

INLEIDING IN DE PROCESKUNDE

DEEL III: "UNIT-OPERATIONS"

door: H. Rozema

Uitgave: Agrarische Hogeschool Friesland
Studierichting: Levensmiddelentechnologie
Bolsward

VOORWOORD

De tweede druk van het diktaat "Inleiding in de proceskunde" deel III, is gesplitst in twee delen. Dit is gebeurd om praktische overwegingen als handteerbaarheid van het diktaat, werkindeling van de schrijver en het indelen van de leerstof in duidelijke hoofdgebieden.

In het eerste deel komen het transport van vaste stoffen, de opslag van vaste stoffen, de mechanische scheidingsmethoden en andere vaste stof bewerkingen aan de orde. Het tweede deel zal gewijd zijn aan fysische scheidingsmethoden. Het streven is het tweede deel over ca. een jaar te laten verschijnen.

Net als in de eerste uitgave is de nadruk gelegd op methoden tot het vaststellen van apparatuur die gewenst is voor een bepaald proces en het berekenen van de grootte van deze apparatuur. Dit laatste vereist dat de leerstof met betrekking tot de fysische transportverschijnselen, deel I en II, "Inleiding in de proceskunde", voldoende wordt beheerst.

In de tweede druk zijn een aantal onderwerpen opgenomen die niet in de eerste druk te vinden zijn zoals het vormen van materialen, omgekeerde osmose-ultrafiltratie en scheidingen vast-vast. Daarnaast zijn onderwerpen als pneumatisch transport en opslag in silo's uitgebreid.

Er is niet gestreefd naar een volledig overzicht van de in de levensmiddelenindustrie voorkomende processen en uitvoeringsvormen. Bij de keuze van de te behandelen stof is vooral gelet op de belangrijkheid van de onderwerpen voor de toekomstige levensmiddelentechnoloog.

Bij het tot stand komen van het diktaat is gebruik gemaakt van verschillende dictaten, handboeken, literatuur en informatie verkregen uit het bedrijfsleven.

Bolsward, maart 1984.

H. Rozema.

Dit diktaat is uitsluitend bestemd voor gebruik door studenten van de levensmiddelentechnologische school te Bolsward.

INHOUDSOPGAVE

1. TRANSPORTSYSTEMEN VOOR VASTE STOFFEN.	1
1.1. Inleiding.	1
1.2. Mechanisch transport.	1
1.3. Pneumatisch transport.	18
1.3.1. Inleiding.	18
1.3.2. Theoretische grondbeginselen van het pneumatisch transport.	20
1.3.3. Berekening van het vermogen.	24
1.3.4. Systeemcomponenten bij pneumatisch transport.	36
1.3.5. Voedingseenheden.	40
1.3.6. Transportsluizen.	43
1.3.7. Materiaalafvoerinrichtingen.	46
1.3.8. Reiniging van het granulaat.	46
1.3.9. Enkele voorbeelden van pneumatische transportsystemen.	49
1.3.10. Samenvatting van de pneumatische transportsystemen.	50
1.3.11. Algemene richtlijnen voor ontwerp.	51
1.3.12. Pneumatisch transport door middel van airslides.	51
1.4. Hydraulisch transport.	52
1.5. Energieverbruik.	52
2. OPSLAG VAN VASTE STOFFEN (SILO'S).	58
2.1. Componenten en armaturen.	73
3. VERKLEINEN VAN MATERIELEN.	81
3.1. Inleiding.	81
3.2. Maalapparatuur.	83
3.3. Maalenergie.	94
3.4. De technische uitvoering van het malen.	96
3.5. Deeltjesgrootteverdeling.	100
4. HET VORMEN VAN MATERIELEN (GRANULEREN, AGGLOMEREREN).	107
4.1. Inleiding.	107
4.2. Bindingsmechanismen bij het agglomereren.	109
4.3. Agglomeratieprocessen.	110
4.3.1. Opbouwgranulatie.	111
4.3.2. Agglomeratie door middel van persen.	118
5. MENGEN EN ROEREN.	120
5.1. Inleiding.	120
5.2. Mengen vast-vast.	122
5.2.1. Theorie.	122
5.2.2. Apparatuur.	130
5.3. Mengen vast/vloeistof.	141
5.4. Het mengen van visceuse produkten (kneden).	142
5.5. Statische mengers.	145
5.6. Het mengen van visceuse vloeistoffen.	149
5.7. Apparaten die gebruikt worden ter verkrijging van dispersies.	150
5.8. Mengen vast/gas.	151

5.9. Mengen vloeistof/vloeistof al of niet met weinig vaste stof.	151
5.9.1. Het vermogensverbruik van roerders.	168
5.9.2. De keuze van de roerder.	176
5.9.3. Mengen vloeistof/gas.	179
5.9.4. Het fijn verdelen van een gas in een vloeistof, dispergeren.	179
6. MECHANISCHE FASESCHEIDINGSPROCESSEN.	183
6.1. Scheiding vast/vloeistof.	188
6.1.1. Uitvoering vast/vloeistof scheiding.	189
6.1.2. Uitlekken.	189
6.1.3. Sedimentatie.	190
6.1.4. Sedimentatie onder invloed van een centrifugaalkracht.	204
6.1.5. Stof- en hydrocyclonen.	228
6.1.6. Filtreren.	235
6.1.7. Omgekeerde osmose-ultrafiltratie.	279
6.2. De scheiding vast-vast.	292
6.3. Het filtreren van mengsels vaste stof-gas.	298
LITERATUUR.	300

1. Transportsystemen voor vaste stoffen.

1.1. Inleiding.

Het transport van vaste stoffen kunnen we onderscheiden in mechanisch, hydraulisch en pneumatisch transport. Deze transportsystemen spelen vooral in continu werkende bedrijven en in fabrieken, waarin een groot aantal verschillende produkten worden vervaardigd, een belangrijke rol.

Bij het bespreken van de transportsystemen zullen we ons beperken tot de continu werkende transporteurs voor los gestorte vaste materialen. De niet continu werkende of niet vast opgestelde transporteurs zullen buiten beschouwing worden gelaten, zoals transportwagens, hijswerktuigen, kranen vorktrucks enz.

In het algemeen kan worden gesteld dat aan de transportmiddelen, die een rol vervullen in een stroomschema van het bedrijf, vaak nauwkeurig regelbaar moeten zijn. Maalapparaten, drogers enz. werken immers met een bepaalde capaciteit.

Naast de transportsystemen zal ook aandacht worden besteed aan systeemcomponenten en de opslag van vaste stoffen in silo's.

1.2. Mechanisch transport.

De voor de levensmiddelentechnoloog van belang zijnde transporteurs kunnen als volgt worden ingedeeld:

- 1.2.1. transporteurs waarbij alleen gebruik gemaakt wordt van de zwaartekracht;
- 1.2.2. transportbanden; bij deze transporteurs heeft de band twee functies, hij draagt en transporteert de produkten. Deze twee functies stellen aan de band verschillende eisen;
- 1.2.3. kettingtransporteurs. Hierbij vindt het transport plaats met behulp van een ketting, terwijl afzonderlijke organen aanwezig zijn voor het dragen van de materialen.
- 1.2.4. kabeltransporteurs; hierbij is de ketting vervangen door een kabel;
- 1.2.5. schroeftransporteurs;
- 1.2.6. transporteurs met een trillende beweging.

Van deze typen zullen, in het kort, enkele worden besproken.

Ad. 1.2.1.

Indien mogelijk zal men bij het transport gebruik maken van de zwaartekracht. Om deze reden ziet men vaak dat de verwerking op de hoogste verdieping van het gebouw begint, terwijl het eindprodukt op de begane grond wordt verkregen. Transport door eigen gewicht is alleen mogelijk wanneer het materiaal goed stroomt, dus bij korrelige, vrij droge en niet plakkerige produkten. Het transport kan plaatsvinden in gesloten kanalen of in open glijgoten. Een nauwkeurige regeling is met dit transportsysteem niet mogelijk. Dit type transport treft men o.a. aan in maalderijen.

Ad. 1.2.2.

De bandtransporteur is de meest toegepaste transporteur. De toepassingsmogelijkheden zijn groot. Ze zijn geschikt voor allerlei materialen als poeders, korrels, grove stukken en zelfs plakkend produkt. De capaciteit kan groot zijn en sterk variabel. Transportbanden kunnen worden vervaardigd in allerlei breedten en tot zeer lange lengten. In fig. 1.2.1 is een voorbeeld van een bandtransporteur weergegeven.

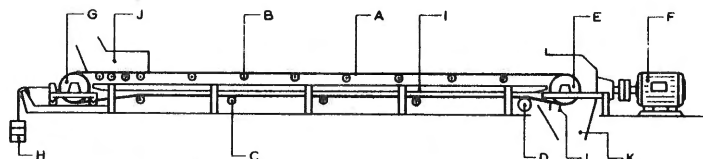


Fig. 1.2.1. Bandtransporteur.

De bandtransporteur bestaat in principe uit de volgende delen:

- | | |
|---|-------------------------|
| A. transportband; | G. spantrommel; |
| B. trogvormige (soms vlakke) bovenrolstellen; | H. spaninrichting; |
| C. onderrolstellen; | I. ondersteuningsframe; |
| D. drukrol; | J. opstorttrechter; |
| E. aandrijftrommel; | K. afstorttrechter; |
| F. bijbehorend aandrijfmechanisme; | L. bandreiniger. |

De banden zonder eind zijn vaak vervaardigd van (synthetische) rubber, versterkt met canvas, kunstvezels, metaal of kunststoffen. Het heengaande gedeelte van de band rust soms op vlakke rollen, of op rollen die een soort trog vormen. De meest voorkomende trogvormige rolstellen vinden we in fig. 1.2.2 en fig. 1.2.3.

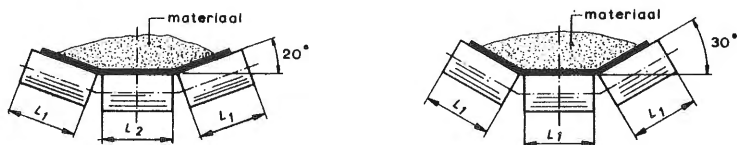


Fig. 1.2.2. Trogvormige rolstellen met zijrollen onder resp. 20° en 30° troghoek.



Fig. 1.2.3.

a b
Trogvormig multirolstel. Rolstel voor een vlakke band.

De banden zijn meestal voorzien van bandreinigers zoals is weergegeven in fig. 1.2.4.

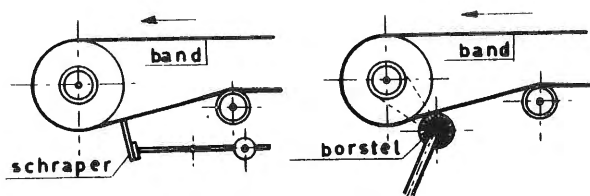
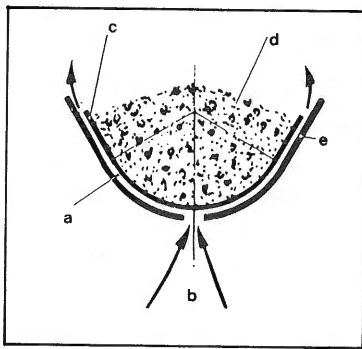


Fig. 1.2.4. Bandreinigers.

Het is ook mogelijk de band door een metalen trog te laten lopen door tussen de band en de metalen wand lucht te blazen, fig. 1.2.5. Hierdoor verkrijgt men een draagkussen van lucht, waardoor o.a. de wrijving tot een minimum wordt beperkt. Door het ontbreken van trogstellen zijn de onderhoudskosten laag.



- a. luchtfilm,
- b. luchttoevoer,
- c. band,
- d. materiaal,
- e. wand van de goot.

Fig. 1.2.5. Luchtbandtransporteur.

De vast opgestelde bandtransporteurs kunnen worden onderscheiden in:

a. horizontaal transporterend;



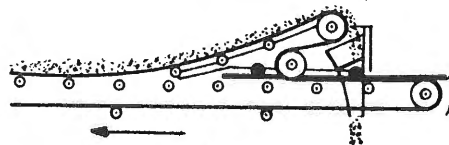
b. omhoog transporterend;



c. omlaag transporterend;



d. afstortend via een verrijdbare afwerpwagen.



Ook combinaties van a, b, c en d zijn uiteraard mogelijk.

Fig. 1.2.6.

De toevoer van het materiaal kan op elk willekeurig punt plaatsvinden. Het lossen kan gebeuren door het materiaal af te werpen over het eind van de band door gebruik te maken van schuiven of door een loswagen, fig. 1.2.6 d.

De loswagen bestaat uit een verrijdbare wagen waarin twee keerrollen zijn aangebracht. Het afgeworpen produkt wordt in een trechter naast de band geleid.

Uit hygiënische overwegingen laat men de band soms in een kast lopen.

De vervoerscapaciteit van een transportband bedraagt voor los gestort materiaal:

$$Q_v = 3600 \cdot A \cdot v \cdot k \text{ (m}^3\text{/h)} \quad \text{of} \quad (1.2.1)$$

$$Q_t = 3600 \cdot A \cdot v \cdot k \cdot \gamma \text{ (kg/h)} \quad (1.2.2)$$

Q_v = vervoerscapaciteit in $\text{m}^3\text{/h}$;

Q_t = vervoerscapaciteit in kg/h ;

A = het oppervlak van het beladingsprofiel in m^2 ;

k = de vullingscoëfficiënt voor hellende banden ($k \leq 1$);

γ = de stortmassa van het materiaal in kg/m^3 .

De coëfficiënt k voor hellende banden ($k \leq 1$) hangt sterk af van de hellingshoek δ ten opzichte van de horizontaal. Voert men het stortgoed met een goed gevormde storttrechter aan de band toe, op een horizontaal of weinig hellend beginstuk, dan kunnen k -waarden aangehouden worden als vermeld in tabel 1.2.1.

Tabel 1.2.1. Aanbevolen waarden voor k .

δ	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
k	1	1	1	1	1	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93

De hellingshoek hangt mede af van de storthoek van het materiaal en is een fractie hiervan. Granen die een storthoek hebben van ca. 25° vervoert men in het algemeen niet steiler dan 10° . Wenst men steiler transport, dan kan een transportband worden voorzien van meenemers in de vorm van schotjes of een profiel, fig. 1.2.7. Transport tot ca. 40° ten opzichte van de horizontaal is dan bij sommige materialen mogelijk.

Transportbanden hebben geringe snelheden maar een grote capaciteit. De normale snelheid van een ca. 50 cm brede band is ruim 1 m/s. Voor graan, een gemakkelijk stromend materiaal, kan zelfs een snelheid van 3 m/s worden toegepast.

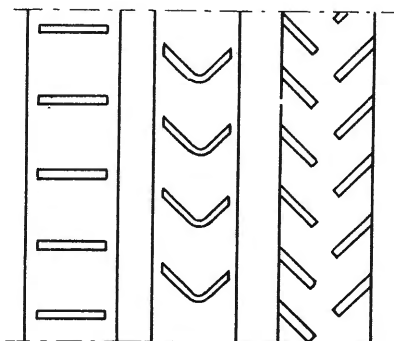
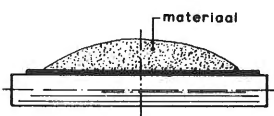


Fig. 1.2.7. Geprofileerde transportbanden.

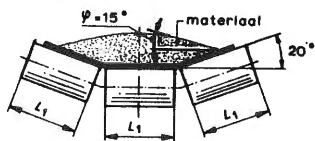
Voor een horizontaal transporterende band en stortgoed met een storthoek van 15° worden de volgende waarden voor Q_V aangehouden.
Vlakke band.



$$Q_V = 240 \, v \, (0,9 \, B - 0,05)^2 \, \text{m}^3/\text{h};$$

$$A = \frac{(0,9B - 0,05)^2}{15} \, (\text{m}^2)$$

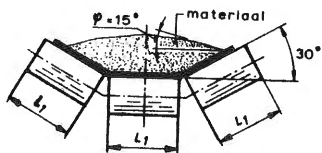
Trogvormige band met zijrollen onder 20° .



$$Q_V = 440 \, v \, (0,9 \, B - 0,05)^2 \, \text{m}^3/\text{h};$$

$$A = \frac{(0,9B - 0,05)^2}{8,2} \, (\text{m}^2)$$

Trogvormige band met zijrollen onder 30° .



$$Q_V = 530 \, v \, (0,9 \, B - 0,05)^2 \, \text{m}^3/\text{h};$$

$$A = \frac{(0,9B - 0,05)^2}{6,8} \, (\text{m}^2)$$

In deze formules is:

Q_V = de vervoerscapaciteit in m^3/h ;

v = bandsnelheid in m/s ;

A = het oppervlak van het beladingsprofiel in m^2 ;

B = bandbreedte in m .

Daar bij deze vervoerscapaciteit slechts is uitgegaan van een gemiddelde storthoek van het stortgoed, kan men bij stortgoed met een grotere cohesie méér en bij een stortgoed met een kleinere cohesie minder vervoeren.

De vervoerscapaciteit van banden welke stammen, zakken, kisten, kratten, dozen e.d. vervoeren wordt bepaald door de bandsnelheid en de onderlinge tussenruimte welke men op de band tussen de te vervoeren delen wil aanhouden. Bij dit transport worden veel vlakke banden gebruikt welke van een profilering is voorzien en die ca. 100 mm breder zijn dan de maximum breedte van de te vervoeren zakken en dozen.

Steil-transport met een band is mogelijk door deze ineengegevouwen door een buis te laten lopen. Zodra het transport weer vlak verloopt opent de band zich weer, fig. 1.2.8.

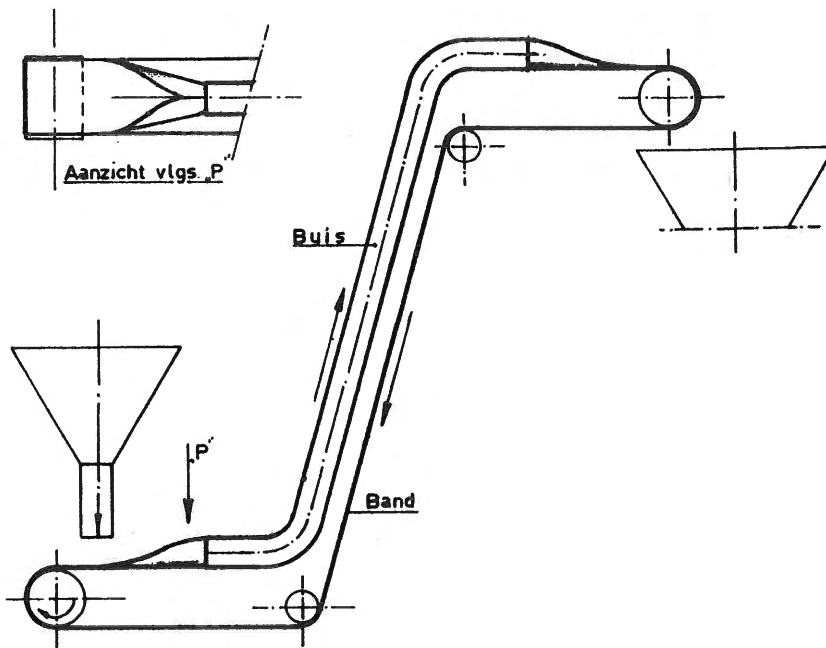
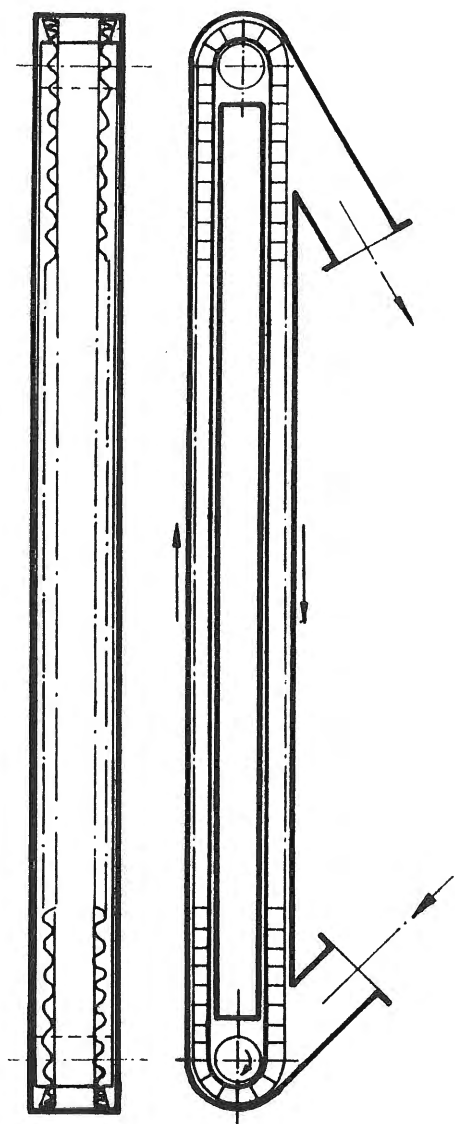


Fig. 1.2.8. Vertikaal transport met een band die ingevouwen wordt.

Een type bandtransporteur die zowel geschikt is voor horizontaal en vertikaal transport heeft een band met geplooid zijwanden, figuur 1.2.9. Voor steil-transport is de band opgenomen in een

geheel gesloten koker. Door de opstaande wanden van de band is de capaciteit groot; het rollenbed bestaat uit vlakke rollen.



In de voedingsmiddelenindustrie worden vaak banden toegepast van roestvaststaal. Door de grote stijfheid van deze banden moeten rollen van grote diameter worden toegepast, terwijl de constructie van het frame sterk moet zijn. Een staalbandtransporteur is relatief duur. Deze banden worden o.a. gebruikt in bakkerijovens.

De banden kunnen ook uitgevoerd zijn in gaas, zgn. gaasbandtransporteurs. Deze banden vindt men in drogers, vriestunnels enz.

Fig. 1.2.9. Vertikale transporteur met geplooiden zijwanden.

1.2.2.1. Het berekenen van het aandrijfvermogen van bandtransporteurs.

Het werkelijke vermogen dat nodig is voor het aandrijven van de band, N_{eff} , bestaat uit:

N_1 = het aan de aandrijftrommel(s) benodigd vermogen voor het aandrijven van de lege, onbeladen band;

N_2 = het aan de aandrijftrommel(s) benodigde vermogen voor het horizontaal transporteren van de bandbelading;

N_3 = het aan de aandrijftrommel(s) benodigde vermogen voor het vertikaal omhoog of omlaag transporteren van de bandbelading;

N_4 = het benodigde vermogen voor het op bandsnelheid brengen van het stortgoed bij de storttrechter (eerst bij capaciteiten boven de 300 ton/h en $v > 3$ m/s in rekening te brengen).

$$N_{eff} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (1.2.3)$$

Daarnaast spelen de omleidtrommels, bandreinigers enz. bij het berekenen een rol. Deze factoren worden meestal door een correctiefactor vertegenwoordigd (C of L_0).

Voor een beweging in het horizontale vlak geldt in het algemeen:

$$N = F \cdot v \text{ (Watt) en}$$

voor een vertikaal vlak

$$N = F' \cdot H \text{ (Watt)}$$

F = een horizontaal werkende kracht (N);

v = de snelheid in horizontale richting (m/s);

F' = een vertikaal te verplaatsen gewicht per tijdseenheid (N/s);

H = de verplaatsing in vertikale richting (m).

De genoemde factoren kunnen als volgt worden berekend:

1. Het benodigde vermogen voor het onbelast lopen van de band:

$$N_1 = f \cdot m_m \cdot C \cdot L \cdot v \cdot g \text{ (Watt)}$$

2. Het benodigde vermogen voor het horizontaal transporteren van het stortgoed:

$$N_2 = f \cdot Q_t \cdot C \cdot L \cdot g \text{ (Watt)}$$

3. Het benodigde vermogen voor het vertikaal transporteren van het stortgoed.

$$N_3 = Q_t \cdot H \cdot g \text{ (Watt)}.$$

4. Het benodigde vermogen voor het op bandsnelheid brengen van het stortgoed bij de storttrechter.

$$N_4 = Q_t \cdot v(v - v_0) \text{ (Watt)}$$

m_m = massa van boven- en onderpart van de band, vermeerderd met de massa van de roterende delen van de boven- en onderrolstellen; alles omgerekend in kg/m; zie figuur 1.2.10.

$$m_m = 2 m_b + m_1/a + m_2/b \text{ (kg/m)};$$

m_b = massa van de band per lengteeenheid (kg/m);

m_1 = massa van de roterende delen van één compleet bovenrolstel (kg);

a = de onderlinge afstand van de bovenrolstellen in m;

m_2 = massa van de roterende delen van één compleet onderrolstel (kg);

b = de onderlinge afstand van de onderrolstellen in m.

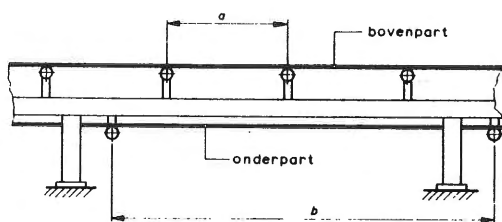


Fig. 1.2.10.

C = correctiefactor op de bandlengte waarmee de invloed van het doorzakken van de beladen resp. onbeladen band tussen de rolstellen, de invloed van de diverse omleidtrommels en de invloed van de bandschraper in rekening wordt gebracht, zie tabel 1.2.2.

Tabel 1.2.2.

L (m)	5	15	25	40	60	100	150	250	500	1000
C	6,6	3,6	2,9	2,4	2,1	1,7	1,5	1,35	1,15	1,05

L = horizontale projectie van de afstand tussen de eindtrommels in m;

Q_t = de vervoerscapaciteit in kg/s;

H = de opvoerhoogte van het stortgoed in m;

v = de bandsnelheid in m/s;

v_o = de aanvangssnelheid van het stortgoed bij het verlaten van de storttrechter in de richting van de band in m/s.

In de formules worden voor de wrijvingscoëfficiënten, f, voor rollen op kogellagers, de volgende waarden aangehouden: tabel 1.2.3.

Tabel 1.2.3.

f = 0,020 - onder zeer gunstige omstandigheden,

f = 0,024 - in normale gevallen met rollen Ø 133 mm,

f = 0,028 - indien het onderhoud moeilijk is en/of sterke vervuiling zal optreden,

f = 0,030 - bij bedrijfstemperaturen beneden - 10°C.

Voor zgn. versnellingsbanden en banden met zeer grote vervoerscapaciteiten gelden speciale berekeningen.

Ad. 1.2.3.

Bij kettingtransporteurs vindt het transport plaats door middel van een band of ketting zonder eind. Aan deze (band) ketting kunnen schrapers of bakjes worden bevestigd. De vaste stof kan zowel horizontaal als vertikaal worden verplaatst.

1.2.3.1. Elevatoren.

Elevatoren worden o.a. gebruikt voor vertikaal transport van korrel- en poedervormige produkten zoals granen, meelsoorten en suiker. Ze hebben het voordeel dat ze stofdicht kunnen worden geconstrueerd. In principe zijn de elevatoren, die vaak Jacobsladders worden genoemd, geschikt voor vrijwel alle materialen, mits de stukken niet te groot en de produkten niet al te plakkerig zijn.

Drie uitvoeringsvormen zijn weergegeven in figuur 1.2.3.1

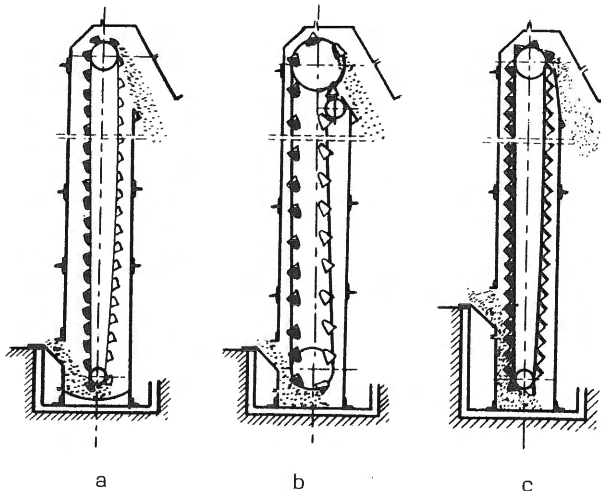


Fig. 1.2.3.1.

Fig. 1.2.3.1 a is een bandelevator met lossing door centrifugaalkracht (het materiaal wordt door een relatief hoog toerental weggegooid); bandsnelheid tussen 1,3 en 3 m/s, afhankelijk van de diameter van de eindrol. Geschikt voor granen en zaden..

Onder b is een omkeerlossende elevator weergegeven. Deze heeft een relatief lage snelheid.

Fig. 1.2.3.1 c laat een continu lossende elevator zien. De bakken vormen een aaneengesloten reeks. Bij het lossen gebruikt elke bak de bodem van de voorgaande bak als glijgoot. Zelfs bij zeer kleine snelheden, 0,5 m/s, kan de werking nog goed zijn.

1.2.3.2. Kettingelevatoren(-transporteurs).

De kettingelevatoren verschillen van de bandelevatoren hierdoor, dat de band is vervangen door twee kettingen. De uitvoeringsvormen zijn:

- a. Schrapertransporteur; het dragende orgaan staat stil terwijl de ketting loopt fig. 1.2.3.2.

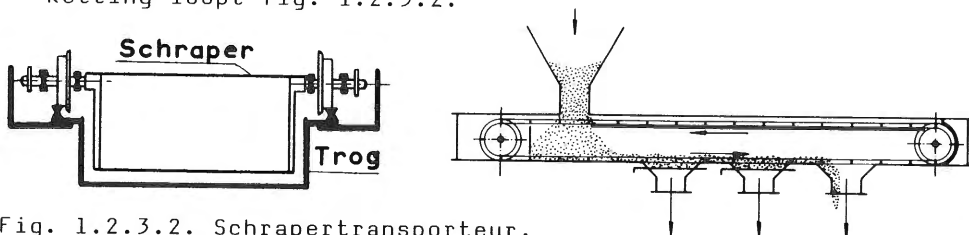


Fig. 1.2.3.2. Schrapertransporteur.

In de trog of goot wordt het materiaal voortgeschoven door schrapers of meenemers, die bevestigd zijn aan kettingen zonder eind. De snelheid bedraagt ca 0,5 m/s. Hellingen van maximaal 30 à 45° kunnen worden overwonnen. Ze worden o.a. toegepast voor het vullen van silo's, diffusiebatterijen e.d. Indien uitgevoerd met harken, zijn ze geschikt voor "lange materialen" als gras, vezels, bieten-snijsels enz.

De nadelen van het apparaat zijn de hoge slijtage en de gemakkelijke beschadiging van het produkt.

b. De paternostertransporteur, fig. 1.2.3.3. Deze transporteur wordt o.a. gebruikt voor stortgoederen.

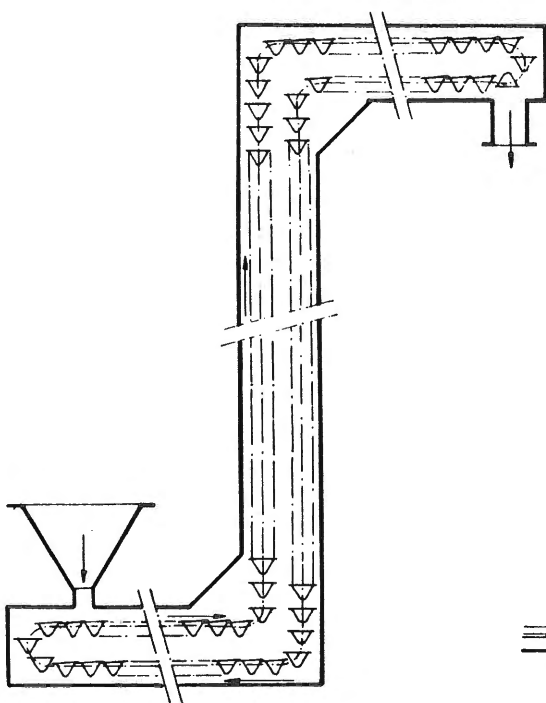


Fig. 1.2.3.3.

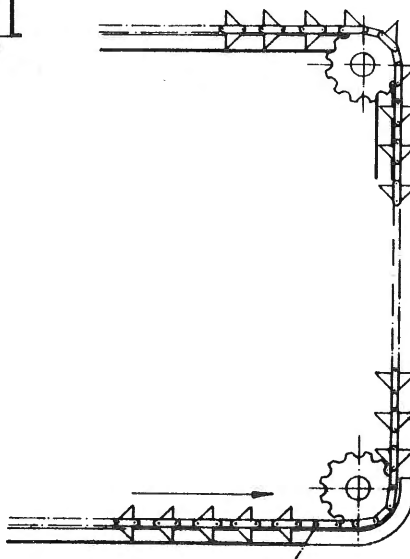


Fig. 1.2.3.4.

c. De schraperelevator, fig. 1.2.3.4.

Horizontaal werkt de schraperelevator als schraper vertikaal als een kettingelevator.

d. De sleepkettingtransporteurs.

De sleepkettingtransporteurs bestaan uit een koker van rechthoekige

of cirkelvormige doorsnee waarin zich een ketting bevindt, die door middel van een kettingwiel wordt voortgetrokken. Aan de ketting zijn meenemers bevestigd. Deze transporteurs zijn geheel met materiaal gevuld. Zij berusten op het feit dat de wrijving tussen de deeltjes onderling groter is dan tussen de deeltjes en de gladde wand. Een voorbeeld is de Redler-elevator, fig. 1.2.3.5. Het apparaat transporteert zowel in horizontale als in verticale richting. Het laden en lossen kan op willekeurige plaatsen geschieden.

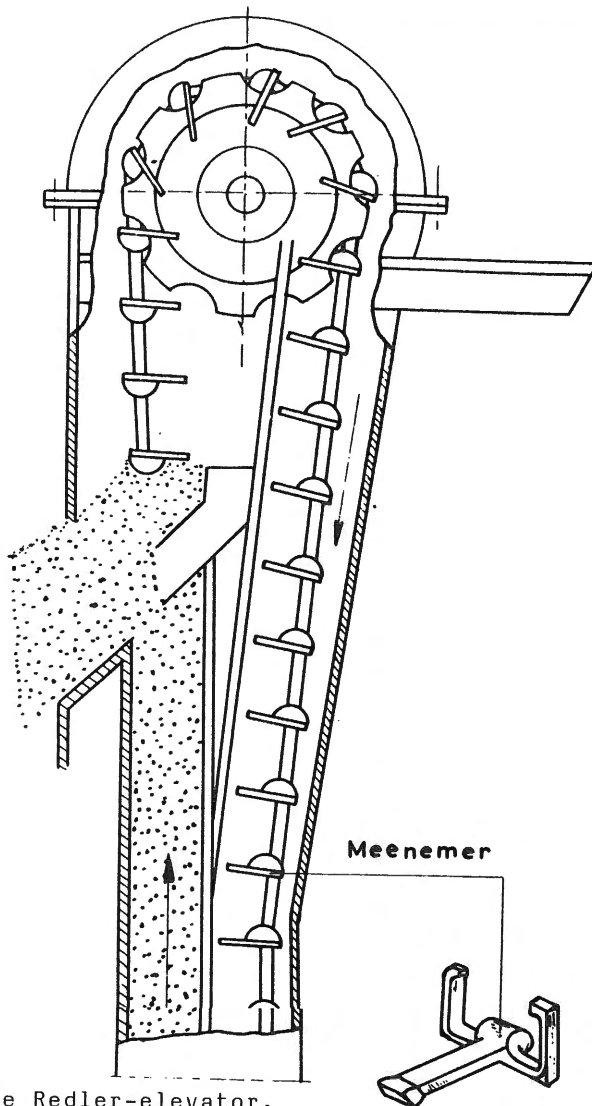


Fig. 1.2.3.5. De Redler-elevator.

Ad. 1.2.4.

Bij de kabeltransporteurs zijn de kettingen vervangen door kabels.
De toepassing is beperkt.

Ad. 1.2.6.

De schroeftransporteur of vijzel is één der oudste toepassingen van mechanisch transport. De transporteurs bestaan uit een schroef die transporteert in een goot (trog), fig. 1.2.3.6.

De schroeven kunnen op velerlei manieren zijn uitgevoerd.

Voordelen zijn:

- a. Eenvoudig en gemakkelijk stofdicht te maken.
- b. Vullen en lossen op willekeurige punten.
- c. Kunnen worden uitgevoerd met een mantel voor verwarming of koelen,
- d. Zijn geschikt voor alle gemakkelijk glijdende materialen.

Nadelen zijn:

- a. Energieverbruik tamelijk hoog door wrijving.
- b. Schroeven kunnen slechts in bepaalde lengte worden vervaardigd (dus niet geschikt voor lange afstanden).
- c. Geschikt voor horizontaal en vertikaal transport.
De capaciteit neemt af met toenemende helling. Bij een kleine spoed van de schroef is hellend transport mogelijk.
- d. Ernstige slijtage bij wat scherpere materialen.
- e. Beschadiging en vergruizing van het materiaal kan plaatsvinden.

De capaciteit van de schroeftransporteurs hangt af van de diameter, het toerental de helling en de vulling van de goot. Deze laatste bedraagt maximaal ca. 45 % met toerentallen tot ca. 200 per min.

De schroeftransporteur wordt toegepast voor het transport van korrel-, brok-, en poedervormige produkten in apparaten en het voeden van apparaten. Daarnaast voor het lossen van silo's en het transport van niet meer verpompbare mengsels van vaste stoffen en vloeistoffen.

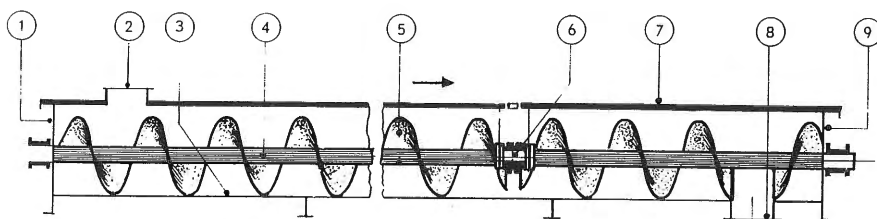


Fig. 1.2.3.6.

1. Aandrijfschild. 2. Inloop. 3. Schroefgoot. 4. Schroefas.
5. Schroefblad. 6. Tussenlager. 7. Deksel. 8. Uitloop. 9. Eindschild.

Ad. 1.2.6.

Bij deze transporteurs beweegt het gemakkelijk stromende materiaal over de bodem van een goot of door een buis, die op de een of andere wijze in trillende beweging wordt gebracht. We kunnen onderscheiden:

a. Schudgoten, fig. 1.2.3.7.

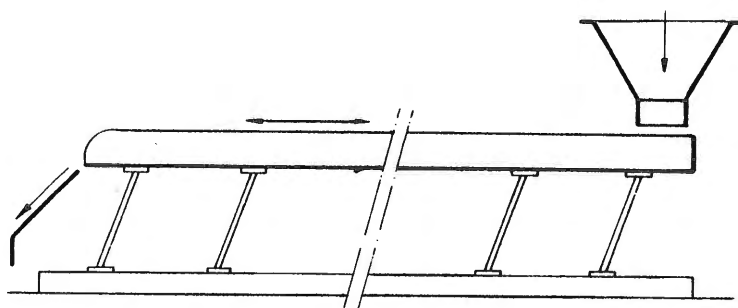


Fig. 1.2.3.7. Schudgoot.

Deze goten zijn gewoonlijk gemonteerd op schuinstaande verende poten. Het aantal heen en weergaande bewegingen bedraagt ca. 300 à 400 per minuut, en de transportsnelheid ca. 0,2 à 0,3 m/s. Deze goten worden meestal gebruikt voor horizontaal transport hoewel transport onder een geringe helling ook mogelijk is. Deze goten maken vrij veel lawaai en kunnen veel stof veroorzaken. Het energie verbruik is vrij hoog en de transportafstand beperkt.

Men ziet schudgoten o.a. in suikerfabrieken voor transport van de nog enigszins vochtige suiker en in zuivelfabrieken voor transport van het nog enigszins vochtige poeder, waar zij het voordeel hebben de suiker en het poeder los te houden door de schuddende beweging.

b. Trilgoten.

De trilgoten werken volgens hetzelfde principe als de schudgoten. Ze hebben echter een veel kleinere amplitude, doch een veel groter aantal trillingen per minuut.

Er zijn twee methoden voor het aandrijven van een trilgoot, nl.

d.m.v. elektromotor en d.m.v. een elektromagnetische vibrator.

De elektromotor drijft twee excentrische schijven met een tegengestelde draairichting aan. Hierdoor wordt een heen- en weergaande trilling verkregen. De frequentie van de trilling kan geregeld worden via het toerental van de motor; de amplitude kan worden gevarieerd door wijziging van de excentriciteit of door verandering van de massa's.

De elektromagnetische vibrator bestaat uit een magneetjuk en een anker, onderling verbonden door veren. Het aantal trillingen is afhankelijk van de frequentie van de voedingsstroom en bedraagt gewoonlijk 50 tot 100 Hz. De amplitude is regelbaar door verandering van de klemspanning, de frequentie eventueel door een frequentie-omvormer.

Trilgoten hebben grote capaciteiten bij een gering vermogen. Door de kleine amplitude veroorzaken ze minder stof dan schudgoten, terwijl de overbrenging op het gebouw minder te bemerken is. Trilgoten kunnen vrijwel alle materialen vervoeren, met uitzondering van kleverige producten. Zij transporteren ook tegen een geringe helling op; de capaciteit is dan geringer dan bij horizontaal transport. Vertikaal transport is mogelijk door de trilgoot in de vorm van een spiraal te bouwen.

Maakt men gebruik van een buis i.p.v. een goot dan dient men er op te letten dat de transportbuis niet geheel met materiaal gevuld is. In een volledig gevulde buis wordt het materiaal nl. aan de onderkant in de transportrichting verplaatst, doch aan de bovenkant wordt het in tegengestelde richting gedwongen, waardoor het totale rendement van het toestel sterk vermindert.

1.3. Pneumatisch transport.

1.3.1. Inleiding.

Onder pneumatisch transport wordt verstaan het transporteren van vaste stof door buizen door middel van een gas. Vrijwel iedere vaste stof met een korrelgrootte, die ligt tussen 2,5 micron - 80 mm, en die een dichtheid heeft van ten hoogste 2000 kg/m³, is in principe pneumatisch transporteerbaar.

Voorbeelden van materialen waarbij pneumatisch transport wordt toegepast zijn; granen, suiker, allerlei gemalen produkten, poeders, gehakseld gras etc. Het gaat hierbij om transport vanuit schepen, wagons e.d. naar opslagplaatsen in de fabriek en omgekeerd en bij transport in de eigenlijke fabriek van het ene naar het andere apparaat.

Pneumatische transportsystemen bestaan in principe uit een voedingseenheid, die de vaste stof aan de buis toevoegt, een transportleiding, een afvoerinrichting van de vaste stof en een luchtbron.

Pneumatisch transport heeft ten opzichte van bijv. mechanisch transport de volgende voordelen;

- a. de transportweg kan vrij willekeurig zijn. Gewoonlijk is deze weg een buis of een slang, die men allerlei hindernissen kan laten nemen, echter liefst met zo weinig mogelijk scherpe bochten;
- b. het transport gebeurt vrij geruisloos;
- c. er zijn - buiten het te transporteren materiaal - weinig bewegende delen. Er is relatief weinig slijtage, tenzij het te transporteren materiaal zeer hard en scherp is, waardoor de leidingen snel slijten;
- d. het transport is bijna stofvrij.

Er zijn echter ook een aantal nadelen aan pneumatisch transport verbonden als;

- a. het energieverbruik is hoog t.o.v. mechanisch transport. Het hoge energieverbruik komt o.a. doordat niet alleen het materiaal moet worden getransporteerd maar ook een grote hoeveelheid gas (lucht);
- b. broze materialen kunnen verpulveren door de botsingen en het

schuren langs de pijpwand. Andere materialen, waaronder brouwgerst, kunnen tijdens het transport te veel worden beschadigd.

Bij olie houdende produkten is uittreding van olie mogelijk;

- c. er is een installatie nodig om het materiaal weer van de lucht te scheiden;
- d. er bestaat gevaar voor stof-explosie.

Op grond van het bovenstaande is pneumatisch-transport veelal beperkt van ca. 10 tot ca. 2000 m. Bij korte afstand verdient in het algemeen mechanisch transport de voorkeur. Zijn de afstanden groter dan ca. 2000 m dan kunnen ook beter mechanische transportsystemen, transportwagens e.d. worden ingezet, daar het energieverbruik van een pneumatisch transportsysteem te hoog wordt.

Pneumatisch transport wordt ook wel toegepast als hulpmiddel bij bewerkingen, het transport is dan secundair. Zo wordt vaak bij malen en sorteren van pneumatisch transport gebruik gemaakt; tijdens het gesuspendeerd zijn in lucht kan het allerlei bewerkingen ondergaan, zoals drogen, bevochtigen, koelen, verwarmen, mengen met een andere vaste stof of met een olie enz.. De verblijftijd van de vaste stof in pneumatisch transportsysteem is echter klein.

We kunnen de volgende vormen van pneumatisch transport onderscheiden:

- a. pneumatisch transport in de verdunde fase. Hierbij is de luchtsnelheid duidelijk groter dan de valsnelheid van een enkel deeltje. De fractie vrije ruimte zal meestal 0,95 of meer zijn. Het aantal kg vaste stof per kg lucht (beladingsgraad) zal meestal niet groter zijn dan ca. 20;
- b. pneumatisch transport in de dichte fase. Hierbij worden de deeltjes in min of meer gefluidiseerde toestand door de leiding voortgeschoven. De beladingsgraad is meestal hoger dan 50. De luchtsnelheid is ongeveer gelijk aan de materiaalsnelheid en ligt in de orde van grootte van 0,5 - 5 m/s;
- c. pneumatisch transport door middel van "airslides". Hierbij wordt het produkt in gefluidiseerde toestand via een hellend oppervlak getransporteerd.

Alvorens wordt ingegaan op de transportsystemen zullen eerst de theoretische achtergronden worden besproken.

1.3.2. Theoretische grondbeginselen van het pneumatisch transport.

De stromingen die tijdens het transport optreden bestaan uit verschillende vormen die in het kort nader zullen worden bekeken. Ter verduidelijking wordt uitgegaan van een glazen cilinder met een poreuze bodem waarin zich een hoeveelheid produkt bevindt. Het bovineinde van de cilinder is open. Door de poreuze bodem wordt nu een toenemende hoeveelheid lucht onderin de materiaal-kolom gebracht. In fig. 1.3.2.1. zijn de verschillende stroomverschijnselen weergegeven die we tijdens het doorblazen van de lucht kunnen onderscheiden. In fig. 1.3.2.2 is het totaal drukverlies per lengteenheid buis als functie van de lichtsnelheid, v , betrokken op de lege buis, weergegeven. In fig. 1.3.2.3 vinden we de invloed van de massastroom op het drukverlies.

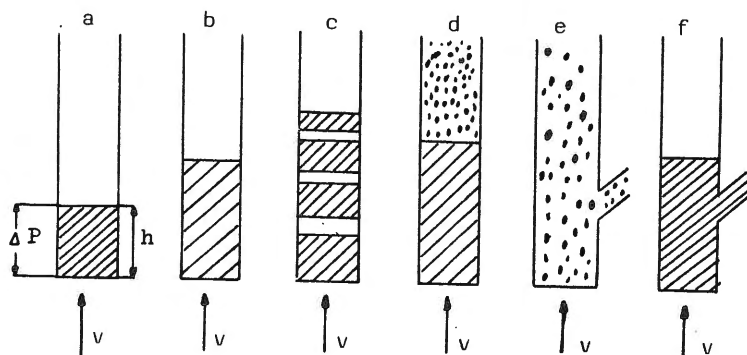


Fig. 1.3.2.1. Stromingsvormen van een vast/gas systeem.

Fig. 1.3.2.1 geldt voor één materiaal met een bepaalde dichtheid, deeltjesgrootte en vorm van het deeltje. Het transport is vertikaal, de buizen zijn van een bepaalde gelijke diameter terwijl de lucht een constante temperatuur heeft.

Bij horizontaal transport komen de lijnen in fig. 1.3.2.2 ongeveer overeen met die van vertikaal transport tot punt A. Na punt A verlopen bij horizontaal transport de lijnen in het algemeen minder steil dan bij vertikaal transport.

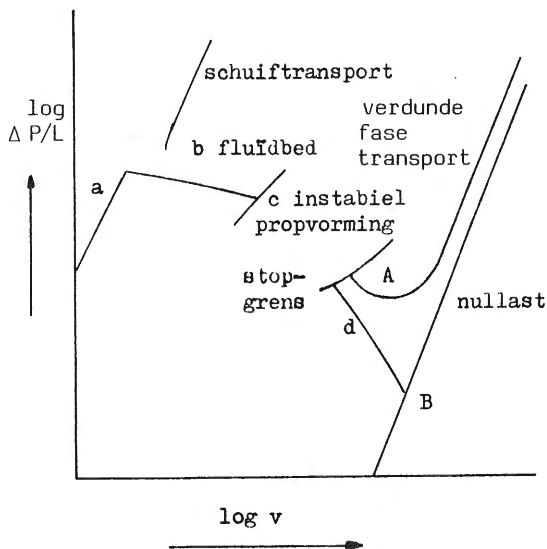


Fig. 1.3.2.2. Toestandsdiagram van een vast/gas systeem.

De volgende stroomverschijnselen zijn te onderscheiden.

- a. Een geringe luchthoeveelheid wordt aan de kolom toegevoegd; de lucht stroomt tussen de deeltjes omhoog. De kolom vaste stof blijft in rust. Indien de luchthoeveelheid wordt opgevoerd, bij een in rust verblijvende materiaalkolom, neemt de druk toe.
- b. De luchthoeveelheid, ofwel de luchtsnelheid tussen de deeltjes, wordt zover opgevoerd dat door wrijving tussen lucht en deeltjes de deeltjes een dermate grote impuls krijgen, dat evenwicht wordt bereikt en de deeltjes praktisch gaan zweven. Hierdoor neemt de hoogte van de materiaalkolom toe en de toestand van fluidisatie bereikt, de druk daalt.
- c. Bij verdere toeneming van de gassnelheid vormen zich in de materiaalkolom luchtbellen, waardoor proppen materiaal getransporteerd worden. Deze proppen vallen tijdens het transport uit elkaar en vallen terug op het restmateriaal, waardoor een instabiele toestand bereikt is (zgn. koken).
- d. Door verdere toeneming van de luchtsnelheid worden de bovenste deeltjes continu afgevoerd bij afnemende druk, totdat de cilinder leeg is en de druk gelijk is aan de weerstand die het poreuze materiaal veroorzaakt. De luchtsnelheid is nu hoger dan de zweefsnelheid van de zwaarste deeltjes.

e. Wanneer de glascilinder boven de bodem continu met nieuw produkt wordt gevoed, is een transportsysteem verkregen. Is dit niet het geval dan wordt in punt B het laatste deeltje door de gasstroom afgevoerd.

De drukverliescurve in het geval van transport ligt boven de nullastlijn en loopt hieraan evenwijdig bij hoge luchtsnelheden.

f. Indien aan de buis continu een voldoende hoeveelheid materiaal wordt toegevoerd en door uitwendige krachten het materiaal bijeen wordt gehouden, dan kunnen er zich geen proppen vormen. Vanaf een bepaalde luchtsnelheid wordt de gevormde zuil vertikaal voortbewogen. We hebben te maken met schuiftransport. De drukverlies-curve is ongeveer een rechte. Ze ligt hoger dan die voor verdunde fase transport omdat tevens de wrijvingskrachten tussen materiaal en buiswand moeten worden overwonnen.

Volgens fig. 1.3.2.2 heeft het systeem een minimaal drukverlies in punt A. Bij afnemende luchtsnelheid stijgt de druk snel tot de instabiele toestand in de buis is bereikt en propstroming optreedt. Een bedrijfszekere installatie dient onder alle omstandigheden buiten de zgn. stopgrens te werken. Het minimum op de curve is de snelheid waarmee in de praktijk zou moeten worden gewerkt, omdat lagere luchtsnelheden het risico van verstopping inhouden en hogere snelheden het gebruik van overmatig veel lucht.

In fig. 1.3.2.3 zijn de verschillende omstandigheden weergegeven, als specifiek drukverval bij verschillende beladingen en luchtsnelheden. Hierbij zijn twee grensgevallen met een belading 0 aangegeven. De meest rechtse lijn geldt voor een lege leiding en de linkse lijn is voor een leiding die volledig is gevuld maar waarbij geen transport plaatsvindt.

Het verdunde fase transport vinden we rechts van het minimum. Aan de linkerkant van het minimum ligt het instabiele gebied waar het materiaal proppen en agglomeraten vormt.

In het verleden werd aangenomen dat in dit gebied geen stabiel transport mogelijk was. Het is echter gebleken dat verschillende materialen bij lage luchtsnelheden en hoge beladingen, links van de stopgrens, in een klein gebied, zich goed laten transporteren. Het drukverlies ligt in dit gebied aanmerkelijk hoger dan bij verdunde fase transport. De gemiddelde luchtsnelheid daarintegen

ligt veel lager en komt ongeveer overeen met de valsnelheid van het deeltje.

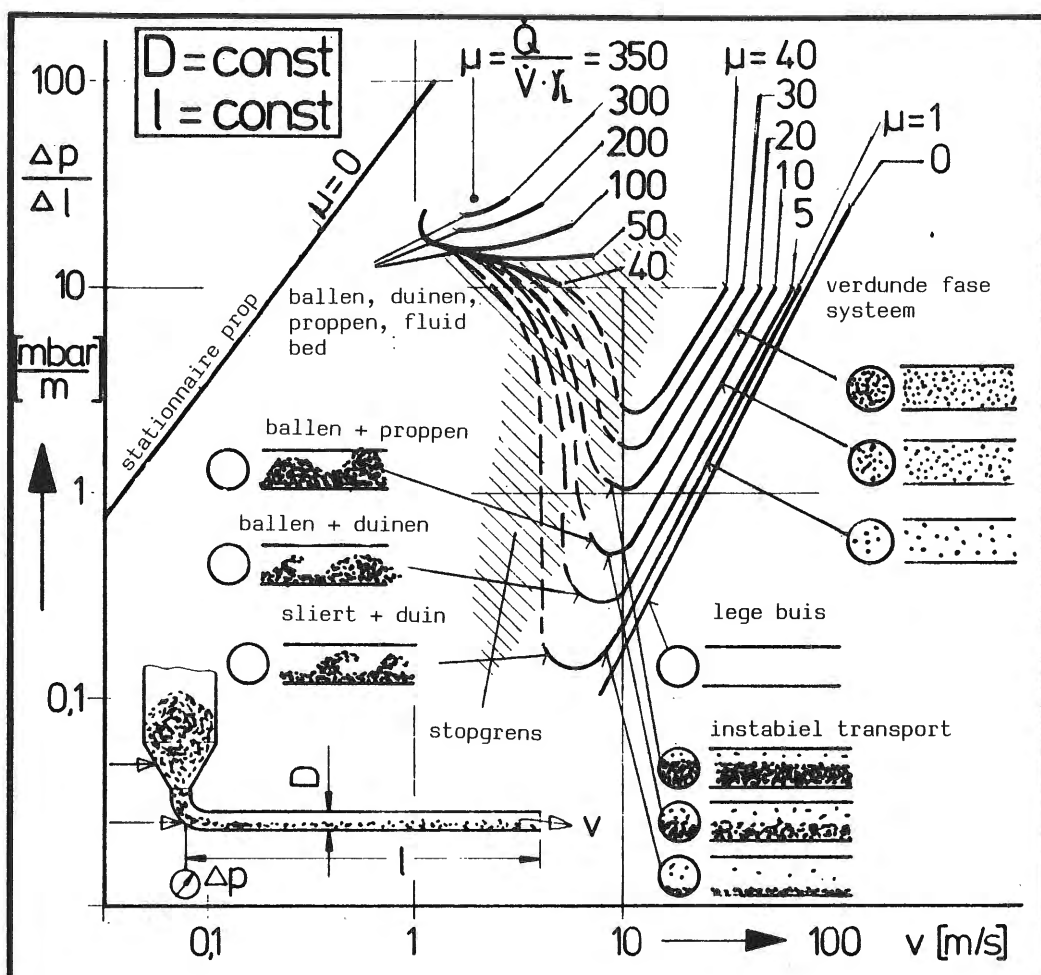


Fig. 1.3.2.3. Funktioneel diagram van het pneumatisch transport.

Voor een juist funktionieren van een verdunde of medium fase transportinstallatie dient deze in ieder geval aan de volgende twee eisen te voldoen:

- a. De transportsnelheid moet boven de zweefsnelheid van het zwaarste deeltje liggen. In de praktijk dient hiervoor ca. 2 - 2,5 maal de zweefsnelheid aangehouden te worden voor horizontaal transport en 1,2 - 1,5 maal de zweefsnelheid voor vertikaal transport. De zweefsnelheden voor graankorrels bijv. bedragen 8 à 10 m/s.
- b. De installatie dient zo dicht mogelijk bij de stopgrens te werken zonder deze echter te bereiken. Dit is afhankelijk van de gekozen beginsnelheid, welke bepaald wordt door de materiaaleigenschappen. Afhankelijk van de materiaaleigenschappen wordt de belading gekozen. De uiteindelijke leidingweerstand wordt nu bepaald door de snelheid, belading, totale leidinglengte, het aantal bochten en de leidingdiameter.

De meeste levensmiddelen die voor pneumatisch transport in aanmerking komen worden getransporteerd met luchtsnelheden die liggen tussen de 15 m/s en 25 m/s. Boven deze snelheden treedt er een sterke slijtage op in de bochten terwijl tevens het produkt te veel wordt beschadigd. Indien voor het transport lucht van hoge druk wordt gebruikt kan meer vaste stof per kg lucht worden getransporteerd dan bij lage druk. Daar staat tegenover dat hogedrukssystemen duurder zijn. De maximale druk die in het algemeen wordt toegepast bij pneumatisch transport is ca. 0,7 baro. Voor een zo groot mogelijke efficiëntie zal de vaste stof-lucht-verhouding, kg vast/kg lucht, zo groot mogelijk moeten zijn. Deze verhouding, die belading wordt genoemd, loopt bij bijv. meel en zout op tot ongeveer 50 kg materiaal/ kg lucht, terwijl het bij tarwe beperkt blijft tot ca. 16 kg/kg lucht.

1.3.3. Berekening van het vermogen.

1.3.3.1. Verdunde fase-transport.

Bij verdunde fase transport zijn de luchtsnelheden groter dan de valsnelheid van een enkel deeltje. Enkele voorbeelden van praktisch toegepaste waarden van luchtsnelheden bij verdunde fase-transport zijn: mais 25 m/s; suiker 24 m/s; graan 18 m/s; kippe-

veren 3 m/s.

Bij poeders wordt meestal een luchtsnelheid gebruikt die groter is dan 4 maal de valsnelheid van een deeltje. De relatieve luchtsnelheid t.o.v. de deeltjes is voor korrelige materialen in bijv. verticale leidingen veelal 1 - 1,5 maal groter dan de zweefsneldheid van een deeltje.

De transportsystemen bij verdunde fase transport kunnen worden onderscheiden naar drukgebied en naar werkwijze. De drukgebieden omvatten lage-, middel- en hogedruksystemen, terwijl de werkwijze berust op zuig- en perssystemen.

Een overzicht van de pneumatische transportsystemen staat vermeld in tabel 1.3.3.1. In fig. 1.3.3.4 en fig. 1.3.3.5 is resp. een voorbeeld getekend van een druksysteem en een zuigsysteem.

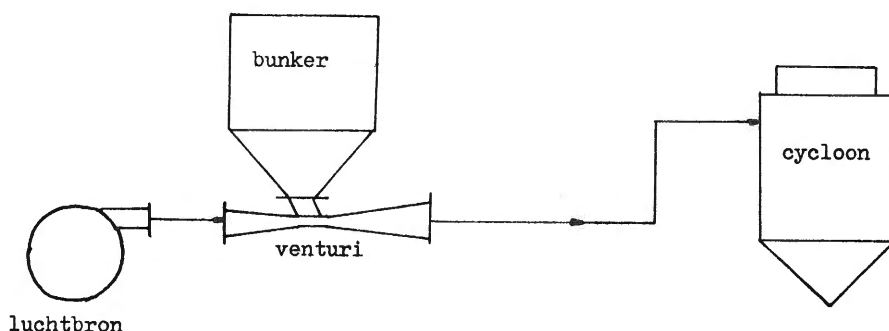


Fig. 1.3.3.4. Druksysteem.

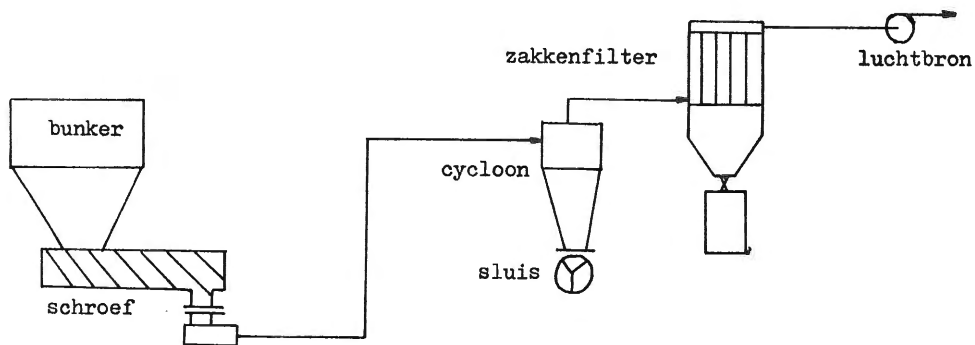


Fig. 1.3.3.5. Zuigsysteem.

Tabel 1.3.3.1. OVERZICHT PNEUMATISCHE TRANSPORTSYSTEMEN.

Omschrijving	Beladings- dichtheid $\mu = \frac{\text{kg mat.}}{\text{kg gas}}$	Druk (bar)	Maximale transport lengte (m)	Transport- snelheid (m/s)	Benodigd vermogen (kWh/ton)	Materi- aal de- biet (ton/hr)	Deeltjes- grootte	Opmerkingen
Hoge dichtheid transport	Hoge druk transport	onder- druk systemen	0 - 10	0 - 0,2 (onder- druk)	tot 300	voor vrij- stromende materialen	normaal 3 - 50	stationaire mengstroming
			gemengde systemen	10 - 30	300 tot 600	vertikaal (1,2-1,5)W _f horizontaal (2,0-2,5)W _f gemiddeld (15-30)m/s	0,5-50 mm	
Lage dichtheid transport	Middel druk transport	overdruk systemen	10 - 30	- 0,2 tot 0,5 (baro)	600	voor fijne korrels tot 7 W _f en meer	0,5-50 mm	stationaire stroming mogelijk: slierten, ballen, propfen.
			20 - 50			0,8 - 6	5 - 200 μ	
			> 30	0,5 - 7 (baro)	tot 2000	W _f = vrijeval snelheid v/d korrels	grof en fijn	
Hoge dichtheid transport	Hoge druk transport	gefluidi- seerd transport	tot 250	3 - 7	tot 1500	5 - 20	fijn 1 - 20 μ	stationaire stroming
			tot 1000 en meer	hoge drukken	20	0,5 - 5	grof ook vochtig	schuifstroming slechts voor korte stukken zonder bochten.

Door middel van een voedingseenheid, in fig. 1.3.3.4 en 1.3.3.5 resp. een venturi en een schroef, wordt het materiaal aan de leiding toegevoegd. Een luchtstroom zorgt er voor dat het materiaal, dat in de leiding is gestort, wordt getransporteerd. Wanneer het materiaal op de plaats van bestemming is aangekomen moet de vaste stof weer van de lucht worden gescheiden. Meestal gebeurt dit met behulp van een cycloon. Bestaat het te transporteren materiaal uit een fijne stof, of wordt voor het luchttransport compressoren toegepast dan is een zeer goede stofafscheiding vereist. In dergelijke gevallen wordt na de cycloon vaak nog een zakkenfilter geplaatst.

Om het totale vermogen van een verdunde fase transportsysteem te berekenen moet de totale drukval over de leiding bekend zijn. Het theoretisch energieverbruik van de pomp wordt dan:

$$P_{th} = Q_v \cdot \Delta P_{tot} \text{ (Watt)} \quad (1.3.3.1)$$

P_{th} = theoretisch vermogen (Watt),

Q_v = hoeveelheid te verplaatsen lucht (m^3/s),

ΔP_{tot} = totale drukval over de leiding (N/m^2).

Het totale drukverlies in een leiding voor pneumatisch transport wordt o.a. veroorzaakt door:

ΔP_1 = drukverlies t.g.v. de luchtstroom betrokken op de lege buis.

ΔP_2 = drukverlies t.g.v. produkt-wandwrijving.

ΔP_3 = drukverlies t.g.v. stoten en wrijven van de deeltjes onderling.

ΔP_4 = drukverlies t.g.v. verticale produktverplaatsing.

ΔP_5 = drukverlies t.g.v. produktversnelling.

ΔP_6 = drukverlies t.g.v. filters cyclonen enz.

Het drukverlies voor lucht betrokken op de lege leiding kan worden berekend met de vergelijking:

$$\Delta P_1 = f_1 \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \quad (1.3.3.2)$$

Voor cyclonen, filters enz. wordt meestal de volgende formule gebruikt:

$$\Delta P_6 = K_w \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1.3.3.3)$$

Voor ρ en v kunnen gemiddelde waarden worden genomen daar de expansie van het transportgas relatief klein is. De overige drukverliezen zijn moeilijk in praktisch bruikbare formules weer te geven. Vooral het drukverloop, na de plaats in de buis waar het product wordt toegevoegd, is moeilijk te definiëren. We hebben hier te maken met een versnelling van de deeltjes. Deze zgn. aanloopzone kan zich over een aantal meters uitstrekken (2 - 4m). De drukgradiënt is in deze aanloopzone vrij groot en neemt geleidelijk af. Na de aanloopzone is de drukgradiënt constant. Verder moeten we voor de exacte berekeningen een zgn. slipfactor, S , kennen. Deze slipfactor, die gedefinieerd is als de verhouding tussen de snelheid van het gas en de snelheid van het deeltje, is moeilijk te bepalen en daardoor veelal niet bekend.

Bij hoge luchtsnelheden en geringe beladingen liggen de drukverlieslijnen bij verschillende beladingen ongeveer evenwijdig aan die voor gas alleen, zie fig. 1.3.2.3. Van deze eigenschap kan gebruik worden gemaakt. Om het drukverlies bij een bepaalde belading te kunnen voorspellen behoeft vergelijking 1.3.3.2 slecht met een constante factor te worden vermenigvuldigd. Deze faktor, E , hangt af van de belading en de luchtsnelheid. Vergelijking 1.3.3.2 krijgt nu de vorm:

$$\Delta P_1 = E \cdot f_1 \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \quad (1.3.3.4)$$

Voor bochten e.d. wordt doorgaans een equivalente lengte ingevoerd. Zo wordt bijv. een bocht met $R = 15 D$ gelijk gesteld aan 7-8 m rechte pijp en worden voor weerstanden wissels e.d. vaste waarden ingezet.

1.3.3.2. Schuiftransport.

In de praktijk wordt schuiftransport weinig toegepast, hoewel deze wijze van transport t.o.v. verdunde fase transport het voordeel heeft van een lager energieverbruik. Het schuiftransport heeft echter als nadeel dat het slechts kan worden toegepast voor materialen die voldoende grof zijn zodat de lucht, nodig voor transport kan worden doorgelaten. Daarnaast is de afstand waarover schuiftransport kan plaatsvinden beperkt tot slechts enkele me-

ters. Bij hoge drukken heeft het te transporteren materiaal sterk de neiging om proppen te vormen door expansie van de lucht. Schuiftransport onderscheidt zich op twee manieren van verdunde fase transport:

- a. door de geringe transportsnelheid, 0,5 - 5 m/s, is er geen lucht - vast afscheider nodig.
- b. door de hoge drukken moet het materiaal via een drukvat worden getransporteerd. Dit houdt in dat schuiftransport altijd discontinu is.

In fig. 1.3.3.6 vinden we een aantal apparaten waarmee schuiftransport kan worden gerealiseerd.

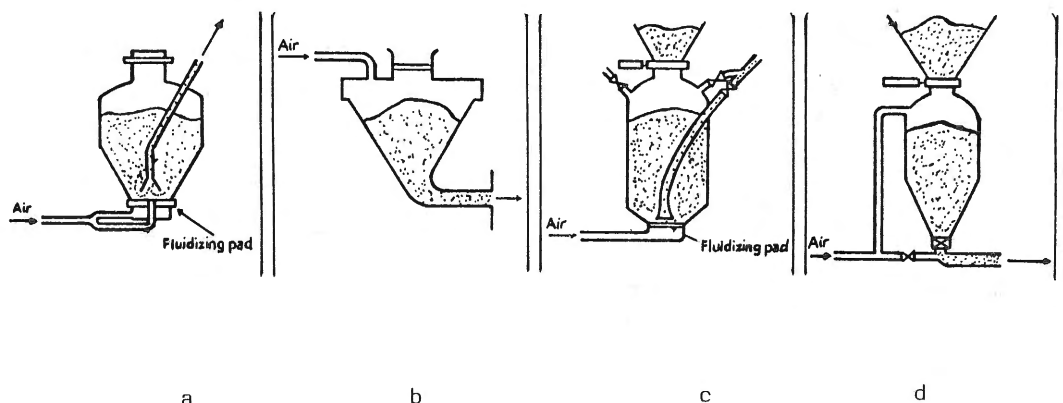


Fig. 1.3.3.6. Poederpompen

Bij a en c wordt de lucht via een poreuze bodem gemengd met de vaste stof. Heeft zich in het drukvat een voldoende hoge druk opgebouwd dan begint het transport. Is het materiaal enigszins samenbakkend dan verdienen b en d de voorkeur. Bij zowel a, b, c als d gaat het schuiftransport over in prop-transport indien de transportleidingen te lang worden.

De apparaten in fig. 1.3.3.6 worden vaak poederpompen genoemd. Type a wordt in het algemeen bij lagere drukken en beladingen gebruikt dan type b en c. Type d is een combinatie van a en b. De poederpompen komen tot een belading van ca. 50 kg/m³, terwijl de werkdruk varieert van 1 - 2,5 bar voor de typen a, b en c en voor type d van 7 - 10 bar.

Daar schuiftransport in de levensmiddelenindustrie weinig wordt toegepast zal op het berekenen van het energieverbruik niet wor-

den ingegaan.

1.3.3.2. Dichte fase transport.

Indien de produkten breukgevoelig, bijv. instant poeders, abrasief, slijtage gevoelig of cohesief zijn, dan is normaal transport in de verdunde fase niet mogelijk. Voor deze produkten zijn pneumatische transportsystemen ontwikkeld waarbij de transportsnelheid erg laag is terwijl de belading maximaal is. De volgende systemen worden toegepast:

- a. "Prop"-transport voor vrij stromend materiaal.
- b. "Pneumosplit"-transport voor niet vrijstromende, aanhechtende, cohesieve produkten.

Proptransport.

Bij proptransport wordt gebruik gemaakt van stromingseigenschappen van het materiaal. Het te transporteren materiaal moet een bepaalde porositeit bezitten en niet samendrukbaar zijn, zodat het materiaal doorlaatbaar is voor lucht. Hierdoor kunnen zich in de leiding, bij snelheden van ca. 1 - 3 m/s, spontaan ophopingen vormen welke als propfen getransporteerd worden, fig. 1.3.3.7 a en b.

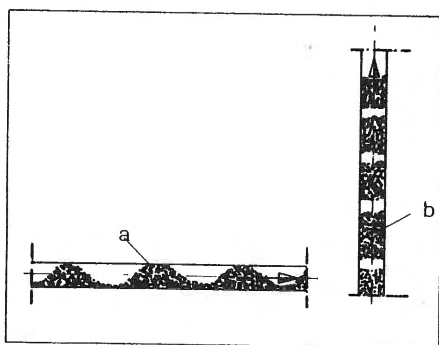


Fig. 1.3.3.7.

- a. Toestand in horizontale leiding.
- b. Toestand in vertikale leiding.

Het systeem bestaat uit een drukvat van waaruit het materiaal in de leiding wordt gebracht, fig. 1.3.3.8.

Het produkt wordt opgevangen in een silo. Daar voor het transport een relatieve geringe hoeveelheid lucht nodig is kan voor het afscheiden van de lucht meestal worden volstaan met het aanbrengen van een luchtfilter op de silo. De druk van de drukzender bedraagt meestal 1 - 2 baro waardoor de transportsnelheid van het produkt laag is (2 - 3 m/s). De capaciteit van het systeem is ten opzichte

van andere pneumatisch transportsystemen dan ook gering. Dit heeft echter het voordeel dat door de lage luchtsnelheden de te transporteren produkten minimaal worden beschadigd terwijl de mechanische aantasting van de leidingen te verwaarlozen is.

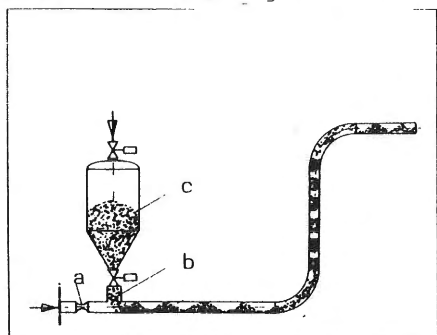


Fig. 1.3.3.8.

- a. Gashoeveelheidsregeling.
- b. Instroomkamer.
- c. Drukkzender.

Het systeem is o.a. geschikt voor produkten als niet vette wei-, melkpoeder, suiker, tomatenpoeder enz.

De luchtsnelheid, betrokken op de lege buis, v , is ongeveer gelijk aan de zweefsneldheid van de deeltjes, w_s , die aan de buis worden toegevoegd. De kolom in de buis groeit waardoor de luchtsnelheid tussen de deeltjes zal toenemen, v_1 . Het gevolg hiervan is dat de druk, P , aan de aanvoerkan zal toenemen. De op de materiaalkolom werkende krachten zijn de wrijvingskrachten, $R = G \cdot \beta$, die in het begin groter zijn dan de kracht, W , tengevolge van de drukval over de kolom.

$W = \Delta P \cdot A$. zie fig. 1.3.3.9.

G = gewicht van de kolom (N),

β = frictiecoëfficiënt,

A = doorstroomoppervlak (m^2),

R = wrijvingskracht (N),

ΔP = drukval over de kolom (N/m^2),

W = stromingsweerstand (N).

Is de materiaalkolom zover aangegroeid dat de kracht tengevolge van het stromen van de lucht groter wordt dan de wrijvingskracht, R , dan zal de kolom uiteenvallen. Is de porositeit van de kolom bijv. 0,5 dan is de werkelijke snelheid van de lucht $v_1 = 2 \cdot w_s$. Door deze hoge snelheid worden de deeltjes versneld en met de lucht meegenomen. Hierdoor worden opnieuw proppen gevormd die

om dezelfde reden weer uiteen zullen vallen etc. We krijgen uiteindelijk een transport met een pulserend karakter.

Bij vertikaal transport is de kans op propvorming het grootst, fig. 1.3.3.7 b. Bij horizontaal transport, fig. 1.3.3.7 a zal tengevolge van de zwaartekracht, die op de deeltjes werkt, over de doorsnee van de buis verschillende snelheden ontstaan. Aan de on-

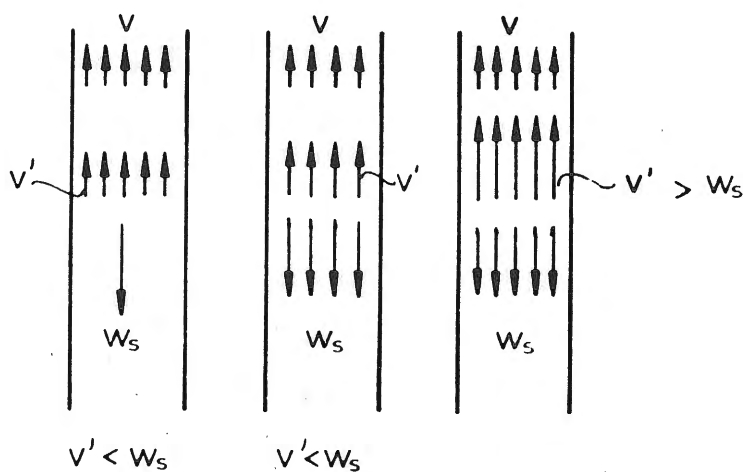
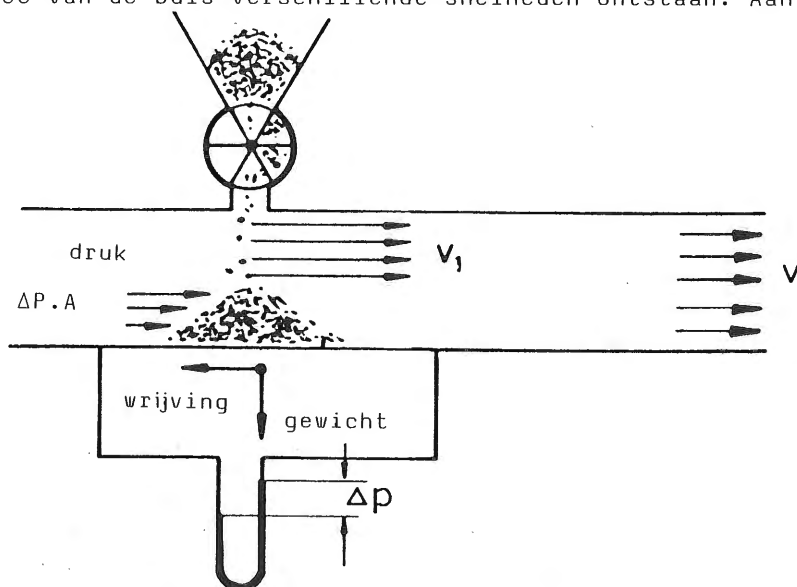


Fig. 1.3.3.9. Theoretisch model van langzaam pneumatisch transport.

derkant van de buis zal het materiaal de laagste snelheid hebben en aan de bovenkant de hoogste snelheid. Hierdoor kunnen eenmaal gevormde propfen uiteenvallen waardoor een soort "slierten"-transport ontstaat. Afhankelijk van het soort materiaal, dat getransporteerd wordt, vormen zich duinen of worden opnieuw propfen gevormd.

Een praktijk voorbeeld van een propstroomstelsel is grafisch weergegeven in fig. 1.3.3.10.

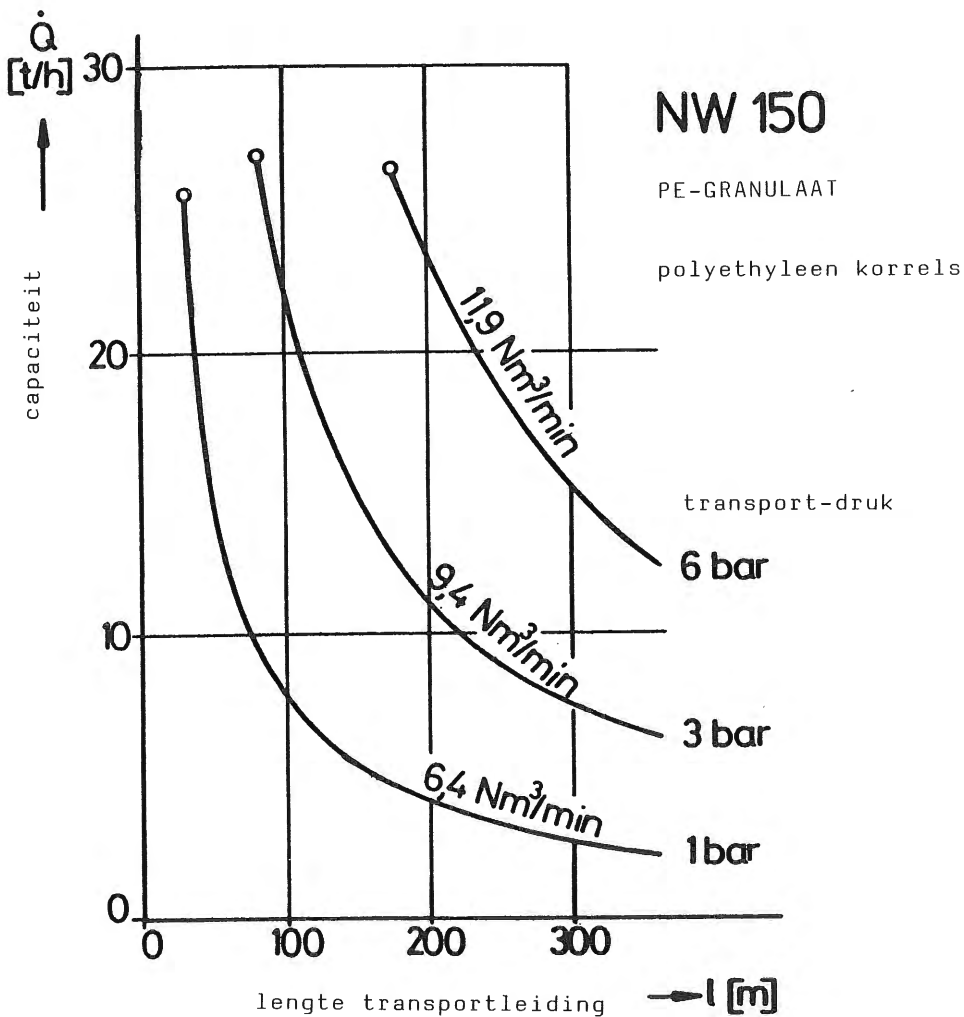


Fig. 1.3.3.10. Propstroomtransport van polyethyleen-korrels

Pneumosplit transport.

Voor niet vrij-stromende, aanhechtende en cohesieve produkten is het pneumosplit systeem ontwikkeld.

In een pneumatisch transport-systeem dat zich stabiel gedraagt, bijv. verdunde fase transport, zal het drukverval lineair verlopen met de leidingafstand, zoals in fig. 1.3.3.11, lijn a, is aangegeven. Wordt er een prop gevormd dan kan het drukverval verlopen zoals aangegeven door lijn b in fig. 1.3.3.11.

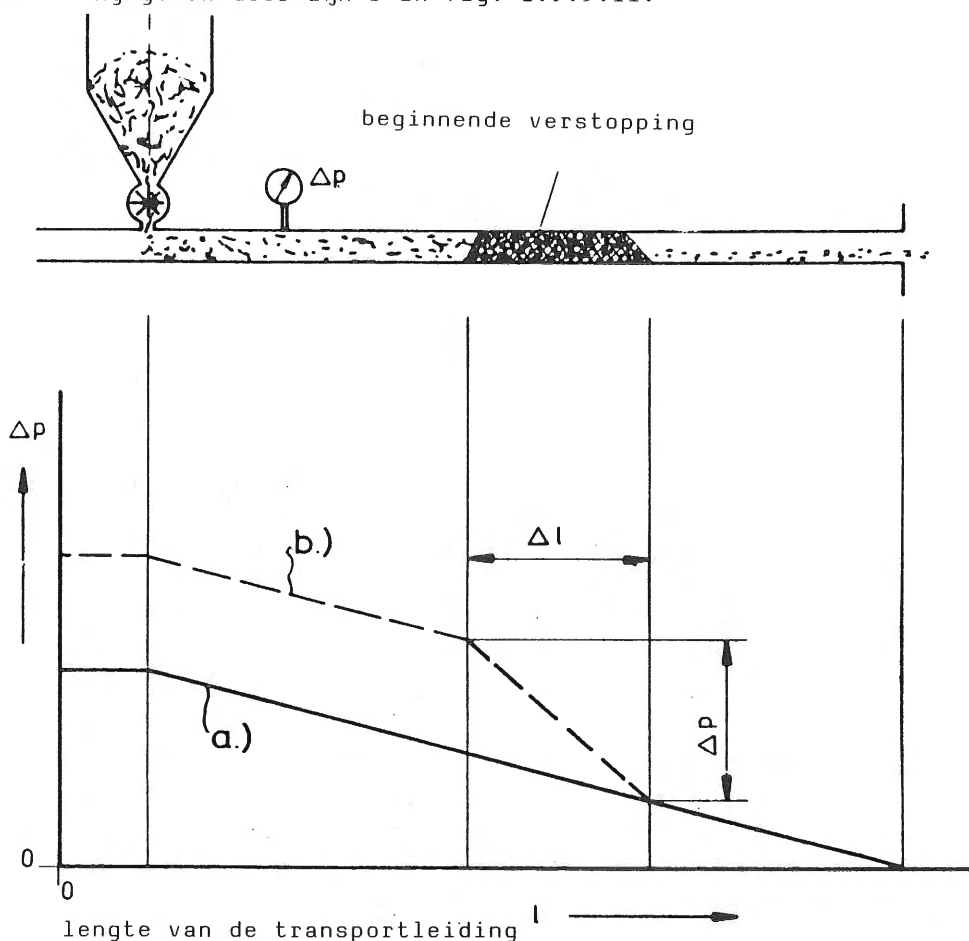


Fig. 1.3.3.11. Drukverloop in een pneumatische transport-leiding;
a. bij ongestoord pneumatisch transport;
b. in het geval van een beginnende prop.

Bij het verder aangroeien van de prop zal het drukverval over de prop, t.g.v. wrijving, de beschikbare transportdruk overschreiden waarna verstopping van de leiding optreedt. Een dreigende verstopping kan worden voorkomen door middel van plaatselijke luchtinjectie zoals in fig. 1.3.3.12 is aangegeven.

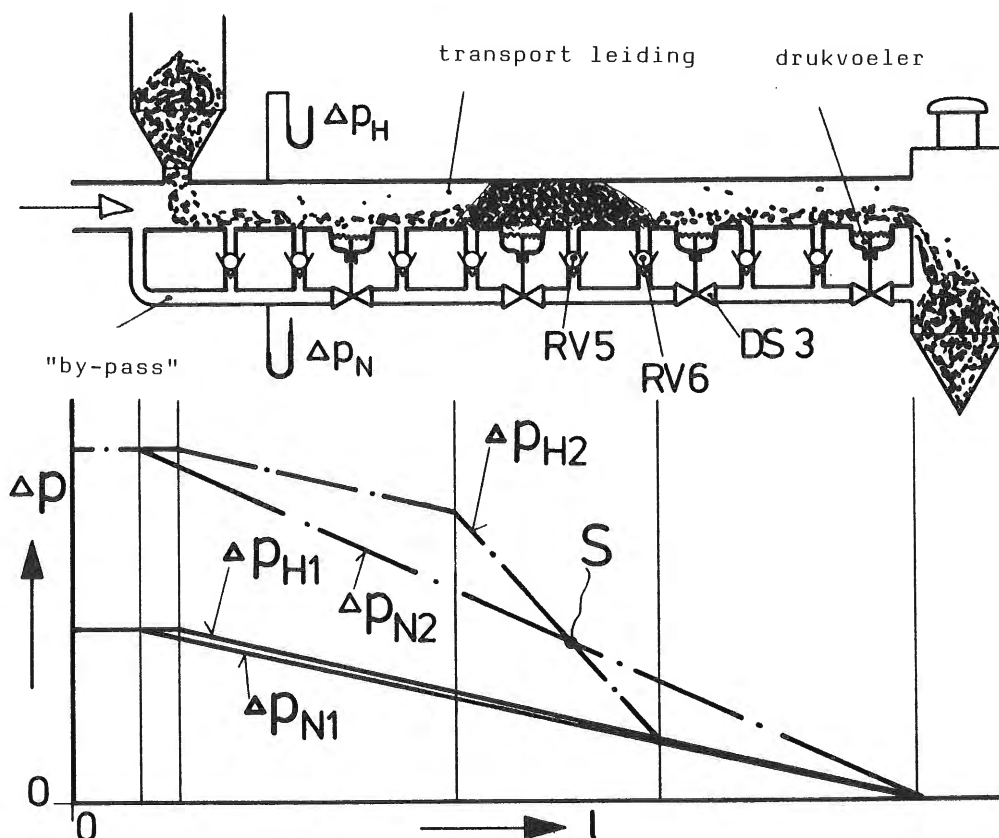


Fig. 1.3.3.12. Voorkomen van proppen d.m.v. secundaire luchttoevoer.

Evenwijdig aan de hoofdleiding is een "by-pass" gemonteerd waardoor ca. 5 - 10% van de totale hoeveelheid lucht gaat, die direct naar het eindpunt stroomt. Door middel van een systeem van membraan gestuurde drukverschil sensoren en injectieventielen, voor secundaire lucht, zal automatisch ter plaatse een drijgende verstopping worden opgeheven waardoor een stabiel systeem ontstaat.

1.3.4. Systeemcomponenten bij pneumatisch transport.

Bij pneumatisch transport kunnen de volgende systeemcomponenten worden onderscheiden, zie fig. 1.3.3.4 en fig. 1.3.3.5:

- a. luchtbronnen;
- b. voedingseenheden;
- c. transportsluizen;
- d. materiaalaafvoerinrichtingen;
- e. wissels en componenten.

Bovenstaande punten, met uitzondering van e, zullen hierna afzonderlijk worden besproken.

1.3.4.1. Luchtbronnen.

Als luchtbronnen worden bij pneumatisch transport verschillende typen toegepast waarvan enkele nader worden uiteengezet.

Ventilatoren..

Ventilatoren, fig. 1.3.4.1, worden toegepast voor eenvoudige lage-druksystemen, met capaciteiten tot ca. 5 ton/uur tot max. 1200 mm waterkolom (ca. 0,1 bar). De werking komt overeen met die van de centrifugaalpomp. Bij ventilatoren is de invoer axiaal en de afvoer tangential zoals uit fig. 1.3.4.1 blijkt.

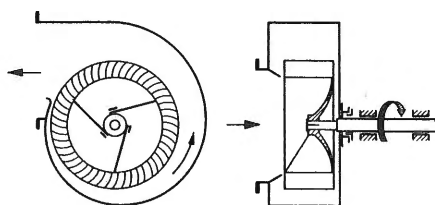


Fig. 1.3.4.1. Ventilator.

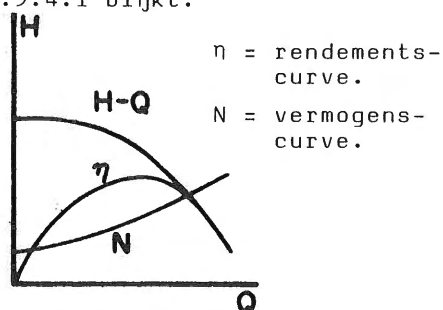


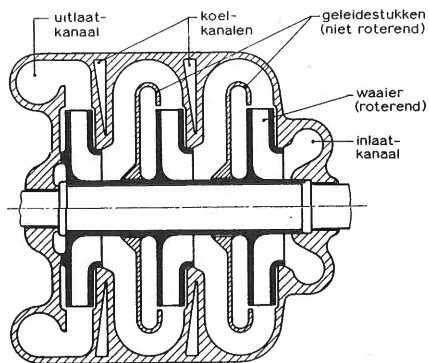
Fig. 1.3.4.2. Karakteristiek van ventilator. Q-H curve.

De voordelen van de ventilator zijn, dat ze ongevoelig zijn voor stof, eenvoudig en betrouwbaar zijn en een lage kostprijs hebben. Een nadeel is echter dat bij de ventilatoren de luchtopbrengst zeer snel afneemt bij een toenemende leidingweerstand, of door een dreigende propvorming, waardoor de installatie verstopt kan raken. Het een en ander volgt uit de ventilatorkarakteristiek. Een installatie met een ventilator zal ver van de stopgrens moeten

werken om overbelasting te vermijden en zal bij voorkeur voor kleinere capaciteiten worden toegepast.

Turbineblowers.

Turbineblowers, ook wel radiaal-, centrifugaal compressoren genoemd, bestaan uit een aantal ventilatortrappen, fig. 1.3.4.2.



De maximale druk van de turbineblowers ligt bij ca. 5000 mm waterkolom, ca. 0,5 bar. De karakteristiek heeft dezelfde vorm als die van een ventilator. Het enige voordeel t.o.v. de ventilator zijn de hogere werkdrukken

Fig. 1.3.4.2. Turbineblower.

Vloeistofringpompen.

Een voorbeeld van een vloeistofringpomp is in fig. 1.3.4.3 weer-gegeven. Een schoepenwiel (1) draait excentrisch in het pomphuis (2) en is aan weerszijden met een geringe speling ingesloten tussen een tweetal deksels. In deze deksels zijn de zuigopening (3) en de persopening (4) aangebracht. De pomp is gedeeltelijk gevuld met een vloeistof (meestal is dit water). Door de centrifugaalkracht zal

deze vloeistof weggeslingerd worden en een met het pomphuis concentrische ring vormen.

