



**Sedimentatiesystemen
voor sleepopperzuigers 1**

Eerste afstudeeropdracht

M.J.P. Meeuwissen, rapp.nr:92.3.GV3064

Begeleiders:

Ir H.P. Hokke, HAM

Dr ir S.A. Miedema, T.U. Delft

Hollandsche Aanneming Maatschappij
Capelle aan den IJssel, april 1993

VAKGROEP TRANSPORTTECHNOLOGIE, SECTIE GRONDVERZET

Project-/thema-code:	030C922	Soort opdracht:	1 ^e vierdejaars
VF-code:	WB-02/83-29	Opdrachtnummer:	92.3.GV.3064
Vertrouwelijk:	Ja	Datum:	25 november 1992
		Naam:	M.J.P. Meeuwissen

Titel: **hopperbezinksystemen**

Overweging:

Begripsbeschrijving

Voor het winnen van zand zijn verschillende werktuigen te onderscheiden. De twee belangrijkste type werktuigen zijn de snijkopzuiger en de sleehopperzuiger. Een snijkopzuiger wordt gekenmerkt door een zuigbuis met aan het einde een roterende snijkop, die de grond losmaakt en vervolgens verticaal omhoog transporteert. Een sleehopperzuiger is een schip dat een zuigmond over de bodem voortsleept en door hydraulische erosie zand losmaakt, waarna het door de zuigbuis omhoog getransporteerd wordt.

Van groot belang bij een sleehopperzuiger is de cyclustijd, bestaande uit een winfase en een transportfase. De transportfase is in deze opdracht geen doel van onderzoek.

Er ontstaan tijdens de winfase verliezen bij het beladen van de hopper. Na het verticale transport wordt het mengsel in de hopper van de sleehopperzuiger gestort. In de hopper worden zand en water gescheiden doordat de korrels bezinken en het water, wanneer de hopper gevuld is met mengsel, via een overloop de hopper verlaat met de niet bezonken deeltjes. De grootte van dit overvloeiverlies is ondermeer afhankelijk van de samenstelling van de grond (korrelgrootte, slibgehalte), het debiet, de concentratie van het opgezogen mengsel en de vormgeving en dimensies van het gehele systeem (inlaat, bezinkgebied en overvloei).

Probleemstelling

Bij fijn en/of slibhoudend zand is het bezinkrendement van de huidige bezinksystemen laag. Dit heeft als gevolg dat gedurende een bepaalde laadtijd weinig nuttige lading in de hopper neerslaat, en de efficiency van de baggeroperatie laag is.

Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het genereren van praktische oplossingen ter verbetering van het bezinkrendement bij het sleepzuigen van fijn en/of slibhoudend zand.

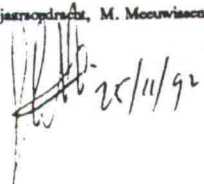
Tot nu toe uitgevoerd onderzoek

In een eerste afstudeeronderzoek in 1990 is een inventarisatie gemaakt van de relevante fysische processen bij de hopperbezinking. Vervolgens is er een schaalmodel ontwikkeld, waarin de processen zijn bestudeerd. Mede op basis van dit onderzoek is een aantal concrete verbeteringsvoorstellen gedaan. De modelopstelling is inmiddels ingrijpend aangepast teneinde aan de nieuwe randvoorwaarden en meetnauwkeurigheden te kunnen voldoen.

Uit te voeren werkzaamheden

Analyse van de processen die een rol spelen bij hopperbezinking. Inventarisatie van de bezinksystemen in sleehopperzuigers en het zoeken naar alternatieve systemen. Beoordelen van de verschillende systemen. Dit gebeurt aan de hand van voorspellingen omtrent de werking en eventueel onderzoek in een model. Verder worden bij de beoordeling andere eigenschappen van de systemen beschouwd, zoals vereiste scheepsgeometrie, bereikbaarheid andere systemen in de hopper, slijtage en uitval.

In de 2^e vierdejaars opdracht zal een veelbelovend bezinkstelsel worden uitgewerkt. Vervolgens zullen onderdelen hiervan op schaal worden vervaardigd en beproefd. De resultaten van deze proeven moeten indicaties geven of het bezinkstelsel op de voorspelde wijze functioneert en of het een verbetering van de reeds bestaande systemen is.

