miss 1950

I ett studium av asfaltbeläggningsars stabilitet tecknar författaren sambandet

$$q_{v,max} = q_h \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2 f_c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}}$$

Motzkus, U, Belastung von Siloböden und Auslauftrichtern durch körnige Schüttgüter, Diss, Braunschweig 1974

Vissa delar av den relevanta litteraturen refereras och diskuteras. Det visas att Janssens teori låter sig utan svårighet anpassas till mätresultat men att för tratten någon pålitlig beräkningsmetod inte är given. Ett stort antal försöksresultat jämföras med enligt författaren och enligt Walker beräknade värden.

Av Pieper angivna stora tryck på tömningssidan bekräftas för kvartssand ca 13 r över tömningsöppningen. Upprepad användning av en spannmålssilo visas ge stegrade silotryck.

Mogami, T, Imai, G, Influence of Grain-to-Grain Friction on shear Phenomena of Granular Material, Soil and Foundation 3:1969

Mogami med flera skilda medförfattare i flera skilda publikationer har behandlat partikelhopar och funnit följande samband



mellan portal  $\epsilon$  och inre friktion  $\phi$  : vid plant påkännings-  
tillstånd  $(1 + \epsilon) \sin \phi = k_1$  ; plant deformationstillstånd  
 $(1 + \epsilon) \sin \phi = k_2$  ; axialsymmetri  $2(1 + \epsilon) \sin \phi / (3 - \sin \phi)$   
 $= k_3$ . För stenfyllning av skilda slag i dammar fann man ur 37  
st prov  $\epsilon = 0,51 (1 \pm 0,36)$  - jämför minivärdet för jämnstora  
sfärer 0,35. För  $\phi$  erhöles 39,9° ( $1 \pm 0,14$  och  $k_2 = 0,96$   
( $1 \pm 0,15$ ) motsvarande  $k_1 = 3 k_2 / 2 = 1,45$ . För släta jämnstora  
stålkulor erhöles  $k_1 \approx 0,6 - 1,5$ . I övrigt beror  $k$  av kornform  
och packningsgrad. Glidytor eller -linjer utbildas inte enligt  
gängse teorier. Sammanhållna tättagrade hopar röra sig mellan  
band av löslagrat material.

Nanninga, N, Geeft de gebruikelijke rekenwijze ter bepaling  
van de drukken op wanden en bodem van silogebouwen veilige  
mitkomsten, De Ingenieur Nov 1956.

I försök att finna grunden till avvikelser mellan förutsagda  
och observerade silotryck införs i diskussionen, baserad på  
Janssens formel, dels kohesionen dels gränsvärdena för  $\kappa$  vid  
respektive aktivt och passivt tryck,  $(1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$   
och  $(1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ . En snabb skiftning häremellan kan  
ge betydande tryckstegring.

Nielsen, J, Silotryk, Rapport Nr R 26, Afdelingen for Baeren-  
de Konstruktion Danmarks tekniske Højskole, Köpenhamn 1972

Rapporten behandlar problem sammanhängande med tryckmätning  
dels i modeller dels i fullskalesilor. En sådan mätning avsåg  
inverkan av en arrangerad förtjockning inåt på väggen till en  
cell i Kongens Bryghus.

Cellen  $\phi$  4,5 m  $\times$  40 m gavs en förtjockning inåt av maximalt  
6 mm inom en cirkel med diametern 1 m varav följde en tryck-  
stegring av ca 45 kN/m<sup>2</sup> motsvarande en förhöjning av storleks-  
ordningen 100 %. I ett tidigare, refererat försök visades ock-  
så en betydande inverkan av avvikelse från vertikalitet.

Paterson, W S, Pressures in silos, Civil Engng and Public Werks Review, May 1970

Författaren refererar ett antal litteraturställen och ägnar sig själv särskilt åt betingelserna för övergång från glid- tömning till rinntömning.

Peschl, I A S Z, Theory of the Formation of Arches in Bins, Trans ASME, J Engng for Industry, May 1969

För att stabila valv skola hindras från att uppstå bör tratten kunna fjädra. En med djupet tilltagande lutning hos trattsidan är fördelaktig.