Deze vloeistofring vormt met het schoepenwiel luchtkamers, die van A naar B groter worden en van B naar A kleiner. Tijdens het vergroten van deze luchtkamer zal hierin onderdruk ontstaan, waardoor lucht door de zuigopening (3) zal worden aangezogen. Bij het verkleinen van de luchtkamers zal deze lucht samengeperst worden

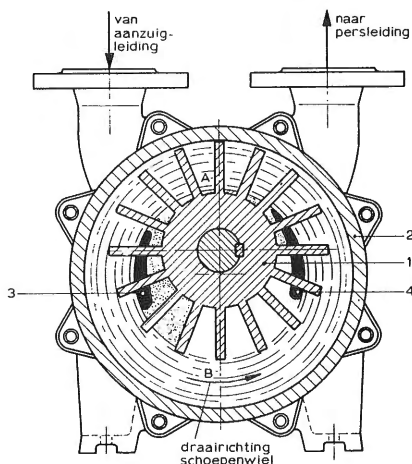


Fig. 1.3.4.3. Vloeistofringpomp.

en door de persopening (4) ontwijken.

In principe komt de werking van de vloeistofringpomp overeen met die van een zuigerpomp, waarbij de vloeistof tussen de twee schoepen als zuiger dienst doet. Daar deze pomp in feite een verdringerpomp is kan men hem gebruiken als compressor of als vacuümpomp.

Wenst men een groot drukverschil dan kan men pompen gaan gebruiken met meerdere in serie geplaatste schoepenwielen.

Een gedeelte van de in de pomp aanwezige vloeistof wordt met het samengeperste gas afgevoerd. In de praktijk moet daarom naast de pomp een reservoir naast de pomp worden opgesteld, dat als circulatievat voor deze vloeistof dient, of het pomphuis moet worden aangesloten op de waterleiding.

Rootsblower.

Een rootsblower, fig. 1.3.4.4 kan als enkeltraps een druk van ca. 10.000 mm waterkolom, ca. 1 bar, en als tweetraps ca. 12.000 mm waterkolom, 1,2 bar leveren. De onderdruk bedraagt ongeveer 5000 mm waterkolom, 0,5 bar. Deze blowers worden erg veel in pneumatische transportsystemen gebruikt, zowel in pers als zuigsystemen. De pomp levert nl. een olievrije, droge lucht, terwijl de karakteristiek, fig. 1.3.4.5, een bijna constante luchtopbrengst vertoont, die practisch onafhankelijk is van de tegendruk; voor pneumatisch transport een eerste vereiste.

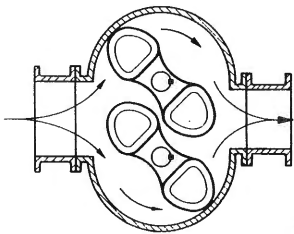


Fig. 1.3.4.4. Rootsblower.

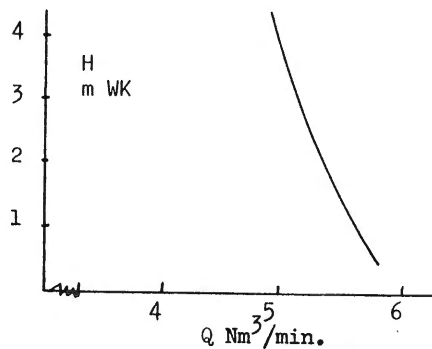


Fig. 1.3.4.5. Q - H kromme van een rootsblower.

Daar de blowers, in verband met hun constructie, een licht pulserende werking hebben, is het nodig de blowers te voorzien van een aanzuig- en evt. persgeluidsdemper in verband met de geluidshinder.

In fig. 1.3.4.6 is een voorbeeld gegeven van een pneumatische transportinstallatie waarbij gebruik wordt gemaakt van een rootsblower.

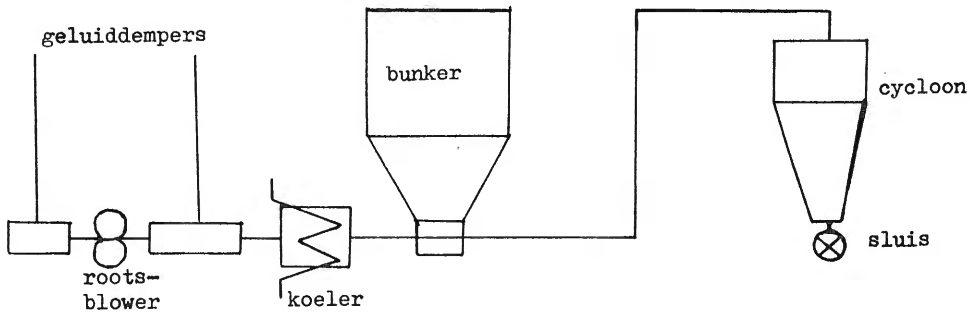


Fig. 1.3.4.6. Pneumatische transportinstallatie met rootsblower.

Zuigercompressoren.

De zuigercompressor kan bestaan uit één tot twaalf trappen. Dit is de enige compressor die zeer hoge drukken kan leveren (meer dan 350 MN/m^2). Een ééntaps, twee cilinder, compressor is weergegeven in fig. 1.3.4.7. Dit type compressor wordt uitsluitend toegepast bij hogedruktransport.

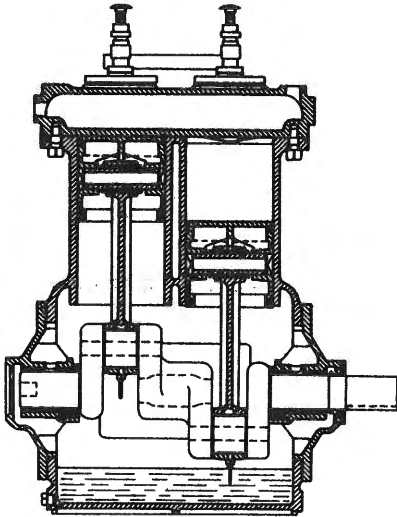


Fig. 1.3.4.7. Eéntaps compressor.

Schroefkompressoren.

Schroefkompressoren bestaan uit een tweetal naast elkaar gelegen, als dikke assen uitgevoerde, rotoren in een nauwsluitend huis. De rotoren zijn voorzien van precies in elkaar passende, schroeflijnvormig uitgevoerde uitsparingen, fig. 1.3.4.8.

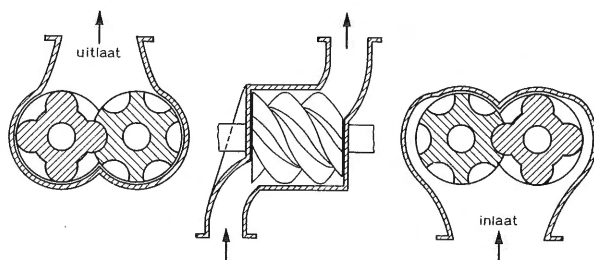


Fig. 1.3.4.8. Schroefkompressor.

Door één der assen aan te drijven en de andere via tandwielen van dezelfde omtreksnelheid te voorzien, wordt als het ware een met gas gevulde ruimte "vooruitgeduwd". De ruimte wordt geleidelijk kleiner, omdat de uitsparingen geleidelijk minder worden. Hierdoor ontstaat de compressie. De toerentallen zijn in de regel hoog (men gaat wel tot 15.000 omw./min).

De schroefkompressoren zijn licht en goedkoop. Eén van de nadelen is het onaangename geluid als gevolg van de hoge toerentallen. Bij pneumatisch transport wordt dit type compressor voornamelijk toegepast voor lagere drukken, tot ca. 2 bar effectief, en grote luchthoeveelheden. Daarnaast wordt de kompressor toegepast wanneer men een zo licht en klein mogelijk kompressortype nodig heeft zoals bijv. voor het lossen van tankwagens.

1.3.5. Voedingseenheden.

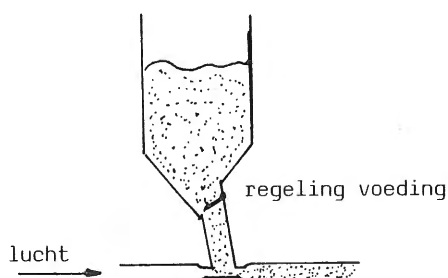
Voor het toevoegen van het te transporteren materiaal aan de transportleiding zijn verschillende voedingseenheden in gebruik. Welk type in een bepaald geval moet worden toegepast hangt in belangrijke mate af van het soort produkt en het transportsysteem. Van de meest gebruikte voedingseenheden zal hierna een kort overzicht worden gegeven.

Zuiginstallaties (Toepassing: verdunde fase-transport).

Zuiginstallaties kunnen vanuit een bunker gevoed worden door

het materiaal eenvoudig in een open zuigleiding te laten vallen. De hoeveelheid vaste stof kan worden geregeld door een schuif. Bij gemakkelijk stromende materialen kan dit nauwkeurig geschieden door gebruikmaking van uitstroomopeningen met verschillende diameter.

Ook kan gebruik worden gemaakt van een venturi, fig. 1.3.5.1.



De negatieve druk die in de keel van de venturi ontstaat vergroot de uitstroming uit de silo. De venturi wordt o.a. gebruikt voor transport van graan en suiker. Belading ca. 30 kg/m^3 lucht en een werkdruk van $0,35 - 0,70 \text{ bar}$. Het rendement van de venturi is slecht waardoor het specifiek energieverbruik te hoog wordt voor toepassing bij grote capaciteiten.

Fig. 1.3.5.1. Venturi.

Bij zuiginstallaties wordt ook veel gebruik gemaakt van zuigpijpen, soms nozzles of zuigmonden genoemd, waarvan het principe getekend is in fig. 1.3.5.2 a en b.; a voor het voeden van losgestorte

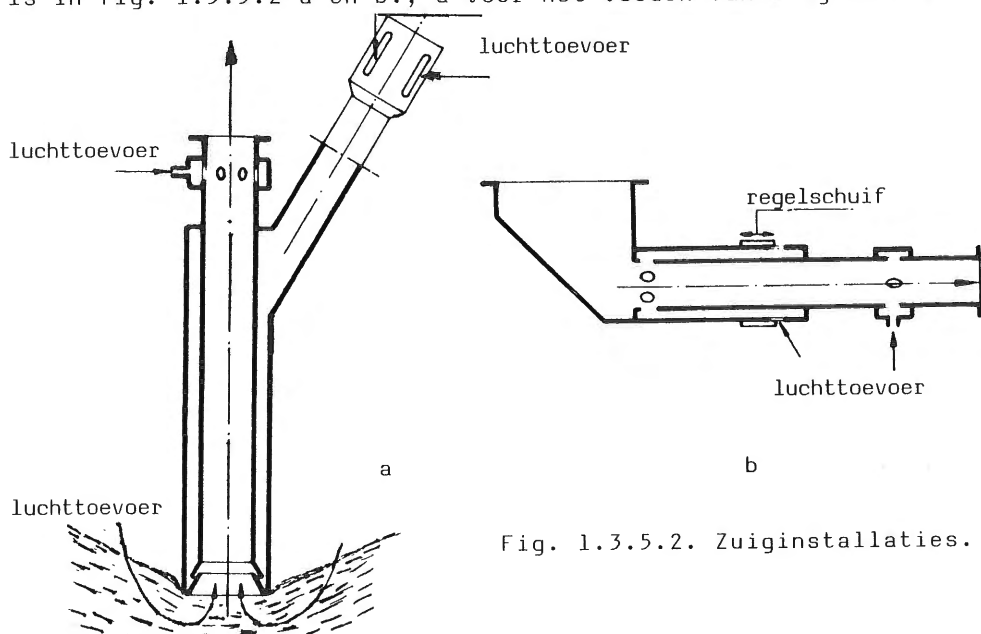
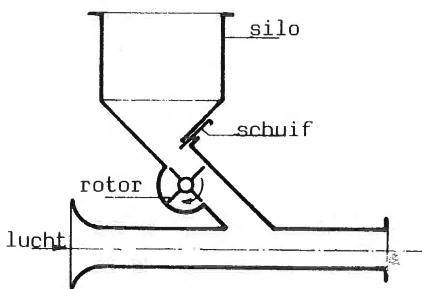


Fig. 1.3.5.2. Zuiginstallaties.

materialen, zoals bij het lossen van graanschepen; b) voor het voeden vanuit bunkers. De zuigpijp, fig. 1.3.5.2 a, kan in elke stand worden gebruikt; een deel van de transportlucht treedt toe via de vaste stof, een deel via de ruimte tussen de eigenlijke zuigpijp en de buitenste pijp en tenslotte kan aan het einde van de zuigpijp nog lucht ingelaten worden. Beide laatst genoemde lucht-hoeveelheden zijn regelbaar en daarmee kan de gewenste mengverhouding tussen lucht en vaste stof worden ingesteld. Bij toepassing onder een bunker kan de zuigpijp ook worden gekombineerd met een betere doseerinrichting, fig. 1.3.5.3. Door middel van een rotor



kan de dosering worden gecontroleerd terwijl tevens de druk van de lucht op een bepaalde waarde kan worden gehandhaafd. Deze eenheid wordt veel toegepast voor vrijstromende niet abrasieve materialen, belading ca. 30 kg/m^3 lucht en een werkdruk van $0,35 - 0,90 \text{ bar}$.

Fig. 1.3.5.3. Zuigpijp gecombineerd met doseerinrichting.

Druksystemen (Toepassing: dichte fasetransport).

Het voeden van drukinstallaties gebeurt, in bijzondere gevallen, met een schroef of met poederpompen, fig. 1.3.3.6.

Een gewone schroef, fig. 1.3.5.4, kan slechts kleine tegendrukken overwinnen.

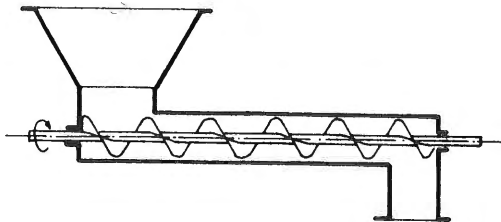


Fig. 1.3.5.4. Schroeftransporteur.

Een schroefpomp, zoals getekend in fig. 1.3.5.5, kan voor fijne poeders worden gebruikt tot een overdruk van ca. 3 bar, belading ca 90 kg/m³ lucht.

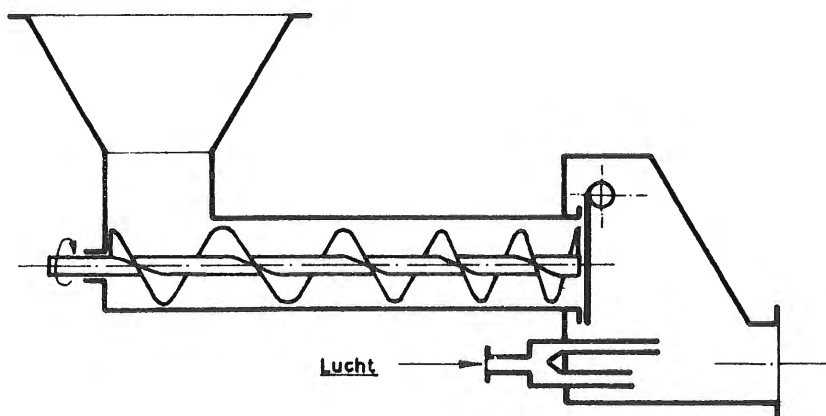


Fig. 1.3.5.5. Schroefpomp met veerbelaste uitloopdeksel.

De schroef is zodanig geconstrueerd, dat het produkt in de schroef een afdichting vormt d.m.v. een veerbelaste uitloopdeksel. Het nadeel van deze schroef is de hoge prijs. De schroef is niet bruikbaar voor plastificerend materiaal en materiaal dat gemakkelijk beschadigd wordt. Het energieverbruik van de schroef is relatief hoog.

1.3.6. Transportsluizen.

Een transportsluis, cellenradsluis, is een roterende sluis (af-

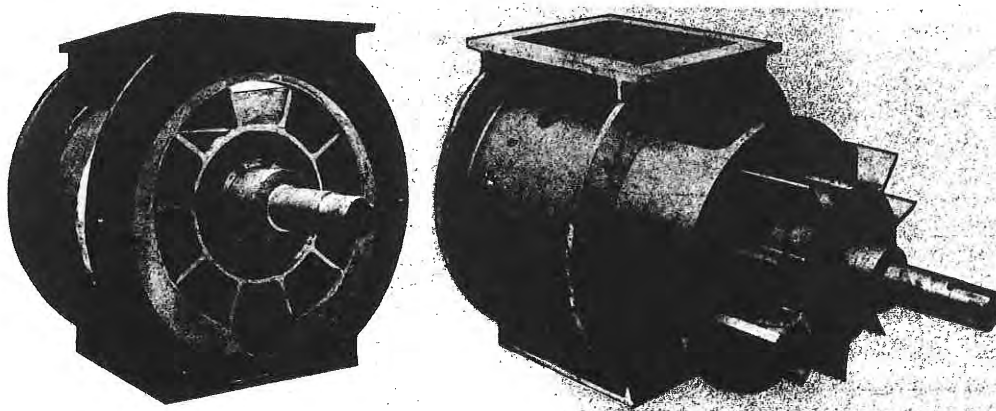


Fig. 1.3.6.1. Transportsluis.

sluiter) die tegelijkertijd doseert en voedt en tegelijkertijd een drukverschil kan overwinnen. De transportsluis kan zowel worden toegepast bij zuig- als persinstallaties als voedingsapparaat of als roterende afsluiter onder cyclonen. In fig. 1.3.6.1 is een uitvoeringsvorm van een transportsluis weergegeven.

Een aantal typen transportsluizen zullen nader worden toegelicht.

Doorvalssluizen.

De sluis in fig. 1.3.6.2 wordt o.a. gebruikt onder cyclonen en is leverbaar in gietijzer, evt. hardverchroomd, aluminium of roestvaststaal. De rotor is verdeeld in een aantal kompartimenten die zo groot mogelijk moeten zijn voor het verkrijgen van een labyrint-afdichtingseffect. Voor plastificerende produkten dient de asafdichting met druklucht te worden gespoeld. Voor sommige versme-

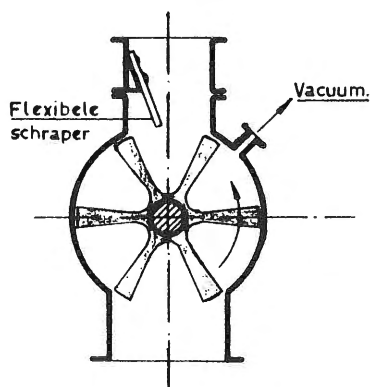


Fig. 1.3.6.2. Doorvalsluis met schraper.

rende produkten als melkpoeder en suiker, dient de rotor met schraapmessen te worden uitgerust. De messen zorgen ervoor dat de zich op de binnenkant van huis vormende harde laag continu wordt weggenomen om vastlopen te voorkomen.

Bij verschillende industrieën, o.a. de melkpoederindustrie, is het nodig de sluis snel te kunnen reinigen. Hiervoor is de as in 3 delen gedeeld, waarbij het middelste deel (rotor) past in de bussen in de eigenlijke lagering.

Hierbij wordt één zijschild met vleugelmoeren bevestigd en kan na verwijdering hiervan de gehele rotor direkt uit het huis worden getrokken.

Sintermetaalsluis.

Bij aanbakkende produkten treedt er in vele gevallen een "dichtgroeien" van de cellenradkamers op. Om dit te voorkomen wordt een speciale sluis, de zgn. "sintermetaalsluis" geleverd.

Hierbij is een cellenrad uit poreus materiaal (sinterbrons of roestvaststaal) opgebouwd en wordt via een speciale koppeling via een

holle as op het inwendige van de sluis, druklucht toegevoerd. Deze lucht ontwijkt door de compartimenten waardoor de inhoud ervan wordt gefluidiseerd, zodat de kamers geheel gelost worden.

Sluis met verstelbare inloop.

Voor granulair materiaal treedt bij een normale sluis "hakken" aan de inloopzijde op. Ter vermijding hiervan wordt een speciale sluis met ingebouwde, verstelbare verschraalde inloop, welke excentrisch geplaatst is, gebruikt, fig. 1.3.6.3. Deze sluis wordt in combinatie met een venturi toegepast voor voeding van granulaat in middeldruksystemen.

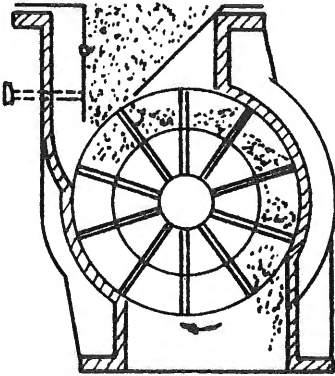
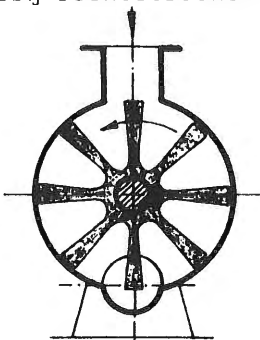


Fig. 1.3.6.3. Sluis met verstelbare inloop.

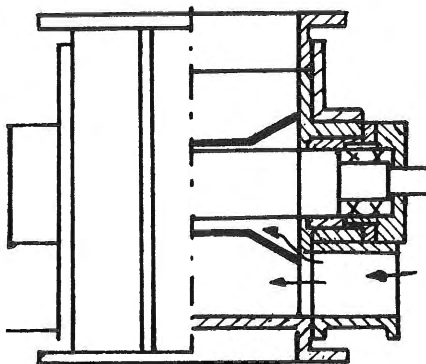
Doorblaassluis.

Voor poeders wordt de zgn. doorblaassluis, fig. 1.3.6.4 gebruikt, waarbij rechtstreeks door de cellencompartimenten wordt geblazen.



Deze sluis bouwt zeer compact. Daar de compartimenten echter een pulserende invloed op het transportsysteem uitoefenen is het mogelijk, dat de hierdoor optredende pulsatie een resonantie in het opvangvat aan het einde van de leiding teweegbrengt.

Fig. 1.3.6.4. Doorblaassluis.



Ter vermijding van de pulsatie worden cellenradbodems uitgevoerd als aangegeven in fig. 1.3.6.5. Een deelstroom van de lucht wordt aan de binnenzijde omgeleid, deze deelstroom is maximaal bij maximale druk d.w.z. wanneer een vol compartiment voor de blaasopening komt. De drukschommelingen worden op deze wijze in het systeem genivelleerd.

Fig. 1.3.6.5. Spec. doorblaassluis.

Konstruktief worden aan de sluizen de volgende eisen gesteld:

- a. kleine spelings (0,1 - 0,2 mm);
- b. robuuste bouwwijze;
- c. korte, dikke rotoren, $L = 1 - 1,5 D$;
- d. aanpasbaar aan het produkt (speciale afdichtingen, schraapmes-
sen, snelreiniging enz.);
- e. buitenliggende, gesloten, stofdichte lagers;
- f. flexibiliteit wat betreft aandrijving, d.w.z. de mogelijkheid
tot direkte d.m.v. koppeling of zijdelingse motoraanbouw met
kettingtransmissie.
- g. Toepasbaar voor niet-abressief materiaal tot ca. 20.20.20 mm.

1.3.7. Materiaalafvoerinrichtingen.

Om bij pneumatisch transport het gas (lucht) te kunnen scheiden van de vaste stof zijn er zgn. afvoerinrichtingen nodig als cyclonen en filters. De vastestof-afscheiders zullen onder hoofdstuk 5 "Mechanische scheidingsmethoden" nader worden besproken.

1.3.8. Reiniging van het granulaat.

Tijdens het transport wordt het te transporteren materiaal vaak iets beschadigd terwijl het daarnaast nog ongewenste bestanddelen kan bevatten. Deze bestanddelen als stof, vezels enz. worden in een cycloon en/of filter mee afgescheiden. Voor het verwijderen van deze bestanddelen kan gebruik gemaakt worden van een pneumatisch ontstoffingssysteem die berust op omstroming van korrels door een gasstroom. Bij deze systemen mag het verschil in snelheid tussen de lucht en de korrels niet groter zijn dan de zweefsnelheid van een korrel, daar anders het produkt wordt weggeblazen.

In fig. 1.3.8.1 en fig. 1.3.8.2 zijn de oudste typen afscheiders getekend waarbij een eenmalige doorgang van de lucht plaatsvindt. Fig. 1.3.8.3 is een nieuwer type. Bij dit apparaat vinden meerdere doorgangen van de luchtstroom plaats waardoor een betere scheiding plaatsvindt en een hogere belading mogelijk is dan bij de oudste typen. De nieuwste ontwikkeling is weergegeven in fig. 1.3.8.4. Het produkt dat met een snelheid v_1 wordt aangevoerd krijgt in de versnellingszone een snelheid v_2 en wordt door de verdringer ringvormig verdeeld. Bij de intreezone wordt de reinigingslucht met een snelheid v_3 ingeblazen en stroomt met de versnellings- of

transportlucht tegengesteld aan de produktstroom via de ringkamer naar de uitgang e. Het produkt wordt hierbij sterk afgeremd en goed gereinigd vanwege het grote snelheidsverschil tussen de vaste stof en de lucht.

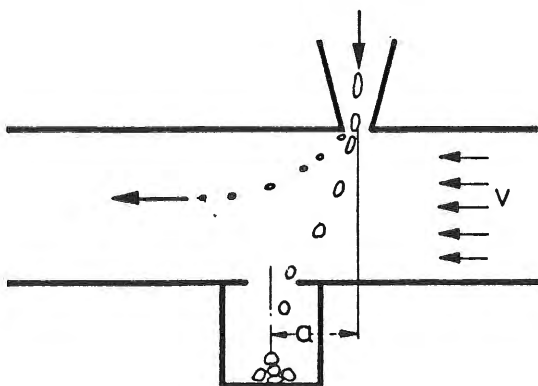


Fig. 1.3.8.1. Horizontale reiniger.

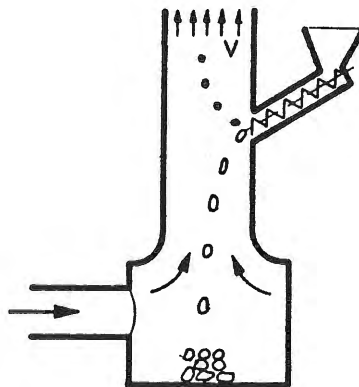


Fig. 1.3.8.2. Tegenstroom reiniger (vertikaal reiniger).

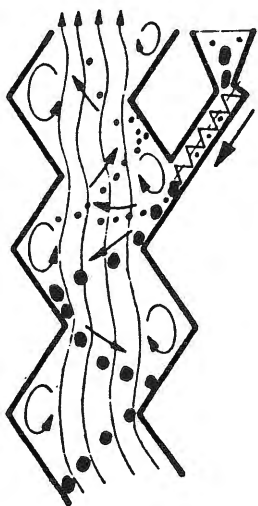


Fig. 1.3.8.3. Cascade reiniger (Zig-Zag Zifter).

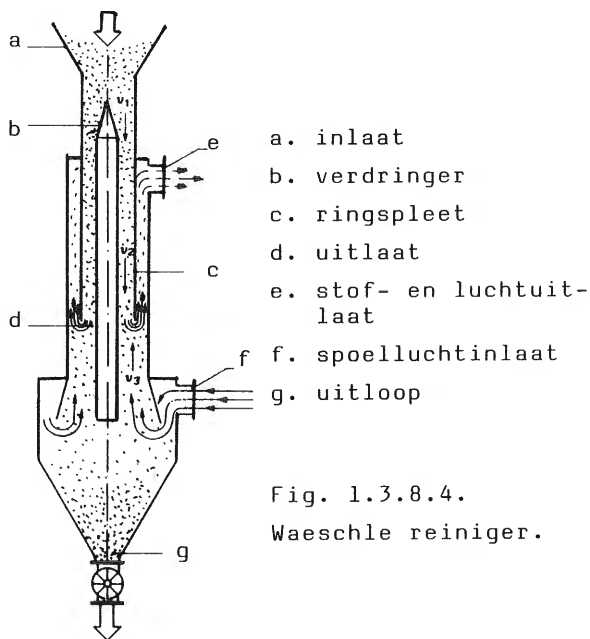


Fig. 1.3.8.4.
Waeschle reiniger.

In tabel 1.3.8.1 zijn van de besproken 4 scheidingsmethoden enkele kengetallen vermeld.

Tabel 1.3.8.1. Kengetallen van enkele granulaatreinigers.

type	d (mm)	κ	$\mu_{\max}$
horizontaal	0,3 .. 10	0,5 .. 0,8	0,5
vertikaal	0,3 .. 10	0,5 .. 0,8	0,5
cascade	0,1 .. 10	0,8	1
Waeschle	0,1 .. 15	0,9 .. 0,95	6

d = korrelgrootte van het te reinigen produkt,

μ = belading,

κ = scheidingsscherpte.

De reinigers kunnen op verschillende manieren in een systeem worden geïntegreerd. Fig. 1.3.8.5 geeft een voorbeeld van de plaatsing van een trommelzeef in combinatie met een cascaderreiniger.

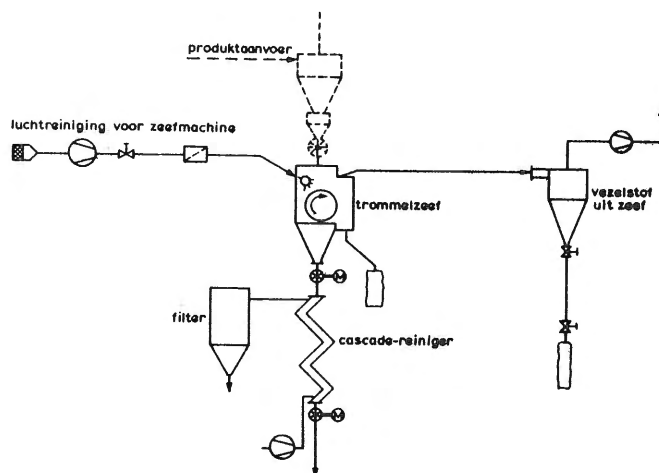


Fig. 1.3.8.5. Granulaatreiniging met voorafzeving.

In fig. 1.3.8.6 is een voorbeeld gegeven van de plaatsing van een Waeschle-reiniger. Het apparaat is aangesloten op een druktransportsysteem met een extra impulsversnelling waardoor zowel grove deeltjes als fijn stof wordt verwijderd. Het geïnstalleerd vermogen

van een dergelijke installatie bedraagt ca. 1,2 kW/ton produkt terwijl de hoeveelheid reinigingslucht tot twee keer de hoeveelheid transportlucht kan bedragen.

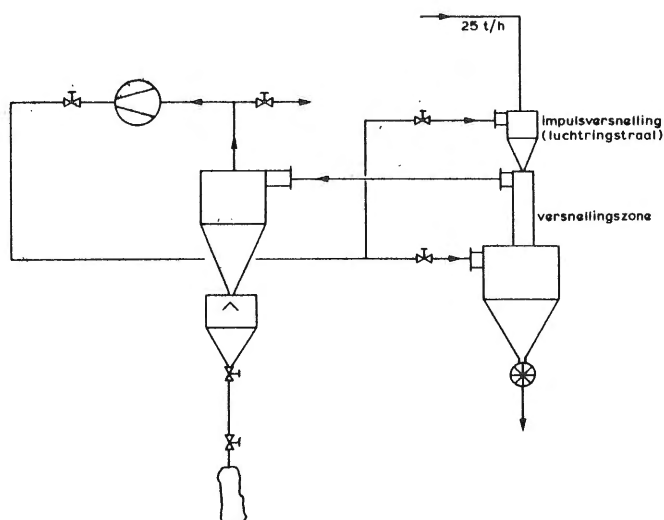


Fig. 1.3.8.6. Reiniger in een druktransportsysteem.

1.3.9. Enkele voorbeelden van pneumatische transportsystemen.

Lage druksystemen.

Het transportsysteem volgens fig.1.3.3.4 wordt o.a gebruikt voor poeders met een capaciteit van ca. 250 kg/uur. De afstand is ca. 20 m, de druk ca. 1500 mm WK en het vermogen van de motor 1,9 kW. Het systeem is zeer eenvoudig doordat bewegende delen zijn vermeden en heeft lage investeringskosten. Voor de voeding wordt een venturi, injecteur, gebruikt. In de keel van de venturi wordt de druk verlaagd tot ongeveer atmosferische druk.

Fig. 1.3.3.5 is een zuigsysteem die o.a. wordt toegepast voor aanbakkende pellets van 15.15.15 mm. De capaciteit bedraagt ca. 10 ton/uur. Als luchtbron is een meertrapsturbineblower gebruikt, onderdruk maximaal 3500 mm WK, motor 30 kW, energieverbruik 2,8 kW/ton. De lengte van de leiding bedraagt 80 m. Het systeem heeft een hoog specifiek energieverbruik. Het systeem is gekozen om een lage belading te verkrijgen te vermindering van verstopping in de leiding tengevolge van de produkteigenschappen.

Midden-druksystemen.

Het druksysteem volgens fig. 1.3.4.6 wordt o.a. gebruikt voor het transport van kunststofgranulaat. Hierbij wordt een enkeltraps Rootsblower toegepast met nakoeler. De capaciteit van het systeem bedraagt 20 ton/uur. De afstand is ca. 170 m, het vermogen van de motor 37 kW en de druk 10.000 mm WK. Dit systeem is voor het betreffende produkt gekozen omdat een continu transport noodzakelijk was hetgeen bijv. met een drukvat onmogelijk is. Het systeem ligt praktisch aan de grens van het economisch optimale betreffende investering en energieverbruik; 1,8 kW/ton.

1.3.10. Samenvatting van de pneumatische transportsystemen.

Op grond van het voorgaande kunnen de transportinstallaties als volgt worden ingedeeld:

Systeem					
Lage druk (bar)	Werkwijze	Kapaciteit (kg/uur)	Luchtbron	Snelheid (m/s)	Voeding
ca. 0,04		50 - 10.000	ventilator	20 - 40	venturi of
ca. 0,90		50 - 10.000	ventilator	15 - 30	cellerad- sluis
Toepassing: Eenvoudige, kleine systemen.					

Midden druk (bar)	Werkwijze	Kapaciteit (ton/uur)	Luchtbron	Snelheid (m/s)	Voeding
0,2 - 0,5	zuig	1 - 250	rootsblo- wer/vloei- stofring- pomp(uitz).	12-25	cellenrad- sluis, schroef.
1,3 - 3,5	druk	1 - 100	,,	12-25	drukvat, in- jecteur.
Toepassing: Voor bijna alle niet abrasieve produkten.					

Hoge druk (bar)	Werkwijze	Kapaciteit (ton/uur)	Luchtbron	Snelheid (m/s)	Voeding
8 - 9	druk	1 - 100	zuigerkompres- sor, meertraps- rootsblower, turbineschroef- kompressor.	8-20	drukvat
Toepassing: Voor abrasieve stoffen. Dit type hogedruksysteem wordt weinig toegepast in de levensmiddelenindustrie.					

1.3.11. Algemene richtlijnen voor ontwerp.

Bij het ontwerpen van pneumatische transportinstallaties moet o.a. met de volgende punten rekening worden gehouden.

- a. Vermijd bochten zoveel mogelijk. Voor een bocht met een optimale straal neemt bij bijv. verdunde fasetransport de deeltjessnelheid tot ca. 40 % van de intreesnelheid af. Na de bocht is weer een aanzienlijke versnelling nodig.
- b. Maak bij verdunde fasetransport de rechte lengte vóór een bocht lang genoeg, zodat de korrels voldoende versneld zijn voor ze een bocht ingaan. In de regel is 10 m ruim voldoende.
- c. Kies de straal van een bocht ruim: ca. 8 D is gebruikelijk.
- d. Maak bochten voor stijgleidingen uitneembaar, i.v.m. mogelijke verstoppingen.
- e. Beperk het aantal appendages in de transportleiding zoveel mogelijk.
- f. Leg bij voorkeur geen transportleidingen onder een hoek van 45° .
- g. Plaats een stijgleiding bij voorkeur aan het begin i.p.v. aan het eind van een horizontaal traject.
- h. Probeer het aantal keuze-mogelijkheden wat vertrekpunten en bestemmingen betreft zoveel mogelijk te beperken. Veel mogelijkheden maken een transportsysteem duur, zowel door de meer benodigde apparatuur, als door de veel gecompliceerder automatische besturing.

1.3.12. Pneumatisch transport door middel van airslides.

De apparatuur waarmee pneumatisch transport door middel van "airslides" kan worden uitgevoerd bestaat uit licht hellend opgestelde goten met beluchte bodem. Door beluchting kan fluïdisatie van het te transporteren materiaal worden verkregen waardoor de wrijving praktisch wordt uitgeschakeld. Het produkt gedraagt zich als een vloeistof. Met dit type transport kunnen hoge beladingen

worden verkregen, fig.1.4.1.

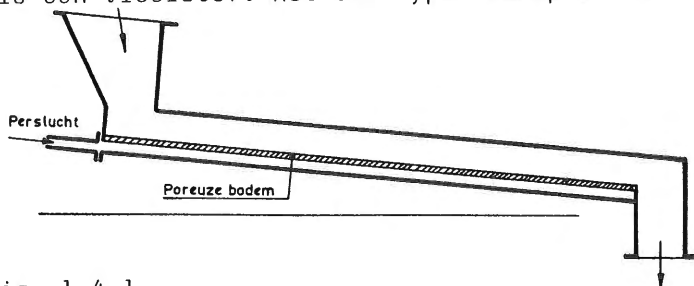


Fig. 1.4.1.

1.4. Hydraulisch transport.

Onder hydraulisch transport wordt het verplaatsen van vaste stoffen met behulp van vloeistof, gewoonlijk water, door pijpleidingen of goten verstaan.

Het grote verschil tussen hydraulisch- en pneumatischtransport wordt veroorzaakt door het grote verschil in fysische eigenschappen tussen gas en vloeistof. Bij hydraulisch transport zullen de vloeistofsnelheden veel lager zijn en het verschil tussen de vloeistof- en deeltjessnelheid veel kleiner. Bij hydraulisch transport is er een groot verschil tussen vertikaal en horizontaal transport. Hydraulischtransport door leidingen komt o.a. voor bij het transport van suspensies als bijv. zetmeel en zand.

Bij transport door open goten wordt vaak gebruik gemaakt van goten met een halfronde doorsnede, om het waterverbruik te verminderen, die liggen onder een helling van 1 op 10 of 1 op 12. Een voorbeeld is het transport van suikerbieten van de losplaats naar de fabriek. Verder wordt dit transport, vaak in combinatie met mechanische hulpmiddelen, in wasmachines toegepast voor bijv. aardappelen, bieten, groenten en fruit.

Zowel voor horizontaal als vertikaal transport wordt voor het berekenen van de drukverliezen verwezen naar deel 1, stromingsleer.

1.5. Energieverbruik.

Het energieverbruik voor het transport van vaste stoffen en fluïda per massa-eenheid, loopt bij de verschillende transportsystemen nogal uiteen. Dit wordt vooral veroorzaakt door de optredende wrijving, die bij de verschillende systemen ongelijk is. Deze wrijving hangt af van een aantal factoren, zoals transportweg, transportmiddel en transportsnelheid.

Zowel bij intern transport in bedrijven als extern transport, over grote afstanden, zijn er een groot aantal mogelijkheden om het transport te realiseren. De keuze van het transportmiddel wordt gemaakt aan de hand van een aantal criteria, die van geval tot geval verschillend zullen zijn. De kosten zijn hierbij vaak de bepalende factor, die bestaan uit investerings- en bedrijfskosten, waarvan de energiekosten een belangrijk deel kunnen zijn. Het energieverbruik kan daarom bij de keuze van het transportsysteem een wezenlijke rol gaan spelen. Een methode om het energieverbruik van de verschillen-

de transportmiddelen onderling te kunnen vergelijken kan bij de keuze van een transportmiddel van veel nut zijn. Eén van de mogelijkheden hiertoe biedt de zgn. "transportverliesfactor".

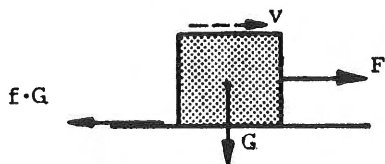
De transportverliesfactor.

Bij transport kan men spreken van een transportprestatie, indien een massa met een bepaald gewicht over een bepaalde afstand is verplaatst. De transportprestatie is dan gelijk aan gewicht x afstand.

Door de optredende wrijvingsverliezen is, voor het verrichten van een transportprestatie, in het algemeen arbeid nodig. De transportverliesfactor, f_T , kan nu als volgt worden gedefinieerd:

$$f_T = \frac{\text{benodigde arbeid tengevolge van wrijvingsverliezen}}{\text{transportprestatie}} \quad (1.5.1)$$

De eenvoudigste vorm van transport is het slepen van een last over de bodem, fig. 1.5.1. Is het gewicht G en de benodigde trekkracht F , dan is volgens de definitie, bij transport over een horizontaal vlak de transportverliesfactor:



$$f_T = \frac{F \cdot L}{G \cdot L} = \frac{F \cdot L}{m \cdot g \cdot L} = \frac{F}{G} \quad (1.5.2)$$

$G = \text{massa (m)} \times \text{versnelling van de zwaartekracht (g)}.$

Fig. 1.5.1.

In dit geval is f_T gelijk aan de wrijvingscoëfficiënt f tussen last en bodem.

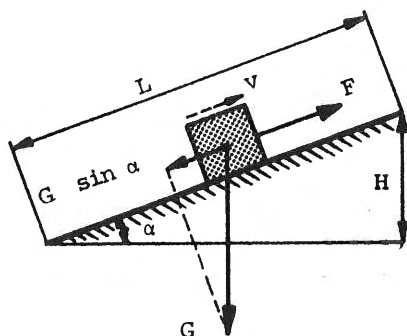
Is v de constante transportsnelheid, dan is het benodigde vermogen $P = F \cdot v$ (Watt), zodat de transportverliesfactor ook kan worden uitgedrukt als volgt:

$$f_T = \frac{P}{m \cdot g \cdot v} \quad (1.5.3)$$

Is het transport niet horizontaal, maar bestaat er een hoogteverschil, H , tussen begin- en eindpunt, dan moet de hefarbeid van de totale verrichte arbeid worden afgetrokken. Uit fig. 1.5.2 volgt voor de transportverliesfactor:

$$f_T = \frac{P - G \sin \alpha \cdot v}{G \cdot v} = \frac{P}{G \cdot v} - \sin \alpha \quad (1.5.4)$$

of



$$f_T = \frac{P}{m \cdot g \cdot v} - \frac{H}{L} \quad (1.5.5)$$

Fig. 1.5.2.

Vergelijking 1.5.5 is algemeen geldig voor het met constante snelheid v verplaatsen van lasten met een gewicht G over een afstand L waarbij een vermogen P nodig is. De waarde van G is uitsluitend het gewicht van de transportlast; het gewicht van het betreffende transportmiddel mag hier niet bij worden opgeteld. Het hoogteverschil is positief indien het eindpunt hoger is dan het beginpunt en negatief in het omgekeerde geval.

Hebbenwe te maken met continue materiaalstromen, zoals bij een bandtransporteur, dan is meestal gegeven de lengte en de capaciteit. Onder het laatste wordt verstaan de maximale hoeveelheid materiaal die per tijdseenheid kan worden getransporteerd.

Is L de lengte van de transporteur en m de massa per meter van de volgeladen transporteur dan is de massa die op de transporteur ligt:

$$m = L \cdot \text{massa/meter (kg)} \quad (1.5.6)$$

De capaciteit van de transporteur is:

$$C_m = \text{massa/meter} \cdot v \text{ (kg/s)} \quad (1.5.7)$$

Substitutie van vergelijking 1.5.6 en 1.5.7 in vergelijking 1.5.5 geeft:

$$f_T = \frac{P}{C_m \cdot g \cdot L} - \frac{H}{L} \quad (1.5.8)$$

De vergelijkingen 1.5.2, 1.5.5 en 1.5.8 kunnen worden gebruikt om de voor het transport benodigde energie van verschillende apparaten, door middel van de f_T -faktor, met elkaar te vergelijken.

Boven genoemde vergelijkingen gaan op indien:

- wordt uitgegaan van volbelaste transportmiddelen, dus werkend op volle capaciteit;
- de transportverliesfactoren worden betrokken op het benodigde mechanisch aandrijfvermogen.

In fig. 1.5.3. zijn grafisch, op logarithmische schaal, globale waarden vermeld van de transportverliesfactoren van een aantal veel gebruikte transportmiddelen.

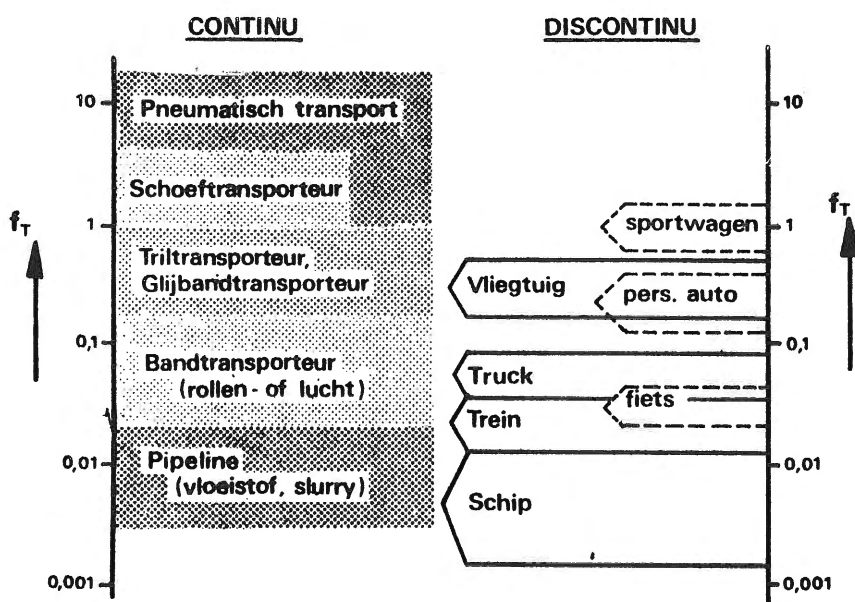


Fig. 1.5.3. f_T -waarden van een aantal veel gebruikte transportmiddelen.

Uit de figuur volgt dat het transport per schip of pijpleiding de laagste verliesfactoren geven. De waarden gelden voor de zgn.

economische snelheid, de snelheid waarbij de totale kosten het laagst zijn. Voor leidingen is dit ongeveer omgekeerd evenredig met de diameter, zodat de leidingen met de grootste diameter de laagste transportverliesfactoren geven.

De grootste energieverbruikers zijn de schroeftransporteur en de pneumatische transportsystemen. Globaal kan worden gesteld dat 100 meter pneumatisch transport ongeveer evenveel energie vraagt per massa-eenheid, als 100 km transport per schip.

Uit het bovenstaande zou de conclusie kunnen worden getrokken dat pneumatisch transport economisch niet aantrekkelijk is. Daar pneumatisch transport in andere opzichten kosten besparend kan zijn t.o.v. andere transportsystemen is het zelfs denkbaar dat de totale bedrijfskosten in vergelijking met andere systemen het laagst uitvallen. Een voorbeeld van kostenberekening vinden we in fig. 1.5.4. Uit dit voorbeeld blijkt dat er bij gebruik van een pneumatisch systeem zodanig op de arbeidskosten kan worden bespaard dat het pneumatisch transport er in dit voorbeeld als meest verantwoorde keuze uitkomt.

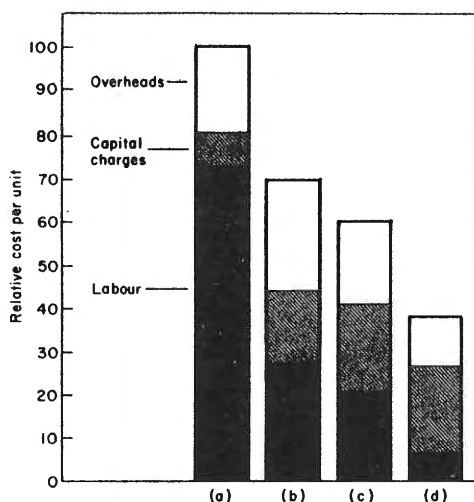


Fig. 1.5.4. Vergelijking van de transportkosten van meel in een fabriek met een capaciteit van 75 ton/uur.

- Meel wordt in zakken verpakt en daarna door mankracht getransporteerd.
- Meel wordt in zakken verpakt en daarna mechanisch getransporteerd.
- 50% van het meel wordt als onder b behandeld en 50% pneumatisch getransporteerd (opslag in bulk).

d. 100% van de meelprodukten wordt pneumatisch getransporteerd en in bulk opgeslagen.

2.0. Opslag van vaste stoffen (silo's).

Produkten waarvan de kwaliteit nadelig wordt beïnvloed door atmosferische omstandigheden zal men bij voorkeur niet opslaan in de buitenlucht. Deze produkten kan men beter opslaan onder een afdak zodat wegwaaien of verslechtering van de kwaliteit door wisselingen in temperatuur en vochtigheid, veel minder is. In de levensmiddelenindustrie hebben we vaak te maken met produkten die gevoelig zijn voor wisselende atmosferische omstandigheden terwijl daarnaast de te verwerken hoeveelheden vaak groot zijn. Voor de opslag van grondstoffen, halfprodukten en eindprodukten maakt men om genoemde redenen veel gebruik van afgesloten ruimten. Eén van de methoden, die veel wordt toegepast voor opslag van produkten, is de silo.

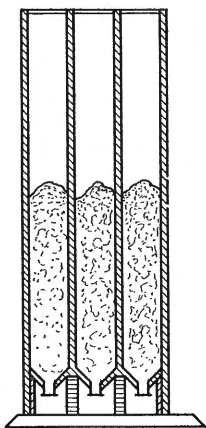


Fig. 2.1. Silo's

Moderne silo's van grote afmetingen zijn meestal uitgevoerd in gewapend beton en gebouwd volgens een eenvoudige werkwijze (glijbekistingssysteem). Kleinere silo's worden vaak van staal gemaakt. Silo's worden van boven gevoed. De afvoer vindt plaats via een opening aan de onderkant.

Silo's kan men globaal indelen naar de type stroming die in de silo tijdens het lossen optreedt. Onderscheid kan worden gemaakt tussen massastroming (Eng. Mass-flow) en trechter(kern)stroming (Eng. Funnel-flow), zie fig. 2.2 a en b.

Bij een massastroomsilo is al het materiaal in de silo in beweging

Silo's bestaan meestal uit een aantal cellen van ronde, vier-, zes- of achtkantige vorm, die volgens een bepaald systeem bij elkaar zijn geplaatst, fig. 2.1. Een silo kan worden verdeeld in een zgn. trog, het bovenste gedeelte met verticale wanden en een trechter, het onderste gedeelte waarvan tenminste één van de wanden schuin toeloopt.

In de levensmiddelenindustrie worden de silo's gebruikt voor o.a. de opslag van melkpoeder, weipoeder, zetmeel, koffie, suiker, eigeelpoeder, soja- en kokosschroot, graansoorten, meelsoorten en veevoeders.

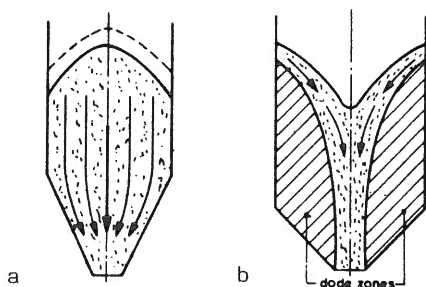


Fig. 2.2. Stromingspatronen in silo's.

- a. massastroming,
- b. kernstroming.

wanneer een gedeelte van het materiaal uitstroomt. Deze uitstroming vindt plaats indien de wanden voldoende stijf en glad zijn.

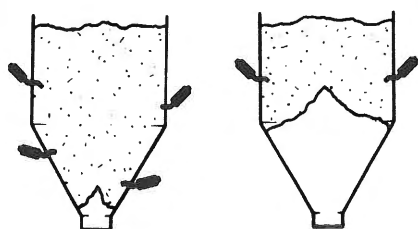
Bij een massastroom is de stroming gelijkvormig en onafhankelijk van de hoogte van de vaste stof in de silo. Kanaalvorming en een golvende uitstroming zijn afwezig. De snelheden in de silo zijn laag daar het materiaal over de gehele doorsnede van de silo stroomt.

De druk op de bodem en de massa is relatief klein en in een horizontale laag overal gelijk, waardoor nagenoeg geen samendrukken (consolidatie) van het stortgoed optreedt. Er zijn in een massastroom silo geen dode hoeken terwijl we te maken hebben met een stromingsvolgorde van "first in - first out", fig. 2.2 a.

Door genoemde eigenschappen zijn massastroom silo's zeer geschikt voor opslag van poeders, welke gemakkelijk fluidiseren, voor vaste stoffen, die bij opslag samenbakken, en voor bederf gevoelige producten.

Wanneer de omstandigheden van massastroming niet aanwezig zijn zal trechter(kern)stroming optreden. Deze stroming komt in diverse vormen voor, vanaf het bestaan van kleine dode zones tot het uiterste geval, waarin alleen boven de uitstroomopening nog een stroomkanaal met nagenoeg vertikale wanden blijkt te bestaan. De vaste stof zal hierdoor gaan stromen. Het kanaal verwijdt zich naar boven cirkelvormig en is omgeven door niet stromend materiaal, fig. 2.2 b. Wanneer het kanaal leeg is zal het opnieuw worden gevuld. Het niveau van het materiaal in het kanaal fluctueert soms tussen de top en de uitlaat van het kanaal, waardoor een sterk onregelmatige stroming ontstaat. We hebben hier te maken met een zgn. "first in - last out" stromings volgorde. We spreken van een silo met trechter(kern)stroming of "funnel flow".

Naast de keuze van het type stroming is bij het ontwerp belangrijk, dat een storingsvrije werking kan worden gegarandeerd.



brugvorming boogvorming
Fig. 2.3.

Bij cohesieve stortgoederen is de belangrijkste storingsbron het optreden van min of meer stabiele brug- of boogvorming, waardoor een onregelmatige stroming of in het ergste geval een totale blokkering van de stroom kan ontstaan.

De massastroomsilo zal men in veel gevallen nastreven en is noodzakelijk indien aan bederf onderhevige goederen moeten worden opgeslagen. Toch geeft men om economische redenen vaak de voorkeur aan een silo met trechterstroming. Om ook in deze silo's de vaak noodzakelijke massastroom te verkrijgen past men allerlei hulpmiddelen toe, waarover later meer.

Om de volgende redenen wordt aan een silo met trechterstroming de voorkeur gegeven:

- a. De massastroomsilo neemt meer ruimte in.
- b. De massastroomsilo is duurder door een grotere bouwhoogte (steilere uitlooptrechter) en een betere afwerking van de wanden.
- c. Wanneer de silo niet nodig is om een constante produktstroom te verkrijgen.
- d. Wanneer de silo wordt gebruikt voor bewaring op lange termijn, bijv. voor graan.

Het verschil in eigenschappen tussen een massastroom- en een trechterstroomsilo kunnen als volgt worden samengevat.

	Massastroomsilo	Trechterstroomsilo
1.	Deeltjes mogen iets samengeklonterd zijn tijdens lossen.	Deeltjes mogen niet samenklonteren.
2.	Stromingsvolgorde: "first in first out".	Stromingsvolgorde: "first in last out".
3.	Stroming is uniform.	Stroming is onregelmatig t.g.v o.a. brugvorming.
4.	Massastroom per tijdseenheid	

Massastroomsilo	Trechterstroomsilo
en massastroomdichtheid zijn constant. De snelheden in de silo zijn laag.	Produkt heeft neiging tot plaatselijke momentane brugvorming, waardoor lege ruimten in de silo ontstaan. De massastroomdichtheid varieert. De snelheden zijn hoog.
5. Niveaumeters werken betrouwbaar.	Niveaumeters moeten op een kritische plaats worden gemonteerd om een goede werking te garanderen.
6. Het produkt kan niet achterblijven in dode hoeken waar bederf kan optreden.	Het produkt kan achterblijven in dode hoeken totdat de gehele silo wordt gereinigd.
7. De silo kan zodanig worden ontworpen zodat een produkt dat samenklonterd kan worden opgeslagen of kan dienst doen als menger.	Voor grote vaste deeltjes wordt een regelmatige stroming verkregen.

Ontwerpen van silo's.

Bij het ontwerpen van silo's kunnen drie aspecten worden onderscheiden:

- a. Vorm en afmeting van de silo.
- b. Eigenschappen van het produkt.
- c. Krachten op de silowand.

Ad. a.

De grootte van een silo wordt in het algemeen bepaald door de snelheid waarmee de silo met produkt wordt gevuld en de snelheid (frequentie) waarmee het produkt wordt afgenomen. Wanneer deze snelheden bekend zijn, kan men de grootte van de opslag vaststellen.

Tevens kan men voor de keuze komen te staan of er één of twee of meerdere kleinere silo's moeten worden gebouwd. Hierbij kunnen de volgende vragen aan de orde komen:

- a. Hoeveel verschillende produkten moeten worden opgeslagen?
- b. Hoelang duurt het voordat de analyse van het produkt bekend is en dit wordt afgegeven voor de afvoer uit de silo?
- c. Fungeert de silo als buffer tussen twee processtappen?
- d. Wat is de beschikbare ruimte voor de silo en de toelaatbare grondbelasting?

Daarnaast zal de uiteindelijke keuze sterk afhangen van de lokale omstandigheden en van economische factoren.

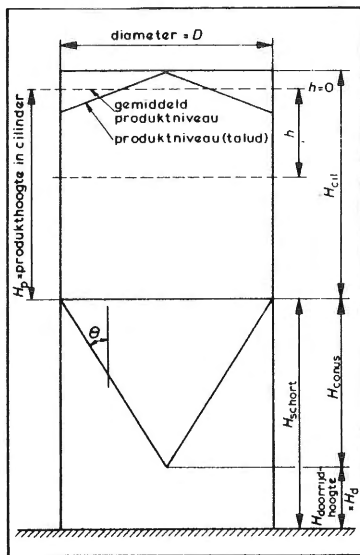


Fig. 2.4. Analyse van een silo.

Liggen de afmetingen vast, dan zal nog moeten worden gekozen voor een bepaalde geometrie, o.a. de hoogte-diameter verhouding (H/D verhouding). De H/D verhouding is afhankelijk van de conushoek θ , zie fig. 2.4. Kiest men de H/D - of oppervlakte-volume-verhouding optimaal dan kan met een minimum aan constructiemateriaal een maximum aan volume worden verkregen. De geometrie wordt echter vooral bepaald door de fabricagekosten van bepaalde onderdelen van de silo zoals de conus. Ook de diameter van de trog kan bepalend zijn. Moet de trog worden getransporteerd dan kan een te grote diameter moeilijkheden opleveren bij transport.

Ad. b.

De kennis van de eigenschappen van het produkt is nodig om het stromingsgedrag in de silo en nabij de uitstroomopening te kunnen voorspellen en om inzicht te krijgen in de krachten die op de silowand worden uitgeoefend.

De volgende eigenschappen van het produkt spelen een belangrijke rol bij het bepalen van het stromingsgedrag.

- massadichtheid; (ρ_b) massa van een stortgoed, gedeeld door het totaalvolume van dat stortgoed. De massa van het medium in de tussenruimte wordt niet meegeteld;
- gemiddelde deeltjesgrootte;
- vorm van de deeltjes;
- de verhouding van de spanning die het materiaal ondervindt en de spanning die het materiaal kan verdragen (de zgn. flow-functie (ffc))

Een silo dient zodanig te worden ontworpen dat een storingsvrije werking kan worden gegarandeerd. Bij cohesieve stortgoederen is de belangrijkste storingsbron het optreden van een min of meer stabiele brugvorming, waardoor een regelmatige stroming of in het ergste geval een totale blokkering van de stroom kan ontstaan. Hoe groter de cohesie, hoe groter de kans op brugvorming.

Onder cohesie, C (N/m^2), wordt de schuifspanning verstaan in een zwijkvlak van een stortgoed tijdens kwasi-statisch bezwijken terwijl er geen normaalspanning als gevolg van externe krachten op dat vlak werkt.

Voor cohesievrije produkten zoals bijv. droog zand, koffiebonen enz. zal in het algemeen nooit een brug ontstaan.

Een stortgoed zal vrij uit een silo stromen wanneer de spanningen

werkend op een "brug", die zich ergens in de omgeving van de uitlaat kan bevinden, zie fig. 2.5., groter zijn dan wat deze brug kan doorstaan.

De spanningen die de brug kunnen doorstaan zijn een functie van:

- de stortgoed eigenschappen,
- de silogeometrie,
- de voorgeschiedenis van het stortgoed.

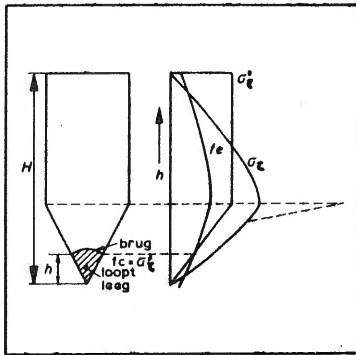


Fig. 2.5. Schematisch verloop van de spanningen.

Met punt c worden de invloeden bedoeld waaraan het stortgoed blootgesteld geweest is tijdens het verblijf in de silo als:

- het drukverloop in het stortgoed tijdens de beweging van boven naar beneden in de silo,
- de verblijftijd in de silo,
- de vochtigheid en de temperatuur van het stortgoed.
- het feit of het lossen continu of discontinu geschiedt.

Om te kunnen bepalen wanneer het bezwijken van een brug optreedt, zal men de grootste spanningen in deze brug moeten kennen. Deze spanningen kunnen volgens verschillende meetmethoden worden bepaald.

Bezwijkbeschouwingen.

Wanneer een stortgoed aan spanningen wordt onderworpen kan dit bij een bepaalde spanningstoestand tot plastisch vervormen van de korrelmassa leiden. Hierbij zullen in het algemeen niet de afzonderlijke korrels worden gedeformeerd, maar vindt afschuiving in het stortgoed plaats langs een of meer bezwijkvlakken. Het is juist dit bezwijken van korrelmassa's waarin men geïnteresseerd is bij de opslag van stortgoed, daar een continu bezwijken van het stortgoed de stroming ervan mogelijk maakt.

Hoewel de eigenschappen van het stortgoed sterk zullen samenhangen met die van de afzonderlijke korrels is het gebruikelijk uit te gaan van het gedrag van een zeer grote hoeveelheid korrels en deze als een elastisch-plastisch continuüm te beschouwen.

Door diverse onderzoekers zijn criteria opgesteld die aangeven wat de spanningsvoorwaarden zijn die tot bezwijken aanleiding geven. Hierbij wordt gebruik gemaakt van Mohrcirkels. Deze cirkels worden weergegeven in een diagram met de schuifspanning, τ , als functie van de normaalspanning, σ .

De Mohrcirkel geeft in dit diagram de "meetkundige plaats" weer van alle mogelijke spanningstoestanden op vlakjes in alle mogelijke richtingen van een elementair deeltje materiaal, zie fig. 2.6.

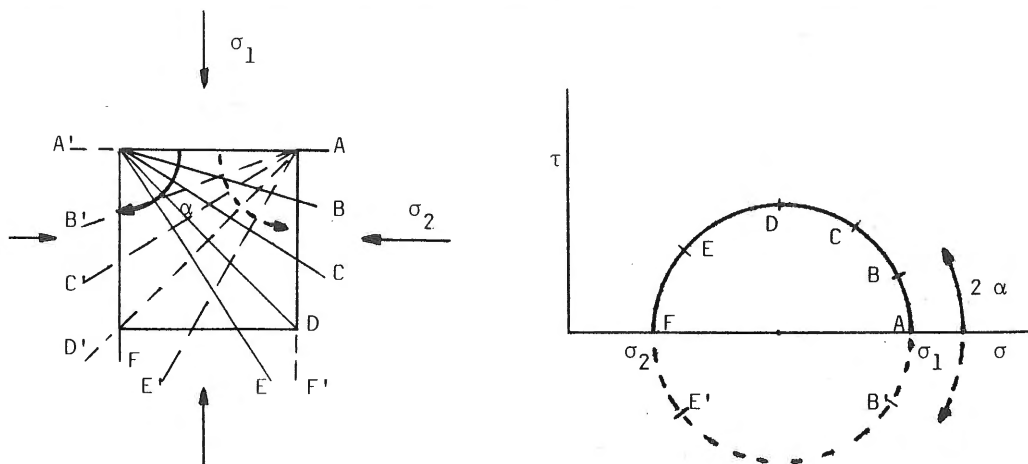


Fig. 2.6. De richting van de spanningen in een elementair deeltje en het corresponderende Mohr-diagram.

Als voorbeeld nemen we een elementje met hoofdspanning $\sigma_1 > \sigma_2$. Bij bekende σ_1 en σ_2 ligt de Mohrcirkel vast. Wordt uitgegaan van het vlak waarop σ_1 werkt, dan kan door dit vlak te roteren over de hoek α , in de Mohrcirkel de spanningen op dit geroteerde vlak worden gevonden, door deze cirkel over de hoek 2α te draaien. De punten in de cirkel, zowel als de vlakken, kunnen worden gespiegeld, daar in werkelijkheid een hele cirkel kan worden beschouwd.

Volgens Mohr-Coulomb bestaat er een recht-evenredig verband tussen de normaalspanning, σ , en de schuifspanning, τ , in een afschuifvlak, fig.2.7, ($\tau = C + \sigma \tan \alpha$).

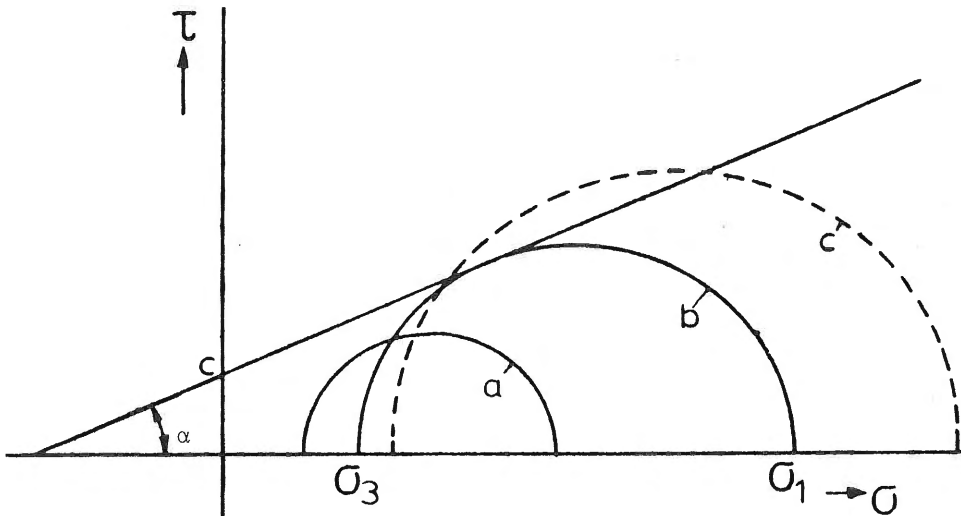


Fig. 2.7. Mohr-Coulomb bezwijkkriterium.

Het Mohr-Coulomb criterium blijkt in de praktijk alleen te voldoen voor goed stromende materialen die geen of weinig cohesie vertonen, bijv. kunststofkorrels, granen, zaden, droogzand enz.

Voor cohesief stortgoed wordt veel gebruik gemaakt van het door Jenike c.s. opgestelde bezwijkkriterium. In een σ - τ diagram kan dit bezwijkgedrag worden weergegeven als een serie bezwijklijnen BL's, waarvan er een in fig. 2.8 is weergegeven. De parameter van de bezwijklijnen is de bijbehorende verstevigingsspanning σ_c , waaraan het stortgoed onderworpen is geweest. Een andere waarde van σ_c zal tot een andere bezwijklijn leiden, zodat afhankelijk van σ_c een serie bezwijklijnen ontstaat die het bezwijkgedrag van het be-

treffende stortgoed beschrijft.

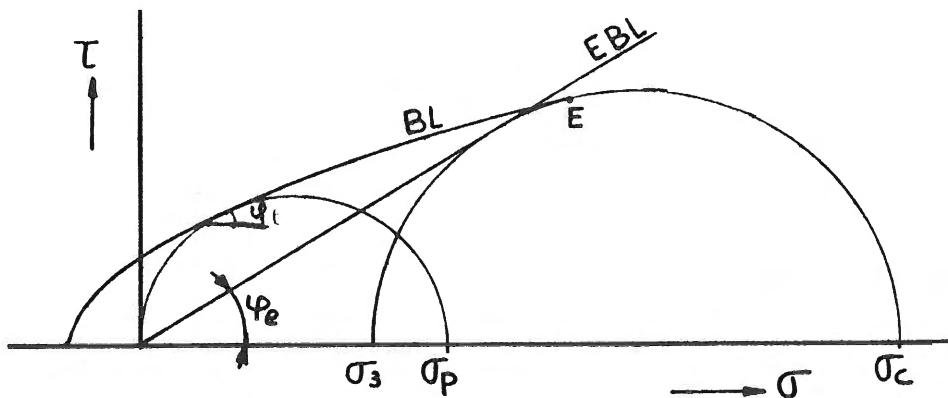


Fig. 2.8. Bezwijkbedrag van cohesief stortgoed.

De betekenis van de bezwijklijnen kan als volgt uiteengezet worden. Voor spanningstoestanden weergegeven door Mohr-cirkels, die onder de bezwijklijn liggen gedraagt het materiaal zich stijf of elastisch. Bij spanningstoestanden met Mohr cirkels, die raken aan de bezwijklijn, zal plaatselijke deformatie optreden, waarbij een expansie van het monster optreedt. Spanningscirkels die de bezwijklijn snijden zijn theoretisch niet mogelijk.

De spanningscirkel, die gaat door de verstevigingsspanning σ_c en de bezwijklijn raakt in haar eindpunt E, geeft de spanningstoestand weer waarbij een continue vervorming van het stortgoed mogelijk is, zonder dat expansie of contractie van het materiaal hoeft op te treden. De bezwijklijnen beschrijven de toestand van beginnend stromen waarbij expansie moet optreden; de eindpunten geven de zgn. stationaire stroming weer.

Experimenteel is gebleken dat tijdens stationaire stroming een constant verband bestaat tussen de grootste en de kleinste hoofdsparing, σ_c resp. σ_3 , nl.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \varphi_e}{1 - \sin \varphi_e} \quad (2.1)$$

Dit is een vergelijking van een rechte lijn, die gaat door de oorsprong en raakt aan de cirkel in het $\tau - \sigma$ diagram, lijn EBL (ef-fectievekbezwijklijn), fig 2.8. De hoek φ_e is de invendige wrijvingshoek van het stortgoed.

Bepaling van de minimale uitstroomopening en de stromingstoestand.

Voor het bepalen van de minimale uitstroomopening gaan we uit van het zgn. "flow-no-flow" criterium. Dit criterium stelt dat geen stabiele brug kan ontstaan wanneer de grootste spanning die op de brug werkt, σ'_c , groter is dan de druksterkte, σ_p , van het materiaal in de brug. In fig. 2.9 is dit het geval voor $h > h_{kr}$, met een minimale waarde voor d_{kr} in de uitlaat van de silo.

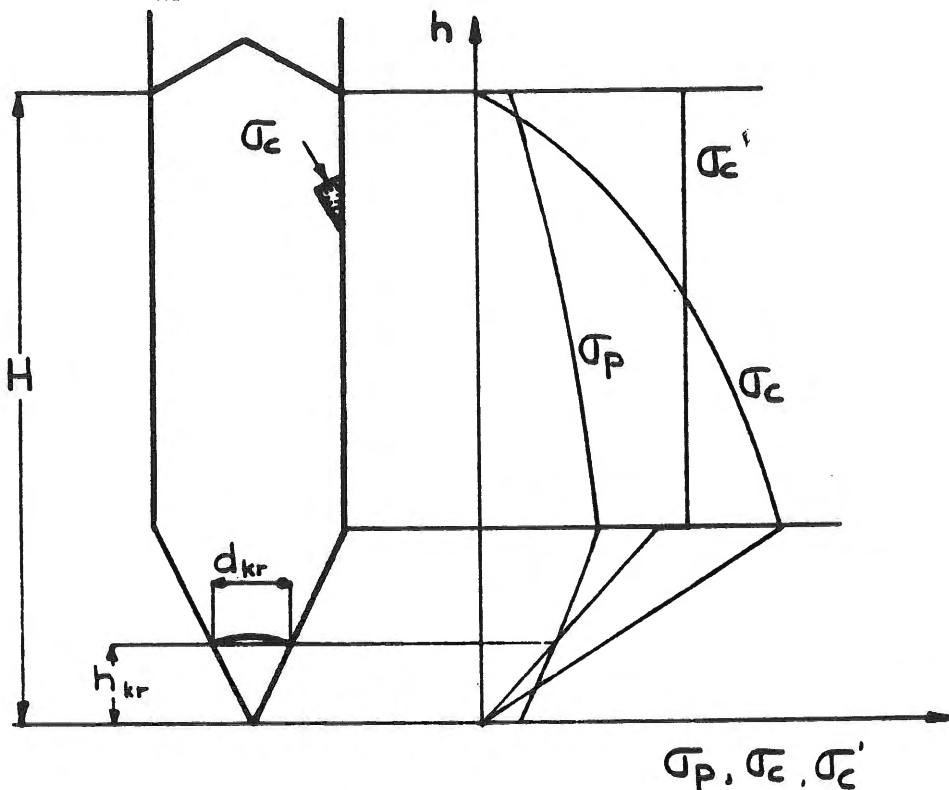


Fig. 2.9. Schematisch verloop van de spanningen σ_c , σ'_c en σ_p over de hoogte h .

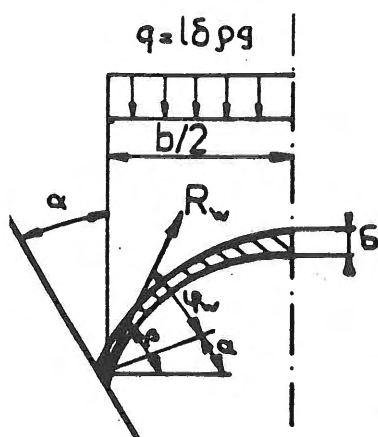
Het verband tussen σ_c en σ_p is via de door Jenike voorgestelde meetprocedure, met behulp van de zgn. Jenike- tester, zie pag. 71 , te bepalen. De grootte van σ_p is afhankelijk van het soort stortgoed. Voor cohesievrije materialen is de σ_p -waarde vrijwel te verwaarlozen. Het quotient σ'_c/σ_p of σ'_c/f_c (zie fig. 2.5 en 2.9) wordt "flowfunctie", ffc , genoemd. Hoe kleiner ffc des te gemakkelijker het produkt bezwijkt en des te beter het zal stromen. In het algemeen kan gesteld worden:

- $ff_c \leq 2$: stortgoed cohesief, geen stroming mogelijk,
 $ff_c > 2$: stortgoed cohesief; om het materiaal te laten stromen
 $ff_c \leq 4$ zijn hulpmiddelen nodig, zie hoofdstuk 2.1.
 $ff_c > 10$: materiaal is vrijstromend.

In fig. 2.10 is een brug met de krachten die erop werken weergegeven, voor een vlakke uitstroomopening. Om het verband tussen de grootste spanning, σ'_c , in een brug en de bunkerafmetingen ter plaatse van de brug te kunnen bepalen zijn de volgende veronderstellingen gedaan:

- de uitstroomopening is symmetrisch;
- vóór- en achterwand nemen geen krachten op;
- bovenliggend stortgoed oefent geen kracht op de brug uit;
- de brug is paraboolvormig;
- de brugdikte, in verticale richting gemeten, is constant, zodat de belasting door eigen gewicht over de breedte constant is;
- de brugdikte is gering;
- de brug kan geen buigbelasting opnemen.

Uit het verticale evenwicht volgt:



$$R_w \sin \beta = \frac{1}{2} \rho_b g L b \delta \quad \text{met}$$

R_w is reactie van de wand, ρ_b is stortmassa, g is versnelling van de zwaartekracht, L is lengte bunkeropening en δ is brugdikte.

De grootste hoofdspanning (σ'_c) in de brug bedraagt:

$$\sigma'_c = \frac{R_w}{L \cdot \delta \cos \beta} \quad \text{waaruit volgt:}$$

$$\sigma'_c = \frac{\rho_b g}{\sin 2\beta} \cdot b$$

Deze spanning is zo klein mogelijk voor $\sin 2\beta = 1$. Vereenvoudigend kan deze waarde veilig worden gebruikt. Daar voor bezwijken van de brug moet gelden $\sigma'_c > \sigma'_{ckr}$ volgt:

$$b > \frac{1}{\rho_b \cdot g} \cdot \sigma'_{ckr}$$

Fig. 2.10. Brug met de hierop werkende krachten.

Daar β constant is voor een bepaalde silo-stortgoed combinatie volgt uit bovenstaande dat σ'_c lineair afhankelijk is van de uitstroomopening b . Voor een bepaalde konischhoek blijkt σ_c eveneens lineair

te zijn met b . Omdat σ_c en σ'_c voor vaste waarden van α , φ_e en φ_w lineair afhankelijk zijn van b moet hun verhouding constant zijn. Deze verhouding, $\sigma_c/\sigma'_c = ff_d$ staat bekend als de "flowfactor". Deze factor is voor verschillende waarden van φ_e , φ_w en α 's bekend, zie als voorbeeld fig. 2.11.

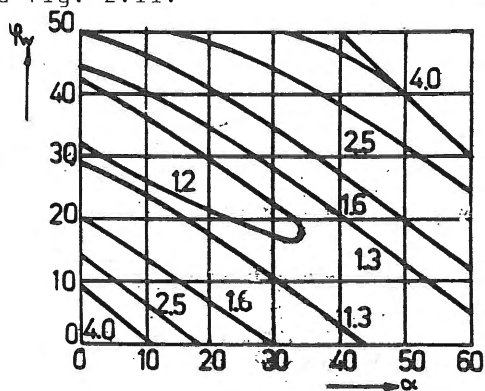
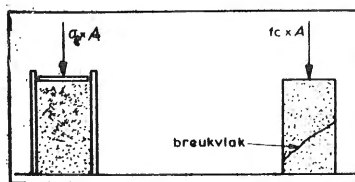


Fig. 2.11 "Flowfactors" voor $\varphi_e = 50^\circ$, bij vlakke stromingstoestand.

De "flowfactor" is een maat voor de stromingseigenschappen van een silo. Hoe hoger de ff_d waarde, des te beter de silo. Zoals uit bovenstaande blijkt wordt de ff_d -waarde zowel bepaald door de geometrie van de silo als de eigenschappen van het stortgoed.

Het begrip "flowfunctie" kan als volgt worden geïllustreerd met een gedachtenexperiment.

Wanneer men in een cilinder een stortgoed brengt en het stortgoed met een bepaalde spanning σ_c samendrukt (consolideert) dan zal wanneer men de cilinderwand wegneemt en er co-



hesiekrachten werkzaam zijn, een stortgoedcilinder blijven staan die een zekere sterkte heeft, fig. 2.12. Brengt men op de, van zijn ondersteuningcilinder ontdane stortgoedcilinder, een druk aan die maar langzaam vergroot, dan zal bij een bepaalde druk f_c (σ_p), die cilinder bezwijken.

De massastroming wordt bepaald door de helling van de uitloop, α , de effectieve inwendige wrijvingshoek, φ_e , van het stortgoed en de wandwrijvingshoek, φ_w , tussen het stortgoed en de wand. Met de theorie van Jenike is de grenswaarde van α voor massastroming te bepalen. Fig. 2.13 geeft de grenswaarden weer voor een vlakke en een

axiaalsymmetrische stromingstoestand weer.

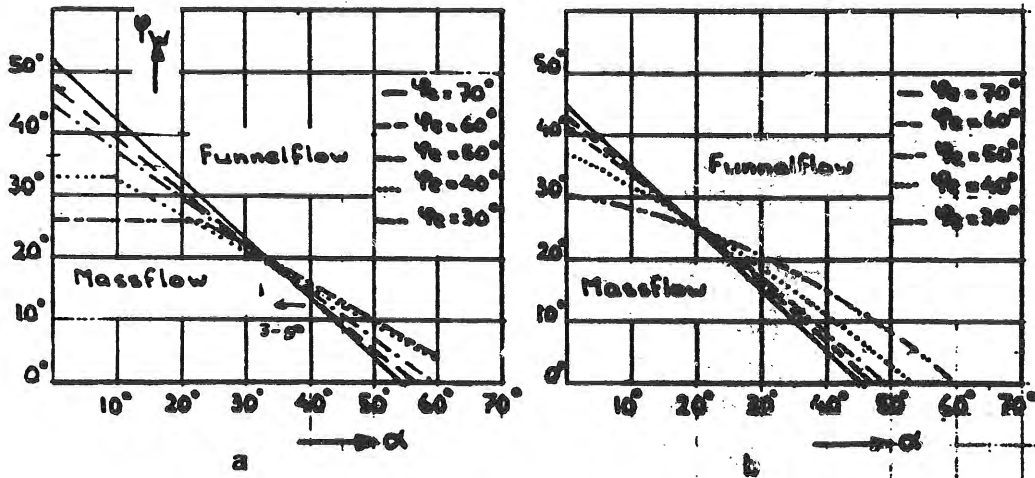


Fig. 2.13. Grenzen voor massastroming bij vlakke stromingstoestand.

Grenzen voor massastroming bij axiaalsymmetrische stromingstoestand.

Door σ'_c en σ_p als functie van σ_c uit te zetten kan σ'_{ckr} worden bepaald, zie als voorbeeld fig. 2.14.

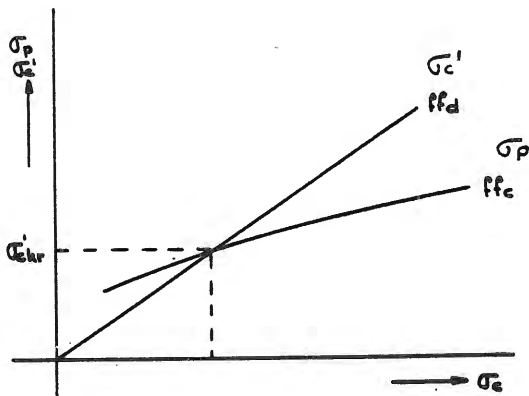


Fig. 2.14. Bepaling van σ'_{ckr} .

Bepaling van de stortgoedeigenschappen.

Voor de experimentele bepaling van de bezwijklijnen is een aantal apparaten beschikbaar waarvan de belangrijkste, de de Jenike afschuifcel, in het kort zal worden besproken.

De Jenike afschuifcel.

Met behulp van zgn. afschuifsterkte metingen, "shearcell-metingen", is het mogelijk om spanningstoestanden in stapelingen van stortgoed na te bootsen en de bezwijkspanningen te vinden die op stapelingen moeten worden uitgeoefend om stroming mogelijk te maken. Deze me-

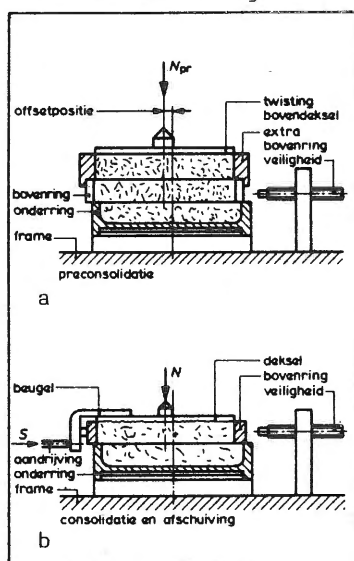


Fig. 2.15. Uitvoering van de afschuifcel.

tingen worden o.a. uitgevoerd met een apparaat zoals is weergegeven in fig. 2.15 a en b.

Een monster van het te onderzoeken stortgoed wordt in laagjes in de tester, fig. 2.15 a, geplaatst. Nadat het monster aan de bovenkant is afgeschraapt en afgedekt wordt via een belastingsjuk, met losse gewichten, een verticale belasting, N_{pr} , op het monster uitgeoefend. De tijd van deze belasting moet worden gekozen in overeenstemming met de tijd die ook in de bunker als consolidatietijd kan worden verwacht. Tijdens deze consolidatie dient er voor te worden gezorgd dat de omstandigheden, zoals o.a. vochtgehalte, overeen-

komen met die in de silo en niet veranderen in de tijd. Na de preconsolidatie wordt de extra bovenring verwijderd en het materiaal gelijk met de bovenkant van de bovenring afgeschraapt. Vervolgens wordt een afschuiving in het monster opgelegd door via de beugel de bovenring met constant lage snelheid (ca. 1 mm/min) horizon-

taal' te verschuiven t.o.v. de onderring. De hiervoor benodigde afschuifkracht S zal na een zekere verplaatsing (ca. 3 mm) een constante waarde aannemen, zie fig. 2.16. Het monster bevindt

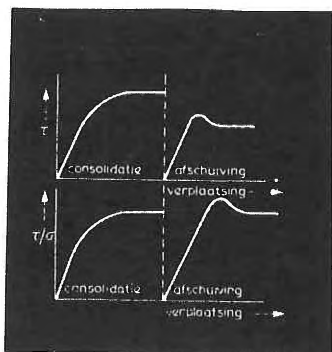


Fig. 2.16. Het schuifspanningsverloop als functie van de verplaatsing.

zich dan in een situatie van stationair bezwijken (zonder spannings- of dichtheidsveranderingen) en de dan optredende hoofdspanning is de verstevigingsspanning σ_c . Op dit moment wordt de afschuiving stopgezet en de verticale belasting vermindert, N_i . Vervolgens wordt de afschuiving doorgezet waarbij de afschuifkracht S_i snel toeneemt tot een maximale waarde en bezwijken van het monster optreedt, gepaard gaande met een expansie van het materiaal en afname van S_i , zie fig. 2.16. De maximale

waarde van S_i geeft samen met de aangebrachte verticale belasting N_i (na deling door het afschuifoppervlak, F , resp. τ_i en σ_i) de condities voor beginnend bezwijken en dus een punt van de bezwijklijn weer. Op dezelfde wijze kunnen bij dezelfde verstevigingsspanning door variatie van N_i meerdere punten van de bezwijklijn worden bepaald. Vervolgens kunnen meerdere bezwijklijnen worden bepaald door dezelfde procedure bij andere waarden van de verstevigingsspanning uit te voeren. Aan de diverse bezwijklijnen kunnen nu de bijbehorende waarden van de druksterkte σ_p worden bepaald via de raakcirkel door de oorsprong van de betreffende bezwijklijn, zie fig. 2.8. De bij de bezwijklijn behorende verstevigingsspanning σ_c wordt bepaald door de raakcirkel aan de bezwijklijn gaande door het gevonden punt van stationair bezwijken. De effectieve bezwijklijn EBL wordt als omhullende aan de grootste spanningscirkel geconstrueerd.

De hoek, φ_e , tussen de EBL-lijn en de σ -as geeft de effectieve inwendige wrijvingshoek van het stortgoed weer.

Ad. c.

Voor het onderwerp, krachten op silowand, wordt verwezen naar de literatuur.

2.1. 'Komponenten en armaturen.

In het algemeen wordt de lossnelheid van een silo bepaald door de geometrie rond de uitstroomopening en het stromingsgedrag van het produkt. Om een goede uitstroming te verkrijgen voor slecht lopende produkten is dikwijls een grote uitstroomopening nodig. Om aan dit bezwaar tegemoet te komen, worden meestal hulpmiddelen toegepast om lossing via een kleine uitstroomopening te verkrijgen. Welke storingen er in een trechter kunnen optreden, zonder toepassing van hulpmiddelen vinden we in fig. 2.17.

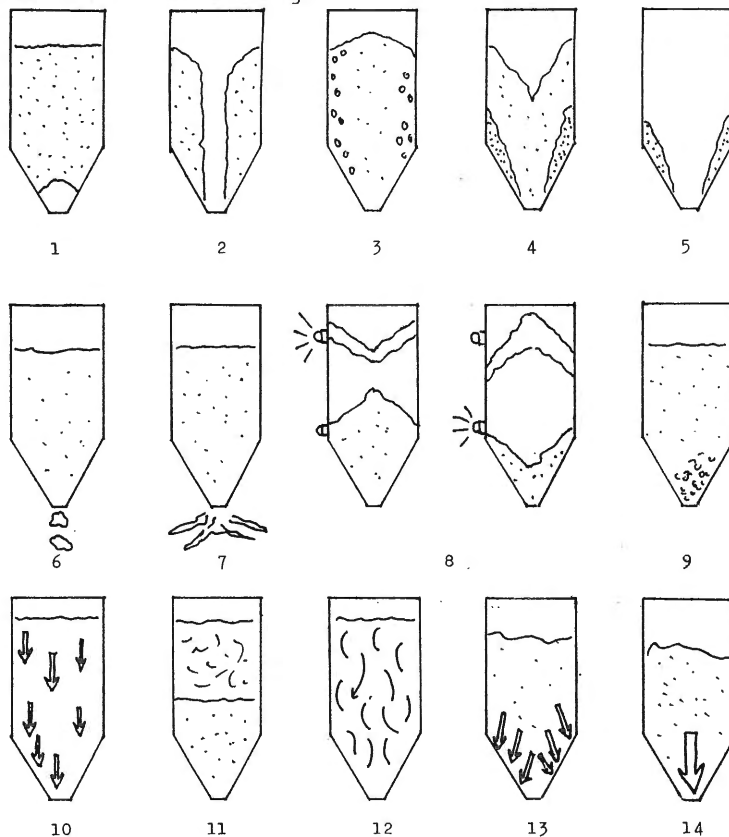


Fig 2.17. Wat er in een trechter gebeuren kan.

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Gewelfvorming. | 8. Onjuiste niveau-indikatie. |
| 2. Buisvorming. | 9. Strukturele opstopping. |
| 3. Produktscheiding. | 10. Onregelm. stromingratio's. |
| 4. Dode hoeken in stromingspatroon. | 11. Variaties in dichtheid. |
| 5. Achtergebleven resten. | 12. Produktbreuk. |
| 6. Onregelmatige doorstroming. | 13. Slijtage van de binnenwand. |
| 7. Uitvloeijing. | 14. Hoge druk op de trechtermond. |

De voorzieningen voor het voorkomen van storingen, de zgn. uitloop-mechanismen, kunnen worden onderscheiden in:

- mechanische hulpmiddelen en
- hulpmiddelen die werken met lucht (beluchting).

De uitloop-mechanismen dienen aan de volgende eisen te voldoen:

- ze moeten de voor het proces verlangde massastroom per tijdseenheid leveren,
- de uitloop-dwarsdoorsnede moet volledig worden geactiveerd, zodat er geen dode zones ontstaan die tot vastzitten van stortgoederen en daardoor tot brug- of schachtvorming kan leiden,
- de uitloophoeveelheid (massastroom) moet continu, binnen ruime grenzen, regelbaar zijn, zodat bij het wisselen van receptuur van een mengsel, of bij een zenderwissel van de bulkwagen of aftakinstallatie, de massastroom gemakkelijk aangepast kan worden. Dient het uitloopapparaat gelijktijdig als doseerapparaat dan is een bepaalde doseernauwkeurigheid vereist.
- ze moeten gemakkelijk kunnen worden aangepast aan een ander stortgoed of aan een nieuw regelgebied daar silo's en de daarbij behorende bedrijfsmiddelen, de produktieduur van vele producten overleven,
- het onderhoud en toezicht moet gering zijn,
- het energieverbruik moet gering zijn.

Mechanische hulpmiddelen.

Van de mechanische hulpmiddelen, die er toe bijdragen dat niet volkomen vrijstromend materiaal gelost kan worden, is er een grote verscheidenheid op de markt. De bekendste mechanische hulpmiddelen zullen kort worden besproken.

Transportschroef/kettingtransporteur.

Met de transportschroef en kettingtransporteur, fig. 2.18 a en b,

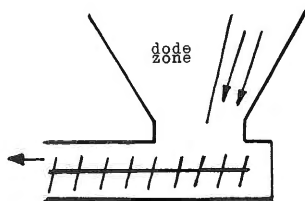
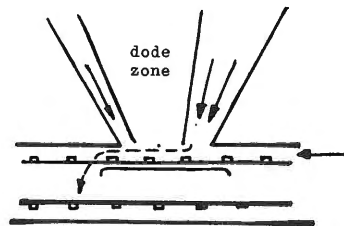


Fig. 2.18. a. Schroeftransport.



b. Kettingtransport.

wordt het onderste gedeelte van de silo in beweging gehouden. Het uitloopvlak wordt echter slechts gedeeltelijk geactiveerd en wel bij voorkeur het achterste gedeelte.

Trilbanden en transportbanden.

Trilbanden en transportbanden, fig. 2.19, activeren alleen het voorste gedeelte van de afvoer, daar de wrijving van het stortgoed groot is ten opzichte van de wrijving stortgoed/banden.

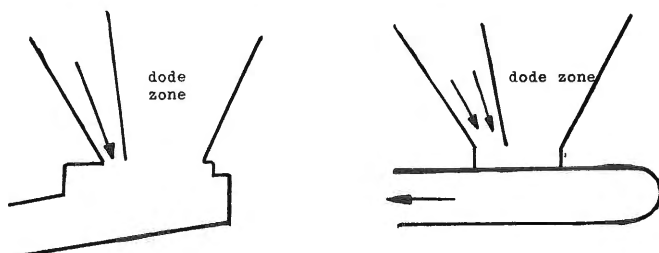


Fig. 2.19. a. Trilbanden.

b. Transportband.