 25/11/92

A. Uitgangspunten

- A1. Koning J. de, *Constant Tonnage Loading Systems of Trailing Suction Hopper Dredgers*, Internationale Cursus: Modern Dredging.
- A2. Miedema, S.A., *Het stromen van baggerspecie in en uit hoppers en het bezinkproces in hoppers*, Technische Universiteit Delft, Afdeling der Werktuigbouwkunde, 1981.
- A3. Bij de HAM aanwezige literatuur.
- A4. Verdere relevante literatuur.
- A5. Bij de HAM aanwezige faciliteiten.

B. Opdrachten

- B1. Korte procesanalyse van hopperbezinking.
- B2. Inventarisatie van reeds bestaande bezinksystemen en zoeken naar alternatieven.
- B3. Uitvoeren van modelproeven.
- B4. Modelleren en opstellen eigenschappen van de verschillende systemen.
- B5. Vergelijken en beoordelen van de verschillende systemen.
- B6. Meest veelbelovende systeem kiezen. Dit wordt in de 2^e vierdejaarsopdracht definitief beproefd en constructief uitgewerkt.
- B7. Rapportage omtrent B1 t/m B6.

C. Begeleiding

Uw directe begeleider voor deze opdracht is Dr.ir S.A. Miedema. Met hem dient U tweewekelijks contact te onderhouden inzake de voortgang van deze opdracht. Namens de HAM zal Ir H.P. Hokke als begeleider optreden.

De student is verantwoordelijk voor de voortgang van het project. De beide begeleiders controleren de voortgang.

D. Planning en rapportage

Gestreefd zal worden naar een tijdsbesteding van 760 uur (19 weken), inclusief rapportage. De opdracht vangt aan op 2 november 1992. De tijdsbesteding is 40 uur per week.

Het rapport mag een omvang van 75 pagina's exclusief bijlagen en listings niet te boven gaan. Het rapport vangt aan met een kopie van deze opdracht, gevolgd door een inhoudelijke samenvatting van ten hoogste vijf pagina's.

De tijdsindeling naar de in B genoemde punten zal als volgt zijn: B1, vijf weken; B2 en B3, zes weken; B4 t/m B6, vier weken; B7, drie weken. Voorafgaand aan het hiervoor opgesomde zal één week worden besteed aan plannen en het opstellen van de inhoudsopgave.

Nadat tweederde van de opdracht is voltooid, volgt een bespreking met de hoogleraar en de begeleiders. Pas dan zal de 2^e vierdejaars opdracht worden geformuleerd

Er wordt een intern-HAM-rapport gemaakt dat als basis voor de eindbeoordeling kan dienen. Op basis hiervan wordt een TU-afstudeerrapport gemaakt, waarbij de HAM zich het recht voorbehoudt om gevoelige HAM-bedrijfsinformatie daarin niet te laten opnemen.

[Handwritten signature]
25/11/92

E. Archivering en eigendom

Het TU-afstudeerrapport is eigendom van de Technische Universiteit Delft. Het manuscript wordt losbladig ingeleverd bij de hoogleraar, terwijl twee gebonden exemplaren worden gemaakt voor plaatsing in de bibliotheek van de vakgroep Transporttechnologie voor intern TUD-gebruik.

De TUD zal het rapport de eerste twee jaar na gereedkomen niet aan derden verstrekken zonder schriftelijke toestemming van de HAM.

De industriële eigendomsrechten van dit project zijn van de HAM. Publikatie zal in principe een gezamenlijke inspanning van TUD/HAM zijn.

F. Embargo

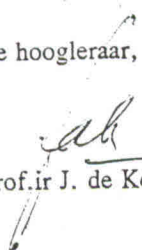
Naast een kopie van het TU-afstudeerrapport voor de HAM zal ook de student een kopie van dit rapport krijgen. De student en zijn begeleiders verklaren bij deze het embargo te zullen eerbiedigen en de gevoelige HAM-bedrijfsinformatie vertrouwelijk te zullen behandelen.