Pieper, K, Investigation of Silo Loads in Measuring Models, Trans ASME, J Engng for Industry, May 1969

Rapporten redogör för försök, som visar Janssens formel giltig som modellag och visar  $\alpha = 0,5$  à 1. Värdet  $\kappa \approx 0,5$  indikeras. Tryckstegringar i relation till Janssens fyllningstryck erhålls vid excentrisk tömning med 45 % 2 ggr bredden över bottnen på väggen mitt för öppningen och med 65 % på en nivå något över den föregående. Långsam tömning höjer avsevärt tryckstegringsnivåerna. Mjöl och liknande antar efter att som vätska ha varit något luftburet material tämligen snabbt inre friktion och till någon otillräckligt känd del kohesion.

Pieper har senare systematiserat detta och annat i ett normförslag.

Pieper, K, "Über das "Schlagen" in Silozellen, Aufbereitungs-Technik, 4/1975.

I en granskning av bl a Theimer 1973 utvecklas hypotesen att glid- tömning för vissa typer av material helt övergår till rinntömning ca 1,5 d över bottnen och att det område, inom vilket övergången sker, begränsas uppåt mera än 5 d över bottnen.

Som aktuella material nämns cementklinker och majs.

Pieper, K, Martens, P, Kroll, D, Wagner, K, Silos für Zementklinker, Zement-Kalk-Gips, August 1970

För cementklinker ges  $\phi \approx 0,8$  vid fyllning och  $\alpha \approx 0,55$  vid tömning och  $\gamma \approx 15 \text{ kN/m}^3$ . Åt  $\kappa$  ges värdet 0,45 vid fyllning och ca 0,6 vid tömning. Cementklinkersilor anges vara mycket benägna för lokala, temporära tryckstegringar inom områden längre än ca 3,5 d från fyllningsgodsets överyta.

Maximalt tömningstryck är ca 2 ggr fyllningstrycket med ca 0,5 av stegringen utgörande lokala tryckstegringar.

Pieper, K, Wenzel, F, Druckverhältnisse in Silozellen, (Wilhelm Ernst & Sohn) Berlin-München 1964

Bokens första del innehåller en välgjord sammanställning av den väsentliga litteraturens merpart t o m 1963 med intresse ägnat framför allt  $\kappa$ . Deras andra del innehåller en rapport rörande egna försök med noggrann tryckbestämning. Tömning gav vid kvartssand maximal tryckstegring 54 % och vid vete 27 %. Begynnande trattbildning iakttoogs vid sand ca 11,5 r över bottnen och vid vete ca 7 r över bottnen. Försök att finna pålitliga värden  $\alpha$  misslyckas; kohesionen negligeras.

I övrigt behandlas DIN 1055.

Ravenet, J, Überdrücke in Silos mit ausmittiger angeordneter Entleerungsöffnungen, Acier-Stahl-Steel 3/1976

Rapporten inleds med en redogörelse för tidigare försök gjorda med excentrisk tömning med delvis motsägande resultat rörande storleken av över- och undertryck i relation till fyllningstryck enligt Janssen. Anslutningsvis redogörs för ett modellförsök på en silo  $30 \times 30 \times 1980 \text{ mm}$  fylld med sand och tömd excentriskt mitt på en sida. Ca 35 mm över bottnen mitt för öppningen erhålls övertrycket 95 % och rakt över öppningen ca

45 mm över botten undertrycket 70 %. Nära botten, mitt för öppningen erhöles undertrycket 35 %.

Reimbert, A, Reimbert, M, Silos, Trait  Th orique et Pratique,  ditions Eyrolles, Paris 1956

På bas av egna mätningar (1943) utarbetas ett alternativ till Janssens metod enligt vilken exponentialfunktionen blir ersatt av en hyperbel. F r  $\kappa$  väljs  $(1 - \sin \phi)/(1 + \sin \phi)$ , vilket  r huvudp k nningsf rh llandet enligt Rankine.

Reimbert, M, Surpression dans le Silos lors de la Vidange, Travaux, Nov 1954

Genom försök visas hur ett perforerat rör kan framtvinga rinntömning, varvid tryckstegring under tömning kan undvikas.

