

Statische und dynamische Phänomene in Silos

Welche Möglichkeiten bestehen, diese bei der statischen
Auslegung von Silos zu berücksichtigen?



SMP Ingenieure
im Bauwesen GmbH

ehem.

Prof. Eibl + Partner GbR

Prof. Müller + Dr. Günter IGB GmbH

Stephanienstr. 102
76133 Karlsruhe
Tel. 0721/91319-0
www.smp-ing.de

Dr.-Ing. C. Ruckenbrod

Vielzahl unterschiedlicher Silobauwerke



Vielzahl unterschiedlicher Schüttgüter



Schüttgut: jede Art von loser Ware, die geschüttet werden kann



„Schüttgut heißt jetzt Solids“

Landwirtschaftliche Erzeugnisse

Getreide (Gerste, Hirse, Mais, Roggen, Weizen);
Hülsenfrüchte (Bohnen, Erbsen, Linsen, Sojabohnen);
Ölsaaten (Weizen, Lein, Raps, Senf, Sonnenblumen);
Nusskerne, Palmkerne;
Kaffee (-bohnen); Kakao (-bohnen)

Bearbeitete landwirtschaftliche Erzeugnisse

Getreidemehl; Kleie;
Schrot (Palmkerne, Sojabohnen, Sonnenblumen);
Futtermittel;
Pelletierte Produkte: Sojabohnen, Sonnenblumen,
(Kleie);
Zucker;
Zucker;
Malz

Anorganische Rohstoffe

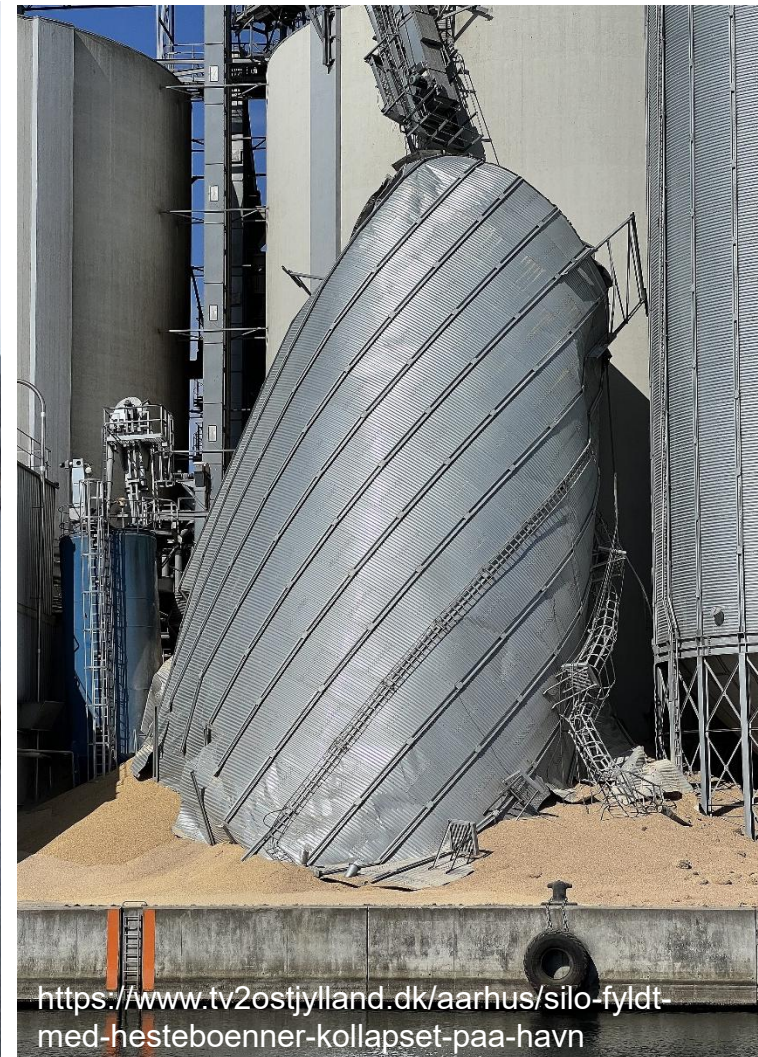
Kies, Quarz, Sand, Schotter,
Erz; Kalk; Kohle; Koks

Industrieprodukte

Zementklinker; Rohmehl, Kalk
Gesteinsmehl, Kohlenstaub;
Düngemittel (Kalisalze, Phosphatmehl), Streusalz;
Oxide; Schwefel; Soda;
Kunststoffgranulate

Schüttgut ist weder fest, noch flüssig, noch gasförmig.
Schüttgut ist lose.

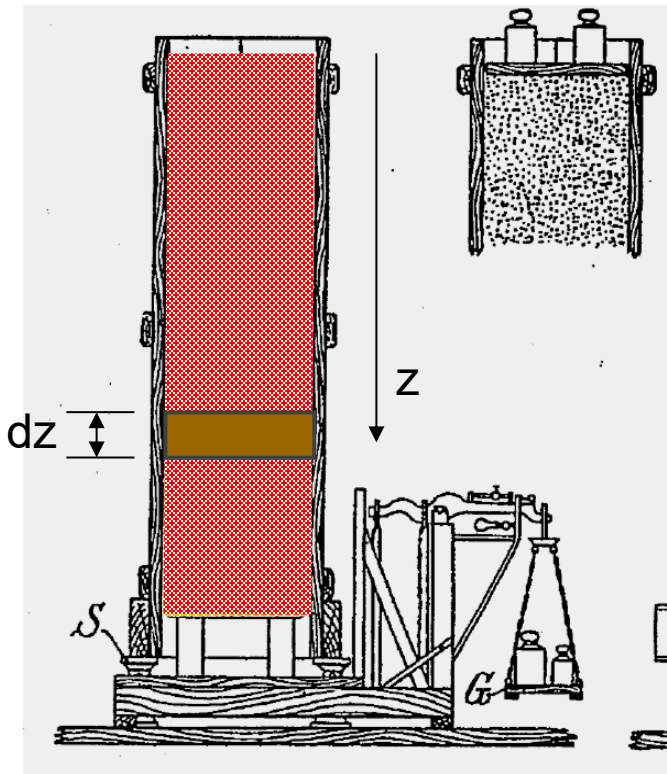
Vergleichsweise hohe Schadensrate



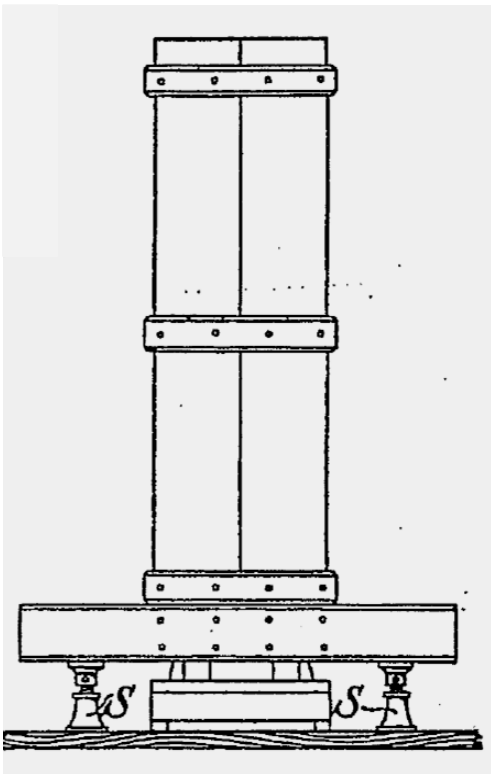
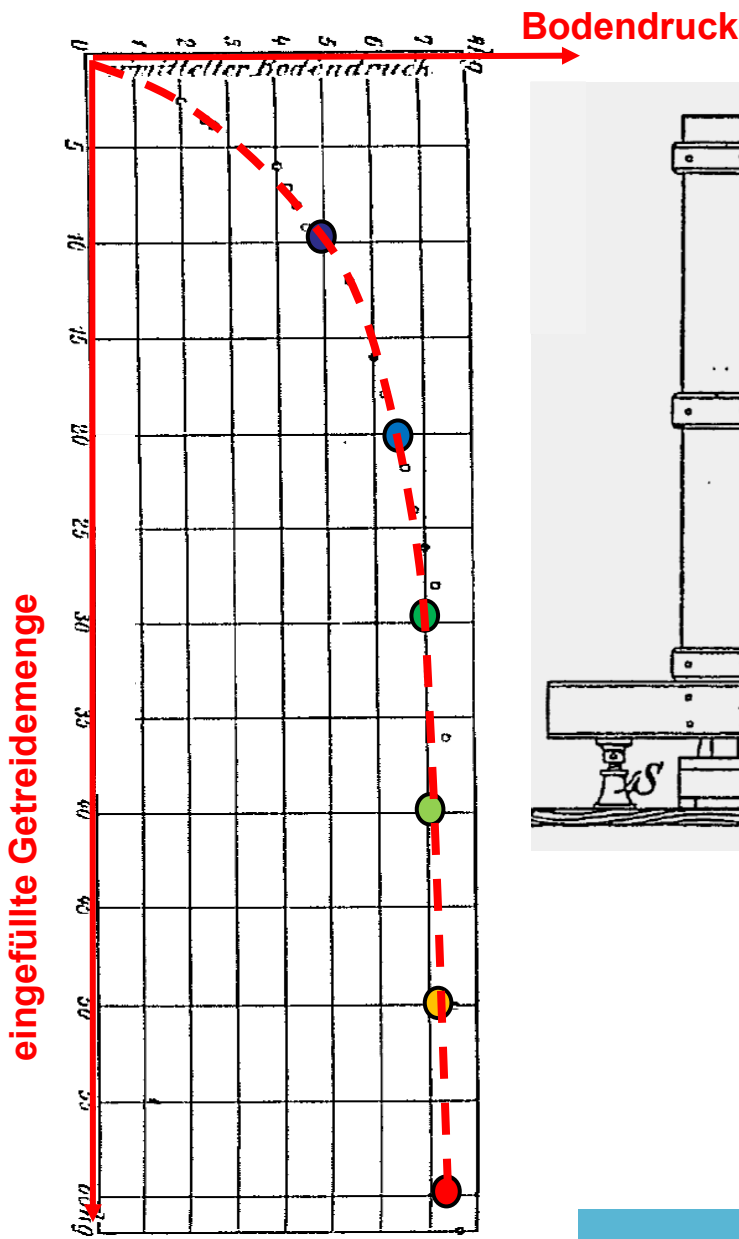
13. April 2023