Voor accord:

De student,


M.J.P. Meeuwissen

De hoogleraar,


Prof. ir J. de Koning

HAM,


Ir G.L.M. van der Schrieck

C.c.: Dr. ir S.A. Miedema
Ing. J. Brouwer
Hr. M. Neeleman
Ir. H.P. Hokke

T.U. Delft
T.U. Delft
T.U. Delft
HAM

Samenvatting

Dit onderzoek heeft als doel het genereren van praktische oplossingen ter verbetering van het sedimenteren van vaste stof gedurende het laden aan boord van sleephopperzuigers.

De sleephopperzuiger is een baggerwerktuig dat door middel van een of meer zuigbuizen specie van de bodem omhoog naar de hopper pompt. In de hopper wordt de specie ontdaan van zoveel mogelijk water, zodat een zo groot mogelijke hoeveelheid vaste stof kan worden getransporteerd. De hopper dient tevens als opslagruimte gedurende het horizontale transport. Vooral als de specie veel slecht bezinkende deeltjes bevat is het van belang het sedimentatie proces te optimaliseren.

De sleephopperzuiger wordt onderverdeeld in de volgende subsystemen: het casco, het aandrijfsysteem, het zuigstelsel, de hopper en de besturing. Het hoppersysteem wordt onderverdeeld in drie soorten subsystemen: de instroom, het bassin en de uitstroom.

De drie soorten hoppersubsystemen worden beschreven en beschouwd aan de hand van de verschillende criteria. De belangrijkste zijn de proces criteria: de bezinksnelheid en de uitschuring, deze worden beïnvloed door onder andere de mengsnelheid, de turbulentie en de deïningsinvloed. Verdere criteria zijn de constructieve: de eenvoud, het gewicht en de slijtage. En tenslotte de overige criteria: de uitval, de kosten en of het systeem reeds bestaat in verband met vereiste tests en onderzoek alvorens het toepasbaar is.

Het eerste hoppersubstelsel, **de instroom**, kan worden verbeterd door de stroomsnelheden laag te maken, het mengsel goed te verdelen over de breedte van het bassin, de instroom rustig te laten verlopen en erosie van het bezonken zandbed te voorkomen. De snelheid kan lager worden gemaakt door verbreding van de stroom zoals bij de fishtail en door het doen afnemen van de kinetische energie zoals bij de woelbak.

Het tweede hoppersubstelsel, **het bassin**, dient als opslagruimte voor de vaste deeltjes gedurende het horizontale transport. Het bassin is optimaal uit te voeren door de stroming goed over het bodemoppervlak te verdelen. Dit kan gebeuren door schotten, die tevens de kinetische energie van het mengsel doen afnemen. De suspensiestroom op de bodem kan worden beïnvloed door intermitterend beladen. Naarmate de vaste stof concentratie toeneemt ontstaat gehinderde bezinking, waardoor de valsnelheid van de deeltjes afneemt.

Het derde hoppersubstelsel, **de uitstroom**, moet het mengsel rustig uit de hopper laten stromen. Dit kan worden bereikt door plaatsing van schotten, door deïningscompensatie en door afstemming van de overvloedhoogte op het laadproces.

Twee hoppersubsystemen komen uitgebreid aan de orde, de cyclonenseparator en de lamellenbezinker.

De cyclonenseparator, als instroomsysteem toegepast, heeft twee gunstige werkingen. Het debiet van het in het bassin stromende mengsel is kleiner en de gemiddelde deeltjesdiameter van dit mengsel is groter. Van aspecten als slijtage, uitval en flexibiliteit met betrekking tot soorten mengsel is niet voldoende bekend om een uitspraak te kunnen doen omtrent de geschiktheid van de cyclonenseparator. Cyclonen zijn zeer gevoelig voor schommelingen in de eigenschappen van het instromende mengsel, zoals dichtheidschommelingen. Met name grote deeltjes kunnen de wervelingen in een cycloon ongunstig beïnvloeden. Voor het verkrijgen van voldoende sedimentatie bij grote sleephopperzuigers is volgens fabrikanten minimaal een tiental cyclonen met hoofddiameters van ongeveer één meter nodig. Dit betekent een ingewikkeld stromingsverdelingsstelsel en veel drukverlies.