Apparaten die in de trechtermond zijn ingebouwd.

In fig. 2.20 zijn een aantal apparaten weergegeven die het materiaal in het onderste gedeelte van de silo in beweging houden. Deze apparaten dienen meer als brugverstoorders dan als regelbare doseerapparaten.



Trilbalken.

Brugverstoorder.

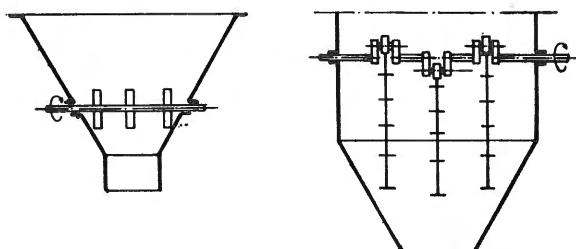


Fig. 2.20. Brugverstoorders.

Een overzicht van de mechanische hulpmiddelen, met hun specifieke eigenschappen, is weergegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1. Overzicht van de mechanische hulpmiddelen.

	Vijzel- transp.	Tandket- tingtrans- sport.	Tril- banden.	Transp. band.	Tril- balk.	Brugver- nielers.
Aktivering van de uitloop.	-	-	-	-	+	±
Regeling van de uitloophoeveelheid	+	±	+	±	±	-
Besnoeiing van de invoer.	+	+	+	+	±	±
Doseernauwkeurigheid voor:						
-cohesieve produkten	-	-	-	-	±	-
-vrijlopende produkten	±	-	+	+	-	-
Aanpassing aan andere produkten.	+	+	+	+	-	±
Aanpassing aan andere regelgebieden.	±	-	+	-	-	-
Onderhoud.	±	±	+	±	±	+
Energieverbruik.	-	-	+	±	+	+
Dient gelijktijdig als transportmiddel voor:						
-lange trans.weg;	-	+	-	+	-	-
-korte trans.weg.	+	+	+	+	-	-

Verklaring van de tekens: + bevredigend,

± onder bepaalde omstandigheden bevredigend,

- niet bevredigend.

Vibratoren.

Met behulp van vibratoren wordt het stortgoed in trilling gebracht. De vibratoren kunnen tegen de wand van de silo aangebracht worden of onder aan de silo, zodat het gehele uitloopoppervlak wordt gebruikt. De vibratoren tegen de wand kunnen ten alle tijden worden gemonteerd, fig. 2.21. Voorwaarde is dat de bunkerwand of uitlooptrechter gemakkelijk in trilling moet kunnen worden gebracht. Deze vibratoren kunnen een nadelige invloed hebben op de silo- en ondersteuningsconstructie terwijl de werking ervan niet altijd afdoende is.

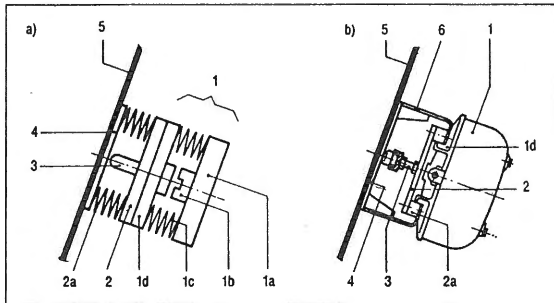


Fig. 2.21.
Vibrator.

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 elektromagnetische vibrator, | 2 bevestigingsplaat van de vibrator, |
| 1a "vrije zijde" van de vibrator, | 2a veren, |
| 1b magneetsysteem, | 3 klopbout, |
| 1c vibratorveren, | 4 montageplaat, |
| 1d "arbeidszijde" van de vibrator, | 5 bunkerwand. |

De vibratoren die aan de onderkant van de silo worden aangebracht zijn o.a. de "Siletta" en de trilbodem.

De "Siletta".

Bij de "Siletta", fig. 2.22 wordt de onderkant van de silo verdeelt in een groot aantal spleetvormige uitlopen. Deze uitlopen kunnen door een vibrator heen en weer bewogen worden. Bij stilstand worden de spleten door brugvorming gesloten. Door de beweging van de platen ontstaat een gelijkmatige materiaalstroom over het gehele oppervlak. De uitloopstroom kan binnen ruime grenzen continu geregeld worden.

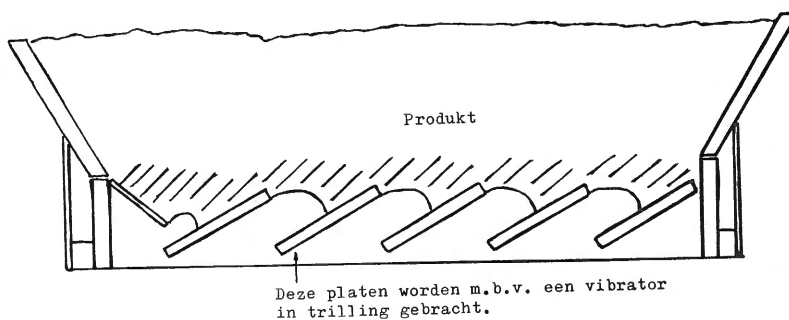


Fig. 2.22. De "Siletta".

De trilbodem.

De trilbodem bestaat uit een onder de silo flexibel opgehangen bodem met een gewelfde binnenschotel en een zijdelings aangebouwde instelbare balansmotor, fig. 2.23.

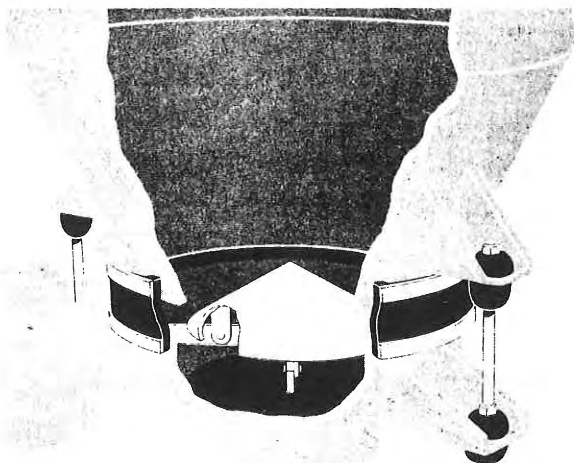


Fig. 2.23. Trilbodem.

Tijdens bedrijf vibreert de bodem met een amplitude van ca. 0,5 - 1,5 mm. Deze vibratie is te beschouwen als een roterende vector daar een onbalansmotor in plaats van een trilmagneet toegepast wordt. De gewelfde schotel oefent nu op het produkt reactiekrachten uit. Deze krachten bestaan uit horizontale componenten, die voldoende zijn om de inwendige materiaalwrijving te overwinnen. Hierdoor vindt in het materiaal een continu "breken" plaats en loopt het produkt uit. Deze methode heeft een laag energieverbruik, een compacte bouwwijze en een silolossing met een praktisch horizontale materiaal spiegel, waardoor geen ontmenging in de silo plaatsvindt. Het apparaat wordt vooral gebruikt voor producten die niet fluidiseerbaar zijn (o.a. vette melk- en cacaopoeder, aardappelmeel enz.). Door het niet fluidiseerbaar zijn vormen zich tijdens het uitstromen kanalen, waardoor de lucht ontwijkt zonder fluidisatie teweeg te brengen. Door het toepassen van een trilbodem wordt deze kanaalvorming opgeheven.

Beluchting.

Inblazen van lucht.

Door het inblazen van lucht in de silotrechter kan het materiaal

in deze trechter enigszins worden gefluidiseerd waardoor een betere uitstroming wordt verkregen, fig. 2.24.

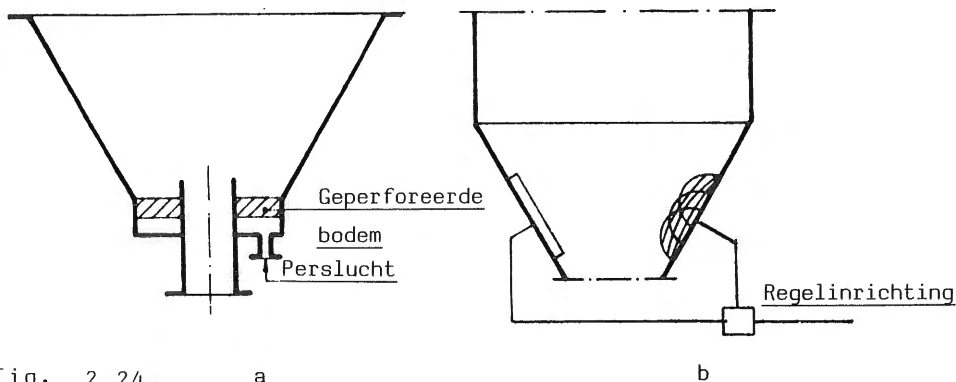


Fig. 2.24. a In fig. 2.24 a wordt de lucht via een geperforeerde bodem ingeblazen. In fig. 2.24 b zijn de zijwanden van de trechter voorzien van opblaasbare panelen. Deze panelen blaast men op beurten op waardoor een pulserende werking ontstaat waardoor het materiaal los wordt gehouden.

Er kan ook gebruik worden gemaakt van een luchtkanon die op kritieke plaatsen, waar het stortgoed zich vastzet, wordt gemonteerd, fig. 2.25.

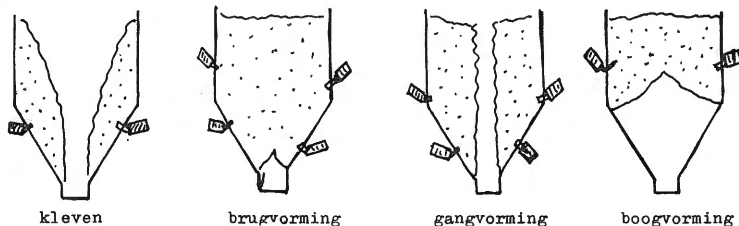


Fig. 2.25. Plaatsing van een luchtkanon op kritieke plaatsen.

Op gezette tijden wordt een dosis gecomprimeerde lucht (6-10 bar effectief) in het stortgoed geblazen. Fig. 2.26.

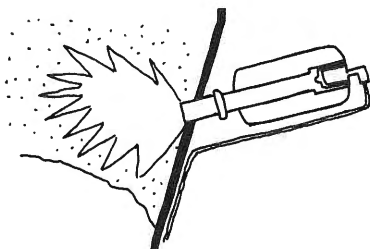


Fig. 2.26. Luchtkanon.

Beluchttingsbodem.

Een andere mogelijkheid is het toepassen van konisch of vlakke, licht hellende beluchttingsbodems. Deze bodems hebben een inwendige bespanning uit poreus materiaal, waardoor in de kritische zone gefluidiseerd kan worden. Afhankelijk van de loopeigenschappen van het produkt worden 1, 2 of 3 konische bodems toegepast, hierdoor kan de silo geheel gelost worden zonder resten, fig. 2.27.

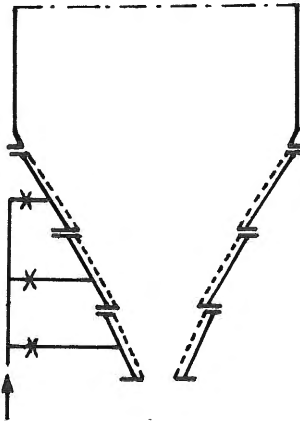


Fig. 2.27. Beluchttingsbodem.

Beluchting is doorgaans een relatief kostbaar en energieverbruikend middel, daar in de totaalprijs niet alleen de bodem, maar ook de olievrije rootsblower voor het leveren van de lucht gerekend moet worden.

3.0. Verkleinen van materialen.

3.1. Inleiding.

Het verkleinen van materialen wordt in de levensmiddelenindustrie voornamelijk uitgevoerd om:

- a. produkten in de handel te brengen in een bepaalde vorm en afmeting,
- b. als hulpmiddel bij andere bewerkingen.

Ad. a.

Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen "malen" (een vergaande verkleining) en het verkleinen tot betrekkelijk grote afmetingen en bepaalde vorm. In beide gevallen kunnen we te maken hebben met stoffen die weinig vloeistof (water of olie) bevatten, zodat zij bij het verkleinen "droog" blijven, of met stoffen die vloeistofrijk zijn. De laatste stoffen zullen bij vergaande verkleining overgaan in een min of meer vloeibare massa (pulp, pasta, brei). Bij snijden behouden deze produkten, wanneer een celstructuur aanwezig is, een vaste vorm.

Vaak moeten poedervormige produkten aan een bepaalde gemiddelde deeltjesgrootte, maximum of minimum afmetingen voldoen.

Wil men poeder fabriceren met deeltjesgrootten tussen nauwe grenzen, dan moet het malen, zoals nader uiteen gezet zal worden, gecombineerd worden met classificatie.

Vele artikelen worden in gesneden vorm in de handel gebracht als aardappelen, groenten, vruchten, vlees, vis, brood, kaas, boter, voedermiddelen, tabak. De snijdsels kunnen zeer verschillende vorm hebben: plakken, schijven, blokjes, draden, repen enz. Een algemene regel is dat een verkleind produkt, hoe klein de vorm daarvan ook mag zijn, gelijkmatig dient te wezen. Andere artikelen worden in vergaand verkleinde vorm gefabriceerd als fijngemaakte groenten, vruchten in jams, vleeswaren, aardappelenpuree, maar ook allerlei emulsies. In deze gevallen gaat het er gewoonlijk om produkten te verkrijgen die homogeen of quasi homogeen van uiterlijk, eventueel van smaak zijn. De kleur wordt bijv. in vele gevallen verbeterd wanneer de deeltjesgrootte en vorm gelijkvormig zijn. Bij een bepaalde verkleining wordt een optimale smaak verkregen. Hoe kleiner de deeltjes hoe groter het oppervlak voor het vrijkomen van geur en smaakstoffen.

De deeltjesgrootte heeft tevens invloed op de stabiliteit van

produkten. Men denke bijv. aan babyvoedsel, cacaodeeltjes in chocolademelk, soepen, mosterd, slasaus en koffie. Bij koffie bijv. zal er bezinksel op de bodem van een kopje ontstaan als de koffie meer dan 1 % deeltjes bevat met een deeltjesgrootte kleiner dan 150 micron.

Ook bij het mengen van verschillende produkten speelt de deeltjesgrootte een belangrijke rol. Bij vulmachines kan een ongunstige deeltjesgrootteverdeling de nauwkeurigheid van het vullen beïnvloeden. Het verkleinen kan men in bovenstaande gevallen beschouwen als een middel om de homogeniteit en stabiliteit van mengsels te bevorderen.

Ad. b.

Bij verkleining van deeltjes als hulpmiddel bij andere bewerkingen gaat het om het oppervlak per gewichtshoeveelheid en daardoor de snelheid van warmte- en stofoverdracht te vergroten. Een vergroot oppervlak zal immers het contactoppervlak vergroten. Dit speelt bijv. een belangrijke rol bij allerlei fysische bewerkingen van vaste stoffen als drogen, extraheren, oplossen, koelen en verwarmen, maar ook bij innige kontakten die men (tijdelijk) kan bewerkstelligen tussen niet mengbare vloeistoffen en tussen vloeistoffen en gassen. Ook bij de uitvoering van mechanische scheidingen kan verkleinen een rol spelen. Een voorbeeld is de winning van zetmeel uit bijv. aardappelen; deze moeten eerst zover worden verkleind dat de zetmeelkorrels uit de vernietigde cellen kunnen treden. Ook het uitspersen van een vloeistof uit een vaste stof wordt vergemakkelijkt door de vaste stof te verkleinen.

Vloeistofrijke materialen gaan bij vergaande verkleining over in een pulp of brei. In zo'n geval kan men van nat malen spreken. Nat malen heeft t.o.v. droog verkleinen vaak zulke voordelen dat men aan vloeistofarme stoffen ook wel eens vloeistof toevoegt om nat te kunnen malen. De voordelen hiervan zijn:

- men bereikt gemakkelijk een hoge fijnheid,
- hoge temperaturen kunnen worden vermeden,
- minder gevaar voor oxydatie,
- minder gevaar voor stofexplosie.

Uiterst fijn verkleinen gebeurt bijna altijd in aanwezigheid van vloeistof.

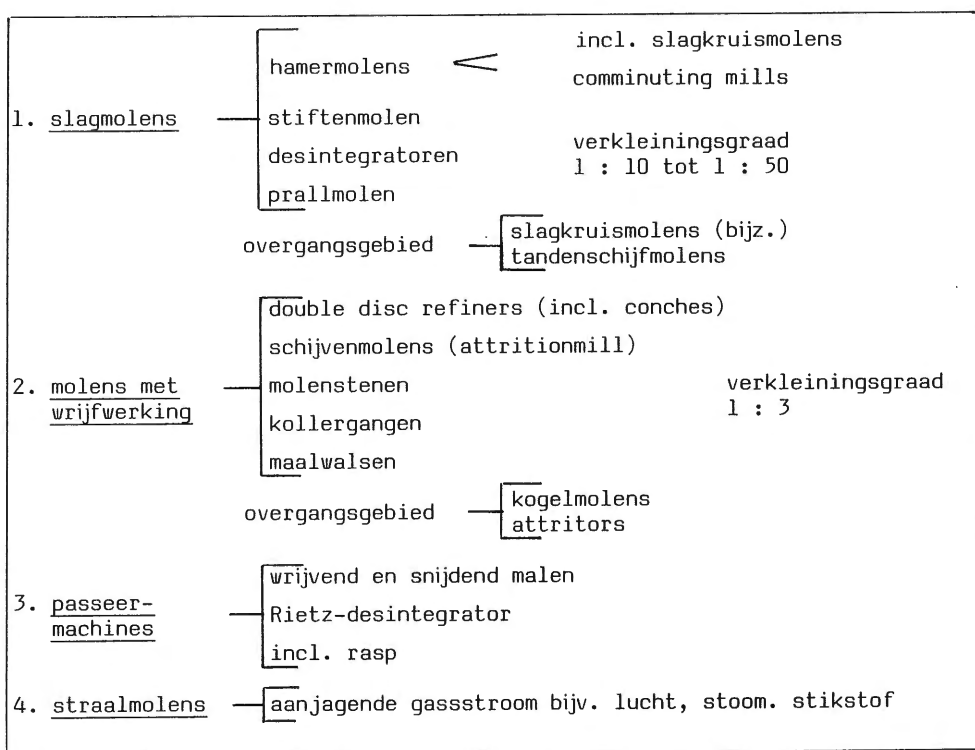
Bij droog malen moet men letten op de verdamping van water en ande-

re vluchtige componenten, op thermische ontleding en oxydaties door hoge temperaturen die kunnen ontstaan. Soms wordt malen bij lage temperatuur uitgevoerd, ook wel in inert gas, het laatste vooral wanneer stofexplosies dreigen.

3.2. De maalapparatuur.

De beschikbare maal- en breekwerktuigen vertonen een grote variatie in uitvoeringsvorm. De classificatie van deze apparatuur is moeilijk. Dit wordt vooral veroorzaakt door het feit, dat de te malen stoffen een grote verscheidenheid hebben en dat de eisen die aan de produkten gesteld worden variëren. Een overzicht van de meest voorkomende maalwerktuigen uit de procesindustrie is in tabel 3.1 opgenomen. De molens kunnen grofweg verdeeld worden in vier hoofdgroepen: slagmolens, molens met wrijfwerking, passeermachines en de zgn. straalmolens.

Tabel 3.1. Indeling van de maalapparatuur.



Een meer gedetailleerde indeling is weergegeven in tabel 3.2 met in tabel 3.3 de opgenomen richtlijnen voor de keuze van maal- en breekapparatuur.

Tabel 3.2. Keuze van maalapparatuur.

A	Bekbrekers.
B	Kegelbrekers.
C	Andere grove brekers, zoals kolenbrekers.
D	Rollenbrekers met horizontale gladde of getande rollen. Rollenbrekers met verticale rollen.
E	Schijfmolens.
F	Zware hamermolens.
G	Roterende snij-apparaten.
H	Langzaam draaiende maalapparaten: kogelmolens, staafmolens, buismolens, trilmolens.
I	Matig-snel draaiende apparaten : pletters, ring-rol molens, maalstenen, kogelmolens, hamermolens.
J	Snel draaiende apparaten : colloidmolens, hamermolens.
K	Straalmolens.

Tabel 3.3. Keuze van maalapparatuur.

Bewerking	Hardheid van het materiaal	afmetingen in cm		Reductieverhouding	Type (zie bovenste tabel)
		voeding	produkt		
Breken:					
primair	hard	30,0-150,0 10,0- 50,0	10,0-50,0 2,5-12,5	3/1 4/1	A - D A - D
secundair	hard	2,5- 12,5 0,625- 3,75	0,5- 2,5 0,83-0,46	5/1 7/1	A - F A - F
		zacht	10,0- 50,0 1,0- 5,0	10/1	C - G
Malen:					
verpulveren					
grof	hard	0,08-0,46	0,008-0,058	10/1	C - I
fijn	hard	0,015-0,108	0,001-0,008	15/1	H - K
desintegratie					
grof	zacht	0,16-1,25	0,008-0,058	20/1	I - K
fijn	zacht	0,05-0,39	0,001-0,008	50/1	I - K

De termen primair en secundair breken, tabel 3.3, worden algemeen gebruikt als aanduiding voor de deeltjesgrootte waarop het breekvermogen betrekking heeft. Het onderscheid tussen verpulveren en desintegratie ligt voornamelijk in de mate van homogeniteit, afmeting en hardheid van de voeding.

De variatie die in een bepaald type apparaat voorkomt wordt duidelijk gedemonstreerd door het feit, dat hamermolens zowel onder F, I als J voorkomen.

Verkleinen door slijten of uiteenvallen van agglomeraten treedt bijv. op in zeven, centrifuges en gefluïdiseerde bedden.

In maalapparaten wordt verkleining in het algemeen verkregen door het materiaal bloot te stellen aan een stoot, slag of aan schuifkrachten (wrijving) e.d. In de meeste apparaten zijn genoemde mechanismen tegelijkertijd werkzaam hoewel een bepaald mechanisme een overwegende rol zal spelen. Grof malen gaat in het algemeen het beste door drukken stoten of slaan. Voor fijn malen is in principe wrijving het meest geschikt. Hardere en brossere materialen laten zich gemakkelijk verkleinen door slaan of botsen. Voor zachtere, taaiere materialen komt wrijving meer in aanmerking. Droge materialen worden niet vaak door wrijving verkleind. Dit gebeurt wel bij het malen van tarwe wanneer men tegelijkertijd een scheiding van de verschillende delen van de tarwekorrel beoogt. Voor dit doel gebruikt men maalwalsen. Wil men de tarwekorrels zonder meer malen, bijv. in een veevoederbedrijf, dan zal men een slagmolen kiezen; de granen behoeven hier slechts open gebroken en niet gemalen te worden zoals in de meelindustrie. Wrijving ziet men vooral toepassen op stoffen die wat vloeistof (water of olie) bevatten. In alle maaltoestellen is er zowel contact tussen de deeltjes onderling als tussen de deeltjes en het apparaat. Het aantal deeltjes stijgt bij toenemende fijnheid sterk, het benodigde aantal kontakten voor verdergaande verkleining wordt steeds groter. Dit is de reden dat de capaciteit van een molen daalt en het energieverbruik stijgt wanneer fijner wordt gemalen. Dit is schematisch weergegeven in fig. 3.1.

In de levensmiddelenindustrie zijn, naast de eerder genoemde maalwerktuigen, passeermachines in gebruik voor zachte materialen. De betreffende produkten zijn gemakkelijk te verkleinen. Naast de ver-

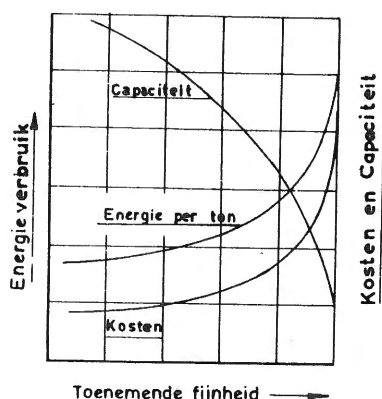


Fig. 3.1. Energieverbruik als functie van toenemende fijnheid.

kleining van de gemalen en/of gesneden produkten wordt gelijktijdig een scheiding teweeggebracht in karakteristieke harde en zachte produktdelen, bijv. schil en sap tegenover de pitten. Deze machines zijn vaak aangepast aan de vorm van de te behandelen produkten. Een mogelijkheid om zeer fijn te malen, bijv. kleiner dan 10 à 20 micron, is gebruik te maken van een zgn. straalmolen. Hier wordt het maalgoed met hoge snelheid in de maalkamer gebracht door een

gasstroom (eventueel stoom) die via een impulsoverdracht het deeltje met grote snelheid doet botsen tegen andere meegesleurde deeltjes en tegen de wand van de expansiekamer. Door de expansie van het drijfgas treedt afkoeling op en wordt het produkt gekoeld. De beladingsgraad is echter laag en ligt in de buurt van 1/10 tot 1/15. Aangezien de energiekosten bij straalmolens hoog zijn, is het duidelijk dat deze wijze van malen slechts wordt toegepast voor maalgoed met een hoge kiloprijs.

Hierna zal worden volstaan met het geven van enkele voorbeelden van maal- en breekapparaten om een algemene indruk te krijgen van deze apparaten. Voor uitgebreider overzichten wordt verwezen naar de betreffende handboeken.

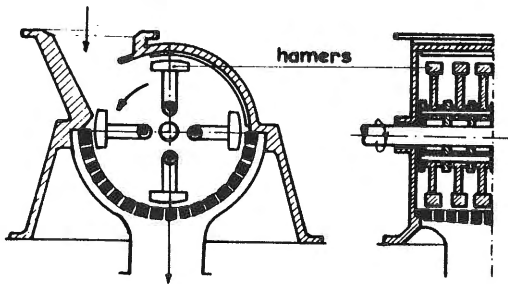
Slagmolens.

Onder slagmolens worden apparaten verstaan met snel roterende maalorganen. Deze molens worden in het algemeen gebruikt voor kristallijne en weinig plastische materialen. In deze groep zal men stiftenmolens gebruiken voor het fijnere eindprodukt. Er is een overgangsg gebied tussen de slagkruismolens en tandschijfmolens, die in vele constructieve uitvoeringen door de diverse fabrikanten wordt gebouwd.

Van de slagmolens zullen enkele typen worden besproken.

Hamermolen.

In fig. 3.2 is een voorbeeld van een hamermolen getekend. Deze



molen is het meest geschikt voor harde en brosse materialen maar is ook bruikbaar voor zachtere, taaie en vezelachtige produkten. Deze molen wordt o.a. toegepast voor het vermalen van granen in de veevoederindustrie.

Voor verschillende produkten zijn er uiteenlopende uitvoeringsvormen.

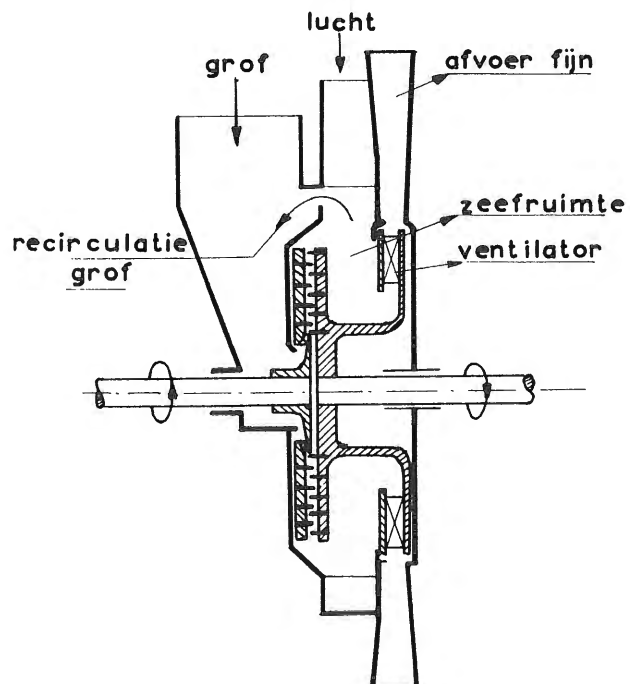
Fig. 3.2. Hamermolen.

De belangrijkste variaties in constructies zijn:

- de omtreksnelheid van de maalorganen bedraagt normaal 40 m/s maar kan gaan tot 100 m/s,
- beweeglijke hamers die door centrifugaalkracht een radiale stand innemen. Er zijn ook molens waarbij de hamers vast aan de as zijn verbonden; deze worden gewoonlijk slagkruismolens genoemd.
- de vorm van de hamers loopt sterk uiteen. Dikwijls bestaan zij uit eenvoudige staven van vierkante of rechthoekige doorsnede. In andere gevallen bestaan de hamers uit betrekkelijk dunne platen (messen).
- het huis van de molen is normaal glad. Er zijn ook molens waarbij het huis een niet gladde wand heeft.
- dikwijls zijn de molens uitgevoerd met een bodem van roosterstaven of zeefgaas. De zeef is bepalend voor de bovenste grens van de deeltjesgrootte maar niet voor de onderste grens. De te verkrijgen fijnheid kan men slechts in beperkte mate door de keuze van de zeef regelen.
- bij de molens kunnen meerdere hamers naast elkaar op de as zijn gemonteerd, fig. 3.2.

Elke hamermolen werkt enigszins als een ventilator. De te bereiken fijnheid is voornamelijk afhankelijk van het toerental en van de toevoersnelheid van het materiaal. Bij eenmalige passage kunnen hamermolens ver verkleinen.

Stiften(pennen)molens.



Stiftenmolens worden in de levensmiddelenindustrie veel gebruikt o.a. voor het verkleinen van noten, cacaobonen, muskaat enz. In fig. 3.3 is een voorbeeld van een dergelijke molen getekend terwijl in fig. 3.4 de stator en rotor-schijf zijn weergegeven. De molens zijn zowel in verticale als horizontale bouwvorm verkrijgbaar. De omtreksnelheden liggen tussen de 80 - 160 m/s.

Fig. 3.3. Stiftenmolen met pneumatische klassificatie.

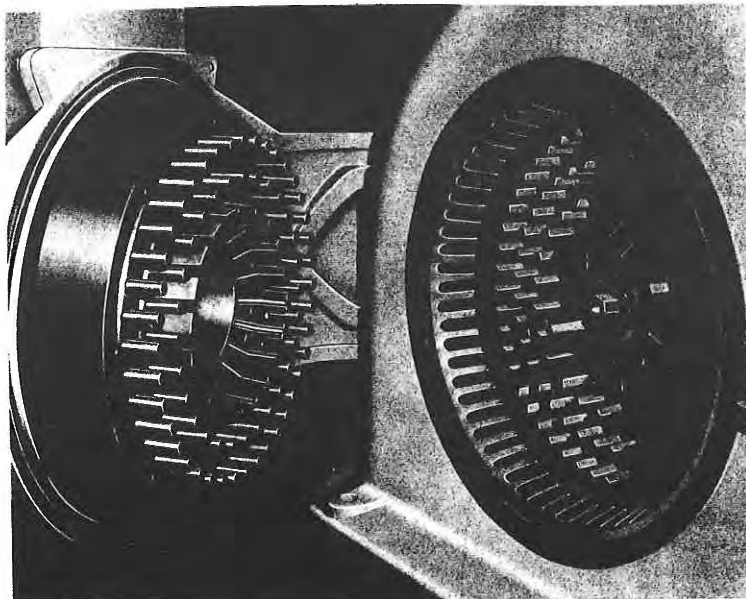


Fig. 3.4. Stiftenmolen met vierkante stiften.

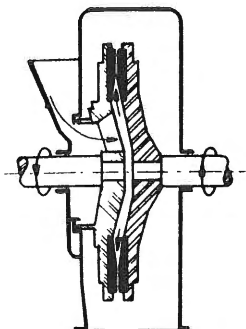
Molens met wrijvende werking.

De molens met wrijvende werking vormen een vrij heterogene groep. Deze apparaten hebben het kenmerk, dat het materiaal tussen twee oppervlakken fijngewreven wordt. Naast wrijving zal er daarbij altijd druk optreden. Deze molens zijn geschikt voor fijn vermalen van droge, natte, zachte en/of taaie of vezelachtige materialen. In verband met o.a. de warmteontwikkeling wordt bij de meeste apparaten met wrijvende werking de voorkeur aan nat malen gegeven.

Tot de molens met wrijvende werking behoren o.a.:

- a. de schijvenmolen,
- b. de maalwalsen,
- c. de colloïdmolens.

De schijvenmolen.



In de schijvenmolen, fig. 3.5, wordt het produkt radiaal aangevoerd, terwijl het radiaal passeert tussen twee platen door. Soms staat één plaat stil, terwijl de andere draait of beide platen draaien. De afstand tussen de beide platen is instelbaar. Ze worden meestal met een regelbare druk op elkaar geperst. De platen kunnen ruw zijn of voorzien van groeven. De schijvenmolens zijn er zowel in horizontale als verticale uitvoering. Ze hebben een breed inzetgebied.

Fig. 3.5. Schijvenmolen.

De maalwalsen.

Op het gebied van de maalwalsen bestaat er een grote variatie in uitvoering. De maalwalsen worden o.a. toegepast in de olieindustrie, voor het malen van granen en voor o.a. het fijnmalen van chocolademassa's. Een walsenstoel uit de olieindustrie met vijf walsen boven elkaar is afgebeeld in fig. 3.6. De afstand tussen de rollen is instelbaar. De laatste rollen worden gewoonlijk met een flinke druk op elkaar geperst. Het toerental van de rollen is verschillend zodat een wrijvende werking ontstaat.

Voor drogere produkten gebruikt men zowel gladde als gegroefde rollen. De laatste hebben een meer brekende en krakende werking, zij dienen voor grof malen, als bijv. van granen en zaden.

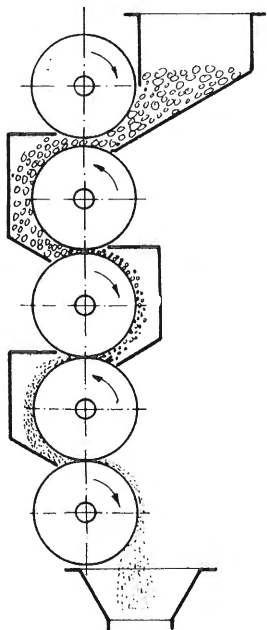


Fig. 3.6. Vijfwalsenstoel.

Het verschil in toerental is in dat geval niet groot. De groeven zijn dikwijls in de vorm van een spiraal aangebracht, soms lopen ze evenwijdig aan de as. Wil men fijner malen, dan gebruikt men minder diepe groeven, en een groter verschil in toerental, terwijl voor zeer fijn malen gladde walsen worden toegepast met een vrij groot verschil in toerental. Een walsenstoel zoals die gebruikt wordt in de maalderijen is getekend in fig. 3.7.

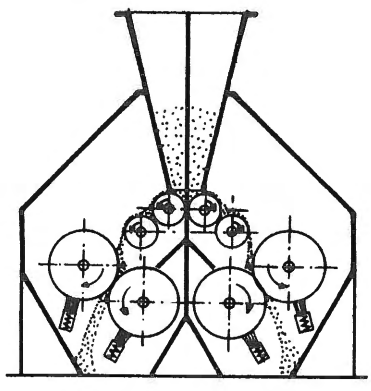


Fig. 3.7. Een walsenstoel voor maalderijen.

Bij het maken van flakes (platte, dunne plaatjes) uit mais, tarwe, rijst, sojabonen enz. gaat het in hoofdzaak om druk en niet om wrijving. Voor dit doel past men gladde walsen toe met gelijk of weinig verschillend toerental. Wanneer het uitsluitend om druk gaat, spreekt men van pletwalsen (cornflakes, havermout e.d.).

Een groot verschil tussen walsen en bijv. slagmolens is dat de verkleiningsgraad bij eenmalige passage veel geringer is. Bij slagmolens kan deze bijv. 1 op 50 bedragen, bij walsen slechts 1 op ca. 3.

Fig. 3.8 toont een ideaal systeem waarbij een bol- of cilindervormig deeltje met een straal r_2 , aan rollen met een straal r_1 , wordt toegevoegd. De hoek die gevormd wordt door de raaklijnen aan het oppervlak van de walsen, in het contactpunt tussen de deeltjes en de walsen is de "angle of nip". Deze hoek is van belang om de

om de afmeting van de rollen te kunnen definiëren voor een be-

paalde capaciteit. De "angle of nip" is gelijk aan 2α , zie fig. 3.8. Deze hoek kan worden berekend met de formule:

$$\cos\alpha = \frac{r_1 + b}{r_2 + r_1} \quad (3.1)$$

Hierin is r_1 (m) de straal van de rol, r_2 (m) de straal van het deeltje en b (m) de straal van het gevormde produkt.

Een deeltje zal juist door de rollen worden meegenomen indien $\tan\alpha = \mu$. Hierin is μ de

wrijvingscoëfficiënt tussen het deeltje en de walsen. Voor stalen walsen is de "angle of nip" meestal groter dan 32° .

Voor een wals met een roldiameter van D_r (m), lengte L (m), een "nip" van D_p (m) en een toerental N (omw/s) is de capaciteit Q (m^3/s):

$$Q = N \cdot D_r \cdot D_p \cdot L \quad (m^3/S) \quad (3.2)$$

Wanneer het stortgewicht van het materiaal met een deeltjesdiameter D_p bekend is kan de massastroom worden bepaald. In de praktijk blijkt de werkelijke capaciteit ongeveer 0,1 tot 0,3 te zijn van de theoretische capaciteit.

Colloïdmolen. (Fig. 3.9).

Voor het fijn maken van mengsels vast/vloeistof worden colloïdmolens gebruikt.

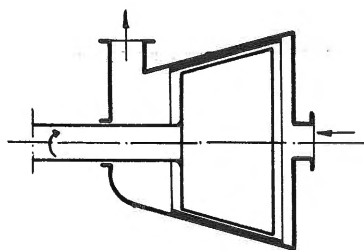


Fig. 3.9. Kolloïdmolen.

De kolloïdmolen bestaat uit een konisch huis (stator), waarin een konische rotor draait. Het toerental is hoog, de spleet tussen stator en rotor is instelbaar en kan zeer nauw worden (bijv. 25 micron). De werking berust op zeer grote schuifspanningen in de spleet:

$$\tau = \eta \cdot \frac{v}{h} \quad (3.3)$$

τ = schuifspanning (N/m^2); η = viscositeit (Ns/m^2); v = omtreksnelheid en h = spleetwijdte (m).

De spleet tussen stator en rotor is gewoonlijk instelbaar tussen 0,1 tot 1,3 mm. De toerentallen variëren meestal van 3000 omwentelingen per minuut voor een rotor met een diameter van 38 cm tot 15000 omwentelingen per minuut voor een rotor met een diameter van 9 cm. De apparaten met een horizontaal geplaatste rotor zijn het best geschikt voor het behandelen van relatief laag visceuse vloeistoffen. Voor meer visceuse produkten worden molens gebruikt waarvan de rotor op een verticale as draait. De statoren en rotors zijn in het algemeen glad. Soms zijn ze echter voorzien van groeven. Colloïdmolens worden o.a. gebruikt bij het produceren van slasaus, mayonaise, de bereiding van vlees en vispasta's, vruchten en fruitpurees.

Kogelmolens.

In fig.3.10 is een doorsnede gegeven van een konische kogelmolen waarin weergegeven de omtreksnelheden en de verhouding van de kogels t.o.v. het te verkleinen materiaal.

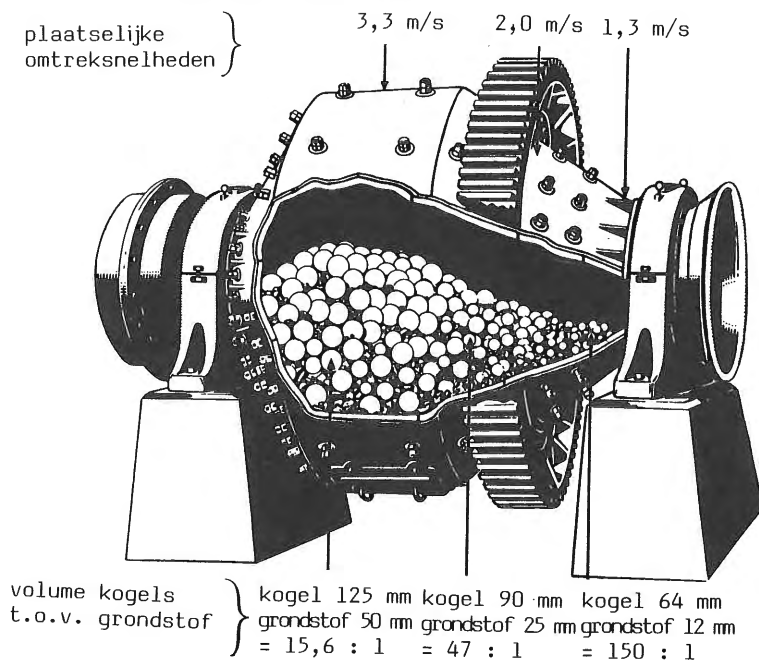


Fig.3.10. Doorsnede van een konische kogelmolen.

Het principe van de kogelmolen volgt uit de dwarsdoorsnede van fig. 3.11. Het materiaal wordt gebroken door indirecte werking

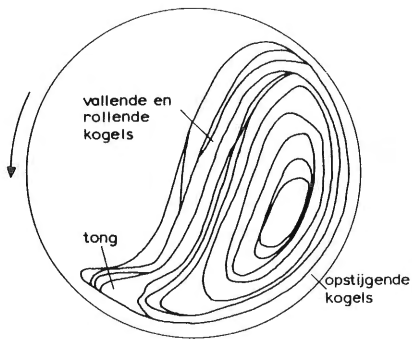


Fig. 3.11. Dwarsdoorsnede van een kogelmolen.

van de vallende kogels. De kogels worden door de draaiende molen meegevoerd; slip tussen wand en kogels wordt dikwijls voorkomen door "lifters" aan te brengen. De kogels vallen vrij en cascaderend op de kogeltong. De kogels in de tong brengen de energie over op deeltjes, waarna 90 % van de breuk optreedt tussen de kogels en de wand. Kogelmolens worden zowel ladingsgewijs als continu gebruikt.

Met name bij natmalen wordt veel gebruik gemaakt van de goede mengwerking die in de kogelmolen optreedt.

De kogels zijn meestal van porcelein of staal en nemen 30-50% van het totale volume van de molen in.

Indien de molens een te hoog toerental maken plakken de kogels tengevolge van de centrifugaalkracht tegen de wand waardoor geen malende werking zal optreden. Om dit te voorkomen mag het toerental een bepaalde waarde, de zgn. kritische waarde, niet overschriden.

Bij het kritische toerental is de versnelling van de zwaartekracht precies gelijk aan de centrifugaalkracht, $r \cdot \omega_c^2$ of

$$g = r \cdot \omega_c^2 \quad (3.4)$$

r = straal van de molen - straal van het deeltje (m),

ω_c = kritische hoeksnelheid (rad/s),

N = toerental per seconde.

Voor ω_c kan worden geschreven:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{r}} \quad ; \text{ daer } \omega_c = 2 \cdot \pi \cdot N \text{ (rad/s), kan voor het kritisch}$$

toerental N_c worden geschreven:

$$N_c = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (3.5)$$

3.3. De maalenergie.

De maalenergie nodig voor het breken van een deeltje is slechts een fractie, 0,1 % - 3 %, van de aan het maalapparaat toegevoerde energie. Het grootste deel van het aan de as afgegeven vermogen wordt gebruikt voor:

- elastische vervorming vóór de breuk,
- niet-elastische vervorming die tot breuk leidt,
- elastische vervorming van de apparatuur,
- wrijving in de apparatuur,
- wrijving tussen deeltjes onderling en tussen deeltjes en apparatuur,
- produktie van geluid en trillingen.

Voor het berekenen van de energie, nodig voor het breken, bestaan een aantal wetten, die echter een beperkte waarde hebben. Van deze wetten zullen er drie worden besproken, die kunnen worden afgeleid van de differentiaalvergelijking:

$$\frac{dE}{dd} = - C d^{m-1} \quad (3.6)$$

Deze wet zegt dat de energie, dE , die nodig is om een geringe verandering in afmeting van het deeltje per massaeenheid te verkrijgen, evenredig is met de afmeting, d , tot de macht $m-1$.

Wordt voor $m = -1$ ingevuld dan krijgen we na integratie de wet van Rittinger, 1867:

$$E = C \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) \quad (3.7)$$

Deze wet zegt dat de energie, die nodig is om een deeltje te breken, recht evenredig is met de toename van het oppervlak.

De hoeveelheid oppervlak per eenheid van massa is nl. gelijk aan

$$\frac{\pi d^2}{\rho \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi d^3} \quad \text{en dus evenredig met } \frac{1}{d}, \text{ uitgaande van bolvormige deeltjes.}$$

Vullen we voor $m = 0$ in dan krijgen we na integratie de vergelijking:

$$E = C \ln \frac{d_1}{d_2} \quad (3.8)$$

Vergelijking 3.8 is de wet van Kick (1885). Deze wet zegt, dat de benodigde energie alleen afhangt van de verkleiningsverhouding en niet van de deeltjesgrootte.

De verhouding d_1/d_2 staat bekend als de reductieverhouding en is een maat voor de werking van een bepaalde molen.

Gaan we voor $m = -\frac{1}{2}$ invullen dan krijgen we na integratie van vergelijking 3.6 de wet van Bond (1952). Deze wet neemt een plaats in tussen de beide voorgaande en luidt:

$$E = C(\sqrt{\frac{1}{d_2}} - \sqrt{\frac{1}{d_1}}) \quad (3.9)$$

In de drie vergelijkingen is:

d_1 = gemiddelde diameter van de voeding,

d_2 = gemiddelde diameter van het gemalen produkt.

De wet van Rittinger is vooral geldig in het gebied waar de toename van het oppervlak belangrijk is; met name bij zeer fijn malen. Bij grote deeltjes ligt de nadruk meer op de elastische vervorming voor breuk en een reductie in lengte, vandaar dat in dit gebied de wet van Kick beter opgaat. De wet van Bond neemt een tussenplaats in.

Indien de drie wetten worden weergegeven in een diagram waarbij het quotiënt van oppervlakte toename en maalenergie $\Delta A/E$ (m^2/J) is uitgezet tegen het quotient van maalenergie en volume, E/V (J/m^3), dan ziet het diagram er uit als afgebeeld in fig. 3.12.

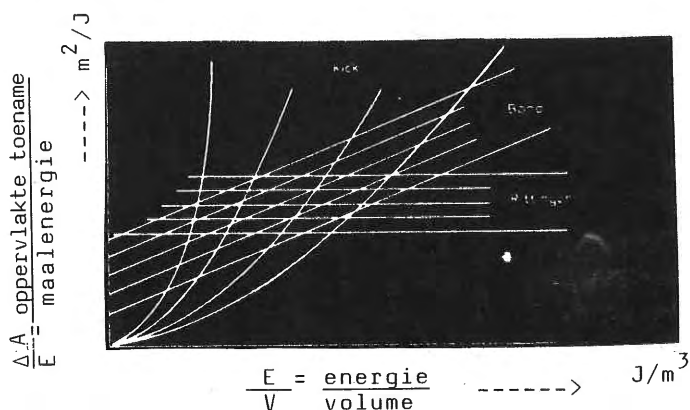


Fig. 3.12. Maalwettendiagram.

De genoemde wetten zijn een benadering en zijn slechts geldig in een nauw gebied. In de praktijk blijkt de maalenergie niet steeds evenredig met de deeltjesgrootte tot een macht, $m = 0$, $m = -0,5$ of $m = -1$, te zijn, maar komen allerlei machten voor. Dit is te zien in figuur 3.13. Naar links zijn de onderbroken lijnen willekeurig getrokken. In de figuur is te zien, dat in het gebied waar onderzoeken verricht zijn de drie wetten door raaklijnen aan de curve weergegeven kunnen worden.

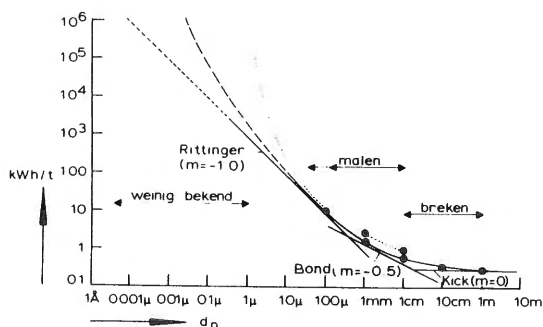


Fig. 3.13.

3.4. De technische uitvoering van het malen.

In principe kan men ladingsgewijs of continu malen. Continu malen is algemeen gebruikelijk wanneer grote hoeveelheden verkleind moeten worden.

Ladingsgewijs malen.

Bij ladingsgewijs malen wordt de molen gevuld met materiaal. Het materiaal blijft tijdens het maalproces in de molen totdat de gewenste verkleining is verkregen. Dit kan worden bereikt door een zeef in de uitlaat te plaatsen. Bij deze wijze van malen vindt een intensief maalproces plaats. De capaciteit van de machine is echter beperkt terwijl het energieverbruik hoog is. Daarnaast zijn de arbeidskosten hoog daar de machine gevuld en geleegd moet worden. Ladingsgewijs malen wordt alleen toegepast wanneer relatief kleine hoeveelheden materiaal moeten worden gemalen en wanneer het ge-

wenst is het gehele maalproces in één bewerking te realiseren. Daar het materiaal slechts één keer de molen passeert en tijdens deze passage de gewenste verkleining moet krijgen kan de verblijftijd lang zijn. Door de verblijftijd kort te houden, geen zeef plaatsen aan de uitlaat, voorkomt men enigszins het onnodig verkleinen van de deeltjes.

Continu malen.

Hierbij kunnen we twee methoden onderscheiden:

- a. "Open circuit grinding", (O.C.G.).
- b. "Closed circuit grinding", (C.C.G.).

Ad. a.

Open circuit grinding is de eenvoudigste manier van continu malen, die veel wordt toegepast. Bij dit proces vindt geen classificatie plaats waardoor de investeringen relatief laag zijn. In fig. 3.14 is het principe weergegeven.

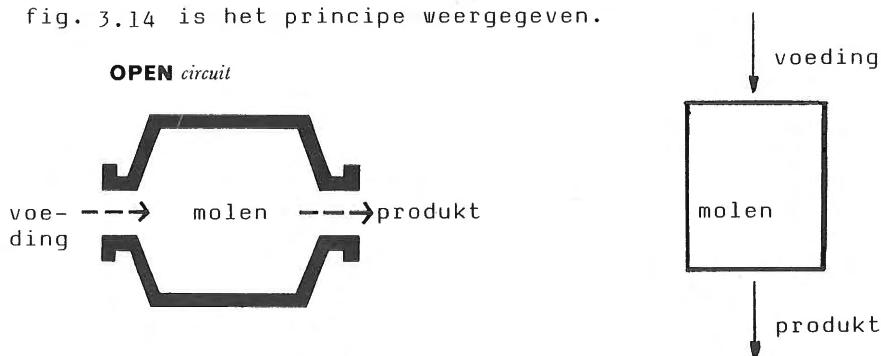


Fig. 3.14. "Open circuit grinding".

Het materiaal wordt eenmalig, met een relatief lage snelheid, door de molen gevoerd. De molen moet zodanig worden afgesteld dat de grootste deeltjes na eenmalige passage beneden de maximaal toelaatbare afmetingen zijn verkleind. Men krijgt een weinig uniform produkt daar sommige deeltjes snel de molen passeren. Het energieverbruik is hoog daar een groot aantal deeltjes, die reeds de juiste afmetingen hebben, onnodig worden verkleind.

Ad. b.

Wanneer tijdens het malen het produkt de gewenste grootte heeft bereikt is het wenselijk het zo snel mogelijk uit de molen te verwijderen. Men voorkomt dan dat onnodig veel energie wordt verbruikt,

terwijl niet te veel deeltjes van te kleine afmetingen ontstaan. Het onnodig energieverbruik en de vorming van te kleine deeltjes kan worden voorkomen door het maalproces te combineren met classificatie, fig. 3.15. Hierdoor wordt er voor gezorgd dat voldoende klein materiaal uit het maalapparaat wordt afgevoerd, zodat slechts het nog grove materiaal verder wordt gemalen.

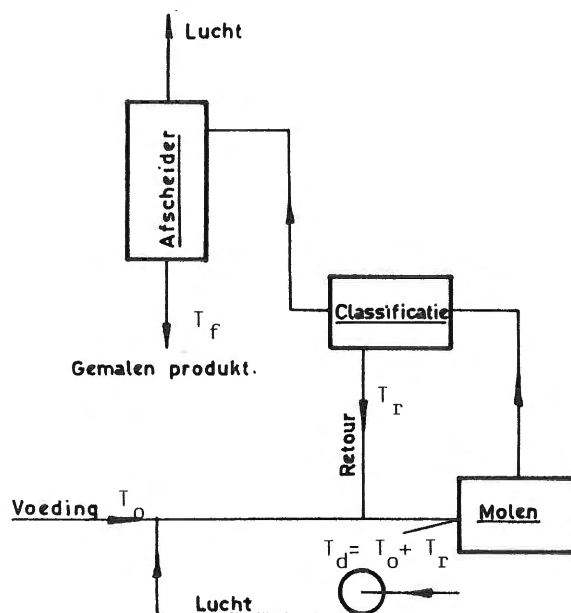


Fig. 3.15. Continu malen met classificatie.

De bedoelde classificatie kan in de molen zelf dan wel in afzonderlijke apparaten plaatsvinden. In het eerste geval heeft de molen een ingebouwde zeef of pneumatische separator; het maalt en sorteert dan tegelijkertijd. Voortdurend wordt het fijne materiaal verwijderd, terwijl het te grove produkt in de molen blijft of er in terugvalt. Gebruikt men een afzonderlijk classificatieapparaat (meestal pneumatisch) dan is de gang van zaken als volgt: het te verwerken materiaal wordt door de molen gevoerd; deze is zo afgesteld dat na eenmalige passage slechts een klein gedeelte een voldoende fijnheid heeft bereikt; dan volgt het sorteren, waarna het grove produkt terug gaat naar de molen. Men heeft dan het schema van fig. 3.15. Verkleining met klassificatie vereist een

een' duurdere apparatuur, doch geeft een homogener produkt bij een lager energieverbruik en een grotere capaciteit. Een voorbeeld van C.C.G. systeem, waarin opgenomen een kogelmolen met luchtclassificatie, is weergegeven in fig. 3.16.

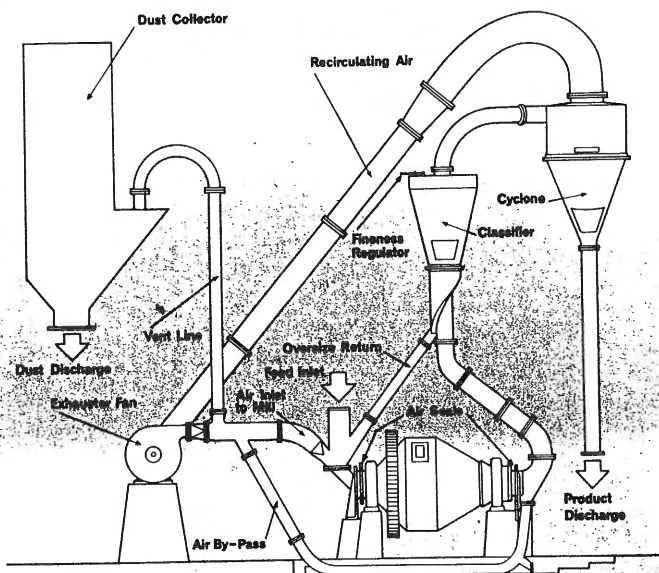


Fig. 3.16. C.C.G.-systeem met kogelmolen en luchtclassificatie.

Een belangrijke grootte van het C.C.G.-systeem is de terugvoer-
verhouding:

$$\tau = \frac{T_r + T_o}{T_o} \quad (3.10)$$

Deze formule geeft de verhouding weer van de hoeveelheid gemalen
produkt en de uiteindelijke hoeveelheid gereed produkt. Bij even-
wicht is $T_f = T_o$.

T_e = eindprodukt; T_o = ongemalen produkt; T_f = fijn produkt;
 T_r = grof produkt.

Hoge waarden van τ houdt in dat veel materiaal teruggevoerd moet
worden omdat de gewenste fijnheid nog niet is bereikt. Indien de
waarde van $\tau > 3$ dan heeft recirculatie in het algemeen weinig
practische waarde meer daar dan het C.C.G.-systeem te duur wordt.

3.5. Deeltjesgrootteverdeling.

Bij het bestuderen van verschillende "unit-operations" speelt de deeltjesgrootteverdeling een belangrijke rol. We kunnen hierbij denken aan drogen, filtreren, kristalliseren, vast-gas scheiding en malen.

Beperken we ons tot het malen dan blijkt bij het bestuderen van het maalproces, zoals vergelijkende onderzoeken en beoordeling van maalapparaten, de definitie van een gemiddelde deeltjesdiameter één der grootste problemen. Elk maalapparaat levert namelijk een produkt dat deeltjes van zeer verschillende grootten en vorm bevat. Men moet zich dan afvragen op welke wijze de diameters van de afzonderlijke deeltjes worden gedefinieerd, hoe de deeltjesgrootteverdeling kan worden vastgesteld en hoe tenslotte een gemiddelde diameter kan worden berekend, waarvan de begin en eindwaarde in verband kunnen worden gebracht met bijv. het energieverbruik.

De verdeling van de deeltjesgrootte zal zeer verschillend zijn afhankelijk van:

- a. De aard van het materiaal, waarbij brosheid en hardheid een belangrijke rol spelen.
- b. De vraag of afslijpen van het materiaal zal optreden.
- c. De wijze waarop de breukenergie wordt toegeënd
- d. Het al of niet vormen van agglomeraten. De ondergrens van de deeltjesgrootte, die bij droog malen bereikbaar is, wordt voor vele apparaten gegeven door het optreden van agglomeraten.

Door het toepassen van nat malen is een grotere fijnheid bereikbaar. Het zal in dit verband duidelijk zijn, dat de condities waaronder gemalen wordt, in het algemeen van invloed zijn op de breukresultaten.

Bepaling van de deeltjesgrootte.

De deeltjesgrootte kan worden vastgelegd met behulp van een karakteristieke lengteparameter. Deze karakterisering is echter vaak niet eenduidig. Dit is wel het geval wanneer de vorm van de deeltjes volledig is beschreven, zoals bij een kubus of bol. Ook het gebruik van een lengteparameter tesamen met een vorm- of bolvormigheidsfactor is vaak niet voldoende, omdat de bolvormigheid

vaak gedefinieerd is door een oppervlakteverhouding en deze kan dan alleen een maat zijn voor het oppervlak van het deeltje. Om deze reden moeten deeltjesgroottebepalingen steeds in verband worden gezien met de aard van het proces, waarvoor met behulp van de gevonden waarden een apparaat te berekenen is. Dit heeft ertoe geleid dat een groot aantal bepalingswijzen berusten op dezelfde verschijnselen als de industriële apparatuur.

Zo kan een sedimentatieanalyse in verband worden gebracht met indikkers, een elutratie met pneumatisch transport, een zeefanalyse met industriële zeving, enz.

Bij andere bepalingsmethoden is het verband minder direkt zoals bijv. bij de optische methode. Bij deze methode wordt de extinctie van een lichtbundel gemeten die optreedt ten gevolge van het zich in de bundel bevinden van een bekend aantal deeltjes. Deze methode levert een gemiddeld oppervlak per deeltje. Wanneer dit oppervlak gelijk is aan het geprojecteerde oppervlak, dan kan het gebruikt worden voor de bepaling van bijv. de stromingsweerstand van een deeltje in een homogeen medium.

Zeefanalyse.

De zeefanalyse, een directe methode, is de eenvoudigste methode voor het bepalen van deeltjesgrootten. De methode is bruikbaar tot 50 à 75 micron bij gebruik van normale analyse-zeven en tot ca. 3 micron bij gebruik van microzeven, een zeer speciale uitvoering van zeven van kunststof. In het algemeen wordt de zeefanalyse uitgevoerd met droog materiaal. Bij het gebruik van microzeven wordt nat gezeefd.

De normale analyse-zeven bestaan uit genormaliseerde geweven gazen. Hiervan bestaan er verschillende standaarden. Voorbeelden zijn de veel gebruikte schalen volgens Tyler en de U.S.-Sieve series. De laatste wordt geadviseerd door de A.S.T.M. (American Standard for Testing Materials). Nederlandse zeven worden aangegeven met de afmeting van de zeefopening in mm. Volgens NEN-480 is een zeef d-16 een zeef met een zeefopening van 16 mm.

Internationaal worden zeefmaten vaak opgegeven in "mesh", het aantal gaten per strekkende inch. Het hangt uiteraard van de draaddikte af hoe groot de gaten zijn. De aanduiding "mesh" moet dan ook vergezeld gaan van een specificatie van de draaddikte.

Het open oppervlak van een gewezen zeef kan als volgt worden berekend:

$$P = \frac{O^2}{(O + D)^2} \cdot 100; P = (O.M)^2 \cdot 100. \quad (3.11)$$

P = percentage open oppervlak.

M = "mesh".

O = afmeting opening.

d = diameter van de draad.

Bij de zeefanalyse wordt het te onderzoeken materiaal op de bovenste van een serie boven elkaar geplaatste zeven gebracht. Van boven naar beneden verandert de afmeting van de gaten (maaswijdte) vaak met een factor $\sqrt{2} = 1,2$. Zijn minder nauwe zeeffracties nodig, dan kunnen series samengesteld worden met een stapgrootte van $\sqrt{2} = 1,4$ of 2. Van sommige zeven bestaan ook trajecten met een stapgrootte van 1,1. Vanaf 1 mm naar boven hebben de in Nederland genormaliseerde zeven ronde gaten. De overgang van vierkante naar ronde gaten is van geen belang bij afzeven van fracties van een bolvormig materiaal. Een plaatvormig deeltje met een kortste zijde van het dunne plaatje van $0,8 \sqrt{2} = 1,12$ mm zal echter nog juist een zeef van 0,8 mm, met vierkant gat, kunnen passeren, terwijl het door een rond gat van 1 mm ruimschoots wordt tegengehouden. Uit dit voorbeeld blijkt tevens, dat niet de grootste afmeting a van het deeltje maar de zgn. tweede lengtemaat b in belangrijke mate het verloop van het zeefproces bepaalt.

Bij de uitvoering van een zeefanalyse worden de op elkaar gestapelde zeven, met opvolgende maaswijdte, in een trilapparaat geplaatst. Het te onderzoeken materiaal wordt op de bovenste zeef gebracht, waarna de zeven met een bepaalde frequentie en gedurende een bepaalde tijd worden geschud. De deeltjes vallen door de zeven totdat die zeef is bereikt waarvan de openingen kleiner zijn dan de afmeting van het deeltje. Op deze wijze worden zeeffracties verkregen. De zeeffracties, de hoeveelheid materiaal die op een zeef achterblijft, worden uitgezet tegen de gemiddelde deeltjesgrootte van de fractie. Als gemiddelde deeltjesgrootte wordt meestal het algebraïsche gemiddelde genomen van de bovenliggende zeef en de zeef waarop de fractie ligt. In tabel 3.4 vinden we het resultaat

van de zeefanalyse weergegeven.

Tabel 3.4.

Zeef (Tyler mesh)	Gem. deeltjes diameter (mm)	Zeeffractie (massa %)
-10 + 14	1,41	2
-14 + 20	1,00	5
-20 + 28	0,71	10
-28 + 35	0,50	18
-35 + 48	0,36	25
-48 + 65	0,25	25
-65	0,10	15

De notatie van bijv. -10 + 14 betekent dat de deeltjes kleiner dan 10 mesh maar groter dan 14 mesh zijn. De resultaten kunnen worden weergegeven in een histogram, fig. 3.17. Op de verticale as is de massafractie tussen twee zeven weergegeven. Gaan we uit van de gemiddelde deeltjesgrootte dan krijgen we een verdelingscurve als aangegeven in fig. 3.18. Met behulp van deze curve kunnen we tot cumulatieve verdelingscurven komen zoals aangegeven in fig. 3.19.

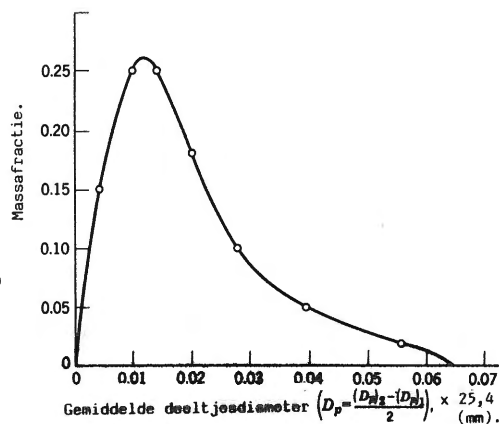
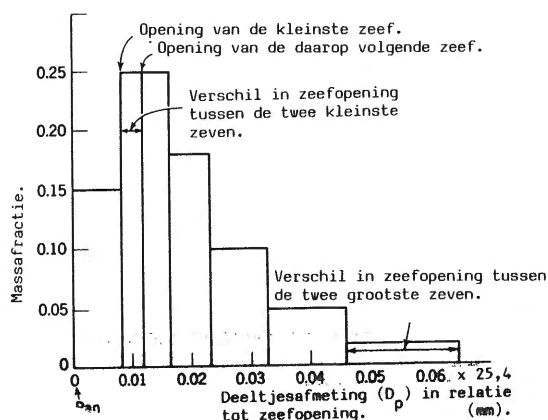


Fig. 3.17. Histogram van een zeefanalyse (geg. tabel 3.4).

Fig. 3.18. Verdelingscurve van een zeefanalyse (geg. tabel 3.4)

Door de resultaten op een andere wijze weer te geven kan vaak meer informatie worden verkregen over de korrelgrootteverdeling.

Zowel natuurlijk als kunstmatig gebroken stoffen blijken vaak een regelmatig verdelingspatroon te vertonen, dat door een vergelijking

kan worden beschreven. De verdeling ligt echter niet eenduidig

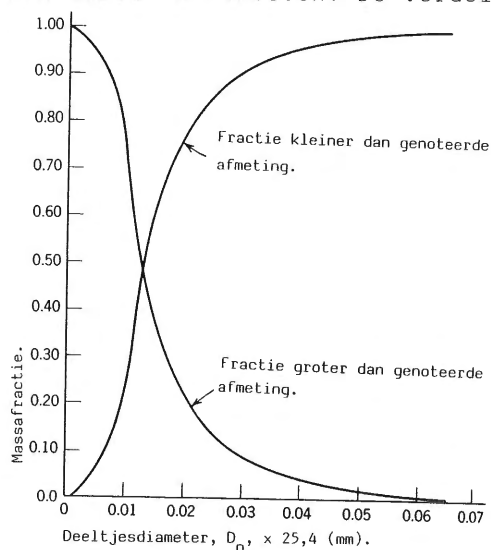


Fig. 3.19. Cumulatieve verdelingscurve van een zeefanalyse (geg. tabel 3.4)

vast. Wanneer tijdens het breken een verdeling naar grootte plaatsvindt of wanneer de analyse een bepaald gedeelte van het produkt betreft zal de curve afwijken van een regelmatig verloop.

Voor het beschrijven van een verdelingscurve zijn verschillende vergelijkingen opgesteld. Hiervan zullen we één vergelijking bespreken en wel die van Rosin en Rammler. Deze onderzoekers toonden aan dat men bij verkleining van allerlei soorten produkten in allerlei typen maalapparaten

vaak (helaas niet altijd) een deeltjesgrootte verkrijgt, die voldoet aan de statistische wet:

$$R = 100 \cdot \exp. - \left(\frac{d}{\bar{d}} \right)^n \quad (3.12)$$

of

$$Y = 1 - \left(\exp. - \left(\frac{d}{\bar{d}} \right)^n \right) \quad (3.13)$$

R = massapercentage van al het materiaal groter dan een diameter d .

$\bar{d}$ = een getal kenmerkend voor de fijnheid van het poeder, d.w.z. een statistisch gemiddelde diameter.

n = constante, afhankelijk van de aard van het produkt, het type maalapparaat en enigszins van de graad van fijnheid (n ligt meestal tussen ca. 0,7 en 1,5).

Y = cumulatieve fractie (doorval).

Vergelijking 3.12 kan ook als volgt worden geschreven:

$$\log \log \left(\frac{100}{R} \right) = n \log \frac{d}{\bar{d}} + \log \log e'$$

$$\log \log \left(\frac{100}{R} \right) = n (\log d - \log \bar{d}) + \log \log e \quad (3.14)$$

Zet men de gevonden deeltjesgrootteverdeling in een grafiek met de zeefrest R in % dubbellogarithmisch op de ordinaat en d (de deeltjesgrootte) enkel logarithmisch op de abscis dan zal volgens vergelijking 3.14 een rechte lijn ontstaan. Dit blijkt vaak op te gaan, tenminste wanneer men van een enkelvoudig materiaal uitgaat en niet van een mengsel. Soms is de lijn enigszins geknikt. In fig. 3.20 is het hiervoor gebruikelijke grafiekpapier met een voorbeeld weergegeven terwijl in fig. 3.21 dit voor verschillende maalsels is gedaan.

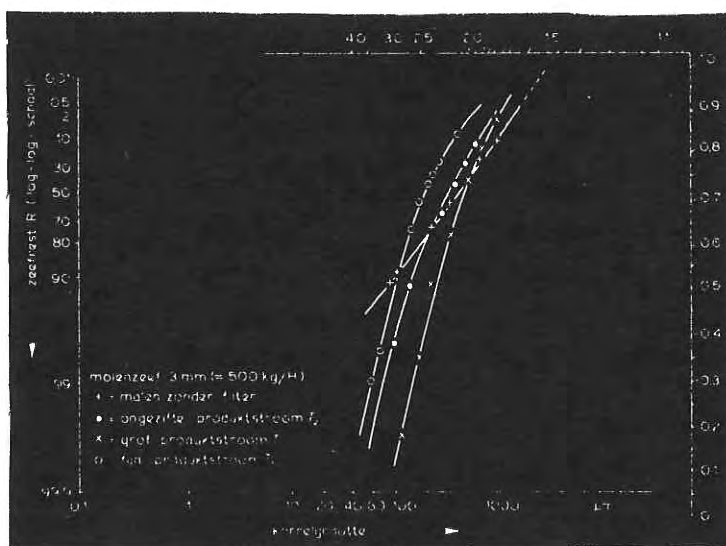


Fig. 3.21. Malen met en zonder zifter.

Stelt men in vergelijking 3.14 $d = \bar{d}$, dan is $100/R = e$, dus $R = 100/2,718 = 36,79 \%$. Trekt men nu in de grafiek een lijn // aan de abscis op de hoogte $R = 36,79$, dan geeft het snijpunt tussen de rechte lijn, aangevende de deeltjesgrootteverdeling, en deze horizontale lijn de waarde van $\bar{d}$. Hoe fijner het poeder hoe meer de lijn naar links ligt. Hoe gelijkmatiger het poeder des te steiler is de lijn. Het getal n is dus een maat voor de gelijkmatigheid (homogeniteit) van het poeder; hoe groter n des te beter de homogeniteit. Om de waarde van n gemakkelijk te bepalen is een punt P opgenomen in een schaalverdeling. Men verplaatst de lijn // aan zich zelf naar dit punt en leest dan de waarde van n af.

Het voordeel van de geschetste methode is dat men een korreelig materiaal kan definiëren door $\bar{d}$ en n .

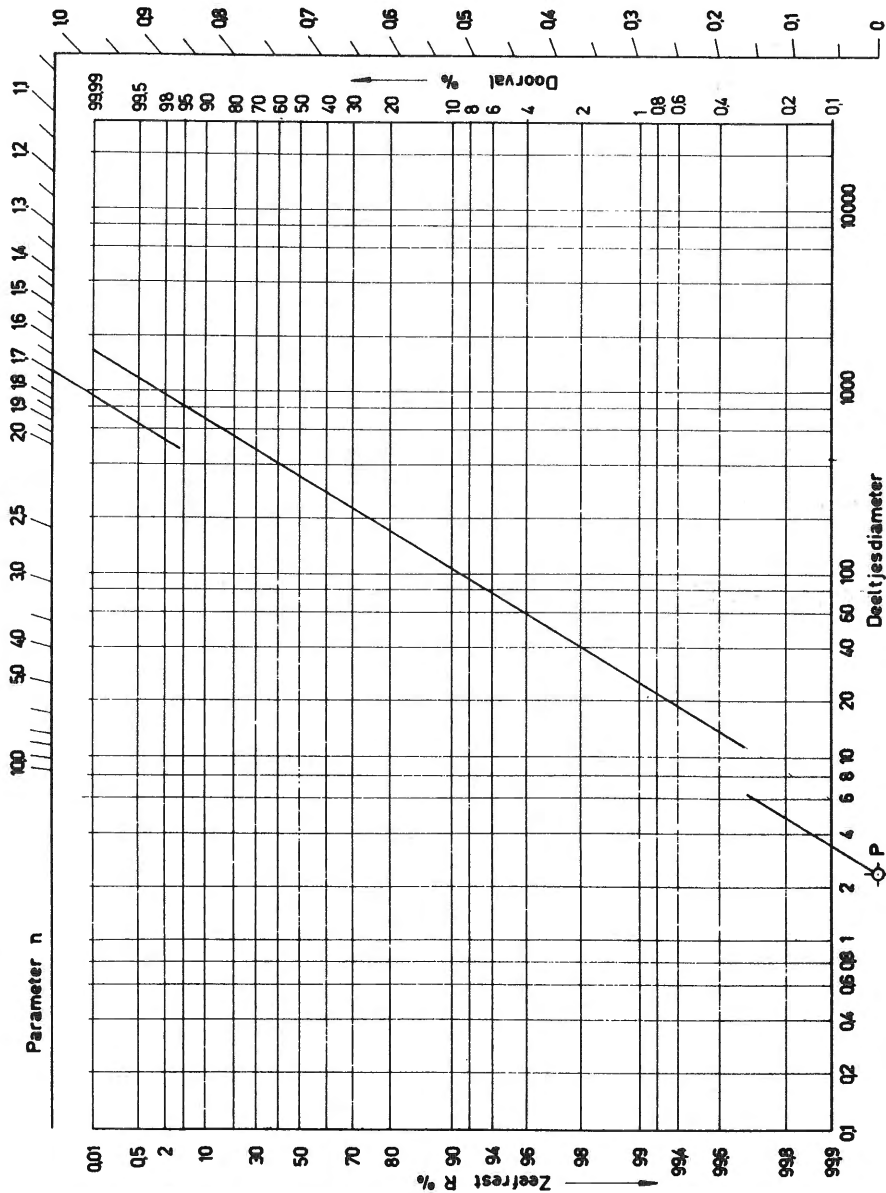


Fig. 3.20. Rosin en Rammler papier.

4. Het vormen van materialen (granuleren, agglomeren).

4.1. Inleiding.

Bij het vormen van materialen, ook wel granuleren of agglomereren genoemd, worden poedervormige stoffen, suspensies en klonten omgezet in korrels of brokken met redelijke uniforme afmetingen. In de gevormde korrels of brokken zijn de oorspronkelijke deeltjes nog herkenbaar.

Granuleren kan tevens inhouden het verkleinen van materialen door malen, breken of snijden van uniforme deeltjes van een draad. Ondanks de geringe theoretische kennis van het agglomeratieproces wordt het in de voedingsmiddelenindustrie veel toegepast.

Het vormen van materialen speelt o.a. een belangrijke rol in de graan- en suikerverwerkende industrie, zoals het vormen van veevoerders tot brokken in de veevoederindustrie en het vormen bij de fabricage van suikerwerken.

De gevormde granulaten bieden vele voordelen boven vaste stoffen in poedervorm zoals:

- geen of weinig stofverlies,
- goede mechanische verdeelbaarheid,
- bij opslag en transport treedt vrijwel geen samenklontering op,
- geen ontmenging als meerdere componenten aanwezig zijn,
- regeling van de oplosbaarheid van vaste stoffen.

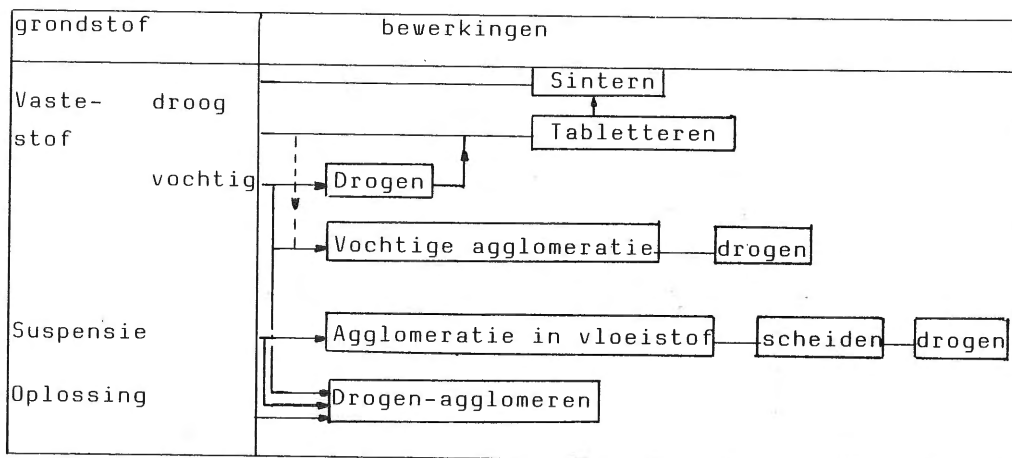
In de voedingsmiddelenindustrie kennen we verder verschillende agglomeratieprocessen; o.a. bij de bereiding van melkpoeder, cacao, meel, suiker en oploskoffie. Bij deze processen heeft de agglomeratie vooral tot doel het verhogen van de instanteigenschappen. Onder "instantiseren" wordt een zodanige behandeling van het oorspronkelijke produkt verstaan zodat de consument het behandelde produkt sneller en gemakkelijker kan gebruiken dan het onbehandelde produkt. Agglomeren is slechts één van de methoden die het instantkarakter van een produkt kunnen verbeteren. Andere methoden zijn o.a. het voorkoken van bijv. zetmeelhoudende produkten als babyvoeding, instant-pudding en rijst. Ook drogen kan leiden tot produkten met een instantkarakter.

Bij het agglomeren van voedingsmiddelen wordt in het algemeen het volgende nagestreefd:

- het verbeteren van de dispergeerbaarheid en oplosbaarheid.
Bij het oplossen van poeders of granulaten in water kunnen de volgende stappen worden onderscheiden:
 - bevochtigen van het poeder op het wateroppervlak,
 - zinken van het poeder in het water,
 - dispersie van de poederdeeltjes in het water,
 - oplossen van de poederdeeltjes.
 Deze stappen vinden gedeeltelijk gelijktijdig plaats.
- voorkomen van ontmengen,
- verbeteren van de stromingseigenschappen,
- verbeteren van het uiterlijk,
- vermindering van de hygroscopiciteit. Door agglomeratie kan een vermindering van de hygroscopiciteit optreden.
- aromatisering. Het agglomeratieproces kan eventueel uitgevoerd worden met een aromahoudende vloeistof.

Bij het agglomereren wordt in het algemeen uitgegaan van een droog of vochtig poedervormig materiaal, een suspensie of een oplossing, zie tabel 4.1.

Tabel 4.1.



In tabel 4.1 zijn de mogelijke processtappen voor het maken van een agglomeraat weergegeven. Betreft het een droog poeder dan kan dit

in een andere vorm worden omgezet door sinteren of tabletteren. Een vochtig poeder kan eerst gedroogd en dan geperst worden. Bij suspensies en oplossingen kan een combinatie van drogen en agglomereren worden toegepast. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van een walsdroger, sproeidroger of fluidbeddroger. Bij suspensies is agglomeratie in de vloeistof ook mogelijk door middel van een vloeistof die niet mengbaar is met de vloeistof van de suspensie.

4.2. Bindingsmechanismen bij het agglomereren.

Bij het granuleren kunnen vier soorten bindingsmechanismen worden onderscheiden, zoals in fig. 4.1. is weergegeven:

met vaste-stofbruggen	zonder vaste stofbruggen
 sintern chem. binding	 v.d. Waals
 hard wordende b.m. krist. opgeloste stoffen	 elektrostatisch (isolator)
 hoogvisk. b.m. vloeistof bruggen	 elektrostatisch (geleider)
 capillaire krachten t.g.v. vloeistof.	 vezels

Fig. 4.1. Schematische weergave van de belangrijkste bindingsmechanismen in agglomeraten.

De vier soorten mechanismen kunnen als volgt worden omschreven:

1. Binding via vaste-stofbruggen.

Vaste-stofbruggen kunnen ontstaan door sintering, door chemische reactie, door smelten en weer vast worden, door hard worden van toegevoegde bindmiddelen of door kristallisatie van opgeloste stoffen.

Bij het sinteren worden de vaste deeltjes bij voldoende hoge temperatuur met elkaar in contact gebracht. Sinter processen hebben het voordeel dat geen bevochtiging en droging nodig zijn. Sinteren kan echter kwaliteitsverlies geven door oververhitting.

Bij (her)kristalliseren kunnen rechtstreeks vaste-stofbruggen worden gevormd.

2. Vloeistofbruggen. Bij relatief kleine hoeveelheden vloeistof in het agglomeraat vormen zich vloeistofbruggen tussen de deeltjes. Neemt het vloeistofgehalte toe dan worden de poriën met vloeistof gevuld en gaan de capillaire krachten een rol spelen.
3. Binding van capillaire krachten.
Capillaire krachten kunnen optreden indien er zich na de granulatie vloeistof in de granule bevindt.
4. Binding tengevolge van aantrekkingskrachten tussen vaste stoffen. Hieronder vallen de van de Waals-kracht, aantrekking tengevolge van elektrische lading en magnetische aantrekkingskrachten.

Bij vezelvormige materialen kan een binding ontstaan doordat de vezels in elkaar grijpen.

De vaste-stofbruggen vormen de sterkste binding, daarna volgen resp., vloeistofbruggen (capillaire krachten), van der Waals en elektrische krachten.

4.3. Agglomeratieprocessen.

Voor de verschillende granuleertechnieken kan het beste onderscheid worden gemaakt naar het materiaal waarvan wordt uitgegaan.

1. Opbouwgranulatie. Dit is de belangrijkste methode om granules uit poeders te maken.
2. Granuleren van thermoplasten.

Granuleren is in de kunststoffenindustrie van groot belang. Kunststoffen die niet al te bros of niet al te plastisch zijn kunnen zeer goed gegraneleerd worden met een draadsnijder. Met behulp van een extruder worden meerdere draden geperst die door de machine in gelijke stukken worden gehakt, zie fig. 4.2.

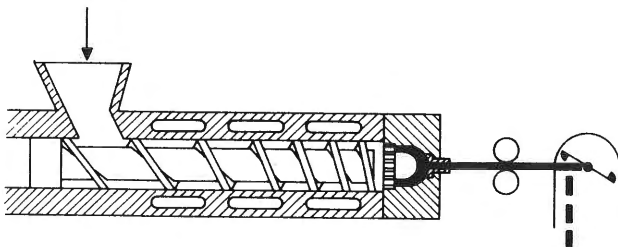


Fig. 4.2. Extruder.

Deze werkwijze vinden we ook terug in de levensmiddelenindustrie. Een voorbeeld hiervan is de fabricage van deegwaren, zoals macaroni en vermicelli. Hierbij wordt een deeg onder hoge druk door matrijzen geperst, welke voorzien zijn van verschillende soorten kleine openingen, al naar gelang de vorm waarin men het eindprodukt wil verkrijgen. De continue fabricage van diverse soorten suikerwerken geschiedt in principe op dezelfde wijze; ook in de chocoladeindustrie wordt deze werkwijze toegepast, bijv. bij het vervaardigen van hagelslag.

3. Granuleren van poedervormige materialen.

Het is mogelijk uit poeders granulaten te maken waarvan de breeksterkte sterk kan variëren.

De bekende en veel gebruikte techniek om granules met zeer grote sterkte te maken is briketteren of tabletteren. Hiervoor is een zeer hoge druk nodig, er worden allerlei typen persen voor gebruikt, persdrukken liggen in de orde van 10^2 à 10^3 bar.

4.3.1. Opbouwgranulatie.

Bij de opbouwgranulatie kunnen de volgende stappen worden onderscheiden:

- verhogen van de plakkerigheid van het droge poeder door bevochtiging en/of verhitten,
- het met elkaar in kontakt brengen van de plakkerige deeltjes, zodat agglomeraten gevormd worden,
- het drogen van de agglomeraten.

Voor het bevochtigen van waterabsorberende materialen, als voedingsmiddelen, is gewoonlijk meer vloeistof nodig dan voor inerte materialen. Bij inerte materialen kan worden volstaan met de vloeistofhoeveelheid die juist voldoende is om vloeistofbruggen tussen de deeltjes te vormen. Deze vloeistof moet wel een hulpstof bevatten, die na het drogen van de agglomeraten voldoende binding tussen de deeltjes geeft. Bij de meeste voedingsmiddelen is dit niet nodig daar verschillende componenten van het voedingsmiddel in de vloeistof, waarmee het bevochtigd wordt, meestal water, oplost. Deze vaak hoog geconcentreerde oplossingen van voedingsmiddelencomponenten in water hebben een thermoplastisch

karakter, waardoor de plakkerigheid van het poeder sterk van temperatuur en vochtigheid afhangt. Zie fig. 4.3 voor oploskoffie. Bij zetmeel bijv. is een vochtgehalte van ca. 20 massa % nodig voordat voldoende plakkerigheid optreedt, terwijl bij suiker reeds een vochtgehalte van 0,3 massa % voldoende is.

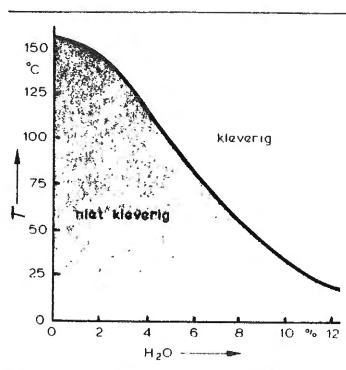


Fig. 4.3. Omstandigheden waaronder oploskoffie plakkerig is.

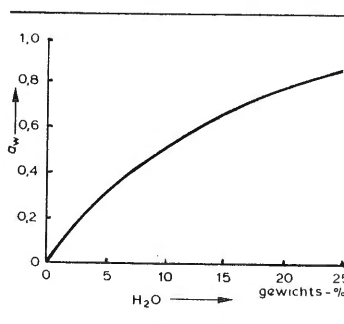


Fig. 4.4. Sorptie-isotherm voor oploskoffie.

Voedingsmiddelen kunnen worden bevochtigd door het opspuiten van vloeistof of door ze in contact te brengen met vochtige lucht of een mengsel van stoom in lucht. Wanneer van lucht/stoom gebruik wordt gemaakt wordt de opgenomen hoeveelheid vocht bepaald door de sorptie-isotherm van het betreffende produkt. Een voorbeeld hiervan is gegeven in fig. 4.4.

Daar in de praktijk het bevochtigen van het agglomeraat vaak in korte tijd plaatsvindt kan er geen evenwicht worden gevormd tussen deeltje en omgeving waardoor bijv. bij oploskoffie de in fig. 4.3 en fig. 4.4 gegeven relaties slechts gelden voor het oppervlak.

De opgenomen hoeveelheid vocht bepaald in belangrijke mate de eigenschappen van het uiteindelijke agglomeraat. De volgende bevochtigingsstadia kunnen worden onderscheiden, zie fig. 4.5.

In de pendulaire situatie vormen de vloeistofbruggen een disperse fase. De poriën tussen de deeltjes staan met elkaar in verbinding. Het agglomeraat heeft een open structuur. Deze toestand

is gunstig voor het oplossen van het poeder.

Bij overbevochtiging van de agglomeraten ontstaat de funiculaire toestand; lucht wordt ingesloten in de agglomeraten. Het eindprodukt zal slecht zinken in de vloeistof bij oplossen.

Bij nog verdere bevochtiging worden de kapillairen met vocht gevuld. Deze agglomeraten zinken beter, maar lossen meestal slecht op, kapillaire toestand.

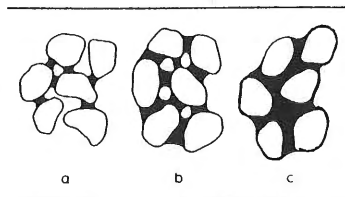


Fig. 4.5. Mate van bevochtiging. a. pendulaire toestand; b. funiculaire toestand; c. kapillaire toestand.

Apparatuur.

De opbouwgranulatie wordt veelal uitgevoerd in continu werkende granuleertrommels en -schotels.

Bij de granuleertrommel, fig. 4.6, wordt het droge poeder in een draaiende trommel gevoerd en wordt in axiale richting getransporteerd door de draaiende trommel, omdat deze onder een kleine hoek staat opgesteld. Tegelijkertijd wordt van bovenaf vloeistof op de poedermassa gesproeid. Door de rollende beweging van het poeder ontstaan granules. De sterkte wordt bepaald door bindingsmechanismen na droging.

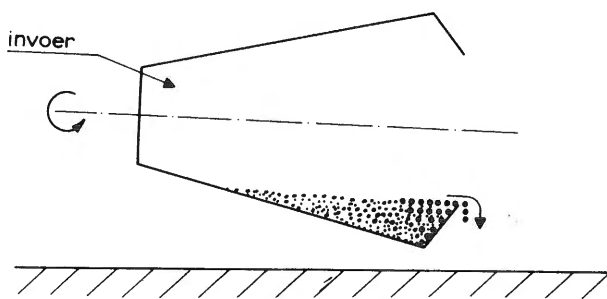


Fig. 4.6. Granuleertrommel.

De korrelgrootte varieert aanzienlijk en het is daarom nodig het produkt te klassificeren. Dit gebeurt tijdens het granuleerproces in de granuleertrommel, zie fig. 4.6.

De trommelgranulator is grotendeels vervangen door de schotelgranulator, fig. 4.7. De schotels zijn onder een hoek van ongeveer 50° opgesteld.

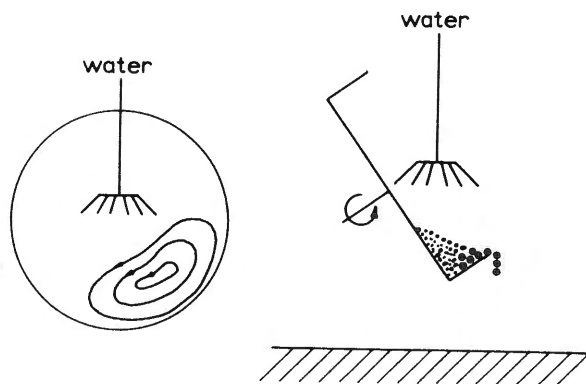
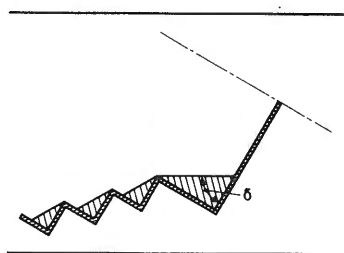


Fig. 4.7. Schotelgranulator.

De grote granules verzamelen zich aan de rand van de schotel en vallen er overheen. Het voordeel van de schotelgranulator t.o.v. de trommelgranulator is de veel betere klassificerende werking, bovendien kan het proces visueel gevolgd worden, wat zeer belangrijk is als het toerental, de helling en de vloeistoftoevoer, waarbij gegraneleerd moet worden, nog uitgezocht moeten worden.



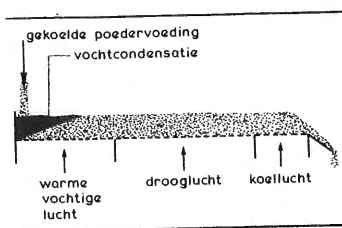
De klassificerende werking van de schotel kan worden vergroot door aangepaste vormen, bijv. door middel van trappen zoals in fig. 4.8 is aangegeven.

Fig. 4.8. Trapvormige agglomeratieschotel met hellende treden.

Agglomeren van poeders kan ook plaatsvinden door mengen wat in principe in elke vastestof menger kan worden uitgevoerd.

Het fluid-bed leent zich eveneens voor het agglomereren van poeders. Hierbij wordt de agglomeratie en droging in één apparaat gekombineerd.

Eén van de eerste systemen voor de agglomeratie van o.a meel was het Pillsbury-systeem, fig. 4.9. Bij dit systeem wordt het



poeder bevochtigd door in het eerste gedeelte van de fluidbeddroger vochtige lucht door het bed te leiden, waarbij vocht condenseert op het koude toegevoerde poeder. In de volgende zones van de droger wordt het produkt gedroogd en gekoeld.

Fig. 4.9. Pillsbury-systeem voor agglomeratie in een fluid-bed.

Tegenwoordig zijn er systemen waarbij rechtstreeks op het bed wordt gesproeid met een verstuiver, fig. 4.10.