Statische Phänomene

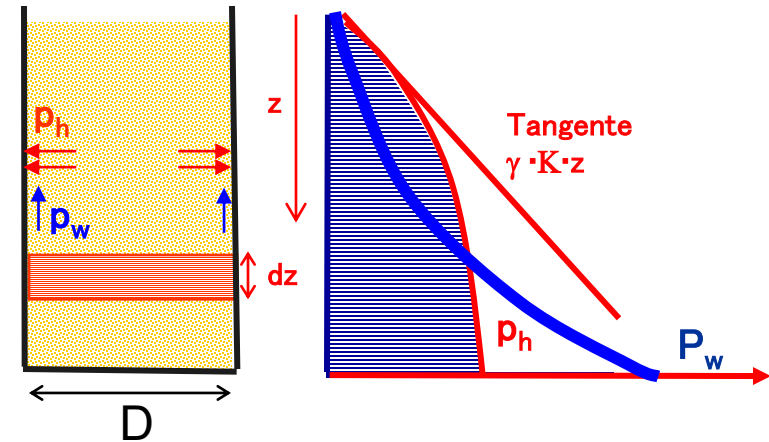
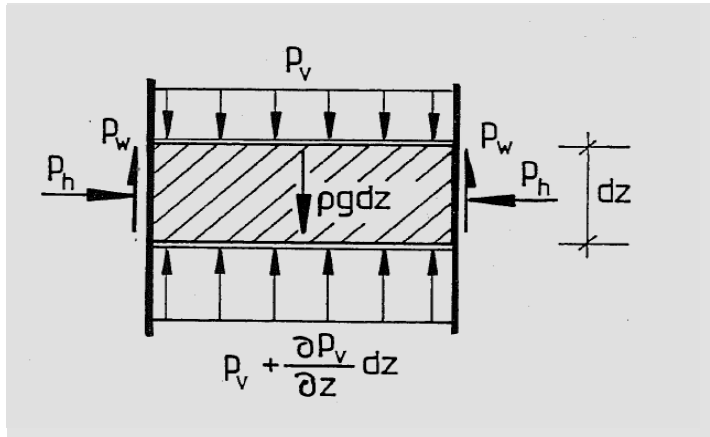
Füllzustand



„Janssentheorie“ von 1895



Schüttgutverhalten im Füllzustand



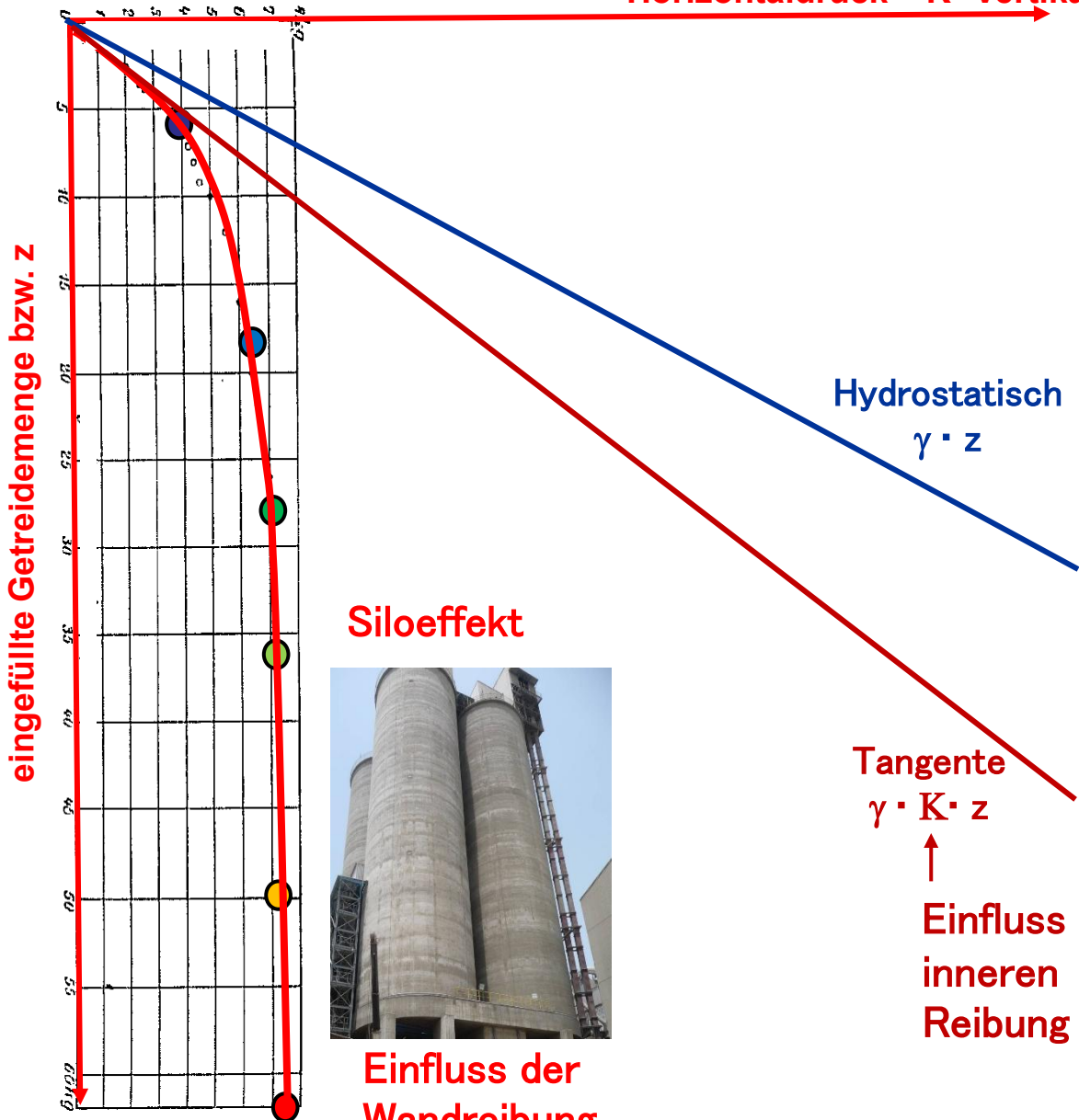
Silotheorie von Janssen

Annahmen: $p_{h,J} = K \cdot p_{v,J}$ und $p_{w,J} = \mu \cdot p_{h,J}$

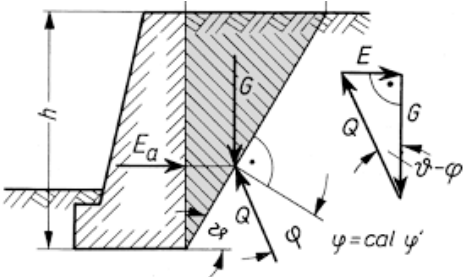
Lösung Differentialgleichung:

$$p_{h,J} = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \left[1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot U}{A} \cdot z} \right] \xrightarrow[\text{Integration über } z]{p_{w,J} = \mu \cdot p_{h,J}} P_{w,J} = \frac{\gamma \cdot A}{U} \left[z - \frac{A}{U \cdot K \cdot \mu} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot U}{A} \cdot z} \right) \right]$$

Horizontaldruck = $K \cdot$ Vertikaldruck



Erddrucktheorien



„Stützwandsilos“

Flüssigkeitsbehälter

$$p_h = \gamma \cdot z$$

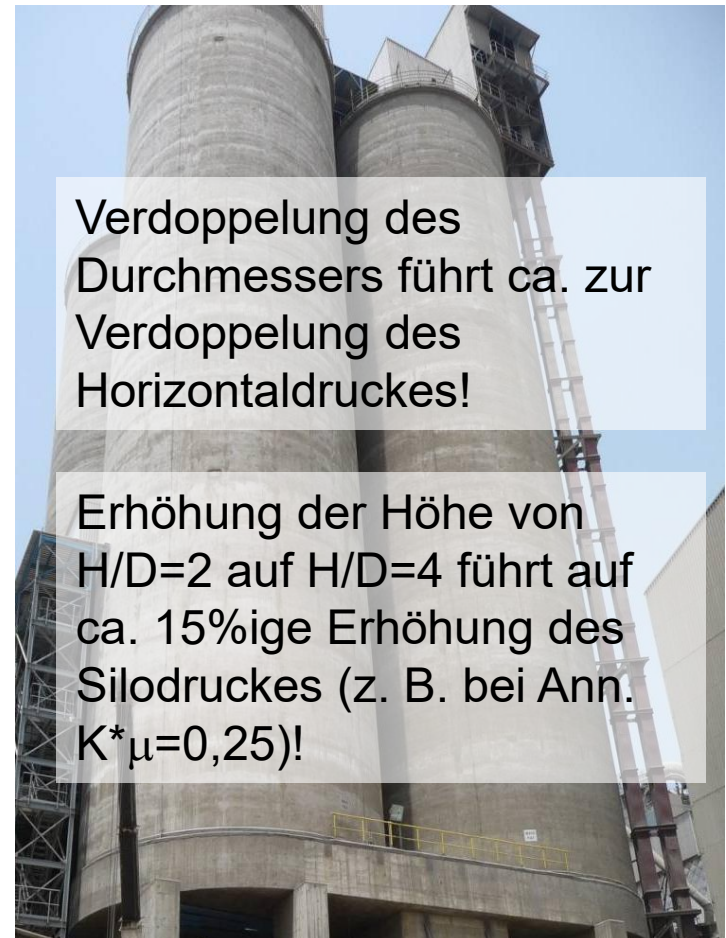


Verdoppelung der Höhe
führt zur Verdoppelung
des Druckes!

Durchmesser auf Druck
keinen Einfluss!