De werking van cyclonen is gebaseerd op centrifugaalkracht, die ingewikkelde stromingen aandrijft. Uit de literatuur blijkt dat de precieze werking van de processen in de cycloon nog niet volledig bekend zijn. Mathematische beschrijving van de processen in cyclonen is gecompliceerd door het ontbreken van kennis over de processen en het driedimensionale karakter van de stromingen. Het verschalen ten behoeve van fysische modellen is hierdoor niet eenvoudig.

Volgens bepaalde fabrikanten zijn goede resultaten aan boord van sleehoppers te verkrijgen

door het plaatsen van een twaalftal cyclonen met hoofddiameters van ongeveer één meter. Voor een cycloon met een ingaande mengselstroom waarvoor geldt dat de gemiddelde deeltjesdiameter ongeveer 200 μm en de concentratie ongeveer 18 % is, wordt **het hopperrendement na diverse aannames een factor 1,4** groter, dan zonder het toepassen van een cyclonenseparatiesysteem. Dit wordt veroorzaakt door de grotere deeltjesdiameter en het kleinere debiet dat in het bassin stroomt. Echter het debiet dat van de bodem naar het schip wordt gepompt blijft gelijk.

Het andere in dit rapport uitgewerkte hoppersubstelsysteem is **de lamellenbezinker**, toegepast als uitstroomsysteem. Plaatsing als uitstroom is gunstig, bij de uitstroom is de vaste stof concentratie lager en de gemiddelde deeltjesdiameter kleiner dan bij de instroom. Hierdoor is het stroombeeld rustiger en stabiel, met als gevolg dat een voor de lamellenbezinker van belangzijnde menglaag tussen uitstromend mengsel en bezonken zandpakket, de suspensie laag kleiner en stabiel zal zijn.

De werking van de lamellenbezinker is gebaseerd op zwaartekracht. Er ontstaan twee langs elkaar bewegende stromingen, tussen achtereenvolgende schuin opgestelde evenwijdige lamellen. Bij het meestromende lamellensysteem stroomt de bovenste laag, de mengsellaag, met een lage concentratie naar boven en de onderste laag, de suspensie laag, met een hoge concentratie naar beneden. De menglaag tussen de twee stromingen dient een zekere mate van stabiliteit te hebben.

Voor mengselstromingen met een gemiddelde deeltjesdiameter van ongeveer 150 μm en een in de lamel gaande concentratie van 12 %, wordt verwacht volgens berekeningen dat **het hopperrendement na diverse aannames met een factor 1,6** wordt vergroot, ten opzichte van een hopper zonder lamellenbezinkersysteem. Terwijl de concentratie van het mengsel dat het bassin instroomt ongeveer 18 % bedraagt.

Op grond van de beoordeling van de verschillende hoppersubsystemen en de combineerbaarheid van de hoppersubsystemen, zijn de volgende hopperconfiguraties interessant en veelbelovend.

De vijf te beproeven hopperconfiguraties

Het instroomsysteem is bij alle configuraties **het sproeiersysteem (afb. 4.8)**.

1. **Open bassin (afb. 4.11)**
Ronde uitstroom (afb. 4.21)
2. **Schotten verticaal kerend bassin (afb. 4.15)**
Ronde uitstroom
3. **Schotten verticaal keren bassin; intermitterend beladen**
Ronde uitstroom
4. **Open bassin**
Lamellen met flappen (afb. 4.19)
5. **Open bassin**
Flappen doorlaat (afb. 4.18)

Iedere configuratie zal op vier verschillende wijzen worden beproefd, bij de verschaalde debieten $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ en $16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ en bij de verschaalde dichtheden $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ en $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Inhoud

Opdrachtsomschrijving

Samenvatting	i
Inleiding	1
1 De sleephopperzuiger	3
1.1 Omgeving	3
1.2 Procesanalyse	4
2 Subsystemen van de sleephopperzuiger . .	7
2.1 Het casco	7
2.2 Het aandrijfsysteem	8
2.3 Het zuigsysteem	10
2.4 De hopper	14
2.5 De besturing	15
3 De hopper	17
3.1 Subsystemen	17
3.2 Beladingsverloop	18
3.3 Fysische processen	18
3.4 Invloed van de procesparameters	23
4 Hopperconfiguraties	25
4.1 Instroomsysteem	25
4.1.1 Soorten	25
4.1.2 Eigenschappen	28
4.1.3 Beoordeling en vergelijking	29
4.2 Bassinsysteem	30
4.2.1 Soorten	30
4.2.2 Eigenschappen	32
4.2.3 Beoordeling en vergelijking	34