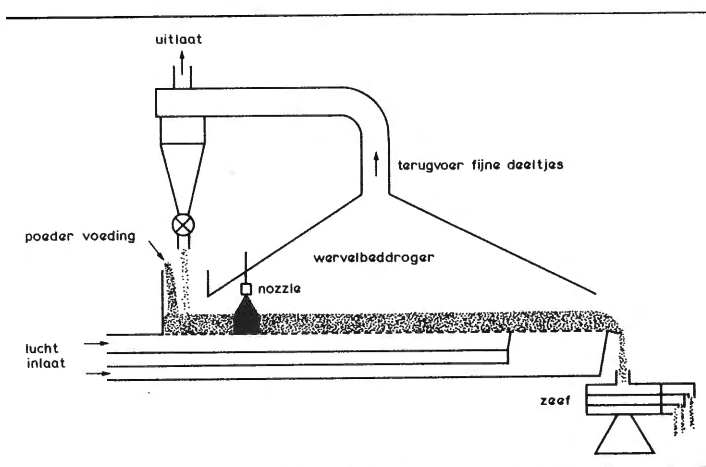


Fig. 4.10. Agglomeratie in een fluid-bed met directe verstuiving.

Nadeel van agglomeratie in een fluid-bed is dat produktcomponenten met verschillende dichtheid sterk segregeren, waardoor de onderlinge verhouding van de componenten in het agglomeraat sterk kan verschillen (bijv. bij cacao/suikermengsels voor instantdranken). Ook is het moeilijk te voorkomen dat het produkt een stoffig uiterlijk krijgt. Locale overbevochtiging van het bed en vastplakken van het produkt aan de apparatuur kan men soms moeilijk voorkomen.

Poeders die in een sproeitoren geproduceerd worden, kunnen daarin ook worden geagglomereerd. Het voordeel is, dat de gehele

behandeling dan geen extra apparatuur en arbeidskracht vereist. Enige agglomeratie vindt ook bij normaal bedrijf plaats in de omgeving van de nozzle of de centrifugaalverstuiver. De mate van agglomeratie kan worden verhoogd door meer dan één verstuiver te gebruiken, fig. 4.11. Een andere methode is om een deel van het poeder door de nozzle zone te laten recirculeren. De agglomeratie in een sproeidroger wordt wel "straight through" genoemd, omdat deze in één proces plaatsvindt.

De processen waarbij men start met een droog poeder als grondstof worden wel "rewet" processen genoemd, waarbij men meestal te maken heeft met een afzonderlijke droogstap.



a. recirculatie van poeder in de verstuiverzone. b. meer dan één verstuiver.

Fig. 4.11. Agglomeratie in een sproeidroger.

Bij het "straight through" proces, direkte agglomeratie, vindt in de sproeidroger de agglomeratie plaats tijdens en onmiddellijk nadat de individuele deeltjes zijn gevormd. Belangrijk hierbij is dat het oppervlak van de deeltjes zo kleverig is, dat effectieve botsingen plaatsvinden. Deze agglomeratie kan plaatsvinden in een toren zoals aangegeven in fig. 4.12 maar dan zonder stoominjectie. Dit proces kent twee uitvoeringsvormen:

- één fase droogstelsel. De agglomeratie en droging vindt plaats in de sproeitoren terwijl het poeder wordt gekoeld buiten de droger, bijv. op een schud- of fluidbed.
- twee fase droogstelsel. De agglomeratie en een gedeeltelijke droging vindt plaats in de toren. Buiten de toren wordt nagedroogd en gekoeld in een schud- of fluidbeddroger. Zie fig. 4.12.

Het twee fasen systeem heeft als voordeel dat de luchttemperatuur aan de uitlaat van de toren laag kan worden gehouden en dat de fijne fractie naar de toren teruggevoerd kan worden.

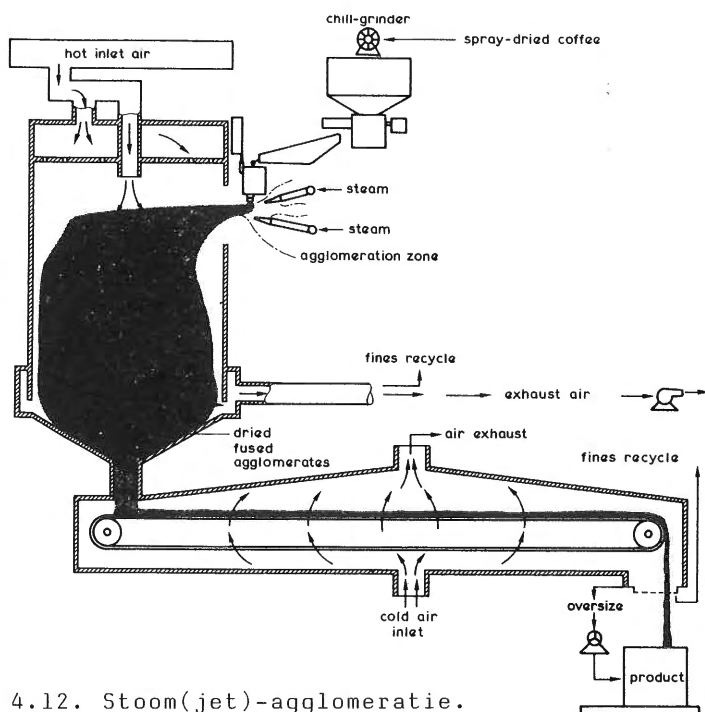


Fig. 4.12. Stoom(jet)-agglomeratie.

Bij "rewet" processen, indirecte agglomeratie, worden de poeders geagglomereerd in een apart bevochtigingsproces. Bij dit proces wordt gedroogd poeder opnieuw bevochtigd waardoor de afzonderlijke deeltjes aan elkaar gaan kleven. Bij dit proces kunnen vaak grotere agglomeraten worden verkregen, die betere instant eigenschappen hebben dan die verkregen met het rechtstreekse principe. Van het indirecte proces kennen we twee uitvoeringsvormen:

- a. agglomeratie met stoom of vochtige lucht. Hierbij wordt het stoom of lucht bevochtigd, waarna agglomeratie plaatsvindt, daarna gedroogd en gekoeld, fig. 4.12.
- b. agglomeratie met een fijn verstoven vloeistof, al of niet met oplosbare componenten als bijv. suiker. Na bevochtiging wordt het poeder gedroogd en gekoeld, zie fig. 4.13.

Bij methode a wordt in het algemeen een meer gelijkmatiger bevochtiging verkregen dan bij b.

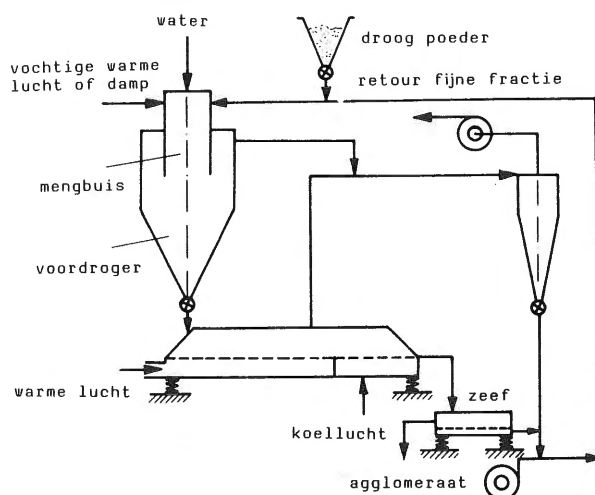


Fig. 4.13. "Rewet" agglomeratie d.m.v. bevochtiging in een mengbuis.

4.3.2. Agglomeratie door middel van persen.

Door het materiaal samen te persen wordt het aantal kontaktpunten tussen de deeltjes verhoogd. Door vervormingen, op de plaatsen van contact, kan een binding tussen de deeltjes worden verkregen. De bindingssterkte tussen de deeltjes is afhankelijk van het materiaal. Elastische deeltjes zullen in het algemeen minder sterke bindingen vertonen dan inelastische deeltjes. Door toevoegen van bindmiddelen, zoals bijv. melasse, wordt de persbaarheid verbeterd. De belangrijkste agglomeratieprocessen door middel van persen zijn schematisch weergegeven in fig. 4.14.

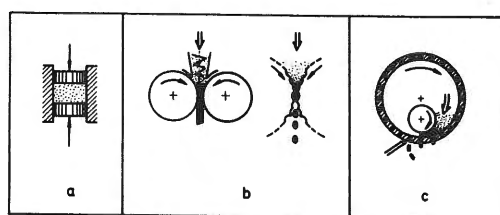


Fig. 4.14. Keuze uit een aantal agglomeratiepersen.
a. Tabletteren met stempel en matrijs. b. Agglomeratie tussen twee walsen. c. Persen door geperforeerde platen.

Het tabletteren of briketteren volgens fig. 4.14 a treft men aan in veevoeder bedrijven, bij de bereiding van artikelen als peper-munt en in de farmaceutische industrie. Het briketteren gebeurt met en zonder bindmiddelen.

Voor het vormen van materialen kan ook gebruik worden gemaakt van walsen, fig. 4.14 b. Hiermee maakt men in de bakkerijen dunne vellen van deeg, waaruit biscuits en dergelijke worden gestansd. Ze worden gebruikt voor het vervaardigen van flakes uit mais, haver enz.

De apparatuur die we onder fig. 4.14 c vinden wordt gebruikt voor het maken van pellets. Deze korrelvorm, welke men veel ziet in de veevoederindustrie, wordt gefabriceerd door een mengsel van grondstoffen, meestal voorzien van bindmiddelen, onder hoge druk te persen door geperforeerde platen; aan de voorzijde worden de korrels met behulp van een mes afgeschraapt.

5. Mengen en roeren.

5.1. Inleiding.

Onder mengen verstaan we het bij elkaar voegen van verschillende stoffen en het vervolgens onderling ruimtelijk in elkaar verdelen, tot een zekere graad van uniformiteit bereikt is.

Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen homogene en heterogene mengsels.

Homogene mengsels zijn van gelijke samenstelling zoals kan voorkomen bij vast/vloeistof oplossingen, mengbare vloeistoffen en gas-sen. Het maken van homogene mengsels is, thermodynamisch gezien, een spontaan proces (entropie neemt toe). Door diffusieverschijnselen zal, ook wanneer men niets ter bevordering van de menging doet, een homogeen mengsel ontstaan. Denk bijv. aan het mengen van twee gassen of twee in elkaar oplosbare vloeistoffen.

Bij heterogene mengsels blijft gedurende het mengproces het mengsel uit twee of meer fasen bestaan (twee monsters op verschillende plaatsen van het mengsel genomen, bezitten een verschillende samenstelling). Heterogene mengsels kunnen worden gevormd door twee niet mengbare vloeistoffen, een vloeistof en een gas, een vast/gas mengsel en een vast/vast mengsel. Bij heterogene mengsels hebben we niet te maken met een spontaan mengproces. Wanneer men de menging niet bevordert zal er vaak helemaal niets gebeuren, bijv. mengen van korrelmassa's. In vele gevallen kan na menging gemakkelijk ontmenging optreden zoals bij vast/gas en vloeistof/gas mengsels.

Bij het mengen kunnen we er naar streven een stabiel produkt te maken van een bepaalde samenstelling zoals bij de boter en deeg bereiding. Hierbij is het mengen het uiteindelijke doel. Het mengen kan echter ook als hulpmiddel dienen om een ander doel te bereiken zoals het bewerkstelligen van een tijdelijk innig contact tussen twee fasen met het oog op snelle uitwisseling van warmte of stof of een chemische reactie tussen de fasen te laten plaatsvinden.

Bij de fabricage van voedingsmiddelen treft men de volgende problemen aan:

- mengen vast/vast. De meeste mengvoeders, melanges van thee en koffie, droge soepen, mengsels voor de bereiding van bakwaren,

- pudding, ijs enz. zijn voorbeelden van vast/vast menging.
- mengen vast/vloeistof. Mengen vast vloeistof kan betrekking hebben op een vaste stof die oplost in de vloeistof (oplossing), maar ook kan het een vaste stof betreffen, die niet in de vloeistof oplosbaar is.
 - mengen vloeistof/vloeistof. Onderscheid kan worden gemaakt tussen mengbare vloeistoffen ("in elkaar oplosbare vloeistoffen") en niet mengbare vloeistoffen.
 - mengen vloeistof/gas. Voorbeelden van vloeistof/gas mengsels zijn o.a. ijs, slagroom, sommige suikerwaren en bakkerijartikelen.
 - mengen als hulpmiddel. Van het mengen als hulpmiddel kunnen de volgende voorbeelden worden genoemd:
 - a. Koelen of verwarmen produkten. Hierbij wordt dikwijls gemengd om het warmtetransport van de koude of warme wand naar het produkt (vloeibaar of korrelvormig) te bevorderen of om een gelijkmatige temperatuur in het produkt te verkrijgen. In het laatste geval worden vloeistofelementen of korrels van verschillende temperaturen gemengd. Hierbij spreekt men meestal niet van mengen maar van roeren.
 - b. Het uitvoeren van een fysische bewerking. Het mengen heeft hierbij tot doel om een gunstig contact tussen de stoffen te verkrijgen. Voorbeelden zijn:
 - Roeren bij oplossen en extractie (contact vast/vloeistof en vloeistof/vloeistof).
 - Mengen van een vloeistof of een gas met een absorptie- of adsorptiemiddel.
 - Mengen van een vloeistof met een damp bij rectificerende destillatie.
 - Mengen van kristallen met een oververzadigde oplossing bij kristallisatie.
 - Fijn verdelen van een oplossing in lucht om deze oplossing te drogen (verstuivingsdrogen).
 - Verstuiven van water in lucht om deze te bevochtigen.
 - Verdelen van waterdruppels in stoom om deze te condenseren (mengcondensor) of van stoom in een vloeistof om deze te verwarmen.
 - Stoffen die worden gemengd om reacties te bewerkstelligen.

c. Mengen als hulpmiddel bij de uitvoering van mechanische scheidingen zoals:

- Mengen van een mengsel van vaste stoffen met lucht of water voor pneumatische of hydraulische classificatie.
- Mengen van een zgn. filtratiehulpmiddel met een te filteren vloeistof.

d. Diverse toepassingen als:

- Het mengen van een vaste stof met lucht of water met het doel deze te transporteren.
- Het roeren van suspensies om bezinking te voorkomen.

5.2. Mengen vast-vast.

5.2.1. Theorie.

Bij het mengen van vaste deeltjes zijn voor een technoloog de volgende vragen van belang:

1. Wat is het mechanisme van het mengen?
2. Hoe zou de toestand van een mengsel kwantitatief gewaardeerd kunnen worden?
3. Aan welke eisen moet een mengsel voldoen, om voor een bepaald doel geschikt geacht te kunnen worden?
4. Wanneer het mengen wordt tegengewerkt door een optredende ontmenging, wat is dan het mechanisme daarvan?
5. Hoe groot is de mengsnelheid, resp. ontmengsnelheid?
6. Welke energie is vereist om een bepaalde hoeveelheid mengsel in een gespecificeerde toestand van gemengdheid te brengen?
7. Welke vergrotingsregels moeten in acht worden genomen bij het interpreteren van mengproeven op verkleinde schaal?

Ad. 1.

Bij het mengen van vaste deeltjes spelen drie mechanismen een belangrijke rol:

- a. het convectief mengmechanisme. Dit mengmechanisme treedt op wanneer brokstukken worden verwisseld met brokstukken van andere dergelijke gebieden.
- b. het diffuus mengmechanisme. Betrekkelijk kleine volumeelementen van het mengsel worden onderling verwisseld. Het nettoresultaat is een transport van componenten in de richting van hun negatieve concentratie-gradiënten.

c. het mengen door middel van lagen. Bij pasta's en degen kunnen door het aanbrengen van schuifspanningen lagen worden gevormd.

Tussen diffusieve en convectieve menging is er vaak een geleidelijke overgang die afhankelijk is van de verhouding tussen de grootte van de onderling uitgewisselde gebieden en de schaal van ongemengdheid.

De drie mengmechanismen kunnen in verschillende mate optreden in de nog te bespreken vast-vast mengers.

Ad. 2.

De toestand van een mengsel kan kwalitatief beoordeeld worden naar de mate van homogeniteit die men verwacht. Deze homogeniteit kan gebaseerd zijn op het meten van kleur, korrelgrootteverdeling, dichtheid, temperatuur of andere fysische grootheden.

Bij het beoordelen van de kwaliteit van een mengsel, gebaseerd op het meten van bepaalde fysische grootheden, zullen de gevonden relaties gewoonlijk empirisch zijn. De uitkomsten verkregen uit de metingen worden immers meestal vergeleken met een standaard mengsel.

De eenmaal gekozen meetmethode moet uit praktische overwegingen gemakkelijk uit te voeren zijn en voor een grote verscheidenheid van mengsels bruikbaar zijn. Om een mengsel te kunnen beoordelen zal het noodzakelijk zijn monsters te verzamelen gedurende het mengproces. De beoordeling van het totale mengsel zal echter nooit beter zijn dan de informatie die men verkrijgt uit de monsters.

Een mengsel van verschillende vaste deeltjes is ideaal gemengd indien verschillende monsters van het totale mengsel volledig dezelfde samenstelling hebben. De bruikbaarheid van deze definitie wordt bij vaste stoffen vooral bepaald door de monstergrootte. Monsters die één deeltje bevatten kunnen niet aan de definitie voldoen. Zelfs bij monster die tientallen deeltjes bevatten zal de samenstelling van de afzonderlijke monsters niet constant zijn maar een spreiding vertonen om een gemiddelde waarde bepaald van het gehele mengsel. Overal in het mengsel kunnen gebieden worden aangegeven waarbinnen de samenstelling groter of kleiner is dan de gemiddelde waarde. Geen enkel vast-vast mengsel zal een uniform mozaïek vertonen, fig. 5.1. De werkelijke samenstelling kan worden vergeleken met een mozaïek als aangegeven in fig. 5.2.

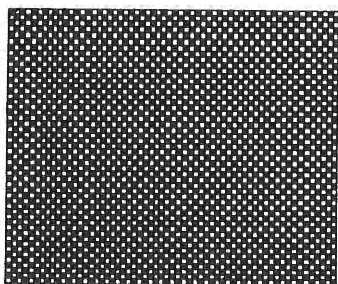


Fig. 5.1. Uniform mozaïek

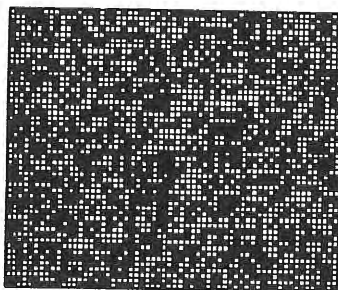


Fig. 5.2. "Overall" maar geen plaatselijke uniformiteit in het mengsel.

In fig. 5.2 is er geen plaatselijke uniformiteit. In zijn geheel geven beide mozaïeken echter dezelfde samenstelling.

Ad. 3.

De meest bekende methode om een mengsel te beoordelen is door middel van statistische relaties. De bij het mengen gebruikte statistische methoden zijn meestal gebaseerd op de standaarddeviatie σ , of de variantie, σ^2 , uitgaande van het rekenkundig gemiddelde.

De eisen van geschiktheid van een mengsel voor een bepaald doel komt er op neer dat de spreiding, X , van monsters van een bepaalde grootte, van een gemiddelde waarde, ξ , van het gehele mengsel, beneden een zeker maximum blijft.

In de statistiek wordt de toegestane spreiding van X , tolerantie genoemd en de gespecificeerde monstergrootte de schaal van beoordeling.

De spreiding van de gemiddelde waarde van X van de monsters is een belangrijk criterium voor een mengsel.

Stel er zijn n monsters getrokken die in grootte overeenkomen met de schaal van beoordeling. Dit kan een consumptie-eenheid zijn, zoals een schep veevoeder of babyvoedsel uit een grotere verpakking, of een handelseenheid, bijv. een pakje droge soep.

Ieder monster krijgt een nummer i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). De monsters worden geanalyseerd waarbij voor het i -de monster voor X de waarde

X_i is gevonden. Na analyse kan het uit de statistiek bekende begrip variantie, σ^2 , worden berekend. De variantie is voor de populatie gedefinieerd als:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \xi)^2 \quad (5.1)$$

Is de verwachtingswaarde ξ van X_i niet bekend dan moeten we gebruik maken van het steekmonstergemiddelde:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5.2)$$

en de variantie t.o.v. dit gemiddelde berekenen. Om te voorkomen dat deze variantie kleiner wordt, dan die berekend met ξ , moet de som van de kwadraten van de verschillen met $\bar{X}$ gedeeld worden door $n-1$ in plaats van door n :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (5.3)$$

De variantie is een maat voor de spreiding. De eisen die gesteld worden aan een mengsel kunnen kwantitatief tot uitdrukking worden gebracht, door een maximum te stellen aan de gemeten variantie van de X -waarden voor een vastgesteld aantal monsters van een vastgestelde grootte. Dat ook het aantal monsters vastgesteld moet worden is nodig, omdat bij verlaging van dit aantal, het risico groter wordt, dat er toevallig monsters met betrekkelijk dicht bij elkaar of bij de verwachtingswaarde ξ liggende X -waarden worden getrokken. Het risico van goedkeuring van een "slecht" mengsel moet afgewogen worden tegen de kosten en moeite verbonden aan de analyse van een groter aantal monsters en tegen het verlagen van de door de variantie gestelde maximumwaarde.

Voor een groot aantal monsters met gemiddeld n korrels, van uniforme grootte, kan worden aangetoond dat:

$$\sigma_{\infty}^2 = \frac{\xi(1-\xi)}{n} \quad (5.4)$$

Wij zien hieruit dat voor een groot aantal korrels van de beschouwde komponent per monster de bereikbare variantie tot nul nadert. Wij zien ook dat voor een komponent, die slecht in kleine hoeveelheden voorkomt, geen lage waarden voor σ^2 bereikt kunnen worden.

Wanneer we voor de aanvang van de menging een groot aantal monsters van gelijke grootte nemen, dan kan worden aangetoond dat:

$$\sigma_0^2 = \xi (1 - \xi) \quad (5.5)$$

Is X de volume fractie voor een bepaalde component dan kan σ_0^2 uitgerekend worden.

Wanneer het materiaal gedeeltelijk gemengd is kan de bruikbaarheid van het mengsel worden uitgedrukt in een menggraad, M ; een dimensionloos getal die is gedefinieerd als:

$$M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_\infty^2} \quad (5.6)$$

Hierin is σ_0^2 de beginwaarde van de variantie en σ_∞^2 de eindwaarde van de door mengen bereikbare variantie.

$M = 0$ voor ongemengd materiaal, $\sigma = \sigma_0$.

$M = 1$ voor volledig gemengd materiaal, $\sigma = \sigma_\infty$.

De vereiste menggraad is een maat voor de kwaliteit van de producten. Wil men een ladingsgewijze menger onderzoeken op de juiste menggraad dan moet men monsters uit de menger trekken die de grootte hebben van de uiteindelijke consumptieeenheden.

Gebeurt de menging continu dan liggen de problemen anders dan bij ladingsgewijs mengen. Bij continu mengen moeten eisen gesteld worden aan de dosering van de ingrediënten, aan het mengen zelf en aan het verdelen van het mengsel over de verpakkingseenheden.

Ad. 4.

Bij het maken van vast-vast mengsels kan na een bepaalde mengtijd ontmenging optreden. De ontmenging wordt veroorzaakt doordat op de componenten een uitwendig krachtveld werkt, meestal de zwaartekracht of een centrifugaalkracht of een resultante van beide krachten.

Worden in een ladingsgewijze menytrommel bij het vullen de kleinste deeltjes eerst gestort en daarna de grovere deeltjes er boven op dan zal tijdens rotatie er nagenoeg geen menging plaatsvinden. De grove deeltjes blijven boven. Wordt het grove materiaal op de bodem gestort en de kleintjes er boven op dan vindt wel menging plaats. Na een bepaalde tijd zal er echter ontmenging optreden daar de grovere deeltjes opnieuw de bovenste laag gaan vormen.

Ook bij deeltjes, die dezelfde grootte, maar een verschillende dichtheid hebben, treedt ontmenging op. De deeltjes met de grootste dichtheid hebben de neiging naar de onderkant te gaan en de lichtere deeltjes naar boven. In fig. 5.3 is het verloop van het mengen als functie van de tijd grafisch weergegeven. Deze figuur geeft na een bepaalde tijd een maximale menggraad weer waarna ontmenging optreedt.

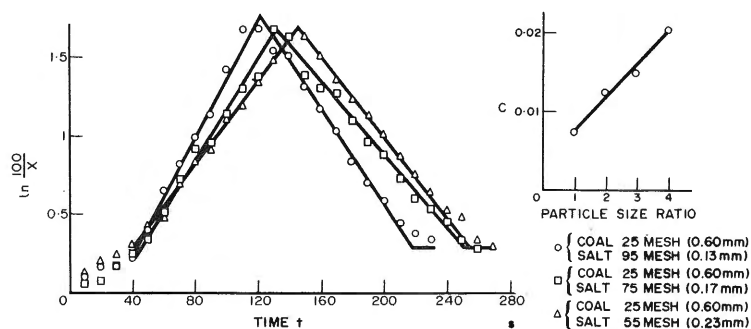


Fig. 5.3. Het mengen en ontmengen van vaste deeltjes in een trommelmenger.

Ad. 5.

Onder mengsnelheid wordt de snelheid verstaan, waarmee het verschil tussen de actuele toestand en door de menging bereikbare eindtoestand wordt verminderd. Onder ontmengsnelheid wordt de snelheid verstaan, waarmee de toestand in de richting van volledige scheiding verandert.

Daar er eigenlijk geen principieel verschil is tussen de diffusieve en convectieve menging mag verondersteld worden dat de formules die voor diffusievemenging kunnen worden afgeleid ook gelden voor convectieve menging. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de door de menger uitgewisselde gebieden kleiner zijn dan de monstergrootte (ofwel de schaal van beoordeling).

Bij diffusieve menging, die niet door ontmenging wordt tegengewerkt, hebben we een netto transport van de componenten, dat voldoet aan de wet van Fick.

Indien Y de fractie is van de monsters die de twee te mengen materialen in ongeveer dezelfde verhouding bevatten als die in het

gehele mengsel dan kan uitgaande van de wet van Fick, worden afgeleid dat:

$$Y(M) = 1 - e^{-ct} \quad (\text{menggraad}) \quad (5.7)$$

c = constante.

t = mengtijd.

Indien X het percentage van de niet gemengde monsters is, is:

$$Y = 1 - (X/100).$$

Door nu $\ln(X/100)$ uit te zetten tegen de tijd (t) moet volgens vergelijking 5.7. een rechte lijn worden verkregen. De waarde van c blijkt bij een trommelmenger o.a. af te hangen van:

- het totale volume van het te mengen materiaal,
- de hoek waaronder de mengtrommel draait,
- de rotatiesnelheid van de trommel,
- de deeltjesgrootte van de componenten,
- de dichtheid van de componenten,
- het relatieve volume van de componenten.

In fig. 5.4 is voor een ladingsgewijze trommelmenger $\ln(100/X)$ als functie van de mengtijd weergegeven met het toerental van de trommel als parameter.

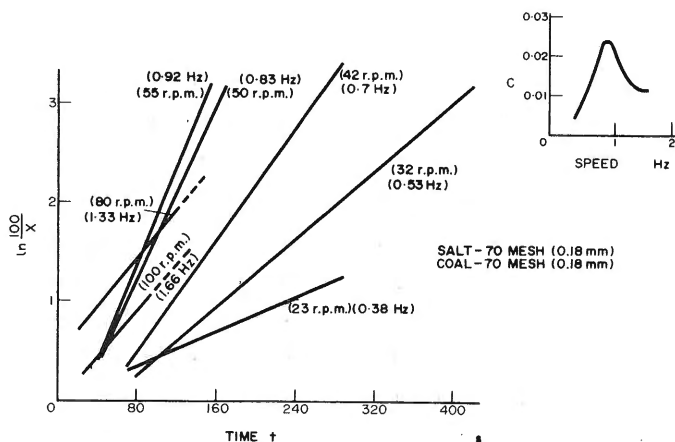


Fig. 5.4. Het effect van het toerental op de mengsnelheid.

Wanneer zowel menging als ontmenging optreden zal er uiteindelijk een toestand ontstaan, waarbij de mengsnelheid en ontmengsnelheid elkaar in evenwicht houden.

Ad. 6.

Welke hoeveelheid energie vereist is om een bepaalde hoeveelheid mengsel van een gedefinieerde toestand van gemengdheid te bereiden, kan slechts met behulp van proefnemingen beantwoord worden.

Ad. 7.

Wanneer men gegevens van een proces op grote schaal wil verkrijgen uit proefnemingen op verkleinde schaal moet men de vergrotingsregels kennen. Om deze vergrotingsregels te vinden, past men eerst een dimensieanalyse toe, d.w.z. men groepeert de variabelen, waarmee men het proces beschrijft, tot het maximaal mogelijke aantal onderling onafhankelijke dimensieloze groepen. Verschillende dimensieloze groepen kunnen voor het mengproces worden afgeleid. Gaan we er vanuit dat de verhouding van de centrifugaal- tot de zwaartekracht de belangrijkste grootheden zijn die het verschil bepalen tussen een laboratoriummenger en een geometrisch gelijkvormige fabrieksmenger dan kan de wisselwerking tussen de twee apparaten gekarakteriseerd worden door het getal van Froude, Fr.

$$Fr = \frac{N^2 \cdot L}{g} \quad (5.8)$$

N is het toerental of frequentie van de menger,

L is een kenmerkende afmeting,

g is de versnelling van de zwaartekracht.

Is het Froude-getal voor beide apparaten gelijk dan zullen we in beide apparaten hetzelfde stromingspatroon vinden.

5.2.2. Apparatuur.

Mengen vast/vast.

Bij het mengen vast/vast spelen de volgende punten een rol:

- a. de verhouding tussen de hoeveelheden te mengen stoffen (de menging wordt moeilijker naarmate deze verhouding meer afwijkt van 1 : 1);
- b. de deeltjesgrootte van de stoffen (menging wordt moeilijker naarmate de deeltjesgrootte meer verschillen);
- c. de dichtheden van de stoffen (een groter verschil maakt de menging lastiger);
- d. de vorm van de deeltjes en de aard van het oppervlak van de deeltjes;

Ontmenging kan gemakkelijker optreden naarmate de verschillen in eigenschappen meer uiteenlopen.

Bij het mengen van vast/vast is het moeilijk om verschillende apparaten op hun doelmatigheid te beoordelen en te vergelijken. Ook is het moeilijk ze in te delen naar het mengmechanisme daar de eerder genoemde mechanismen bij elk apparaat terug te vinden zijn. Bij mengschroeven, fig. 5.14, zal het convectief mengen overheersen terwijl bij trommelmengers, fig. 5.5 t/m fig. 5.13, hoofdzakelijk een vorm van diffuus mengen plaatsvindt. Laagsgewijs mengen kan soms beschouwd worden als een vorm van convectief mengen.

De benodigde mengtijd is een kwestie van ervaring; in goede mengers bedraagt deze enkele tot ca. 20 minuten, afhankelijk of het een gemakkelijk of moeilijk mengprobleem is.

Over het krachtverbruik is weinig te zeggen; dit zal stijgen naarmate de deeltjes fijner zijn (groter oppervlak) en zwaarder zijn (groter gewicht).

Controle op de menging kan door monsterneming en analyses plaatsvinden; de monsterneming is echter een moeilijk probleem.

Sommige materialen zoals kristallen en thee moeten voorzichtig gemengd worden om beschadiging te voorkomen. Bij deze keuze van de mengers moet hiermee rekening worden gehouden.

Roterende mengers (trommelmengers).

Roterende mengers zijn de eenvoudigste ladingsgewijs werkende mengers. De deeltjes worden ten aanzien van elkaar in één of meer dan één richting bewogen of verplaatst. Verschillende roterende mengers zijn getekend in fig. 5.5 tot en met fig. 5.13.

In fig. 5.5 is een eenvoudige trommelmenger getekend waarbij een cilinder om zijn as draait.

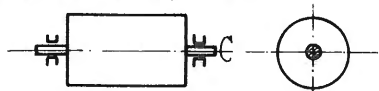


Fig. 5.5. Trommelmenger.

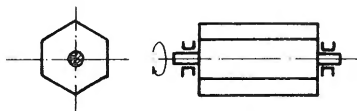


Fig. 5.6. Trommel (zeshoekig)-menger.

De menging in bovenstaande mengers vindt uitsluitend plaats doordat de korrels voortdurend over elkaar heen rollen. In dit apparaat treedt menging op in een vlak loodrecht op de as, doch weinig of niet in de richting van de as. Dit bezwaar wordt groter naarmate de cilinder langer is. Hetzelfde geldt voor de zeshoekige trommel. De menger in fig. 5.6 werkt nauwelijks beter dan de trommelmenger van fig. 5.5.

De in fig. 5.7 getekende menger werkt aanzienlijk beter doordat het materiaal zich in verschillende richtingen verplaatst.

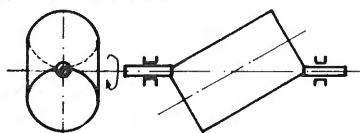
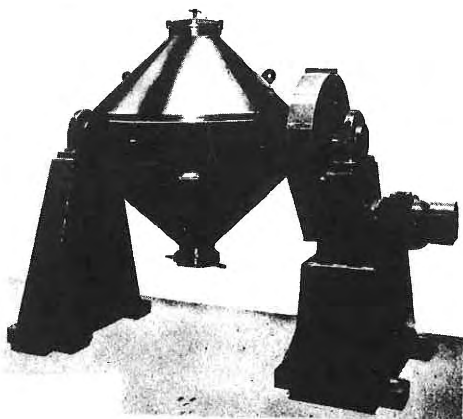


Fig. 5.7. Trommelmenger die draait onder een bepaalde hoek.

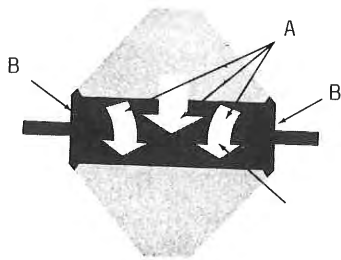
De menger in fig. 5.8 is een zgn. dubbelkegel menger die nog beter werkt dan die van fig. 5.7.



De menger bestaat uit een kort cilindrisch stuk, aan beide zijden voorzien van een kegel; het geheel roteert langzaam om de as die loopt door het cilinderoppervlak. Door op de as een konisch aan te brengen wordt een gelijkmatige snelheid van

Fig. 5.8. Dubbelkegel menger.

de deeltjes over de breedte van het cilindrische gedeelte verkregen, fig. 5.9. Hierdoor wordt de mengtijd verkort en daardoor het energieverbruik verminderd.



- A. Uniforme deeltjes snelheid.
- B. Konisch (voorkomt dode hoeken).

Fig. 5.9. Dubbelkegel-menger met konischen.

In fig. 5.10 is een tweeling menger, V-vorm, weergegeven, die zonder sproeischijven uitstekend geschikt is voor het mengen van droge materialen.

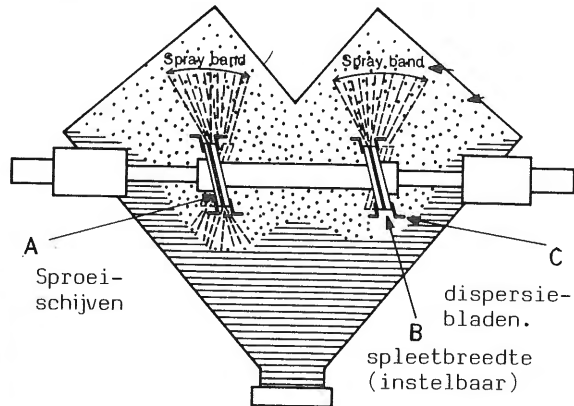
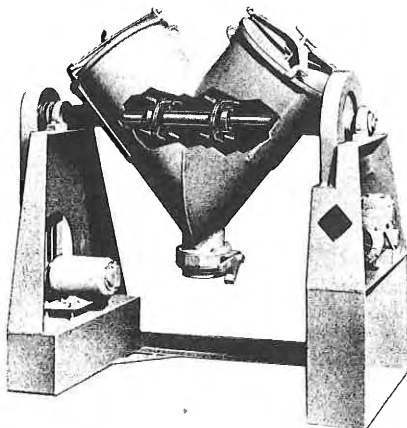


Fig. 5.10. Tweelingmenger, V-vorm.

Bij elke omwenteling van de mengtrommel wordt de gehele inhoud eenmaal samengevoegd en één keer in twee helften verdeeld. Door ongelijke beenlengten te nemen wordt er meer produkt in axiale richting verplaatst waardoor de mengsnelheid ten opzichte van het V-type toeneemt.

Goede resultaten worden ook verkregen met roterende tetraëders, kuben e.d.

Bovenstaande apparatuur biedt tevens mogelijkheden voor het granuleren en coaten van poedervormige produkten, bijv. voor het

ontstoffen of voor het aanbrengen van een produktvreemde laag. De mengers worden daarvoor voorzien van technische hulpmiddelen waarmee een geringe hoeveelheid vloeistof zo goed mogelijk wordt verdeeld over de vaste stof. Een voorbeeld van een dergelijke voorziening is aangegeven in fig. 5.10 in de vorm van sproei-schijven.

Een veel toegepaste menger voor het drageren en granuleren is de paddestoelmenger, fig. 5.11.

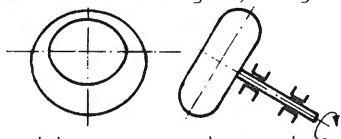
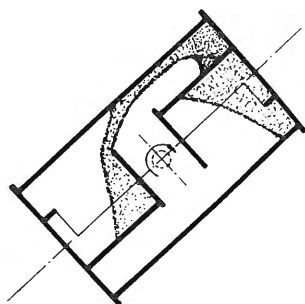


Fig. 5.11. Paddestoelmenger.

De werking van roterende mengers kan worden verbeterd door in de trommel tegen de wanden schoepen aan te brengen of roerarmen of een roerwerk.



In fig. 5.12 is een menger getekend die bestaat uit een cilinder waarvan de rotatieas loodrecht op de lichaamsas staat, terwijl op ieder van de beide vlakke wanden een cilindrisch busje is geplaatst waarvan ongeveer de helft van de cilinderwand is weggelaten.

Fig. 5.12. Trommelmenger met schotten, rotatie "end over end".

De menger in fig. 5.13 is een moderne menger die erg geschikt is

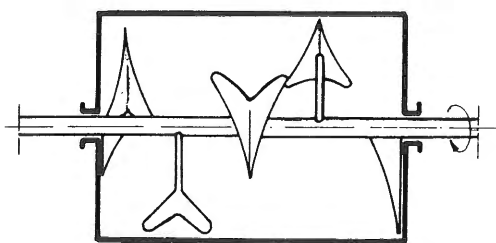
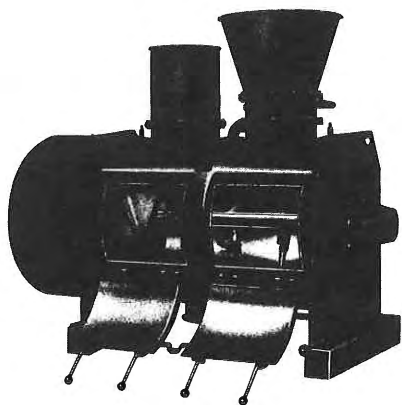


Fig. 5.13. Een mengtrommel met scheppenroerwerk.

voor het mengen van bepaalde produkten als mengvoeders, droge soepen, meelprodukten etc. Daarnaast wordt de menger gebruikt bij het bereiden van cacaoprodukten.

De menger heeft een langzaam draaiende trommel en een snel draaiend roerwerk in de vorm van een aantal ploegen. Dit roerwerk zorgt voor een verplaatsing in de as-richting en is in staat om eventueel gevormde conglomeraten uit elkaar te slaan. Mengtrommels met roerwerken zijn minder geschikt voor stoffen die beschadigd kunnen worden. De apparaten kunnen tevens worden voorzien van hulpmiddelen om verschillende mechanische processen te combineren als mengen, verpulveren van agglomeraten, bevochtigen, coaten, verwarmen, koelen, drogen en het uitvoeren van reacties onder druk of vacuüm en hoge temperatuur.

In mengers met roerarmen worden in het algemeen grotere mengsnelheden bereikt dan in die zonder roerwerk; hun energieverbruik is echter hoger. Het totale energieverbruik voor het bereiken van een zekere menggraad zal in verschillende typen van mengers waarschijnlijk niet veel verschillen.

Roterende mengers zonder roerwerk zijn in hoofdzaak geschikt voor goed stromende materialen; stoffen die een grotere samenhang vertonen, als bijv. fijne poeders, kunnen beter worden verwerkt in een menger met een roerwerk.

Alle mengtrommels werken het best bij een zekere, niet te grote, vulling en een bepaald toerental. Dit laatste dient ver onder het zgn. kritische toerental, N_c (toeren/s), te liggen. Bij het kritische toerental is de centrifugaalkracht gelijk aan de zwaartekracht. In formule:

$$m \cdot \omega^2 \cdot r = m \cdot g; \quad \omega = 2 \pi N;$$

hieruitvolgt:

$$N_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}} \quad (\text{omw./s}) \quad (5.9)$$

m = massa van het deeltje (kg).

ω = hoeksnelheid van de trommel (rad/s).

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

r = straal van de trommel - straal van het deeltje (m).

Mengers met één of meer mengschroeven.

In fig. 5.14 is een ladingsgewijze menger weergegeven waarin meerdere schroeflinten zijn toegepast.

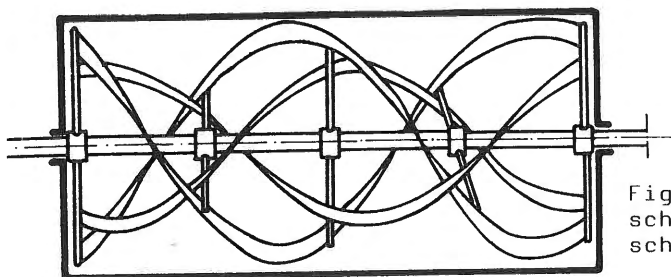


Fig. 5.14. Ladingsgewijze schroefmenger met meerdere schroeflinten.

Doordat de schroeflinten een tegengestelde transportrichting bewerkstelligen, wordt een goede menging verkregen.

De mengschroef kan tevens als continu menger zijn uitgevoerd, zoals fig. 5.15 laat zien. Deze menger is vaak uitgevoerd met

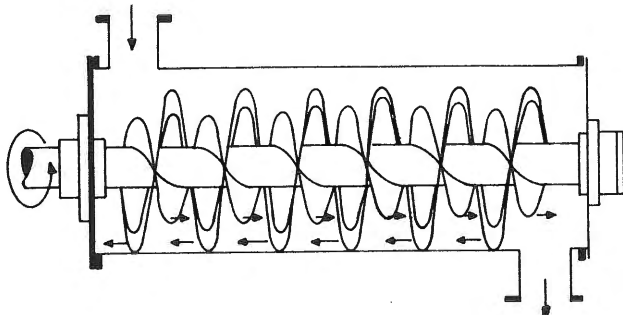


Fig. 5.15. Een mengschroef met twee schroefbladen.

schroefbladen die om elkaar heen bevestigd zijn. Deze mengers kunnen vele meters lang zijn en dienen dan tevens als schroeftransporteur. Op verschillende plaatsen kunnen bepaalde componenten aan de menger worden toegevoegd die, tijdens het transport, met de reeds aanwezige stoffen worden gemengd.

Een ander type apparaat met een mengschroef in het midden is in fig. 5.16 getekend. Een veel beter apparaat, waarbij de mengschroef vertikaal is geplaatst is de zogenaamde Nautamenger. In deze menger loopt de schroef al draaiend in een kegelvormig vat rond. Deze zeer goede menger heeft zowel een verticale als een horizontale materiaal verplaatsing. De Nautamenger wordt ook in dubbele uitvoering, met twee mengschroeven, uitgevoerd.

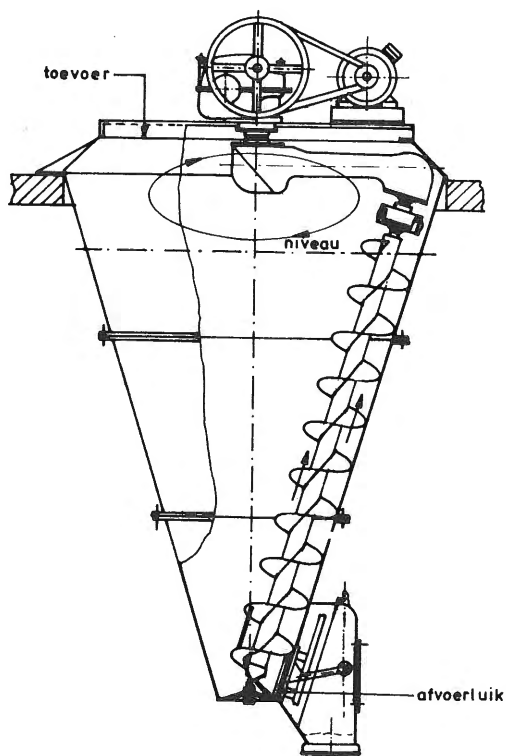
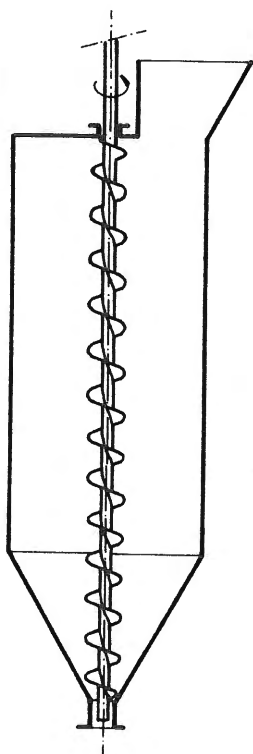


Fig. 5.16. Vertikale schroef- / Fig. 5.17. Nautamenger.
menger.

Een doorsnede van een Nautamenger is getekend in fig. 5.17. Deze menger is zowel voor goed stromende als minder goed stromende materialen bruikbaar. Door de intensieve menging zijn deze mengers bijzonder geschikt voor de menging van vaste stoffen waarbij een van de stoffen slechts in zeer geringe hoeveelheden voorkomt. Een voorbeeld hiervan is het mengen van vitamines door levensmiddelen. Nautamengers worden uitgevoerd met dubbele wand wanneer het nodig is de inhoud van het vat te verwarmen. Elektrische verwarming is ook mogelijk.

De schroefmengers kunnen, behalve voor vaste stoffen, gebruikt worden voor het mengen van vloeistoffen met vaste stoffen tot een brij.

Men vindt bovenstaande mengers o.a. in meel-, en vismeelfabrieken.

Mengers met roerarmen.

Mengers met roerarmen zijn opgebouwd uit een ondiep, cilindrisch langzaam roterend vat, waarin roerarmen in tegengestelde richting ronddraaien en over de bodem schrapen. De as waarop de roerarmen zijn gemonteerd staan meestal excentrisch. In figuur 5.18, een soort planeetmenger, is de grondgedachte schematisch aangegeven. De menger in figuur 5.19 heeft twee tegen elkaar draaiende roerwerken.

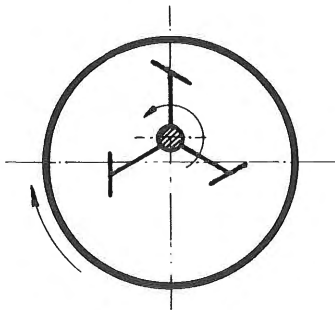


Fig. 5.18. Planeetmenger met één roerarm.

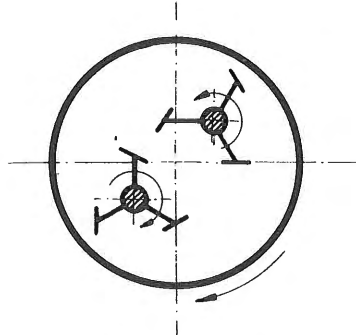
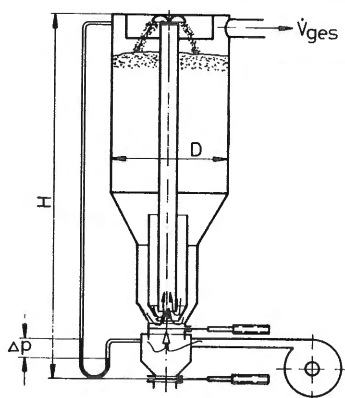


Fig. 5.19. Planeetmenger met twee roerarmen.

In plaats van roerarmen kan dit type menger ingericht worden met walsen; het maalt en mengt dan tegelijk. Men kan spreken van een licht type kollergang. Wanneer het primair om mengen gaat, bouwt men de kollergang meestal excentrisch.

Mengen met behulp van lucht.

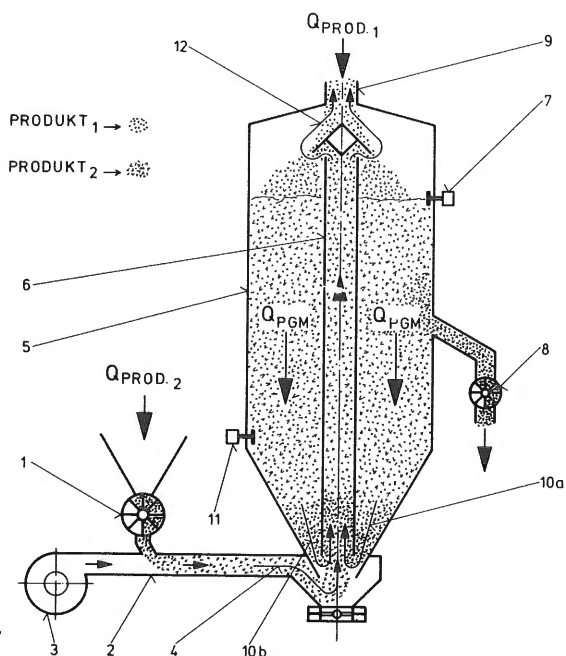
Het mengen met behulp van lucht kan op verschillende manieren. Zo is het mogelijk onder in een vat, waarin zich de te mengen stoffen bevinden, stralen lucht te blazen. De stoffen wervelen dan op en er treedt een snelle menging op. Ook is het mogelijk van volledige fluïdisatie gebruik te maken. In fig. 5.20 is een silo weergegeven waarbij gebruik wordt gemaakt van fluïdisatie. Met lucht wordt de massa pneumatisch getransporteerd door een verticale stijgbuis waardoor een interne recirculatie van het produkt wordt verkregen. Het mengprincipe berust op een continu "versnijden" van twee ongelijke massastromen stortgoed door middel van een scheidingstrechter. In fig. 5.21 is een continu werkende



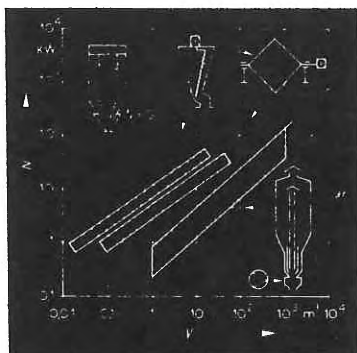
1/8. transportsluis, 3. ventilator, 5. menger, 6. stijgbuis, 7/11. niveau voeler, 9/12 lucht-afvoer.

Fig. 5.20; Fig. 5.21.

Pneumatische menger voor granulair materiaal, resp. ladingsgewijs, continu.



mengsilo weergegeven die volgens hetzelfde principe werkt.



In fig. 5.22 is voor enkele vast/vast mixers het geïnstalleerd vermogen in kW/100 kg (N) uitgezet tegen de nuttige inhoud in m^3 (V).

Fig. 5.22. Gemiddeld energieverbruik in kW/100 kg voor enkele mengertypes.

Continu mengen.

Naast de ladingsgewijs werkende vast-vast mixers zijn er een aantal die continu werken. Hiervan zijn er in het voorgaande twee besproken, fig. 5.15 en 5.21. Hieraan zullen enkele typen worden toegevoegd. Continu mengen van vaste stoffen wordt relatief weinig toegepast daar zich hierbij vaak verschillende problemen voordoen.

De eenvoudigste methode van continu mengen is het samenvoegen van leidingen waarin de te mengen stoffen pneumatisch worden getransporteerd. Op het punt van samenkomst en in de leiding daarachter vindt de menging vrijwel momentaan plaats. Bij dit systeem komt het aan op een zeer nauwkeurige en gelijkmatige dosering van de te mengen stoffen. Wanneer deze dosering goed uitgevoerd wordt is het de vraag of de menging tijdens het pneumatisch transport voldoende zal zijn en of er bij de afscheiding van het mengsel uit de lucht geen ontmenging zal optreden. Hetzelfde geldt voor de zgn. centrifugaalmengers, waarin de te mengen stoffen op een snel draaiende schijf worden toegevoegd. Een voorbeeld hiervan is de zgn. Entoleter, fig. 5.23.

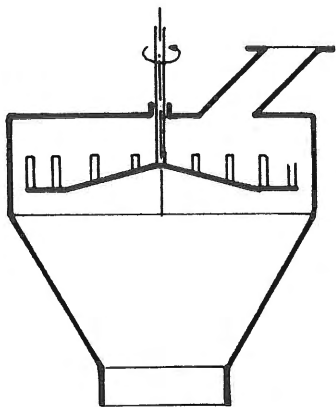


Fig. 5.23. Entoleter.

Door de centrifugaalkracht worden de toegevoegde stoffen er af geslingerd, waarna verdere menging plaatsvindt in het om de rotor gebouwde huis. Bij een max. diameter van de schijf van ca. 0,4 m bedraagt het toeren-tal 60 per seconde. Een dergelijke menger heeft een kleine inhoud en een momentane menging. Het komt aan op een goede dosering. De Entoleter wordt in o.a. de graanindustrie tevens gebruikt voor het doden van insecten e.d. Daaruit volgt dat men er geen materialen in kan scheiden die beschadigd kunnen worden.

Een nadere methode van continu mengen is het op een transport-band laten stromen van de te mengen stoffen. Op deze band komen de materialen in lagen over elkaar te liggen, waarna een namenging moet plaatsvinden. Dit systeem wordt o.a toegepast in veevoederbedrijven. Ook hier is de dosering belangrijk.

Reeds besproken is het continu mengen in een menger die voorzien is van tegen elkaar in transporterende schroeflinten(bladen), zodanig dat er een nettotransport is in één richting. Men krijgt zowel een transversale als longitudinale menging, fig. 5.15.

In fig. 5.24 vinden we een continu werkend apparaat, die is opgebouwd uit een groot aantal tweelingmengers volgens fig. 5.10. De werking ervan spreekt voor zich.

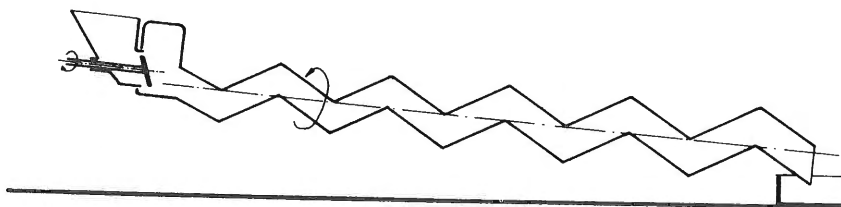


Fig. 5.24. Continu menger opgebouwd uit tweelingmengers.

Een toepassing van continu mengen is het vereffenen van fluctuaties in samenstelling of kwaliteit van een produktstroom. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de spreiding in verblijfsduur in de menger; men wil m.a.w. bevorderen dat men op een bepaald ogenblik in de uitgaande stroom van de menger volume-elementen aantreft die op verschillende vroegere tijdstippen de menger zijn ingegaan. Men kan dit doel bereiken door de ingaande materiaalstroom te splitsen en de deelstromen door silo's met verschillende verblijftijden te laten gaan.

Zowel in de reeds besproken menger, fig. 5.21, als die weergegeven in fig. 5.25 wordt bovenstaande gedachtengang toegepast. In de menger, volgens fig. 5.25, passeert het materiaal gedeeltelijk een silo één keer en voor een ander deel dezelfde silo meerdere malen. De stroom in de silo ondergaat ook weer een verdeling over een aantal verblijftijden omdat op verschillende hoogten in de wand uitlaten zijn aangebracht. De circulatiestroom wordt pneumatisch gedreven.

In de menger volgens figuur 5.26 worden eveneens delen van een materiaalstroom over een aantal apparaten met verschillende verblijfsduur gecirculeerd. Een stroom materiaal valt hierbij op een snel draaiende holle conus die voor menging en splitsing van de stroom, in vier delen, dient. Twee delen vallen in vrij grote silo's, waar zij na verloop van betrekkelijk lange tijd weer uitkomen in een schroeftransporteur. Eén deel valt in een pijp die direct in een schroeftransporteur uitmondt, de rest wordt aan de

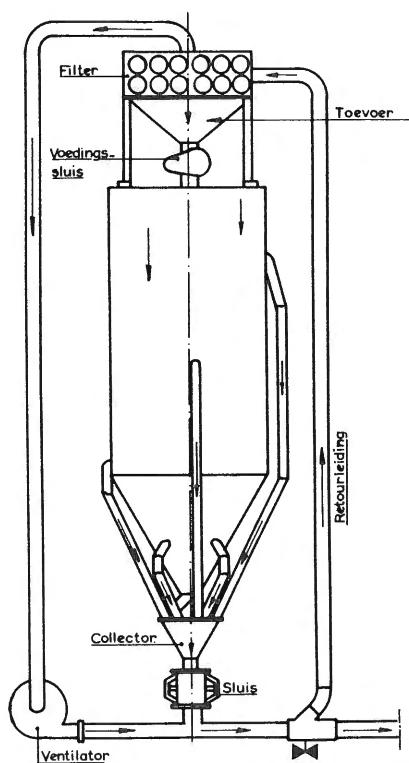


Fig. 5.25. Silomenger (pneumatisch transport).

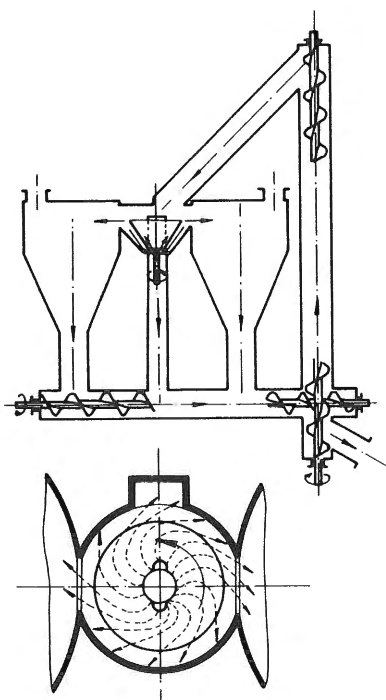


Fig. 5.26. Silomenger (schroeftransport)

onderzijde van de konisch weer aangezogen en opnieuw aan de verdeling onderworpen.

Vele maalwerktuigen zijn tevens goede mixers. Men kan malen en mengen combineren. Ook hierbij is de dosering het voornaamste probleem.

5.3. Mengen vast/vloeistof.

Het mengen van vaste stoffen met vloeistoffen bestrijkt een groot gebied. Hierbij kunnen we onderscheiden:

- Vaste met heel weinig vloeistof.
- Het mengen van een vaste stof en vloeistof in zodanige verhouding dat wij te maken hebben met een zeer visceus mengsel.
- Vloeistof met heel weinig vaste stof.

Ad. a.

Dit probleem vinden we terug bij het bevochtigen van de vaste stof

en bijv. bij het toevoegen van vet of melasse aan veevoeder. Wanneer componenten in kleine hoeveelheden aan een mengsel moeten worden toegevoegd verdient het aanbeveling dit in de vorm van een oplossing te doen. Het volume is dan veel groter. Wanneer men een kleine hoeveelheid vloeistof op één plaats aan een grote hoeveelheid vaste stof toevoegt zal de vloeistof daar ter plaatse worden gebonden en zal het buitengewoon moeilijk zijn een goede menging te verkrijgen. Men kan het best een menger gebruiken zoals o.a. afgebeeld in fig. 5.13, die de conglomeraten van vloeistof en vaste stof uiteenslaat.

In het algemeen is het beter de vloeistof onmiddellijk zo goed mogelijk over de vaste stof te verdelen, waarna een korte namenging noodzakelijk is. Bij namengen heeft men te maken met mengen vast/vast; de kleine hoeveelheid vloeistof verhoogt het vochtgehalte van het mengsel in geringe mate. Deze bewerking kan worden uitgevoerd door:

- a. continu vloeistof te verstuiven in een leiding waardoorheen de vaste stof wordt getransporteerd,
- b. continu vloeistof te verstuiven in een cycloon waarin de vaste stof wordt opgevangen.

In beide gevallen moeten de te mengen stoffen nauwkeurig worden gedoseerd.

Daarnaast lenen de meeste mengers voor vast/vast zich goed voor het mengen van een vaste stof met weinig vloeistof. De mengers moeten dan worden voorzien van technische hulpmiddelen, waarvan in fig. 5.10 een voorbeeld is gegeven.

5.4. Het mengen van visceuse produkten (kneden).

Tot het maken van visceuse mengsels kan worden gerekend:

- a. de fabricage van pasta's,
- b. de fabricage van degen,
- c. het kneden van plastische massa's als chocolade, margarine (vloeistof/vloeistof).

In deze gevallen is de consistentie zodanig dat het mengsel moeilijk stroomt. De menging dient langs mechanische weg tot stand te worden gebracht. De machines die hiervoor worden gebruikt noemt men kneedmachines. De meeste kneedmachines werken ladingsgewijs en zijn van een zware constructie.

De ladingsgewijze kneedmachines kunnen worden onderscheiden in drie hoofdtypen:

1. Kneedmachines uitgevoerd met één (of twee) zware roerarm(en) van bijzondere vorm, die ronddraaien in (een) trogvormige ruimte(n). De roerarmen draaien tegen elkaar in met dezelfde of verschillende snelheid. Dit type vinden we weergegeven in figuur 5.27.

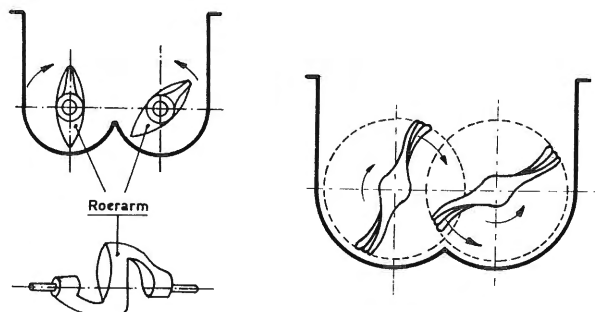


Fig. 5.27. Kneedmachines met roerarm(en).

2. Kneedmachines die bestaan uit een cilindrische pan waarin zich een roerarm bevindt. De pan draait rond, de roerarm bevindt zich excentrisch in de pan en heeft soms nog een of andere beweging. De machines worden veel toegepast in bakkerijen. Een voorbeeld is weergegeven in fig. 5.28.

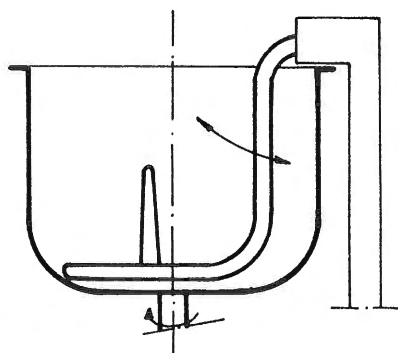


Fig. 5.28. Kneedmachine voor o.a. de bakkerij.

3. Een menger met een stilstaande pan, waarin een concentrische roerarm ronddraait is te vinden in fig. 5.29 . Het meest kenmerkende van deze machines is dat de roerder niet alleen roteert om zijn as, maar dat de as nog een cirkelvormige baan in de pan beschrijft. De roerder legt zodoende een weg af zoals aangegeven in fig. 5.30

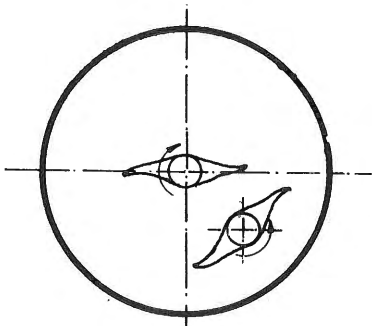


Fig. 5.29. Kneedmachine met stilstaande pan.

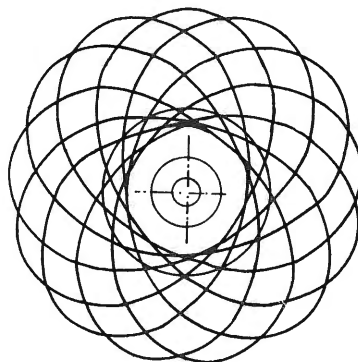


Fig. 5.30. Afgelegde weg van de roerder uit fig. 5.29.

De conche, fig. 5.31, is een bijzonder type kneedmachine die in de chocoladeindustrie toegepast wordt. De gesmolten chocolade wordt in een trog van speciale vorm door een langzaam heen en weer bewegende grafieten rol gekneed.

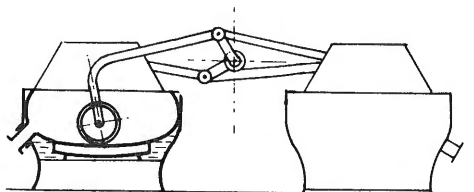


Fig. 5.31. De conche.

Continu kneden.

In fig. 5.32 zien we een zgn. Ko-kneedmachine. Deze heeft een onderbroken worm die draait en tegelijkertijd in de as richting heen en weer gaat. Voorts zijn om de worm stilstaande tanden aangebracht. De kneedwerking is bijzonder goed en aangezien de verblijfsduur vrij groot is, en enige longitudinale menging optreedt, worden variaties in de dosering van de te mengen materialen sterk gedempt, terwijl ook materialen kunnen worden verwerkt, die een vrij lange kneedduur hebben.

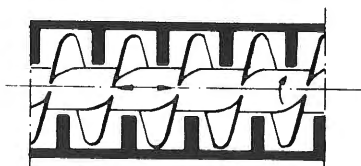


Fig. 5.32. Continu kneder.

5.5. Statische mengers.

Statische mengers bestaan meestal uit een buis waarin elementen van dezelfde vorm achter elkaar zijn geschakeld. Deze elementen splitsen een stroom, die continu aan de menger wordt toegevoegd, in twee of meerdere delen, waarna de deelstromen over ca. 90° worden gedraaid.

Het mengeffect berust op een continu splitsen in deelstromen, het draaien ervan over een bepaalde hoek en daarna weer samenvoegen van bepaalde deelstromen.

Statische mengers kunnen zowel voor laminair als turbulent stromende fluïda worden gebruikt.

Er bestaan ca. 30 verschillende menger typen waarvan er twee zullen worden besproken. De menger in fig. 5.33, de Keenics statische menger, bestaat uit schroefvormige elementen die een hoek van 90° met elkaar maken. De schroefvormige elementen bevinden

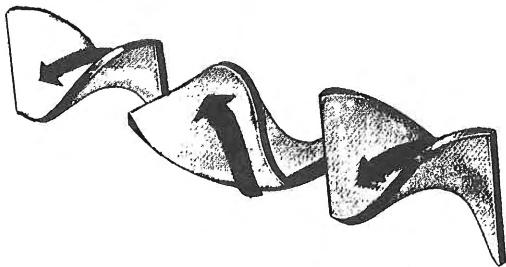


Fig. 5.33. Keenics menger (schroefvormige elementen).

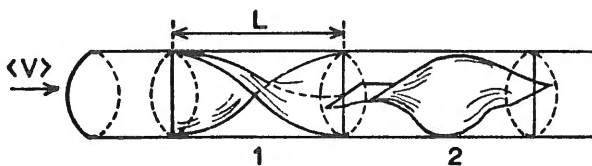


Fig. 5.34. Keenics statische menger, 2 elementen.

zich in een buis, al of niet omgeven door een buis waarin men een koel- of verwarmingsmedium kan laten stromen.

Bij produkten met een hoge viscositeit, bijv. degen, en laminaire stroming wordt

het medium gemengd doordat het wordt opgedeeld in lagen nl. 2^n lagen per n elementen, die voortdurend van stroombaan veranderen,

fig. 5.34. Dit betekent dat de reductie van de afmetingen

en van een "vreemd" element in een vloeistofstroom, r , wordt weergegeven door:

$$r = 2^{-n} = 2^{-\left(\frac{v \cdot t}{L}\right)} \quad \text{of}$$

$$r = \exp.\left(\left(-\frac{v \cdot t}{L}\right) \cdot \ln 2\right) \quad (5.10)$$

Hierin is v de superficiële snelheid in m/s, t de verblijftijd in een buis gevuld met elementen die elk een lengte L hebben.

De Sulzer statische menger, fig. 5.35, bestaat uit een aantal elementen, die opgebouwd zijn uit een aantal gegolfde lamellen.

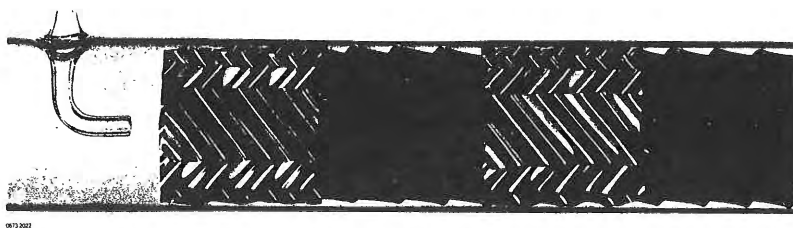


Fig. 5.35 a. Sulzer statische menger.

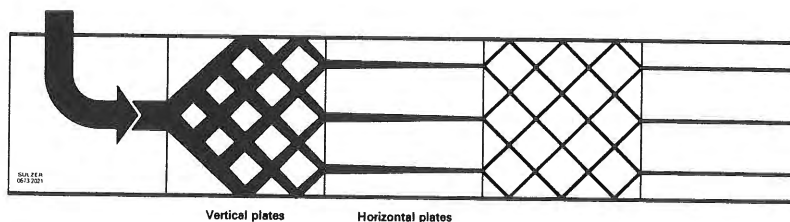


Fig. 5.35 b. Principe van de werking van de Sulzer menger.

De elementen zijn 90° gedraaid en zodanig achter elkaar in een mengbuis geplaatst dat open elkaar kruisende kanalen ontstaan. Bij iedere kanaalkruising worden de deelstromen herverdeeld.

Om inzicht te krijgen in het mengeffect kan evenals bij vast/vast mixers worden uitgegaan van statistische relaties.

Indien twee componenten worden gemengd kunnen de meetresultaten worden uitgedrukt in een relatieve standaarddeviatie (s/s_0) daar deze grootte onafhankelijk is van de verhouding van de volumestromen van de componenten.

De standaarddeviatie of variantie kan worden verkregen met vergelijking 5.3.

De variantie van de twee nog niet gemengde fluïda aan het begin, met volumestromen V_1 en V_2 en met respectievelijke concentraties $X_1 = 1$ en $X_2 = 0$ is:

$$s_0 = \frac{\sqrt{V_1 \cdot V_2}}{V_1 + V_2} \quad (5.11)$$

$$s_0 = \sqrt{\bar{X}(1 - \bar{X})} \quad (5.12)$$

$$\bar{X} = V_1 / (V_1 + V_2)$$

In de praktijk is men vooral geïnteresseerd in de variantie, s , die betrekking heeft op het gemiddelde, $\bar{X}$, berekend volgens vergelijking 5.2. Dit wil zeggen in de homogeniteit van het mengsel, die kan worden gedefinieerd als $s/\bar{X}$.

Indien twee componenten gemengd worden met concentratie $X_1 = 1$ en $X_2 = 0$ dan krijgen we:

$$\frac{s}{\bar{X}} = \frac{s}{s_0} \cdot s_0 \cdot \frac{1}{\bar{X}} = \frac{s}{s_0} \sqrt{\frac{1}{\bar{X}} - 1} \quad (5.13)$$

Het resultaat van een mengproces kan tevens worden uitgedrukt in de volgende vergelijking.

$$\frac{s}{\bar{X}}_1 = a \cdot e^{-m \cdot L/D} \quad (5.14)$$

In fig. 5.36 is het mengresultaat van twee mengers weergegeven als functie van de lengte van de menger gedeeld door de diameter (L/D). Het mengresultaat wordt mede bepaald door de wijze waarop

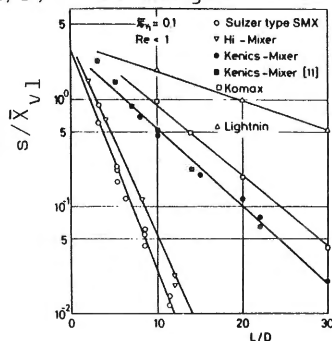
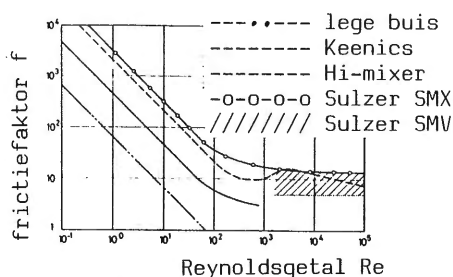


Fig. 5.36. $s/\bar{X}_{v1}$ als functie van L/D .

de componenten, die worden gemengd, aan de menger worden toegevoegd. Daarnaast speelt de grootte en het aantal monsters een belangrijke rol en de grootte van de menger. Een laboratorium menger geeft niet in alle gevallen dezelfde resultaten als een menger die vele keren groter is.

Het berekenen van het drukverlies in statische mengers vindt op dezelfde wijze plaats als bij buizen. Bij statische mengers verschilt de frictiefactor als functie van het Re-getal met die van een buis. De f -waarde hangt bij een statische menger o.a. af van de wijze waarop de verschillende componenten zijn geschakeld en het type component. In fig. 5.37 is voor twee typen statische



mengers f als functie van Re weergegeven.

Fig. 5.37. De frictiefactor f als functie van Re .

Daar we bij statische mengers tevens met een radiale snelheidscomponent te maken hebben is de warmteoverdracht aanmerkelijk beter dan in een buis. Bovendien resulteert het mengeffect in een gelijkmatige temperatuurverdeling, fig. 5.38. De stroming nadert een propstroom zoals uit fig. 5.39 blijkt.

o statische menger

● lege buis

stroming laminair.

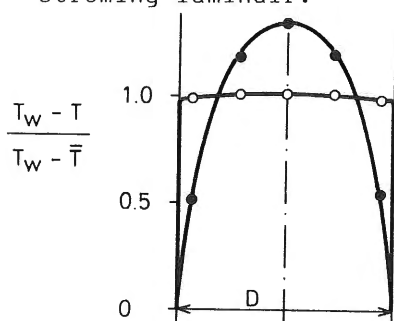


Fig. 5.38. Dimensieloze temperatuur als functie van de diameter D na verhitting.

T = plaatselijke temp.

$\bar{T}$ = gemiddelde temp.

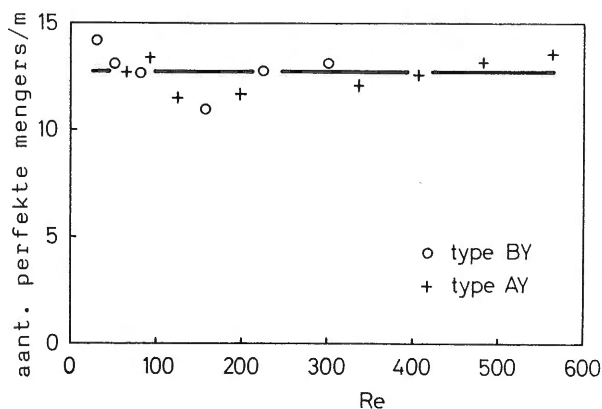


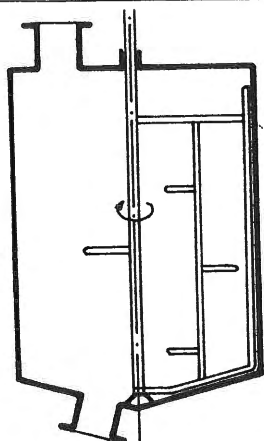
Fig. 5.39. Equivalent aantal perfecte mengers per meter mengelement als functie van het Re -getal.

T_w = temp.aan de pijpwand.

Statische mengers kunnen voor zeer uiteenlopende doeleinden worden gebruikt zoals:

- mengen van laagviskeuze vloeistoffen en gassen waarbij de stroming turbulent is,
- mengen van hoog visceuse media, pasta's en degen, met meestal een laminaire stroming,
- mengen van een hoog viskeuse met een laagviskeuze vloeistof, bijv. verdunnen van melasse met water.
- als warmtewisselaar voor bijv. het pasteuriseren of appertiseren van hittegevoelige producten.

5.6. Het mengen van visceuse vloeistoffen.



Voor het mengen van dik-vloeibare media komen naast de statische mixers licht uitgevoerde planeetmengers in aanmerking. In deze mixers kunnen alle soorten roerarmen worden geplaatst, fig. 5.40.

Fig. 5.40 Planeetmenger.

Naast bovengenoemde mixers zijn er mixers met stilstaande armen, waartussen zich roerarmen bewegen zoals in fig. 5.41 is weergegeven. De zwaarte van de constructie wordt bepaald door de consistentie van het te fabriceren mengsel.

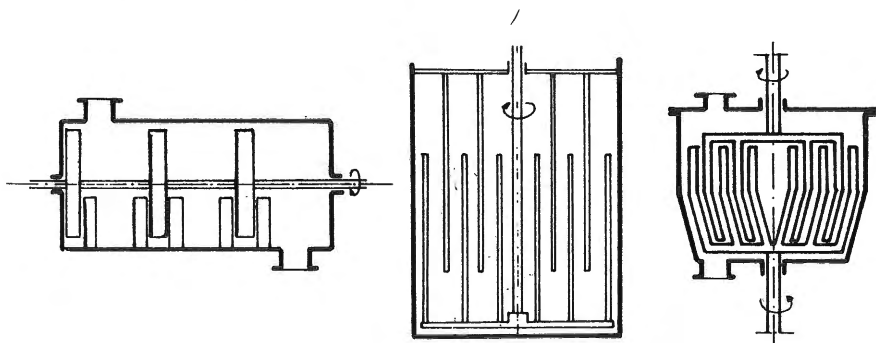


Fig. 5.41. Planeetmengers met stilstaande en roterende armen.

Voor het mengen van hoogviskeuze produkten kunnen ook eenvoudiger apparaten worden gebruikt, zoals een roerketel met roerarm in de vorm van een anker of hoefijzer, fig. 5.42. Dit type wordt o.a. gebruikt wanneer de ketel moet worden verwarmd; de roerarm houdt de wand van de ketel schoon en heeft een gunstige invloed op de warmtetransport.



Fig. 5.42. Planeetmenger met anker.

5.7. Apparaten die gebruikt worden ter verkrijging van dispersies.

Wanneer een vaste stof zeer fijn verdeeld wordt kunnen dispersies worden verkregen met een grote stabiliteit. Hiervoor kunnen o.a. de volgende, reeds besproken, apparaten worden gebruikt:

- a. kneedmachines,
- b. conches,
- c. maalapparaten als walsen en kollergangen.

De speciale apparaten op dit gebied kunnen worden ingedeeld in:

- a. kolloïdmolens,
- b. maalroerders.

We hebben hier te maken met een overgangsgebied tussen mengen en roeren.

Kolloïdmolens.

Zie voor deze molens hoofdstuk 3 en fig. 3.8.

Maalroerders.

De maalroerders, die in het algemeen mixers worden genoemd, zijn apparaten die malen en mengen. Hiervan bestaan twee hoofdtypen.

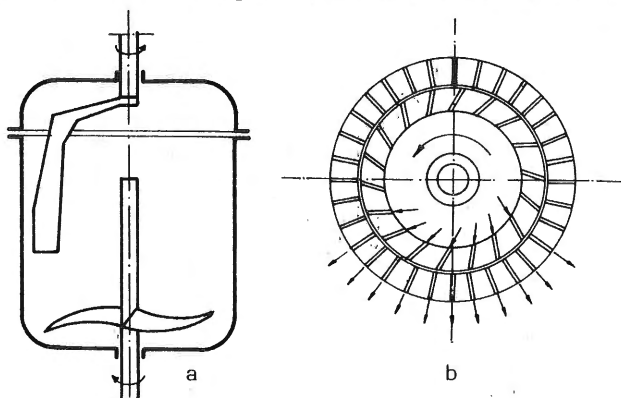


Fig. 5.43. Maalroerders.

Tot het eerste type maalroerders behoren apparaten die bestaan uit een vat van speciale vorm, waarin een aantal messen draait met een zeer hoog toerental, fig. 5.43 a. Dit type apparaat is het best geschikt om vaste stoffen, die een grote hoeveelheid water bevatten, zoals vlees, vruchten en groenten zeer fijn te vermalen. Het toerental bedraagt, afhankelijk van de inhoud van het vat, 50 - 170 omw./s.

Tot het tweede type behoren apparaten die bestaan uit een as, waarop een rotor bevestigd is, waaromheen een stator is aangebracht, fig. 5.43 b. De stator is gewoonlijk een ring met tanden; de rotor wordt gevormd door messen en draait met een geringe speling in de stator. Het toerental is afhankelijk van de diameter. De roerder wordt in het te dispergeren mengsel geplaatst en pompt dat mengsel door de rotor en stator. De meng- en maalwerking is zeer intensief; de vaste stoffen in suspensie worden in korte tijd uiterst fijn verdeeld. Dit type werkt in alle verpompbare, dit wil zeggen dun vloeibare mengsels.

5.8. Mengen vast/gas.

Verschillende methoden van het mengen van een vaste stof met gas zijn reeds besproken zoals:

- a. pneumatisch transport,
- b. het lossen van silo's door inblazen van lucht,
- c. pneumatische klassificatie,
- d. het pneumatisch mengen van twee vaste stoffen.

Andere belangrijke toepassingen zijn:

- a. het verstuiven van poederkool in vuurhaarden,
- b. het verstuiven van plantenziektenbestrijdingsmiddelen,
- c. fluïdisatie; een eenheidsbewerking die in de levensmiddelen-industrie veel wordt toegepast, zie o.a. deel I, stromingsleer, hoofdstuk 5.

5.9. Mengen vloeistof/vloeistof al of niet met weinig vaste stof.

Bij het mengen van weinig visceuse vloeistoffen is het onverschillig of er enige vaste stof in de vloeistof aanwezig is, dan wel of wij te maken hebben met meerdere vloeistoffen. Bij het mengen van meerdere vloeistoffen kan onderscheid worden gemaakt tussen mengbare vloeistoffen ("in elkaar oplosbare vloeistoffen") en niet mengbare vloeistoffen. Hierbij gaat het vooral om het samenstellen van een vloeistof van een bepaalde kwaliteit of eigenschap of om een bepaalde verdunning te verkrijgen.

Niet-mengbare vloeistoffen mengt men meestal om een emulsie te verkrijgen als mayonaise, boter en margarine. Een emulsie, een "mengsel" van twee of meer vloeistoffen, waarbij de ene vloeistof in de vorm van fijne druppels in de andere vloeistof aanwezig is,

kunnen opromen door een uitwendig krachtenveld of door coalescentie van de afzonderlijke druppels. Het opromen kan worden beperkt door:

- de druppels klein te maken en/of
- het toevoegen van een geschikte emulgator.

De intensiteit waarmee het mengen geschiedt, is afhankelijk van de stromingstoestand van de vloeistof. De menging wordt intensiever naarmate de turbulentie toeneemt. Stroming kan ontstaan door:

- dichtheidsverschillen in de vloeistof tengevolge van temperatuurverschillen (natuurlijke convectie) en
- langs kunstmatige weg door middel van bijv. roeren (gedwongen convectie).

Mengen van een vloeistof in een tank.

Het mengen van vloeistoffen gebeurt vrijwel altijd in mengvaten of tanks. Een mengvat bestaat vrijwel steeds uit een cilindrisch vat met een conische of bolle bodem. Voor de verwarming of de koeling van de inhoud kan het vat zijn voorzien van een dubbele mantel of een aparte koel- of verwarmingsspiraal in de vloeistofmassa zelf. Het mengen van een vloeistof in een tank kan plaatsvinden door middel van:

- een rondpompinrichting,
- inblazen van lucht,
- mechanische roerders.

Alleen vloeistof-vloeistof menging wordt in de praktijk ook wel gerealiseerd door gebruik te maken van zogenaamde mengpompen.

Mengpomp.

Voor het mengen van twee vloeistoffen kan een normale centrifugaalpomp, met een tweezijdige aanzuig, worden gebruikt. De pomp kan hierdoor verschillende vloeistoffen aanzuigen, waarvan de volumehoeveelheden ongeveer gelijk moeten zijn in verband met optredende krachten op de waaier van de pomp.

Door de wervelingen in het pomphuis kan met een eenmalige bewerking een hoge mate van homogeniteit worden bereikt. Mengpompen zijn aantrekkelijk in het gebruik daar ze goedkoop in aanschaf zijn, terwijl vaak een meng- en pompbewerking kunnen worden gebombineerd.

Rondpompinstallatie.

Bij een rondpompinstallatie wordt er ladingsgewijs gemengd door uitwendige circulatie van de vloeistof, fig. 5.9.1. Dit systeem

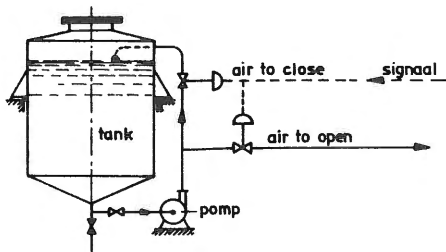


Fig. 5.9.1. Rondpompinstallatie.

wordt veel gebruikt indien uit een opslagtank voor een vloeistofmengsel een discontinue afname plaatsvindt. In de pers van de pomp bevindt zich een afsluiter welke geopend wordt, indien in het proces een vloeistofmengsel vereist is. De menging wordt dan onderbroken. Bij dit systeem treedt een krachtige menging op in de pomp zelf en een langzame menging van de tankinhoud. Als pomp kan eventueel een zgn.

mammoetpomp worden gebruikt, fig. 5.9.2 a en b.

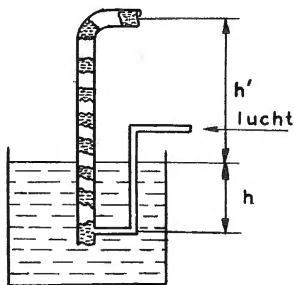


Fig. 5.9.2. a. Mammoetpomp.

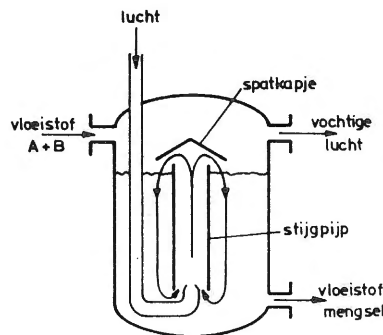


Fig. 5.9.2. b. Menging d.m.v mammoetpomp.

De werking kan worden verbeterd door de vloeistof met grote snelheid in de tank te injecteren. De straal vloeistof van hoge snelheid sleurt bij de opstelling volgens fig. 5.9.3 de omringende vloeistof mee. Stuwstraalmenging wordt toegepast bij het mengen van gassen, het mengen van vloeistoffen en het inbrengen van gassen in vloeistoffen. Het laatste vindt o.a. toepassing bij biologische zuiveringsinstallaties.

Stuwstraalmenging kan niet worden toegepast voor visceuse vloeistoffen en vloeistoffen met vaste bestanddelen.

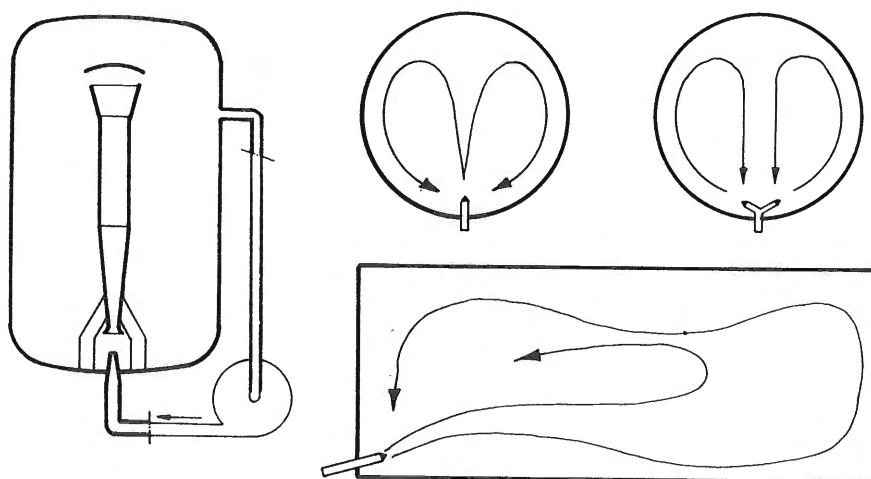


Fig. 5.9.3. Opstellingen voor stuwstraalmenging.

Menging door inblazen van een gas.

Door lucht of een ander gas door de vloeistof te laten borrelen kan ook een menging worden verkregen. Hierbij maakt men vaak gebruik van ringleidingen die voorzien zijn van gaatjes of speciale sproeistukken, fig. 5.9.4. Hierdoor worden kleine opstijgende bel-

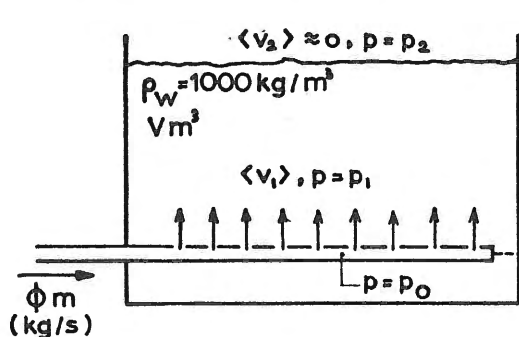


Fig. 5.9.4. Roeren door inblazen van lucht.

len verkregen. Het door de vloeistof borrelende gas verlaagt plaatselijk de dichtheid, waardoor een uitgesproken verticale circulatiestroming ontstaat, die bijv. bijzonder geschikt is om vaste stoffen in suspensie te houden. Verder kan deze wijze van roeren zonder bezwaar in corrosieve vloeistoffen worden toegepast.

Een voordeel van deze werkwijze is dat de benodigde apparatuur goedkoop is en nauwelijks onderhoud vereist. Het energieverbruik, van voornamelijk de compressor, is hoog in vergelijking met dat van de aandrijving van een mechanische roerder.

Gasinjectie kan alleen worden toegepast indien:

- er geen gevaar is voor verdamping of oxidatie,
- de viscositeit van de vloeistoffen laag is,
- de vloeistoffen volledig mengbaar zijn,
- geen schuimvorming optreedt,
- gecomprimeerde lucht in voldoende mate beschikbaar is.

In sommige gevallen is voor de ontluchting een spatvanger nodig. De gassnelheid in het roervat dient in het algemeen groter te zijn dan 0,02 m/s.

Bij deze methode van roeren wordt de mechanische energie-inhoud van een gas afgegeven aan een vloeistof door traagheids- en visceuze effecten, fig. 5.9.4. Voor deze situatie volgt uit de wet van Bernoulli, indien we aannemen dat de lucht zelf wrijvingsloos expandeert:

$$\frac{1}{2} \Delta v^2 + g \Delta h + \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{\rho_a} dP + W' = 0 \quad (5.9.1)$$

W' = de snelheid waarmee de expanderende lucht mechanische arbeid op zijn omgeving (de vloeistof) uitoefent.

$g \Delta h$ = de verandering van de potentiële energie van de lucht bij het opstijgen door de vloeistof; potentiële energiefactoren zijn te verwaarlozen.

$\frac{1}{2} \Delta v^2$ = verandering in kinetische energie. v_2 wordt gelijk aan nul gesteld, v_1 is te berekenen uit de drukval over de gaten in de beluchtingsbuis ($P_0 - P_1$).

De vermogensafgifte, P , wordt:

$$P = \left(- \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{\rho_a} dP + \frac{1}{2} (\langle v_2^2 \rangle - \langle v_1^2 \rangle) \right) \cdot Q_m \quad (5.9.2)$$

Indien de kinetische energieverandering wordt opgenomen in de drukval over de gaten in de beluchtingsbuis dan krijgen we:

$$P = \left(- \int_{P_0}^{P_2} \frac{R \cdot T}{M \cdot P} \right) \cdot Q_m \quad (5.9.3)$$

De expansie van de lucht zal nagenoeg isotherm verlopen door het directe contact tussen de vloeistof en de lucht.

De vermogensafgifte, P , van lucht naar vloeistof is gelijk aan de snelheid waarmee de expanderende lucht arbeid op zijn omgeving

uitoefent:

$$P = Q_m \frac{R \cdot T}{M} \cdot \ln \frac{P}{P_0} \quad (5.9.4)$$

R = gasconstante (8,31 Joule/K Mol),

M = molmassa,

T = temperatuur (K),

P₀ = druk (N/m²),

Q_m = massastroom (kg/s).

Mechanische roerders.

Voor de meeste processen is mengen met roterende roerders de aangewezen methode. Deze roerders hebben een groot werkgebied wat de grootte van het mengvat en de viscositeit van de te mengen stoffen betreft.