Schüttgutbehälter

$$p_h = \frac{\gamma \cdot D}{\mu \cdot 4} \left[1 - e^{-\frac{\mu \cdot \lambda \cdot U}{A} \cdot z} \right]$$



Streuende („echte“) Schüttgutkennwerte

Art des Schüttgutes ^{d,e}	Wichte ^b		Böschungs- winkel	Winkel der inneren Reibung			Horizontal- lastverhältnis		Wandreibungskoeffizient ^c μ $(\mu = \tan \phi_w)$				Kennwert für Teil- flächen- last C_{op}
	γ			ϕ_r	ϕ_i		K		Wand- typ D1	Wand- typ D2	Wandtyp D3	a_μ	
	γ_ℓ	γ_u			ϕ_{im}	a_ϕ	K_m	a_K					
	unterer Wert	oberer Wert		Mittel- wert	Um- rech- nungs- faktor	Mittel- wert	Umrech- nungs- faktor	Mittel- wert	Mittel- wert	Mittelwert	Um- rech- nungs- faktor		
	kN/m ³	kN/m ³	Grad	Grad									
Allgemeines Schüttgut ^a	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,3	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0	
Betonkies	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,1						
Aluminium	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,2						
Kraftfuttermischung	5,0	6,0	39	36	1,08	0,45	1,1						
Kraftfutterpellets	6,5	8,0	37	35	1,06	0,47	1,0						
Gerste ☼	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,1						
Zement	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,2						
Zementklinker ☼	15,0	18,0	47	40	1,20	0,38	1,3						
Kohle ☼	7,0	10,0	36	31	1,16	0,52	1,1						
Kohlestaub ☼	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,2						
Koks	6,5	8,0	36	31	1,16	0,52	1,1						
Flugasche	8,0	15,0	41	35	1,16	0,46	1,2						
Mehl ☼	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,1						
Eisenpellets	19,0	22,0	36	31	1,16	0,52	1,1						
Kalkhydrat	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,2						
Kalksteinmehl	11,0	13,0	36	30	1,22	0,54	1,2						
Mais ☼	7,0	8,0	35	31	1,14	0,53	1,1						
Phosphat	16,0	22,0	34	29	1,18	0,56	1,1						
Kartoffeln	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,1						
Sand	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,1						
Schlackenklinker	10,5	12,0	39	36	1,09	0,45	1,1						
Sojabohnen	7,0	8,0	29	25	1,16	0,63	1,1						
Zucker ☼	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,2						
Zuckerrübenpellets	6,5	7,0	36	31	1,16	0,52	1,1						
Weizen ☼	7,5	9,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5	

Tabellenwerte - Tabelle E.1

oberer charakteristischer Wert von $K_u = a_K K_m$

unterer charakteristischer Wert von $K_l = K_m / a_K$

oberer charakteristischer Wert von $\mu_u = a_\mu \mu_m$

unterer charakteristischer Wert von $\mu_l = \mu_m / a_\mu$

oberer charakteristischer Wert von $\phi_{iu} = a_\phi \phi_{im}$

unterer charakteristischer Wert von $\phi_{il} = \phi_{im} / a_\phi$

Drei Bemessungssituationen

1. Horizontallasten

$$p_{hf} = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot U} \left[1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot U}{A} \cdot z} \right]$$

(Red arrow points to $\mu \cdot U$)

2. aufsummierte Wandreibungslasten

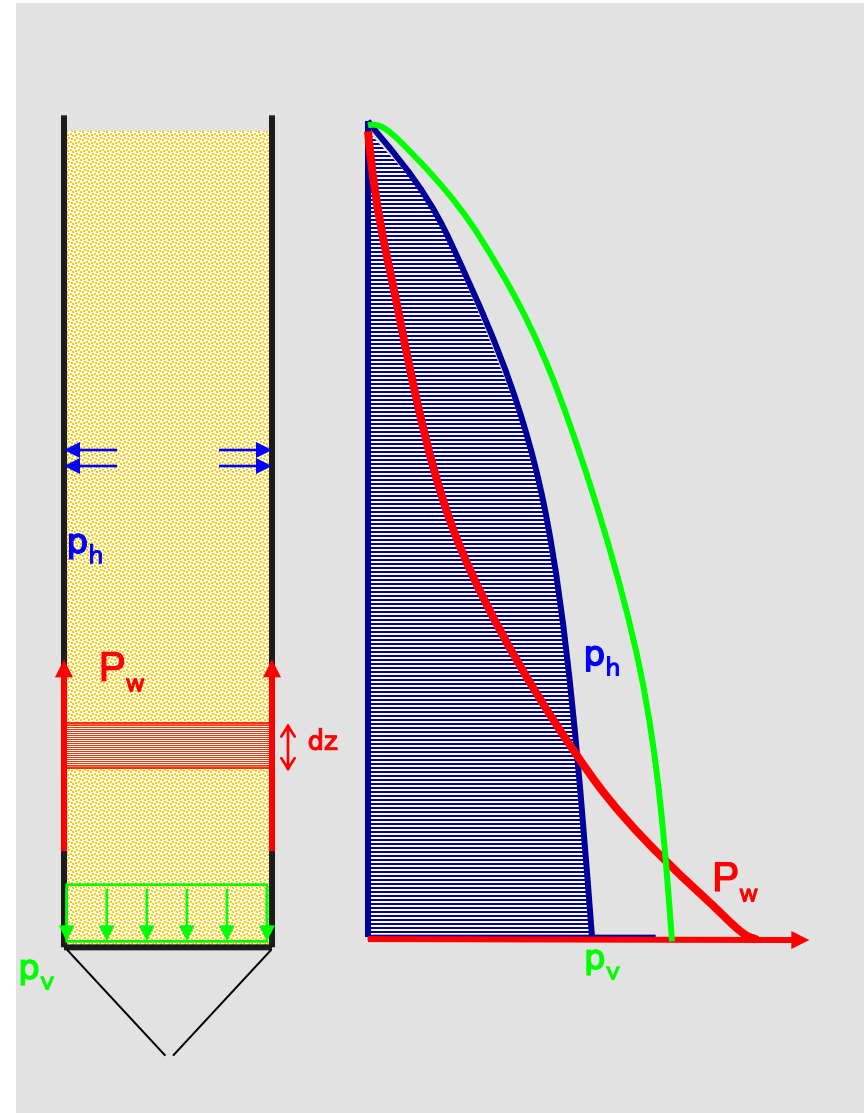
$$P_{wf} = \frac{\gamma \cdot A}{U} \left[z - \frac{A}{U \cdot K \cdot \mu} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot U}{A} \cdot z} \right) \right]$$

(Red arrows point to $U \cdot K \cdot \mu$ and μ)

3. Boden- und Trichterlasten

$$p_{vf} = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot K \cdot U} \left[1 - e^{-\frac{\mu \cdot K \cdot U}{A} \cdot z} \right]$$

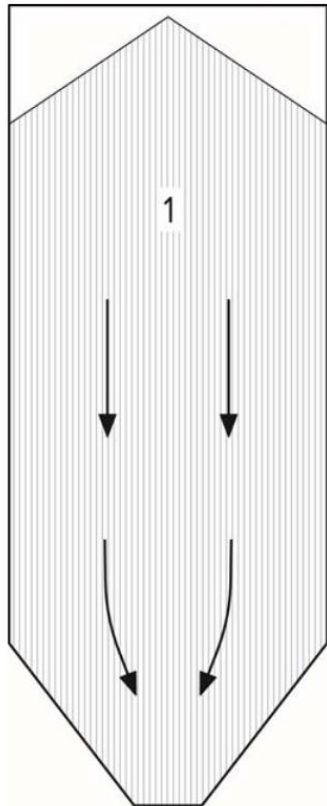
(Red arrows point to $\mu \cdot K \cdot U$ and μ)



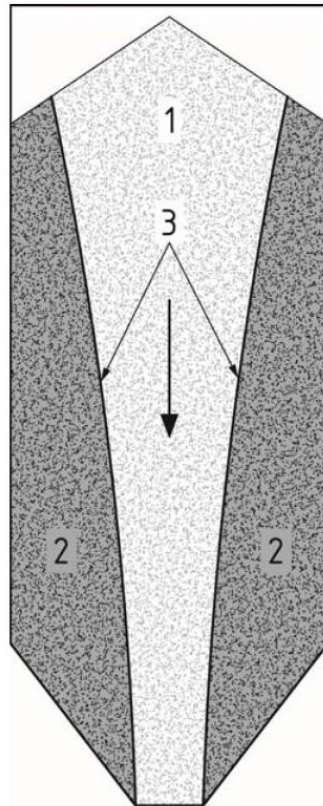
(Quasi)statische Phänomene

Entleerungszustand „freifließender Schüttgüter“

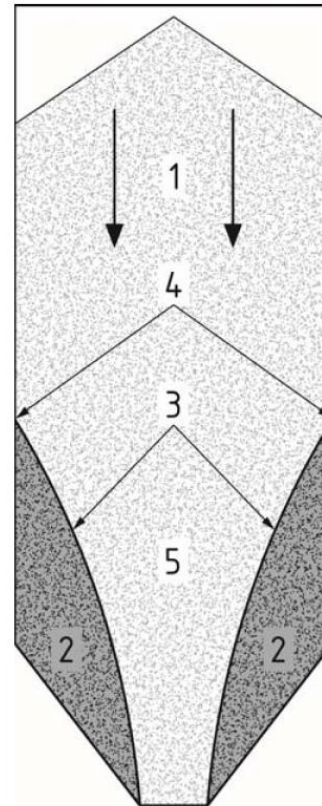
Grundlegende symmetrische Fließprofile



Massenfluss



Schlotfluss

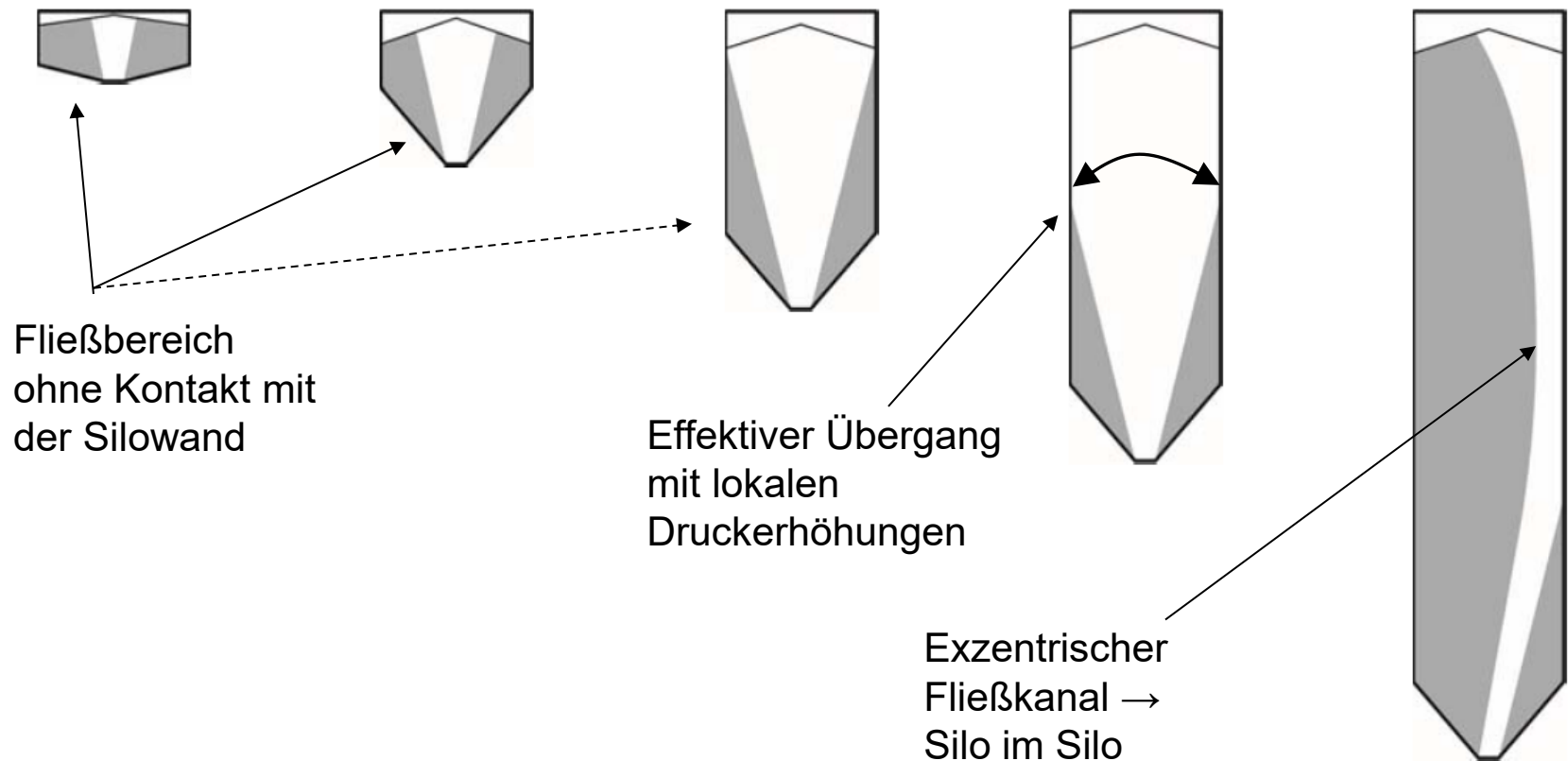


Gemischtes Fließen


Kernfluss („funnel flow“)