4.3	Uitstroomsysteem	35
4.3.1	Soorten	35
4.3.2	Eigenschappen	38
4.3.3	Beoordeling en vergelijking	39
4.4	Te beproeven hopperconfiguraties	40
5	Cyclonen separator	43
5.1	Inleiding	43
5.1.1	Basisprincipe	43
5.1.2	Verdeling van de stroomsnelheid	44
5.1.3	Het effect van de ontwerp parameters	45
5.1.4	Hopperrendement	48
5.2	Separatie theoriën	50
5.3	Cycloonprestaties	52
5.3.1	Volgens fabrikanten	52
5.3.2	Berekeningen	53
5.4	Conclusies	58
6	Lamellenbezinker	59
6.1	Basisprincipe en werking	59
6.1.1	Scheidingsdiameter	60
6.1.2	Laagdikte tussen de lamellen	62
6.1.3	Mengselstroomsnelheden	64
6.2	Berekening van een lamellensysteem	66
6.2.1	Bezonken laagdikte	66
6.2.2	Mengselstroomsnelheid	67
6.2.3	Stabiliteit	67
6.2.4	Afstroming langs lamellen	68
6.2.5	Berekeningen	69
6.3	Gewenst bezinkingseffect	70
6.4	Rendementsverbetering	71
6.5	Conclusies	72
	Conclusies	73
	Referenties	75
	Symbolen	77
	Bijlage	

Inleiding

Het doel van het in dit rapport beschreven onderzoek is het genereren van praktische oplossingen ter verbetering van het sedimentatie proces gedurende het laden aan boord van sleepopperzuigers.

Allereerst worden de omgeving en de werkwijze van de sleepopper behandeld. Vervolgens wordt de hopper beschreven. De hopper wordt in drie subsystemen opgedeeld. De fysisch processen die in de hopper een rol spelen komen aan de orde.

Hierna worden de drie subsystemen op systematische wijze behandeld, om vervolgens te worden beoordeeld naar proces, constructieve en overige criteria. De drie subsystemen zijn: de instroom, het bassin en de uitstroom. Tevens wordt de combineerbaarheid van de verschillende subsystemen bekeken.

Eén van de instroomsystemen, de cyclonenseparator en één van de uitstroomsystemen, de lamellenbezinker worden uitvoerig beschouwd.

Met de cyclonenseparator zijn in het verleden goede resultaten bereikt met zandverwerkingsinstallaties op land. Vooral in de mijnbouw wordt de cycloon veel toegepast. De werking van de cycloon is gebaseerd op centrifugaalkrachten, die gecompliceerde stromingen doen ontstaan. De precieze werking van de cycloon is niet bekend. De beoordeling van de cyclonen gebeurt aan de hand van globale formules en aan de hand van praktijkproeven. Het verscalen ten behoeve van proeven vormt een probleem door de onbekendheid van het proces in de cycloon. De cyclonenseparatie heeft als instroom een twee gunstige werkingen. Er komt een kleiner debiet in het bassin, waardoor de hopperbelasting afneemt en de gemiddelde diameter van de deeltjes wordt vergroot.

De lamellenbezinker wordt tot nog toe niet toegepast voor mengsels met hoge concentraties zoals bij toepassingen in de bagger het geval is. Wel wordt veel gebruik van gemaakt bij waterzuivering. De werking is gebaseerd op gravitatiekracht, die zorgt voor het ontstaan van twee stromen, waarvan de ene een hoge vaste stof concentratie heeft en de andere een lage, met tussen deze lagen een menglaag. Plaatsing van de lamellenbezinker als uitstroom is gunstig ten opzichte van plaatsing als instroom, aangezien de concentratie daar laag is en de gemiddelde deeltjesdiameter klein. Dit betekent dat de deeltjes minder last hebben van gehinderde bezinking en bovendien is de stroming minder turbulent.