Bij mechanische roerders zijn één of meer roerlichamen aan een centrale as bevestigd. Deze roerders zijn geschikt voor al of niet in elkaar oplosbare vloeistoffen, gassen met vloeistoffen en vaste stoffen, al of niet oplosbaar, met vloeistoffen. Zijn de vaste stoffen niet oplosbaar dan moeten ze in suspensie worden gehouden.

De mechanische roerders kunnen worden onderscheiden in: roerarmen, propellers, turbineroerders en trilroerders.

De criteria op grond waarvan men een bepaalde wijze van roeren zal verkiezen boven andere worden onder andere bepaald door de mate waarin homogeniteit wordt bereikt, de tijdsduur die daarmee is gemoeid, mengtijd, en het vermogen dat daarvoor nodig is.

Mengtijd.

Onder mengtijd wordt verstaan de tijd die verloopt tot aan het moment waarop volledige uniformiteit wordt bereikt. In de praktijk brengt het experimenteel bepalen van deze uniformiteit wel eens moeilijkheden mee. Immers, de mengtijd zou volgens deze definitie afhankelijk zijn van de nauwkeurigheid van de meetmethode. Dit is vooral het geval als de menging bij laminaire stroming plaats heeft, bijv. van zeer visceuse vloeistoffen. Men zegt dan ook dat de mengtijd verstreken is als de samenstelling op iedere plaats in het vat niet meer dan een bepaalde fractie van de eindwaarde

blijft afwijken. Voor deze fractie neemt men gewoonlijk 1 ... 5 %.

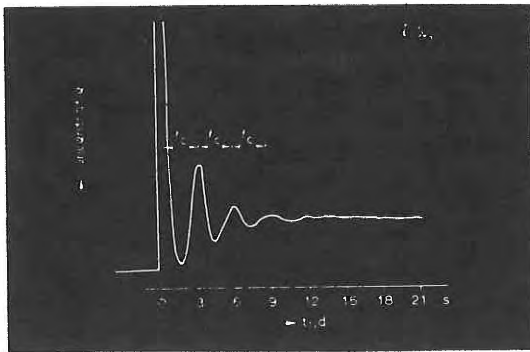


Fig. 5.9.5. Responsiecurve na pulsvormige injectie in geroerd vat.

Een methode om de mengtijd te weten te komen is het meten van de kleur of de geleidbaarheid na pulsvormig toevoegen van een hoeveelheid kleurstof of elektrolyt van de te mengen vloeistoffen. Het verloop van de te meten grootte heeft meestal de gedaante als in fig. 5.9.5 is aangegeven. De afstand tussen twee toppen of dalen in

de curve is de circulatietijd, de tijd nodig voor één circulatie van de vloeistofelementen. De circulatietijd vermenigvuldigt met de circulatiestroom, roterende beweging van de vloeistofelementen, geeft het totale vloeistofvolume.

Naast de fysische eigenschappen van het te mengen medium heeft het toerental, n , de diameter van de roerder, d , de tankdiameter, T , en de vloeistofhoogte, H invloed op de mengtijd. Daarnaast spelen de keerschotten, zie pag. 166, een rol. Van enkele variabelen is de invloed op de mengtijd weergegeven in fig. 5.9.6. en 5.9.7.

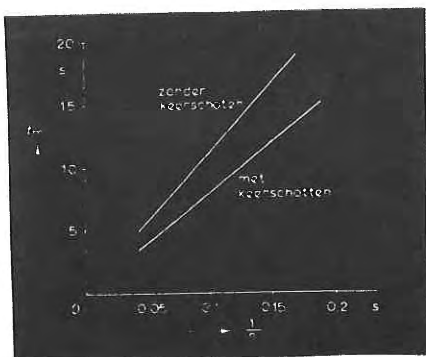


Fig. 5.9.6. Invloed van de roersnelheid op de mengtijd met en zonder keerschotten ($T = 0,32$ m, propellerroerder).

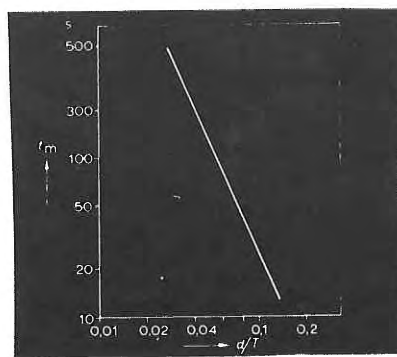


Fig. 5.9.7. Invloed van de verhouding roerderdiameter/tankdiameter op de mengtijd ($T = 1,37$ m, propellerroerder).

Roerarmen.

Enkele soorten roerarmen (paddle roerders) zijn weergegeven in fig. 5.9.8. Een roerder met de arm in de vorm van een plaat brengt de vloeistof in een ronddraaiende beweging waardoor een overwegend tangentiële stroming wordt verkregen (de wervelas valt samen met de draaiïngsas).

De voor de menging van een roerwerk maatgevende snelheidsverschil tussen de vloeistof (suspensie) en de roerder, is klein daar de vloeistof nagenoeg met dezelfde hoeksnelheid roteert als de as van de roerder. Goede menging treedt alleen op in een betrekkelijk dunne laag vloeistof waarin de roerarm zich beweegt. Dit is vooral het geval bij meer visceuse vloeistoffen. Om een goede menging te verkrijgen moet een groot deel van het te mengen volume door roerarmen worden bestreken. Daartoe dienen allerlei combinaties van meerdere roerarmen.

Om een groot deel van het te mengen volume te kunnen bestrijken is het nodig dat de verhouding van de diameter van het blad, d , en de diameter van de tank, T , hoog is. Gewoonlijk ligt de d/T waarde tussen 0,5 en 0,9.

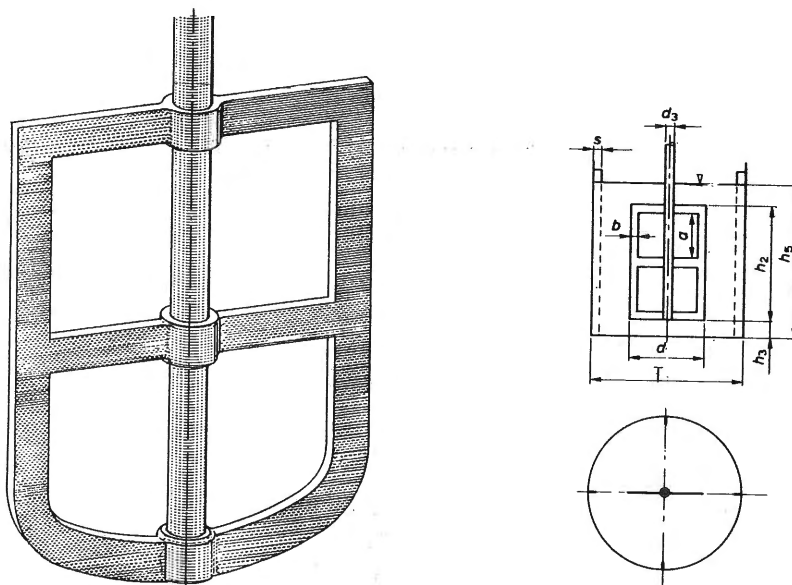


Fig. 5.9.8. a. Roosterroerder.

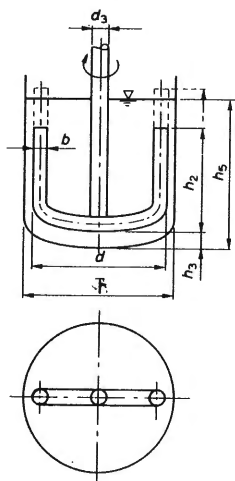
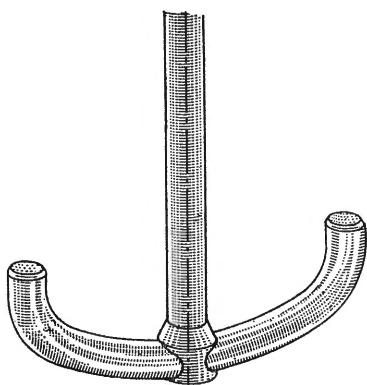


Fig. 5.9.8. b. Ankerroerder met ronde bladen.

De omtreksnelheid van een roerarm bedraagt gewoonlijk 1,3 - 2,3 m/s.

De omtreksnelheid kan worden berekend met de formule: $v = \omega \cdot r$.

$\omega = \text{rad/s}$; $\omega = 2 \pi N$; $N = \text{omwentelingen/s}$.

Bij hogere viscositeiten moeten roerarmen van zware constructie worden gebruikt, die een diameter hebben slechts weinig minder dan die van het vat en die ook in axiale richting het gehele produkt bewerken. Door de schrapende werking van de roerder wordt het materiaal van de wand losgemaakt; dit is vooral belangrijk wanneer het materiaal tijdens het roeren via de wand wordt opgewarmd. Naarmate de viscositeit stijgt moet het toerental lager worden gekozen, de aandrijving wordt duurder.

Propellerroeders.

Propellerroeders worden in de procesindustrie het meest toegepast in vloeistoffen waarvan de viscositeit niet hoger is dan ongeveer 5000 cP. Deze roeders hebben de vorm van schep-schroeven. De propellerroerder kan bestaan uit drie, vier of soms meer roerderbladen die onder een hoek aan een aslichaam zijn bevestigd. De roerder bestaande uit drie bladen wordt het meest gebruikt, fig. 5.9.9. Ze hebben een relatief laag gewicht en zijn gemakkelijk te monteren.

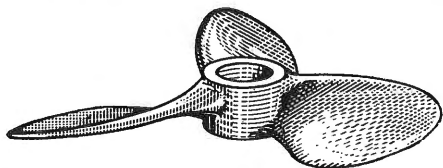


Fig. 5.9.9. Propeller.

Snel lopende propellers geven een axiale stroming (stroming in de richting van de roeras) met een sterke turbulentie, die in het algemeen neerwaarts is gericht, 5.9.10. Aan de bodem van het vat buigt deze stroming om naar de omtrek. Bij hogere viscositeit treedt reeds onder de propeller een afbuiging van de optredende stroming op waardoor iets verder onder de roerder een zone is met een minder intensieve menging.

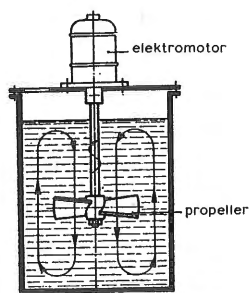


Fig. 5.9.10. Propellerroerder centraal geplaatst.

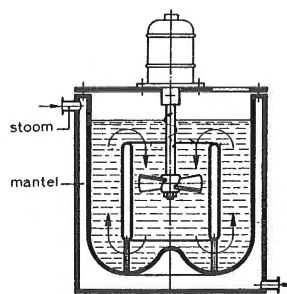


Fig. 5.9.11. Roerder ingebouwd in een buis.

Door inbouw van een buis en het aanpassen van het vat, fig. 5.9.11, kan men de werking met visceuse vloeistoffen verbeteren.

Is de stroming neerwaarts gericht dan ontstaat bij een te grote vloeistofhoogte in het vat bovenin een relatief minder sterk geroerde zone. Bij opwaartse stroming treedt dit effect onderin het vat op.

Bij een centrale opstelling van de roerder wordt er bij een geringe vloeistofhoogte gemakkelijk een kolk, ook wel "vortex" genoemd, gevormd; daardoor wordt gas in de vloeistof gezogen. Voor sommige processen kan dit nadelig zijn. Daarnaast worden sterk fluctuerende krachten op de roerder uitgeoefend. Bij een vortex zijn de verticale snelheden laag ten opzichte van de tangentiële snelheden.

De propellerroerder wordt meestal aangebracht op een derde van de vloeistofhoogte, gerekend van onderaf, en heeft een diameter, D , die ongeveer ligt tussen $1/3$ en $1/4$ van de tankdiameter (T). Bij grote voorraadtanks, bijvoorbeeld in de zuivelindustrie, ziet men vaak relatief kleine propellers door de cilindrische wand in het vat aangebracht, die voor een langzaam circulerende stroming zorgen. De roerder wordt via de opstaande wand evenwijdig geplaatst, fig. 5.9.12 of schuin naar onderen gericht. Ook is het mogelijk

meer propellerroerders op een as te plaatsen, fig. 5.9.13, met name als de viscositeit hoger is dan 100 cP of wanneer de totale vloeistofhoogte groter is dan vier propellerdiameters. In dat geval is de speed en de draairichting van de roerders zodanig, dat de stroming van een propeller door de andere wordt versterkt.

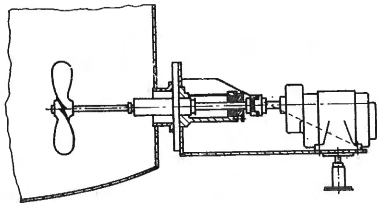


Fig. 5.9.12. Horizontale plaatsing propellerroerder.

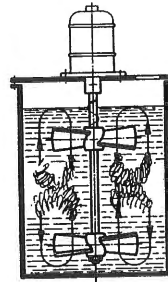


Fig. 5.9.13. Montage van twee propellerroerders.

De gebruikelijke omtreksnelheid van propellerroerders bedraagt 5 à 8 m/s. Als vuistregel kan worden aangenomen dat toerentallen boven de 7 omw./s moeten worden vermeden als de viscositeit groter is dan 200 cP of het mengvat een volume heeft dat groter is dan 7,5 m³. Een toerental boven 20 m/s is slechts aan te bevelen voor viscositeiten lager dan 50 cP of als het mengvolume kleiner is dan 2 m³.

De draaiende beweging van de roerder veroorzaakt een circulerende beweging van de vloeistof. Deze beweging, niet een eventuele tangentiële beweging, is de pompcapaciteit van de roerder. Deze circulerende beweging is in feite de oorzaak van de menging. De pompcapaciteit van een propellerroerder wordt vaak gedefinieerd als het volume vloeistof dat per tijdseenheid de projectie van de cirkel rond de bladuiteinden, loodrecht op de draaiingsas, passeert. Voor de pompcapciteit kan op grond van deze definitie een vergelijking worden afgeleid die veel overeenkomst vertoont met die voor een centrifugaalpomp, zie deel 1, pompen. Als van de propeller de diameter gelijk is aan de speed, s, dan wordt de formule:

$$Q_v = K \cdot n \cdot D^3 \quad (5.9.5)$$

K = een dimensieloze parameter,
 D = diameter van de propeller (m),
 n = toerental van de roerder (omw./s).

Uit vergelijking 5.9.5 volgt dat de pompcapaciteit evenredig is met het kwadraat van de propellerdiameter en de spoed en evenredig is met de derde macht van de diameter als de spoed gelijk is aan de diameter. Uit de pompcapaciteit is de circulatietijd te berekenen, die bij een goed gedimensioneerde propellerroerder gelijk is aan 0,1 .. 0,2 maal de mengtijd.

Turbineroerders.

Evenals de propellerroerders worden turbineroerders voornamelijk voor laag viskeuze vloeistoffen toegepast. In deze groep roerders bestaat een grote variatie, waarvan enkele typen in fig. 5.9.14 zijn geschetst.

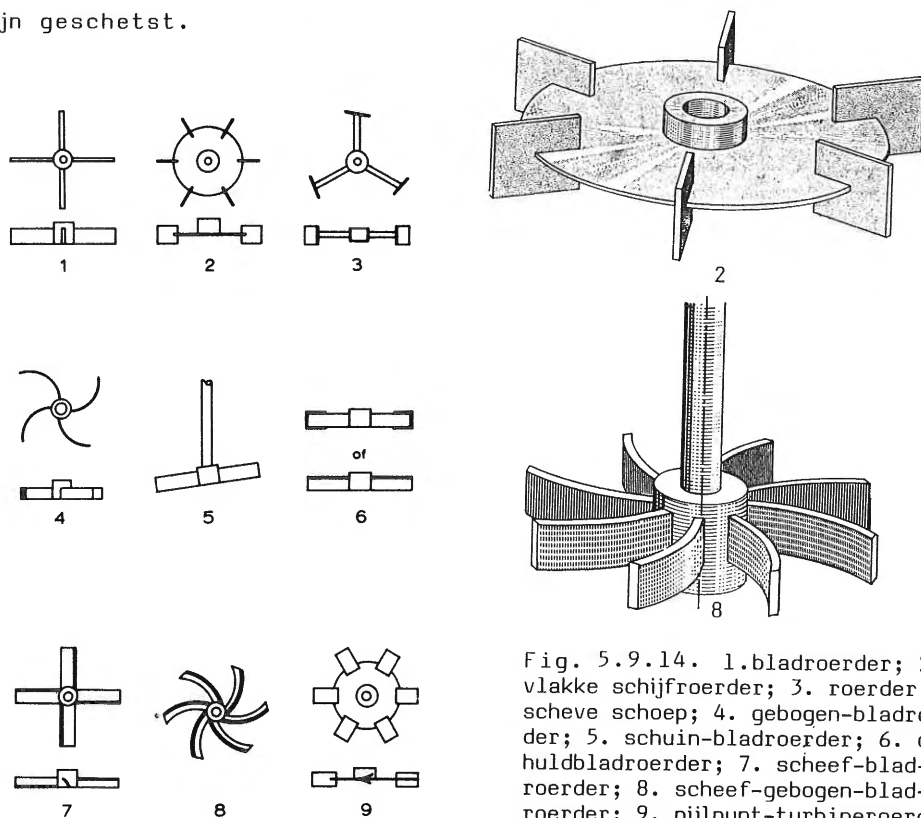


Fig. 5.9.14. 1. bladroerder; 2. vlakke schijfroerder; 3. roerder met scheve schoep; 4. gebogen-bladroerder; 5. schuin-bladroerder; 6. omhuldbladroerder; 7. scheef-bladroerder; 8. scheef-gebogen-bladroerder; 9. pijlpunt-turbineroerder.

Sommige hiervan vinden een beperkte toepassing.

De turbineroerder wordt in de praktijk meestal op een derde van de vloeistof hoogte, gerekend vanaf de bodem, geplaatst. Ook een

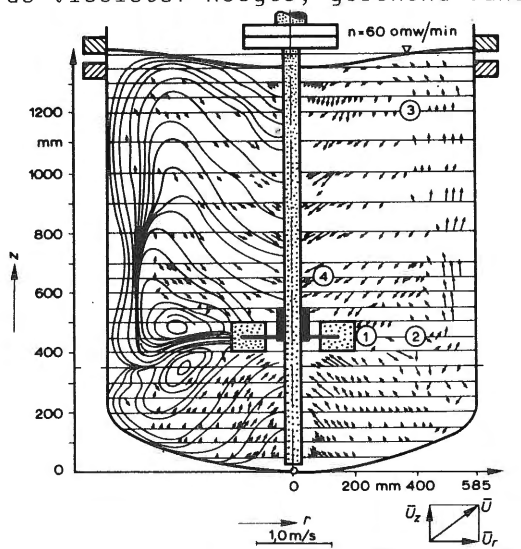


Fig. 5.9.15. Vectoriële gemiddelde snelheid in een mengvat met turbineroerders op een gebruikelijke hoogte. In de linkerhelft zijn stroomlijnen aangegeven.

ronde in plaats van een vlakke bodem bevordert de mengverhouding door de afwezigheid van dode hoeken, fig. 5.9.15.

Het stromingspatroon van de turbineroerder is, afgezien van de snelheidscomponent in tangentiële richting, onafhankelijk van de draairichting; altijd is de axiale component naar de roerder toe gericht. Deze axiale stroming wordt bereikt doordat een vloeistofstroom door de bladen wordt weggeslingerd en daardoor andere vloeistofelementen worden verdrongen. Doordat de circulatiestroom bij een stand-

aardopstelling in eerste instantie radiaal gericht is, ontstaat naast de hoofdstroom een gebied met relatief kleine snelheden.

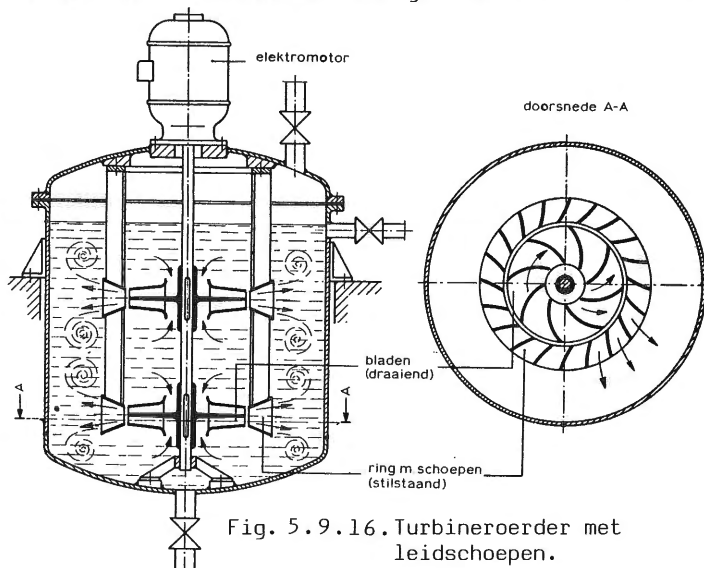


Fig. 5.9.16. Turbineroerder met leidschoepen.

Juist vanwege het voorkomen van dit gebied is de turbineroerder minder geschikt voor het mengen van viskeuze vloeistoffen. De propellerroerder heeft dit nadeel veel minder. De mengwerking van de turbineroerders kan worden verbeterd door twee roerlichamen op een as te plaatsen al of

niet voorzien van leidschoepen, fig. 5.9.16.

Er is geen scherpe grens tussen turbineroerders en propellerroerders.

Turbineroerders worden onder andere toegepast bij het verdelen van een gas in een vloeistof; bijvoorbeeld enzymbereiding, en het intensief in contact brengen van twee niet mengbare vloeistoffen, voor bijvoorbeeld extractiedoeleinden of het maken van stabiele emulsies.

Trilroerders.

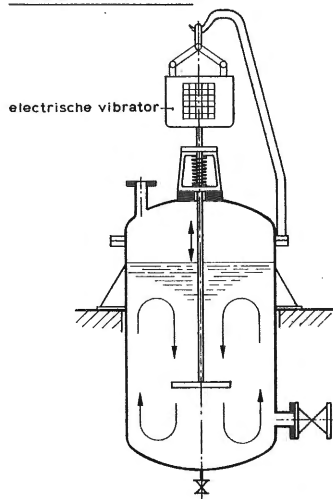


Fig.5.9.17. Opstelling van een trilroerder.

Een trilroerder is een heen en weergaande roerder gemonteerd op een met hoge frequentie (bijv. 100 perioden/s) en kleine amplitude, ca. 1 mm, in zijn lengterichting trillende as, fig. 5.9.17. Bevestigt men aan deze as een stijve plaat met konische gaten, fig. 5.9.18, dan lijkt de pompwerking op die van een propeller. De pompwerking ontstaat doordat de stromingsweerstand van de gaten in tegenovergestelde richting verschillend is. Een slappe plaat zonder gaten geeft een stromingsbeeld als van een turbineroerder, fig. 5.9.19.

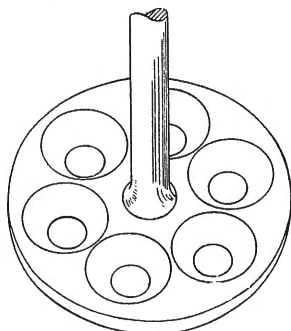


Fig.5.9.18. Stijve plaat met konische gaten.

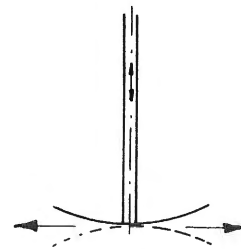
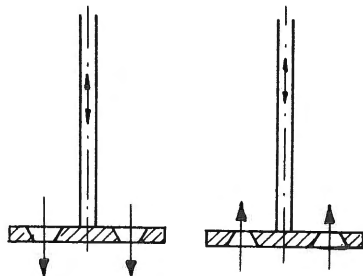


Fig.5.9.19. Slappe plaat zonder gaten.

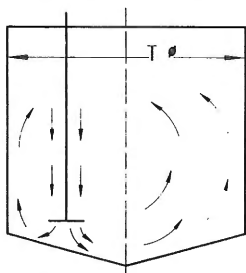
Trilroerders zijn eenvoudig en hun energieverbruik is gunstig. Meestal zijn zij zo uitgevoerd dat de amplitude regelbaar is. Ze worden gebruikt voor mengbare vloeistoffen, niet mengbare vloeistoffen (extractie en emulsie) en voor niet te zware suspensies.

Voorkomen van een vortex.

Bij vertikaal en centraal geplaatste roerders bestaat er bij vloeistoffen met een viscositeit lager dan ca. 600 Poise en hoge toerentallen van de roerder, turbulente stroming, kans op de vorming van een vortex. Zoals reeds eerder besproken heeft het ontstaan van een vortex vaak een nadelige invloed op het procesgebeuren. Een vortex zal men in het algemeen proberen te voorkomen, dit kan door:

- te roeren met een laag toerental,
- de roerder vertikaal excentrisch te plaatsen,
- de roerder schuin in het vat te plaatsen,
- het toepassen van keerschotten.

Vertikaal excentrische plaatsing.



Door de roerder excentrisch te plaatsen geraakt het stromingsbeeld in onbalans, fig. 5.9.20. Hierdoor wordt de kans op een vortex verminderd. Het excentrisch plaatsen van een roerder vraagt echter wel een groter energieverbruik.

Fig. 5.9.20. Vertikaal excentrische plaatsing van een roerder.

Plaatsing schuin in het vat.

De wijze waarop de roerder schuin in het vat wordt geplaatst is weergegeven in fig. 5.9.21. Door deze plaatsing werken de axiale en tangentiale stromingen elkaar tegen waardoor een vortex wordt voorkomen. De stand van de roerder is kritisch. Een onjuiste stand geeft trillingen en spanningen in de roerdersas en een hoger energieverbruik. Bij een permanent geplaatste roerder krijgen we: Afstand $Y = T/6$; afstand $X = T/4 - T/3$ (afhankelijk van de geometrie van de tank), $\beta = \text{ca. } 10^\circ$.

Bij kleine tankinhouden wordt vaak gebruik gemaakt van draagbare propellerroerders. Op deze roerders zitten instelbare bevestigingsklemmen waarmee een instelling van de hoeken α en β kan worden verkregen, die variëren van $5 - 20^\circ$, afhankelijk van de geometrie van de tank, fig. 5.9.22.

Bij het schuin plaatsen van de propellerroerder is het in alle gevallen belangrijk dat de schroef het midden van de tank niet overschrijdt.

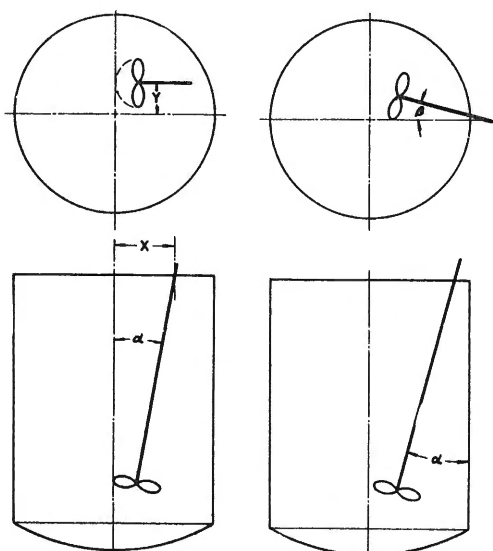


Fig. 5.9.21. Excentrisch geplaatste roerder.

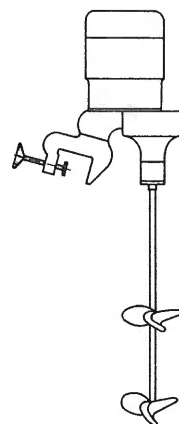
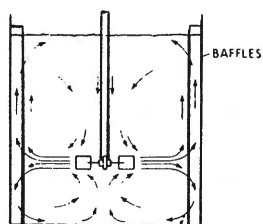


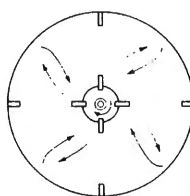
Fig. 5.9.22. Draagbare propellerroerder.

Keerschotten.

Keerschotten worden gebruikt bij vertikaal centraal geplaatste roeders, fig. 5.9.23. De montage van vier vertikaal geplaatste keerschotten aan of bij de wand is het meest gebruikelijk.



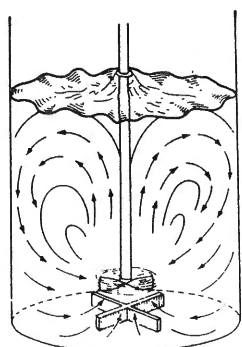
zijaanzicht



onderaanzicht

Fig. 5.9.23. Stromingspatroon in een vat met vertikale keerschotten.

De verticale keerschotten hebben veelal een breedte van $T/10$ of $T/12$. De laatste afmeting wordt het meest toegepast. In het algemeen zit er tussen keerschot en tankwand een ruimte van $1/6$ van de breedte van het keerschot. Dit wordt gedaan om de vorming van dode hoeken zo veel mogelijk te voorkomen. Het keerschot wordt meestal niet tot de bodem doorgetrokken. Een bepaalde afstand is nodig om bijvoorbeeld de ophoping van vaste stof te voorkomen. Het meest effectieve gedeelte van het keerschot is het gedeelte in de omgeving van de schroef.

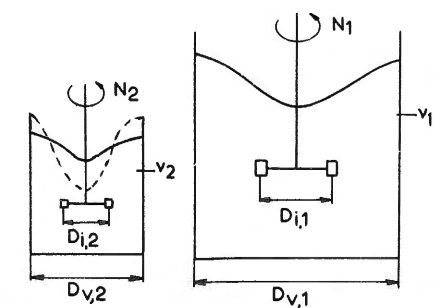


Bij naar beneden pompende propellers worden soms enkele verticale schotten op de bodem van de tank aangebracht, fig. 5.9.24.

Fig. 5.9.24. Stromingspatroon in een vat met verticale schotten op de bodem.

De diepte van een vortex.

De diepte van een vortex als functie van de roerdersnelheid in een tank, waarin de roerder centraal en vertikaal geplaatst is en zonder keerschotten, kan worden voorspeld door een modelstudie in een kleinere tank. Deze kleine tank moet dezelfde geometrische verhoudingen hebben als de grote tank, fig. 5.9.25. In deze twee



model tank werkelijke tank

Fig. 5.9.25. Vortex-diepte in geroerde tank.

tanken zal het stromingsbeeld hetzelfde zijn als het Re -getal en het Fr -getal, zie hoofdstuk 5.9.1, hetzelfde zijn. We krijgen:

$$\frac{D_1^2 \cdot N_1 \cdot \rho_1}{\eta_1} = \frac{D_2^2 \cdot N_2 \cdot \rho_2}{\eta_2} \quad \text{en}$$

$$\frac{D_1 \cdot N_1^2}{g} = \frac{D_2 \cdot N_2^2}{g}$$

Daar de versnelling van de zwaartekracht niet verandert krijgen we:

Daar de versnelling van de zwaartekracht niet verandert krijgen we:

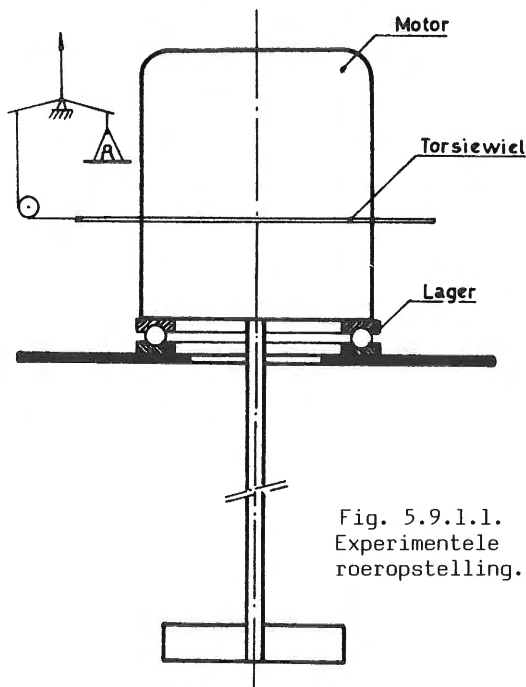
$$\frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad ; \text{ gesubstitueerd in Re geeft:}$$

$$\frac{\eta_2}{\rho_2} \times \frac{\rho_1}{\eta_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{3/2} \quad \text{of} \quad \frac{\nu_2}{\nu_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{3/2} \quad \text{met } \nu = \text{kinematische viscositeit.}$$

Uit de twee laatste vergelijkingen volgt dat een overeenkomstige vortex-vorm niet kan worden verkregen indien in beide tanks dezelfde vloeistof wordt gebruikt. Hiervoor moet in één van de tanks een minder visceuse vloeistof worden gebruikt. Wanneer de afmeting van de kleinste tank de helft is van de grootste dan moet de kinematische viscositeit $1/\sqrt{8}$ maal die van de vloeistof in de grote tank zijn. Wanneer in beide dezelfde vloeistof wordt gebruikt en het Re-getal hetzelfde is, zal het Fr-getal in de kleine tank groter zijn en de vortex dieper (onderbroken lijn in fig.5.9.25.

5.9.1. Het vermogensverbruik van roerders.

Bij het ontwerpen van vloeistof/vloeistof mengers en het bereke-



nen van het vermogensverbruik van de roerders wordt meestal uitgegaan van resultaten verkregen met een proefopstelling. Deze gegevens moeten worden vertaald naar de grotere industriële installaties. Om twee roerders met elkaar te kunnen vergelijken moeten in beide vaten hetzelfde type roerder en hetzelfde aantal baffles worden gebruikt. Daarnaast moet er geometrische, kinematische en dynamische gelijkvormigheid zijn.

Met een kleine roerder, fig. 5.9.1.1, kunnen als volgt experimentele gegevens worden

verkregen. De torsiekracht, T , die tijdens het roeren op de roerders wordt uitgeoefend en de door de motor aan de as geleverde vermogen kan door middel van een aangebracht torsiewiel worden gemeten. Hiertoe moet de elektromotor wrijvingsloos op het roervat zijn bevestigd. Tijdens het roeren moet op het torsiewiel een kracht worden uitgeoefend om te voorkomen dat de motor meegaat draaien. Deze kracht, die door middel van een massa m is aangebracht, zie fig. 5.9.1.1, is een maat voor het geleverde asvermogen. Dit vermogen kan worden berekend met de formule: $2 \pi \cdot N \cdot T$. Hierin is de torsiekracht: $T = m \cdot L \cdot g$.

N = toerental van de motor (omwentelingen/s),

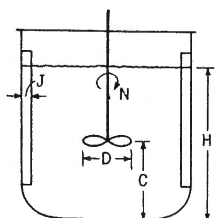
m = massa aangebracht op de schaal (m),

L = afstand van de linker katrol A tot het centrum van de roerderas (m),

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2).

Geometrische gelijkvormigheid.

Geometrische gelijkvormigheid houdt in dat de corresponderende afmetingen van beide apparaten dezelfde verhoudingen moeten hebben, fig. 5.9.1.2. Dit wil zeggen dat: D_T/D ; C/D ; J/D ; S/D ; W/D ; H/D hetzelfde moeten zijn voor beide systemen.



D = diameter van de roerder,

D_T = diameter van de tank

C = hoogte van de roerder boven de tankbodem,

H = vloeistofhoogte,

R = aantal keerschotten

J = diepte van de keerschotten,

N = toerental van de roerder,

S = spoed van de roerder,

W = breedte van de bladen van de roerder.

Fig. 5.9.1.2.

Afmetingen van een mengvat.

Indien er geen bijzondere eisen gesteld worden aan de geometrie van vat en roerder dan kunnen de figuren 5.9.1.3 en 5.9.1.4 als uitgangspunt dienen voor het kiezen van de dimensies van respectievelijk het vat en de roerder. Fig. 5.9.1.3 geeft de verhouding weer van de vloeistofhoogte tot de tankdiameter zoals die in de praktijk veel worden toegepast en in fig. 5.9.1.4 vinden we voor een

drietal werkgebieden de verhouding van de diameter van de roerder en de tankdiameter als functie van de viscositeit. Deze figuur geldt voor Newtonse vloeistoffen.

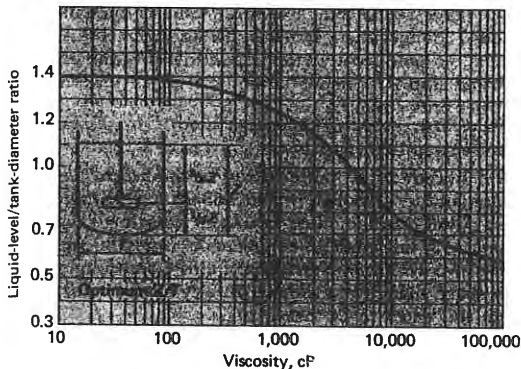


Fig. 5.9.1.3. Verhouding vloeistof niveau tot tankdiameter als functie van de viscositeit.

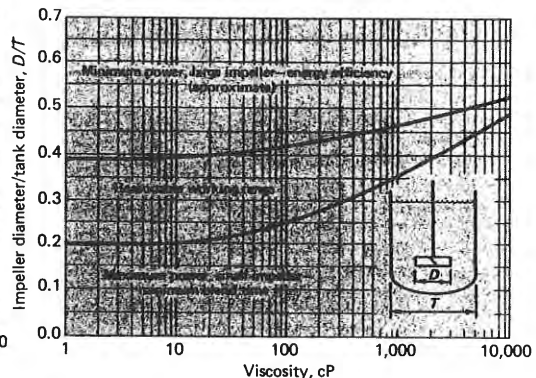


Fig. 5.9.1.4. Verhouding van de roeder tot de tankdiameter als functie van de viscositeit.

Kinematische gelijkvormigheid.

Kinematische gelijkvormigheid wordt verkregen indien de verhouding van de snelheden op overeenkomstige plaatsen in de roervaten dezelfde is.

Dynamische gelijkvormigheid.

Dynamische gelijkvormigheid houdt in dat de verhouding van de krachten op overeenkomstige punten in beide roervaten dezelfde is.

Wanneer de geometrische verhoudingen vastliggen kunnen kan dynamische en kinematische gelijkvormigheid worden verkregen indien bepaalde dimensieloze grootheden aan elkaar gelijk zijn. Om deze grootheden te verkrijgen wordt een dimensieanalyse toegepast.

Dimensieanalyse.

Bij geometrische gelijkvormigheid kan het vermogen P worden uitgedrukt als functie van een aantal onafhankelijke variabelen, die het vermogen bepalen.

$$P = f(D, \eta, g, \rho, N)$$

Hiervoor kan worden geschreven:

$$P = K(D^a, \eta^b, g^e, \rho^f, N^j)$$

Indien dit wordt uitgedrukt in het M.L.T.-systeem van eenheden krijgen we:

$$\frac{M \cdot L^2}{T^3} = (L^a \cdot (\frac{M}{L \cdot T})^b \cdot (\frac{L}{T^2})^e \cdot (\frac{M}{L^3}) \cdot (\frac{1}{T})^j)$$

$$\text{Hieruit volgt: } L \quad 2 = a - b + e - 3f$$

$$M \quad 1 = b + f$$

In termen van b en e:

$$T \quad -3 = -b - 2e - j$$

$$f = 1 - b$$

$$a = 2 + b - e + 3 - 3b = 5 - 2b - e \quad \text{Hieruit volgt:}$$

$$j = -b - 2e + 3$$

$$P = K \cdot (D^{-2b-e+5} \cdot \eta^b \cdot g^e \cdot \rho^{1-b} \cdot N^{-b-2e+3})$$

$$P = K \cdot (D^5 \cdot \rho \cdot N^3) \cdot (\frac{D^2 \cdot N \cdot \rho}{\eta})^{-b} \cdot (\frac{D \cdot N^2}{g})^{-e} \quad (5.9.1.1)$$

of

$$\frac{P}{D^5 N^3 \rho} = K \cdot (\frac{D^2 \cdot N \cdot \rho}{\eta})^{-b} \cdot (\frac{D \cdot N^2}{g})^{-e} \quad (5.9.1.2)$$

De betekenis van de verkregen dimensieloze groepen.

$$\underline{\text{Reynoldsgetal:}} \quad Re = \frac{D^2 \cdot N \cdot \rho}{\eta}$$

Het Re-getal geeft de verhouding aan tussen de traagheidskrachten, het botsen tengevolge van vloeistofstroming, en de visceuse (wrijvings) krachten. Deze verhouding bepaalt of de stroming laminair of turbulent is. Bij laminaire stroming overheersen de wrijvingskrachten langs de wand van het vat in het benodigde koppel. Bij turbulente stroming overheersen de traagheidskrachten.

$$\underline{\text{Froudegetal:}} \quad Fr = \frac{D \cdot N^2}{g}$$

Bij het roeren speelt het Froudegetal een rol omdat het roeren vaak wordt uitgevoerd in tanken met een vrij oppervlak. De vorm van het oppervlak en het stromingsbeeld in de tank worden beïnvloed door de zwaartekracht. Het Fr-getal, een golfkengrootte, is een maat voor de invloed van de zwaartekracht. De invloed van het Fr-getal is vooral van belang indien een vortex optreedt. Immers de zwaartekrachtversnelling werkt de vorming van een vortex tegen, de centrifugaalversnelling van de roterende vloeistof

$(N^2 D)$ bevordert vortex vorming.

Vermogenskental: $N_p = \frac{P}{D^5 N^3 \rho}$

Indien de geometrie van de twee apparaten gelijk is wordt vergelijking 5.9.1.2:

$$N_p = K \cdot Re^m \cdot Fr^r \quad (5.9.1.3)$$

K hangt af van het type propeller en het vat.

Evenals bij de stromingsleer, deel I, kan vergelijking 5.9.1.3 grafisch worden weergegeven door $\log Re$ op de abscis uit te zetten.

$$\phi = \frac{N_p}{Fr^r} = K' \cdot Re^m$$

Typische curven met $\phi = f(Re)$ zijn weergegeven in fig. 5.9.1.5. Indien keerschotten aanwezig zijn is de exponent r van het Fr-getal gelijk aan nul zodat $\phi = N_p$.

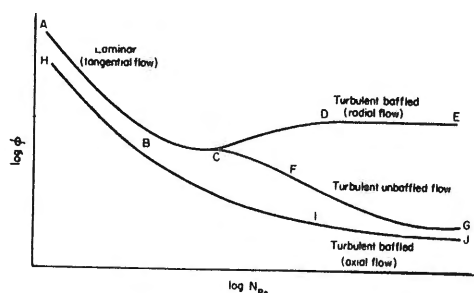


Fig. 5.9.1.5. Karakteristieke vermogenscurve voor een propellerroerder.

de macht en de diameter tot de vijfde macht en onafhankelijk van de viscositeit.

- Laminair gebied.

Bij laminaire stroming, de lijnen A-B en H-B, is de helling van de lijn hetzelfde voor elke willekeurige roerder. In dit gebied speelt het Fr-getal geen rol terwijl de helling -1 is. We krijgen:

$$N_p = K'' (Re)^{-1} \text{ . Substitutie in het vermogenskental geeft:}$$

$$P = K'' \cdot \eta \cdot N^2 \cdot D^3 \quad (5.9.1.5)$$

Nadere beschouwing van de grafiek.

- Turbulent gebied.

Bij hoge Re-getallen in tanken met keerschotten is $N_p = K$ (constant); curve D-E en I-J.

$$P = K \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (5.9.1.4)$$

Bij geometrische gelijkvormigheid is het vermogen evenredig met de dichtheid, toerental tot de derde

Uit vergelijking 5.9.1.5 volgt dat het vermogen o.a. recht evenredig is met de viscositeit. Om deze reden worden roerders vaak als viscositeitsmeters gebruikt in roervaten met een laminaire stroming. Voor propellers van het schepsschroeftype, met drie bladen, waarvan de spoed gelijk is aan de diameter van de schroef, is K'' ongeveer 41.

- Overgangsgebied.

Evenals bij stroming door een pijp is er bij roeren sprake van een kritisch Re -getal. In het algemeen wordt aangenomen dat bij een $Re < 10$ de stroming laminair is en bij $Re > 10^4$ turbulent. In het overgangsgebied, $10 > Re > 10^4$, spelen de traagheidskrachten een steeds grotere rol. Bij $Re > 300$ wordt het al of niet aanbrengen van keerschotten van belang. Zijn er geen keerschotten aangebracht dan gaat de invloed van de zich vormende vortex een rol spelen; het vermogenskental, N_p , blijft dalen. Zijn er keerschotten aangebracht dan komt voor $Re > 10^4$ het N_p -getal op een nagenoeg constante waarde.

Het energieverbruik van een aantal roerders.

Fig. 5.9.1.6 geeft voor een turbineroerder het verband tussen het vermogenskental, $\phi = P/(\rho \cdot N^3 \cdot D^5)$ en het Re -getal van de roerder. In fig. 5.9.1.7 is het verband weergegeven voor een propellerroerder en in fig. 5.9.1.8 voor enkele bijzondere roerdertypen.

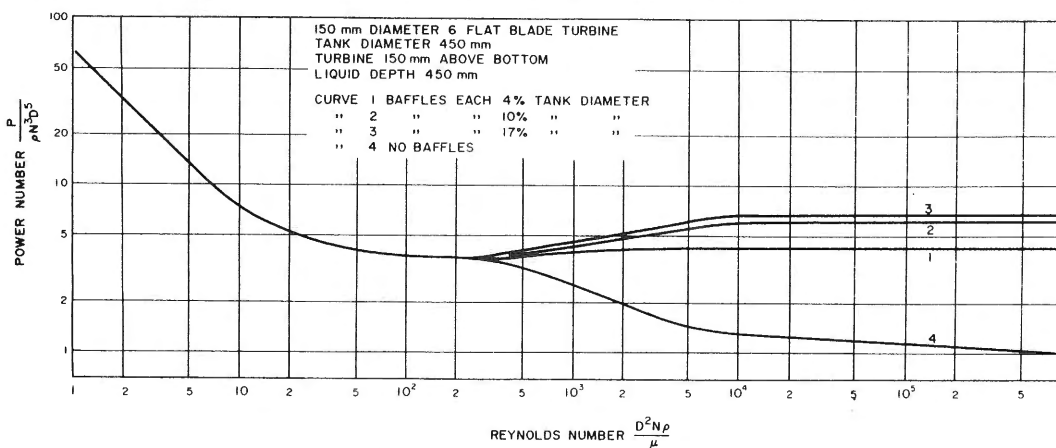


Fig. 5.9.1.6. Vermogenskental als functie van het Re -getal voor een turbineroerder.

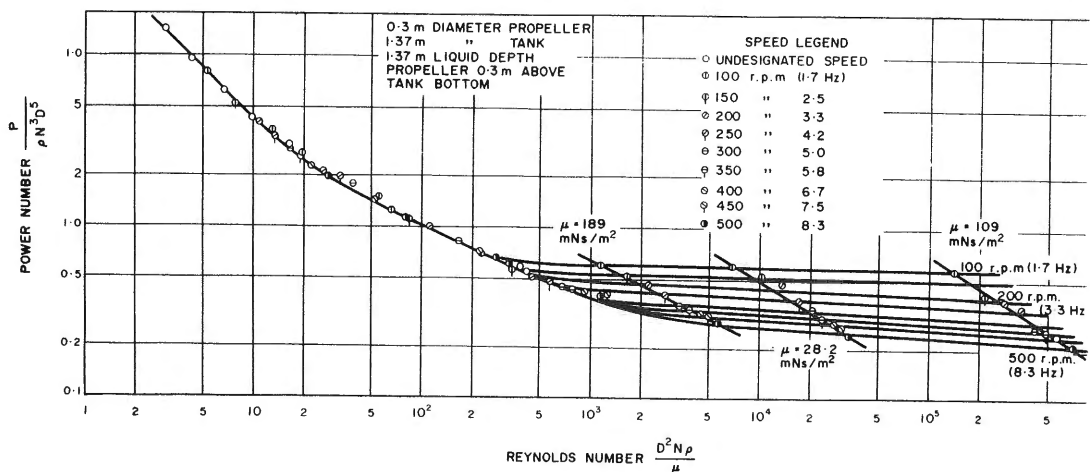


Fig. 5.9.1.7. Vermogenskental als functie van het Re-getal voor een propellerroerder.

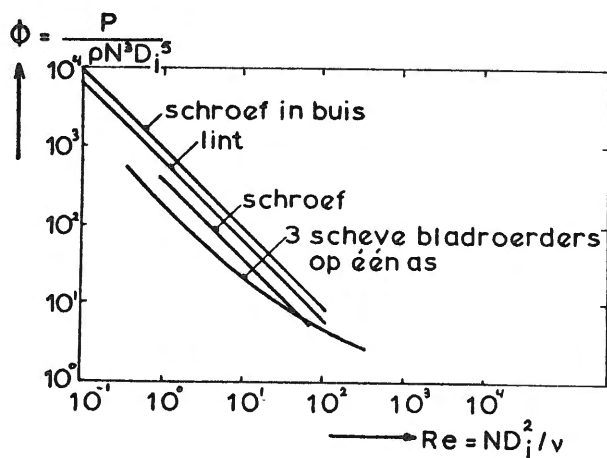


Fig. 5.9.1.8. Vermogenskentalen voor enkele bijzondere roerder-typen geschikt voor visceuse materialen.

Zowel voor de turbine- als de propellerroerder ziet men duidelijk dat de eerder aangehaalde verbanden bevestigd worden. De invloed van de keerschotten is duidelijk geïllustreerd.

Tabel 5.9.1.1 geeft enige vuistregels voor de waarde van het vermogenskental, N_p , in het turbulente gebied en voor K'' in het laminaire gebied.

Tabel 5.9.1.1.

Roerdertype.		N_p ($Re > 10^4$)	K'' ($Re < 10$)
1.	6 bladige turbineroerder in "gebaffeld" vat (4 baffles).	5,5 - 6,5	~ 70
2.	propellerroerder in "gebaffeld" vat (4 baffles).	0,4	42
3.	roterende schijf in "ongebaffeld" vat.	0,02	-
4.	scheve bladroerder, 6 bladen.	1,5	70
5.	geschraapte warmtewisselaar.	-	$\sim 1,3 \cdot 10^4$

Energieverbruik bij roeren van niet-Newtonse vloeistoffen.

Vele voedingsmiddelen vertonen een niet-Newtons gedrag, waarmee men bij het mengen en roeren rekening mee moet houden.

Op theoretische gronden kan worden verwacht dat in het turbulente gebied geen invloed van het niet-Newtons gedrag is te verwachten zodat zowel voor Newtonse als voor niet-Newtonse vloeistoffen zal gelden:

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} = \text{constant}$$

De waarden gegeven in tabel 5.9.1.1 voor N_p kunnen bij turbulente stroming dan ook worden gebruikt voor niet-Newtonse vloeistoffen. In het laminaire- en overgangsgebied hangt het energieverbruik wel af van de viscositeit van de vloeistof.

Het ontwerpen van een roerdersysteem voor niet-Newtonse vloeistoffen die de machtwet volgen verloopt als volgt. Men gebruikt curven welke het vermogenskental, N_p , tegen het Reynoldsgetal, Re , geven, fig. 5.9.1.9. Dit Re -getal is op dezelfde wijze gedefinieerd als de vergelijking voor niet-Newtonse buisstroming.

Een meer algemene methode is die waarbij een evenredigheid wordt verondersteld tussen het toerental van de roerder en de gemiddelde schuifsnelheden in het roervat, $dv/dr = \alpha \cdot N$.

Kent men het toerental en α dan is dv/dr bekend en via het bekend veronderstelde rheologisch gedrag ook de schijnbare viscositeit: $\eta_a = f(dv/dr)$. Vervolgens wordt Re berekend als $Re^* = \rho \cdot N \cdot D^2 / \eta_a$ en de curve $N_p = f(Re)$ gebruikt om het vermogen P te berekenen.

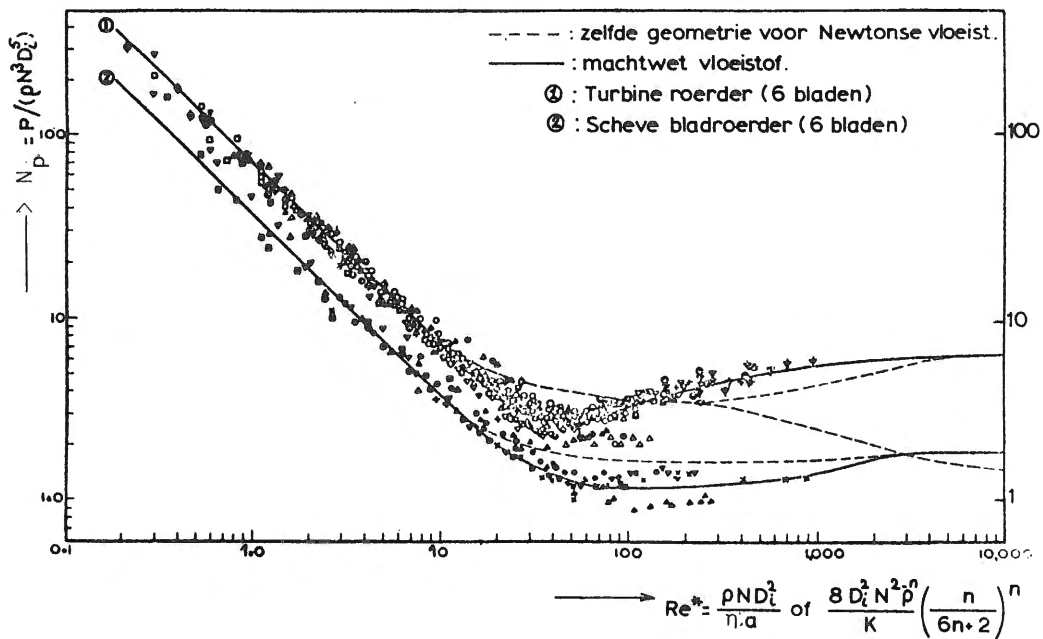


Fig. 5.9.1.9. Getrokken curven geven verband tussen D en Re^* voor niet-Newtonse vloeistoffen.

Enkele waarden voor de constante α voor enkele roerdertypen en D/D_T verhoudingen zijn te vinden in tabel 5.9.1.2.

Tabel 5.9.1.2.

Faktor α voor mengen van niet-Newtonse vloeistoffen.			
Roerdertype		D/D_T	α
Anker roerder (ongebaffeld)	Pseudoplastisch	0,955	84
	,,	0,90	51,5
	,,	0,66	19
Turbine, 6 bladig (gebaffeld)	Pseudoplastisch	0,66	12
	Dilatant	0,33	25,5
Tweebladig paddle (gebaffeld)	Pseudoplastisch	0,66	10
	Dilatant	0,33	22,5
Driebladig propeller (gebaffeld)	Pseudoplastisch	0,66	10
	Dilatant	0,47	23

5.9.2. De keuze van een roerder.

Het is in het algemeen een misvatting dat de aard van het mengprobleem alleen bepalend is bij de keuze van een roerder. Het is

mogelijk elk type propeller, turbine of roerarm voor een groot aantal doeleinden te gebruiken. Om tot een juiste keuze te komen zal men de kosten van de roerder en het energieverbruik in overweging moeten nemen naast de aard van het mengprobleem. In de eerste plaats zal men bij het selecteren van een roerder de viscositeit van de vloeistof en het volume van het mengvat er bij betrekken. Zowel fig. 5.9.2.1 als fig. 5.9.2.2 kunnen als hulpmiddel dienen om tot een juiste selectie te komen. In fig. 5.9.2.1 is schematisch de afhankelijkheid van de viscositeit weergegeven terwijl in fig. 5.9.2.2 op grond van de viscositeit en het vatvolume een selectie kan worden gemaakt.

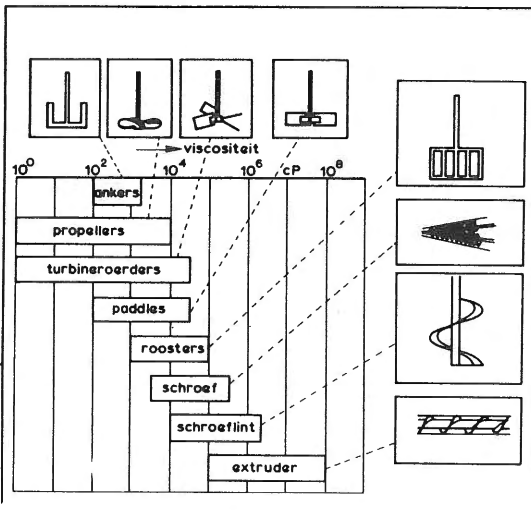


Fig. 5.9.2.1. Viscositeitsgebied voor roerders.

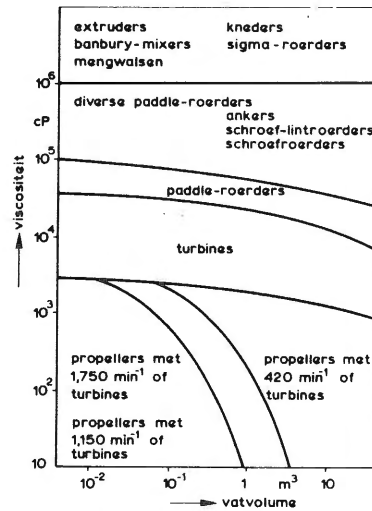


Fig. 5.9.2.2. Effect van de viscositeit en volume van het mengvat.

Uit fig. 5.9.2.2 blijkt dat in het lage viscositeitsgebied (tot aan ca. 3000 cP) het volume van het vat belangrijk is. Uit beide figuren blijkt dat men niet zoveel vrijheid heeft bij de keuze van roerders voor sterk viskeuze media. Ook het toerental van deze roerders is beperkt; voor de zware roerarmen zijn moeilijk bedrijfszekere lageringen te construeren.

Gebruikelijke toerentallen voor de propellerroerder zijn:

- vloeistoffen met lage viscositeit: 1750 min^{-1} ,
- vernissen en stropen: 1150 min^{-1} ,
- zware olie, verf, slurry; vloeistoffen met zware bestanddelen of bij het roeren in vaten waarbij gevaar voor ongewenste schuim-

vorming bestaat: 300 min^{-1} .

Roersnelheden boven de 400 min^{-1} moeten worden vermeden als de viscositeit groter is dan 200 cP of het mengvat een volume heeft dat groter is dan $7,5 \text{ m}^3$. Een toerental boven 1150 min^{-1} is slechts aan te bevelen voor viscositeiten lager dan 50 cP of als het mengvolume kleiner is dan 2 m^3 .

Bij het kiezen van een toerental voor een roerder zal gewoonlijk naar een compromis worden gezocht tussen een snelle menging (hoog toerental) en een laag energieverbruik (laag toerental). Van een bepaalde roerder zijn in fig. 5.9.2.3 enkele resultaten weergegeven op grond waarvan men tot een juiste keuze kan komen op grond van genoemde criteria.

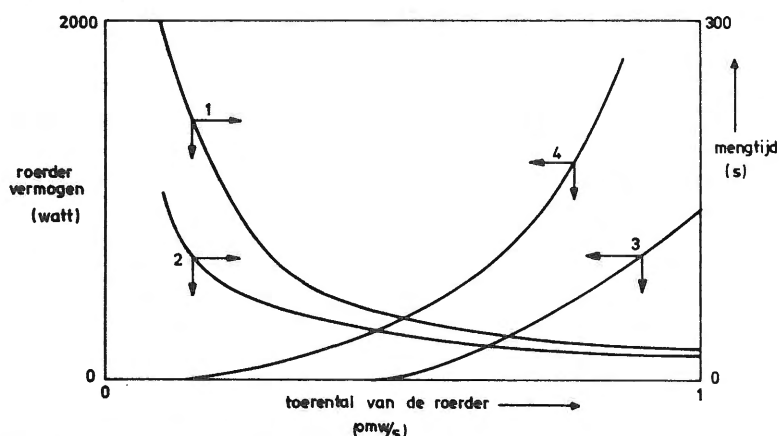


Fig. 5.9.2.3. Karakteristiek van een propellerroerder. 1. toerental als functie van de mengtijd; 2. toerental als functie van de mengtijd (4 baffles); 3. toerental als functie van het vermogen; 4. toerental als functie van het vermogen (mengvat voorzien van baffles).

Grafiek 1 laat zien dat de mengtijd sterk afneemt met toenemend toerental. De toevoeging van keerschotten verlaagt de mengtijd maar verhoogt het energieverbruik, grafiek 2. De grafieken 3 en 4 laten de veranderingen zien bij verschillende toerentallen met en zonder keerschotten.

Industriële toepassingen.

Ondanks de vele theoretische kennis over roerders is de selectie van roerders voor industriële toepassingen vooral gebaseerd op jarenlange experimenten. Enkele voorbeelden zijn:

- mengen van plantaardige oliën. Dit proces wordt gewoonlijk uit-

- gevoerd in tanks die 50.000 tot 500.000 kg olie kunnen bevatten. Voor deze doeleinde worden horizontaal geplaatste roerders gebruikt met een vermogen van 750 Watt/50.000 kg.
- het splitsen van vet in vrije vetzuren. Deze splitsing vereist een homogeen mengsel. Het proces hangt sterk af van de menging. Zowel de propeller- als de verticale platen turbineroerder worden hiervoor gebruikt. Vermogen 15-20 kilowatt/50.000 kg olie.
 - biologische processen. Biologische oxidatie door middel van luchtinslaan wordt uitgevoerd met een verticale vlakke platen turbine. Het vermogen bedraagt 400-1000 Watt/5000 liter. Bij fermentatieprocessen is het vermogen ca. 5.000-10.000 Watt/5000 liter.

5.9.3. Mengen van vloeistof/gas.

Bij veel bewerkingen worden vloeistoffen met gassen gemengd. Deze menging kan een hulpmiddel zijn, zoals een tijdig innig contact tussen vloeistof en damp, maar kan ook hoofddoel zijn. Bij het laatste kan gedacht worden het aan het bereiden van slagroom, ijs, sommige suikerwerken, bakkerijartikelen en aan het fabriceren van materialen als schuimrubber en schuimkunststoffen.

5.9.4. Het fijn verdelen van een gas in een vloeistof, dispergeren.

Onder dispergeren verstaat men het verdelen van een fase in een tweede, niet mengbare, fase. Men kan bijvoorbeeld gas/vloeistof of vloeistof/vloeistof dispergies onderscheiden (gas/vast dispersies worden schuimen genoemd, bijv. brood).

Het dispergeren van gas in vloeistof is een belangrijke bewerking. Toepassingen zijn:

- Lucht in vloeistof blazen om te roeren.
- Stoom in een vloeistof blazen om tegelijkertijd te roeren en te verwarmen (bijv. toegepast bij "sterilisatie" processen, U.H.T.).
- Stoom in een vloeistof blazen om bepaalde componenten uit de vloeistof te verdampen en zo de vloeistof te zuiveren van deze componenten, bijv. desodoriseren van oliën).
- Beluchten van de vloeistofinhoud van aërobe fermentatietanks (de microorganismen verbruiken zuurstof die vanuit de gasfase naar de vloeistof wordt overgedragen).
- Lucht inblazen in een mengsel vast/vloeistof om flotatie teweeg te brengen of andere adsorptieve bellenscheidingen of schuim-

scheidingen te bewerkstelligen.

5.9.5. Verstuiven.

Het verstuiven van een vloeistof in een gas wordt veel toegepast, meestal om een groot oppervlak tussen een vloeistof en een gas te vormen met het oog op stofoverdracht.

In de levensmiddelentechnologie wordt deze bewerking bijv. toegepast bij sproeidrogen, luchtbevochtiging, wassen van gasen in scrubbers en dergelijke.

Er zijn vier hoofdmethoden voor verstuiven te onderscheiden.

a. Verstuiven in centrifugaal- of werveldrukverstuivers, fig.

5.9.5.1 en fig. 5.9.5.2.

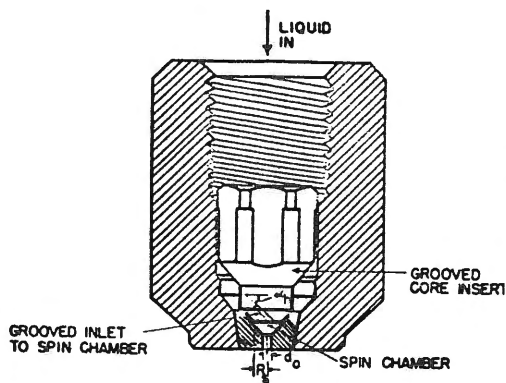


Fig. 5.9.5.1. Centrifugaaldrukverstuiver.

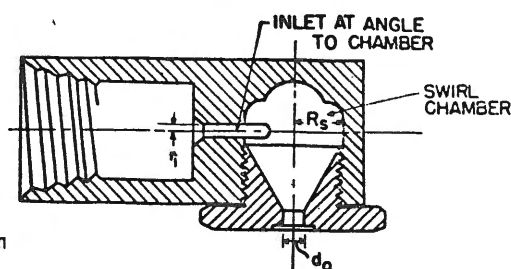


Fig. 5.9.5.2. Werveldrukverstuiver.

De drukverstuivers zijn de oudste verstuivers die om hun eenvoud veel worden gebruikt. De te verstuiven vloeistof wordt onder druk door een kleine opening geperst. Om te bereiken dat de vloeistof in kleine druppels uiteenvalt, wordt aan de vloeistof een draaiende beweging gegeven voordat deze de opening bereikt. Hierdoor ontstaat een centrifugale werking, terwijl de vloeistof buiten de verstuiver tegen de stilstaande lucht botst, waardoor een verdere verkleining optreedt. Kleine openingen en hoge drukken geven zeer kleine druppels. Voor het verstuiven van water in bijv. luchtbehandelingsinstallaties zijn overdrukken van een paar bar voldoende. Voor het verkrijgen van zeer kleine druppeltjes, zoals bijv. nodig zijn bij verstuivingsdroging, moeten hoge drukken en kleine openingen worden

toegepast, vooral bij visceuse vloeistoffen. Men gaat wel tot drukken van meer dan 100 bar. Daarbij treedt snelle slijtage op zodat de verstuivers worden voorzien van uitwisselbare, hardmetalen plaatjes. De capaciteit van een drukverstuiver is evenredig aan het oppervlak van de opening en ongeveer evenredig aan de wortel uit de druk. Deze verstuivers zijn minder geschikt voor vloeistoffen waarin zich deeltjes bevinden.

- b. Pneumatisch verstuiven, waarbij een vloeistofstraal gedisintegreerd wordt door een gasstroom met hoge snelheid. De verstuivers werken met perslucht of soms met stoom. De vloeistof wordt uiteengesleurd door een straal gas van hoge snelheid. De vloeistof kan door de gasstroom worden aangezogen. Gebruikelijk is de vloeistof onder overdruk toe te voeren. Het contact tussen vloeistof en gas kan buiten de eigenlijke verstuiver plaatsvinden, zoals in fig. 5.9.5.3 is weergegeven, dan wel in de kamer binnen de verstuiver, fig. 5.9.5.4. Deze verstuivers geven gemakkelijk fijne druppels. Zij worden bij luchtconditionering in grote ruimten gebruikt.

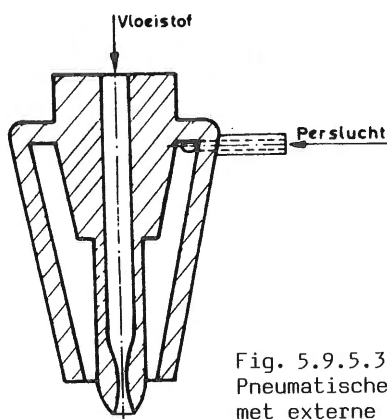


Fig. 5.9.5.3.
Pneumatische verstuiver
met externe menging.

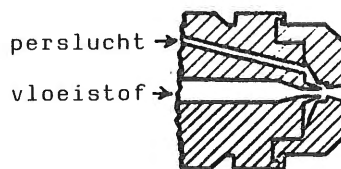


Fig. 5.9.5.4.
Pneumatische verstuiver met
interne menging.

- c. Verstuiven met behulp van een roterende schijf waarop centraal vloeistof wordt toegevoerd. Deze is bijzonder geschikt voor verstuivingsdrogen. In zijn eenvoudigste vorm is dit een enigszins holle plaat, die in een horizontaal vlak snel rond draait. De vloeistof wordt in het midden aangevoerd, verdeelt zich over de schijf en wordt door de centrifugaalkracht weggeslingerd. De gehele schijf wordt bij een goed gebruik door een dunne film van vloeistof bedekt.

Op enige afstand van de schijf wordt de film zo dun, dat hij in druppels uiteenvalt. De druppelgrootte is voornamelijk afhankelijk van de omtreksnelheid van de schijf en van de dikte van de film op het moment dat deze de schijf verlaat. Omtreksnelheden van 100 à 200 m/s kunnen normaal worden genoemd.

De voordelen van de centrifugaalverstuivers zijn:

- capaciteit is groot;- kunnen vrijwel niet verstoppem;- zijn gemakkelijk te reinigen;- produceren druppels van een tamelijk gelijkmatige grootte.

De nadelen zijn:

- aanschaffings kosten hoger dan van de eerder genoemde typen;
- energiekosten hoger dan van eerder genoemde typen;
- zijn alleen te gebruiken in een horizontaal vlak.

Een bijzonder uitvoeringsvorm is weergegeven in fig. 5.9.5.5.

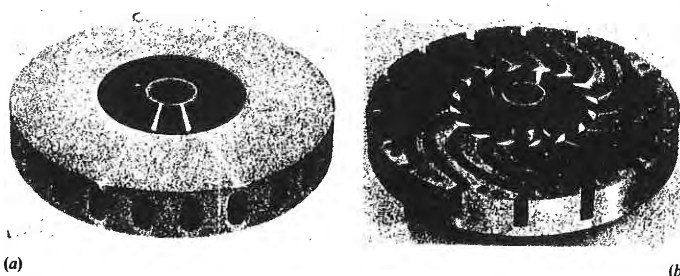


Fig.5.9.5.5. Wielverstuivers. a. met rechte kanalen; b. met gekromde kanalen. Deksel is verwijderd.

- d. Verstuiven door botsing, waarbij men één of meer vloeistofstralen laat botsen tegen een vast oppervlak.

6.0. Mechanische fasescheidingsprocessen.

Onder mechanische fasescheidingsprocessen verstaan we processen waarbij een scheidingsapparaat een voedingsstroom, die uit een mengsel van twee fasen bestaat, verdeelt in twee stromen die elk in hoofdzaak uit een van die fasen bestaat.

De volgende scheidingsproblemen kunnen worden onderscheiden:

- vaste stof in vloeistof (suspensies, afscheiding actief slib, kristallen van moederloog);
- vaste stof in gas (stofwolken, afscheiden van een poeder uit een gasstroom);
- vloeistof in gas (mist, vloeistofstralen);
- vloeistof in vloeistof (emulsies, dispersies).

Een fasescheidingsproces kan schematisch worden weergegeven als in fig. 6.1.

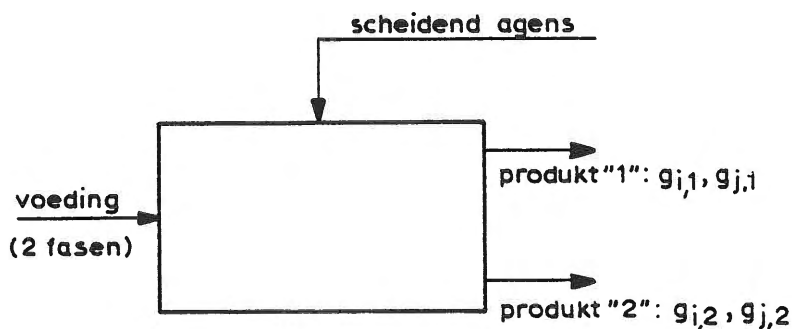


Fig. 6.1. Schematische weergave van een fasescheidingsproces.

De voedingsstroom bestaat vaak uit twee fasen, de disperse en de continue fase, die met een zekere mate van volledigheid worden gescheiden met behulp van een "scheidend agens" (bijv. zwaartekracht, centrifugaalkracht). De fasen worden in fig. 6.1 weergegeven met index i en j en de produktstromen met "1" en "2". We noemen de massastroom van fase i in produktstroom 1: $g_{i,1}$ (kg/s) etc. De selectiviteit van de fasescheiding kan nu worden gedefinieerd als:

$$\beta_{ij} = \frac{g_{i,1}/g_{j,1}}{g_{i,2}/g_{j,2}} \quad (6.1)$$

Hoe groter β_{ij} is hoe vollediger de fasescheiding geslaagd is in de zin dat produktstroom "1" uit zuivere fase i bestaat en

produktstroom "2" uit zuivere fase j.

Fig. 6.2. geeft een globaal overzicht van de verschillende scheidingsmethoden terwijl in tabel 6.1 een overzicht geeft van de soorten scheidend agens die zoal gebruikt kunnen worden om de scheiding tussen de fasen te bewerkstelligen.

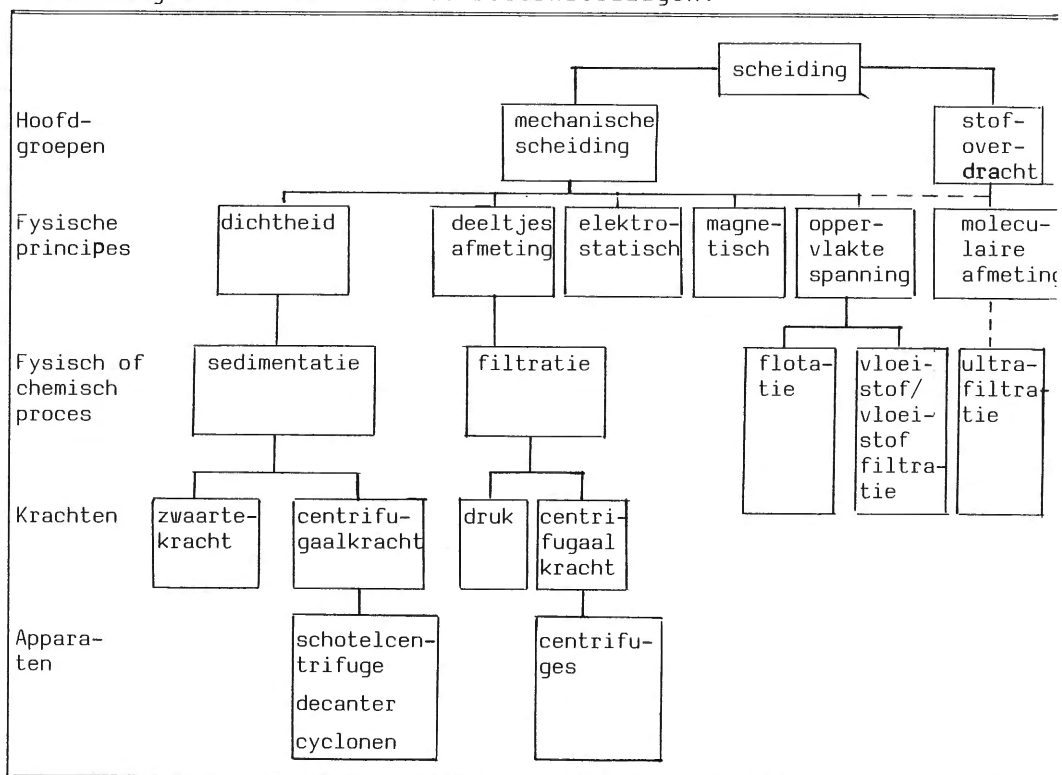


Fig. 6.2. Overzicht van de verschillende fasescheidingsmethoden.

Naast de genoemde soorten scheidend agens (krachten) kan een scheiding worden verkregen door een mengsel te laten stromen en vervolgens de disperse fase te dwingen van stroomlijnen van het fluidium af te wijken door de stroomlijnen krom te laten verlopen. Traagheidskrachten zorgen nu dat de deeltjes van de disperse fase uit de bocht vliegen en dan bijv. botsen tegen een daartoe aangebracht lichaam dat de deeltjes niet meer loslaat. Een andere methode is een gaas of filterdoek in de stroming te plaatsen en zo deeltjes van de disperse, in dit geval steeds vaste, fase te vangen. Dit soort scheidingsprocessen wordt vaak aangeduid met classificeren of ziften. De scheiding kan gebeuren op verschil in

Tabel 6.1. Classificatie van fasescheidingsprocessen.

Naam Proces	Voeding	Scheidend agens	Product stromen	Scheidings principe	Voorbeelden
1. Sedimentatie	vloeistof fase + disperse vaste fase	zwaartekracht	vloeistof en sediment	verschil in dichtheid	verwijdering van gesuspendeerde vaste stof en neerslagen uit water
2. Flotatie	vloeistof fase + disperse vaste fase of disperse vloeistof fase	zwaartekracht	vloeistof en schuimlaag	verschil in dichtheid gas/vloeistof en ophoping disperse fase aan gas/vloeistof grensvlak	verwijderen van olie uit raffi-naderij afvalwater
3. Drijf-zink scheiding	mengsel van twee disperse vaste stoffen met dichtheden ρ_1 , ρ_2	vloeistof met dichtheid : $\rho_1 < \rho < \rho_2$	schuimlaag en sediment	verschil in dichtheid tussen de twee vaste fracties	scheiding erts/ganggesteenten wassen van steenkool
4. Elektrostatische precipitatie	gas + fijne vaste stof	elektrische kracht	gas en vaste stoflaag op collectors	elektrische lading op deeltjes in een elektrisch veld	stofverwijdering uit schoorsteen gasen (bijv. vlieg-as)
5. Centrifugeren	vloeistof + disperse vaste stof	centrifugaal kracht	vloeistof en slib	dichtheidsverschil	ontwaten van slib, klaren van vloeistoffen
6. Magnetische scheidingen	mengsel van vaste stoffen of vloeistof + vaste stof	magnetische kracht	vaste stof en magnetische fractie of vloeistof en magnetische fractie	magnetische fractie (bijv. Fe) of magnetiseerbaar materiaal	verwijderen van blikresten uit huisvuil reinigen van ertsen of steenkool
7. Hydrocycloon, stofcycloon	fluidum dat vaste stof bevat	traagheidskrachten	fluidum en vaste stof stroom	dichtheidsverschil tussen fluidum en vaste stof	afvangen vaste stof uit gaastromen (bijv. sproei-drogers) afvangen vaste stof uit vloeistoffen

8. Scrubbing	gasstroom + disperse vaste stof	vloeistofdrup- pels of vloe- istoffilm + traagheids- krachten	gas en vloe- istof/vast slurry	verandering van fluidum stro- mingsrichting; bevochtigbaar- heid vaste stof deeltjes	afvangen vaste stof uit gasstromen beperken stofemis- sies
9. Botsingsaf- scheiding	gasstroom + disperse stof	traagheids- krachten	gas en vaste stof	verandering van stromingsrich- ting fluidum	afvangen vaste stof uit gasstro- men
10. Filtreren (koek)	fluidum + vaste stof	filtermedium + drukenergie	fluidum en filterkoek poriën medium	grootte van deeltjes > mazen filterdoek	verwijderen van wa- ter uit slib winning van vaste stof uit slurry
11. Filtreren (diepte)	fluidum + vaste stof	filtermedium + drukenergie	fluidum en ver- vuld filter	tortuositeit van kanaaltjes in fil- ter medium	luchtfilters (blijv. verwijderen van stof uit schoor- steengassen
12. Zeven	vloeistof + brokjes vaste stof	zeefgaas + zwaartekracht	vloeistof en vaste stof	grootte van brok- jes vaste stof > mazen van zeef	primaire waterbe- handeling
13. Coalescentie	mengsel vaste stof gas + vloe- istof druppel- tjes	zeefgaas + zwaartekracht pakking van me- taal of kunst- stofvezels + drukenergie	twee fracties vaste stof gas en vloe- istof	verschil in grootte van vaste fracties druppelgrootte en bevochtigings- eigenschappen van het pakking materi- aal	verwijdering van zwaanzuur druppel- tjes uit gasstromen fasescheiding na vloeistof/vloeistof extractieproces
14. Windziften	mengsel van dispersie vaste stoffen	gasstroom + centrifugaal kracht	twee fracties vaste stof	verschil in zweef- snelheid van vaste stofdeeltjes	papier/plastic scheiding in zig- zag zifter wannen van granen, rijst scheidingen in maalderijen

eigenschappen tussen deeltjes als soortelijke massa, diameter, vorm, magnetiseerbaarheid.

Bij nauwkeurige bestudering van vele typen fasescheidingsapparaatuur blijkt dat in vele apparaten meerdere mechanismen tegelijkertijd aan het werk zijn. De voorgaande indeling kan daardoor niet geheel eenduidig gebruikt worden voor het indelen van apparatuur maar geeft slechts globaal onderscheiden gebieden aan. Fig. 6.3 geeft een overzicht van de apparatuur die gebruikt wordt voor het vangen van kleine deeltjes uit lucht met de mechanismen van de scheiding en de deeltjesgrootte orde waarvoor de afscheider in het bijzonder geschikt is.

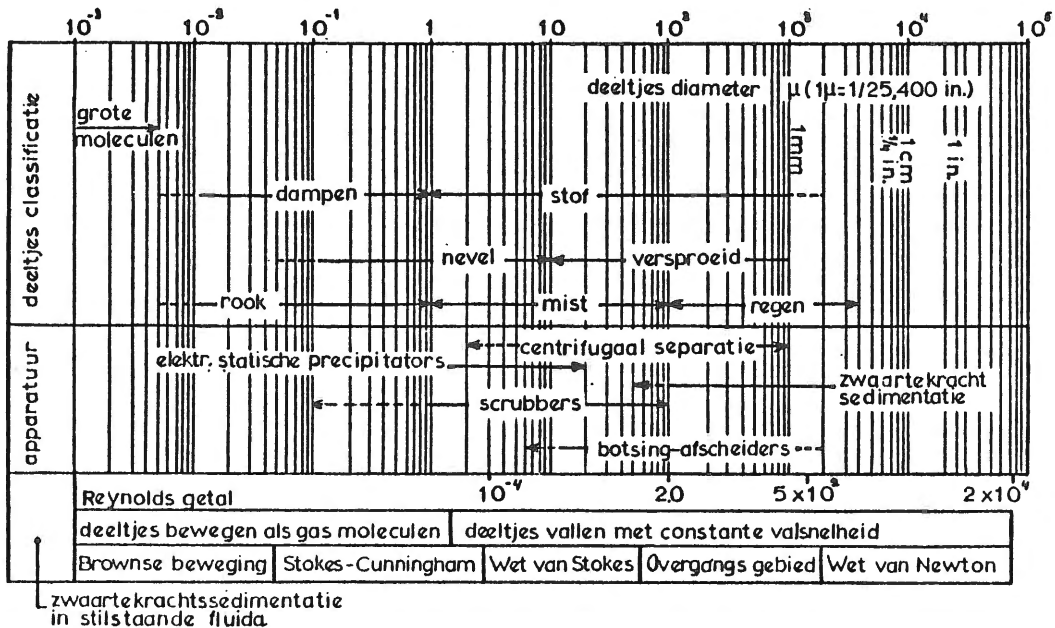


Fig. 6.3. Indeling van deeltjes naar grootte en apparatuur, geschikt voor het afscheiden van de deeltjes.

Voor het afscheiden van vaste deeltjes uit water wordt op grote schaal sedimentatie en flotatie toegepast in de waterzuivering. Daarnaast worden hydrocyclonen, centrifuges en filtratieapparatuur gebruikt.

6.1. Scheiden vast/vloeistof.

Het scheiden van vaste stoffen van vloeistoffen of oplossingen is een bewerking die in tal van bedrijven voorkomt. Deze werkwijze heeft tot doel een heterogeen mengsel van vaste stof en vloeistof te verdelen in twee fracties, waarvan de ene een heldere vloeistof (of oplossing) is en de andere alle vaste stoffen met nog een zekere hoeveelheid vloeistof (of oplossing) bevat. De vaste stof wordt geconcentreerd; deze scheiding wordt wel aangeduid met de term "indikken".

Uit de definitie blijkt dat de scheiding niet volledig is; langs mechanische weg kan men namelijk nooit een vaste stof volledig van vloeistof scheiden. Wil men een meer volledige scheiding, dan moet men na een mechanische scheidingsmethode een fysische scheidingsmethode toepassen. Bestaat de vloeistof bijvoorbeeld uit water, dan verkrijgt men na een mechanische scheidingsmethode toegepast te hebben, een natte vaste stof. Deze kan door drogen geheel of gedeeltelijk van het overgebleven water worden bevrijd.

Het doel van de scheiding vast/vloeistof kan zijn:

- a. het winnen van de vloeistof,
- b. het winnen van de vaste stof of beide.

Het winnen van de vloeistof is primair bij het clarificeren of klaren van vruchtensappen of wijn, bij het klaren van sappen die door indampen geconcentreerd moeten worden, zoals suikersappen, bij het winnen van vruchtensappen door het uitpersen van vruchten, bij het winnen van suikersap door het uitpersen van suikerriet, bij het zuiveren van water en afvalwater. In al deze gevallen is de vaste stof van minder belang.

Voorbeelden waarbij het gaat om de winning van vaste stof zijn:

- het winnen van zetmeel uit suspensies in water,
- het concentreren van celstof in de vorm van papier en karton uitgaande van verdunde suspensies,
- het uitpersen van allerlei produkten voordat ze worden gedroogd (bijv. wasgoed, papier en karton, gecoaguleerd rubber, suikerbietenpulp, visafval etc.)
- uitpersen van oliehoudende grondstoffen, hierbij zijn de vloeistof en de vaste stof belangrijke produkten.

Bij het winnen van de vaste stof uit een vast/vloeistof mengsel wordt vaak gestreefd naar een gelijktijdige zuivering van de vaste stof. Deze zuivering kan bijv. worden verkregen door uitwassen van de vaste stof; dit kan gebeuren door na de scheiding zuivere vloeistof aan de vaste stof toe te voegen en de scheiding te herhalen. Een voorbeeld hiervan is het uitwassen van strocelstof en het uitwassen van oplosbare verontreinigingen bij de fabricage van zetmeel waarbij tegelijkertijd onoplosbare verontreinigingen worden verwijderd.

Wanneer het in hoofdzaak gaat om de winning van oplosbare stoffen wordt extractie toegepast. Bij de fysische scheidingsmethoden speelt de mechanische scheiding vast/vloeistof een belangrijke rol. De mechanische scheidingsmethode van een vloeistof uit een vast/vloeistof mengsel is in het algemeen goedkoper dan verdamping van de vloeistof. Een mechanische scheidingsmethode, als uitpersen kan meestal alleen worden toegepast indien de vloeistof die wordt verwijderd weinig waardevolle bestanddelen bevat.

6.1.1. Uitvoering vast/vloeistof scheiding.

De scheiding van vast/vloeistof kan onder andere op de volgende manieren plaatsvinden:

- uitlekken,
- sedimentatie; deze kan worden uitgevoerd onder invloed van de zwaartekracht of door gebruikmaking van centrifugaalkracht.
- filtratie; daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen filtratie onder druk of vacuum, en filtratie in een centrifuge.

6.1.2. Uitlekken.

Men spreekt van uitlekken wanneer men onder invloed van de zwaartekracht een gedeelte van de vloeistof laat weglopen. Uitlekken wordt veel toegepast na wassen van produkten, bijvoorbeeld bij wasgoed en bij grove losse materialen als aardappelen, groenten, vruchten en granen. Dit soort produkten kan men op een grove zeef laten uitlekken. Het grove materiaal kan ook omhoog worden verplaatst langs een helling. De overmaat water loopt langs de helling naar beneden, het produkt lekt dus uit. Men kan hiervoor bijvoorbeeld een schuin opgestelde geperforeerde transportband gebruiken, die voorzien is van dwarsschotten en door een bak met het betreffende uit te lekken materiaal loopt.

6.1.3. Sedimentatie.

Onder sedimentatie verstaat men het laten bezinken van een vaste stof in een vloeistoffase of een gasfase onder invloed van de zwaartekracht. Bij sedimentatie wordt de vaste stof hoogstens tot een dikke suspensie geconcentreerd. Sedimentatie is alleen mogelijk wanneer er verschil in dichtheid bestaat tussen de vaste stof en de vloeistof of het gas.

Er kunnen verschillende soorten bezinking worden onderscheiden zoals fig. 6.1.3.1 laat zien.

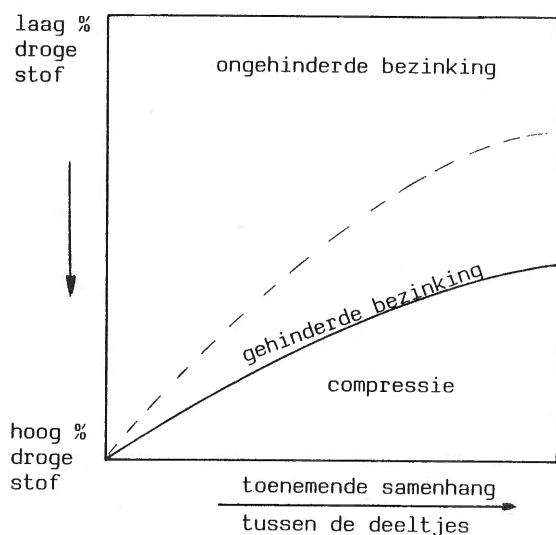


Fig. 6.1.3.1. Overzicht soorten bezinking.

Bij verdunde suspensies, vaste stofgehalte $\leq 0,5\%$, treedt ongehinderde (vrije) bezinking op. We hebben te maken met de sedimentatie van een enkel deeltje waarvan de stationaire valsnelheid kan worden berekend met de vergelijking:

$$v_r = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot D \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{C_w \cdot \rho_f} \right) \cdot g} \quad ; \text{ zie deel I; stromingsleer, hoofdstuk 3.}$$

C_w = funktie van het Reynolds getal.

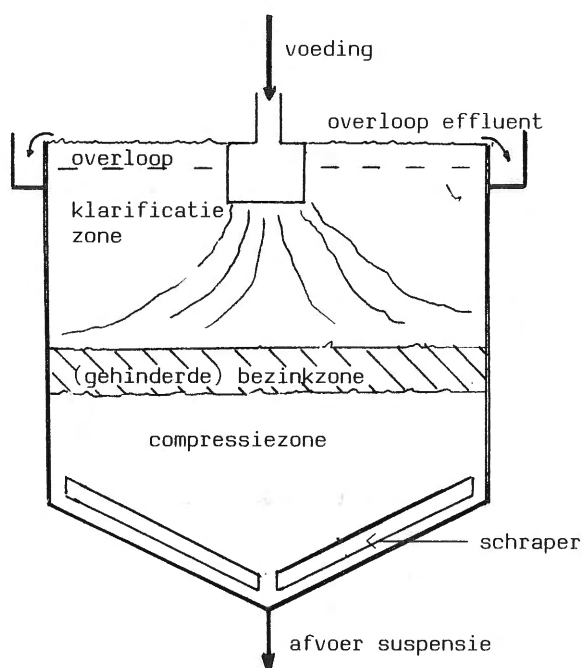
Bij ongehinderde bezinking bestaat er geen scherpe grens tussen de bezinkende deeltjes en de bovenstaande vloeistof. Grotere deeltjes bezinken sneller dan kleinere waardoor tijdens het bezinken er een concentratiegradiënt over de hoogte ontstaat.

Voor meer geconcentreerde suspensies bevinden de deeltjes zich dichter bij elkaar en wijzigt het beeld van de bezinking. Een meer geconcentreerde suspensie zal ook optreden in de eindfase van de bezinking van een verdunde suspensie of door flocculatie van een verdunde suspensie.

Tijdens het bezinken van een gedoncentreerde suspensie wordt de bezinksnelheid van de grotere deeltjes vertraagd en van de kleine deeltjes versneld doordat de deeltjes elkaar hinderen. In het geval van flocculatie van de deeltjes ontstaan er vaak vlokken van dezelfde afmeting of er ontstaat een vlokkenstructuur waarin de kleinere deeltjes worden ingekapseld tussen de grotere. Het gevolg is dat bij flocculatie de deeltjes vaak gezamenlijk bezinken waardoor de gehele suspensie gelijkmatig naar beneden beweegt. Men spreekt van gehinderde bezinking. Gehinderde bezinking zal eveneens optreden indien de concentratie aan vaste stof een bepaalde waarde overschrijdt. Zoals fig. 6.1.3.1 laat zien is de concentratie aan vaste stof waarbij de gehinderde bezinking begint niet precies aan te geven.

Wordt de suspensie verder geconcentreerd dan treedt indikking of compressie van de suspensie op. Hierbij is er niet langer sprake van werkelijke bezinking omdat bij hoge concentratie de deeltjes met elkaar in contact komen. Op dat moment wordt in een bepaalde laag het gewicht van de erboven liggende lagen voor een deel mechanisch ondersteund door krachten tussen de deeltjes onderling. Een verdere daling van de slibspiegel is het gevolg van de opwaartse verplaatsing van water.