- (1) Schüttgut in Bewegung
- (2) Schüttgut in Ruhe
- (3) Fließkanalgrenze
- (4) Effektiver Übergang
- (5) Effektiver Trichter

Auswirkung unterschiedlicher Schlankheiten bei Schlotfluss und gemischtem Fließen



a) Stützwand-silo

b) niedriger Silo

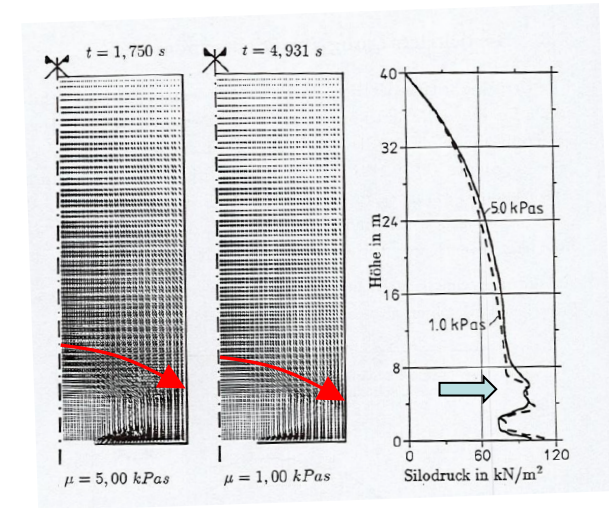
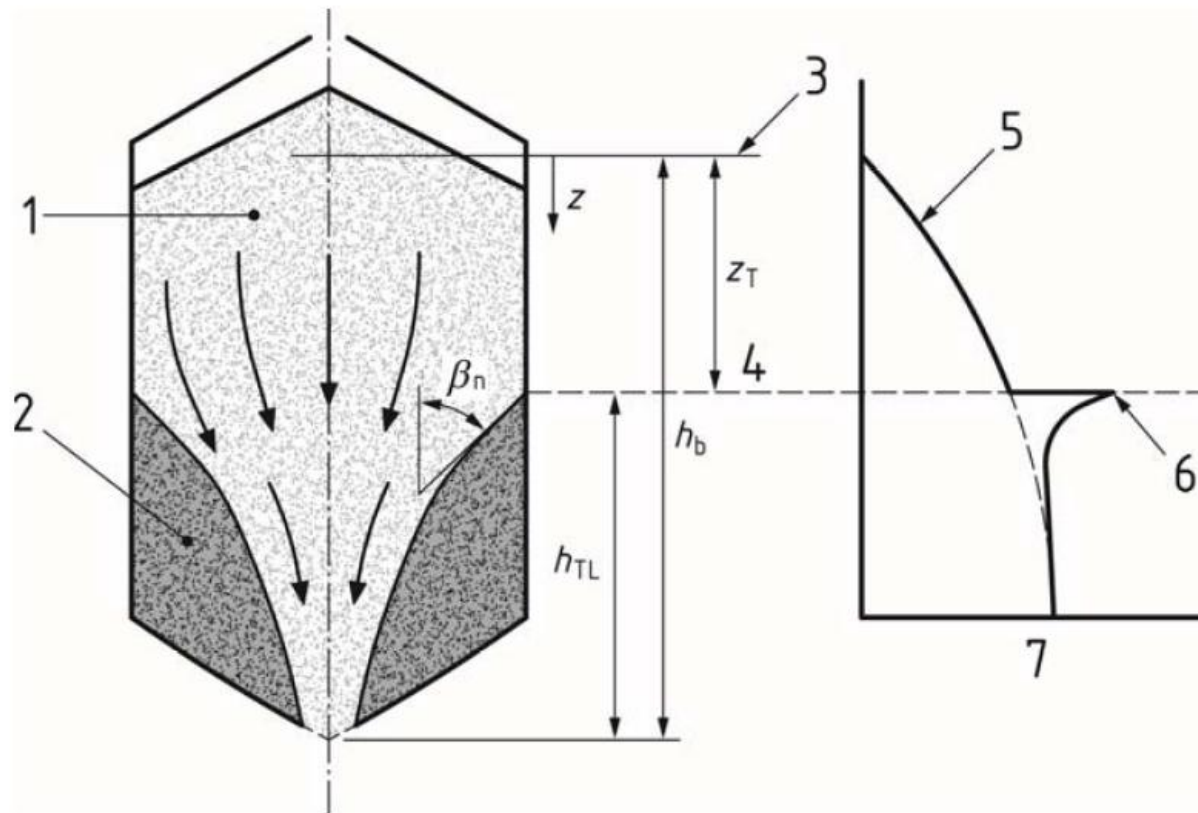
c) Silo mittlerer Schlankheit

d) schlanker Silo

e) sehr schlanker Silo

„Band Loads“

Wechselwirkung Fließen und Druckverhältnisse

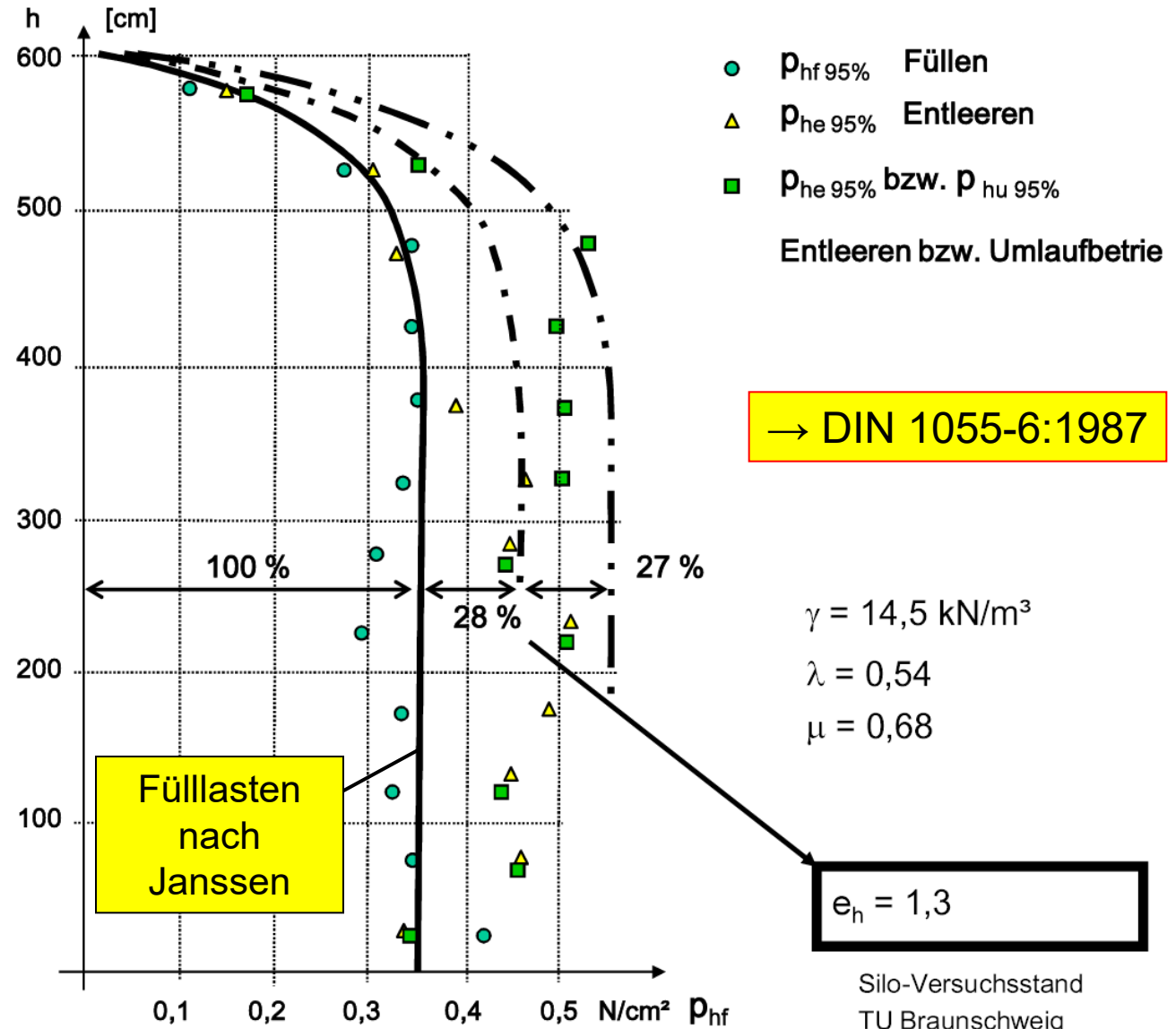
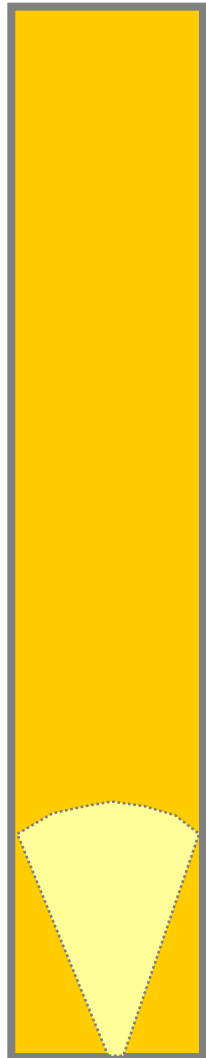


aus Ruckenbrod [1995]

- (1) Schüttgut in Bewegung
- (2) Schüttgut in Ruhe
- (3) Äquivalente Schüttgutoberfläche
- (4) Effektiver Übergang
- (5) Horizontaldrücke bei Massenfluss
- (6) Druckspitze am effektiven Übergang
- (7) Wanddrücke unterhalb des effektiven Überganges