Aan de hand van het vergelijken van de eigenschappen van de verschillende hopperconfiguraties, vooral gelet op proces criteria, zal worden geconcludeerd welke systemen het meest veelbelovend en interessant zijn en verder zullen worden beproefd.

X
13 dat zo

1 De sleephopperzuiger

De sleephopperzuiger wordt over het algemeen ingezet bij onderhoudsbaggerwerk, zandwinning en het maken van profielen ten behoeve van bijvoorbeeld pijpleidingen.

1.1 Omgeving

In de onderstaande tabel wordt de omgeving van de sleephopperzuiger schematisch weergegeven.

Fysische omgeving	lucht (weer)	windkracht temperatuur
	water	golven stromingen
	vaste grond	bodemsoort geografie
Positie	bepaling	bakens satellieten
	behouden; wijziging	veranker en afzet mogelijkheden
Naburige activiteiten	scheepvaart	
	offshore installaties	
Flora en fauna (milieu)	water	planten vissen micro organismen
	lucht	vogels
Wetgeving	politieke stabiliteit (invoer)belasting milieuwetgeving	
Economie	project omvang kosten risico	

tab. 1.1: Omgeving van sleephopperzuiger

Als jeer
 War doe je hier mee?
 war mee wilt mis it
 Sw, Skornel etc.

1.2 Procesanalyse

Bij de sleepopperzuiger is sprake van een cyclisch proces. In deze paragraaf komen de tijdfasen van de cycli en het bepalen van de optimale laadtijd aan de orde.

Cyclusfasen

Winfase

Eerst wordt de grondsamenhang mechanisch of hydraulisch verbroken. Vervolgens wordt de losgemaakte grond ontgraven en met water tot specie vermengd.

Om de juiste grond te verwijderen en het ontgravingsproces geregeld te laten lopen dient het werktuig horizontaal en verticaal te worden gepositioneerd.

De specie wordt op mechanische of hydraulische wijze verticaal getransporteerd. Tenslotte wordt de specie gestort en ontvangen in het middel van vervoer.

Transportfase

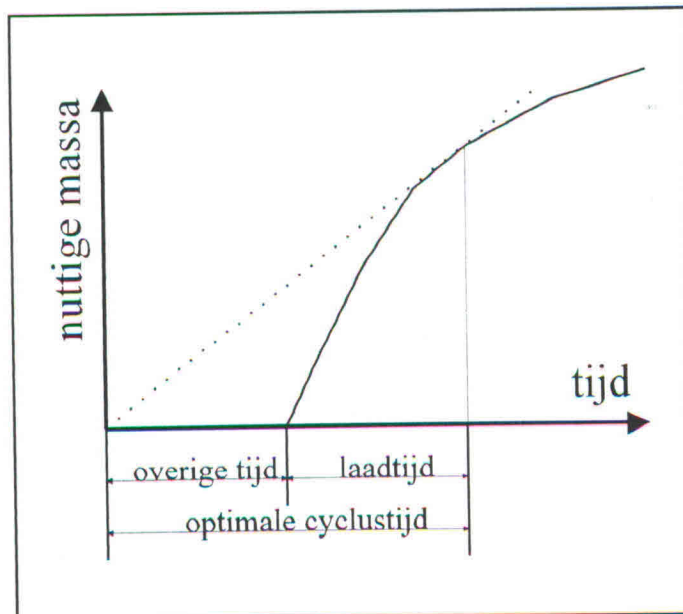
De transportfase omvat het horizontale vervoer en het lossen. Het horizontale vervoer gebeurt varend, hydraulisch of mechanisch. Daarna wordt de specie gelost en naar de plaats van bestemming afgevoerd.

Bij de bovenstaande procesfasen ontstaat mors ten gevolge van het verbreken van de grondsamenhang, het lossen uit het vervoermiddel, het verticale transport, het overstromen van bakken of hoppers en het storten in ophoging.

Aan het eind van het laadproces is de mors (het overvloeiverlies) zo groot dat verder laden economisch ongunstig is. De optimale laadtijd wordt bepaald met behulp van de grafiek van het laadverloop (afb. 1.1).