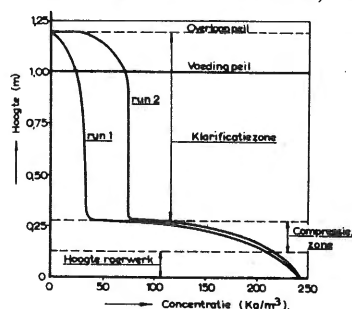
Gedurende het bezinken spelen zich volgens bovenstaande in feite twee processen af namelijk bezinking en compressie. Deze twee processen vinden we terug in verschillende continu werkende bezink-tanken. Deze tanks bestaan meestal uit cirkelvormige basins, fig. 6.1.3.2, waarvan de diameter meer dan 100 m kan bedragen. De hoogte van de tanks wordt vooral bepaald door de compressiezone. De hoogte varieert in het algemeen van 1 tot enkele meters. Op de bodem, die meestal konisch is, bevindt zich een langzaam lopende schraper die de ingedikte suspensie naar een centrale uitlaat-opening verplaatst waarna de suspensie door een (membraan)-pomp wordt verwijderd. Door de enigszins roerende werking van de schra-



per wordt de concentra-
tie in de compressie-
zone in al of niet gun-
stige zin beïnvloed.
De aanvoer van de sus-
pensie gebeurt centraal
onder het vloeistof op-
pervlak; vandaar ver-
spreidt de suspensie
zich radiaal. De helde-
re vloeistof, het efflu-
ent, wordt over de rand
van de tank afgevoerd.

Fig. 6.1.3.2.
Zones in een continue be-
zinktank.

In fig. 6.1.3.3 is de concentratie in continu werkende bezinktank, in stationaire toestand, weergegeven. Run 1 geeft de toestand weer



bij een normale toevoer per tijds-
eenheid en run 2 bij een te grote
toevoer met het gevolg dat het
effluent troebel overloopt.

Fig. 6.1.3.3. Concentratieverloop in
een continu werkende be-
bezinktank.

Technische uitvoering.

Bij de technische uitvoering van sedimentatieapparatuur zijn er vier delen te onderscheiden, fig. 6.1.3.2, namelijk:

- inlaatzone waar het mengsel binnenkomt,
- de eigenlijke sedimentatiezone,
- het afvoermechanisme van het sediment,
- de uitlaatzone (overflow).

Wij kunnen onderscheid maken tussen ladingsgewijze en continue sedimentatie. De eerste wordt weinig toegepast, namelijk alleen voor kleine hoeveelheden suspensie of soms in gevallen dat de bezinking buitengewoon lang duurt (vruchtensappen, wijn e.d.). Voor de verwerking van grote hoeveelheden suspensie (bijv. afvalwater) worden alleen continu werkende apparaten gebruikt.

Bij ladingsgewijs sedimenteren is het het gunstigst gebruik te maken van ondiepe tanks. Wanneer bijv. in een tank van 2 m diepte de suspensie bezinkt tot 1/10 van de oorspronkelijke hoogte in 1 uur, duurt het in een tank van 10 m hoogte 5 uur, voordat de suspensie bezonken is tot 1/10 van de hoogte. Twee tanks van een bepaalde diameter produceren tezamen bijna twee maal zoveel heldere vloeistof als één tank van dezelfde diameter, doch twee maal zo diep.

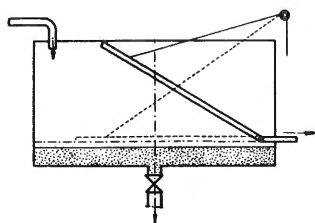


Fig. 6.1.3.4. Ladingsgewijze bezinktank. Hieronder bevestigde afvoerleiding die men in de tank laat zakken (bijv. met behulp van een vlotter) totdat de aflopende vloeistof troebel wordt (fig. 6.1.3.4).

De meeste continu werkende apparaten hebben een mechanische afvoer van het geconcentreerde slib. De bekendste apparaten zijn de Dorr-indikkers, waarvan vele typen gebouwd worden, fig. 6.1.3.5 en fig. 6.1.3.2. Voor een beschrijving van de werking zie pagina 191.

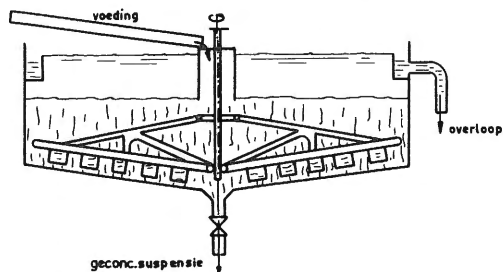


Fig. 6.1.3.5. Continue bezinktank.

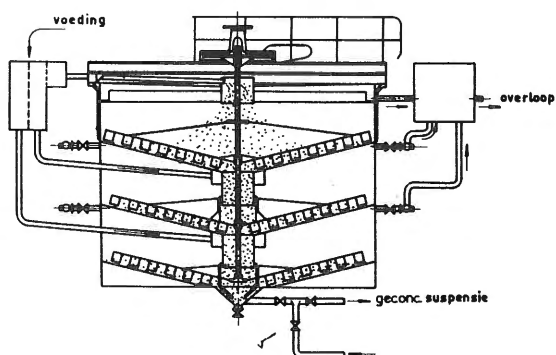
Om de capaciteit, bij eenzelfde grondoppervlakte, te vergroten worden een aantal indikkers boven elkaar gebouwd, fig. 6.1.3.6. Iedere afdeling heeft een aparte voeding en overloop; de compar-

timenten werken parallel maar de werking is iets minder goed

dan van een enkelvoudige indik-
dikker. Desondanks treft men
deze apparaten aan in fabriek-
en of op fabrieksterreinen,
waar men meestal geen ruimte
heeft voor een grote enkel-
voudige indikker.

Enkele globale gegevens van
deze twee continue indikkers
zijn gegeven in tabel 6.1.3.1.

Fig. 6.1.3.6. Continue indikker
met compartimenten.



Tabel 6.1.3.1.

Diameter tank in m.	5	10	20	50	100	200
Toerental roerwerk omw./min.	0,35	0,16	0,10	0,07	0,03	0,02
Omtreksnelheid in m/min.	5,5	5,0	6,3	11,0	9,4	12,6
Vermogen in kW.						
Dorr-indikker.	0,4	1,1	2,2	3,0	5,0	10,0
Vijfkamer-indikker.	1,3	2,0	3,0			

Het beeld van de sedimentatie in een continu werkend apparaat
verschilt enigszins van dat bij discontinu sedimenteren. Het is
duidelijk dat in een continu apparaat een stationaire toestand
moet gaan heersen.

Het dimensioneren van indikkers.

Voor het dimensioneren van indikkers bestaan er diverse bereke-
ningsmethoden. Hiervan zullen er twee worden besproken waarvan be-
kend is dat ze redelijke resultaten geven. Alvorens op deze bereke-
ningen in te gaan zal eerst aandacht worden besteed aan de ladings-
gewijze sedimentatie, om meer inzicht te krijgen in de opzet van de
berekeningen nodig voor het dimensioneren van indikkers.

Ladingsgewijze sedimentatie.

Een voorbeeld van een ladingsgewijze sedimentatie is getekend in
fig. 6.1.3.7 en fig. 6.1.3.8. Wanneer $d_{\max}/d_{\min} < 6$ of de concen-
tratie $\geq 0,5$ vol % begint zich spoedig na de aanvang van de bezin-

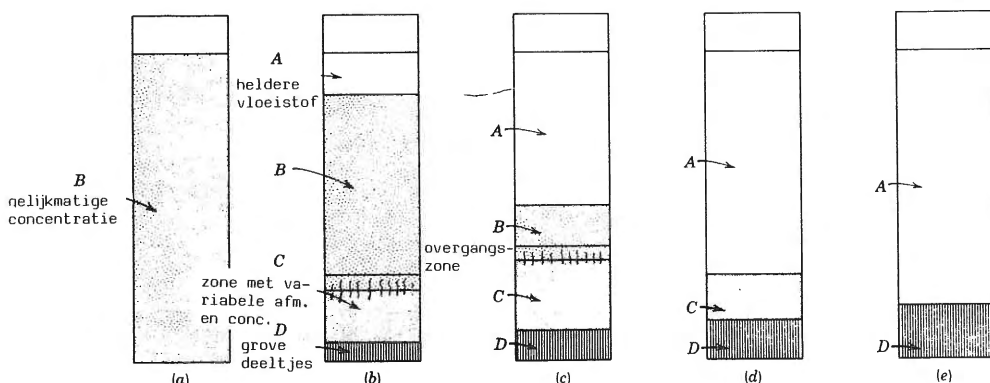


Fig. 6.1.3.7. Ladingsgewijze sedimentatie.

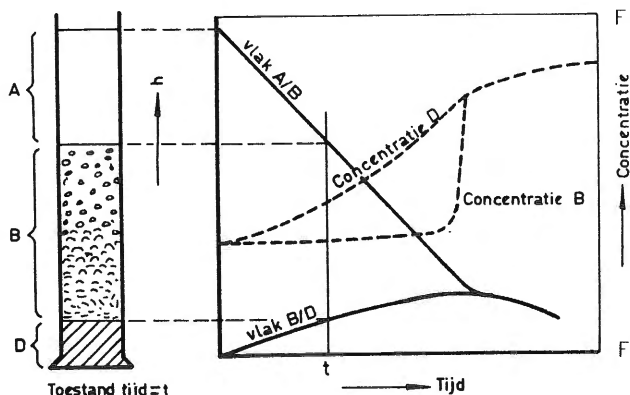


Fig. 6.1.3.8. Ladingsgewijze sedimentatie.

king een scherpe grenslijn af te tekenen tussen de zones A en B. Op de bodem zet zich een laagje D af. Gewoonlijk is de grens tussen B en D scherp, soms is er nog een overgangszone, C, fig. 6.1.3.7. Zolang de grensvlakken tussen A en B enerzijds en B en D anderzijds betrekkelijk ver van elkaar verwijderd zijn, verplaatst eerstgenoemd grensvlak met een eenparige snelheid (de gehinderde bezinkingssnelheid, lineaire gedeelte van de kromme in fig. 6.1.3.8), terwijl de concentratie in zone B constant blijft. De verklaring hiervan is dat kolom B is zijn geheel bezinkt, aan de bovenzijde wordt heldere vloeistof achtergelaten, onder in het vat zet zich vaste stof af. Wanneer het grensvlak tussen A en B dat tussen B en D nadert, nemen de dichtheid en de viscositeit van de suspensie toe en daalt de bezinksnelheid sterk. Tenslotte, bij het zgn. kritische punt, is zone B geheel verdwenen en resteert slechts zone D. De geconcentreerde suspensie hierin wordt dan nog langzaam gecomprimeerd,

enige vloeistof wordt geleidelijk uitgeperst. Men noemt de laatste periode, waarin de hoogte van de zone D langzaam afneemt, de compressieperiode. Het kritische punt is meestal moeilijk waarneembaar. In fig. 6.1.3.9 is een voorbeeld gegeven van de invloed van

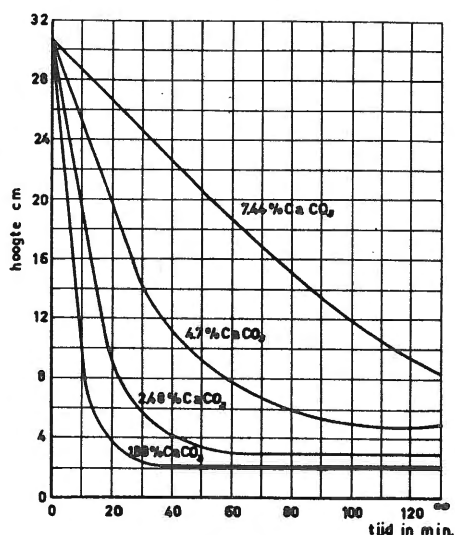


Fig. 6.1.3.9. Ladingsgewijze bezinkproeven van CaCO_3 suspensies.

de concentratie op de bezinksnelheid. In alle vier gevallen ziet men aanvankelijk een periode van constante bezinksnelheid, gevolgd door een overgangsperiode en een langzame compressie van de geconcentreerde laag sediment. De bezinksnelheid loopt in de praktijk zeer uiteen. Er kunnen vaak maatregelen worden getroffen om de bezinksnelheid te bevorderen. Dit is vooral van belang voor produkten die moeilijk door bezinking geklaard kunnen worden, omdat ze deeltjes bevatten met geringe valsnelheden. Om de bezinksnelheid te vergroten kan bijv. de

viscositeit van de vloeistof verlaagd worden door verwarming. Dit komt echter minder in aanmerking omdat in een warme vloeistof altijd convectiestromingen optreden die de bezinking bemoeilijken. Wanneer de viscositeit wordt veroorzaakt door bijv. pectinen, die voorkomen in vruchtensappen en dergelijke, kan de viscositeit worden verlaagd door deze met enzymen af te breken, waardoor een betere snellere klaring wordt verkregen. Een gunstige invloed wordt vaak verkregen door het vergroten van de deeltjesdiameter door coalescentie of flocculatie. De mate waarin flocculatie of coalescentie kan optreden hangt af van de frequentie waarmee botsingen tussen de deeltjes optreden. Deze botsingsfrequentie hangt af van de overloopsnelheid van een bezinktank, snelheidsgradiënten in het systeem, de deeltjesconcentratie en de spreiding in deeltjesgrootte. Hebben we te maken met colloïdale suspensies dan kunnen deze soms tot uitvlokking worden gebracht door verhitting. Flocculatie kan ook worden verkregen door verandering van pH of toevoegen van elektrolyten. Zulke maatregelen komen voor levensmiddelen meestal

niet in aanmerking.

De ontwerpberekeningen.

In 1916 is door Coe en Clevenger de grondslag gelegd voor het berekenen van continu werkende indikkers. Zij hebben een verband gelegd tussen ladingsgewijze bezinkproeven en continue indikking. De ladingsgewijze bezinkproeven werden uitgevoerd met suspensies van verschillende concentraties, die in de indikker voorkomen. Bij deze proeven wordt de lineaire beginsnelheid, v_z , van het grensvlak heldere bovenlaag/suspensie bepaald. Coe en Clevenger gingen er van uit dat in een in bedrijf zijnde indikker de bezinksnelheid in de indikker een functie is van alleen de concentratie van de suspensie. In de bezinktank komen op grotere diepten steeds hogere concentraties aan droge stof voor. Elke laag heeft een bepaalde doorvoercapaciteit, flux genoemd. Hieronder verstaat men het aantal deeltjes dat een horizontaal vlak per oppervlakte eenheid en per tijds-eenheid passeert. Zij vonden dat wanneer een laag een lagere doorvoercapaciteit had dan de laag er vlak boven het niet mogelijk was een droge stof met dezelfde snelheid af te voeren als waarmee het werd aangevoerd. Als dit het geval is zal de laag in dikte toenemen. Omgekeerd is het mogelijk dat een laag in staat is meer droge stof door te laten dan uit de erboven liggende laag wordt aangevoerd, zodat de laag steeds dunner zal worden en na enige tijd is verdwenen.

Een heldere overloop wordt verkregen indien de bezinksnelheid van de deeltjes, die in de zone tussen voeding- en overlooppeil, fig. 6.1.3.3, zijn terechtgekomen, groter is dan de opwaartse vloeistofsnelheid. De mogelijkheid om voldoende vaste stof aan de onderzijde af te voeren wordt beperkt door het verband tussen de bezinksnelheid, v_z , en de vaste stof concentratie, c .

Wanneer U het watergehalte is in de voeding, uitgedrukt in kg water per kg droge stof en V het watergehalte in de afvoer, eveneens in kg water per kg droge stof, is $(U-V)$ de hoeveelheid water die per kg vaste stof via de overloop wordt afgevoerd. Wanneer Q_m de massastroom aan vaste stof, de flux keer het doorstroomoppervlak, in de voeding voorstelt (kg/s), A de doorsnede van de classificatiezone (m^2) en ρ_f de dichtheid van de vloeistof (kg/m^3) bedraagt de gemiddelde opwaartse vloeistofsnelheid in de zone:

$$\frac{(U-V) \cdot Q_m}{A \cdot \rho_f} \quad (\text{m/s}) \quad (6.1.3.1)$$

U = watergehalte in de voeding (kg water /kg droge stof)

V = watergehalte in de afvoer (kg water /kg droge stof)

Q_m = massa-stroom droge stof in de voeding (kg/s)

A = doorsnede klassificatiezone (m^2)

ρ_f = dichtheid van de vloeistof (kg/m^3)

De opwaartse vloeistofsnelheid mag niet groter zijn dan de bezink-snelheid, v_z , van een zwerm deeltjes die representatief is voor een bepaalde laag in de tank of:

$$\frac{(U-V) \cdot Q_m}{A \cdot \rho_f} \leq v_z \quad \text{of} \quad A \geq \frac{(U-V) \cdot Q_m}{v_z \cdot \rho_f} \quad (6.1.3.2)$$

Waarden van v_z worden verkregen uit ladingsgewijze sedimentatie-proeven door voor een reeks van concentraties, die in de indikker kunnen voorkomen, de bezinksnelheid van de heldere bovenlaag/ suspensie te bepalen.

Het probleem is op welke wijze men de maximaal toelaatbare Q_m/A , ofwel de flux, berekent, waarbij onder alle omstandigheden een heldere overloop wordt verkregen. Wanneer wordt uitgegaan van de veronderstelling van Coe en Clevenger dat er bij een bepaalde v_z een minimum aan Q_m optreedt kunnen de waarden van v_z en Q_m worden gebruikt om met behulp van vergelijking 6.1.3.2 het oppervlak A te berekenen. Uit de ladingsgewijze bezinkproeven kan nl. een waarde van Q_m/A worden berekend voor iedere concentratie volgens de vergelijking:

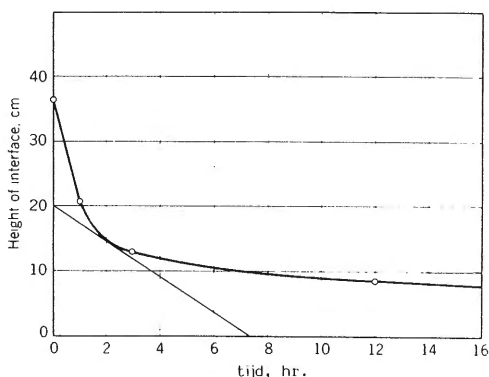
$$Q_m/A = (v_z \cdot \text{concentratie})_{\text{bezinkproef}} \quad (6.1.3.3)$$

Wanneer Q_m/A wordt uitgezet als functie van v_z vindt men de gezochte minimale flux waarna het oppervlak A kan worden berekend.

Daar de ladingsgewijze sedimentatieproeven zowel met lage als hogere slibconcentratie worden uitgevoerd blijken deze proeven niet altijd representatief te zijn voor hetgeen er in een indikker plaatsvindt. Bij bepaalde concentraties worden soms grotere bezinksnelheden gevonden dan in de indikker kunnen worden verwacht. Tijdens het bezinken bij ladingsgewijze proeven kan er een toename van de porositeit optreden, een zgn. kanaalvorming. Dit wordt o.a veroorzaakt door het water dat wordt verdreven uit de compressiezone. Dit water zoekt zijn weg naar boven via stroombuisjes of kanaaltjes die

een soort drainagesysteem door de bezinkzone vormen. Kanaalvorming is dikwijls visueel waarneembaar. Aan het oppervlak van de bezinkzone ontstaan kleine "vulkaanachtige" verhogingen wanneer de stroombanen door het oppervlak breken. Na de volledige vorming van deze kanalen is er een snelle afstroming van de vloeistof in opwaartse richting mogelijk waardoor de bezinkflux zal toenemen. Deze heeft o.a. tot gevolg dat de methode van Coe en Clevenger vaak een te laag oppervlak geeft, ruwweg ca. 20 % te laag. Deze fout kan worden beperkt door in de cilinders, waarin de ladingsgewijze bezinkproeven worden uitgevoerd, zeer langzaam te roeren waardoor het optreden van kanaalvorming wordt verstoord. De resultaten zullen meer in overeenstemming zijn met de praktijk daar in een indikker altijd enige turbulentie heerst tengevolge van dichtheidsverschillen, de invloed van de schrapers en een eventueel roerwerk. De veronderstellingen van Coe & Clevenger zijn veel later geformuleerd door Kynch. Zijn theorie is gebaseerd op de verschijnselen die optreden in een ladingsgewijze bezinkproef volgens fig. 6.1.3.8. Op de uitwerking van deze theorie zal niet worden ingegaan.

Door Talmage & Fitch is op basis van de theorie van Kynch een berekeningsmethode ontwikkeld voor het berekenen van het minimale oppervlak van een indikker. Hun methode komt er op neer dat uit de meting van de daling van de suspensiespiegel, tijdens één bezinkproef, uitgaande van de beginconcentratie, de flux als functie van de concentratie wordt berekend en uit deze gegevens het minimale oppervlak van de indikker.



De curve van een ladingsgewijze sedimentatieproef, fig. 6.1.3.10 wordt gebruikt voor het bepalen van de tijd, t_c , die nodig is om de kritische concentratie, c_c , te bereiken. Dit gebeurt als volgt, fig. 6.1.3.11.

Fig. 6.1.3.10. Hoogte van de suspensiespiegel als functie van de tijd.

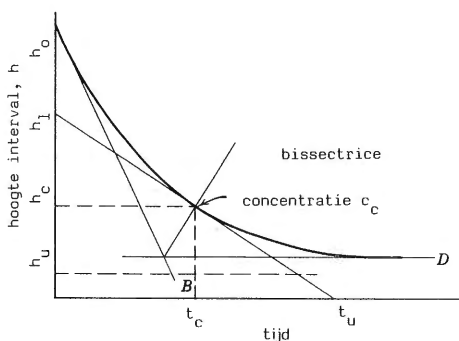


Fig. 6.1.3.11. Bepalen van de kritische concentratie

Aan het eerste rechte gedeelte van de curve, bezinksnelheid is constant, wordt een raaklijn getekend. Tegen het einde van de bezinkproef, waar de concentratie hoog en de bezinksnelheid laag is, is de bezinksnelheid weer nagenoeg constant. Aan dit gedeelte van de curve wordt opnieuw een raaklijn getrokken. In het punt waar beide lijnen elkaar snijden wordt vanuit het snijpunt een bissectrice getrokken. Het snijpunt met de bezinkcurve geeft

de tijd t_c waarbij de deeltjes de compressiezone bereiken met een concentratie c_c .

Tijdens de bezinkproef verandert de hoeveelheid droge stof in de cilinder niet zodat:

$$c_o \cdot A \cdot h_o = c_c \cdot A \cdot h_c = c_u \cdot A \cdot h_u \text{ of } c_o \cdot h_o = c_c \cdot h_c = c_u \cdot h_u \quad (6.1.3.4)$$

Bij een concentratie verandering van c_c naar c_u moet uit de suspensie een hoeveelheid water worden verwijderd van:

$$V = A(h_c - h_u) \quad (6.1.3.5)$$

De tijd die hiervoor nodig is bedraagt $t_u - t_c$. De vloeistofstroom wordt:

$$Q_v = \frac{V}{t_u - t_c} = \frac{A(h_c - h_u)}{(t_u - t_c)} \text{ of}$$

$$t_u - t_c = \frac{A(h_c - h_u)}{Q_v} \quad (6.1.3.5)$$

De bezinksnelheid op het tijdstip t_c wordt verkregen uit de helling van de raaklijn aan t_c of:

$$v_c = (h_1 - h_c)/t_c \quad (6.1.3.6)$$

Indien in een bezinktank de bezinking continu en stationair verloopt mag de opwaartse snelheid van de vloeistof niet groter zijn dan v_c . Is dit wel het geval dan zal er geen bezinking optreden.

De vloeistofstroom op het moment dat de bezinking begint bedraagt:

$$Q_v = A \cdot v_c = A \left(\frac{h_1 - h}{t_c} c \right) \quad (6.1.3.7)$$

Substitutie van Q_v uit deze vergelijking in vergelijking 6.1.3.5 geeft:

$$\frac{h_c - h_u}{t_u - t_c} = \frac{h_1 - h}{t_c} c \quad (6.1.3.8)$$

Uit deze vergelijking en vergelijking 6.1.3.4 kan t_u worden berekend. h_u en t_u kunnen ook worden verkregen uit fig. 6.1.3.11.

Het minimale oppervlak kan als volgt worden berekend. De gemiddelde massastroom waarmee een laag met een concentratie c_u in de indikker wordt gevormd is $(c_u \cdot h_u \cdot A) / t_u$ of $(c_o \cdot h_o \cdot A) / t_u$ daar $c_u \cdot h_u = c_o \cdot h_o$.

Indien de indikker continu werkt moet deze massastroom gelijk zijn aan de massastroom die wordt toegevoegd of:

$$Q_v \cdot c_o = \frac{c_o \cdot h_o \cdot A}{t_u} \quad \text{of}$$

$$A = (Q_v \cdot t_u) / h_o \quad (6.1.3.9)$$

6.1.4. Sedimentatie onder invloed van een centrifugaalkracht.

Centrifugereren is in feite te beschouwen als een versnelde wijze van bezinken of filtreren. In wezen berust de centrifugetechniek op het in snelle rotatie brengen van het te scheiden mengsel dat kan bestaan uit vaste stof - vloeistof, vloeistof - vloeistof of vloeistof - vloeistof - vast.

De centrifuges kunnen we onderscheiden in zgn. dichtwandcentrifuges, waarbij het te scheiden mengsel in een trommel aan een centrifugale kracht wordt blootgesteld, en filtreercentrifuges, waarbij de trommel uit een geperforeerde wand bestaat. De eerst genoemde zijn te beschouwen als verbeterde bezinkinrichtingen en de laatst genoemde als filtreerinrichtingen. Vindt er een afscheiding plaats van (fijne) vaste stof uit de vloeistof dan spreekt men van klarificatie, de betreffende centrifuge wordt dan vaak klarificator genoemd. Bij vloeistof-vloeistof scheiding of wanneer de winning van de vloeistof hoofddoel is worden de centrifuges vaak separatoren genoemd.

Bij het centrifugereren gebruiken we de versnellingskracht in een centrifugaalveld voor het bewerkstelligen van een beweging van de af te scheiden disperse fase ten opzichte van de continue fase.

Berekening van de capaciteit van een centrifuge.

Alvorens in te gaan op de apparatuur zal de theorie van het scheiden onder invloed van een centrifugaalveld worden besproken. Hierbij wordt uitgegaan van een centrifugaalklarificator fig. 6.1.4.1.

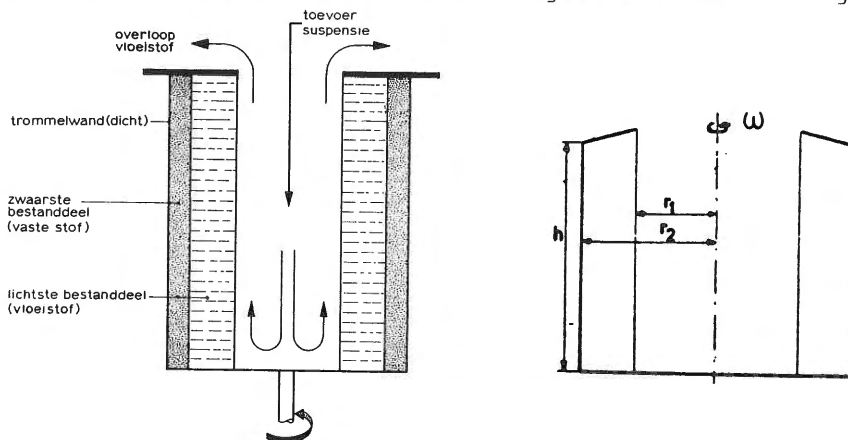


Fig. 6.1.4.1. Trommelcentrifuge (overloopcentrifuge)

De klarificator (klarificatie = afscheiden van een vaste stof uit een vloeistof) werkt in principe op dezelfde wijze als een bezinktank; slechts is de zwaartekracht vervangen door een centrifugaalkracht. Deze laatste is zelfs zo groot dat kan worden aangenomen dat in een een vertikale klarificator het vloeistofoppervlak vertikaal staat, fig. 6.1.4.1.

Brengen we een mengsel van stoffen, waarvan de bestanddelen ongelijke dichtheden hebben, in snelle rotatie, dan zal de zwaarste component met een grotere kracht tegen de buitenwand van het vat geslingerd worden dan het lichtere bestanddeel. Het resultaat zal zijn dat het zwaarste bestanddeel in de buitenste laag plaats neemt (tegen de trommelwand) en het lichtste bestanddeel in de binnenste laag. De klarificator dient zodanig te worden ingesteld dat de vloeistof helder overloopt, met andere woorden zodanig dat de kleinste deeltjes nog juist voldoende tijd hebben om te bezinken.

We zullen nu dieper ingaan op het afscheiden van een fijne vaste stof uit een vloeistof. Bij het centrifugeren kan meestal worden aangenomen dat de deeltjes, ondanks de grote centrifugaalkracht, vallen in het gebied van Stokes. Met behulp van de wet van Stokes kan nu de bezinktijd van een deeltje met een diameter d worden berekend waarvan de vloeistof juist moet worden ontdaan. Van dit zgn. "capaciteit bepalend deeltje", wordt aangenomen dat het start op de meest ongunstige positie. In fig. 6.1.4.1 is te zien dat de langste weg die de deeltjes moeten afleggen gelijk is aan $(r_2 - r_1)$.

Indien de bezinktijd van het capaciteit bepalende deeltje bekend is kan de capaciteit van de centrifuge worden berekend.

Een nauwkeurige berekening van de bezinkingstijd en van de door een deeltje af te leggen weg en daardoor van de capaciteit is niet goed mogelijk. Bij het berekenen van de bezinkingstijd wordt:

- a. geen rekening gehouden met de versnelling van de deeltjes,
- b. aangenomen dat de bezinking ongehinderd plaatsvindt. Vooral in de zone dichtbij de wand kan gehinderde bezinking optreden.
- c. geen rekening gehouden met de stromingskracht loodrecht op de valrichting die varieert met r .

Daarnaast wordt de coriolisversnelling verwaarloosd. We kunnen op grond van bovenstaande slechts tot een globale berekening komen

van de capaciteit van een centrifuge. De uiteindelijke formule voor het berekenen van de capaciteit blijkt voor de praktijk bruikbaar te zijn terwijl daarnaast het nodige inzicht wordt verkregen in de werking van een centrifuge.

Wanneer een deeltje met een massa van m kg in een cirkelvormige baan met een straal r (m) en een hoeksnelheid ω (rad/s) roteert is de centrifugaalkracht die het deeltje ondervindt gelijk aan:

$$F_c = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (6.1.4.1)$$

In een zwaartekrachtveld is de kracht die het deeltje ondervindt gelijk aan een massa m kg keer de versnelling van de zwaartekracht g (m/s^2):

$$F_g = m \cdot g \quad (6.1.4.2)$$

In tegenstelling tot de bezinktank zal de bezinksnelheid in een klarificator geen vaste waarde aannemen omdat de versnellingskracht toeneemt naarmate het deeltje de wand van de trommel nadert.

We beschouwen een dunne laag vloeistof die zich op een bepaalde afstand ten opzichte van de as, r , bevindt, fig. 6.1.4.1.

Voor een bolvormig deeltje geldt tijdens het centrifugeren, bij een laminaire ongehinderde stroming, het volgende krachtenevenwicht:

$$\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 (\rho_s - \rho) \cdot r \cdot \omega^2 - 3 \cdot \pi \cdot n \cdot d \cdot \frac{dr}{dt} - \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \rho_s \cdot \frac{dr^2}{dt^2} = 0 \quad (6.1.4.3)$$

De 1^e term in deze vergelijking geeft de centrifugaalkracht aan die het deeltje ondervindt. De term komt overeen met massa keer de versnelling van de zwaartekracht ($m \cdot g$) waarin g vervangen is door $r \cdot \omega^2$. De 2^e term geeft de wrijvingskracht aan die het deeltje ondervindt en de 3^e term de versnellingskracht die op het deeltje wordt uitgeoefend.

In de vergelijking is:

r = willekeurige afstand ten opzichte van de as (m),

d = diameter van het bolletje (m),

ρ_s = dichtheid bolletje (kg/m^3),

ρ = dichtheid van de vloeistof (kg/m^3),

ω = hoeksnelheid (rad/s),

η = viscositeit van de vloeistof (Ns/m^2),

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot N$

N = aantal omwentelingen per seconde.

De 3^e term, de versnellingskracht is meestal te verwaarlozen zodat voor vergelijking 6.1.4.3 kan worden geschreven:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d^2(\rho_s - \rho) \cdot r \cdot \omega^2}{18 \eta} \quad (6.1.4.4)$$

of

$$v_{s.c} = \omega^2 \cdot \frac{r}{g} \cdot v_{s.g} \quad (6.1.4.5)$$

met

$v_{s.c}$ = bezinksnelheid onder invloed van een centrifugaalkracht,

$v_{s.g}$ = bezinksnelheid onder invloed van de zwaartekracht.

De verhouding $v_{s.c}/v_{s.g} = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} = \frac{4 \pi^2 \cdot N^2 \cdot r}{g}$ (6.1.4.6)

Daar $\pi^2/g \approx 1$ kan voor vergelijking 6.1.4.6 worden geschreven:

$$v_{s.c}/v_{s.g} \approx 4 \cdot r \cdot N^2 \quad (6.1.4.7)$$

De term $4 \cdot r \cdot N^2$ wordt het kental of g-waarde van een centrifuge genoemd.

Na integratie van vergelijking 6.1.4.4 vinden we de gemiddelde sedimentatietijd:

$$t = \frac{18 \eta}{d^2 \cdot \omega^2 (\rho_s - \rho)} \cdot \ln r_2/r_1 \quad (6.1.4.8)$$

Uit het voorgaande blijkt dat opvoering van het kental van een centrifuge, $4 \cdot r \cdot N^2$, de meest doeltreffende maatregel is om de sedimentatie te versnellen. Theoretisch is hieraan geen grens, zodat men door sedimentatie willekeurig kleine deeltjes kan afscheiden (mits een dichtheidsverschil aanwezig is). Uit constructieve overwegingen kan men het kental niet onbeperkt opvoeren. Bij de meeste klarificatoren ligt het kental tussen 5000 en 20000, bij grote langzaam lopende apparaten lager bij kleine toestellen met zeer hoge toerentallen hoger.

De supercentrifuge van Sharples bijv. met een $r = 2,5$ cm en $N = 800$ omw./s zou men nog een technisch apparaat kunnen noemen; het kental bedraagt daarbij 64.000. Het is met zo'n toestel theoretisch mogelijk micro-organismen af te scheiden.

Voor laboratoriumgebruik zijn ultracentrifuges ontwikkeld (o.a. voor het scheiden van eiwitten van verschillend moleculair gewicht) met kentallen tot 1.000.000.

Het maximale debiet, Q_v (m^3/s), dat in een klarificator toelaatbaar is om een suspensie van deeltjes met een diameter d te ontdoen is:

$$Q = V/t \quad (6.1.4.9)$$

V = vloeistofvolume dat voortdurend in de centrifuge aanwezig is.

$$V = \pi (r_2^2 - r_1^2) \cdot h \cdot (\text{m}^3).$$

t = sedimentatietijd (s).

Het debiet moet zo groot worden gekozen dat een deeltje dat ongunstig is binnengekomen juist de "wand" bereikt ofwel een afstand van $r_2 - r_1$ heeft afgelegd, fig. 6.1.4.1. Dit is de langste weg die een deeltje heeft af te leggen. Om een gemiddelde sedimentatietijd te verkrijgen moest vergelijking 6.1.4.4 worden geïntegreerd tussen de grenzen $r_1 \rightarrow r_2$, waardoor vergelijking 6.1.4.8 ontstond. Met behulp van de vergelijkingen 6.1.4.8 en 6.1.4.9 kan voor de volumestroom, Q_v , de volgende vergelijking worden verkregen:

$$Q_v = \frac{g \cdot d^2 (\rho_s - \rho)}{18 \eta} \cdot \frac{\pi \cdot \omega^2 \cdot h}{g} \cdot \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{\ln r_2/r_1} \quad (6.1.4.10)$$

$$Q_v = v_{s.g} \cdot \dots \cdot \dots$$

$$Q_v \approx v_{s.g} \cdot \dots \cdot r_1(r_1 + r_2) \quad (6.1.4.11)$$

De laatste gelijkheid geldt als $(r_2 - r_1)/r_1$ klein is.

Uit vergelijking 6.1.4.10 blijkt dat de volgende factoren in sterke mate de scheiding beïnvloeden:

- dichtheidsverschil tussen vloeistof en vaste stof,
- viscositeit van de vloeistof,
- deeltjesgrootte.

Ad. a

Uit vergelijking 6.1.4.10 volgt dat het debiet $Q_v \sim (\rho_s - \rho)$.

Indien de dichtheid tussen de twee fasen gelijk is zal er geen scheiding zijn, $Q_v = 0$. In dergelijke gevallen kunnen soms bepaalde maatregelen worden gewonnen om alsnog een scheiding te verkrijgen. De scheiding van bepaalde oliën uit water verloopt bijvoorbeeld bij 20°C slecht daar de dichtheden van beide vloeistoffen bij deze temperatuur nagenoeg gelijk zijn. Door de temperatuur van het meng-

sel te verhogen tot bijv. 80°C blijken de dichtheden van beide vloeistoffen aanzienlijk te gaan verschillen waardoor wel een scheiding te verkrijgen is.

Ad. b

Uit vergelijking 6.1.4.10 volgt dat de toevoer, Q_v , omgekeerd evenredig is met de viscositeit. Een verlaging van de viscositeit vergroot de bezinksnelheid van de deeltjes. Dit is o.a belangrijk bij het reinigen van oliën. Door de temperatuur te gaan verhogen kan in sommige gevallen de viscositeit met een factor 10 afnemen waardoor een betere scheiding wordt verkregen.

Ad. c.

Het debiet, Q_v , is rechtevenredig met d^2 . Als bijv. de diameter van het deeltje met de helft wordt verkleind moet het debiet met een factor vier worden verkleind om dezelfde scheiding te verkrijgen. Om een zo groot mogelijke capaciteit van de centrifuge te verkrijgen met een goede scheiding zal men de deeltjes moeten vergroten. Hiertoe staan ons vele hulpmiddelen ter beschikking zoals bijv. flocculatie door middel van chemicaliën.

Andere factoren die de scheiding beïnvloeden zijn de vorm van de deeltjes en o.a. de deeltjesgrootteverdeling.

In de levensmiddelenindustrie komen we veel centrifuges tegen met conische schijven. Deze schijven worden in de vorm van schotels in het inwendige van de trommel aangebracht, fig. 6.1.4.2. De schotels hebben een dikte van van 0,5 à 0,75 mm, en de onderlinge afstand tussen de schotels bedraagt 0,4 tot 2 mm. Deze afstand hangt af van de te verwerken vloeistof en de consistentie van de af te scheiden vaste stof. Iedere ruimte tussen de twee schotels kan als een afzonderlijke scheidingsruimte worden gezien. Door het grote aantal van deze parallel geschakelde ruimten wordt de vloeistof, die centraal via een verdeler in de trommel komt, in een groot aantal dunne lagen gesplitst. De sedimentatieweg van een deeltje wordt daardoor klein gemaakt waardoor reeds bij een relatief laag toerental een snelle scheiding wordt verkregen. Voor deze centrifuge, die vaak schotelcentrifuge wordt genoemd, kan eveneens een vergelijking van de capaciteit, Q_v (m^3/s), het maximale toepasbare debiet, worden afgeleid.

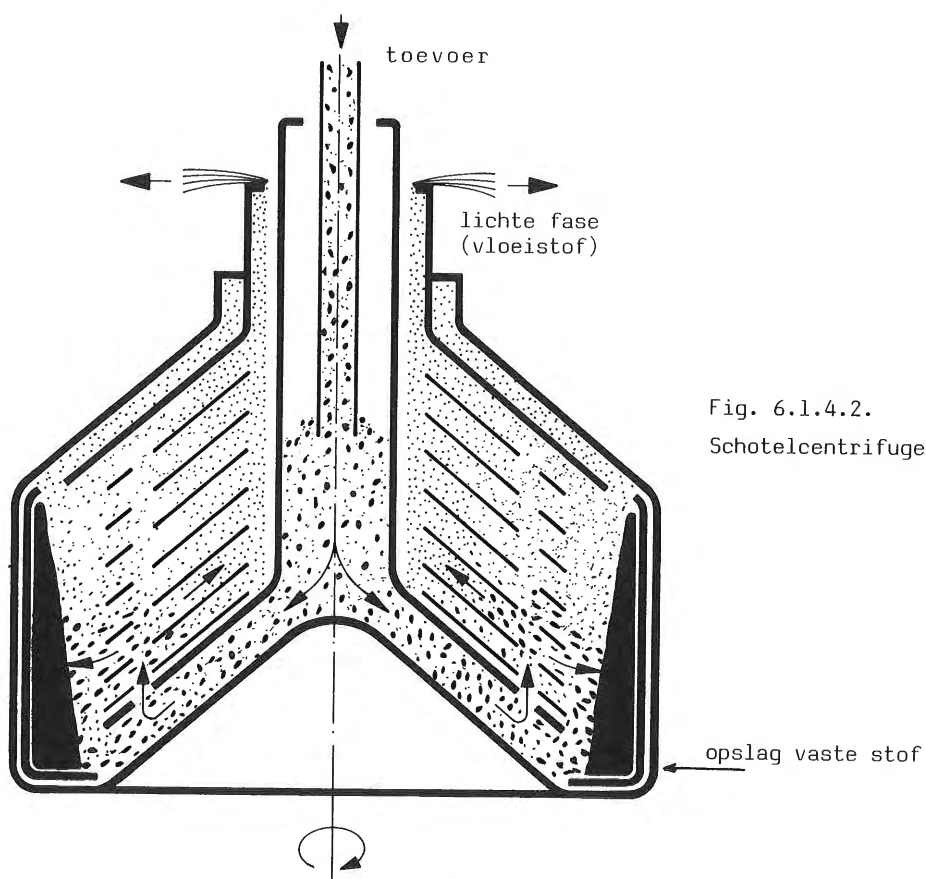


Fig. 6.1.4.2.
Schotelcentrifuge.

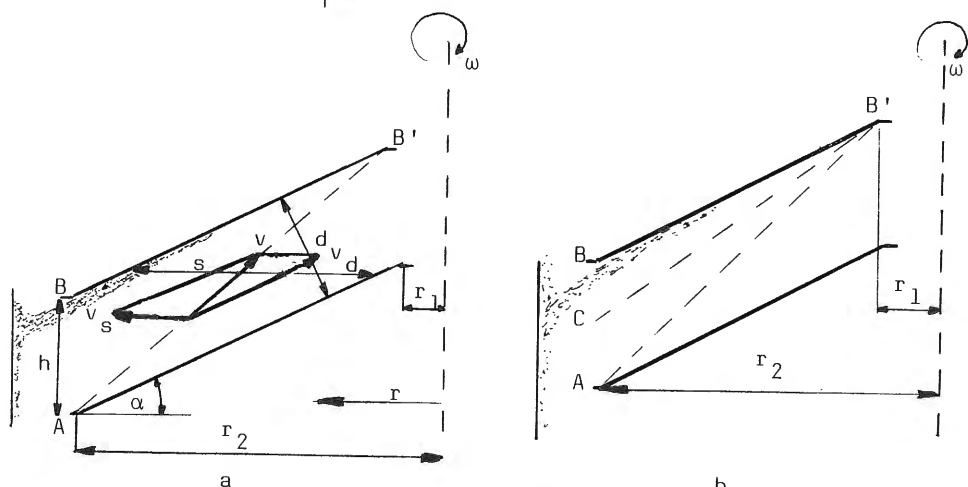


Fig. 6.1.4.3. Baan van deeltjes met
diameter d_c door een scheidingskanaal.

Baan van een deeltje met diameter d_c
en kleiner dan d_c .

Bij het afleiden van de formule wordt het volgende aangenomen.

- De deeltjes of druppeltjes vallen in het gebied van Stokes.
- Het versnellingsgedeelte kan worden verwaarloosd.
- De stroming tussen de schotels is een propstroom.
- De randeffecten bij A en B kunnen worden verwaarloosd.

Tussen de schotels vindt een afscheiding van alle deeltjes plaats indien wordt aangenomen dat het zgn. "capaciteit bepalende deeltje", diameter d_c , start op de meest ongunstige plaats, punt A, en bij punt B' juist niet wordt afgescheiden, fig.6.1.4.3.

Alle deeltjes die groter zijn dan het deeltje met diameter d_c worden volledig afgescheiden. Deeltjes met een kleinere diameter dan d_c kunnen nog worden afgescheiden indien ze een gunstiger start hebben die ligt tussen A en B, fig. 6.1.4.3 b. De deeltjes of druppeltjes worden tegen de bovenste scheidingswand afgezet indien de dichtheid ervan groter is dan de dichtheid van de vloeistof, $\rho_s > \rho_f$. Wanneer $\rho_s < \rho_f$ vindt een afzetting van de deeltjes of druppeltjes aan de onderste scheidingswand plaats. Als een laag glijden de uitgeslingerde deeltjes of druppeltjes langs de bovenste of de onderste scheidingswand naar respectievelijk de slibruimte of naar boven naar de as.

Op een plaats tussen de schotels ondervindt een deeltje twee krachten, fig. 6.1.4.3 a.

1. Een sleepkracht die het deeltje ondervindt van de vloeistof die door de scheidingsruimte stroomt. In de stationaire toestand ondervindt het deeltje een snelheid evenwijdig aan de scheidingswand. We nemen aan dat deze snelheidscomponent gelijk is aan de vloeistofsnelheid zodat:

$$v_d = \frac{Q}{2\pi r d n} \quad (6.1.4.12)$$

n = aantal scheidingskanalen; d = afstand tussen de schotels.

2. Een centrifugaalkracht die in evenwicht is met de wrijvingskracht die het deeltje ondervindt. Het deeltje krijgt een snelheid in horizontale richting, v_s .

$$v_s = \frac{d^2(\rho_s - \rho_f) \cdot \omega^2 \cdot r}{18 \eta} \quad (6.1.4.13)$$

De werkelijke snelheid, v , is de resultante van de snelheidsvectoren v_d en v_s .

Het deeltje moet maximaal een afstand s afleggen. Gedurende een tijd dt is de afgelegde weg ds zodat: $ds = v_s \cdot dt$.

Gedurende de tijd dt stroomt er door een ringvormige spleet met een dikte dr :

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot h \cdot n \text{ of}$$

$$Q_v \cdot dt = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot h \cdot n \quad \text{----->}$$

$$dt = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot h \cdot n}{Q_v} \quad (6.1.4.14)$$

Uit de vergelijkingen 6.1.4.13 en 6.1.4.14 volgt:

$$ds = v_s \cdot dt = \frac{d^2(\rho_s - \rho) \cdot \omega^2 \cdot r}{18 \eta} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot h \cdot n}{Q_v}$$

of

$$\int_0^s ds = \frac{d^2(\rho_s - \rho) \cdot \omega^2 \cdot 2 \pi \cdot h \cdot n}{18 \eta \cdot Q_v} \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr$$

Integratie geeft:

$$s = \frac{d^2(\rho_s - \rho) \cdot \omega^2 \cdot 2 \pi \cdot h \cdot n}{Q_v \cdot 18 \eta} \cdot \frac{1}{3} \cdot (r_2^3 - r_1^3) \quad (6.1.4.15)$$

Daar $\frac{h}{s} = \tan \alpha$ wordt de volumestroom, Q_v , volgens vergelijking 6.1.4.15:

$$Q_v = \frac{g \cdot d^2(\rho_s - \rho)}{18 s \eta} \cdot \frac{\pi \cdot \omega^2 \cdot n}{g} \cdot \frac{2}{3} \cdot (r_2^3 - r_1^3) \cdot \tan \alpha \quad (6.1.4.16)$$

$$= v_{sg} \cdot \quad , , \quad , , \quad \cdot \tan \alpha \quad (6.1.4.17)$$

Uit vergelijking 6.1.4.15 volgt dat bij een platencentrifuge dezelfde factoren de scheiding beïnvloeden als bij een trommelcentrifuge.

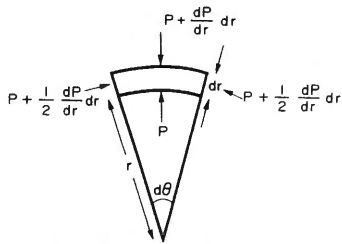
De druk op de trommelwand.

Wanneer een vloeistof wordt geroteerd ontstaat er een drukgradiënt in radiale richting tengevolge van een centrifugáalkracht, die op elk volumeelementje werkt.

Bij het afleiden van een formule, waarmee de druk op een trommelwand kan worden berekend, wordt aangenomen dat bij een constante hoeksnelheid, ω , er geen slip is tussen de trommelwand en de

vloeistof. De trommel heeft een straal R.

We gaan uit van een vloeistof element met een hoogte dy in axi-



ale richting met een inwendige straal r en een uitwendige straal r + dr. Het element maakt een hoek dθ met het centrum van de as, fig. 6.1.4.4.

Het element heeft een massa van:

Fig. 6.1.4.4. Druk in een centrifuge.

$(rd\theta)(dy)(dr) \cdot \rho$

De uitgeoefende centrifugaalkracht is: $((rd\theta)(dy)(dr) \cdot \rho) r \omega^2$ of

$$: \rho \omega^2 r^2 d\theta dy dr$$

Is de druk op een afstand r van het midden P en op een afstand r + dr van het midden $P + (dP/dr) \cdot dr$ dan is de gemiddelde druk op de zijdelingse grensvlakken van het element:

$$P + \frac{1}{2} \frac{dP}{dr} \cdot dr, \text{ fig 6.1.4.4.}$$

De krachten die op het element werken worden veroorzaakt door de drukken die op het element werken. De som van deze krachten is:

$$P(r d\theta dy) - (P + \frac{dP}{dr} \cdot dr)((r+dr)d\theta dy) + 2(P + \frac{1}{2} \frac{dP}{dr} \cdot dr)dr dy \sin \frac{1}{2}d\theta = - \frac{dP}{dr} \cdot dr \cdot r d\theta dy$$

Deze krachten zijn in stationaire toestand in evenwicht met de centrifugaal krachten zodat:

$$- \frac{dP}{dr} \cdot dr \cdot r d\theta dy = \rho \omega^2 r^2 d\theta dy dr \quad (6.1.4.18)$$

of

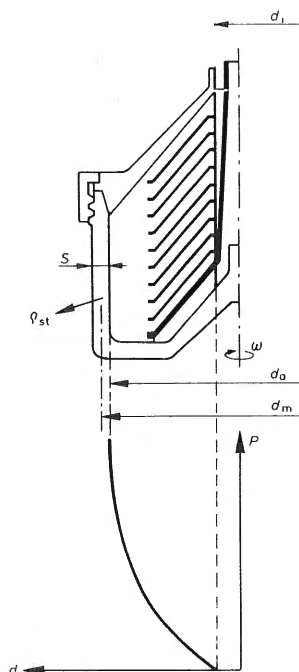
$$\frac{dP}{dr} = \rho \omega^2 \cdot r \quad (6.1.4.19)$$

Daar op een afstand r_1 de druk op de vloeistof tengevolge van de centrifugaalkracht nul is kan de druk op de trommelwand, straal R, worden verkregen door integratie van vergelijking 6.1.4.19.

$$P = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (R^2 - r_1^2) \quad (6.1.4.20)$$

Uit deze vergelijking volgt dat het toerental, de straal van de trommel, de dichtheid van de vloeistof en de stand van de vloeistof

stof in de trommel bepalend zijn voor de druk die de vloeistof op wand uitoefent. Fig. 6.1.4.5 toont het verloop van de vloeistofdruk in de trommel.



Bij continu werkende centrifuges, zoals bij schotelcentrifuges, kan de vloeistofdruk gebruikt worden voor het transport van deze vloeistof naar bijv. een opslag-tank. Een centrifuge kan in feite dienst doen als pomp.

Fig. 6.1.4.5. Vloeistofdruk op de trommelmantel.

Vergrotingsregels voor centrifuges.

De vergelijkingen 6.1.4.11 en 6.1.4.17 worden vaak als volgt geschreven:

$$Q_v = v_{s.g} \cdot \sum \quad (6.1.4.21)$$

$\sum$ = karakteristiek voor een centrifuge en geeft in feite het oppervlak weer van een bezinkingstank met dezelfde bezinkingseigenschappen als van een centrifuge.

Indien men een centrifuge moet kiezen, bijv. door proeven met een laboratoriumcentrifuge, dan is volgens vergelijking 6.1.4.21 de werking van de te kiezen centrifuge gelijk aan de laboratoriumcentrifuge indien $Q_v / \sum$ voor beide apparaten hetzelfde is. Dit criterium moet met de nodige voorzichtheid worden gehanteerd, vooral wanneer het verschillende typen centrifuges betreft en/of wanneer de centrifugaalkracht onderling meer verschilt dan een factor 2.

Bij het onderling vergelijken van verschillende centrifuges moeten

de berekende $\sum$ waarden vaak worden gecorrigeerd met een zgn. rendementsfactor, E, ofwel:

$$\frac{Q_{v1}}{\sum} \cdot E_1 = \frac{Q_{v2}}{\sum} \cdot E_2 = \text{enz.}$$

Voor trommelcentrifuges geldt een rendementsfactor van ca. 90% en voor schotelcentrifuges ca. 55%. Voor decanteercentrifuges, zie pag. 219, kunnen deze waarden sterk uiteenlopen, afhankelijk van de gevormde slurry en de mate waarin de slurry in de centrifuge kan worden getransporteerd.

Enkele $\sum$ -waarden en vergrotingsfactoren zijn voor drie verschillen- de centrifuges in tabel 6.1.4.1 weergegeven.

Tabel 6.1.4.1.

type centrifuge	inwendige diameter m.10 ⁻²	diameter schotel/ aantal m. 10 ⁻²	toerental r.p.m.	$\sum$ -waarden berekend-praktijk m ² . 10 ²		aanbevolen * vergrotings- factoren
trommel (lengte)	4,5		23000	3,0	3,0	1
„ (0,18 m)	4,5		23000	2,9	1,2	0,4 ***
„	4,5		10000	5,4	5,4	
„ (0,74 m)	10,5		15000	25,3	25,3	21,0
„	12,5		15000	39,0	39,0	33,0
schotel		10,4/33	10000	10,2		1,0
„		24,1/107	6500	199,7		15,0
„		31,5/98	6250	394,8		30,0
„		34,8/132	4650	365,1		25,0
„		49,5/144	4240	975,5		73,0
decanter	15,2		6000	2,51		1,0
„	35,6**		4000	12,45		5,0
„	35,6		4000	27,87		10,0
konisch (0,58 m)	35,6-20,3		3250	4,46	2,79	
cilindr.(0,58 m)	35,6		3250	8,27	5,57	
decanter	50,8		3350	37,2		13,3
„	63,5**		3000	56,7		22,0
„	63,5		2700	79,9		31,0

* De vergrotingsfactoren zijn relatieve waarden die gelden voor een bepaald type centrifuge, met verschillende afmetingen.

** Relatief lange decanter.

***Capaciteit kleiner dan $1,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (100 ml/min.)

Technische uitvoering van centrifuges.

Bij de technische uitvoering van centrifuges kan onderscheid worden gemaakt tussen periodiek en continu werkende apparaten. De eerste moeten worden gestopt en leeg gemaakt wanneer ze vol zitten met sediment. Bij continu werkende wordt de vaste stof voortdurend afgevoerd. In fig. 6.1.4.6 zijn de belangrijkste typen centrifuges weergegeven nl. a. de buizen- (trommelcentrifuge), b. de kamer- en c. de schotelklarificator.

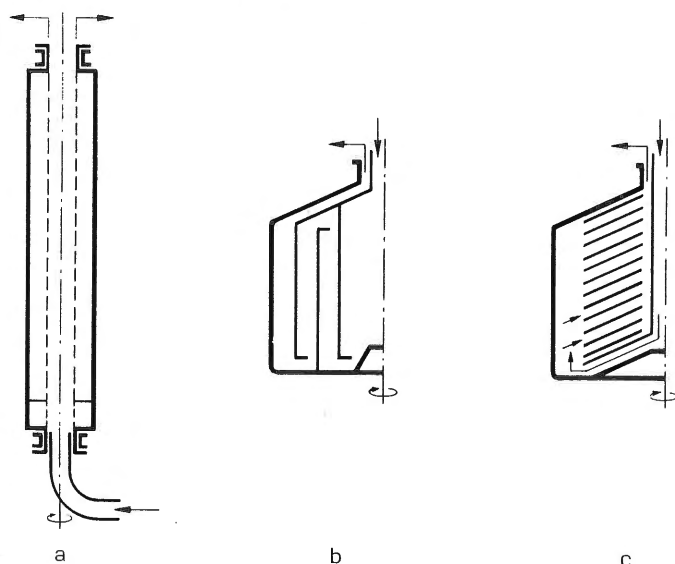


Fig. 6.1.4.6. Basisconstructie van buizen-, kamer- en schotelklarificator.

Ad. a.

De buizencentrifuge bestaat uit een slanke cilindervormige trommel. Deze centrifuge heeft een hoge g-waarde, een geringe capaciteit en werkt periodiek bij aanwezigheid van vaste stof in de vloeistof. De centrifuge wordt voor verschillende doeleinde gebruikt, bijvoorbeeld het klaren van wijn, soepen, vetten, vruchtensappen, het ontwateren van oliën en vetten, enz. Zie fig. 6.1.4.7.

De te verwerken vloeistof, die mag bestaan uit twee niet mengbare vloeistoffen met een geringe hoeveelheid vaste stof, wordt van onderen aan de trommel toegevoegd via een nozzle. Radiaal staande platen brengen de vloeistof in korte tijd op de hoeksnelheid van de trommel. De zware fase verzamelt zich aan de trommelwand, de lichte fase vormt een concentrische ring aan de binnen-

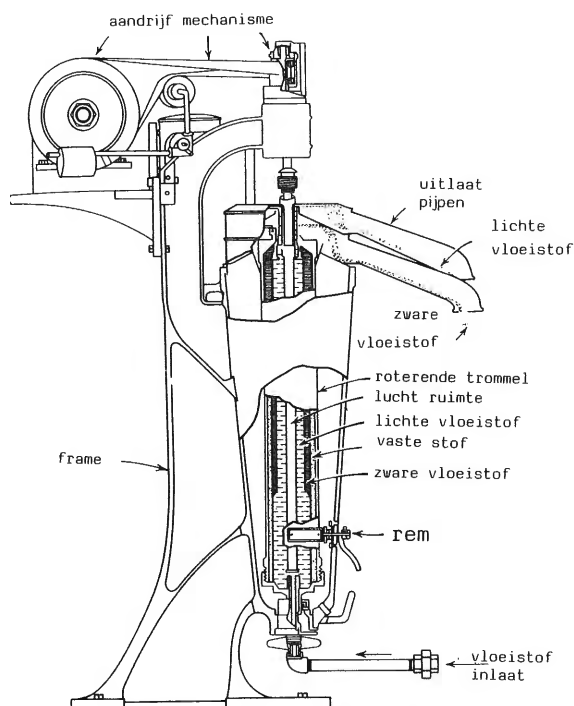


Fig. 6.1.4.7. Doorsnee van een trommel-centrifuge.

Ad. b.

In fig. 6.1.4.8 is een periodiek werkende klarificator weergege-

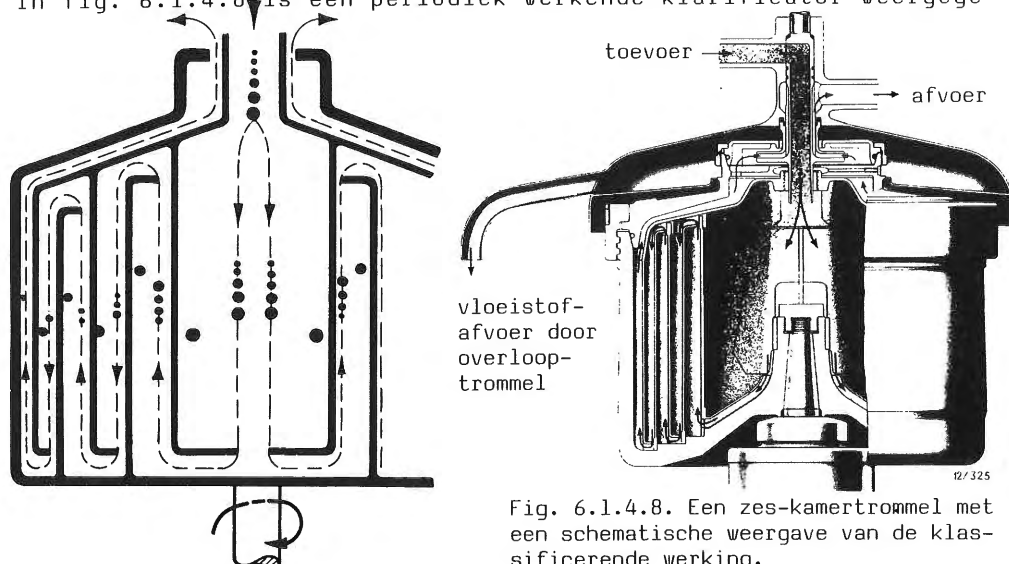


Fig. 6.1.4.8. Een zes-kamertrommel met een schematische weergave van de klassificerende werking.

kant van de zware fase.

De twee vloeistoflagen verlaten de trommel via overloopstuwringen. De maximale buitendiameter van de lagen is afhankelijk van de diameter van de stuwringen.

Er is geen voorziening voor het continu verwijderen van de vaste stof. Indien er in de vloeistof vaste stof aanwezig is zal deze zich aan de wand afzetten indien de dichtheid van de vaste stof hoger is dan van de vloeistoffen. De vaste stof kan worden verwijderd nadat de centrifuge is stil gezet. Het apparaat is eenvoudig te demonteren en te reinigen.

geven met een grote cilindervormige trommel. Deze trommel is on-
derverdeeld met het doel de sedimentatie afstand te verkorten en
de weg die de suspensie aflegt te vergroten. De inhoud van de
trommel is groot, zodat deze klarificator wordt gekozen wanneer
het gaat om grote hoeveelheden vaste stof. De vloeistof stroomt
in de klarificator van binnen naar buiten door de kamers. Het
toerental is in vergelijking met de buizencentrifuge laag. Het be-
zinkingstraject is ten opzichte van de buizencentrifuge daarin-
tegen zeer groot, waardoor een goede scheiding wordt verkregen.
Iedere kamer afzonderlijk werkt in principe als een kamer van een
buzizencentrifuge. De scheiding vindt slechts plaats in de dunne,
axiaal stromende cilindrische laag. De laagdikte wordt van kamer
tot kamer kleiner, hoe verder men van het centrum van de trommel
verwijderd raakt. In de binnenste kamer is de laagdikte het grootst
en in de buitenste het kleinst. Daardoor wordt ook de effectieve
bezinkingsweg langzamerhand kleiner. Daar bovendien het werkende
centrifugaalveld van kamer tot kamer toeneemt, zal bij een bepaald
dichtheidsverschil en bij een bepaalde viscositeit van het produkt
in de centrale kamer, de afscheiding van grovere deeltjes plaats-
vinden, terwijl naar buiten toe steeds kleinere vaste deeltjes wor-
den afgescheiden. De kamertrommel heeft een zekere klassificeren-
de werking, fig. 6.1.4.8. De voordelen van deze klarificator zijn:
- groot slibvolume. Vloeistoffen met een betrekkelijk hoog gehalte
aan vaste stof kunnen worden verwerkt.

De nadelen zijn:

- het apparaat kan alleen als klaarder voor het afscheiden van
vaste stof uit een vloeistof worden gebruikt.
- voor het reinigen heeft men meer tijd nodig dan bij bijv. een
buzizencentrifuge, daar de kamers afzonderlijk gereinigd moeten
worden.

Ad. c.

De schotelcentrifuges kunnen we onderscheiden in:

- periodiek werkende en
- continu werkende centrifuges.

De periodiek werkende schotelcentrifuges.

In fig. 6.1.4.9 vinden we een doorsnee van een periodiek (discon-
tinu) werkende klarificator met conische schijven (schotels).

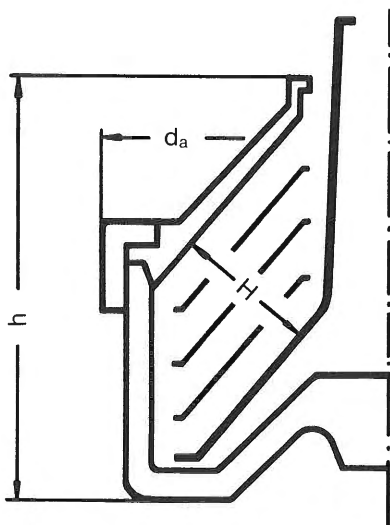


Fig. 6.1.4.9. Doorsnee periodiek werkende klarificator.

Tussen twee schotels vindt men een conische ringvormige ruimte. Bij een gelijkmatige verdeling van de toegevoegde vloeistof per tijdseenheid, Q_v , vloeit door elke ruimte een hoeveelheid van Q_v/n , met n het aantal scheidingsruimten. Indien de vloeistof vaste deeltjes bevat zullen de deeltjes als een laag langs de bovenste scheidingswand glijden, indien de dichtheid van de deeltjes groter is dan die van de vloeistof. De uitgeslingerde deeltjes worden continu naar de slibruimte van de trommel gevoerd. De geklaarde vloeistof stroomt naar binnen en verlaat het schotelpakket via de binnenrand, fig. 6.1.4.3.

Bij periodiek werkende klarificatoren moet men het apparaat stilzetten als de slibruimte met vaste stof gevuld is en daarna ledigen.

Uit vergelijking 6.1.4.17 blijkt dat de klarings- en scheidingswerking van de schotelcentrifuge stijgt als het toerental, de buitendiameter van de schotels, de schotelhoek en het aantal schotels groter worden. Deze grootheden kunnen niet onbeperkt worden vergroot. De toelaatbare spanning van het trommelmateriaal begrenst o.a. het toerental en de buitendiameter van de trommel. De buitendiameter van de schotels wordt bij een bepaalde trommeldiameter in belangrijke mate bepaald door de noodzakelijke grootte van de slibruimte in de trommel.

De grootte van de schotelhoek wordt door de glijhoek van het afgeslingerde sediment in het centrifugaalveld begrensd.

Het aantal schotels hangt in de eerste plaats af van de hoogte H , fig. 6.1.4.9., van het schotelpakket, dat constructief kan worden ondergebracht. Men kan bij discontinu werkende klarificatoren de hoogte H van het schotelpakket niet willekeurig vergroten, daar vanwege een goede balancerings en een goede loop de verhouding

tussen trommeldiameter en trommelhoogte niet belangrijk beneden de 1 mag komen.

De schotelafstand en daardoor het aantal schotels hangt o.a. af van de concentratie aan vaste stof in de vloeistof, de deeltjes grootte en de consistentie van de vaste stof (slurry). De afstand moet zo worden gekozen dat de schotels niet verstoppem.

De periodiek werkende klarificator wordt vooral voor klaringsdoeleinden gebruikt. Onder klaring wordt verstaan het afscheiden van een vaste stof uit een vloeistof, suspensie.

Continu werkende klarificatoren. (vloeistof/vloeistof/vast).

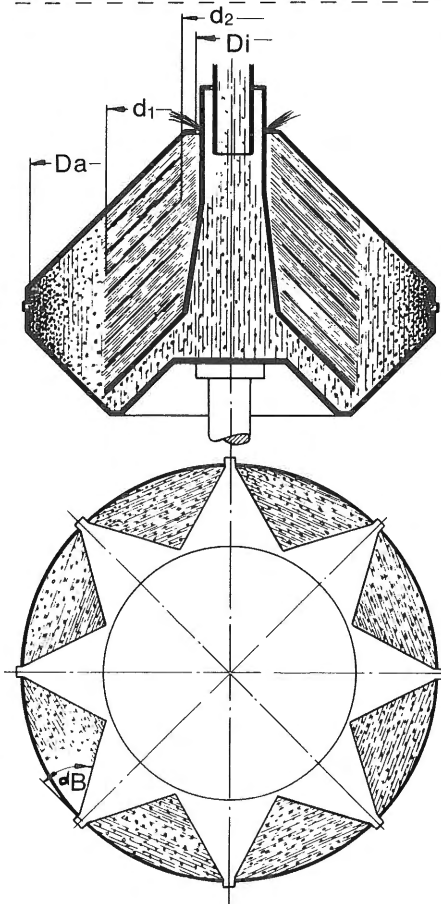
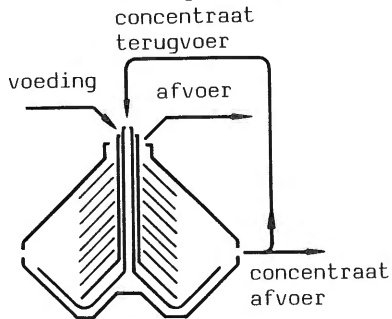


Fig. 6.1.4.10. Schottelcentrifuge met slibspuinozzles. Onderste tekening geeft een doorsnede weer van de trommel op de hoogte van de nozzles.

Continu werkende klarificatoren met schotels verschillen van de discontinue daardoor dat de vaste stof in de vorm van een geconcentreerde suspensie continu wordt afgevoerd bijv. door middel van nozzles; de centrifuge behoeft niet te stoppen, fig. 6.1.4.10. De binnenwanden van de trommel zijn dubbel conisch uitgevoerd. Het aantal nozzles hangt af van de trommelafmetingen en glijhoek van het sediment. Voordat de afvoer van het sediment begint, worden tegen de nozzles slibmassa's opgebouwd. De nozzles hebben een zodanig verloop dat een natuurlijke glijhoek wordt verkregen, waarlangs het slib naar de nozzles wordt afgevoerd. De vaste stof komt met een deel van de vloeistof, door de nozzles, naar buiten. De plaats van de nozzles kan uiteenlopen. De uitstroming van het slib geschiedt onder invloed van de voor de nozzles heersende vloeistofdruk. Uit deze druk en de diameter van de nozzles kan de doorstroomsnelheid worden berekend. Het gebruik van nozzles is

één van de vele mogelijkheden om het sediment continu af te voeren. Schotelcentrifuges met nozzles worden als klarings- scheidings- centrifuges gebruikt in de gistindustrie, zetmeelindustrie, bij de glucosebereiding enz.

Voor een goede werking is een bepaalde vaste stof gehalte van de vloeistof nodig. De maximale indikking bedraagt ca. 1:20.



Het sediment kan zonodig worden gewassen. Dit kan o.a. plaatsvinden door een gedeelte van het sediment te recirculeren, fig. 6.1.4.11, of door aan de onderkant wasvloeistof toe te voegen.

Fig. 6.1.4.11. Principe van wassen door middel van recircualtie.

Naast genoemde klarificatoren zijn er verschillende andere die met gesloten trommel continu werken. Hiertoe behoren o.a de decaners. Een decanter is een horizontaal gelagerde wormcentrifuge met een gesloten mantel, fig. 6.1.4.12. Een decanter is speciaal geschikt voor de afscheiding van vaste stof uit suspensies, waarbij de deeltjesgrootte en de hoeveelheid vaste stof in de suspensie, max. 60%, kunnen variëren.

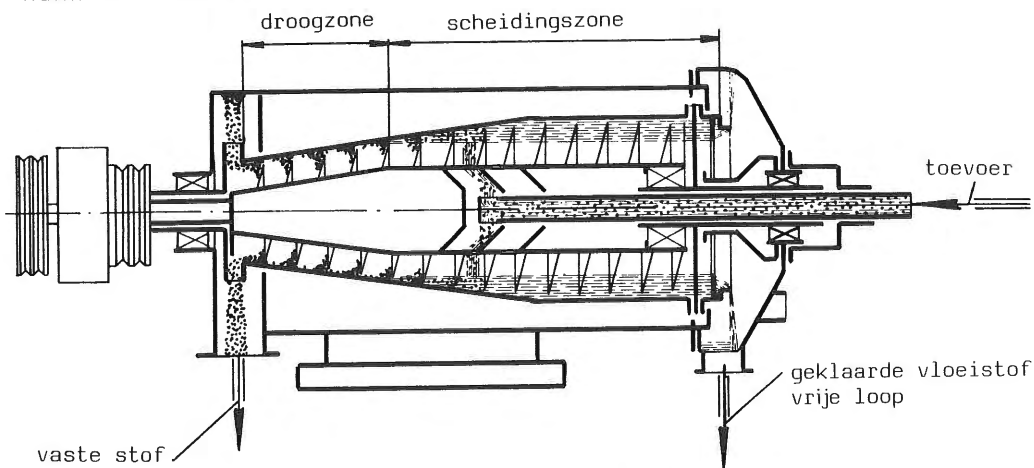


Fig. 6.1.4.12. Decanter met open afvoer van de geklaarde vloeistof.

De te verwerken vloeistof wordt door een centraal gemonteerde, verstelbare inlooppijp in een van de verschillende loopkamers gevoerd. Door openingen komt de vloeistof in de eigenlijke trommel-

ruimte. Door de centrifugaalkracht worden de deeltjes tegen de trommelwand geslingerd. Een worm, die met een iets lager of iets hoger toerental dan dat van de trommel roteert, transporteert de afgescheiden vaste stof continu uit de trommel naar buiten. De vaste stof wordt zonder hulpmiddel of met een pomp verwijderd. De vloeistof bevat bij afvoer in het algemeen ca. 10% vaste stof bij normale capaciteiten. Dit gehalte kan worden teruggebracht door de capaciteit van de decanter te verminderen. De vloeistof stroomt tussen de flanken van de worm tegengesteld aan de transportrichting van de vaste stof naar het gedeelte van de trommel met de grootste diameter. De geklaarde vloeistof verlaat via een stuw de separatiekamer. Bij gesloten machines wordt de vloeistof onder druk afgevoerd, fig. 6.1.4.13. Bij een open machine wordt de vloeistof in een opvangkamer verzameld en stroomt vervolgens naar buiten.

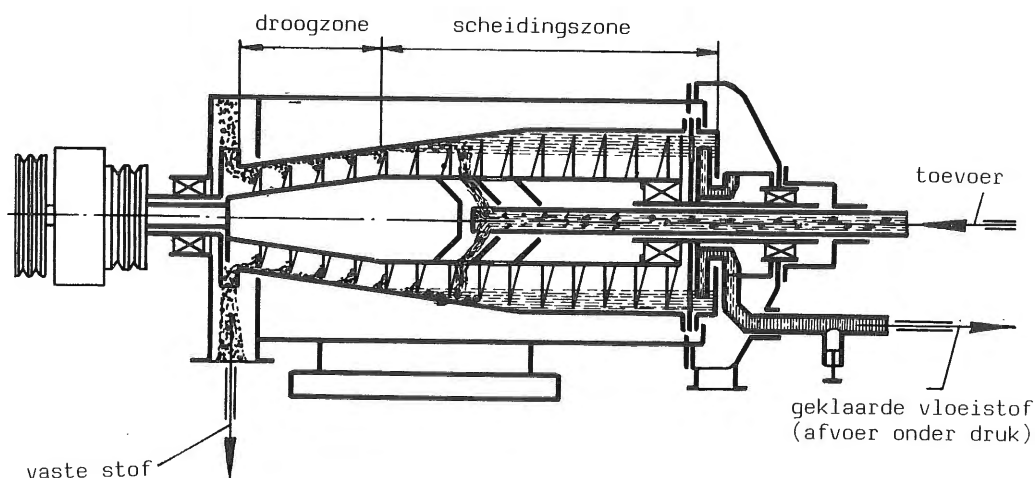


Fig. 6.1.4.13. Decanter met pompafvoer van de geklaarde vloeistof.

Het gedeelte van de trommel dat niet meer met vloeistof bedekt wordt, heet droogzone. Hier vindt ontwatering van de vaste stof plaats. Het gedeelte van de trommel dat met vloeistof is bedekt, heet scheidingszone. Hier vindt de klaring van de vloeistof plaats. In de scheidingszone wordt de hoogste centrifugaalkracht ontwikkeld.

Men kent verschillende trommelvormen: de conische trommel, de cilindrisch-conische trommel en de cilindrische trommel.

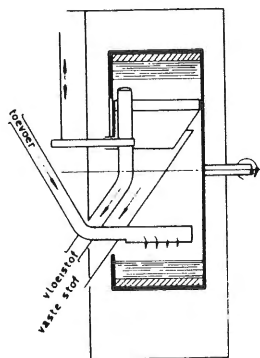
De conische trommel wordt toegepast, als het restvochtgehalte van de afgescheiden vaste stof zo klein mogelijk moet zijn. Men doet echter concessies aan de vloeistofkant wat betreft de klaring. De cilindrisch-conische trommel past men toe, als men naast een goede klaring een redelijk laag vochtgehalte wenst van de afgescheiden vaste stof.

De cilindrische trommel wordt voornamelijk gebruikt, als de geklaarde vloeistof zo helder mogelijk moet zijn. Aan het vochtgehalte van de droge stof kunnen minder hoge eisen worden gesteld, het vochtgehalte is relatief hoog.

Bij decaners met een cilindrisch-conische trommel kunnen zowel een gering vochtgehalte van de droge stof als een goede klaring worden verkregen. Zonder ombouw en grote veranderingen van de decanter kan men de weg van de droogzone, door het verwisselen van een overloopstuw, zo verlengen dat een goede droging wordt verkregen. Aan de andere kant kan men de klaringszone zo uitbreiden dat een goede helderheid van de vloeistof wordt bereikt.

De decaners hebben een kental, g-waarde, dat varieert van 2000-5000. De deeltjesgrootte in de voeding kan uitlopen van 2 micron tot 20 mm en het vaste-stofgehalte van 2 - 40 %. Ze worden o.a toegepast bij de bereiding van melksuiker, zetmeel en in de afvalwaterzuivering.

Een overgangsvorm tussen een periodiek werkende klarificator en een decanter is de machine afgebeeld in fig. 6.1.4.14.



Bij deze machine blijft de trommel steeds doorlopen, terwijl de verschillende bewerkingen achter elkaar, periodiek, plaatsvinden. Deze bewerkingen zijn:

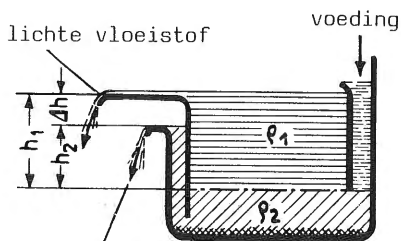
- vullen met suspensie,
- bezinken,
- afschillen van de heldere vloeistof met de schilpijp,
- het verwijderen van de vaste stof met een schilmes.

Fig. 6.1.4.14. Trommelcentrifuge met schilpijp en schilmes. Het geheel gebeurt automatisch. Dit type centrifuge is geschikt voor betrekkelijk langzaam bezinkende deeltjes. De machine wordt o.a toegepast in

de zetmeelindustrie.

Het scheiden van twee vloeistoffen, met of zonder gelijktijdige scheiding van een vaste stof.

Nemen we een bezinktank waaraan continu twee niet mengbare vloeistoffen worden toegevoegd dan scheiden deze vloeistoffen zich in lichtere en zwaardere component. Indien de vloeistoffen verontreinigd zijn met vaste stof dan zal deze vaste stof zich afscheiden als de vaste stof zwaarder is dan de zwaarste vloeistof component, fig. 6.1.4.15. Tussen de twee vloeistoffen vormt zich een schei-



zware vloeistof

Fig. 6.1.4.15. Bezinktank.

dingslijn. Indien het systeem stationair is heerst er een hydrosta-tisch evenwicht tussen de lichte en zware component of:

$$h_1 \cdot \rho_1 \cdot g = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \quad (6.1.4.21)$$

Dit betekent dat de overloophoog-te omgekeerd evenredig is met de dichtheden van de vloeistofcompo-nenten.

Deze bezinktank wordt een centrifugaalafscheider indien men hem om een as laat draaien. Voor deze centrifugaalafscheider gelden dezelfde kenmerken als voor de bezinktank.

Wanneer een mengsel van twee niet mengbare vloeistoffen aan een centrifuge worden toegevoegd zal de vloeistof met de hoogste dichtheid zich verzamelen tegen de trommelwand en de vloeistof met de laagste dichtheid meer naar het centrum van de trommel

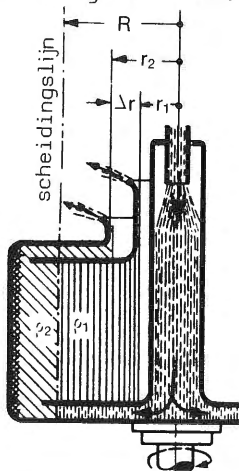


fig. 6.1.4.16. Een vaste stof zal, indien zwaarder dan de zwaarste vloeistof, zich aan de trommelwand afscheiden.

Wanneer we ervan uit gaan dat de vloeistoffen met dezelfde snelheid roteren als de trommel, slip en wrijving zijn te verwaarlozen, dan zal de drukval, tengevolge van centrifugale krachten, tussen R en r_2 gelijk zijn aan de drukval tussen R en r_1 . Wanneer dit niet het geval zou

Fig. 6.1.4.16. Een eenvoudige vorm van een centrifugaal afscheider.

zijn dan zou de neutrale zone, met straal R, niet stabiel kunnen zijn.

Vergelijking 6.1.4.20 toegepast op fig. 6.1.4.16 geeft:

$$\Delta P_{R-r_2} = \frac{\omega^2 \cdot \rho_2}{2} (R^2 - r_2^2)$$

$$\Delta P_{R-r_1} = \frac{\omega^2 \cdot \rho_1}{2} (R^2 - r_1^2)$$

Wanneer de neutrale zone stabiel is zullen de drukken zich omgekeerd evenredig verhouden met de soortelijke massa's. Voor de beide vloeistofcomponenten geldt nu de volgende vergelijking:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = Z = \frac{(R^2 - r_1^2)}{(R^2 - r_2^2)} \quad (6.1.4.22)$$

$$\text{of} \\ R = \sqrt{\frac{r_1^2 - Z \cdot r_2^2}{1 - Z}} \quad (6.1.4.23)$$

$$\text{of} \\ r_2 = \sqrt{\frac{R^2(Z-1) + r_1^2}{Z}} \quad (6.1.4.24)$$

$$\text{of} \\ d_2 = \sqrt{\frac{D^2(Z-1) + d_1^2}{Z}} \quad (6.1.4.25)$$

Zie figuur 6.1.4.17 voor vergelijking 6.1.4.25.

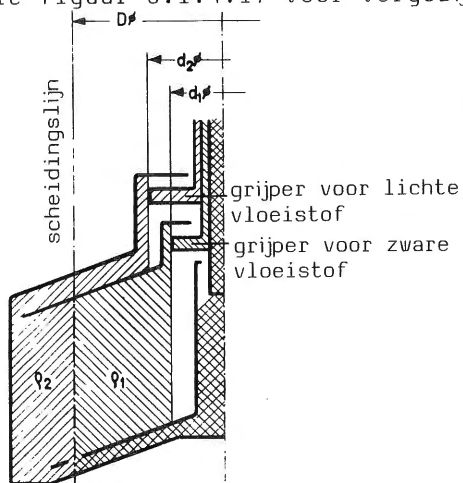


Fig. 6.1.4.17. Schotelcentrifuge met de positie van de scheidingslijn.

ρ_1 = dichtheid lichte vloeistof-component (kg/m^3).

ρ_2 = dichtheid zware vloeistof-component (kg/m^3).

Uit vergelijking 6.1.4.22 volgt dat de neutrale zone theoretisch afhangt van de uitloop van de twee vloeistoffen en de dichtheden van de vloeistoffen. Bij de meeste centrifuges ligt de uittrede van de lichte component vast. Het instellen van de scheidingslijn moet dan gebeuren door het regelen van de uitloopstuw van de zware component.

In fig. 6.1.4.18 wordt schematisch een schotelcentrifuge weergegeven die zowel voor klaring als voor scheidingsdoeleinden, van twee vloeistoffen al of niet met vaste stof, kan worden gebruikt. De te verwerken vloeistof komt centraal via een verdeler

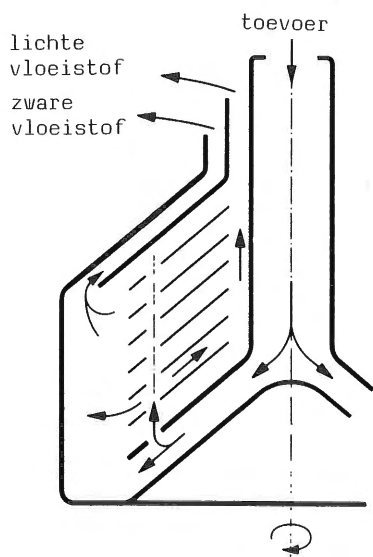


Fig. 6.1.4.18. Separator.

binnen. Deze verdeler heeft radiale ribben om de vloeistof op de hoeksnelheid van de trommel te brengen. Bij de scheidingstrommel zijn stijgkanalen aanwezig, van waaruit verdeling over de ruimten tussen de schotels plaatsvindt. Het totaal van deze ruimten wordt de separatieluimte genoemd. De stijgkanalen zijn loodrechte kanalen, die door boven elkaar liggende gaten worden gevormd. De afgescheiden zware component stroomt over een buitenste ringvormige stuw uit de trommel; de afgescheiden lichte component verlaat de trommel via een binnenvormige ringvormige stuwrand.

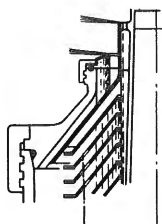
De vaste sedimentdeeltjes worden in de slijbruimte van de trommel geslingerd, zie fig. 6.1.4.10. Door het sluiten van de stijgkanalen en de afvoer van de zware component, wordt de scheidingstrommel in een klaringstrommel omgezet. De te verwerken vloeistof stroomt dan van buitenaf in het schotelpakket en verlaat de trommel aan de binnenzijde.

Het instellen van de regelschijf en de plaats van de stijgkanalen.

De regelschijf of uitloopstuw kan globaal worden ingesteld door berekening met behulp van vergelijking 6.1.4.25. De berekening is niet nauwkeurig omdat geen rekening wordt gehouden met de stromingsweerstand van de verschillende componenten in de trommel. Deze weerstand is afhankelijk van de capaciteit. Op de vergelijking moet een correctie worden toegepast, met name bij hogere capaciteiten. Een nauwkeurige instelling verkrijgt men door proeven. Ter vermijding van emulsies worden de proeven zodanig uitgevoerd dat men van grotere naar kleinere diameter werkt. Indien de juiste

instelling is gevonden onderzoekt men, na opening van de trommel, waar de scheidingslijn loopt. Deze is bijna altijd zichtbaar op de schotels.

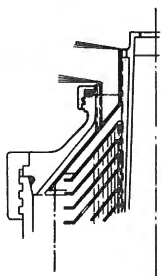
Fig. 6.1.4.19 laat zien hoe men bij olieseperatoren (water-olie mengsel) de uitwerking van een goed dan wel fout gekozen regelschijf kan zien.



Goed gekozen regelschijf.

De schijf is goed gekozen als de scheidingslijn tussen de beide vloeistofcomponenten ongeveer door het buitenste derde deel van de gaten in de schotels loopt.

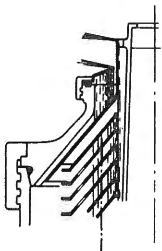
Werking: De olie is vrij van water, het water is vrij van oliedruppels.



Schijf te breed.

De schijf is te breed als de scheidingslijn tussen de twee vloeistofcomponenten in plaats van door de gaten in de schotels verder naar buiten ligt of zelfs buiten de schotels zou liggen.

Werking: Olie is vrij van water, het water bevat olie.



Schijf te klein.

De schijf is te klein als de scheidingslijn tussen de beide vloeistofcomponenten in plaats van door de gaten in de schotels meer naar binnen loopt.

Werking: De olie bevat water, het water is olievrij.

Fig. 6.1.4.19. Proefondervindelijke bepaling van de juiste reguleerschijf.

De plaats van de stijgkanalen hangt af van de verhouding van de afzonderlijke componenten van een vloeistofmengsel en van de vloeistofcomponent die het zuiverste moet worden afgescheiden. In het algemeen geldt, dat de vloeistof die het meest belangrijk is, over het grootste schoteloppervlak loopt. Op deze wijze wordt een dergelijke component het meest vrij van andere bestanddelen afgevoerd. Fig. 6.1.4.20 toont de verschillende plaatsen van de stijgkanalen, in afhankelijkheid van het aandeel van iedere component. Wil men de zware component zo zuiver mogelijk winnen, dan worden de stijg-

kanalen zo veel mogelijk naar binnen gekozen, R is relatief klein. Wil men de lichte component zo zuiver mogelijk afvloeien, dan kiest men de stijgkanalen aan de buitenkant van het schotelpakket, R relatief groot, R is straal van de schotels. Als beide componenten even zuiver moeten wegvloeien, dan worden de stijgkanalen in het midden van een schotelpakket gemaakt.

De scheidelingslijn tussen beide vloeistoffen moet door de stijgkanalen lopen. Dit kan, zoals uit het voorgaande blijkt, worden geregeld met de regelschijf.

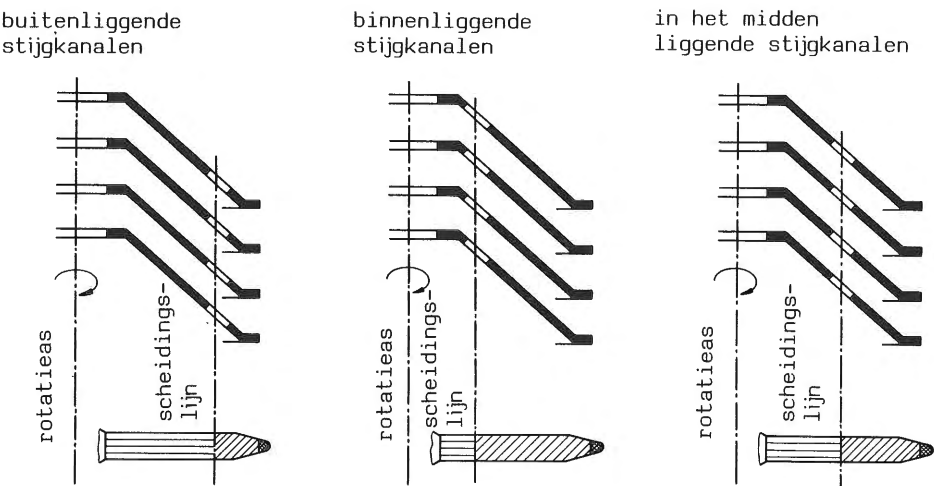


Fig. 6.1.4.20. Plaats van de stijgkanalen.

De keuze van een centrifuge.

Een overzicht van de verschillende centrifuges is te vinden in fig. 6.1.4.21. De vermelde hoeveelheden vaste stof stellen gemid-

CONTINUE SEPARATIE							
scheidings- machine	klarings- machine	scheidings- machine	klarings- machine	scheidings- machine	klarings- machine	scheidings- machine	klarings- machine
schoteltrommel	zelfreinigende schotelseparator		düsenseparator met concentraat terugvoer		düsenseparator		dekanter
vastestof: 0 %	vastestof: ≤ 2 %		vastestof: 2-3 %		vastestof: ≥ 3 %		vastestof: ≥ 3 %

Fig. 6.1.4.21. Keuze van de uitvoering van continue centrifuges.

delde waarden voor, die variëren naar gelang de gestelde eisen.

DISCONTINUE SEPARATIE		
klarings- machine	klarings- machine	scheidings- machine
		
kamertrommel	schoteltrommel	
vastestof: $\leq 2\%$	vastestof: $\leq 0,1\%$	

Bij de discontinue centrifuges wordt de concentratie aan vaste stof bepaald door de grootte van de charge en de slibruimte. Bij de zelfreinigende continue centrifuges ligt het vaste stofgehalte normaal bij ca. 2 %. Zowel de discontinue als de continue centrifuges kunnen als klarings- of als scheidingscentrifuge worden gebruikt.

Fig. 6.1.4.21. Keuze van de uitvoering van discontinue centrifuges.

6.1.5. Stof- en hydrocyclonen.

Cyclonen worden gebruikt voor het scheiden van mengsels die kunnen bestaan uit vaste stof/gas, vloeistof/gas, vaste stof/vloeistof en vaste stof/vaste stof.

De afscheiding van de disperse fase vindt evenals bij de centrifuges plaats onder invloed van traagheidskrachten (centrifugaalkrachten) die deeltjes ondervinden in een roterend fluïdum. In fig. 6.1.5.1 staan twee uitvoeringsvormen van cyclonen nl. resp. een hydrocycloon en een stofcycloon.