Schüttgutlasten abhängig vom Fließverhalten

Messergebnisse von Schütz



gleichmäßige Entleerungslasten

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \quad \text{Horizontallasten}$$

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} \quad \text{Wandreibungslasten}$$

$$p_{ve} = C_b \cdot p_{vf} \quad \text{Vertikal-/Bodenlasten}$$

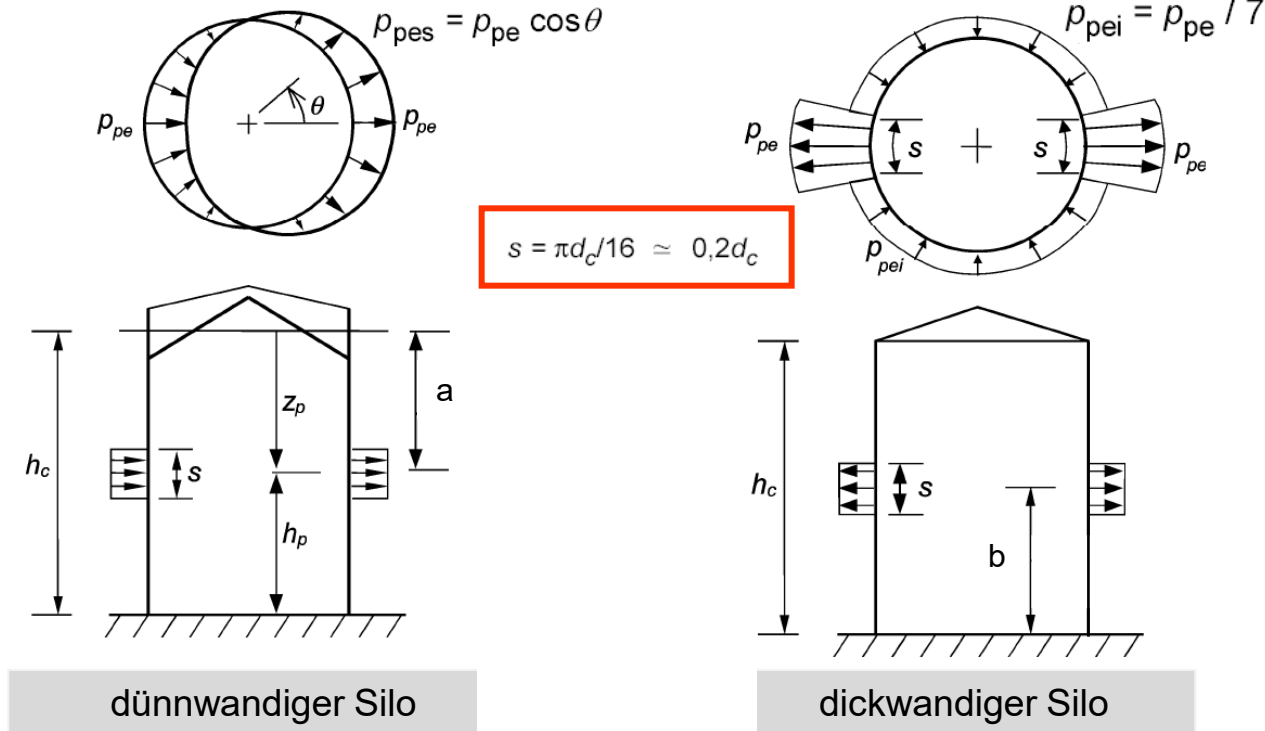
AAC 2,
AAC3

$$1,0 \leq C_h = 1 + 0,15 (h_c/d_c - 1) \leq 1,15$$

$$1,0 \leq C_w = 1 + 0,10 (h_c/d_c - 1) \leq 1,10$$

$$C_b = 1,2 \quad \text{falls dynamische Erscheinungen zu erwarten}$$

Fall: Entleeren



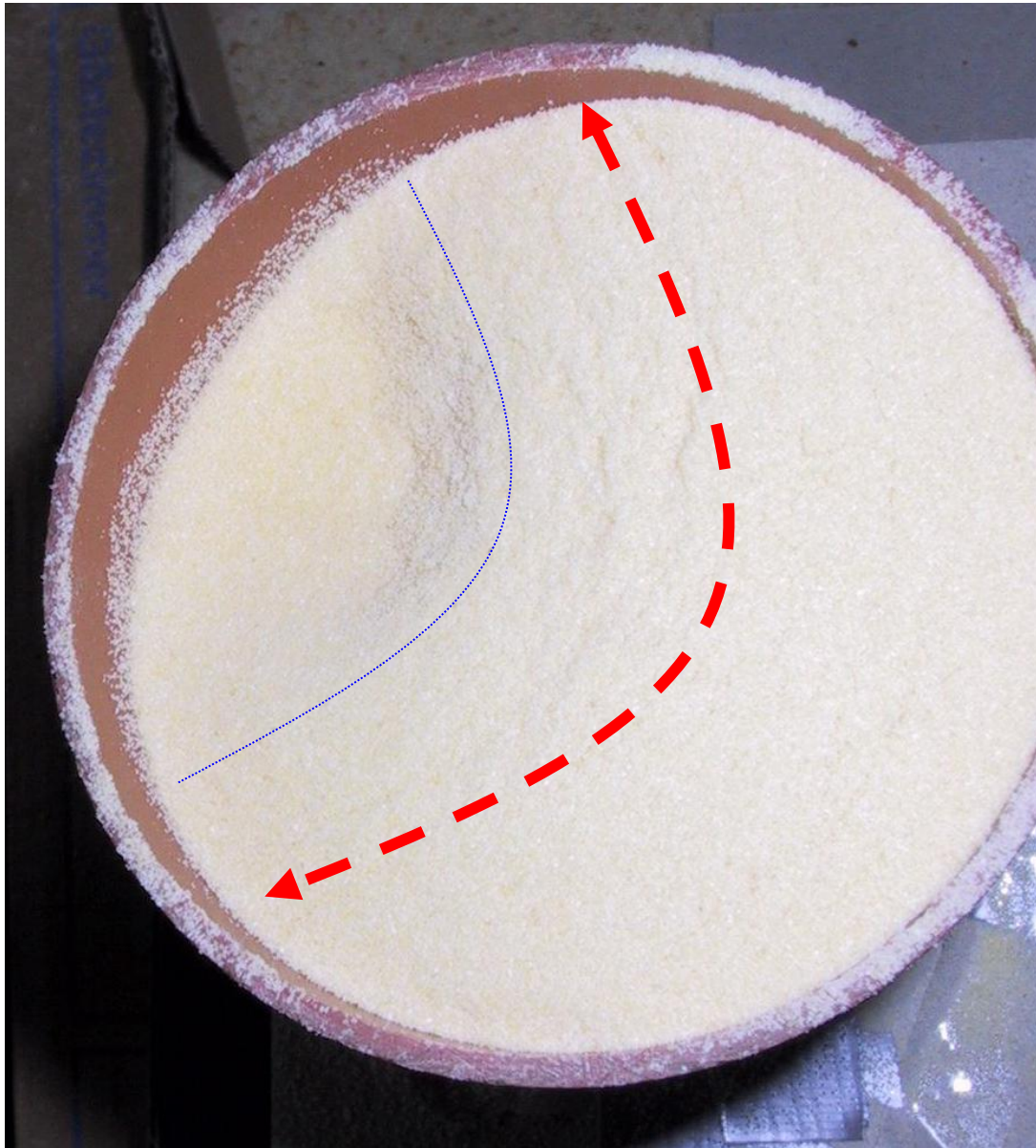
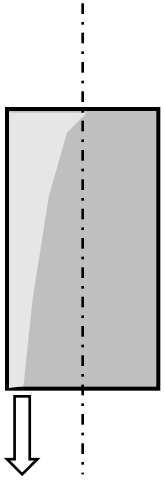
$$p_{pe} = C_{pe} p_{he}$$

$$C_{pe} = 0,42 C_{op} [1 + 2E^2] (1 - \exp\{-1,5 [(h_c/d_c) - 1]\}) \geq 0,272 C_{op} \{(h_c/d_c - 1 + E)\} \geq 0$$

$$E = 2 e / d_c$$

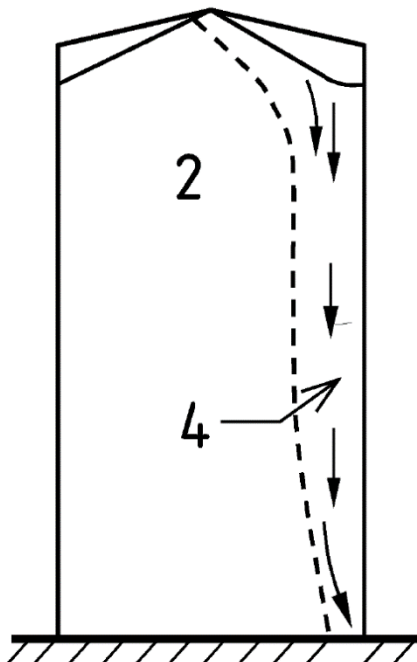
$$e = \max(e_f, e_o)$$

Versuch

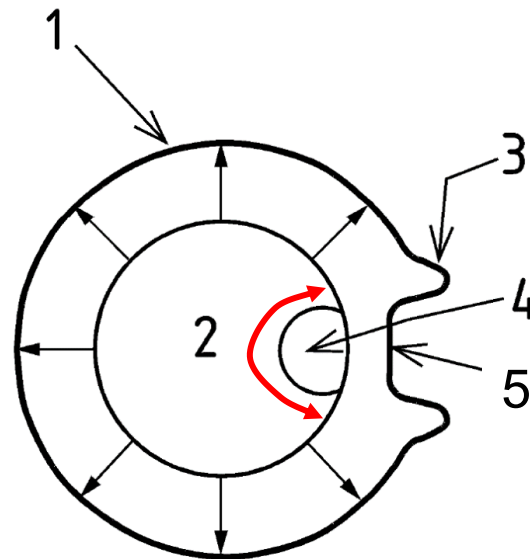


3.5 Fließkanallasten

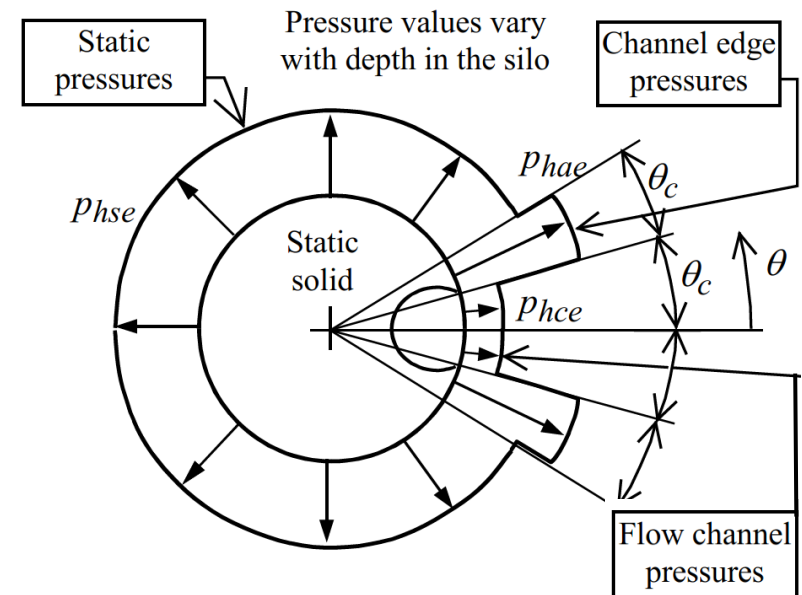
Fließkanal und Druckverteilung



Aufriss



Querschnitt



Lastmodell EN 1991-4

Legende

- 1 Statische Horizontallasten
- 2 Ruhendes Schüttgut
- 3 Örtliche Horizontallasterhöhung