Rowe, R E, An investigation into the Cause of Cracking in a Reinforced Concrete Silo Containing cement, Mag Concr Res, July 1959

Från tryckmätningar gjorda med i en cementsilos vägg infällda m tdosor finner författaren tryck, som högst avsevärt skilja sig från de enligt Janssen beräknade. Han ser häri ett skäl att beteckna Janssens teori som inkorrekt. Emellertid ger  $\alpha = 0,5$  och  $\beta f_c = 14 \text{ kN/m}^2$  de uppmätta trycken  $q_{h,max}$ .

Scharlett, B, Todd, A C, The Critical Porosity of Free Flowing Solids, Trans ASME, J Engng for Industry, May 1969

Den formella sk rh llfastheten liksom betingelserna i övrigt f r sk rdeformation beror av bl a portalen. Undersökningen gäller det kritiska portal, vid vilket detta beroende upphör.

Theimer, O F, Bersten von Stahlsilos bei tiefen Temperaturen,  
Der Bauingenieur 3:1967

Det påpekas att i synnerhet för cylindriska stålsilor med en ringa värmekapacitet hos väggarna och ett nära nog absolut dilatationsförhindrande tvång en hastig temperatursänkning kan ge anledning till bristning och haveri.

Theimer, O F, Failures of Reinforced Concrete Grain Silos,  
ASME, Journal Engng for Industry, May 1969

Författaren sammanställer, illustrerar och kommenterar ett stort antal silohaverier. För dem orsakade av dimensioneringsfel finns inte någon sammanfattande förklaring.

Theimer, O F, Failures of Reinforced Concrete Grain Silos,  
Proc ASME, Journal Engng for Industry, 1969

Rapporten innehåller en summarisk redogörelse för ett antal stora silohaverier och bl a en sammanställning av skilda belastningsantaganden. Storleken av  $\kappa$  och  $\alpha$  diskuteras; för den senare rekommenderas  $2/3$  vid betong- och  $1/2$  vid stålsilor. Tryckstegringen relativt Janssens fyllningstryck refereras ur flera källor och utgör mestadels 100 % på någon del av silohöjden, varierande mellan ca 20 % och ca 70 %.

Theimer, O F, Einsturz eines Riesensilos, Die Mühle + Mischfuttertechnik, Februar 1973

Notisen återger några detaljer kring ett stort silohaveri där en fristående rundcell  $\phi 15,5 \times 75,5$  m fick mycket breda sprickor mellan ca 15 och 25 m över botten sedan den först hade blivit för varm, ca  $40$  à  $45^\circ\text{C}$ , och därefter hade blivit satt under samtidig tömning och fyllning. Cellen hade observerats luta något.

Turitzin, A M, Dynamic Pressure of Granular Material in Deep Bins, Proc ASCE, Journal Struct Div, April 1963, Ann Arbor, Mich

I rapporten ges en vid publikationstillfället aktuell sammanställning av relevant litteratur med tonvikt på den del därav, som behandlar faktiska observationer. Villkoren för rinntömning och glidötömning diskuteras med för den senare stor relativ höjd  $\geq 1,5$  och stor friktion mot väggen. Också metoder att undvika glidötömning behandlas. Vid glidötömning blir horisontaltrycket till synes regellöst upp till drygt 2 ggr fyllningstrycket enligt Janssen på en till synes regellöst varierande del av höjden med mindre delar därav överst och nederst undantagna. Vid rinntömning blir horisontaltrycket ungefär som fyllningstrycket enligt Janssen. Effekten med stegrat horisontaltryck vid tömning kan uppträda först flera år efter det att silon har blivit tagen i bruk.

Walker, D M, An approximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers, Chem Engng Science, 1966

Med tillämpning av Roscoe, K H, Schofield, A N och Wroth, C P, On the Yielding of Soils, Géotechnique 1958 och i efterföljd av Jenike antas ett fyllnadsmaterial, närmast kolpulver kunna karakteriseras av ett effektivt flytområde i Mohrs diagram så, att inverkan av kohesionen därvid blir beaktad. Härur och med vissa förenklingar härleds tryckfördelningen i en symmetriskt konisk tratt. För ett givet material och en given lastsituation bestäms dess flythållfasthet av det högsta inträffade konsolideringstrycket.