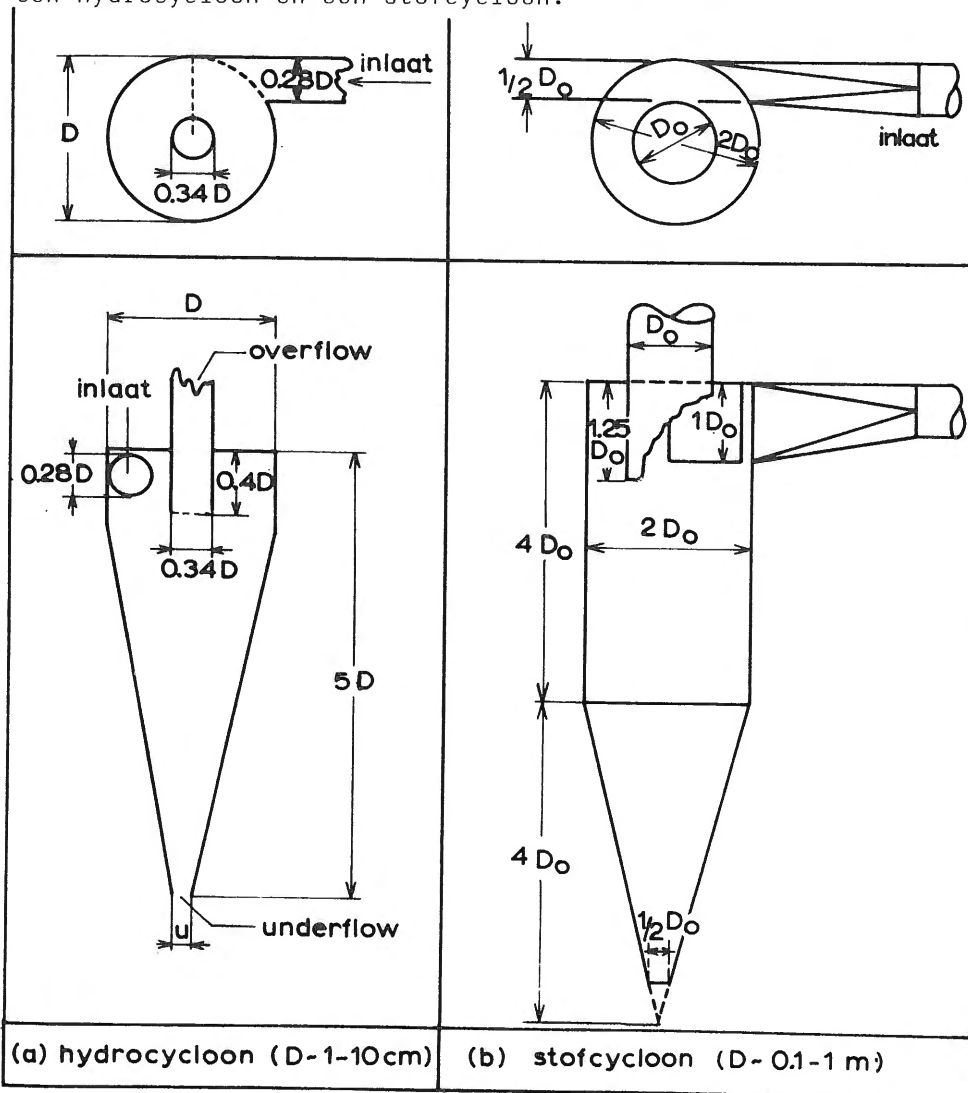


Fig. 6.1.5.1. Karakteristieke afmetingen van hydro- en stofcyclonen.

Het fluïdum met de deeltjes wordt met een hoge snelheid tangentiaal in het bovenste gedeelte van de cycloon gebracht, waardoor het mengsel een draaiende beweging in de cycloon krijgt. Door de draaiende beweging worden de deeltjes tegen de wand van het apparaat geslingerd. De plaats van de afvoer is zodanig dat het gas een grote richtingsverandering moet ondergaan.

Het verschil met centrifugeren is dat het te scheiden mengsel in de cycloon in rotatie gebracht wordt door het te laten stromen in plaats van de rotatie met externe hulpmiddelen op te wekken. Ruwweg berust de werking van een cycloon op het feit dat in het roterende fluïdum de deeltjes naar buiten worden gedwongen door centrifugaalkrachten en zo kunnen ontsnappen aan de sterke verticale stroming in de kern van de cycloon als ze voldoende snel bewegen. Deze deeltjes komen in de "underflow" terecht. Te kleine deeltjes komen toch in de verticale opwaartse stroming terecht en verlaten de cycloon in de "overflow".

De cyclonen zijn eenvoudig te construeren, vragen weinig energie en kunnen werken bij hoge temperatuur en druk. Omdat cyclonen gemakkelijk schoon kunnen worden gemaakt en sanitair kunnen zijn worden ze veel toegepast in de voedingsmiddelenindustrie zoals o.a. stofcyclonen bij de fabricage van gesproeidroogde produkten.

Stofcyclonen.

Bij stofcyclonen wordt in het algemeen een lucht-stof mengsel met een snelheid van 10 à 15 m/s aan de cycloon toegevoegd. Het mengsel komt daardoor in rotatie, zodat op de deeltjes een centrifugaalkracht wordt uitgeoefend. Bij grote cyclonen, diameter van enkele meters en capaciteiten tot meer dan 20 m³/s, bedraagt de relatieve centrifugaalkracht ($v_0^2 / \frac{1}{2} \cdot g \cdot D$) ongeveer 5; bij kleine stofcyclonen, met diameters van 10 à 15 cm kan deze centrifugaalkracht oplopen tot 1000. D = diameter cilindrisch gedeelte).

De kwaliteit van stofcyclonen kan nagegaan worden aan de hand van vangstcijferkrommen, fig. 6.1.5.2. Aan de vangstcijferkrommen ziet men dat elke cycloon een gebied van deeltjesgrootte vertoont waarin van deeltjes van een bepaalde grootte slechts een beperkt percentage wordt gevangen. Bij slechte cyclonen is genoemd gebied groot, curve 2, (de vangstcijferkromme is vlak) en vangt het gebied al aan bij grote deeltjes.

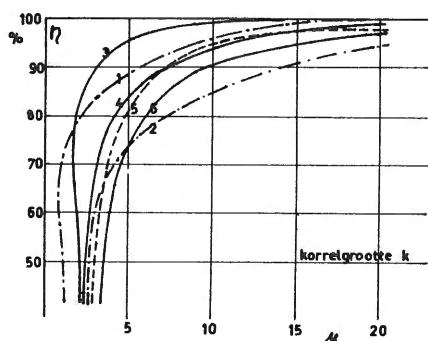


Fig. 6.1.5.2. Vangstefficiency, η , voor bollen.

Stofcyclonen zijn voor het vangen van deeltjes > 2 à 10 micron goed bruikbaar; in het algemeen zijn de vangstcijfers voor deeltjes van 2 à 5 micron laag. Deeltjes > 200 micron kunnen eenvoudiger worden gevangen in bijv. stofkamers.

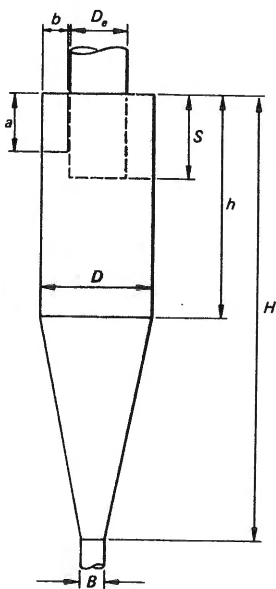
Voor het verkrijgen van een hoge vangstefficiency is het vereist dat de cycloon voldoet aan bepaalde geometrische verhoudingen, zie fig. 6.1.5.1 en 6.1.5.3. In tabel 6.1.5.1 zijn een aantal geometrische verhoudingen weergegeven.

Tabel 6.1.5.1.

	Swift	Laple	Peterson & Whitby
D trommel dia.	1,0	1,0	1,0
a hoogte inlaat	0,44	0,5	0,583
b breedte inlaat	0,21	0,25	0,208
S lengte uitlaat	0,5	0,625	0,583
D_e uitlaat dia.	0,4	0,5	0,5
h hoogte cilinder	1,4	2,0	1,333
H totale hoogte	3,9	4,0	3,17
B uitlaat dia. vaste stof	0,4	0,25	0,5

De in tabel 6.1.5.1 vermelde getallen zijn verhoudingsgetallen waarbij de diameter van de trommel of cilinder 1 is gesteld.

Fig. 6.1.5.3. Standaard cycloon.



Onderzoekingen hebben uitgewezen dat een cycloon met een geometrie volgens Swift de beste vangstefficiëncy gaf, gevolgd door Lapple en Peterson & Whitby. Het onderzoek is uitgevoerd met lucht met een bepaalde belading aan stof. Gebleken is dat de belading de vangstefficiëncy kan beïnvloeden.

De diameter van het deeltje dat nog juist wordt afgescheiden is meestal zo klein dat hierop de wet van Stokes van toepassing is. Voor een bolvormig deeltje geldt volgens Stokes.

$$\frac{1}{6} \pi d^3 r \omega^2 (\rho_s - \rho) = 3 \pi d \cdot v_r \cdot \eta_f \quad (6.1.5.1)$$

v_r = radiale snelheid.

$$r \cdot \omega^2 = v_{\tan}^2 / r \quad (6.1.5.2)$$

$v_{\tan}$ = tangentiële snelheid van het deeltje op afstand r van het midden van de cycloon.

Vergelijking 6.1.5.2 gesubstitueerd in vergelijking 6.1.5.1 geeft

$$d = \sqrt{\frac{18 \eta_f \cdot v_r \cdot r}{(\rho_s - \rho) v_{\tan}^2}} \quad (6.1.5.3)$$

Een basisconcept bij het analyseren van cyclonen is de d_{50} deeltjesdiameter. Dit is de deeltjesdiameter waarvan juist 50 % in de "overflow" en 50 % in de "underflow" terecht komt. Kleinere deeltjes komen voor een groter deel in de "overflow" terecht en grotere deeltjes voor een groter percentage in de "underflow".

Uitgaande van vergelijking 6.1.5.3 is een vergelijking afgeleid waarmee de deeltjesdiameter d_{50} kan worden afgeschat.

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \eta_f \cdot b}{(\rho_s - \rho) \cdot 4 \pi N_e \cdot v_o}} \quad (6.1.5.4)$$

$$v_o = Q_v / (a \cdot b)$$

Q_v = hoeveelheid lucht die door de cycloon gaat (m^3/s),

ρ_s = dichtheid van het deeltje (kg/m^3),

ρ = dichtheid van het gas (kg/m^3),

η_f = viscositeit van het gas (Ns/m^2),

N_e = aantal keren dat de gasstroom ronddraait gedurende zijn gemiddelde verblijftijd in de cycloon. Dit aantal kan bij bena-

dering worden gevonden uit de vergelijking:

$$N_c = 0,33 v_o.$$

Bovenstaande geldt voor een stofcycloon met geometrische verhoudingen volgens Lapple fig. 6.1.5.1 b.

Aan de hand van bovenstaande vergelijkingen kunnen enkele kwalitatieve opmerkingen worden gemaakt om de vangstcijfers te verbeteren.

- a. Een hoger vangstcijfer wordt verkregen indien de inlaatopening, b, wordt verkleind en de toevoersnelheid van de lucht, v_o , niet verandert. In dit geval blijft de centrifugaalkracht bij benadering gelijk, terwijl de naar binnen gerichte stromingssnelheid afneemt. De meesleepkracht neemt af waardoor kleinere deeltjes worden afgescheiden. De capaciteit echter vermindert evenredig met het verkleinen van de inlaatopening.

Hoewel een hogere luchtsnelheid, v_o , resulteert in een hoger vangstcijfer mag de (tangentiële)luchtsnelheid niet te hoog worden opgevoerd daar dan de deeltjes door de meesleepkracht van de cilinderwand worden verwijderd om alsnog via de kern de cycloon te verlaten. Vooral bij droge deeltjes is de luchtsnelheid kritisch. Zijn de deeltjes enigszins plakkerig dan treedt het verschijnsel minder snel op. Met deze deeltjes worden vaak hogere vangstcijfers verkregen bij dezelfde luchtsnelheid. In de praktijk worden de deeltjes vaak bewust bevochtigd of de wand van de cycloon. Hierdoor laten de deeltjes minder gemakkelijk los van de wand. Bij deze zogenaamde natwassers (scrubbers) kunnen hogere luchtsnelheden worden toegepast dan bij overeenkomstige cyclonen die droog werken. Bij deze natwassers kunnen hoge vangstcijfers worden verkregen; deeltjes groter dan 5 micron kunnen worden afgescheiden. Hoge luchtsnelheden gaat echter wel gepaard met hoge drukverliezen en hoog energieverbruik.

- b. Het vangstcijfer verbetert ook wanneer b wordt verkleind en de luchthoeveelheid niet wordt veranderd. De meesleepkracht blijft gelijk, doch de centrifugaalkracht neemt toe.
- c. De werking van de cycloon zal tevens verbeteren wanneer deze proportioneel wordt verkleind; b wordt kleiner.

De geometrische verhoudingen moeten hierbij tenminste aan de volgende voorwaarden voldoen:

- $a < S$ (om kortsluiting te vermijden).

- $(S+L) < H$ (om de vortex in de cycloon te houden.
- $S < h$.
- $h < H$.

Het stromingsbeeld in een grotere en daarmee gelijkvormige cycloon is bij gelijke toevoersnelheid van de lucht nagenoeg gelijk (tangentiële en radiale snelheden zijn gelijk). De meesleepkracht (evenredig met de snelheid) is in beide gevallen dezelfde, maar de centrifugaalkracht die omgekeerd evenredig is aan de straal, is bij de kleine cycloon groter dan bij de grote. Een gelijkvormige kleine cycloon vangt daarom kleinere deeltjes dan een grotere cycloon. Maakt men alle afmetingen van een cycloon twee keer zo klein, dan wordt de capaciteit bij eenzelfde toevoersnelheid van de lucht, vier maal zo klein.

Uit het voorgaande volgt dat men kleinere deeltjes kan vangen door in plaats van één cycloon meerdere cyclonen van dezelfde afmetingen te kiezen. Deze maatregel geeft echter een verhoging van de kosten zodat men in het algemeen kan stellen dat de totale kosten zullen stijgen naarmate men kleinere deeltjes wil vangen.

Het zodanig dimensioneren van een cycloon en het kiezen van de bedrijfsomstandigheden op basis van de samenstelling van het af te scheiden stof, dat de meest economische oplossing wordt verkregen, vereist ervaring.

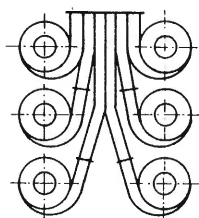


Fig. 6.1.5.4. Multicyclonen.

Op grond van de overweging dat een kleine cycloon in principe beter vangt dan een grotere, worden installaties toegepast die bestaan uit vele tot zeer vele parallel geschakelde kleine cyclonen. Dergelijke apparaten noemt men in het algemeen multicyclonen. Het principe hiervan is gegeven in fig. 6.1.5.4. Deze opstelling treft men dikwijls aan achter drogers.

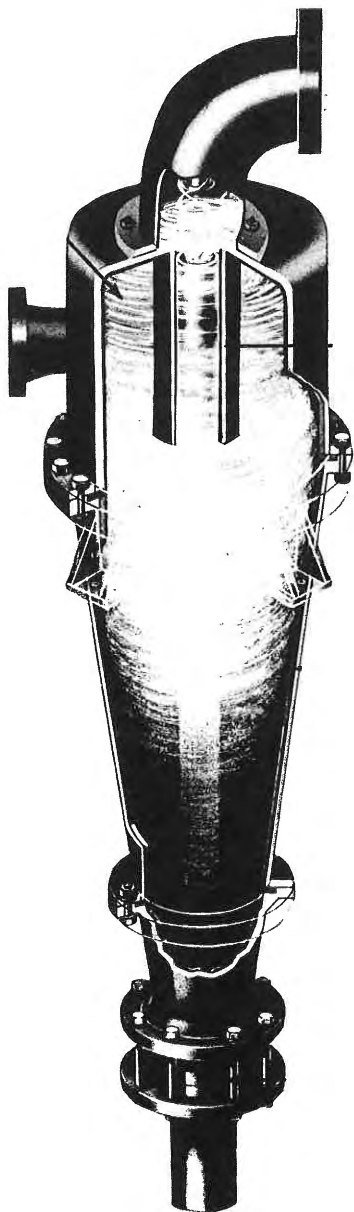
Men kan de weerstand over cyclonen berekenen uit de dynamische druk van de luchtstroom door deze druk te vermenigvuldigen met een bepaalde factor K_w .

$$\Delta P = K_w \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2. \quad (6.1.5.5)$$

Doorgaans worden weerstanden tussen de 200 en 1000 N/m² gevonden.

Hydrocyclonen.

De hydrocycloon werkt volgens hetzelfde principe als de stofcycloon. De vloeistof met daarin de vaste deeltjes wordt in een



spiraalvormige beweging langs de wand gebracht, fig. 6.1.5.5. De deeltjes worden onder invloed van de centrifugaalkracht tegen de wand afgezet en vallen omlaag en worden onderin het conische deel afgevoerd.

Bepalend voor het rendement van de afscheiding is de diameter van de hydrocycloon en de snelheid waarmee de vloeistof wordt ingevoerd.

De belangrijkste verschillen met de stofcycloon zijn:

- hydrocyclonen zijn kleiner omdat ze kleinere volumina fluïdum behandelen;
- dichtheidsverschil tussen vaste stof en vloeistof is kleiner;
- kinematische viscositeit water is 15 maal kleiner als van lucht (voor eenzelfde Re-getal is een hydrocycloon 15 maal kleiner dan een stofcycloon);
- gedeelte van de vloeistof gaat door de aftapopening, terwijl bij een stofcycloon alle lucht door de overloop gaat.

Goede vangstcijfers worden verkregen indien de deeltjes groter dan 5 micron zijn, de viscositeit van de vloeistof laag is en de dichtheden tussen de verschillende fasen niet te klein zijn.

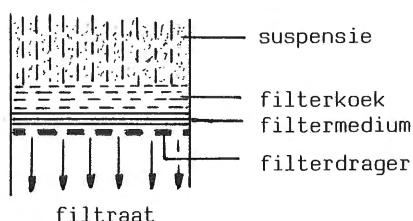
Voor de scheidende werking van hydrocyclonen is op basis van de d_{50} -deeltjesdiameter een eenvoudige formule

Fig. 6.1.5.5. Hydrocycloon.

afgeleid, die geleid heeft tot een ontwerpformule voor hydrocyclonen met geometrische verhoudingen als aangegeven in fig. 6.1.5.1. (Chem. Eng. Sci., 15, 298-325, 1961). Verder wordt verwezen naar "The International Symposium on Hydrocyclones, Cambridge, 1980. Printed and Published by BHRA Fluid Engineering, Bedford, England.

6.1.6. Filtreren.

Filtreren is een methode voor het scheiden van vast-vloeistof of vast-gas. In principe gebeurt het filtreren door middel van een poreuze stof, bijvoorbeeld filtreerpapier, doek of metaalgaas, dat de vaste stof tegenhoudt. Deze poreuze stoffen worden aangeduid als filterbasis of filtermedium, fig. 6.1.6.1. Het filtermedium houdt de vaste deeltjes tegen en laat de vloeistof of het gas



door. De vaste stof die door het filtermedium wordt tegengehouden vormt de zogenaamde filterkoek. Het filterdoek met de zich op het doek afgezette koek wordt ook vaak het filtermedium genoemd.

Fig. 6.1.6.1. Filtratatieproces.
(schematisch)

De na filtratie van de suspensie overblijvende heldere vloeistof noemt men

het filtraat. Bij het begin van het filtratieproces, wanneer nog geen koekafzetting heeft plaatsgevonden, zal het doek meestal deeltjes doorlaten. Deze niet deeltjesvrije doorloopvloeistof, de zogenaamde zwartloop, wordt teruggedleid naar de slurryvoorraad. Zodra zich een koek op het doek heeft afgezet zal een schoon filtraat verschijnen.

De filtreerbaarheid van een suspensie kan zeer uiteenlopen. Gemakkelijk filtreerbare suspensies leveren over het algemeen een filterkoek met een hoog gehalte aan droge stof. Andere suspensies behoeven speciale maatregelen om de filtreerbaarheid te vergroten. Dit geldt vooral voor suspensies van colloïdale deeltjes en voor hoog viskeuze suspensies. Deze leveren veelal waterrijke filterkoeken op.

De technoloog is vooral geïnteresseerd in de filtratiesnelheid, dit is de hoeveelheid suspensie die per m^2 filteroppervlak en per tijdseenheid kan worden verwerkt, als functie van de bedrijfsom-

standigheden. Deze filtratiesnelheid bepaalt uiteindelijk het benodigde oppervlak van een filter. Een globale indeling in de filtereerbaarheid vinden we in tabel 6.1.6.1.

Tabel 6.1.6.1. Indeling filtraties.

	snelle filtraties	normale snelheid	langzame filtraties	verdunde suspensies	zeer verdunde suspensies
	1	2	3	4	5
concentratie, massa %	20	10...20	1.....10	5	0,1
koekvormingssnelheid mm/s.	5.....25	0,2..1	0,02...0,1	0,02	geen koek
filtratiesnelheid $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h.}$	12	0,5..12	0,02...0,05	0,025..5	0,025..5
bezinken	zeer snel	snel	langzaam	langzaam	-

Tijdens de filtratie kan de vaste stof zowel aan het oppervlak van het filtermateriaal (medium) worden tegengehouden als door botsing met en adsorptie aan de wanden van de poriën, gepaard gaande met bezinking in de holten van het filtermateriaal. Dit laatste treedt o.a op bij de filtratie van gassen (bijv. afscheiden van bacteriën); we spreken van diepte filtratie. Wanneer de vaste stof aan het oppervlak van het filtermedium wordt tegengehouden kunnen zich twee situaties voordoen:

- verstoppingsfiltratie en
- koekfiltratie.

Dieptefiltratie.

Dieptefiltratie of diep bed filtratie kan worden toegepast bij suspensies met een laag gehalte aan zeer fijn verdeelde vaste stof, waarbij mechanisch afvangen niet mogelijk is of een te grote drukval geeft. De suspensie wordt door een korrelbed gevoerd waarin de diameter van de poriën een factor 100 à 10.000 keer zo groot is als de diameter van de gesuspenderde deeltjes (0,1-30 micron). Voor het korrelbed wordt meestal zand gebruikt met een korreldiameter van ca. 1 mm in een laagdikte van 1 m bij filtratiesnelheden van ca. $5-20 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{uur}^{-1}$. De afvangst die plaats vindt kan in het algemeen niet op zeefwerking berusten, gezien het grote verschil

tussen deeltjes- en poriediameter, maar wordt door andere mechanismen bepaald.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen het transport naar het oppervlak en de aanhechting daaraan. Bij de aanhechting spelen oppervlakte krachten, zoals elektrostatische krachten en London/ v.d. Waals-attractie de grootste rol. Het transport naar het oppervlak kan door diverse mechanismen tot stand komen. Ook hier kunnen Londen/v.d. Waals- en elektrostatische krachten werken, verder sedimentatie, transport veroorzaakt door de vloeistofstroming, centrifugale en traagheidskrachten en soms wat zeefwerking.

De drinkwaterfiltratie is het belangrijkste toepassingsgebied van de diep bed filtratie. Deze filtratie wordt vaak snelle zandfiltratie genoemd, dit in tegenstelling tot de langzame zandfiltratie, die in hoofdzaak biologisch van aard is. Bij de diepbedfiltratie gaat het naast de afvangst van gesuspendeerde deeltjes zonder lading, vaak om het afvangen van kolloïdale deeltjes. Een voorbeeld van de invloed van de kolloïdchemische eigenschappen is de filtratie van ijzerhydroxide uit grondwater. Bij kolloïdaal ijzerhydroxide is de lading van de deeltjes doorslaggevend voor de afvangst.

Door grover korrelmateriaal toe te passen wordt een hogere filtratiesnelheid verkregen, fig. 6.1.6.2. Dit heeft op zich een ver-

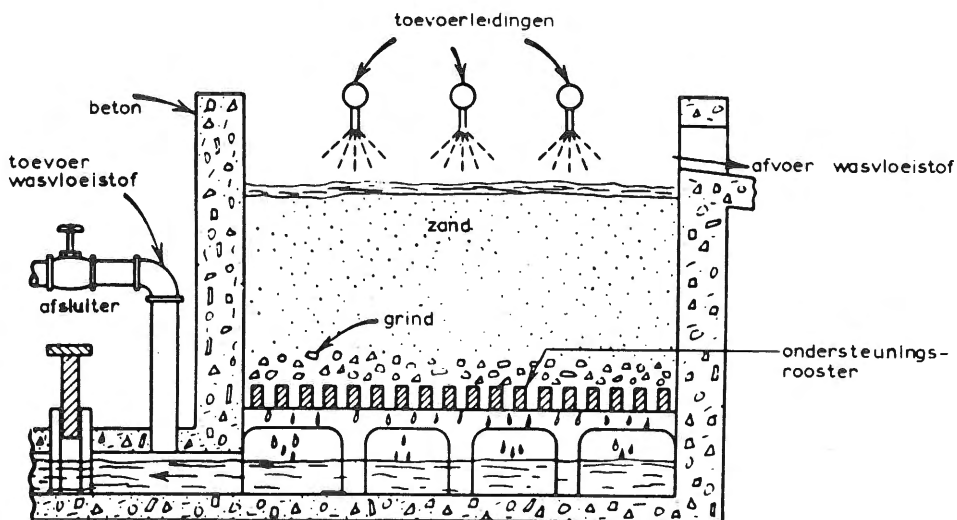


Fig. 6.1.6.2. Doorsnede van een zandfilter. Het filter kan in tegengestelde richting worden uitgewassen.

slechtering van de kwaliteit tot gevolg, hetgeen wordt tegengegaan door toevoeging van flocculatiemiddelen, die coagulatie en flocculatie in het bed bevorderen.

De drukval over een filterbed volgt uit de in paragraaf 4, deel 1, weergegeven vergelijkingen. In het algemeen neemt de drukval bij constante filtratiesnelheid lineair toe met de tijd, totdat verstopping optreedt. Op dit tijdstip, of wanneer de filtraat te slecht wordt, moet het bed worden geregenereerd. Dit gebeurt door het bed in opwaartse richting te fluidiseren, waarbij het afgezette materiaal wordt uitgespoeld.

Verstopningsfiltratie.

Als een zeer verdunde suspensie gefiltreerd wordt, beweegt ieder deeltje los van de andere en zal het deeltje gemakkelijk de stroomlijnen volgen naar de poriën in het filter. Het deeltje zal dan in een porie komen of de opening afsluiten, één en ander afhankelijk van de verhouding tussen de afmetingen van de deeltjes en de porieopening, fig. 6.1.6.3. Bij verstopningsfiltratie neemt het filtratieoppervlak voortdurend af.

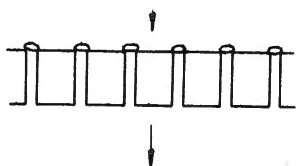


Fig. 6.1.6.3. Verstopningsfiltratie.

Koekfiltratie.

Verstopningsfiltratie kan o.a. worden voorkomen door de openingen in het filtermateriaal enige malen groter te kiezen dan de diameter van de grootste deeltjes. In het begin van de filtratie zal een gedeelte van de deeltjes vrij door de openingen lopen, zwartloop, maar wanneer enige deeltjes tegelijkertijd aankomen bij een opening, dan zullen ze een brug vormen over de opening en daarbij voldoende ruimte overlaten tussen de deeltjes, om het filtermateriaal niet te blokkeren. Hebben zich over alle openingen voldoende bruggen gevormd, fig. 6.1.6.4, dan zal een helder filtraat ontstaan. De deeltjes die zich op elkaar stapelen vormen de koek, terwijl tussen de deeltjes de poriën ten behoeve van een goede doorloop van het filtraat ontstaat. We spreken van koekfiltratie. Een goede en snelle brugvor-

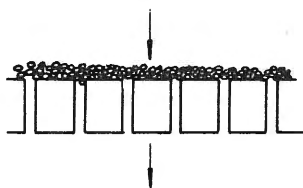


Fig. 6.1.6.4. Koekfiltratie.

ming wordt gemakkelijk verkregen naarmate de deeltjes concentratie in de slurry hoger is.

De koekfiltratie is technisch de belangrijkste filtratie voor de scheiding van vast/vloeistof. We zullen ons speciaal op deze wijze van filtreren richten.

De toepassing van filtratie in de levensmiddelenindustrie kunnen we onderscheiden in vier categorieën.

- Het klaren van vloeistoffen. Hierbij worden kleine hoeveelheden vaste stof verwijderd uit een waardevolle vloeistof. Het uiteindelijke doel is om een heldere vloeistof te verkrijgen. Voorbeeld de drankenindustrie. Door de geringe hoeveelheid vaste stof zal er geen koek worden gevormd.
- Filtratie om zowel de vaste stof als de vloeistof te scheiden. Onder deze categorie vallen de suspensies die meer dan 1 % vaste stof bevatten. Zowel de vloeistof, het filtraat, als de vaste stof kunnen waardevol zijn. Bij deze bewerking wordt een koek gevormd waardoor de bewerking bekend staat als koekfiltratie. Voorbeelden: Bier, gist fabricage, de verwerking van plantaardige oliën en vetten, melksuiker, aardappelmeelderivaten, afvalwaterzuivering.
- Het winnen van vaste stoffen uit vloeistoffen. Bij dit proces gaat het speciaal om de vaste stof. Voorbeelden: Zetmeelwinning en de winning van zoutkristallen.
- Microfiltratie. Bij microfiltratie worden zeer kleine deeltjes, kleiner dan 1 micron, verwijderd. Microfiltratie wordt toegepast bij het verwijderen van microorganismen uit vloeibare voedingsmiddelen.

Filtermedia.

Bij het filtratieproces gebruikt men verschillende filtermedia als:

- keramische materialen, poriëngrootte ca. 65 micron,
- gesinterde metalen,
- gesinterd glas,
- poreuze polymeren,
- vezelplaten, poriëngrootte 0,05-0,1 micron, worden o.a. gebruikt als bacteriefilters voor drinkwater,
- metalen platen (geperforeerd); gebruikt voor fijne deeltjes,
- weefsels, ook wel filterdoek genoemd; één van de meest gebruikte

filtermedia,

- membranen; gebruikt voor het tegenhouden van uiterst fijne deeltjes (ultrafiltratie).

Berekening_van_koekfiltratie.

Bij het opzetten van de theorie wordt uitgegaan van de eenvoudigste vorm van het filtratieproces, waarbij wordt verondersteld dat de vaste deeltjes uitsluitend aan het oppervlak van het filtermedium worden tegengehouden, koekfiltratie.

Wanneer zich tijdens het filtratieproces een koek gaat afzetten zal in het algemeen een schoon filtraat verschijnen. De eigenlijke scheidingsprocedure van deeltjes uit de vloeistof kan beginnen. Wanneer zich meer koek gaat afzetten, blijkt dat de weerstand voor het filtraat over het filtermedium, doek + koek, groter wordt. In het geval van een constante toevoerdruk, drukverschil over het filtermedium is constant, zien we dat de opgevangen filtraathoeveelheid per tijdseenheid daalt. Wordt de slurry met een verdringerpomp door het medium gedrukt, dan wordt een constant filtraatdebiet verkregen en neemt, naarmate de koek dikker wordt, de druk over het filtermedium toe.

Bij een constante druk over het filtermedium wordt de filtratie zo lang voortgezet totdat zo'n laag debiet van het filtraat wordt verkregen zodat optimaal filtreren niet meer mogelijk is.

In het geval van een constant filtraat debiet wordt de filtratie zo lang voortgezet totdat de voor het filter toelaatbare druk bereikt wordt.

Bij het stoppen van de slurrytoevoer wordt in veel gevallen geprobeerd zoveel mogelijk vloeistof uit de koek te verwijderen bijvoorbeeld door blazen met lucht, samendrukken van de koek, of door wasvloeistof door de koek te laten lopen. Daarna wordt de koek verwijderd van het doek, hetgeen continu gebeurt of door vooraf openen en erna sluiten van het filterapparaat. Hierna kan opnieuw begonnen worden met zwartloop, filtratie enz.

Het gehele filtratieproces, ook wel filtratiecyclus genoemd, bestaat uit:

- zwartloop,
- filtratie,
- scheiden restvloeistof uit de koek,

- verwijderen van de koek (schrappen).

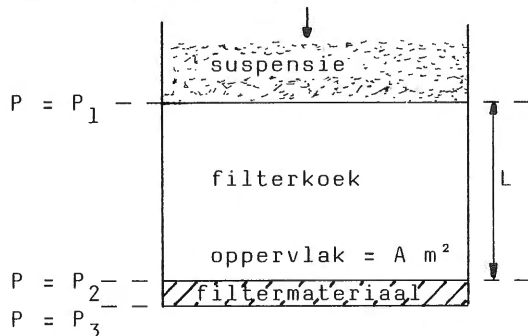
Winning van het filtraat, dan wel koek, vindt plaats tijdens de filtratie. De overige handelingen zijn de niet-productieve handelingen die ten opzichte van de filtratie vaak veel tijd in beslag nemen.

Tijdens de filtratie hebben we te maken met een filterkoek waardoor het filtraat stroomt. We kunnen dit in principe beschouwen als stroming door granulair materiaal. Dit wil zeggen dat we uit kunnen gaan van de theorie die in hoofdstuk 4, deel I, is besproken. Deze theorie is opgebouwd voor een vaste laag die niet dikker wordt in de tijd.

Daar de deeltjes die de koek vormen normaal klein zijn, zal de vloeistofsnelheid laag zijn zodat er tijdens filtratie een laminaire stroming kan worden verwacht en daardoor vergelijking 18 hoofdstuk 4, deel I, voor een momentane laagdikte kan worden toegepast. De algemene vergelijking voor het berekenen van de gemiddelde gas- of vloeistofsnelheid door de poriën is:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{5} \cdot \frac{\epsilon^3}{S_v^2} \cdot \frac{\Delta P}{\eta L} \quad (6.1.6.1)$$

Voor de verklaring van de verschillende grootheden zie fig. 6.1.6.5



$$\Delta P = P_1 - P_3$$

A = filteroppervlak (m²)

V = volume filtraat (m³)

t = tijd (s)

L = dikte filterkoek (m)

Fig. 6.1.6.5. Koekfiltratie.

Bij een samendrukbare koek zal de filtratiesnelheid sneller afnemen dan in het geval van een niet samendrukbare koek. Daar we veelal te maken hebben met niet-samendrukbare of weinig samendrukbare koeken zal voor het afleiden van een filtratievergelijking van niet-samendrukbare koeken worden uitgegaan.

Voor een niet-samendrukbare koek kan gesteld worden dat de factor $\frac{\epsilon^3}{5 S_v^2}$ een eigenschap is van de deeltjes die de koek vormen en kon-

stant is voor een gegeven slurry.

Voor vergelijking 6.1.6.1 kan worden geschreven:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\eta} \frac{\Delta P}{r \cdot L} \quad \text{of}$$

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\eta} \frac{\Delta P}{R} \quad (6.1.6.2)$$

r = specifieke koekweerstand, $r = 5 \frac{S^2}{\epsilon^3 V} \quad (m^{-2})$

R = weerstand van de koek (m^{-1}) .

In vergelijking 6.1.6.2 bestaat een bepaald verband tussen de dikte van de koek, L , en het volume van het filtraat, V , (de hoeveelheid vloeistof die de onderkant van de koek is gepasseerd).

Dit verband kan als volgt worden afgeleid:

massa filterkoek (m_s) = $(1-\epsilon) \cdot A \cdot L \cdot \rho_s$

ρ_s = dichtheid van de vaste stof (kg/m^3) .

massa vloeistof in de koek (m_L) = $\epsilon \cdot A \cdot L \cdot \rho$

ρ = dichtheid van het filtraat (kg/m^3) .

Stel J is de massafractie aan vaste stof in de oorspronkelijke suspensie.

$$J = \frac{m'_s}{m'_s + m'_L}; \quad 1 - J = \frac{m'_L}{m'_s + m'_L}; \quad \frac{J}{1 - J} = \frac{m'_s}{m'_L} \quad (6.1.6.3)$$

m'_s = massa aan vaste stof in de oorspronkelijke suspensie.

m'_L = massa aan vloeistof in de oorspronkelijke suspensie.

Wordt er geen vaste stof met het filtraat meegevoerd dan is:

$$m'_L = m_L + V \cdot \rho \quad \text{en}$$

$$m'_s = m_s \quad \text{of}$$

$$(V \cdot \rho + \epsilon \cdot A \cdot L \cdot \rho) \cdot \frac{J}{1 - J} = (1 - \epsilon) \cdot A \cdot L \cdot \rho_s$$

Voor de laagdikte van de koek (L) kunnen we nu schrijven:

$$L = \frac{J \cdot V \cdot \rho}{\{(1-J)(1-\epsilon)\rho_s - J \cdot \epsilon \cdot \rho\} A} \quad (6.1.6.4)$$

Het volume van de koek, ϑ , dat per volumeeenheid filtraat wordt gevormd kan worden weergegeven door de vergelijking:

$$\vartheta = \frac{J \cdot \rho}{(1-J)(1-\epsilon)\rho_s - J \cdot \epsilon \cdot \rho} \quad (6.1.6.5)$$

De dikte van de koek kan worden weergegeven door:

$$L = \frac{\vartheta V}{A} \quad (6.1.6.6)$$

Vergelijking 6.1.6.6 gesubstitueerd in vergelijking 6.1.6.2 geeft:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{r \cdot \eta \cdot V \cdot \vartheta} \quad (6.1.6.7)$$

Wanneer de weerstand tegen stroming in de filterkoek in het begin van de filtratie nul is en een volume V aan filtraat passeert in een tijd t dan kan vergelijking 6.1.6.7 worden geïntegreerd indien de relatie tussen ΔP , V en t gegeven is.

In het begin van het hoofdstuk is opgemerkt dat de filtratie in het algemeen op twee manieren wordt uitgevoerd nl.:

- Filtratie waarbij de hoeveelheid filtraat per tijdseenheid constant is.
- Filtratie onder constante druk.

De filtratie onder deze twee omstandigheden zullen we nader uitwerken.

Filtratie waarbij de hoeveelheid filtraat per tijdseenheid constant is.

Is bij een filtratie de hoeveelheid filtraat per tijdseenheid constant dan wordt deze filtratie zo lang voortgezet tot een bepaald volume aan filtraat, V_1 , de koek is gepasseerd. We krijgen:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V}{t} = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{r \cdot \eta \cdot V \cdot \vartheta} = \text{constant}$$

of

$$\frac{t_1}{V_1} = \frac{r \cdot \eta \cdot \vartheta}{A^2 \cdot \Delta P} \cdot V_1 \quad (6.1.6.8)$$

Uit deze vergelijking volgt dat ΔP recht evenredig is met V .

Filtratie onder constante druk.

Voor filtratie onder constante druk over een tijdstip t_1 tot t krijgen we:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{r \cdot \eta \cdot V \cdot \vartheta}$$

of

$$\frac{t-t_1}{V-V_1} = \frac{r \cdot \eta \cdot \vartheta}{2A^2 \Delta P} (V-V_1) + \frac{r \cdot \eta \cdot \vartheta \cdot V_1}{A^2 \cdot \Delta P} \quad (6.1.6.9)$$

Uit deze vergelijking volgt dat er een lineair verband bestaat

tussen V^2 en t indien $t_1 = 0$ en $V_1 = 0$ en tussen $\frac{t - t_1}{V - V_1}$ en $V - V_1$.

$t - t_1$ = de tijd waarbij de filtratie onder constante druk plaatsvindt.

$V - V_1$ = volume filtraat dat tijdens de periode van constante druk wordt verkregen.

De invloed van het filtermateriaal (medium) op de filtratie.

Tijdens de filtratie wordt filtermateriaal gebruikt. Voordat er sprake is van filtratie met een constant filtraatdebiet of filtratie onder constante druk heeft zich reeds een geringe koek op het filtermateriaal afgezet. Het filtermateriaal in combinatie met de koek vormt een extra weerstand die in de vorige berekening niet is meegenomen.

In het algemeen kan het filtermateriaal niet afzonderlijk in de berekening worden meegenomen omdat het onmogelijk is om in de praktijk een scheidingslijn aan te geven tussen filtermateriaal en de koek die in het begin is gevormd. Daarnaast blijkt de gezamenlijke weerstand koek-filtermedium groter te zijn dan wanneer ze apart worden beschouwd. Dit wordt o.a. veroorzaakt doordat een gedeelte van de openingen in het filtermateriaal worden geblokkeerd, waardoor het filtermateriaal een grotere weerstand krijgt. De weerstand van het filtermateriaal en de eerste lagen van de koek worden vaak uitgedrukt in een equivalente koekdikte, L' .

Voor het geval het filter en de koek onafhankelijk van elkaar worden beschouwd geldt de volgende betrekking:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{r \cdot \eta (L + L')}$$

of

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\eta} \frac{\Delta P}{(R_K + R_F)} \quad (6.1.6.10)$$

R_K = weerstand van de koek.

R_F = weerstand van het filter.

Deze vergelijking kan worden geïntegreerd tussen de grenzen $t=0$, $V=0$ en $t=t_1$ en $V=V_1$, in het geval er sprake is van een constant filtraatdebiet, en $t=t_1$, $V=V_1$ en $t=t$, $V=V$ voor een constante drukfiltratie.

In het geval van een constant filtraatdebiet krijgen we: .

$$\frac{t}{V} - \frac{t_1}{V_1} = \frac{r \cdot \eta \cdot \vartheta}{A^2 \cdot \Delta P} V_1 + \frac{r \cdot \eta \cdot L'}{A \cdot \Delta P} \quad (6.1.6.11)$$

Voor filtratie onder constante druk:

$$\frac{t}{V} - \frac{t_1}{V_1} = \frac{r \cdot \eta \cdot \vartheta}{2A^2 \cdot \Delta P} (V - V_1) + \frac{r \cdot \eta \cdot \vartheta \cdot V_1}{A^2 \cdot \Delta P} + \frac{r \cdot \eta \cdot L'}{A \cdot \Delta P} \quad (6.1.6.12)$$

Wanneer de weerstand van het filterdoek te verwaarlozen is krijgen we respectievelijk de vergelijkingen 6.1.6.8 en 6.1.6.9 terug.

Vergelijking 6.1.6.11 geeft een lineair verband tussen $\frac{t-t_1}{V-V_1}$ en $V-V_1$ zoals is aangegeven in fig. 6.1.6.6.

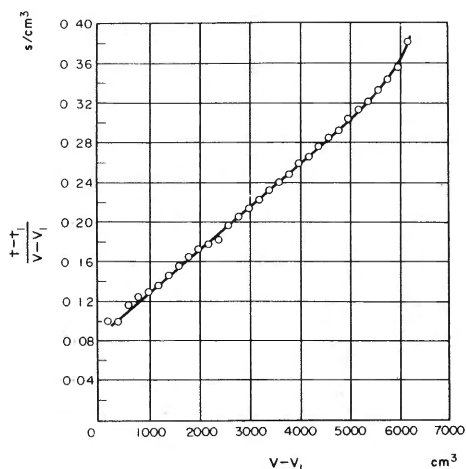


Fig. 6.1.6.6. Filtratie-curve.

De helling van de lijn is volgens de vergelijkingen 6.1.6.12 en 6.1.6.9 evenredig met de specifieke koekweerstand. De lijn gaat niet door de oorsprong. In het geval van vergelijking 6.1.6.12 kan uit het snijpunt met de verticale as de equivalente koekdikte L' worden berekend. Deze waarden zijn meestal niet reproduceerbaar daar de weerstand van het doek in sterke mate wordt bepaald door de wijze waarop de filtratie wordt gestart. Het tijdstip waarop men aanvangt met het meten van V en t beïnvloedt niet de helling en het snijpunt met

de verticale as. Een lineair verband tussen t en V^2 is niet meer mogelijk indien de doekweerstand groot is.

Uit vergelijking 6.1.6.10 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Hoe groter L , des te kleiner wordt het filtraatdebiet, dV/dt .
- Hoe kleiner de viscositeit, η , wordt, hoe groter dV/dt , hoe groter de filtratiesnelheid. Een filtratieproces zal men daarom, voor zover mogelijk, bij verhoogde temperatuur uitvoeren.
- Hoe groter het drukverschil, hoe groter de filtratiesnelheid. Dit drukverschil heeft echter een limiet. Bij hoge druk wordt nl. de filterkoek samengeperst, waardoor de porositeit wordt ver-

kleind. Boven een bepaald drukverschil zal daardoor dV/dt niet meer veranderen; dV/dt wordt constant. Het drukverschil waarbij dit plaatsvindt heet het kritisch drukverschil.

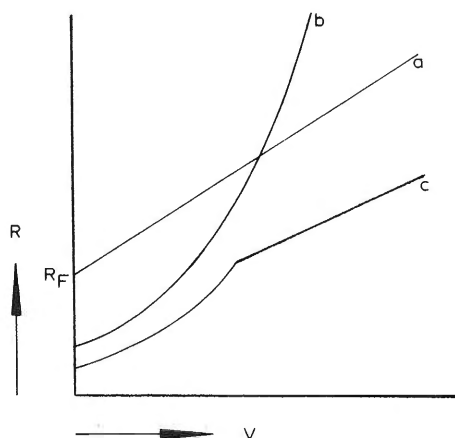
In werkelijkheid is het verloop van de koekfiltratie gecompliceerder als gevolg van:

- samendrukbaarheid van de filterkoek;
- het binnendringen van kleine deeltjes in de filterkoek;
- trillingen waardoor de koek verder in kan klinken;
- het feit dat een zuivere koekfiltratie niet realiseerbaar is omdat het filtermedium altijd gedeeltelijk verstopt, zowel aan het oppervlak als inwendig.

Het optreden van verstoppingsfiltratie kan afgeleid worden uit grafieken waarin de weerstand tegen de hoeveelheid filtraat bij constante drukval wordt uitgezet.

Het criterium voor een zuivere koekfiltratie is, dat bij een constante drukval over de koek de gemiddelde specifieke koekweerstand, $\langle r \rangle$, onafhankelijk is van V of L ($\langle r \rangle = dR/dL$). Bij niet samendrukbare koeken levert dit een rechte R - V lijn; lijn a in fig.

6.1.6.7. Bij koekfiltratie met samendrukbare koeken zal de R - V curve



asymptotisch tot een rechte naderen. De kromme b geeft een voorbeeld van een verstoppingsfiltratie. De curve c geeft aanvankelijk blokkeren aan, gevolgd door koekfiltratie.

Fig. 6.1.6.7. Filtratiecuren.

Er zijn een aantal aspecten van het filtreren die tot nu toe niet aan de orde gekomen zijn. In het kort zullen deze hierna worden besproken.

Om een goede filtratie te verkrijgen is de koekvorming van het allergrootste belang. Wil men snel en goed filtreren dan moet men er naar streven een losse, poreuze filterkoek te verkrijgen. De struc-

tuur van de koek wordt behalve door de deeltjesgrootte en de deeltjesvorm bepaald door de snelheid waarmee de koek wordt gevormd. Vooral bij het begin van de filtratie is deze snelheid van belang; filtreert men te snel dan is er kans dat het filtermedium verstopt. Ook later mag de filtreersnelheid niet te hoog worden opgevoerd daar gevaar bestaat voor te sterke compressie van de koek. De concentratie van de suspensie speelt bij dit alles een voorname rol; hoe hoger de concentratie hoe groter de porositeit van de filterkoek. In de praktijk is het een bekend verschijnsel dat sommige suspensies in verdunde vorm niet te filtreren zijn, terwijl de filtratie van geconcentreerde suspensies gemakkelijk verloopt. Ter verkrijging van een geconcentreerde suspensie laat men vaak het filtreren voorafgaan door indikken. Vanzelfsprekend heeft dit ook het voordeel dat dan een kleiner volume moet worden gefiltreerd.

Evenals bij sedimentatie kan men bij filtratie een aantal maatregelen nemen om de filtreerbaarheid te verbeteren. Een verhoging van de temperatuur is meestal gunstig, niet alleen door verlaging van de viscositeit, doch ook omdat temperatuurverhoging vaak een uitvlokkende werking heeft op allerlei suspensies. Voorts kan men proberen uitvlokking en coagulatie teweeg te brengen door toevoeging van elektrolyten e.d.

In moeilijker gevallen, bijv. slijmerige slurries, wordt veel gebruik gemaakt van filtratiehulpmiddelen ("filteraids"). Dit zijn inerte fijn verdeelde, gemakkelijk filtreerbare stoffen, die ongeveer dezelfde dichtheid hebben als de vaste deeltjes van de te filtreren suspensie. De overige eisen die men aan de filtratiehulpmiddelen stelt zijn:

- het vormen van een koek met een grote porositeit (0,85-0,90),
- een klein oppervlak,
- chemisch bestendig,
- niet te comprimeren; mechanisch voldoende sterk,
- geschikte niet uniforme deeltjes, aangepast aan die van de oorspronkelijke suspensie. Aan de deeltjesgrootteverdeling worden overigens hoge eisen gesteld, omdat te veel kleine deeltjes verstopping bevorderen en te veel grote deeltjes aanleiding geven tot "doorlopen" (niet helder filtraat).

Voorbeelden van filtratiehulpmiddelen zijn: diatomeeënaarde, per-

liet, cellulose, asbestvezels en kool.

Het gebruik van filtratiehulpmiddelen kan geschieden vóór de eigenlijke filtratie zowel als tijdens de filtratie. In het eerst genoemde geval wordt vóór de eigenlijke filtratie een dun laagje van filtratiehulpmiddel op het filterdoek aangebracht ("pre-coating"); dit laagje neemt de functie van het filterdoek over. Het filterdoek dient dan slechts als steunlaag. De poriën in het laagje filtratiehulpmiddel zijn kleiner dan in het filterdoek, terwijl het aantal poriën bovendien veel groter is.

De filtratie is in het algemeen een oppervlakte filtratie. Wordt van filtratiehulpmiddelen gebruik gemaakt tijdens filtratie, dan ontstaat een koek waarin de afgefiltreerde deeltjes uit de suspensie homogeen verdeeld zijn.

De optimale hoeveelheid toe te voegen filtratiehulpmiddel wordt bepaald door economische factoren, dus ook door de overweging, dat de koek dikker wordt met toenemende hoeveelheid. De keuze van het materiaal en de hoeveelheid ervan geschiedt veelal op experimentele gronden (mede overwegend of het filtraat waardevol is of de vaste stof of beide).

Keuze van filterdoek en apparaat.

Bij de keuze van een filtratie-apparaat voor een bepaald proces zal men er naar streven voor zo weinig mogelijk geld een zo hoog mogelijke filtratiecapaciteit te verkrijgen op een zo klein mogelijk vloeroppervlak bij een zo laag mogelijke operatiekosten.

De belangrijkste gegevens waarover men moet beschikken om tot een juiste keuze te komen zijn:

- $\frac{\text{filtratiecapaciteit}}{\text{vloeroppervlak}}$
- $\frac{\text{aanschafkosten}}{\text{filtratiecapaciteit}}$
- $\frac{\text{operatiekosten}}{\text{filtratiecapaciteit}}$

De aanschafkosten en het benodigd oppervlak kunnen worden verkregen uit de gegevens van de leverancier. De operatiekosten kunnen worden bepaald uit:

- $\frac{\text{grondstoffen}}{\text{filtratiecapaciteit}}$; dit komt neer op kosten van eventueel gebruikte filtratiehulpmiddelen, filterdoek en wasvloeistof.

- bediening ; de bediening kan men nagaan uit de constructie van het filter.

Uit voorgaande blijkt dat de filtratiecapaciteit een belangrijke rol speelt bij de keuze van een filtratieapparaat. Op grond van theoretisch kennis is de filtratiecapaciteit niet te berekenen, daar de theoretische kennis om de weerstand te bepalen, uit de eigenschappen van de slurry en de procescondities nog verre van voldoende is. Bovendien kan de beschikbare kennis niet volledig toegepast worden omdat geringe veranderingen in de procescondities, zoals druk en temperatuur, grote invloed kunnen hebben. De definitieve afmetingen zullen daarom steeds bepaald moeten worden aan de hand van gegevens verkregen met behulp van semi-technische apparatuur. Van groot belang bij het beproeven van semi-technische apparatuur is het werken met een slurry die representatief is voor de uiteindelijk te filtreren slurry. Een voorbeeld van een semi-technisch apparaat vinden we in fig. 6.1.6.7. Dit apparaat wordt toegepast wanneer we

de filtratiecapaciteit willen weten van filterapparatuur die onder vacuüm werken. De suspensie wordt in een bekersglas klaargemaakt, waarin zich een roerder bevindt. De zuigkap wordt van een filterdoek voorzien, waarvan de maaswijdte bekend is of is bepaald met een microscoop. De zuigkolf is met een rubberslang op een zuigkolf, of beter een cilinder met een maatverdeling, waarin vacuüm wordt onderhouden, aangesloten.

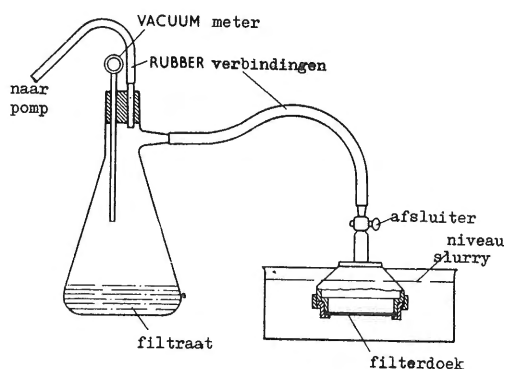


Fig. 6.1.6.7. Testfilter.

Tijdens het filtreren stroomt de vloeistof door de slang naar de kolf terwijl de koek zich op het doek verzamelt. De zuigkap met de verzamelde vaste stof kan zonodig in een bekersglas met wasvloeistof worden gedompeld.

Wil men de proef onder druk uitvoeren dan kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van een apparaat zoals afgebeeld in fig. 6.1.6.8.

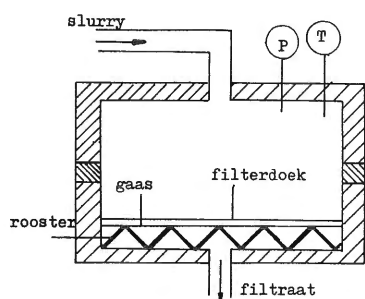


Fig.6.1.6.6. Druk-testfilter.

Met genoemde apparatuur kunnen de "zwartlooptijden", de specifieke koekweerstand en de doekweerstand worden bepaald.

In het geval van constante drukfiltratie krijgt men de gewenste grootheden met behulp van de filtratie-kromme zoals aangegeven in fig.

6.1.6.6. Wanneer men tevens de niet produktieve tijd kent kan men de filtratie capaciteit berekenen.

De niet produktieve tijd kan men schatten door:

- proeven op laboratorium of semi-technische schaal,
- gegevens van fabrikanten en/of derden (schoonmaken apparatuur).

De filtratieapparatuur die in de industrie in gebruik is, kan ingedeeld worden naar de manier waarop het drukverschil, nodig voor de filtratie, wordt verkregen:

- zwaartekrachtfilters; deze worden alleen gebruikt bij diep bed filtratie, veelal waterzuivering,
- druk- en vacuümfilters; deze worden gebruikt in een gebied variërend van klaring (lage concentraties) tot aan filtratie van vrij dikke slurries (concentratie ca. 50 %),
- centrifuges; deze worden gebruikt voor het filtreren van dikke slurries met een hoge filtratiesnelheid.

Bij de keuze van een apparaat moeten ook de eisen bekend zijn, die men wil stellen aan het filtraat en aan de koek.

Bij de keuze van de apparaten zijn de volgende aspecten van belang:

- helderheid van het filtraat,
- het toepasbare drukverschil,
- het constructiemateriaal (sterkte en corrosie),
- de capaciteit en de flexibiliteit,
- continu en discontinu bedrijf,
- druk- of vacuümfilter,
- de mogelijkheid tot wassen,
- verwijdering van de koek,
- gasdichte of steriele uitvoering,
- bedrijfszekerheid,

- kosten van afschrijving, arbeid, energie en hulpstoffen.

Op grond van gegevens verkregen met laboratoriumproeven over filtratiesnelheid en concentratie kan een aantal overwegingen worden gegeven voor de keuze van een apparaat:

- een zeer langzame filtratie is een argument voor het gebruik van een drukfilter,
- bij een lage tot matige filtratiesnelheid is bij ladingsgewijze filtratie een drukfilter nuttig,
- bij geconcentreerde suspensies gaat de voorkeur uit naar een continue werkwijze,
- bij continue filtratie is een vacuümfilter het best hanteerbaar,
- bij een matig snelle tot snelle filtratie wordt een vacuümfilter of een centrifuge gebruikt,
- bij een hoge filtratiesnelheid is een centrifuge het aangewezen apparaat,
- wanneer de koek zeer samendrukbaar is, is het gebruik van centrifuges niet aan te bevelen.

In tabel 6.1.6.2 is een overzicht gegeven van een aantal apparaten met hun werkgebied en een aantal voor- en nadelen.

Keuze van het filtermedium.

De keuze van het filtermedium is van groot belang voor het wel-slagen van de filtratie. De materiaalsoort en het type filter-medium laten een zeer ruime keuze toe uit natuurlijke, synthetische, metallische en keramische vezels, weefsels en platen. De volgende eisen zijn van belang:

- het produceren van een helder filtraat, met zo weinig mogelijk verlies aan vaste stof ten gevolge van "zwartloop",
- een voldoende lage weerstand voor doorstroming,
- een filterkoek moet gemakkelijk zijn te verwijderen,
- geen verstopping na korte of lange bedrijfstijd,
- een voldoende lange levensduur (chemische en mechanische bestendigheid) en zo nodig de mogelijkheid tot reinigen.

De poriën van een filterdoek behoeven niet altijd kleiner te zijn dan de deeltjes. Door het verschijnsel van brugvorming mag de poriëndiameter ca. 5 x zo groot zijn als de deeltjesdiameter. Er zal dan alleen in het begin wat "zwartloop" zijn. De brugvorming is

Tabel 6.1.6.2. Overzicht filtratie-apparatuur

Waardering (9 = hoogste)

Apparaat	Vaste stof gehalte (gew. %)	Deeltjesgrootte- gebied (micron)	Vochtge- halte koek	Koek wassen	Filtraat helder- heid	Kristal- breuk
<u>Centrifuges</u>						
Trommel	10 tot 50	2 - 30000	9	6	5	6
Conische zeef	10 tot 40	60 - 30000	7	-	5	7
Disk	0,005- 2	0,1 - 100	3	-	6 - 7	-
Schuif	20 tot 80	40 - 70000	9	5	4	4
Schraper	10 tot 50	2 - 30000	9	6	5	5
<u>Zwaartekracht filters</u>						
Trommel	0,08 - 0,8	50 - 6000	6	-	6 - 7	-
Roterende zeef	0,01 - 0,1	100 - 10000	-	-	6	-
Zand (diep bed)	0,002 - 0,01	0,1 - 50	-	-	7 - 9	-
Tafel/pan	5 - 70	50 - 80000	5 - 7	9	7	8
<u>Compressie filters</u>						
Automatische filterpers	0,2 - 40	1 - 200	7	7	7 - 8	-
Schroef	10 - 70	1 - 200	6	-	-	-
<u>Drukfilters</u>						
Trommel	0,7 - 8	5 - 200	5 - 6	7	7 - 8	8
Filterpers	0,002 - 30	1 - 100	6	7	7 - 9	8
Platen (hor. en vert.)	0,002 - 0,4	1 - 100	5 - 6	6 - 8	7 - 9	8
Zand (diep- bed)	0,002 - 0,02	0,2 - 60	-	-	7 - 9	-
<u>Vacuum filters</u>						
Band/pan	8 - 50	20 - 80000	5 - 7	9	7	8
Trommel	5 - 70	1 - 600	4 - 5	7	7 - 8	8
Platen (blad)	0,07 - 2	1 - 500	4 - 5	9	7	8
"Precoat"- trommel	0,01 - 0,1	0,6 - 100	-	-	8	-

o.a. afhankelijk van de concentratie en de deeltjesgrootte, -vorm- en grootteverdeling. Wanneer bij een filtratie de kans op verstopping van het doek groot is, bijv. door aanwezigheid van zeer kleine deeltjes of door neerslagvorming in het doek, dan zal de voorkeur naar een monofilament weefsel uitgaan boven een multifilament.

Het wassen van de filterkoek.

Het wassen van de filterkoek geschiedt in het algemeen met zuivere vloeistof waarvan de fysische eigenschappen goed overeenstemmen met het filtraat. De doorstromingsvergelijkingen zijn dan direkt toepasbaar dit wil zeggen dat het wassen bij hetzelfde drukverschil kan plaatsvinden met een filtratiesnelheid die gelijk is aan die aan het eind van de filtratie.

Het wassen vindt in twee trappen plaats:

- het filtraat (moederloog) wordt in de koek verdrongen door de wasvloeistof; hierdoor kan ongeveer 90 % van het filtraat worden verwijderd,
- diffusie; omdat grote en kleine poriën aanwezig zijn, zullen bepaalde delen van de koek in het geheel niet, of bijna niet, worden doorstroomd. Op die plaatsen vindt de vervanging van de moederloog alleen door diffusie plaats.

Doordat de koek tijdens het wassen veranderingen kan ondergaan, kunnen er scheuren in de koek ontstaan terwijl bovendien bij het wassen andere stroomrichtingen kunnen worden gekozen dan bij filtratie. Soms treedt er ook nog kanaalvorming op. Deze veranderingen hebben tot gevolg dat slechts een gedeelte van de koek wordt gewassen.

Een enkele keer past men lucht toe om de moederloog uit de koek te verwijderen. Een gedeeltelijke droging van de koek vindt dan eveneens plaats. Het verwijderen van de vloeistof voor het verkrijgen van een redelijke droge koek kan op de volgende wijzen plaatsvinden.

1. Bij roterende vacuumfilters geschiedt het drogen door na het wassen lucht door de koek te zuigen, waardoor de vloeistof voor een deel verdrongen wordt. Een eis is, dat het drukverschil groter is, dan de capillaire druk van de vloeistof in de poriën.

Wanneer men stoom doorblaast of -zuigt, kan het resterende vochtgehalte nog verder worden verlaagd dan met lucht.

2. Bij mechanisch persen van de filterkoek wordt de open ruimte in filterkoek verminderd en daardoor het vochtgehalte. Dit kan alleen bij samendrukbare koeken. Het best lenen zich uit vlokken of agglomeraten opgebouwde koeken. Het persen wordt vaak uitgevoerd in speciale uitvoeringsvormen van filterpersen.

Technische uitvoering van de filtratie.

Van de filtratie-apparatuur voor vast/vloeistof en vast/gas scheidingen zullen de belangrijkste typen worden besproken. Deze zijn filterpersen, bladfilters, kaarsenfilters, roterende filters, filtrerende centrifuges en natte en droge luchtfilters.

Filterpersen.

Filterpersen zijn de oudste en bekende drukfilters. Hierbij zijn twee hoofdvormen te onderscheiden, n.l. de platen- en ramenfilterpersen en de kamerfilterpersen. De platen- en ramenfilterpersen zijn opgebouwd uit afwisselende filterplaten en ramen die de filterplaten op enige afstand van elkaar houden. De elementen worden mechanisch of hydraulisch op elkaar gedrukt. Fig. 6.1.6.7 geeft schematisch een ramenfilterpers weer. Ze worden meestal niet bij drukken groter dan 10 bar gebruikt.

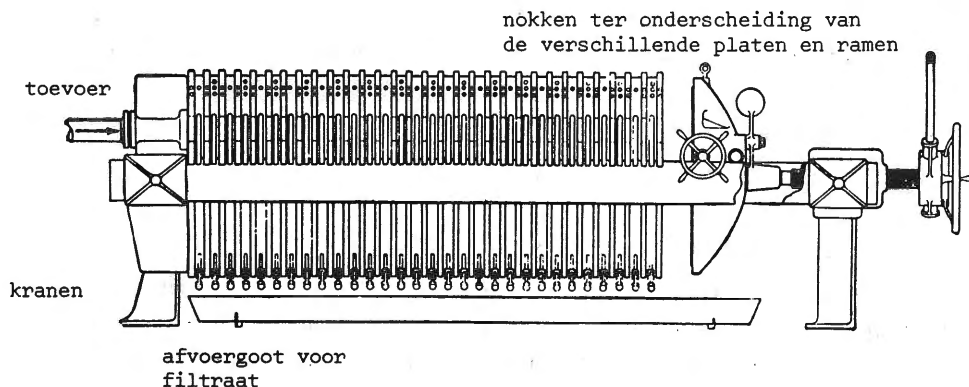


Fig. 6.1.6.7. Platen- en ramenfilterpersen.

De platen hebben een geribbeld oppervlak, 6.1.6.8. De holle ramen zijn gescheiden van de platen door een filterdoek. De platen en ramen worden tegen elkaar aan gedrukt. Hierdoor wordt een kamer

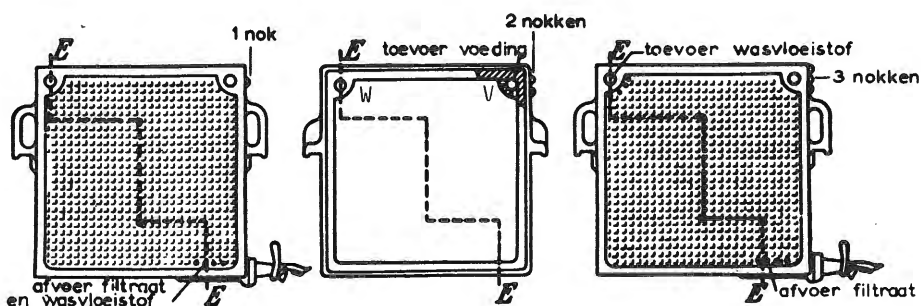


Fig. 6.1.6.8. Platen en ramen van een filterpers met open afvoer en met de mogelijkheid tot uitwassen van de filterkoek.

gevormd tussen ieder der opvolgende platen. De slurrie wordt door het kanaal (V) in de kamers gevoerd. Op het doek wordt aan beide zijden van een kamer een koek gevormd, zie fig. 6.1.6.9. Het filtraat stroomt langs het geribbelde oppervlak van de platen naar beneden en kan van iedere plaat gescheiden worden opgevangen om bij storing direct te kunnen ingrijpen. Bij het wassen wordt de wasvloeistof via het waskanaal (W) tussen de platen en het filterdoek toegevoerd, waardoor de koek geheel door de wasvloeistof doorstroomd wordt. De wasvloeistof loopt via de naast liggende plaat weg. Na het wassen kan de koek met lucht doorgeblazen worden om de overmaat vloeistof te verwijderen.

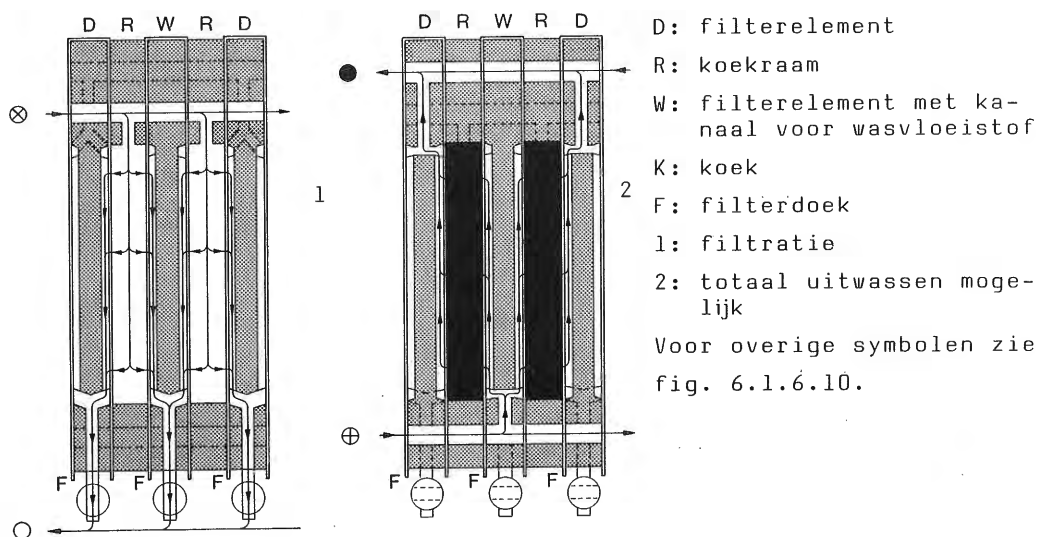


Fig. 6.1.6.9. Platen en ramenfilterpers.

Voor het verwijderen van de koek moet de pers ontmanteld worden. Om de verschillende platen en ramen uit elkaar te houden zijn nokken aangebracht, fig. 6.1.6.7 en - 8: één op de platen waar geen wasvloeistof ingevoerd wordt, twee op de ramen en drie op de platen waar wel wasvloeistof ingevoerd wordt. In fig. 6.1.6.9 is een lengte-doorsnede gegeven, met de situatie tijdens het filtratie- en tijdens het wasproces, terwijl in fig. 6.1.6.10 schematisch de functie van de verschillende openingen in de platen is weergegeven.

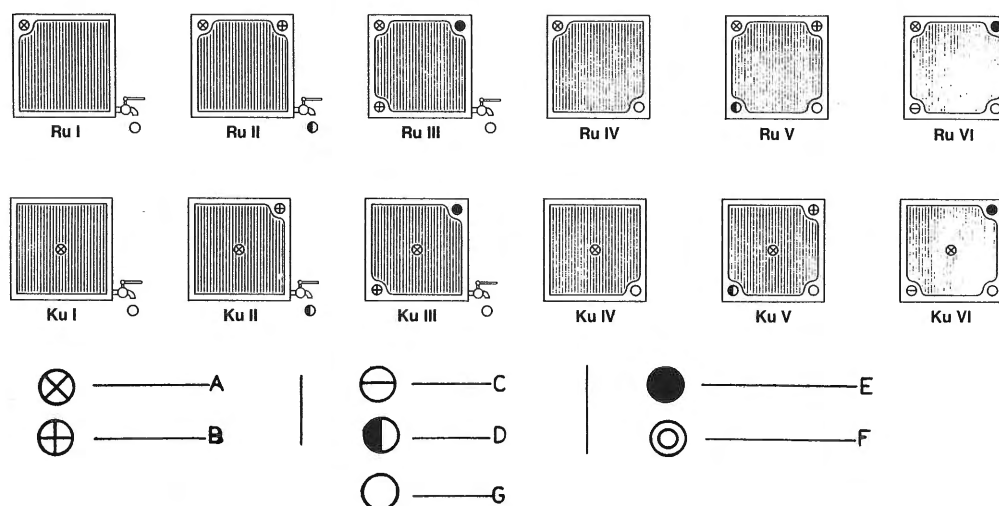


Fig. 6.1.6.10. Schematisch overzicht van de openingen in een ramen- en kamerfilterpers.

- | | |
|--|---|
| A. kanaal voor te filtreren vloeistof | I . afvoer gefiltreerde vloeistof per element; niet mogelijk koek te wassen |
| B. kanaal voor toevoeging van wasvloeistof | II . afvoer gefiltreerde vloeistof per element; gedeeltelijk uitwassen mogelijk |
| C. kanaal voor toevoeging van wasvloeistof tevens afvoer filtraat | III. afvoer gefiltreerde vloeistof per element; totaal uitwassen mogelijk |
| D. afvoer van wasvloeistof tevens afvoer filtraat | IV . gecombineerde gefiltreerde vloeistofafvoer; niet mogelijk koek te wassen |
| E. afvoer wasvloeistof | V . gecombineerde gefiltreerde vloeistofafvoer; gedeeltelijk uitwassen mogelijk |
| F. afvoer lucht | VI . gecombineerde gefiltreerde vloeistofafvoer; totaal uitwassen mogelijk. |
| G. afvoer filtraat | |
| Ru ramenpers met kanalen in de filterelementen- en ramenhoeken | |
| Ku kamerfilterpers met invoer van de te filtreren vloeistof in het midden van de elementen | |

In sommige filterpersen zijn voorzieningen aangebracht voor verhitting met stoom om de viscositeit van het filtraat te verlagen, om een hogere filtratie capaciteit te verkrijgen.

De kamerfilterpers bevat alleen platen. Deze hebben een zodanige vorm dat hiertussen kamers ontstaan, fig. 6.1.6.11. Elke plaat is aan weerszijden voorzien van een handvat, dat in een halve cirkelvorm (het oor) eindigt. De oren steunen op horizontale kolommen,

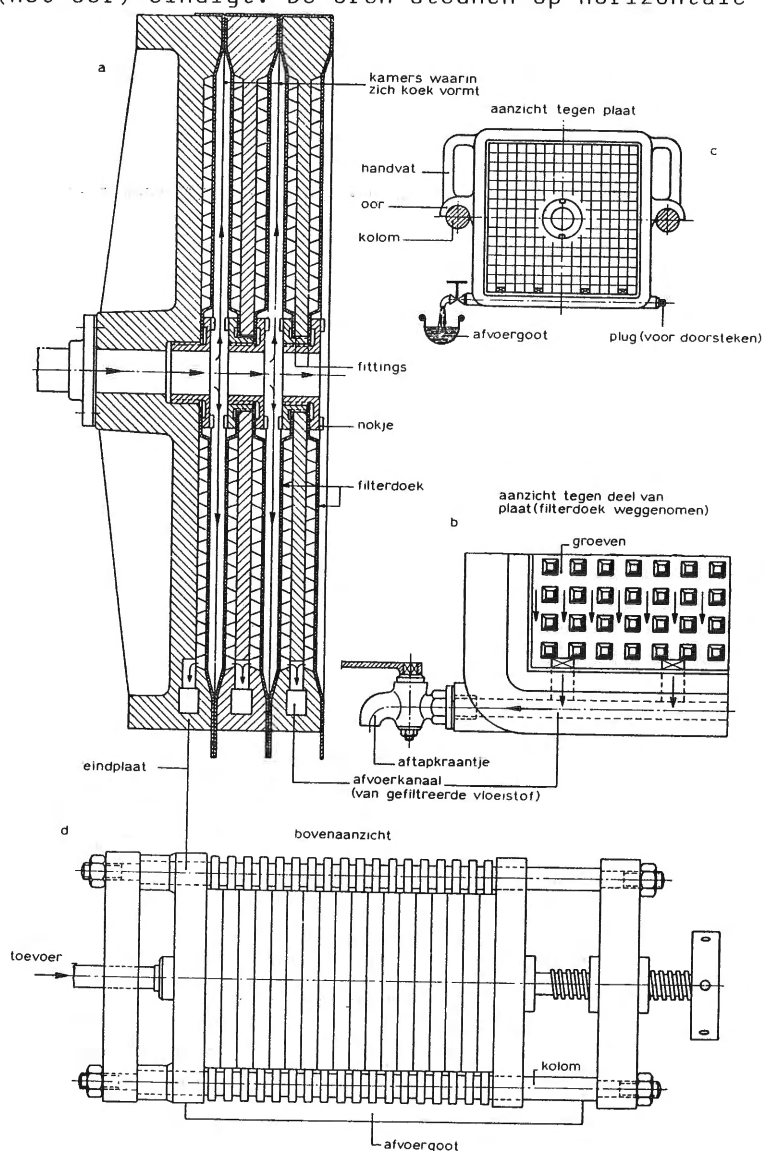
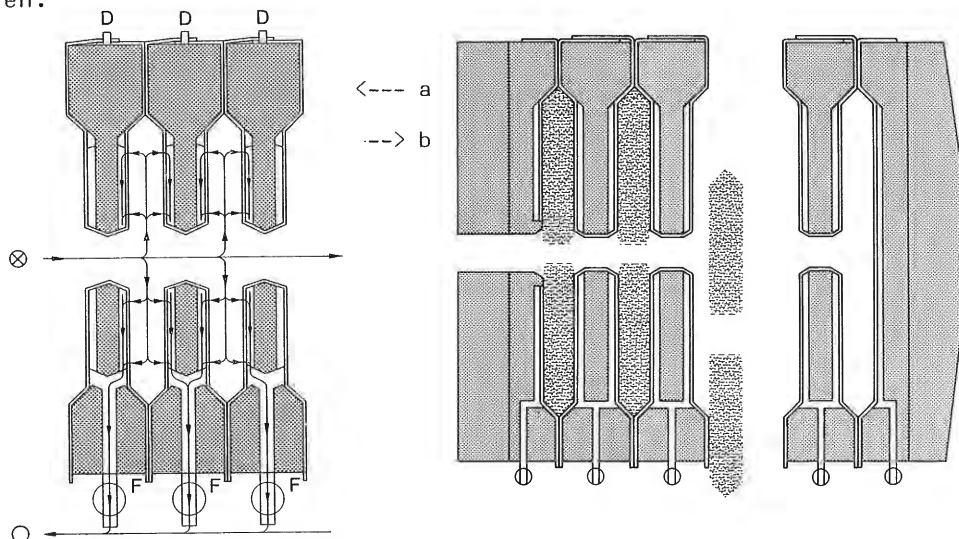


Fig. 6.1.6.11. Doorsneden van een kamerfilterpers.

waarlangs de platen heen en weer geschoven kunnen worden. Het invoerkanaal bevindt zich hier in het midden van de platen. Doordat de koekinhoud van de platen slechts gering is, worden kamerpersen vooral toegepast bij slurries, die weinig vaste stof bevatten of in die gevallen wanneer de gevormde koek slijmerig of slibberig van aard is en de vaste stof van weinig waarde.

In fig. 6.1.6.12 is een lengtedoorsnede gegeven, met de situatie tijdens het filtratie- en het wasproces. In fig. 6.1.6.10 is de functie van de verschillende openingen in de platen schematisch weergegeven.



Kamersfilterpers. a. Begin van de filtratie; b. Eind van de filtratie.

Fig. 6.1.6.12.

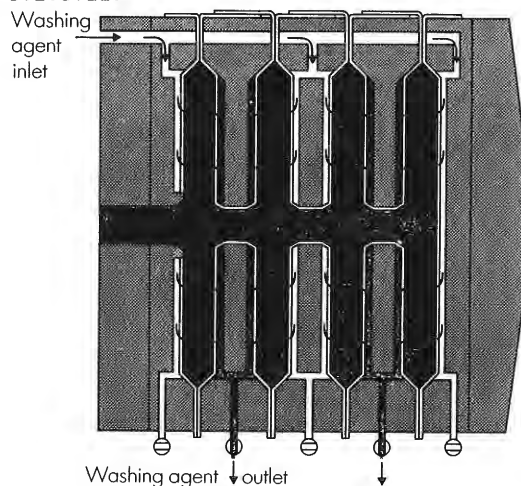


Fig. 6.1.6.12 c. Kamersfilterpers.

Wassen van de koek.

De voordelen van filterpersen zijn:

- Eenvoudige constructie. Er kan bovendien gebruik gemaakt worden van een groot aantal constructiematerialen.
- Geen bewegende delen en dus lage onderhouds- en energiekosten.
- Groot filteroppervlak op een klein vloeroppervlak.
- Eenvoudige variatie in capaciteit is mogelijk door toevoeging van platen en ramen.
- Opsporen van eventuele lekkage is eenvoudig.
- Hoge filtratie drukken kunnen worden gebruikt.
- De filterdoeken kunnen gemakkelijk worden vervangen.

De nadelen van de filterpersen zijn:

- Niet continu in gebruik. Door steeds ontmantelen ontstaat er grote slijtage van de filterdoeken, speciaal bij de kamerfilterpersen.
- Arbeidsintensief.

De nadelen, als niet continu in gebruik en arbeidsintensief, zijn in de moderne uitvoeringsvormen van filterpersen nagenoeg opgelost. De platen en ramen kunnen in moderne apparaten automatisch worden losgemaakt en over de rand laten bewegen, waardoor de koek afvalt of zelfs afgetrild kan worden.

Theorie van het wassen van de filterkoek.

Voor het berekenen van het waseffect van een filterkoek kan van een aantal veronderstellingen worden uitgegaan.

- Laminaire stroming door de kapillairen.
- Laminaire ,, ,, de ,, met dode ruimten.
- Laminaire ,, ,, de ,, met diffusie.
etc.

Het uitwasproces kan op verschillende manieren theoretisch worden benaderd. Hier wordt uitgegaan van een semi-technische relatie.

Iedere keer wanneer een hoeveelheid wasvloeistof de koek is gepasseerd, die gelijk is aan het filtraatresidu in de koek, is een waseffect E (in %) opgetreden. Aan filtraat residu (R) is in de koek overgebleven:

$$R = 1 - \frac{E}{100}$$

Na twee keer de genoemde hoeveelheid gebruikt te hebben geldt:

$$R = \left(1 - \frac{E}{100}\right)^2$$

en na n keer deze hoeveelheid

$$R = \left(1 - \frac{E}{100}\right)^n \quad (6.1.6.13)$$

De parameter n heet de "wash ratio":

$$n = \frac{\text{volume wasvloeistof}}{\text{volume vloeistof in de koek}}$$

Deze "theorie" zegt niets over de grootte van E. Deze grootte moet experimenteel worden bepaald. De faktor n daarentegen kan worden berekend indien we uitgaan van een laminaire stroming door de kapillairen.

Indien de wasvloeistof dezelfde fysische eigenschappen heeft als die van het filtraat vindt het wassen bij hetzelfde drukverschil over de koek met dezelfde filtratiesnelheid plaats als aan het eind van het filtratieproces. De wassnelheid wordt volgens vergelijking 6.1.6.10:

$$v_{\text{was}} = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{A} \frac{V}{t_{\text{was}}} = \frac{\Delta P}{r\eta} \frac{1}{L} \quad \text{indien } L' \ll L$$

$$V_{\text{was}} = \frac{A}{r} \frac{\Delta P}{\eta L} \text{tot} \cdot t_{\text{was}} \quad (6.1.6.14)$$

Het volume van de vloeistof in de koek (V_k) volgt uit:

$$V_k = L \cdot A \cdot \epsilon \quad (6.1.6.15)$$

Uit (6.1.6.14) en (-15) en de definitie van n volgt:

$$n = \frac{V_{\text{was}}}{V_k} = \frac{\Delta P}{r \eta \epsilon} \text{tot} \frac{t_{\text{was}}}{L^2}$$

of

$$n = \frac{V_{\text{was}}}{V_k} = \frac{A^2}{r \eta \epsilon} \frac{\Delta P}{V^2} \text{tot} \cdot \frac{t_{\text{was}}}{L^2} \quad (6.1.6.16)$$

Uit vergelijking 6.1.6.12 volgt, indien $t_1 = V_1 = 0$ en $L' \ll L$ dat:

$$t_F = \frac{r \eta v V^2}{2 A^2 \Delta P} \quad (6.1.6.17)$$

Uit (6.1.6.16) en (-17) volgt:

$$\frac{V_{\text{was}}}{V_K} = \frac{t_{\text{was}}}{t_F} \cdot \frac{1}{\epsilon \cdot v} \quad (6.1.6.18)$$

$$v = \frac{L \cdot A}{V}; \quad v = \frac{m_s}{(1-\epsilon)\rho_s} \cdot \frac{1}{V}; \quad v = \frac{V_g \cdot C_s}{(1-\epsilon)\rho_s} \cdot \frac{1}{V} \quad (6.1.6.19)$$

C_s = vaste stof concentratie in de slurrie (kg/m^3),

V_g = totale volume dat naar het filter gepompt is, of het volume dat het grensvlak tussen suspensie en koek is gepasseerd op tijdstip t ,

V_R = volume dat het grensvlak tussen koek en doek is gepasseerd;

$$V_R < V_g,$$

V_K = hoeveelheid vloeistof die de poriën in de koek opvult.

Als de hoeveelheid vloeistof in het filter verwaarloosd wordt en de hoeveelheid filtraat V is geldt:

$$V_R = V,$$

$$V_g = V + V_K,$$

Voor zeer verdunde suspensies en wasvloeistoffen is $\epsilon \approx 1$. Hier-voor geldt dat $V_g = V$ zodat vergelijking 6.1.6.19 wordt:

$$v = \frac{C}{(1-\epsilon)\rho_s} \quad (6.1.6.20)$$

Deze vergelijking gesubstitueerd in vergelijking 6.1.6.18 geeft:

$$n = \frac{V_{\text{was}}}{V_K} = \frac{(1-\epsilon)\rho_s}{2 \epsilon C_s} \cdot \frac{t_{\text{was}}}{t_F} \quad (6.1.6.21)$$

Voor een niet samendrukbare koek en een gegeven ρ_s en C_s leert vergelijking 6.1.6.21 dat n evenredig is met t_{was}/t_F . Samen met vergelijking 6.1.6.13 kan de invloed van t_{was} op R worden nagegaan.

De optimale filtratiecyclus.

De optimale koekdikte in filterpersen hangt af van de koekweerstand en de tijd nodig om de koek te verwijderen en het apparaat opnieuw in werking te stellen. Hoewel bij een dunne koek een hoge filtratiesnelheid wordt verkregen is de tijd die nodig is om deze koek te verwijderen en het apparaat opnieuw in werking te stellen groot ten opzichte van de tijd die het apparaat filtreert.

Voor een filter, die tijdens het filtreren onder constante druk werkt, geldt:

$$\frac{t}{V} = \frac{r \cdot \eta \cdot V}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P} \cdot V + \frac{r \cdot \eta \cdot L'}{A \cdot \Delta P} \quad \text{met } L' \ll L$$

of

$$\frac{t}{V} = B_1 \cdot V + B_2. \quad (6.1.6.22)$$

B_1 en B_2 zijn constanten.

De filtratietijd is:

$$t = B_1 \cdot V^2 + B_2 \cdot V$$

De tijd nodig voor het verwijderen van de koek en het opnieuw in bedrijf stellen van het apparaat, t' , is onafhankelijk van de eigenschappen van de koek en de koekdikte. De totale tijd nodig voor een filtratiecyclus waarbij een volume V aan filtraat wordt opgevangen is $t + t'$.

De gemiddelde filtratiesnelheid, $V/(t+t')$, wordt:

$$W = \frac{V}{B_1 \cdot V^2 + B_2 \cdot V + t'} \quad (6.1.6.23)$$

W is maximaal wanneer $dW/dV = 0$.

Het differentiëren van vergelijking 6.1.6.23 en het nul stellen ervan geeft:

$$B_1 V^2 + B_2 V + t' - V(2B_1 V + B_2) = 0$$

Hieruitvolgt:

$$t' = B_1 \cdot V^2$$

of

$$V = \sqrt{\frac{t'}{B_1}} \quad (6.1.6.24)$$

Wanneer de weerstand van het filtermedium wordt verwaarloosd, evenals die van de koek die tijdens de "zwartloop" wordt gevormd, $V_1 = 0$, geldt:

$$\frac{t}{V} = B_1 \cdot V$$

of

$$t = B_1 \cdot V^2 \quad (6.1.6.25)$$

Uit (6.1.6.24) en (-25) volgt dat de tijd die nodig is voor het filtreren gelijk is aan de tijd dat het filter buiten werking is. In de praktijk zal de filtratietijd langer zijn daar de weerstand van het filtermedium (vertegenwoordigd door B_2V) en de koekvorming tijdens de "zwartloop" verwaarloosd zijn.

In het algemeen geldt; hoe lager de specifieke koekweerstand hoe dikker de koek.

Bladfilters (drukfilters)

Een bladfilter bestaat uit een metalen frame of een gegolfde plaat waarover een filterdoek is bevestigd, fig. 6.1.6.13. De bladen worden gedompeld in de suspensie die onder druk in het filterapparaat wordt gebracht (drukfilters). Het is ook mogelijk de suspensie aan te zuigen door middel van een vacuumpomp. Het filtraat wordt dan via de bladfilters afgezogen. In beide gevallen bouwt de koek zich aan de buitenzijde van het blad op. Een filterapparaat bestaat uit een aantal bladfilters achter of naast elkaar opgehangen aan rails. Naar de vorm van de bladfilters kunnen verschillende soorten onderscheiden worden.

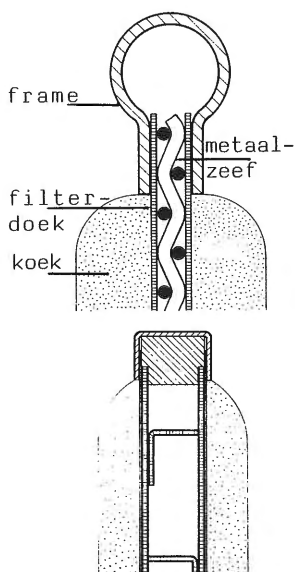


Fig. 6.1.6.13. Filterblad.

Kelly-filter.

Het Kelly-filter bestaat uit een aantal rechthoekige bladen van verschillende grootte, die in de lengterichting van het apparaat staan opgesteld in een horizontaal cilindrisch omhulsel, fig. 6.1.6.14.

De werkdruk van het filter van Kelly varieert van 4 - 25 bar. Om de koek te verwijderen moeten de bladen naar buiten worden gereden waardoor het filter een groot vloeroppervlak vraagt.

Het filtratieverloop van drukfilters verloopt via opeenvolgende charges hetgeen schematisch in fig. 6.1.6.15 is weergegeven.

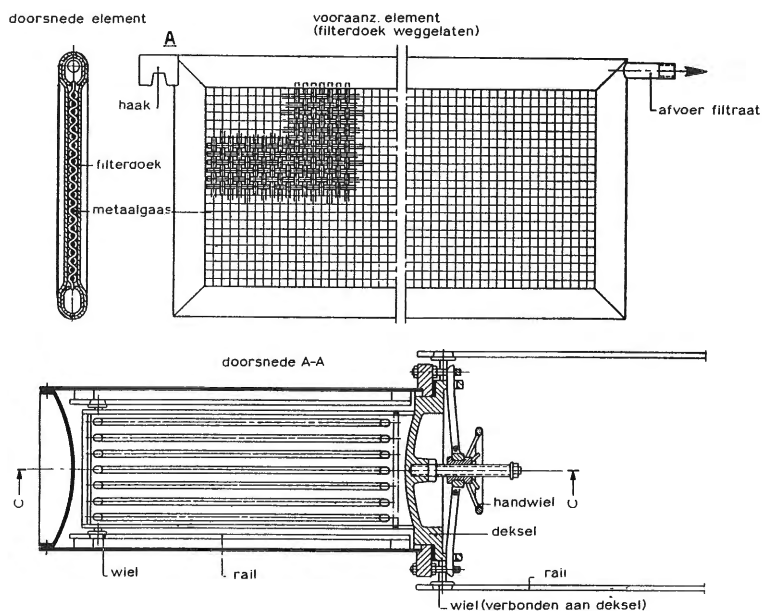


Fig. 6.1.6.14. Kellyfilter.

<--- Halve doorsnede van het Kellyfilter op een andere schaal.

- a. dikte van het filterdoek,
- b. invoer te filtreren vloeistof,
- c. totale afvoer gefiltreerde vloeistof,
- d. vaste framebalken,
- e. aanzicht voorkant filterpers met één afsluiter voor elk element,
- f. dwarsdoorsnede over halve cilinder met filterelementen,
- g. filterelement bestaande uit raam en doek, in het raam verticale afstandhouders van de koek.

Halve doorsnede Kelly-filter.

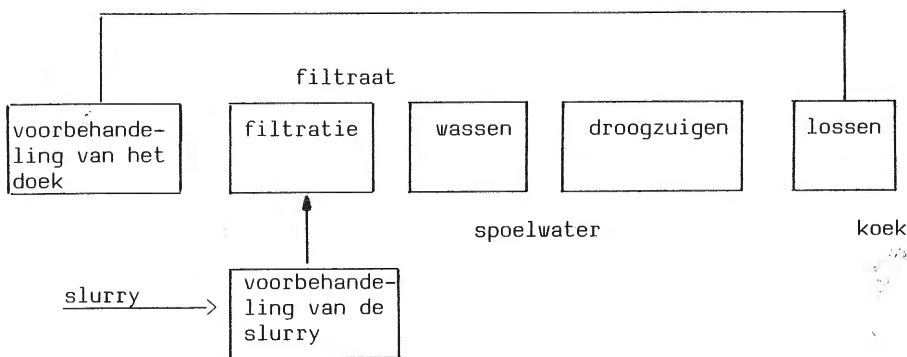
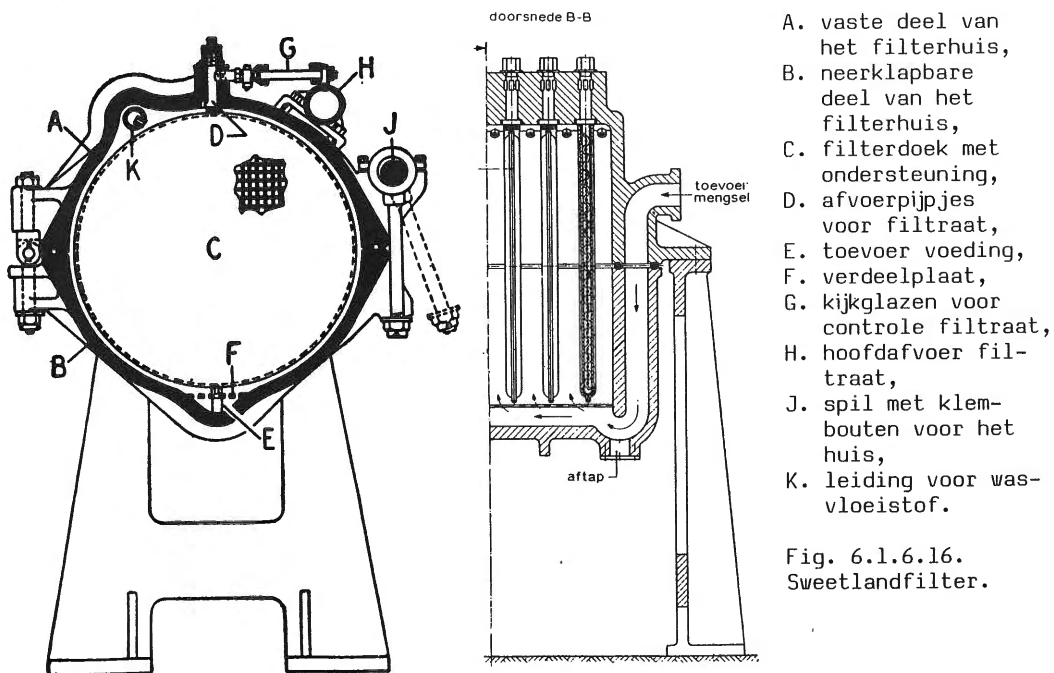


Fig. 6.1.6.15. Filtratieverloop.