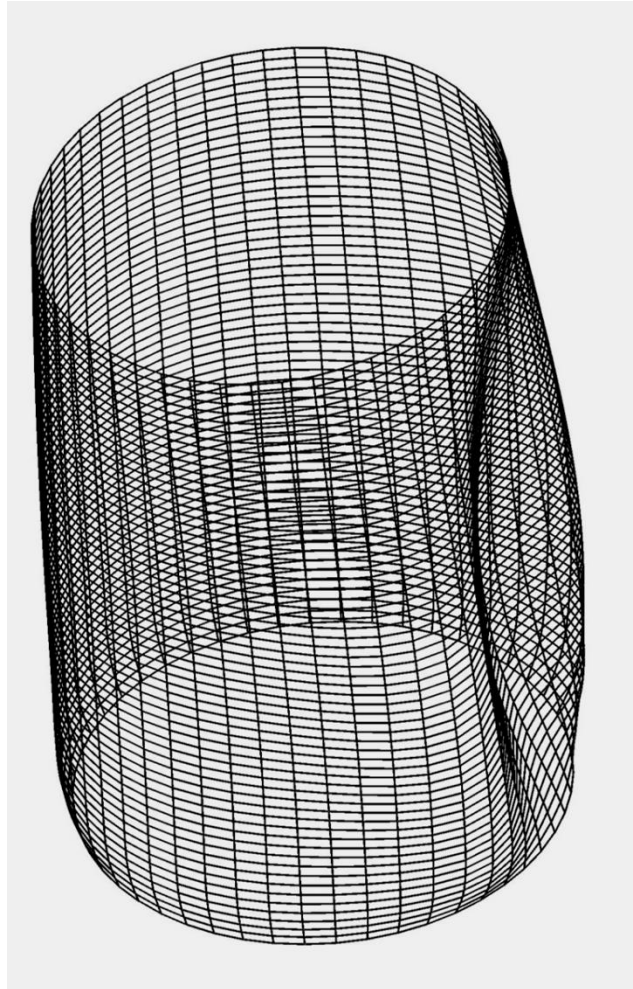
- 4 Fließkanal
- 5 Fließkanallasten

FEM – Berechnungen

Oberer Rand fest

$$h_c/d_c=1,5$$

Schüttgut Gerste



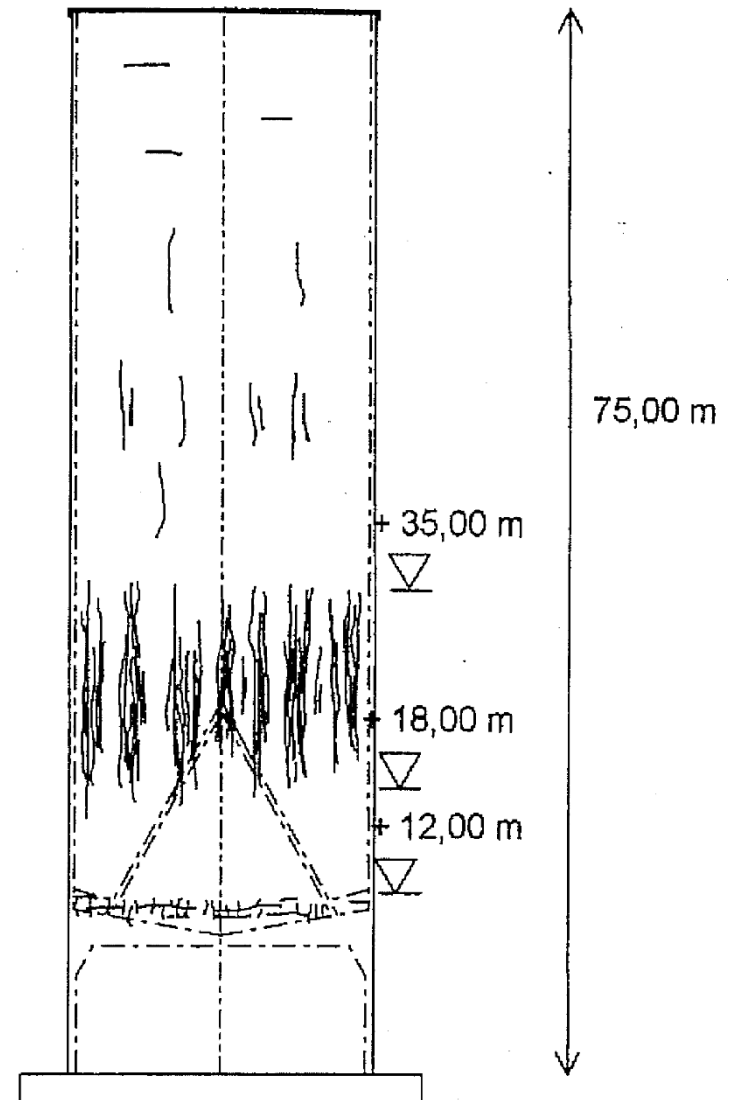
Verformungen der Siloschale

Fließkanalradius $r_c/r=0,2$

Ringzug + Biegung
+ Querkraft

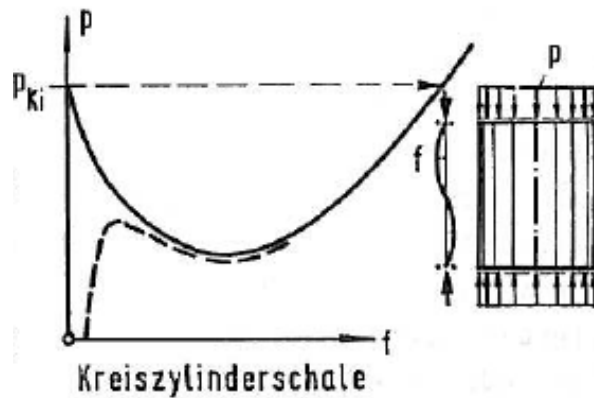


Stahlbetonsilo
ungünstige
Kombinationen



Metallsilo ungünstige Kombination

Stabilitätslastfall Schalenbeulen



Längsdruck +
ungleichförmiger Radialdruck



Dynamische Phänomene bei der Entleerung von Silozellen

Dynamische Phänomene

Beim Entleeren wird die Schüttgutmasse oder große Bereiche davon in Bewegung gesetzt.

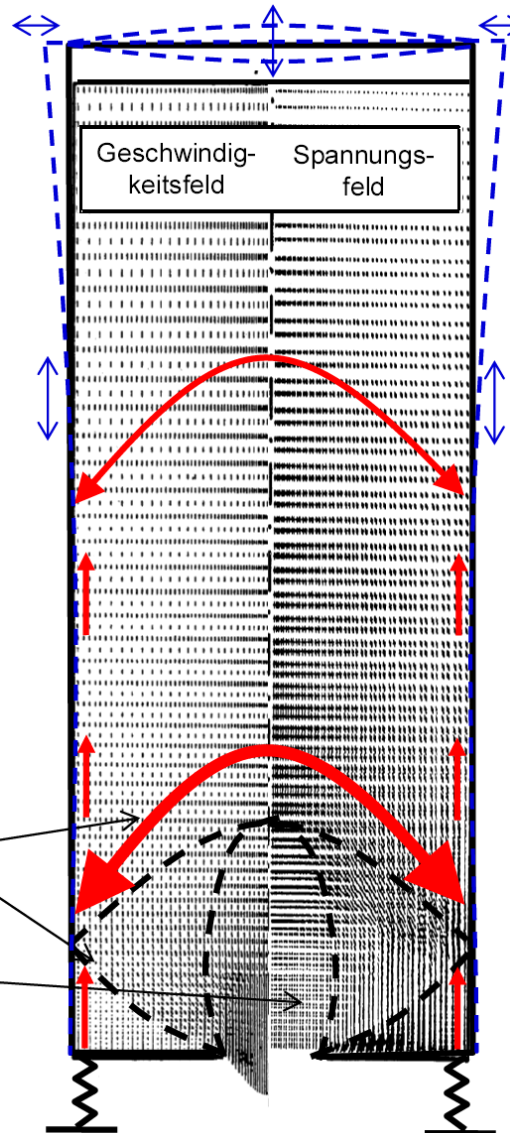
Große Schüttgutmasse sucht Gleichgewicht über Bodendruck und Wandreibung.

Bei schlanken Silos wird ein großer Anteil des Schüttgutgewichtes über Reibung abgetragen.