Walker, D M, A Basis for Bunker Design, Powder Technol, 1967

I fortsättning av Walker 1966 behandlas problemet rörande tömningstrycket i koniska trattar med kohesivt material. Fuktighetens inverkan på kohesionen hos kolpulvret studeras. Vidare studeras inverkan av trattens öppningsdiameter, dess lutning och dess strävhet. Jämförelser med försök störs av stor spridning.

Wenzel, F, Druckverhältnisse in Silos bzw Bunkern, föredrag vid ett symposium i Erlangen 1974-09-12 inom europeiska kemiingenjörssföreningen

Föredraget refererar väsentliga delar av problemens och kunskapens utveckling under de senaste två decennierna utan att ge någon egentlig problemanalys men väl täckning av ett stort litteraturområde. Därå konstateras bl a helt kort att teorin för hur silotryck vid tömning uppstår är ofullständig.

Weymouth, C A G, Effects of Particle Interference in Mortars and Concretes, Rock Products, Febr 1933

I en studie inriktad på att finna en av förekommande orsaker till avvikelser från sambandet mellan vattencementtalet och tryckhållfastheten hos cementbetong finner författaren partikelinterferensen vara väsentlig. Partikelinterferensens primära konsekvens är minskad rörlighet i en hop av olikstora korn.

Wigram, S, Skada å silo i X-lund, Opublicerad, 1976

I ett silobatteri med två rader à tre cirkulära celler, fast inspända i varandra och mellan dem mindre celler i en central rad uppstod efter någon tid stora sprickor lokalt framför de helt excentriska tömningsöppningarna och 5,5 r - 8,5 r över den plana botten. Siloväggen var något underarmerad, vilket underlättade observationen.

SAMMANFATTNING

SILOTRYCK - SKADOR AV SILOTRYCK

Åke Holmberg

Några årtionden efter det att H A Janssen år 1895 publicerade sin i flera avseenden välbestyrkta teori angående fyllmassors tryck mot silors väggar och bottnar började erfarenheten ge stöd för hypotesen att dess förträfflighet, då det gällde fyllning, inte var någon sådan, då det gällde tömning. Diskussionen - efter flera helt skilda vägar - var i full gång några år efter mitten av detta sekel och är det ännu.

Sverige, som är lite av sidesbeläget, har i huvudsak undgått att dras in och ännu på senvintern år 1977 kunde redaktionen för en förmodat ambitiös svensk byggnadstidskrift undanbe sig att bli in- dragen. Haverierna eller haveritillbudena lämnades åt de närmast sörjande, en minoritet i läsekretsen.

Diskussionens skilda vägar utgöras av en huvudled och ett system av småstigar. På huvudleden vandrar som författare A W Jenike och hans alla medarbetare och efterföljare. Målet är att finna de lagar, som bestämmer tömningstrycket innefattande den kraft, trattbildningskraften, som uppstår för att bilda en intern tratt, där tömningen avslutas genom att fyllmassan, som i sina övre delar har glidit, övergår till att rinna.

På småstigarna vandra allehanda författare, väsentligen utan samordning. De sätta var för sig från skilda utgångspunkter i fråga de gängse teorierna för kornhopar som s k friktionsmaterial med ytterligare komplikation, där någon kohesion inte längre kan negligeras. I änden på deras stigar ligga stora fält av okunnighet i väntan på påhittiga och på oförskräckta, uthålliga stigfinnare.

Praktiskt handlande i en kaotisk situation måste baseras på vad som är observerat även om det inte är förstått. Inte ens på den vägen kommer man emellertid längre än att man i dag måste gardera sig i ett antal alternativ. Trattbildningskraften t ex, som inte alls är oväsentlig, måste av försiktighet antas ha alternativa lägen.

Den korta texten ger inte mycket av analys och anvisar knappast vägarna framåt. Huvudparten är en litteraturlista, 49 rubriker, med för var och en av dessa ett mycket kort referat. Urvalet är emellertid gjort med avsikt att antyda problemens mångsidighet och deras anknytning till andra kunskapsområden.







**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 760640-7 från  
Statens råd för byggnadsforskning till Centerlöf & Holmberg AB,  
Lund**

**R34: 1977**

**ISBN 91-540-2696-2  
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6600634  
Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 1403  
111 84 Stockholm**