Sweetland-filter.

Het Sweetland-filter, fig. 6.1.6.16, bestaat uit cirkelvormige bladen van dezelfde grootte, die achter elkaar zijn opgehangen in een cirkelvormig omhulsel. De filtratiecyclus is hetzelfde als bij het Kelly-filter, uitgezonderd dat de koek kan worden verwijderd zonder dat de bladen worden verplaatst. De cilinder bestaat uit twee helften. De onderste cilinder kan via een scharnierbevestiging opengeklapt worden voor de afvoer van de koek.



- A. vaste deel van het filterhuis,
- B. neerklapbare deel van het filterhuis,
- C. filterdoek met ondersteuning,
- D. afvoerpijpjes voor filtraat,
- E. toevoer voeding,
- F. verdeelplaat,
- G. kijkglazen voor controle filtraat,
- H. hoofdafvoer filtraat,
- J. spil met klem-bouten voor het huis,
- K. leiding voor was-vloeistof.

Fig. 6.1.6.16. Sweetlandfilter.

Vallez-filter.

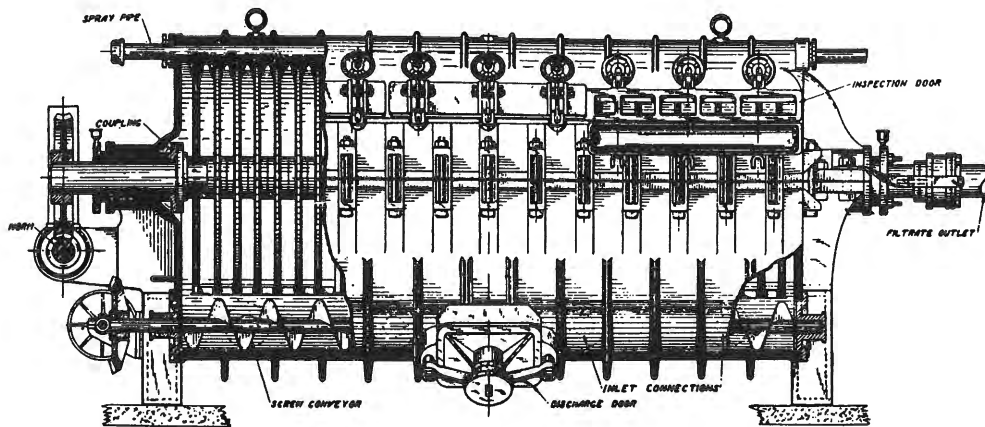
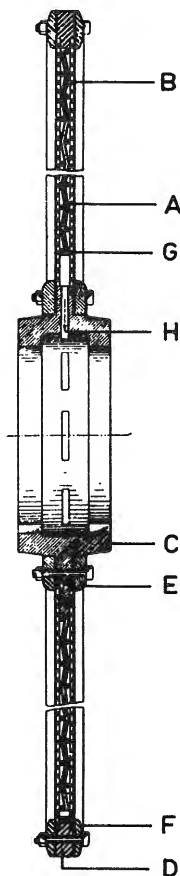


Fig. 6.1.6.17. Vallez filter met constructie van de filterondersteuning.



- A. geperforeerde plaat,
- B. gaas,
- C. naaf,
- D. tussenring,
- E, F. klemmen,
- G. filterdoek,
- H. afvoerkanaal voor filtraat.

Het Vallez filter bestaat evenals het Sweetland filter uit cirkelvormige bladen die om een as zijn gemonteerd, zodat ze kunnen roteren, fig. 6.1.6.17. De filtratiecyclus is hetzelfde als bij de voorgaande filters.

Niagara-filters.

Op hetzelfde principe als de voorgaande filters berusten de filters die bekend staan als Niagara-filters. Deze worden zowel horizontaal als vertikaal opgesteld. In fig. 6.1.6.18 is een ver-

tikale opstelling schematisch weergegeven. De filterelementen zijn opgebouwd uit metaalgaas, dat aan beide zijden bespannen is met fijn gaas.

De filterkoek kan op verschillende manieren van het filterelement worden verwijderd, zoals:

- droge koeklossing,

Hierbij wordt gebruik gemaakt van een vibrator waardoor de koek van de filterelementen afbreekt en via een deur wordt afgevoerd.

- natte koeklossing.

Bij deze methode wordt de koek van de elementen los gespoten door een heen- en weergaande sproeipijp.

De gevormde slurry wordt via een grote aftapopening afgevoerd.

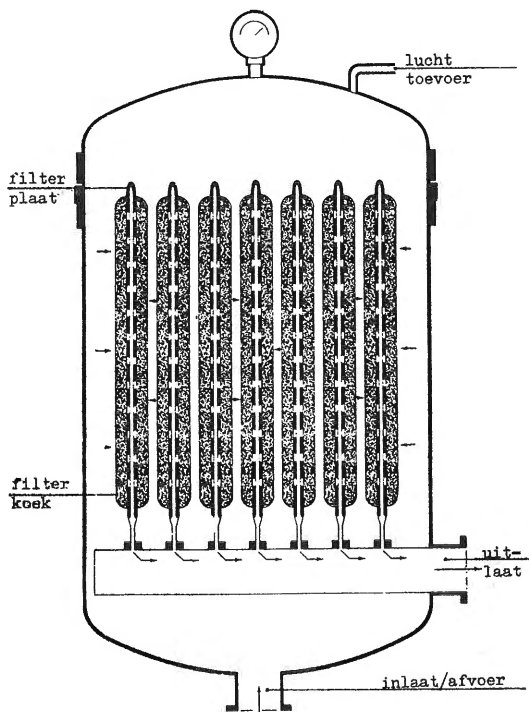


Fig. 6.1.6.18. Niagara-filter.

Vertikale uitvoering.

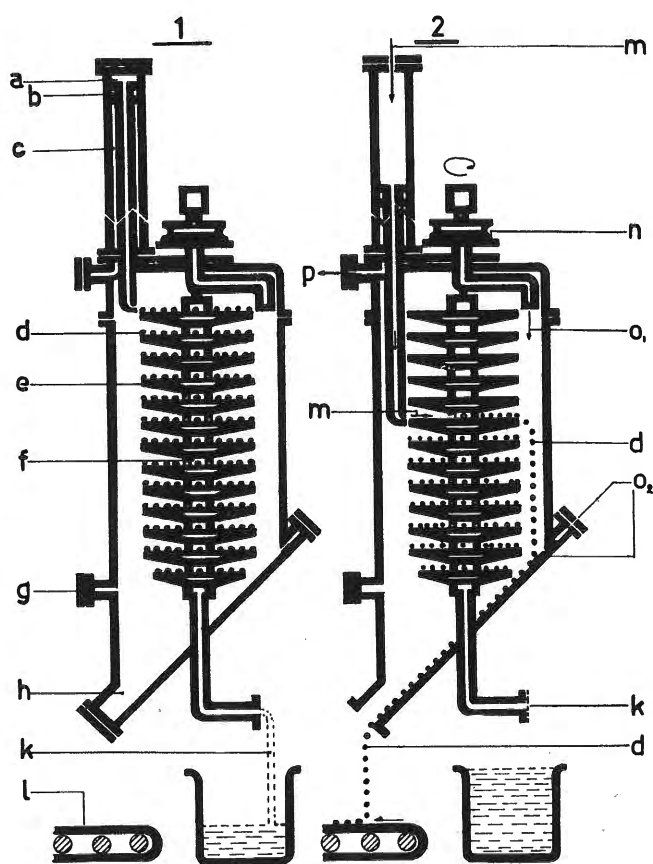
De besproken drukfilters hebben als voordeel dat ze veel filteroppervlak hebben ten opzichte van het ingenomen vloeroppervlak. Een nadeel van deze filters is dat ze discontinu of semi-continu werken, terwijl na het beeindigen van de filtratiecyclus het vat nog gevuld is met slurry het zgn. restvolume. Deze restvolume is bij de drukfilters moeilijk te verwijderen. Wil men het volume verwijderen door het met bijv. perslucht door de filterelementen te persen dan komen, bij het zakken van het vloeistofniveau, de filter-

elementen met lucht in aanraking. De koek droogt ter plaatse uit waardoor de lucht door dit droge gedeelte verdwijnt waardoor er geen druk in het vat kan worden opgebouwd om de vloeistof via de koek te verwijderen. De beste werkwijze is om de overblijvende slurry snel uit het vat te pompen waarbij de restvolume onder luchtdruk wordt gezet om te voorkomen dat de koek van de filterelementen valt.

Continue filters.

Bij de tot nu toe besproken filters is geen continu verlopende bedrijfsvoering te verkrijgen. Dit nadeel heeft men op verschillende manieren trachten op te heffen. Daartoe kan worden uitgegaan van filtreren onder druk of vacuüm.

Filtreren onder druk.



Bij het toepassen van druk kunnen semi-continu werkende drukfilters en persbandfilters worden onderscheiden. Een voorbeeld van een semi-continu drukfilter is weergegeven in fig. 6.1.6.19.

Fig. 6.1.6.19. Fulda-filter.

1. toestel tijdens filtratie.
- a. perslucht of inert gas,
- b. zuiger in hoogste stand,
- c. vloeistof onder druk,
- d. filterdoek,
- e. schotel met filterend oppervlak aan de bovenzijde,
- f. holle as,
- g. invoer te filtreren vloeistof,
- h. gesloten afvoer,

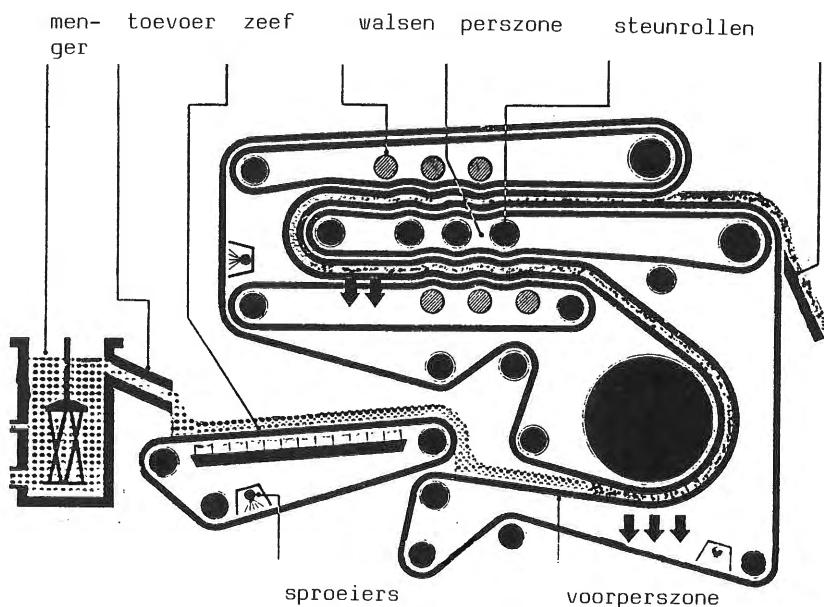
k. gefiltreerde vloeistof, l. stilstaande transportband.

2. toestel tijdens het reinigen.

m. invoer van perslucht of inert gas, n. riemschijf of motor met verschillende toerentallen, O_1 . toevoer perslucht of inert gas, d. vaste stof, O_2 . toevoer perslucht of inert gas, k. afgesloten filtraatleiding, l. transportband l vaste stof afvoerend.

Het filter bestaat uit een vertikaal vat, waarin zich een holle, vertikale as, bevindt. Op deze as zijn een aantal ronde filterplaten horizontaal bevestigd. Deze zijn aan de bovenkant van een filtermedium voorzien. Als de koek de gewenste dikte heeft bereikt of als de weerstand tot de maximumwaarde is opgelopen, kan men de koek uitwassen, daarna zonodig drogen met lucht en verwijderen. Dit filter onderscheidt zich ten opzichte van de besproken filters in de wijze van verwijderen van de koek. Het filter bezit namelijk de mogelijkheid de holle as met filterplaten snel te laten roteren waardoor de koek van de platen wordt geslingerd. Hoewel dit filter in wezen discontinu is kan in feite worden gesproken van een continu filter daar bij de meeste filtraties de regeneratie tijd zeer kort is in vergelijking met de bedrijfstijd.

Persbandfilter.



In fig.

6.1.6.20 is een persbandfilter weergegeven. De suspensie wordt via een uitlekband gevoerd naar de persband, waarna de druk geleidelijk wordt opgevoerd.

Fig. 6.1.6.20.
Persbandfilter.

Vacuümfilters.

Door gebruik te maken van onderdruk (vacuüm) is het technisch goed mogelijk filters te maken met continuwerking. Vacuüm in plaats van druk heeft echter het nadeel dat het maximaal drukverschil minder dan 1 bar bedraagt terwijl het opwekken van onderdruk duurder is dan het opwekken van overdruk.

De continu werkende vacuümfilters kunnen onderverdeeld worden in een aantal groepen:

- bandfilters; - trommelfilters; - plaatfilters; - kaarsenfilters.

Bandfilters.

Bandfilters bestaan er in vele uitvoeringsvormen. De band, een eindloze filterdoek, loopt over een aantal rollen. De bekendste uitvoering is waarbij bakjes onder de band over enige afstand met de band meelopen en vervolgens weer terugkeren, fig.6.1.6.21.

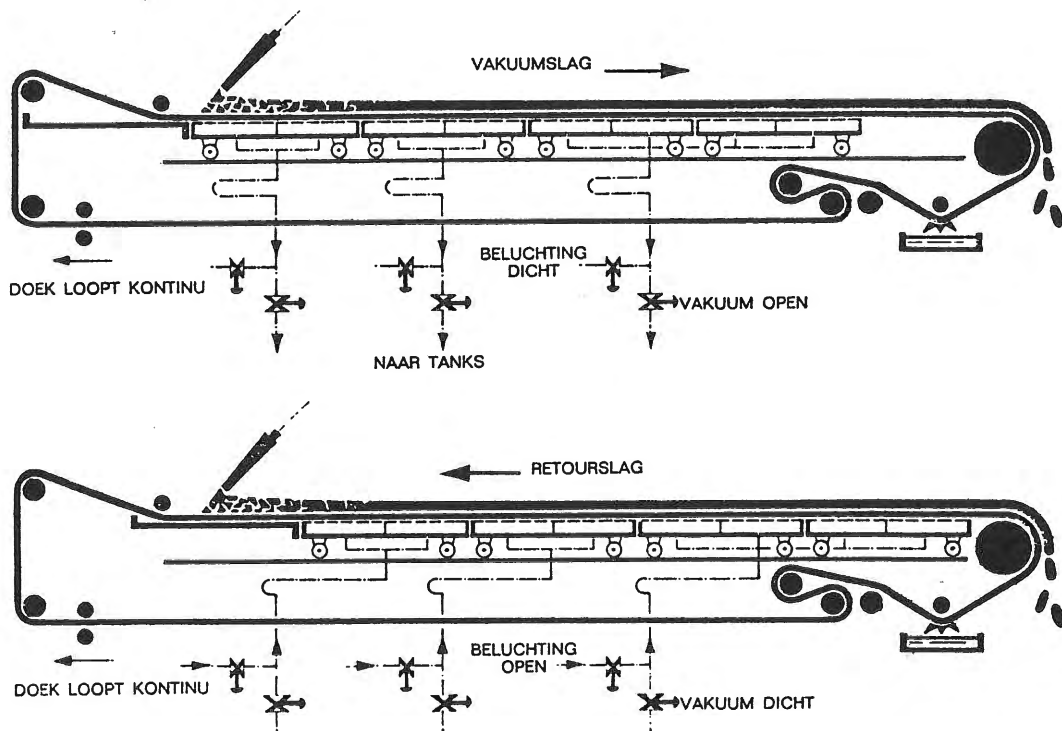
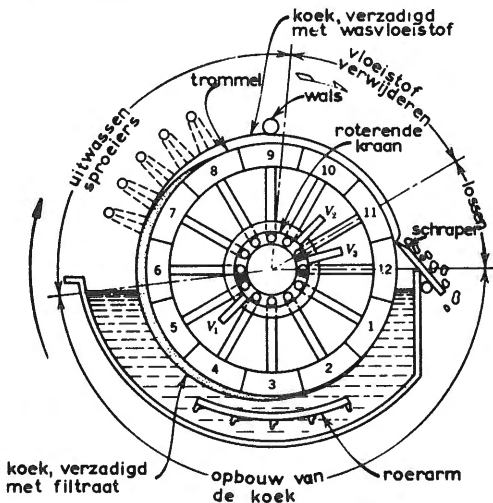


Fig. 6.1.6.21. Vacuumbandfilter.

Continue trommelfilters.

Onder de continue trommelfilters vallen de roterende trommelfilters, die in de levensmiddelenindustrie veel worden gebruikt. In fig. 6.1.6.22 is een roterende trommelfilter weergegeven, die uitwendig filtreert.



V_1 : afvoer filtraat,
 V_2 : afvoer wasvloeistof,
 V_3 : perslucht.

Fig. 6.1.6.22. Doorsnede van een roterend trommelfilter.

Er bestaan ook uitvoeringsvormen, fig.6.1.6.23, waar de slurry in de

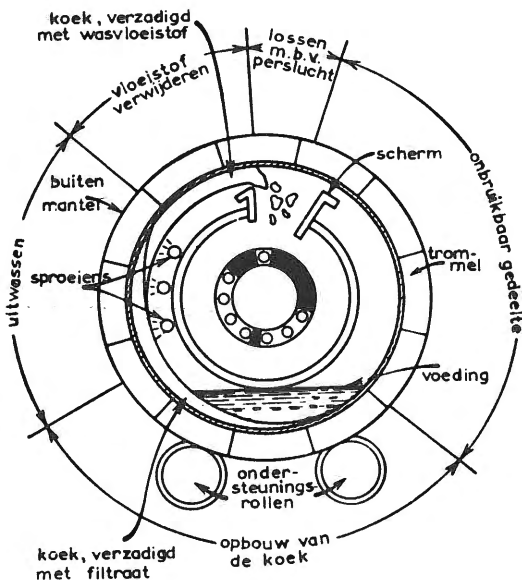
trommel wordt gevoerd en de koek aan de binnenzijde wordt opgebouwd.

De berekeningen van de capaciteit van een roterende trommelfilter, waarbij de filtratie wordt uitgevoerd bij een constant drukverschil, kan plaatsvinden met vergelijking 6.1.6.10 of

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{r \eta v [V + (L' \cdot A) / v]}$$

Deze vergelijking mag worden toegepast wanneer de statische vloeistofdruk

Fig. 6.1.6.23. Doorsnede van een trommelfilter (filter inw.)



verwaarloosd wordt en de koek niet samendrukbaar is. Het verwaarlozen van de doekweerstand is bij dit type filters niet toegestaan wanneer de te behandelen suspensies goed filtreerbaar zijn met een niet te grote verblijftijd van het filteroppervlak in de slurry. Theoretische berekeningen geven bij roterende trommelfilters slechts een ruwe benadering van de werkelijke filtratiecapaciteit. Bij het ontwerpen moet rekening worden gehouden met de tijd nodig voor het wassen en de condities bij het afschrapen van de koek.

In fig. 6.1.6.24 is een voorbeeld gegeven van trommelfilterinstallatie, die laat zien hoe de lucht en de vloeistof worden gescheiden.

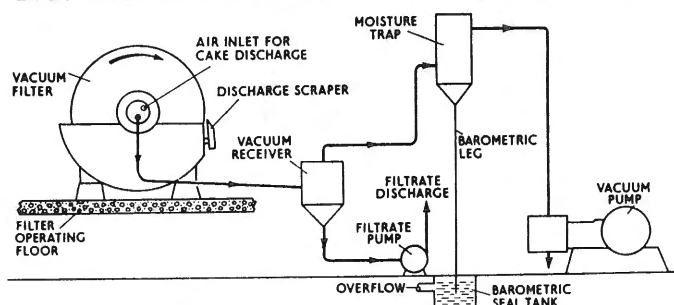


Fig. 6.1.6.24. Voorbeeld van een trommelfilterinstallatie.

Bakjesfilter.

In fig. 6.1.6.25 is een continu werkend vacuümfilter aangegeven die werkt met bakjes.

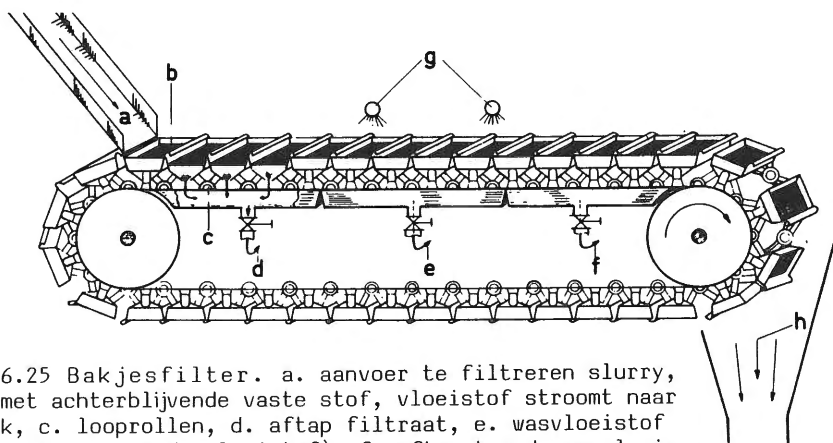


Fig. 6.1.6.25 Bakjesfilter. a. aanvoer te filtreren slurry, b. cellen met achterblijvende vaste stof, vloeistof stroomt naar filtraatbak, c. looprollen, d. aftap filtraat, e. wasvloeistof (met achtergebleven moedervloeistof), f. aftap tweede wasvloeistof (met geringe hoeveelheid moedervloeistof), h. afvoer vaste stof.

Bij omgekeerde bakjes is het mogelijk de filterdoeken te reinigen.

Plaatfilters.

Een voorbeeld van een plaatfilter is weergegeven in fig.6.1.6.25.

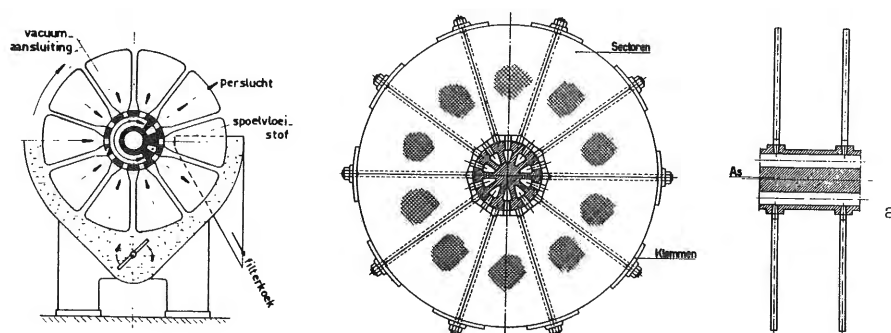


Fig. 6.1.6.25. Gedeelte van een continuschijvenfilter.

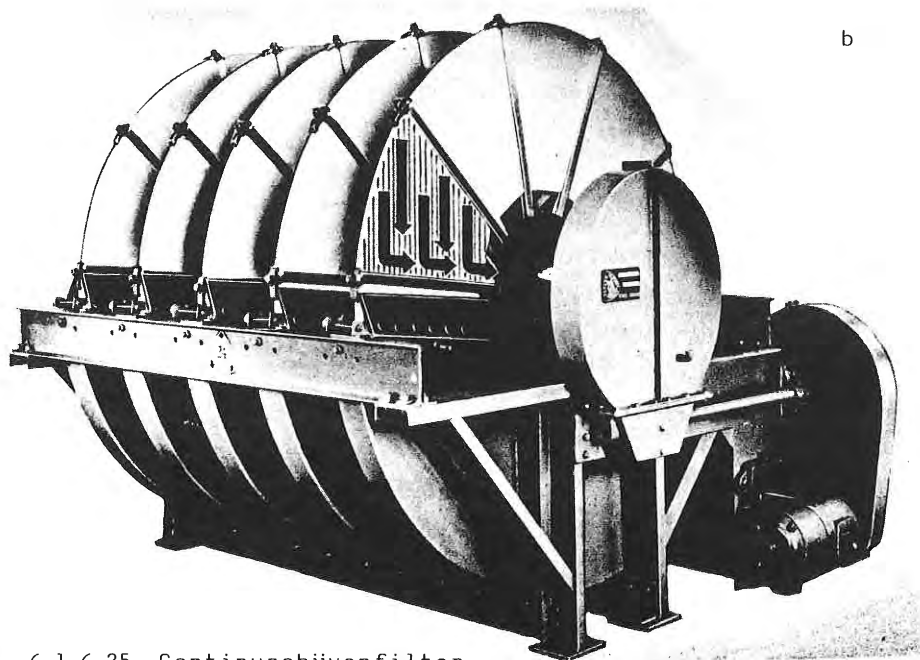


Fig. 6.1.6.25. Continuschijvenfilter.

Het schijvenfilter bestaat uit een aantal filterplaten gemonteerd op een holle as. Deze as draait en de filterplaten bewegen zich, bijna half ondergedompeld, door de suspensie, die zich in een tank bevindt. Deze tank (een halve cilinder) is onderverdeeld in een aantal compartimenten, die juist voldoende breed zijn om de platen door te laten. Bovenop de compartimenten zijn schrapers gemonteerd, fig. 6.1.6.25 b, die de filterkoek afschrapen. De koek valt tussen

de compartimenten door in een opvangbak. De werking is verder gelijk aan die van een roterend filter.

Filtrerende centrifuges.

Bij filtrerende centrifuges geschiedt de afvoer van het filtraat door de wand van draaiende gedeelte. Op de wand zet zich de koek af. In een discontinu werkende centrifuge zal de koek steeds aangroeien, terwijl in een continu werkend apparaat de koek tijdens filtratie wordt afgeschraapt. Bij een discontinu werkende centrifuge wordt de invoer van de slurry gestopt als de koek een bepaalde dikte heeft. De laatste resten vloeistof in de koek worden verwijderd door het overwinnen van de capillaire retentiekrachten door de centrifugaalkracht, evenals bijv. bij het centrifugeren van wasgoed het geval is. De drijvende kracht bij filtrerende centrifuges wordt veroorzaakt door centrifugale druk tengevolge van de vloeistof. Deze drijvende kracht moet de wrijving van de vloeistofstroming in de filterkoek, doek en geperforeerde wand overwinnen. De weerstand van de koek zal toenemen met de toename van de dikte van de koek terwijl de andere weerstanden nagenoeg gelijk blijven.

Voor het opstellen van een formule voor het berekenen van de capaciteit van een filtercentrifuge gaan we uit van een centrifuge met een straal van de trommel die gelijk is aan b . (fig.6.1.6.26).

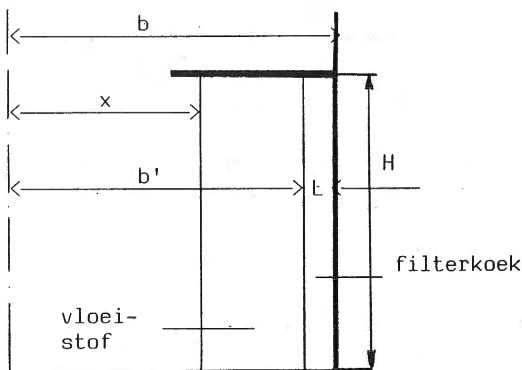


Fig. 6.1.6.26.

We nemen aan dat de suspensie zo snel aan de trommel wordt toegevoerd dat de straal, x , van het vloeistofoppervlak constant blijft. Op een tijdstip t na het begin van de filtratie is er een koek gevormd met dikte L . De straal betrokken op het oppervlak van de koek is b' . Als dP' het drukverschil over een koekdikte dL is dan is de snelheid van het filtraat:

$$v = \frac{-dP'}{r \cdot \eta \cdot dL} \quad (6.1.6.26)$$

Wanneer de centrifugaalkracht groot is ten opzichte van de zwaartekracht zal het filtraat in radiale richting stromen en zich

gelijkmatig over de trommelwand verdelen.

Stel dV is het volume filtraat dat door de koek stroomt in een tijd dt , dan is:

$$v = \frac{1}{2\pi \cdot b' \cdot H} \frac{dV}{dt} \quad (6.1.6.27)$$

Door substitutie van 6.1.6.26 in -.27 krijgen we:

$$- dP' = \frac{r \cdot \eta \cdot dL}{2\pi \cdot b' \cdot H} \frac{dV}{dt}$$

Het totale drukverschil over de koek op tijdstip t is:

$$- \Delta P' = \frac{r \cdot \eta}{2\pi \cdot H} \frac{dV}{dt} \int_0^L \frac{dL}{b'}$$

of

$$- \Delta P' = \frac{r \cdot \eta}{2\pi \cdot H} \frac{dV}{dt} \int_{b'}^b \frac{db'}{b'}$$

is

$$- \Delta P' = \frac{r \cdot \eta}{2\pi \cdot H} \frac{dV}{dt} \ln \frac{b}{b'} \quad (6.1.6.28)$$

Bij het verwaarlozen van de weerstand van het doek is $\Delta P'$ gelijk aan de druk op de wand van de centrifuge:

$$P = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (b^2 - x^2)$$

Stellen we de weerstand van het doek en de wand gelijk aan de weerstand van een koek met een dikte L' dan wordt het drukverschil over het doek:

$$\frac{- \Delta P''}{r \cdot \eta \cdot L'} = \frac{1}{2\pi \cdot H \cdot b} \frac{dV}{dt} \longrightarrow - \Delta P'' = \frac{r \cdot \eta}{2\pi \cdot H} \frac{dV}{dt} \frac{L'}{b} \quad (6.1.6.29)$$

Het totaal drukverschil over de koek en doek is $\Delta P = \Delta P' + \Delta P''$ of

$$- \Delta P = \frac{r \cdot \eta}{2\pi \cdot H} \frac{dV}{dt} \left(\ln \frac{b}{b'} + \frac{L'}{b} \right) \quad (6.1.6.30)$$

Om de laatste vergelijking te kunnen integreren moet het verband tussen b' en V bekend zijn.

We krijgen:

$$v dV = - 2\pi b' H db'$$

of

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-2\pi H \cdot b'}{v} \frac{db'}{dt}$$

Substitutie van dV/dt in vergelijking 6.1.6.30 geeft:

$$\frac{v (-\Delta P)}{r \cdot \eta} dt = \left(\ln \frac{b'}{b} - \frac{L'}{b} \right) \cdot b' db'$$

- ΔP en x zijn constant.

Integratie tussen de grenzen $b' = b$ en $b' = b'$ waarbij t gaat van 0 naar t geeft:

$$(b^2 - b'^2) \left(1 + 2 \frac{L'}{b} \right) + 2 b'^2 \ln \frac{b'}{b} = \frac{4(-\Delta P) \cdot v \cdot t}{r \cdot \eta} =$$

$$\frac{2 \cdot v \cdot t \cdot \rho \cdot \omega^2}{r \cdot \eta} (b^2 - x^2) \quad (6.1.6.31)$$

Hieruit kan de centrifugetijd worden berekend voor een gegeven koekdikte, b' .

Het volume van de koek na tijdstip t is:

$$V_v = \pi (b^2 - b'^2) H \quad (6.1.6.32)$$

Het filtratievolume is:

$$V = \frac{\pi}{v} (b^2 - b'^2) \cdot H \quad (6.1.6.33)$$

Bij bovenstaande vergelijkingen is het moeilijk om de juiste porositeit in te voeren daar deze moeilijk te bepalen is. Daardoor valt de werkelijke koekweerstand moeilijk te berekenen. Ondanks deze moeilijkheid blijkt het net behulp van bovenstaande vergelijkingen mogelijk de volumestroom met een afwijking van ca. 20% ten opzichte van de werkelijke volumestroom te voorspellen.

Typen centrifuges.

Bij de praktische uitvoering van het filtreren met centrifuges is het in hoge mate van belang het ontstaan van onbalans te voorkomen. Dit betekent o.a. dat bij continu werkende centrifuges de slurry-toevoer en de vaste stof afvoer zeer regelmatig moet plaatsvinden. Daarnaast moet worden voorkomen dat de "filterkoek" gaat schuiven

in tangentielle richting. Het verschil in dichtheid tussen vloeistof en vaste stof is bij gebruik van centrifuges meestal klein. Indien de dichtheid van de vaste stof kleiner is dan de dichtheid van de vloeistof zal voor een bijzondere wijze van afvoer van de vaste stof gezorgd moeten worden.

De centrifuges voor filtratie kunnen we onderscheiden in:

- a. Ladingsgewijze centrifuges,
- b. Continuwerkende centrifuges.

Ad. a.

Deze centrifuges worden gebruikt voor het scheiden van mengsels vaste stof-vloeistof, o.a. in suikerfabrieken. Het werkschema voor deze centrifuges, fig. 6.1.6.27 ziet er als volgt uit:

1. vullen met suspensie totdat een voldoende dikke koek is gevormd,
2. wassen van de filterkoek,
3. droogdraaien,
4. afremmen, lossen.

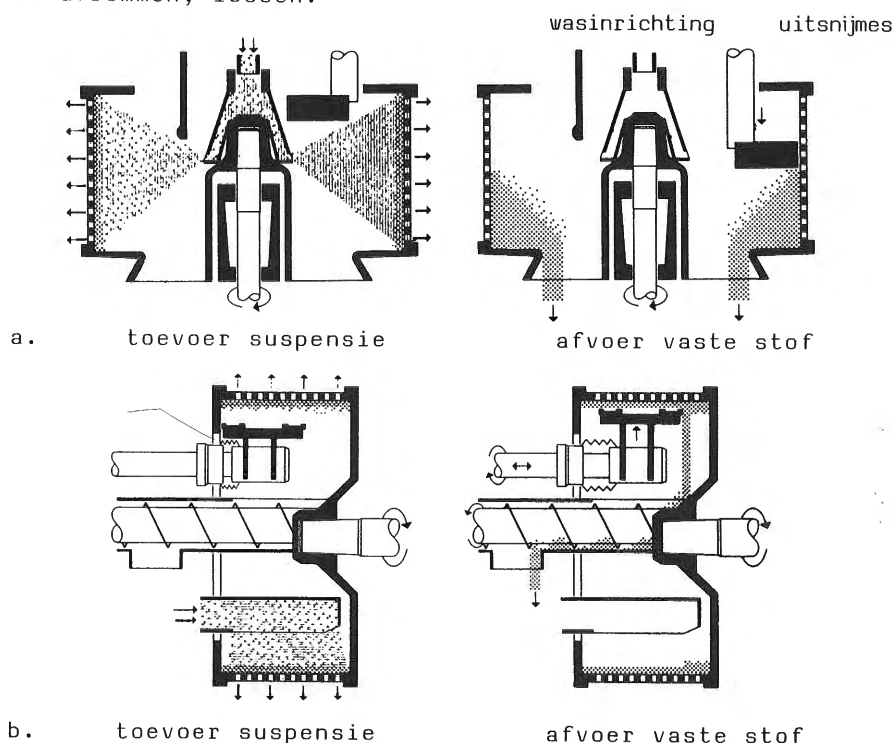


Fig. 6.1.6.27.

De handelingen 1 tot en met 4 kunnen worden geautomatiseerd. In fig.6.1.6.27 a is een ladingsgewijze filtreercentrifuge aangegeven met verticale as in fig.-27b een met een horizontale as. De voeding van de centrifuges vindt plaats via het konisch gedeelte. Hierin wordt de suspensie op de gewenste omtreksnelheid gebracht. Via de overloop wordt de suspensie naar de filtertrommel gevoerd en verdeeld over de omtrek. De meeste vloeistof verdwijnt direct via de geperforeerde wand van de trommel terwijl op deze wand de vaste stof als een koek achterblijft. De koek wordt puls-gewijs verplaatst door een schraper, die met de trommel meedraait en bovendien heen en weer beweegt, per puls 25-75 mm, frequentie 30-70 pulsen per minuut. De vaste stof wordt hierdoor steeds een eindje opgeschoven in de richting van het uiteinde van de zeef-trommel. Op weg naar het open gedeelte van de trommel kan de koek gewassen en/of gedroogd worden. De dikte van de koek varieert van 20 - 120 mm, afhankelijk van de afmetingen van de trommel en wrijving tussen koek en filtermedium.

Ad. b.

Voorbeelden van continu werkende centrifuges zijn gegeven in fig. 6.1.6.28. In deze centrifuges wordt de vaste stof continu verwijderd. Fig. 6.1.6.28 a is een enkeltraps schuifcentrifuge die voor veel doeleinden kan worden gebruikt. Is de suspensie visceus en moet de koek goed gewassen worden dan kan beter van een drietraps schuif-centrifuge gebruik worden gemaakt zoals aangegeven in fig.6.1.6.28 b.

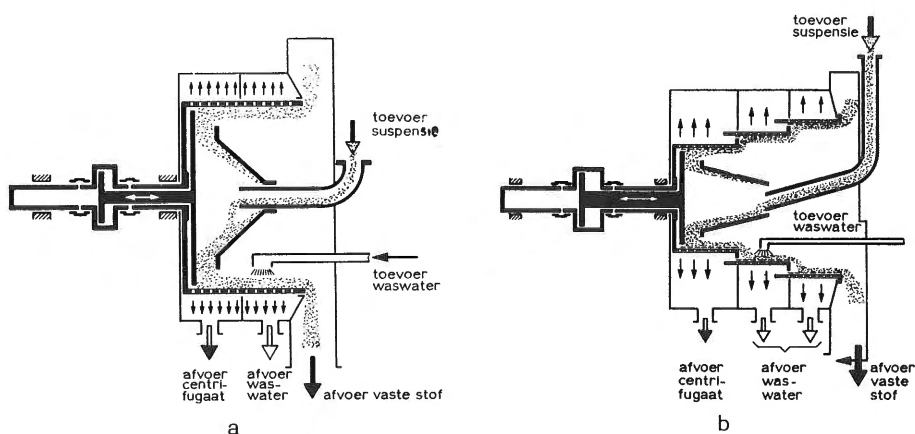


Fig. 6.1.6.28. Schuifcentrifuge.

In deze centrifuge wordt de voeding in de eerste trap gefiltreerd, in de tweede trap gewassen en in de derde trap gedroogd.

In fig. 6.1.6.29 maakt men gebruik van een transportschroef die op een trommel is gemonteerd. De conische transportschroef draait met een iets lagere snelheid dan de zeeftrommel zelf waardoor de vaste stof naar het breedste gedeelte van de zeeftrommel wordt getransporteerd.

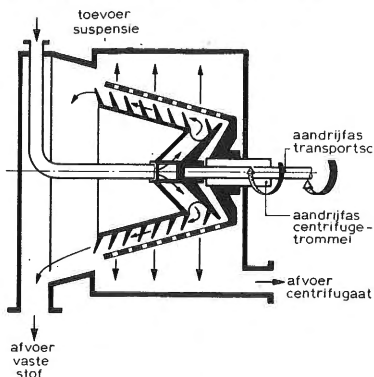


Fig. 6.1.6.29. Schroefcentrifuge.

6.1.7. Omgekeerde osmose-ultrafiltratie.

Omgekeerde osmose en ultrafiltratie zijn scheidingsprocessen waarbij de voedingsstroom gesplitst wordt in twee stromen van ongelijke samenstelling zonder dat daarbij faseovergangen plaatsvinden. Door middel van deze processen kunnen onopgeloste stoffen worden geconcentreerd of een oplosmiddel worden gezuiverd van ongewenste componenten. Beide processen zijn zgn. membraanprocessen. Bij omgekeerde osmose zijn de membranen ondoorlaatbaar voor kleine moleculen als, zouten, suikers, organische of anorganische zuren. Ultrafiltratie membranen laten alleen macromoleculen niet door. Door de juiste keuze van het membraan kan de grootte van de moleculen worden beïnvloed.

Omgekeerde osmose.

Omgekeerde osmose is een moleculair scheidingsproces waarbij gebruik gemaakt wordt van membranen die ondoordringbaar zijn voor laagmoleculaire componenten uit een vloeistofmengsel maar wel doorlatend zijn voor het oplosmiddel. Het gaat vrijwel altijd om waterige oplossingen met anorganische opgeloste stoffen bijv. zouten of kleine organische moleculen als suikers, zuren. Het principe is op een eenvoudige wijze gegeven in fig. 6.1.7.1. Het vat in deze figuur bestaat uit twee compartimenten gescheiden door een selec-

tief membraan dat doorlatend is voor water en ondoorlatend is voor zoutionen. Het linker compartiment bevat een oplossing, bijv. zee-water of een suikeroplossing, het rechter compartiment zuiver wa-ter. Door osmose zal nu water van het linker naar het rechter com-partiment stromen totdat een evenwicht bereikt wordt waarbij de druk links van het membraan gestegen is tot druk van $\Delta\pi$ boven de druk rechts van het membraan, te weten de osmotische druk van de op-lossing (bij zeewater bijv. 25 bar). Gaan we op het linker comparti-ment een hogere druk uitoefenen dan persen we zuiver water terug door het membraan totdat de druk in het linker compartiment weer gelijk is aan de druk rechts vermeerderd met de osmotische druk. Door het ontdekken van membranen die voldoende doorlaatbaarheid voor water vertoonden heeft de omgekeerde osmose belangstelling gekregen voor industriële toepassing. De ontwikkelde membranen wa-ren zgn. asymmetrische cellulose-acetaatmembranen van vrij poreus cellulose-acetaat die aan één zijde door een oppervlaktebehandeling van een zeer dun semi-permeabel huidje voorzien zijn.

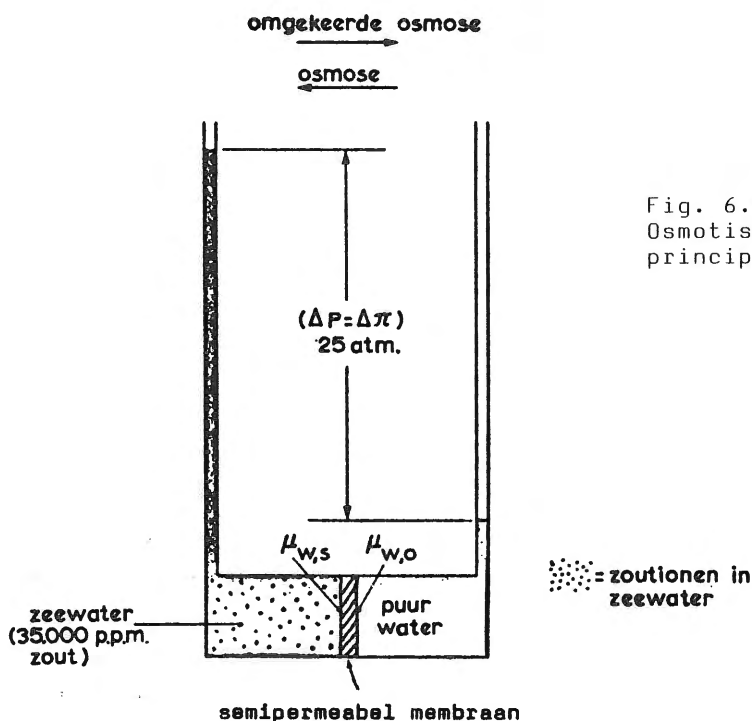


Fig. 6.1.7.1.
Osmotische druk
principe.

Het spreekt vanzelf dat omgekeerde osmose in principe een fraaie methode is voor het ontzouten van zeewater en brak water, het concentreren van suikeroplossingen of het ontzouten van vloeibare voedingsmiddelen. Ook het totaal concentreren van melkwei is een toepassing van omgekeerde osmose te noemen.

Theorie van omgekeerde osmose.

In fig. 6.1.7.2 is schematisch weergegeven hoe een omgekeerd osmose-apparaat werkt. De voeding bestaat uit een mengsel van A en B terwijl het membraan alleen permeabel is voor B.

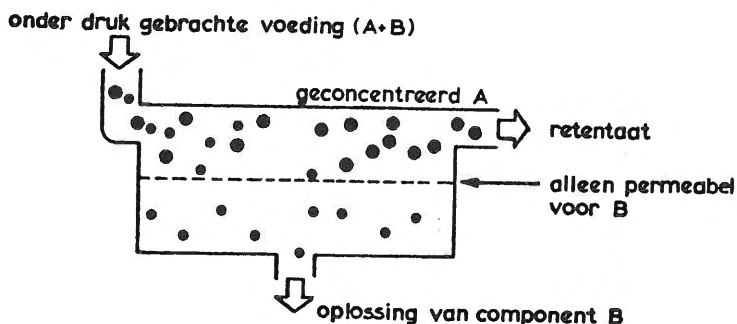


Fig. 6.1.7.2. Schematische weergave van omgekeerde osmose apparaat.

We beschouwen een semi-permeabel membraan dat een oplossing van zuiver water gescheiden houdt, fig. 6.1.7.3, en waarbij in toestand A de druk P_2 kleiner is dan P_1 + de osmotische druk $\Delta\Pi$. Door dit drukverschil zal een stroom water, $Q_{w,m}$, ontstaan door het membraan naar de oplossing toe. Deze stroom zal afnemen door het hydrostatisch drukverschil ($P_2 - P_1$) als tegenwerkende kracht. Tenslotte zal de stroom tot nul reduceren wanneer het osmotisch drukverschil bereikt is. De stroom, Q_m , stopt wanneer geldt:

$$\Delta P = \Delta \Pi = \frac{RT \ln \frac{a_w^r}{a_w^p}}{V_w} \quad (6.1.7.1)$$

a_w^r en a_w^p zijn respectievelijk de wateractiviteiten van de oplossingen voor en na het membraan terwijl V_w het partiële molaire volume is van het water.

Is de activiteit, a_w , niet bekend dan kunnen we voor niet te ge-

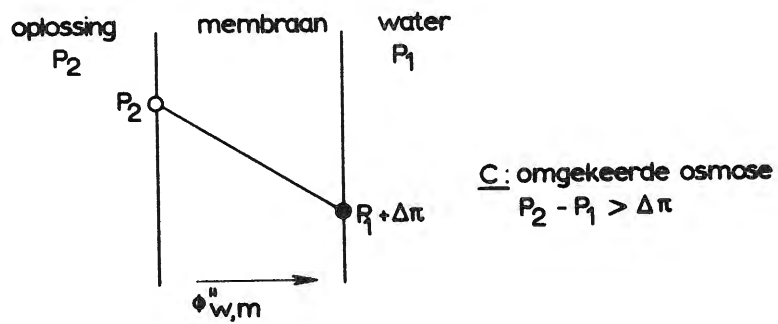
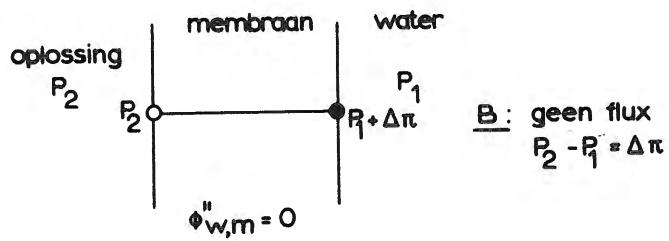
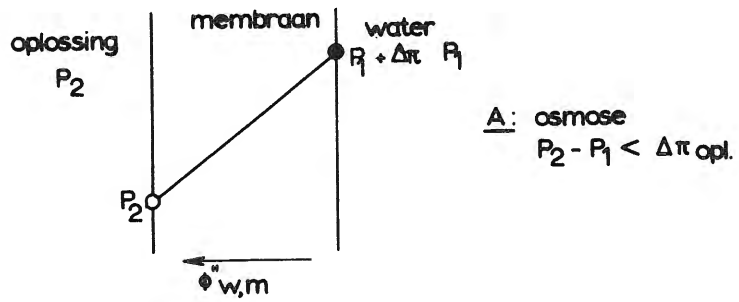


Fig. 6.1.7.3. Drijvende kracht voor watertransport door membranen is $(P_2 - P_1 - \Delta\pi)$.

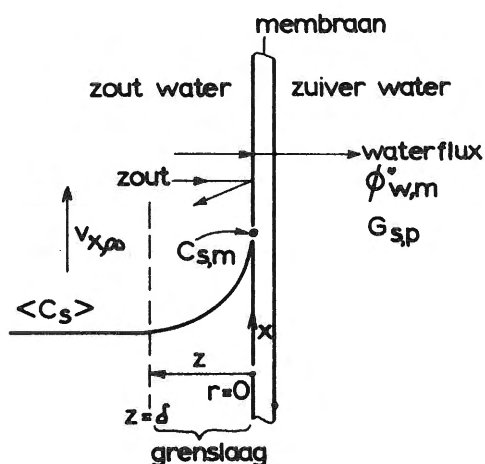
concentreerde oplossingen gebruik maken van Van 't Hoff:

$$\Delta \Pi = \frac{v_s R \cdot T}{\langle V_w \rangle} (x_s^r - x_s^p) \approx v_s R \cdot T (C_{s,m} - C_{s,p}) \quad (6.1.7.2)$$

In deze vergelijking is v_s het aantal ionensoorten waarin een zoutmolecuul uiteen kan vallen in volledige dissociatie (bijv. $v_s = 2$ voor NaCl), $C_{s,m}$ de concentratie in kmol/m³ onmiddellijk aan het membraan aan de retentaat zijde en $C_{s,p}$ de concentratie in permeaat. Brengen we het drukverschil tussen de zoutoplossing en het water boven de osmotische druk, zeg op ΔP_s dan blijkt de waterflux evenredig te zijn aan $(\Delta P_s - \Delta \Pi)$;

$$Q''_{w,m} = k_w (\Delta P_s - \Delta \Pi) \quad (6.1.7.2)$$

Deze vergelijking zegt dat de waterflux door het membraan evenredig is met het voor de osmotische druk gecorrigeerde drukverschil tussen zoutoplossing en water. Voor de osmotische druk moet de druk in de onmiddellijke nabijheid van het membraanoppervlak genomen worden. Deze druk kan aanmerkelijk afwijken van de situatie in de bulk van de vloeistoffasen door concentratie polarisatie-verschijnselen. In fig. 6.1.7.4 wordt een detailschets gegeven van de situatie in de directe omgeving van een membraan waardoor, vanuit een oplossing, selectief water permeëert. Deze permeatie flux, $Q''_{w,m}$, van water



sleurt opgeloste stof mee vanuit de bulk van de vloeistof naar het membraan. Stellen we een massabalans op voor opgeloste stof over de "grenslaag" vlak tegen het membraan dan blijkt dat er geen netto transport van zout over de gearceerde lijn (---) op $z = \delta$ kan plaatsvinden ("ideaal membraan"). Dit betekent dat convectieve meesleuring van opgeloste stof met flux $Q''_{w,m}$ moet worden geba-

Fig. 6.1.7.4. Stoftransport processen in de omgeving van een omgekeerde osmose membraan.

lanceerd door terugdiffusie van opgeloste stof vanuit de grenslaag naar de bulkstroming. Hiertoe is een concentratiegradiënt, als aangegeven in fig. 6.1.7.4, in de grenslaag vereist. Het gevolg is dat de concentratie aan opgeloste stof aan het oppervlak van het membraan hoger is dan in de bulk vloeistof, ($C_{s,m} > \langle C_s \rangle$), wat op zijn beurt inhoudt dat het effectieve drukverschil ($P_2 - P_1 - \Delta\Pi$) over het membraan lager is dan men uit de bulksamenstelling zou vermoeden. De werkelijke flux door het membraan wordt hierdoor lager, een verschijnsel dat wordt aangeduid met de concentratie polarisatie.

In de praktijk heeft men meestal met imperfecte membranen te maken, dit wil zeggen de membranen hebben ook een zekere zoutdoorlaatbaarheid.

Voor de flux aan zout, geldt in eerste benadering:

$$Q''_{s,m} = k_s (C_{s,r} - C_{s,p}) \approx k_s \cdot C_{s,r} \quad (6.1.7.3)$$

De laatste gelijkheid geldt als $C_{s,p} \ll C_{s,r}$, dit wil zeggen het membraan is goed semi-permeabel.

De selectiviteit α_{ws} .

Voor de selectiviteit van het membraanproces kan de volgende vergelijking worden afgeleid:

$$\alpha_{ws} = \frac{(C_w/C_s)_{\text{permeaat}}}{(C_w/C_s)_{\text{retentaat}}}$$

$$\text{of} \quad \alpha_{ws} = \frac{Q''_{w,m}}{Q''_{s,m}} \cdot C_{s,l} \cdot V_w$$

$$\text{of} \quad \alpha_{ws} = \frac{k_w (\Delta P_s - \Delta\Pi) V_w}{k_s} \quad (6.1.7.4)$$

In tabel 6.1.7.1. worden enkele α_{ws} -, k_w - en k_s -waarden van typische omgekeerde osmose membranen gegeven.

De permeabiliteit en selectiviteit zijn nogal afhankelijk van de wijze waarop de membranen worden bereid.

Tabel 6.1.7.1. Eigenschappen van enkele reverse osmose membranen.

Samenstelling. CA-oplossing *	$Q''_{w,m} \cdot \rho_w \cdot V_w \cdot 10^3$ ** (kg/m ² s)	α_{ws} ** (-)
1. CA 25%, Formamide. 30% aceton 45	14,0	12,2
2. CA 14%, Dimethyl formamide 21%, aceton 65 %.	2,4	16,7
3. CA 25%, Dimethyl sulfoxide 37,5%, aceton 37,5%.	5,1	38,0

* De cellulose acetaat (CA)-oplossing wordt uitgegoten bij een temperatuur van ca. 25°C, daarna laat men even het oppervlak indampen (1-8 min.) en vervolgens wordt het oppervlak met warm water gespoeld.

** Gelden voor $C_{s,1} = 5000$ ppm NaCl en $\Delta P_s = 41$ bar.

Technische uitvoering van omgekeerde osmose.

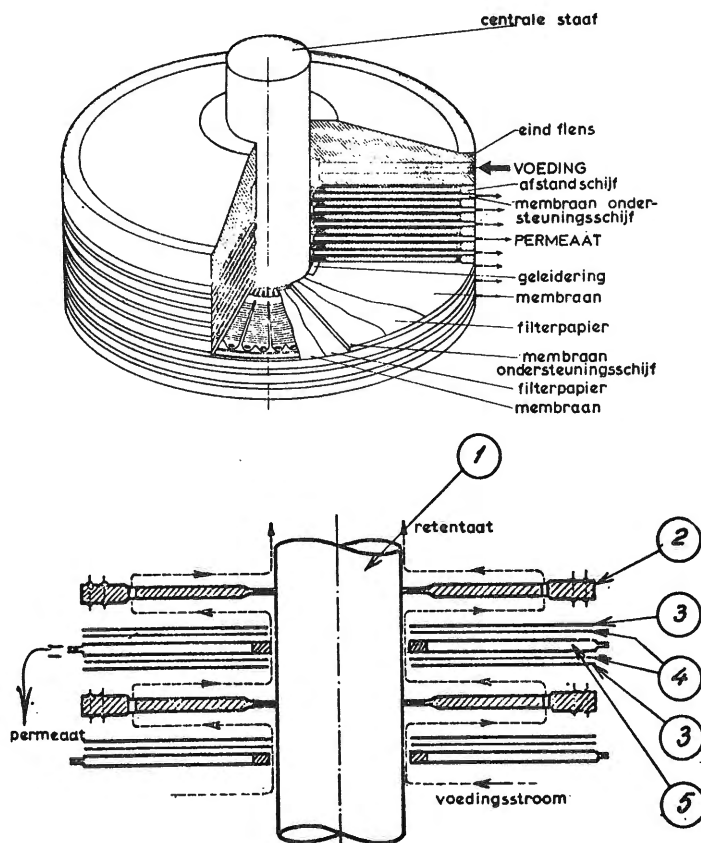
Voor de procesvoering kunnen de volgende hoofdtypen van omgekeerde osmose apparatuur worden onderscheiden.

1. cilindrische buizen, aan de binnenwand voorzien van een membraan en gebundeld in een module;
2. spiraalvormig opgerolde buizen voorzien van membranen;
3. holle vezels met semipermeabele wanden (vezel dikte ca. 10^{-4} m, met een wanddikte van ca. $25 \cdot 10^{-6}$ m);
4. spiraalsgewijs opgerolde membranen;
5. gestapelde platen voorzien van vlakke membranen en geschikte aan- en afvoerkanalen.

In figuur 6.1.7.5 zijn enkele van bovengenoemde typen membraan-modules weergegeven.

Daar de ontwikkeling van membraan modulesystemen nog in volle gang is is het bovenstaande slechts een momentopname van de zich snel wijzigende technische mogelijkheden.

Hoewel in eerste instantie veel onderzoek is verricht naar het ontzouten van zeewater, kan omgekeerde osmose ook worden toegepast voor het concentreren van vruchtensappen, ei producten, zuivelproducten als wei en melk en het zuiveren van afvalwater.

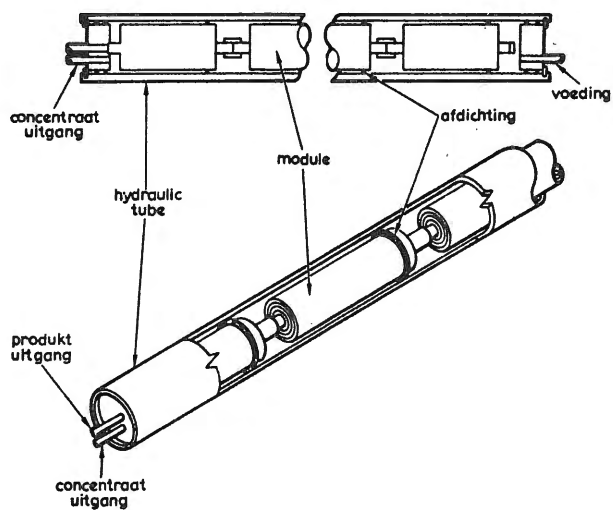


Dwarsdoorsnede van een DDS UF/HF kolom

1. centrale staaf
 2. membraan frame
 3. membraan
 4. filterpapier
 5. membraan ondersteuningsplaat
- permeaat uitlaat

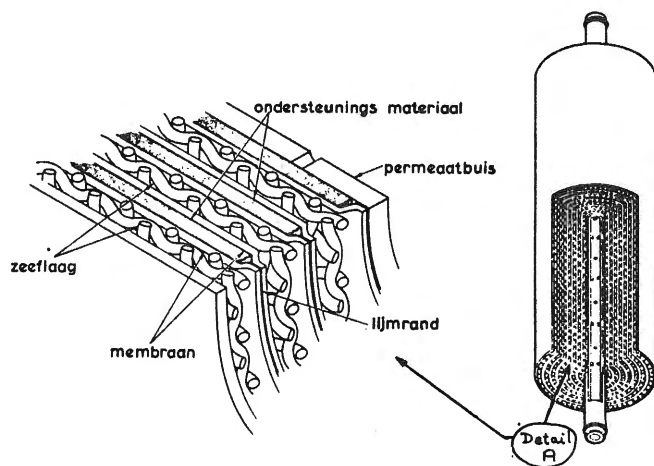
a

Fig. 6.1.7.5. Gestapelde vlakke membranen.



b

Fig. 6.1.7.5. Spiraalsgewijs opgewonden membraan-module.



c

Fig. 6.1.7.5. Detailschets van spiraalsgewijs opgewonden vlak membraanmodule.

Ultrafiltratie.

Ultrafiltratie is een membraanproces dat nauw verwant is aan omgekeerde osmose. Het scheidingsprincipe berust eveneens op semi-permeabiliteit van een membraan. Bij ultrafiltratie ontstaat de semi-permeabiliteit doordat de poriën in een membraan kleiner zijn dan de molecuulgrootte van opgeloste stoffen (bijv. macromoleculen) maar in de orde grootte van het oplosmiddel. Men kan deze methode alleen gebruiken voor vrij grote moleculen (mol. massa > 500) in een waterige oplossing. Uit fig. 6.1.7.6 blijkt dat de ultrafiltratie een breed gebied tussen het werkgebied van omgekeerde osmose, micro-filtratie en normale filtratie bestrijkt. Omdat de waterige oplossingen, waar ultrafiltratie een mogelijke scheidingsmethode zou kunnen betekenen, een geringe osmotische druk hebben, zijn de werkdrukken van ultrafiltratie systemen meestal veel lager dan bij omgekeerde osmose systemen ($\Delta P_s \approx 0,2 - 2 \text{ MPa}$).

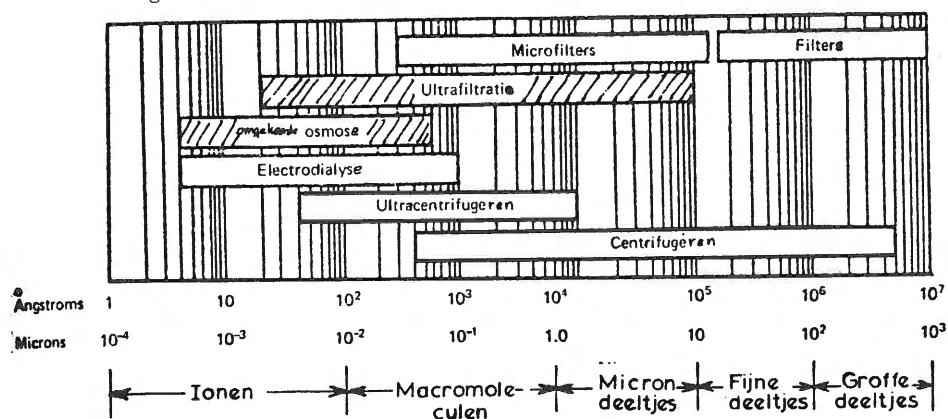


Fig. 6.1.7.6. Werkgebieden van verscheidene moleculaire en fase-scheidingsprocessen.

Membranen voor ultrafiltratie hebben de eigenschap dat kleine moleculen, bijv. met een mol. massa $< M_{\min}$, volledig worden doorgelaten, terwijl moleculen met een mol. massa $> M_{\max}$ volledig worden tegen gehouden. Een membraan waarbij $M_{\min}$ niet al te zeer afwijkt van $M_{\max}$ wordt gekenmerkt als een goed membraan, met een scherpe scheidingsgrens. We nemen als voorbeeld een oplossing die hoofdzakelijk bestaat uit water, eiwit, vetten, melksuiker en zouten, bijv. wei. Indien op de wei omgekeerde osmose of ultrafiltratie wordt toegepast dan kan het volgende worden verwacht.

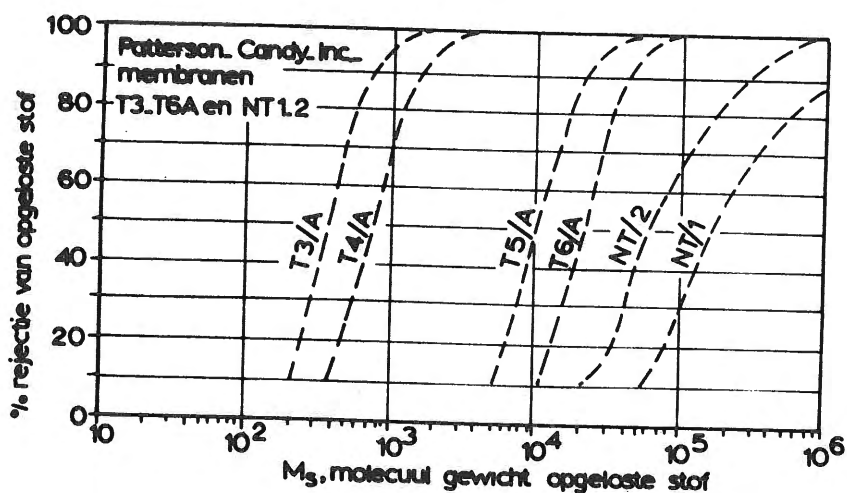


Fig. 6.1.7.7. Rejectiecurven voor enkele ultrafiltratiemembranen.

Bij omgekeerde osmose vindt een concentratie van de oplossing plaats doordat nagenoeg alleen water het membraan passeert. Dit proces is te vergelijken met indampen. Het drogestof gehalte van de wei bij omgekeerde osmose neemt toe van 6 naar ca. 25% en de osmotische druk van ca. 0,7 tot 4 MPa.

In tegenstelling tot omgekeerde osmose maakt men bij ultrafiltratie gebruik van een meer "open" membraan. Behalve water kunnen lactose en zouten worden doorgelaten, maar stoffen met een hoog mol. massa, zoals eiwitten en vetten, worden vrijwel kwantitatief tegengehouden. Bij dit proces is er sprake van een zekere fractionering.

Daar de eiwit- en vetmoleculen door hun grootte slecht weinig bijdragen tot de osmotische druk, is de benodigde druk bij ultrafiltratie laag, ca. 0,2 - 0,7 MPa. De indikking is afhankelijk van de gebruikte apparatuur en de daarin toegepaste stroomsnelheden en loopt uiteen van 15 tot 25 %.

Het zal duidelijk zijn dat ook bij ultrafiltratie de reeds bij het bespreken van omgekeerde osmose genoemde effecten van concentratiepolarisatie kunnen optreden. Bij dit proces zullen eveneens de door de waterstroom naar het membraan meegesleurde opgeloste stof moleculen weer terug moeten diffunderen naar de bulk van de vloeistof. Het zal nu meestal niet zo zijn dat de flux van water door het membraan heen verlaagd wordt door een toename in osmotische druk aan

het membraanoppervlak (door de hogere concentratie aan opgeloste vaste stof) omdat de osmotische druk verhoging in het geval van ultrafiltratie vaak gering is. Wel zal het watertransport geremd worden doordat de hoge concentratie aan "vaste" hoog moleculaire stof aan het grensvlak tot een grotere transportweerstand voor water zal leiden.

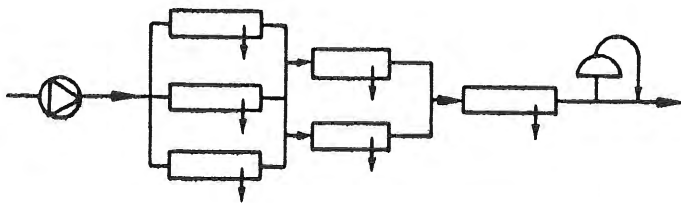
Belangrijke toepassingen van ultrafiltratie zijn te verwachten op het gebied van recirculeren van proceswater waarin hoogmoleculaire stoffen of colloïdale deeltjes voorkomen. In de zuivelindustrie is het concentreren van melkwei een belangrijke toepassing aan het worden. In de aardappelzetmeelindustrie behoort het terugwinnen van eiwit uit het afvalwater van de zetmeelbereiding met behulp van ultrafiltratie tot de technische mogelijkheden. Daarnaast wordt onderzocht welke toepassingsmogelijkheden ultrafiltratie (eventueel gekoppeld aan omgekeerde osmose) in de waterzuivering heeft.

Een van de belangrijkste problemen bij membraanprocessen is de tijdsduur dat een membraan gebruikt kan worden. In het algemeen neemt de flux door een membraan af met de tijd tengevolge van vervuiling van het membraanoppervlak of compactie van het membraan. Door het membraan periodiek te reinigen (bijv. door omkering van de waterstroom, behandeling met enzymen, behandelen met organische zuren, mechanisch reinigen met sponsjes die door de modulebuizen gepompt worden) kan men vaak de flux weer op peil brengen. De microbiologische gesteldheid van een membraanmodule (ophoping van bacteriegroei in dode hoeken) vraagt om een gestroomlijnde constructie van het moduul, membranen die tegen desinfectie behandelingen bestand zijn en eenvoudig in- en uit elkaar te halen module constructies.

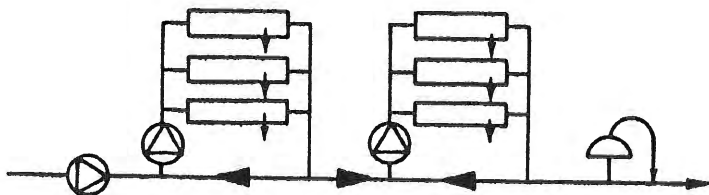
De omgekeerde osmose of ultrafiltratie processen kunnen ladingsgewijs of continu worden uitgevoerd. In fig. 6.1.7.8 zijn verschillende mogelijkheden schematisch weergegeven.

Bij een continu proces kan de vloeistof de apparatuur eenmalig passeren of men kan de vloeistof continu laten recirculeren respectievelijk fig. 6.1.7.8 a en - b. Passeert de vloeistof eenmalig dan zijn de apparaten meestal uitgerust met buisvormige membranen die zijn aangebracht op een poreuze buis, die als ondersteuning dient. In een continu recirculatie systeem zorgen afzonderlijke circulatiepompen

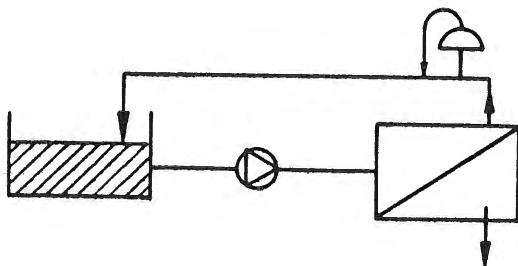
ervoor dat een voldoende volumestroom over de membranen wordt gehandhaafd. De verschillende eenheden zijn parallel geschakeld en bestaan uit buisvormige of vlakke membranen.



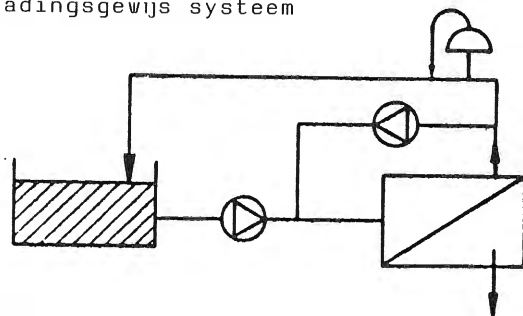
a. continu systeem, eenmalige doorstroming.



b. continu recirculatie systeem.



c. ladingsgewijs systeem



d. ladingsgewijs systeem met interne recirculatie.

Fig. 6.1.7.8. Omgekeerde osmose en ultrafiltratie processen.

6.2. De scheiding vast-vast.

Vast-vast scheiding kan noodzakelijk zijn, omdat men deeltjes van een stof groter of kleiner dan een bepaalde diameter nodig heeft of dat men twee stoffen van verschillende soortelijke massa wil scheiden. Dit principe wordt toegepast bij het sorteren van grondstoffen als granen, zaden, groenten, vruchten, aardappelen enz. en het reinigen van grondstoffen.

Er zijn 4 hoofdprincipes te onderscheiden voor de vast-vast scheiding nl.:

1. Klassificatie. Hierbij maakt men gebruik van verschil in valsnelheid van deeltjes. Het verschil in valsnelheid kan veroorzaakt worden door verschil in grootte of soortelijke massa of een combinatie van beide.
2. Veranderingen van dichtheidverschillen. Hieronder valt flotatie, wat berust op het kunstmatig veranderen van de dichtheid van de deeltjes van een van de stoffen door aanhechten van luchtbelletjes.
3. Magnetische en electrostatische scheidingsmethoden.
4. Scheiding met behulp van zeven.

Bij de eerste twee groepen maakt men gebruik van een vloeistof als hulpfase. Gasfaseprocessen komen ook voor, doch meestal gekoppeld aan andere bewerkingen. Zie hoofdstuk 1.3.8 en 3.4.

Klassificatie onder invloed van de zwaartekracht.

Het eenvoudigste apparaat waarin fracties naar deeltjesgrootte kunnen worden gescheiden, bestaat uit een grote tank die voorzien is van een in- en uitlaat, fig. 6.2.1.

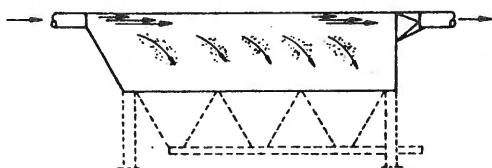


Fig. 6.2.1. Zwaartekracht bezinkkamer.

Door schotten in de tank te plaatsen of door trechters aan te brengen kunnen verschillende fracties worden gevangen. De scheiding tussen de verschillende deeltjes is niet scherp daar een aanzienlijke overlapping in deeltjesgrootte kan optreden.

Een ander type apparaat is de stroomgoot "spitzkasten". In dit apparaat wordt de volgorde van afzetting van de vaste stof bepaald door de stroomsnelheid, fig. 6.2.2.

Bij een vrij grote stroomsnelheid zal het zwaarste materiaal bezinken en op de plaats waar de stroomsnelheid het kleinst is het fijnste en lichtste materiaal

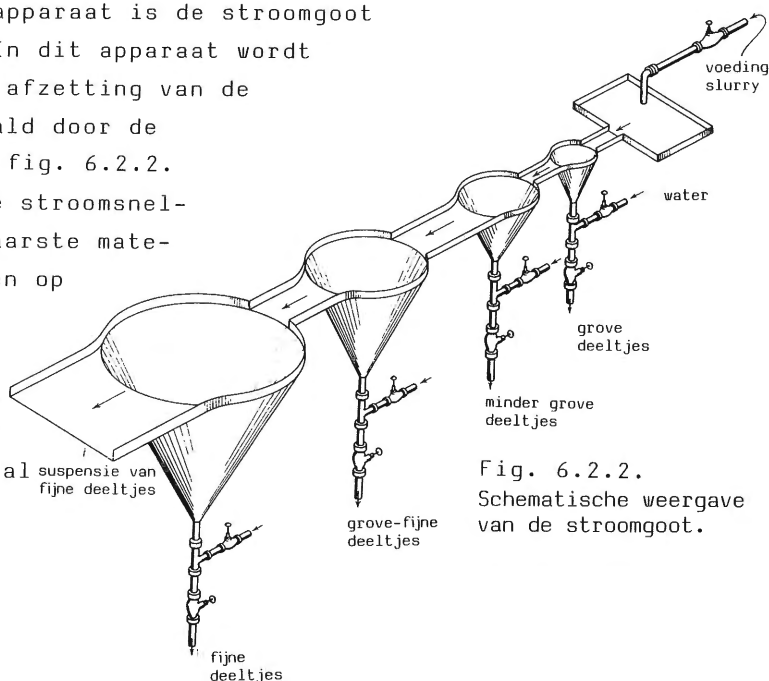


Fig. 6.2.2.
Schematische weergave van de stroomgoot.

Een scheiding in deeltjesgrootte is tevens mogelijk met een "elutratator", fig. 6.2.3. In een verticale buis wordt een vloeistof onderin gevoerd met een

bepaalde snelheid. Het vaste materiaal, dat moet worden gescheiden naar deeltjesgrootte, wordt aan de bovenkant toegevoegd. Moeten meerdere fracties worden gewonnen dan worden meerdere kolommen, met verschillende diameters achter elkaar geplaatst. De scheiding berust op het verschil in bezinksnelheid van de deeltjes.

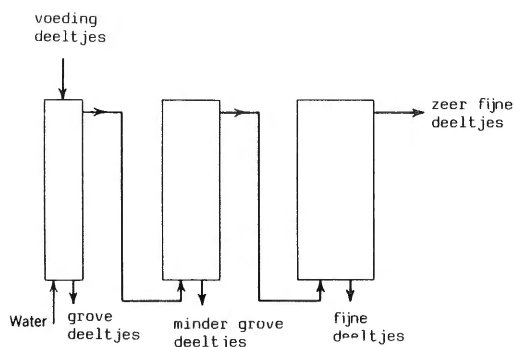


Fig. 6.2.3. Elutratator.

Een apparaat dat op hetzelfde principe berust is de kegelclassificerder, fig. 6.2.4. De vloeistof meestal water, wordt met een bepaalde snelheid onderin het toestel gevoerd en stroomt langs de wand van een kegelvormige bak omhoog. In de konische bak is een

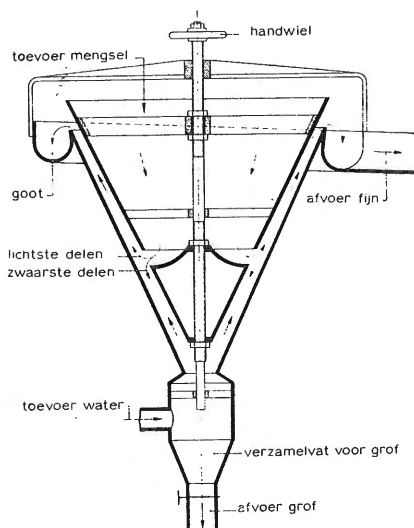


Fig. 6.2.4. Kegelclassificeerder.

kegelvormige trechter geplaatst, waarin het te scheiden mengsel ongeveer in het midden van de opgaande vloeistofstroom wordt gebracht. Het grove of zware materiaal zal tegengesteld aan de stromingsrichting van de vloeistof bezinken en wordt via een verzamelvat afgetapt. De kleine en lichte delen worden, doordat ze een geringe bezinksnelheid hebben, met de opgaande vloeistof meegenomen en aan de bovenkant van de kegel naar een goot afgevoerd. De binnenste trechter kan men met een handwiel in verticale richting verstellen. Hierdoor is het mogelijk de stroomsnelheid van de op-

gaande vloeistofstroom, en daardoor de grens tussen grof en fijn of tussen zwaar en licht, te regelen.

Indien de klassificatie in een gebied van eenparige valsnelheid plaatsvindt dan kan voor een heterogeen mengsel van twee stoffen a en b de fracties naar deeltjesgrootte worden voorspeld.

In een gebied van eenparige valsnelheid geldt de vergelijking:

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot D_u \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{C_w \rho_f} \right) \cdot g} \quad (\text{zie deel 1, hoofdstuk 3.2.}) \quad (6.2.1.)$$

Voor twee deeltjes van een enkelvoudige stof geldt:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{D_1^{m_1}}{D_2^{m_2}} \right)$$

waarin m_1 en m_2 afhankelijk zijn van de waarde van C_w .

In het laminaire gebied ($C_w = 24/Re$) geldt $m_1 = m_2 = 2$ en in het turbulente gebied ($C_w = \text{constant}$) geldt $m_1 = m_2 = \frac{1}{2}$.

Geldt voor één deeltje laminaire condities en voor het andere deeltje turbulente, dan is $m_1 \neq m_2$ en moet er een factor aan de verge-

lijking worden toegevoegd.

Voor een heterogeen mengsel van twee stoffen a en b is de valsnelheid van een deeltje a gelijk aan die van deeltje b als hun dimensies zich verhouden als:

$$\frac{D_a}{D_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right)^n \quad (6.2.2)$$

$n = \frac{1}{2}$ voor laminaire stroming;

$n = 1$ voor turbulente stroming;

$\frac{1}{2} > n < 1$ voor het overgangsgebied.

Is voor een mengsel waarvan a de soortelijke lichtste stof is de verhouding tussen $(d_a)_{\max}/(d_b)_{\min}$ kleiner dan de uit vergelijking 6.2.2 (laminaire stroming) berekende waarde, dan is het kleinste deeltje van de zwaarste stof altijd eerder gesedimenteerd dan het grootste deeltje van de lichte stof. In dat geval is de kwantitatieve scheiding van het heterogene stelsel mogelijk door eenmalige bewerking door een slurry een horizontale snelheid te geven, fig. 6.2.1.

De deeltjesconcentratie in het klassificeerapparaat mag de waarde niet overschrijden, waarbij gehinderde bezinking zal gaan optreden. In het algemeen zal de scheiding niet kwantitatief zijn als zowel a als b in verschillende deeltjesgrootte voorkomen. In dergelijke gevallen kan men een voorscheiding toepassen door bijvoorbeeld zeven.

Flotatie

Flotatie berust op het kunstmatig veranderen van de dichtheid van de deeltjes van een der aanwezige stoffen door aanhechten van luchtbelletjes. Theoretisch wordt de aanhechting van deze belletjes bepaald door de oppervlaktespanningen tussen vaste stof, vloeistof en gas.

Bij de technische uitvoering van deze processen wordt het mengsel van stoffen als suspensie ingevoerd in een ruimte, waardoor luchtbelletjes gevoerd worden, die wel aan stof B en niet aan stof A hechten kunnen. Dit impliceert dus een verschil in oppervlakteeigenschappen van de stoffen A en B. Het eigenlijke scheidingsproces is in wezen een eenvoudig "drijf- en zink"-proces. Het lichte materiaal drijft, het zware bezinkt.

Magnetische en electrostatische scheidingsprocessen.

Magnetische krachten worden gebruikt bij het verwijderen van ijzerdeeltjes uit processtromen waarin deze ongewenst zijn (ijzervanger). De electrostatische scheiding is gebaseerd op het feit dat één van de te scheiden materialen een oppervlakte lading kan verkrijgen zodat het door één van de elektroden wordt aangetrokken. Fig. 6.2.5 geeft een principe schets van een dergelijk apparaat.

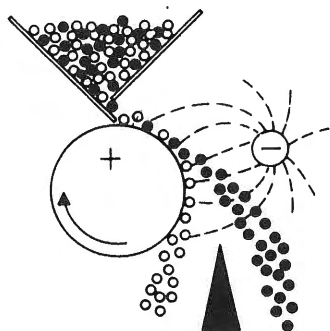


Fig. 6.2.5. Principe schets electrostatische scheiding.

Scheiding door zeven.

Het scheiden door zeven kan langs droge en natte weg worden uitgevoerd. Droog zeven kan in de techniek in het algemeen worden toegepast op produkten met deeltjes groter dan 50 micron; nat zeven stelt ons in staat nog wat kleinere deeltjes te klassificeren.

Voor industriële doeleinden wordt scheiding door zeven gebruikt:

- Om een commercieel produkt te leveren dat aan bepaalde eisen wat betreft de deeltjesgrootte voldoet (bijv. aardappelsorteermachine).
- Om uit de voeding van maalwerktuigen kleine deeltjes te verwijderen.

Er zijn vele uitvoeringsvormen van zeven. Vroeger werden veel trommelzeven en concentrische zeeftrommels gebruikt, tegenwoordig wordt meer gebruik gemaakt van zeven met één of ander vibratie inrichting (trilzeven). In fig. 6.2.6 zijn een aantal zeven weergegeven. De enkelvoudige cilindrische zeef heeft als nadeel, dat de grootste belasting optreedt bij de fijnste, dus zwakste, zeef. Dit is bij de concentrische zeef niet het geval. De zeefbodem kan bestaan uit staven

geperforeerde metalen platen of snaren. De werking van de trilzeef wordt verbeterd door kogels, die de zeef open houden.

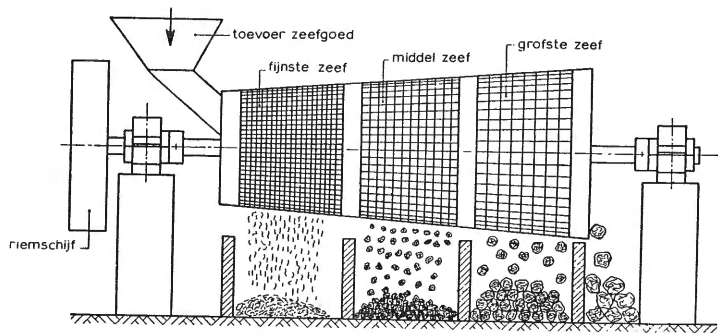


Fig. 6.2.6. a. Trommelzeef (gefractioneerd zeven).

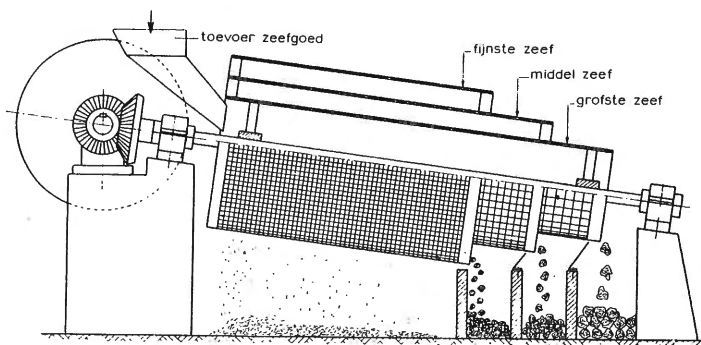


Fig. 6.2.6. b. Telescoopzeef (gefractioneerd zeven).

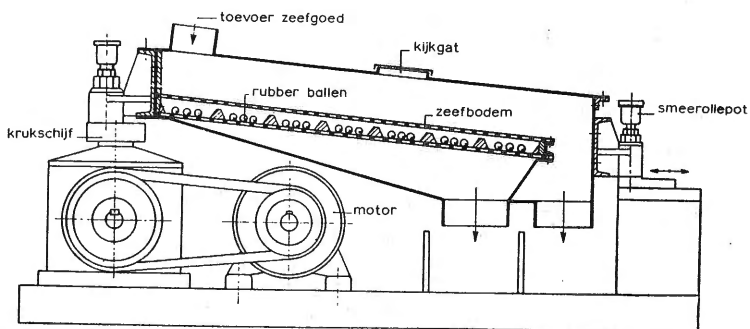


Fig. 6.2.6. c. Rotex-zeef. (schudzeef).

Zeefbocht.

In fig. 6.2.7 is schematisch een zeefbocht weergegeven. Het te scheiden materiaal leidt men op de in fig. 6.2.7 aangegeven wijze over een gekromde zeef. De vloeistoflaag wordt verdeeld zoals in de detailtekening is aangegeven. Het gedeelte van de vloeistof dat door de zeef stroomt neemt kleine vaste deeltjes mee. Bepalend voor de grootte van het deeltje dat nog net meegevoerd wordt, is niet de zeefopening, maar de verschuiving van de mazen loodrecht op de stromingsrichting. Dientengevolge kan de zeefopening zodanig worden gekozen dat geen verstopping optreedt.

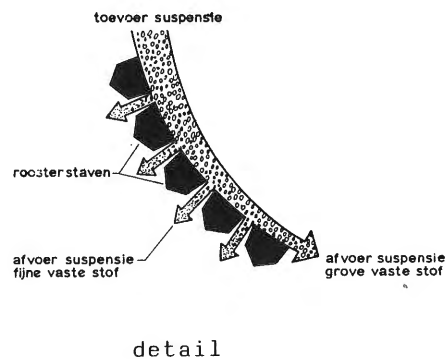
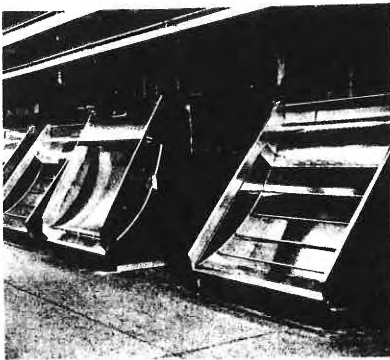


Fig. 6.2.7. Zeefbocht.

De volumestroom van de vloeistof die op de zeef blijft, neemt in de stromingsrichting af. De concentratie aan grote deeltjes in deze vloeistof neemt daardoor toe, terwijl die aan kleine deeltjes constant blijft. De hoeveelheid kleine deeltjes die zich in de aflopende vloeistof bevindt, en die mede de scheidende werking van het apparaat bepaalt, is een functie van de hoeveelheid grof materiaal, omdat deze laatste de voor goede stroming noodzakelijke hoeveelheid restvloeistof bepaalt.

6.3. Het filtreren van mengsels vaste stof-gas.

Evenals mengsels vaste stof-vloeistof, kunnen mengsels vaste stof-gas gescheiden worden door filtreren. In fig. 6.3.1 zijn een aantal filters weergegeven waarvan de werking voor zichzelf spreekt. Bij de zakkenfilters kan de achtergebleven vaste stof periodiek worden verwijderd door het betreffende compartiment buiten bedrijf te stellen en het raamwerk met behulp van een inrichting in een op- en

neergaande beweging te brengen. De zakken worden hierdoor beurte-
lings gespannen en ontspannen (zakken kloppen). Bij de tegenwoordige
zakkenfilters gebeurt de regeneratie van de filters vaak continu.

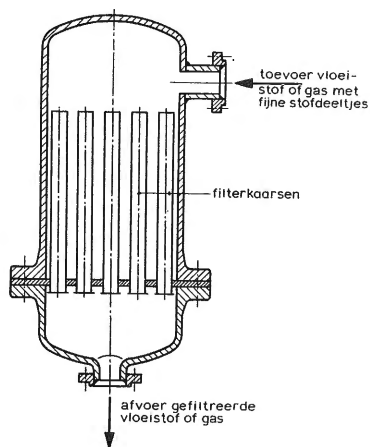
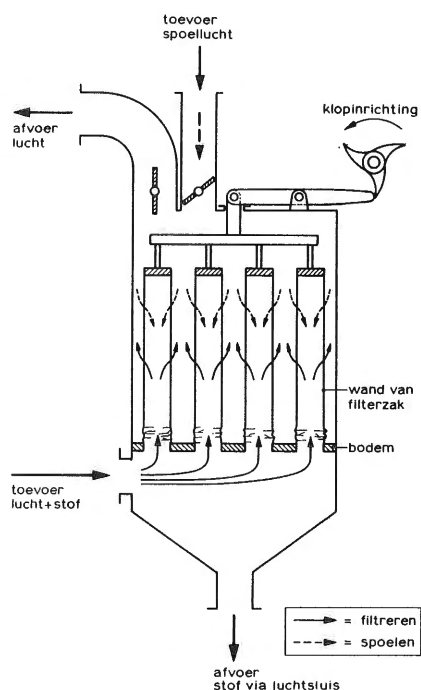


Fig. 6.3.1. Zakkenfilter met klopinrichting (a).

Kaarsen filter (b)

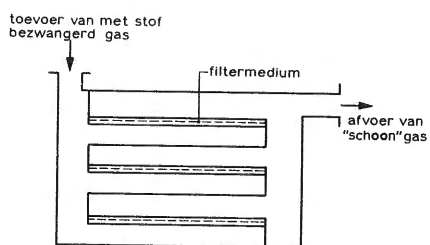


Fig. 6.3.1. Platenfilter (c).

LITERATUURLIJST

1. Casal, J., Martinez-Benet, M.J., A better way to calculate cycloon pressure drop. Chemical Engineering, nov. 7 (1977) 80.
2. Eelkman Roorda, J., Quasi-static stresses in symmetric mass-flow silo's. Dissertatie, 1978. Afdeling werktuigkunde, Universiteit Twente.
3. Everts, R., Het ontwerpen van silo's. Procestechniek 3 (1977) 122.
4. Haaker, G., Storage of Bulk Solids. Voordracht, nov. 1981. Afdeling der werktuigkunde, Universiteit Twente.
5. Hemfort, H., De scheiding van vloeistofmengsels met behulp van seperatoren, 1 en 2. Procestechniek 10-7 (1974) 460; 24-7 (1974) 488.
6. Koch, H., Licht, H., New design approach!boots cyclone-efficiency. Chemical Engineering, . nov. 7, (1977) 80.
7. Kwanten, J.G., Filtratie, een korte beschouwing, Procestechniek 32 (1977) nr. 1 13.
8. Leek, J.H. van der, Granuleren. Procestechniek 3 (1977) 137.
9. Moir, D.N., Batch pressure filtration, Chemical Engineering, july 26 (1982) 47.
10. Müller, W., Schröter, K., Über das pneumatische Schubfördern (Theorie und Praxis), DK 621.867. 81/85: 533,7,
11. Müller, W., Strömungsformen der pneumatischen Förderung, DK 621.867.81/85.
12. Roolvink, A.J., Pneumatisch mengen en homogeniseren van stortgoederen. Procestechniek 3 (1977) 130.
13. Roolvink, A.J., Pneumatisch in-line ontstopping van kunststofgranulaat. Procestechniek 37 (1982) Nr. 10, 84.
14. Veldkamp, R.G., Slibindikking door zwaartekracht (1), H₂O (13) (1980), nr. 14 300.
15. Wirth, Karl-Ernst, Die Grundlagen der pneumatische Förderung, Chem., -Ing. - Tech. 55 (1983) Nr. 2, 110.
16. Zuilichem, D.J. van, Malen met recirculatie, in het bijzonder granen. Procestechniek 3 (1977) 142.

Boeken

1. Bruin, S., Spaninks, J., Inleiding in de proceskunde, Landbouw-universiteit Wageningen, (1977).
2. Coulson, J.M, en Richardson, J.F. Chemical Engineering, volume 2, 3^e ed, (1977). Pergamon Press Oxford.
3. Foust, A.S., e.a., Principles of Unit Operations, 2^e ed. John Wiley and Sons, New York, (1980).
4. Kok, G.J., Zuideveld, P.L., Fysisch-technische scheidingsmethoden. Delftsche Uitgevers Maatschappij B.V., Delft (1973).
5. Perry, J.H., Chemical Engineers Handbook, 5^e ed. Mc Graw-Hill Book Comp., New York, 1973.

LITERATUUROVERZICHTEN

Third European Conference on mixing.	BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England (april, 1979).
Hydrocyclones.	BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England (oktober, 1980).