Beim Entlanggleiten an der Wand ergeben sich ständig ändernde Wandreibungs- und somit Lagerungsbedingungen für die Schüttgutmasse, u.U. nichtlineare Wandreibungsbeziehungen

Eventuell zeitlich veränderliche Fließzonen mit abwechselnd stabilen und instabilen Scherzonen, Schüttgutbrücken oder Gewölbe

Auflockerungszonen im unteren öffnungsnahen Bereich



Deckenschwingungen durch Peitscheneffekt und/oder zeitlich veränderliche Unterdrücke

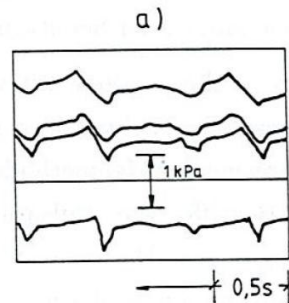
Anregung zu Schwingungen in horizontalen und/oder vertikalen Eigenfrequenzen

„Slip-Stick-Effekte“
Reibschwinger

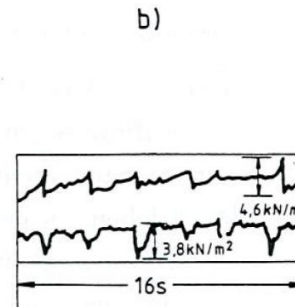
Unregelmäßiges Fließen, Bewegung der Schüttgutmassen führt zu Impulsen, zeitlich veränderlichen Belastungssituationen

Silostruktur als Feder-Masse-Dämpfer-System

- **Schlagen**, stoßartige Belastungen in - a) wohldefinierten wiederkehrenden oder b) unregelmäßigen Zeitabständen - mit z.T. großen Amplituden

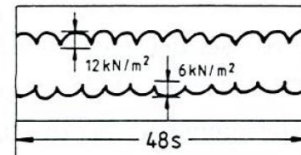


Wolf [1984]

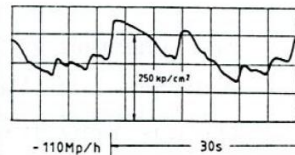


Pieper u.a. [1970]

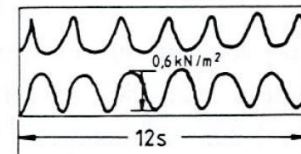
- **Pulsieren**, Oszillieren der Drücke in niederfrequenten, mit - a) nahezu harmonischen Zeitreihen oder b) nichtharmonischen Zeitreihen - geringerer Amplitude (i.d.R. $\leq 0,30 p_f$)



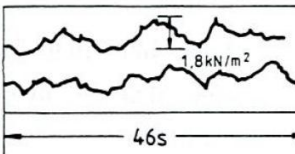
Kaminski/Zubrycki [1980]



Franz [1967]

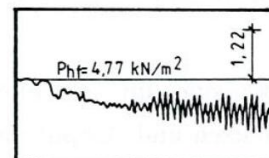


Takahasaki [1963]

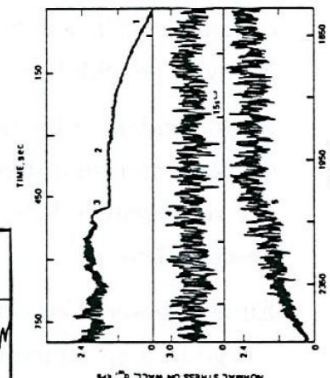


Wagner [1971]

- **hochfrequentes Vibrieren** in nahezu regelmäßigen Zeitreihen



Schneider [1987]



Richards [1977]

Aus: C. Ruckebrod: Statische und dynamische Phänomene bei der Entleerung von Silozellen. TH Karlsruhe 1995

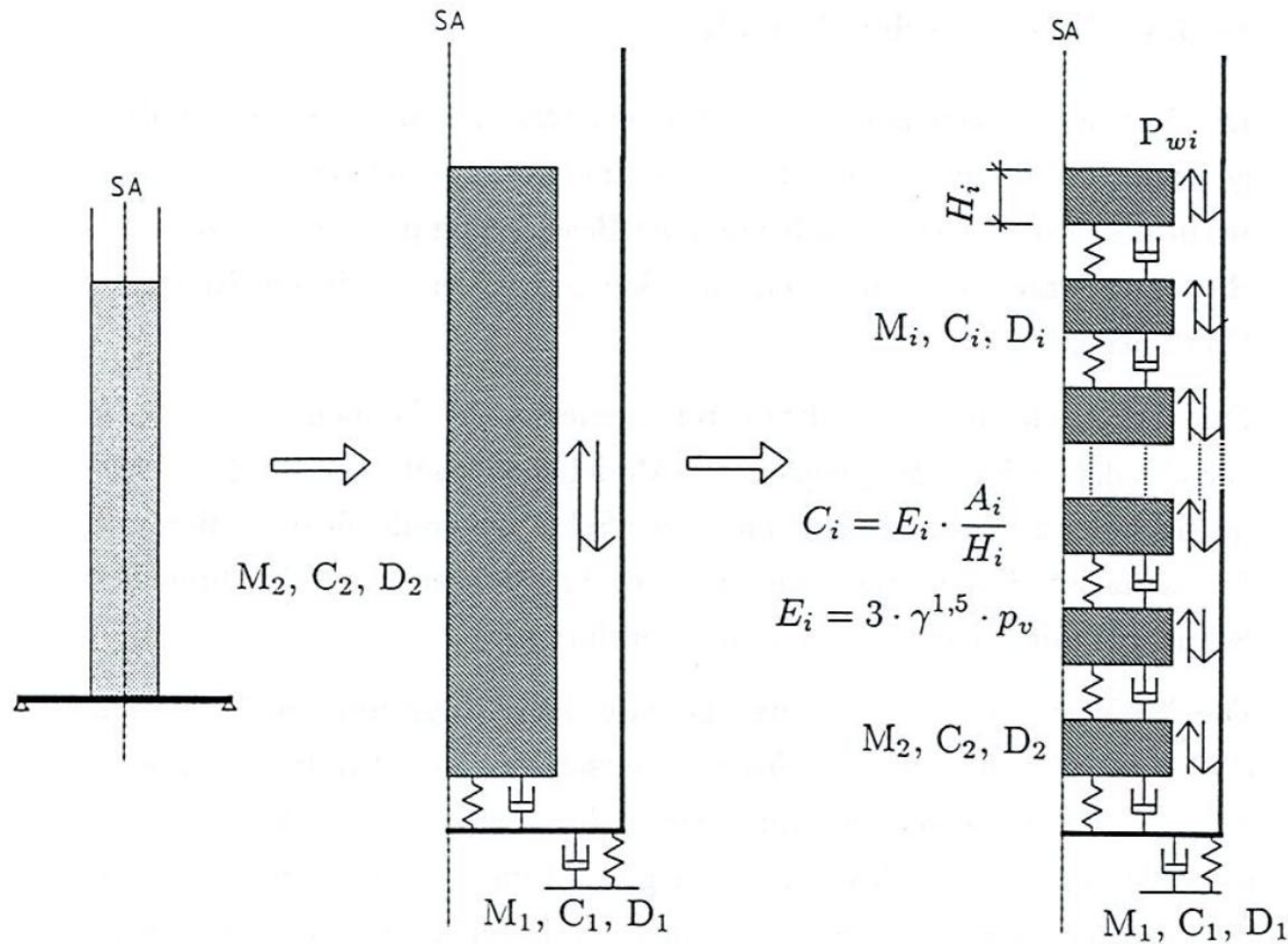


Bild 11.29 Mechanisches Modell zur Erklärung der hochfrequenten Siloschwingungen

Silos with inverted cone

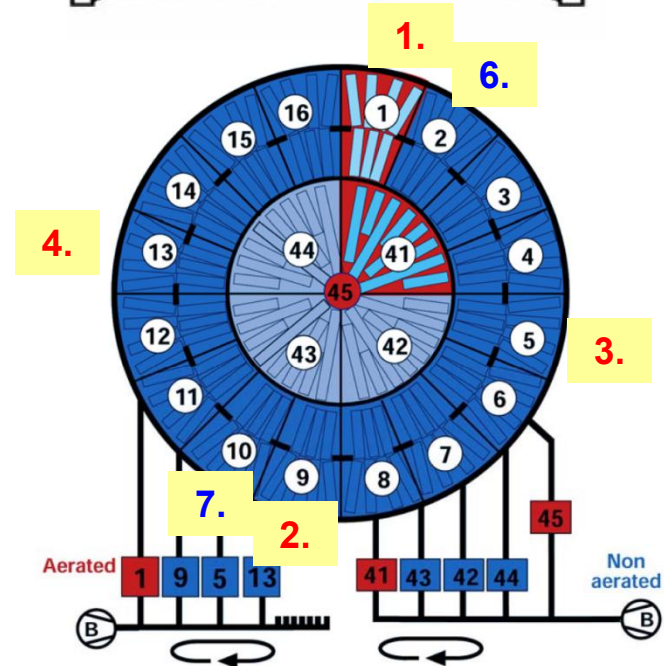
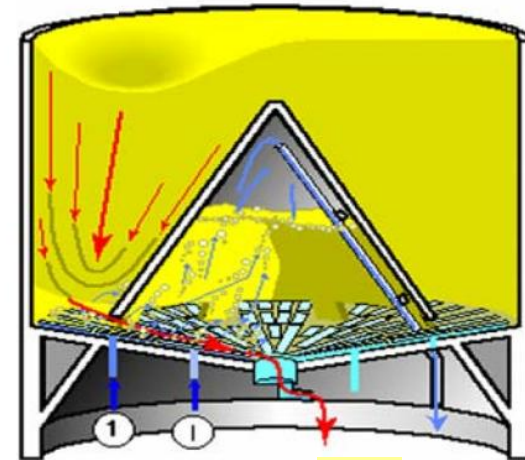
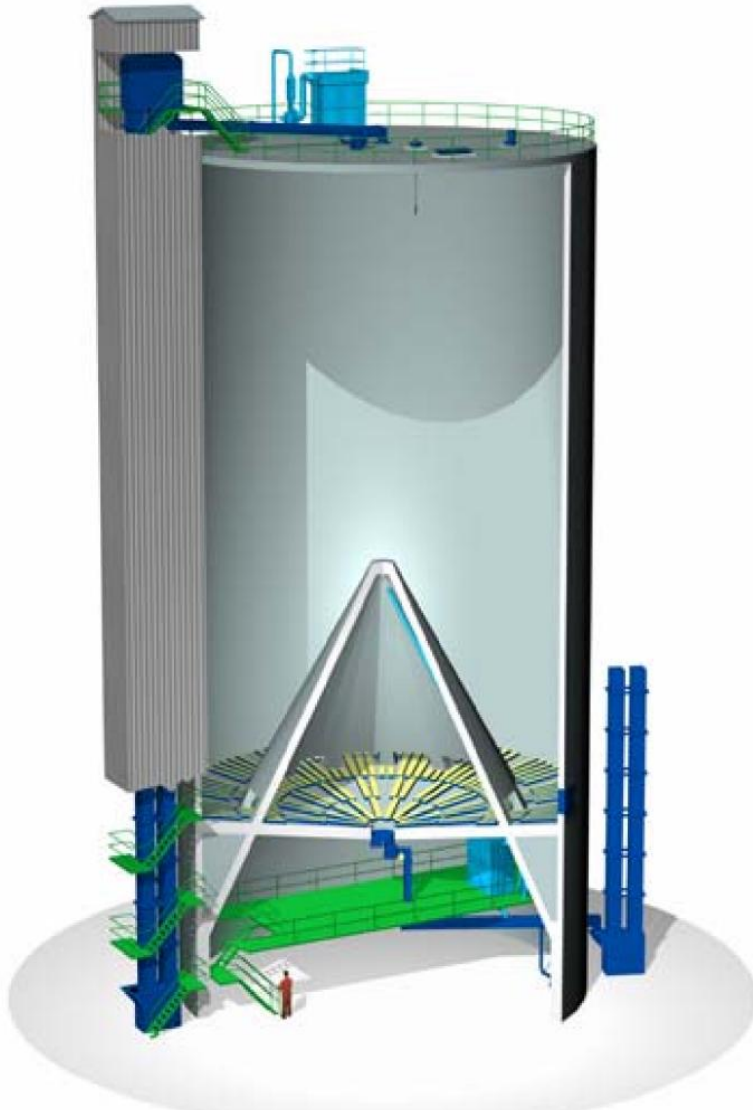
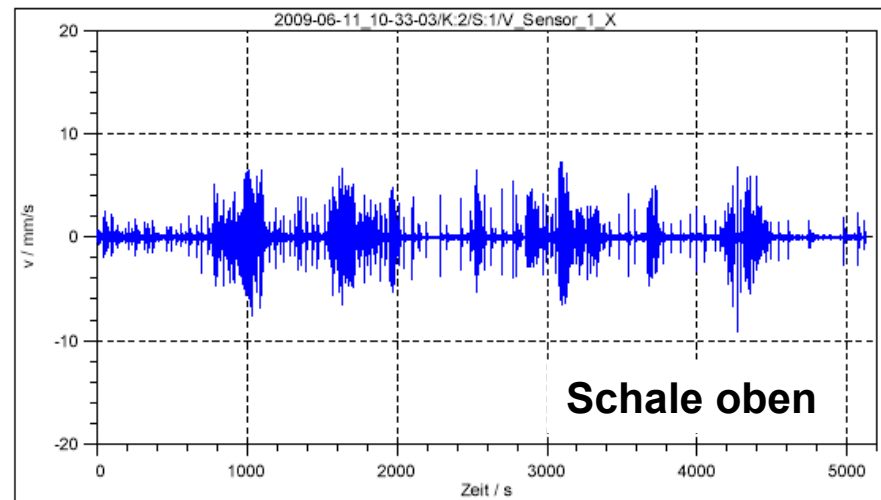
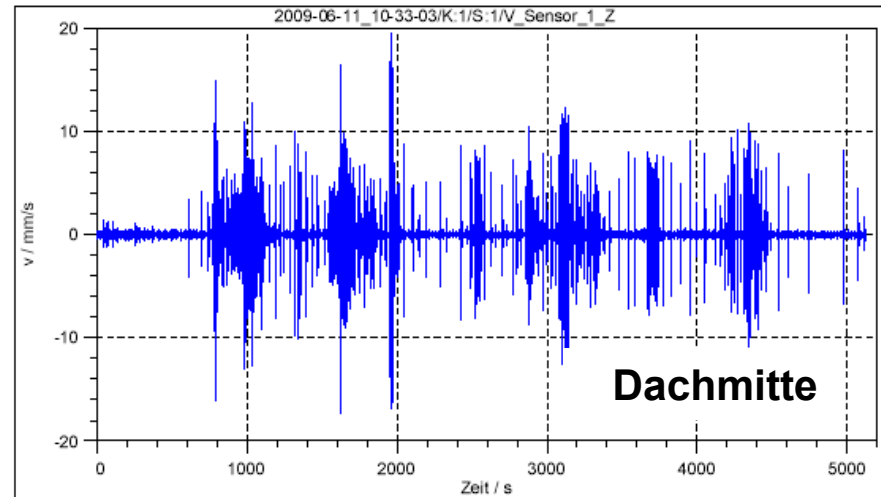


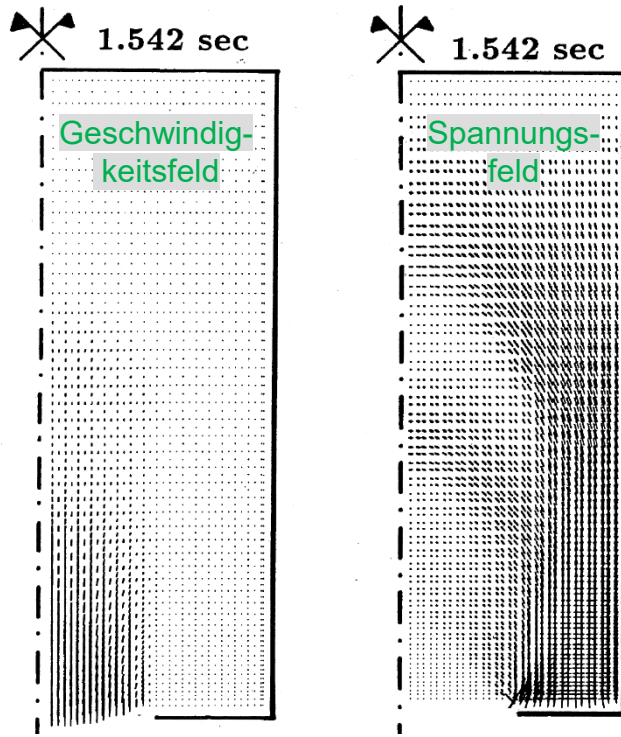
Figure 02: Floor sector aeration plan

Schwingungsmessungen auf Silodach eines Zementsilos

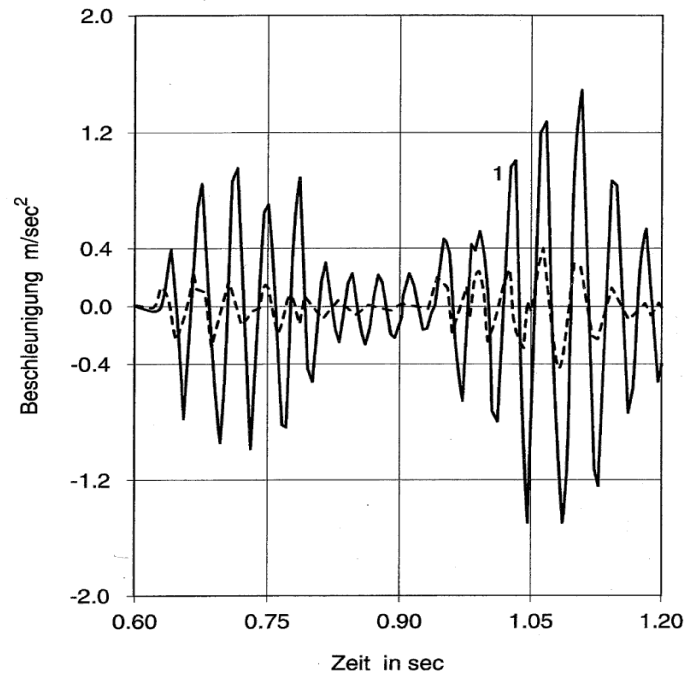


Vertikalgeschwindigkeit [mm/s]

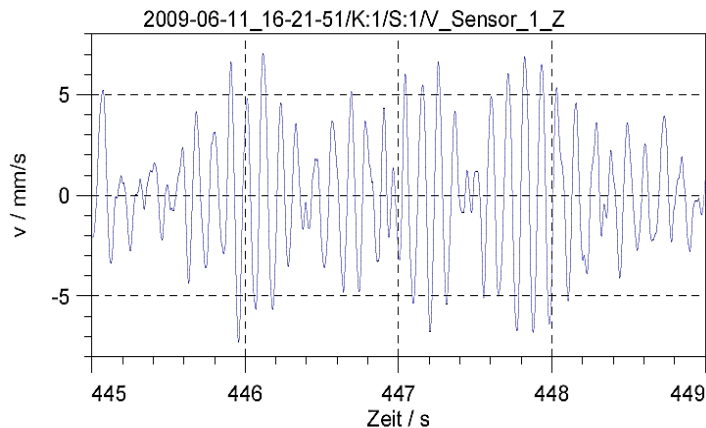




FE-Berechnung



Messung am Bauwerk

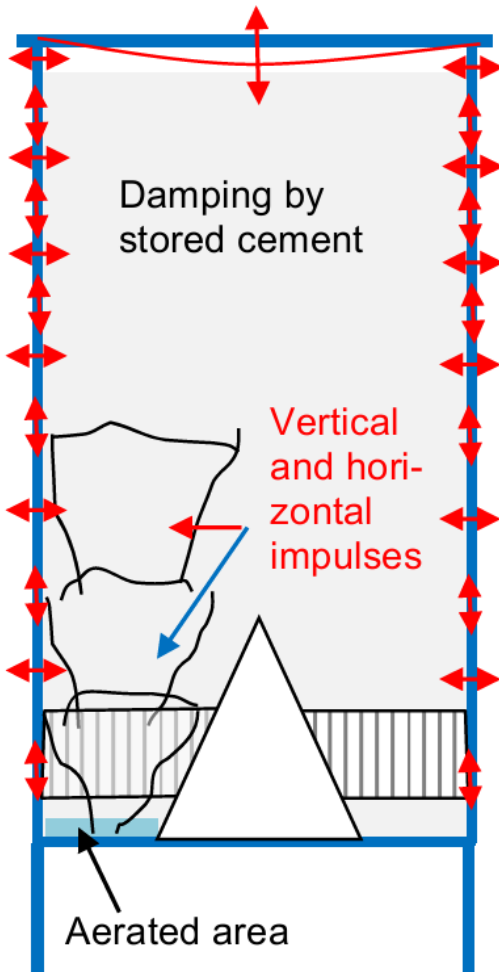




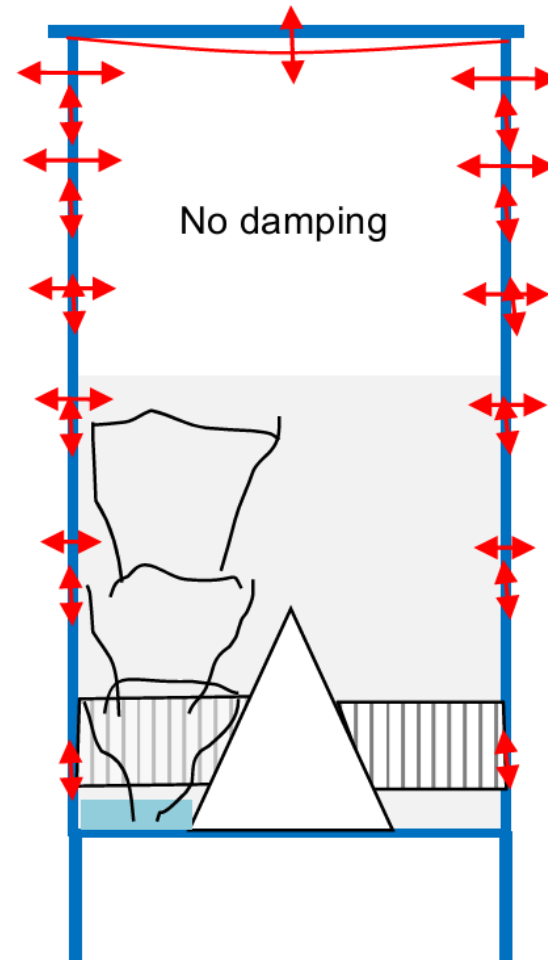
Medley, Florida im Sommer 2012

<http://www.dailymail.co.uk/news/article-2194990/Hurricane-Isaac-Man-entombed-200-foot-silo-dry-cement-fills-rainwater-tropical-storm.html>

high filling level



low filling level





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!