Optimale laadtijd

Het vinden van de optimale laadtijd gebeurt op grafische wijze. De laadcurve is de kromme lijn. De raaklijn is de stippellijn die door het beginpunt van de cyclus loopt. Deze lijn raakt aan de laadcurve. Verder heeft deze raaklijn geen punten met de laadcurve gemeen. De afstand tussen het bij het raakpunt horende tijdstip en het tijdstip waarop het laden aanvangt, is de optimale laadtijd. De overige tijd bestaat uit het varen, het lossen en de andere handelingen die tijd in de cyclus kosten. De cyclustijd is de som van de laadtijd en de overige tijd.



afb. 1.1: Laadverloop

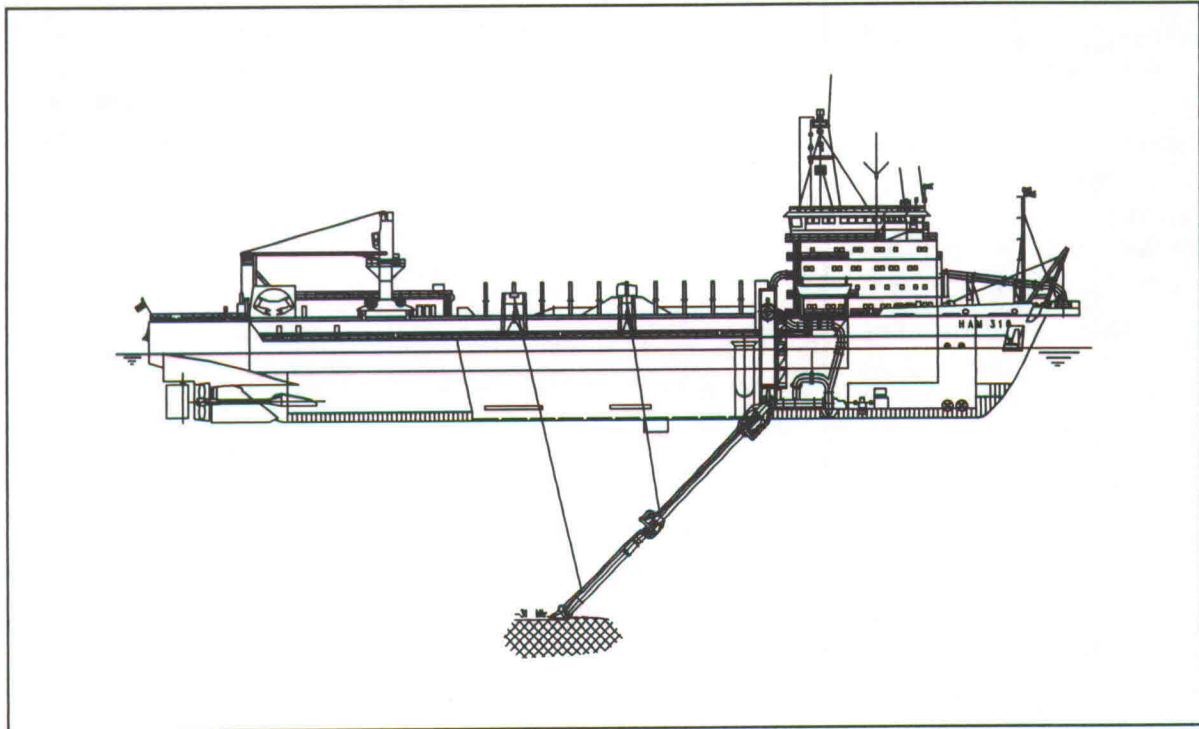
Factoren van invloed op de optimale laadtijd

- De eerste factor is de **vervoersafstand** waarover het materiaal moet worden verplaatst. Des te groter deze afstand, des te gunstiger is het om zo veel mogelijk materiaal per cyclus te verplaatsen. Des te groter de vervoersafstand des te langer is de overige tijd.
- De tweede factor is de **bezinksnelheid** van het materiaal. Naarmate een materiaal langzamer bezinkt is het ongunstig lang door te laden. Een extreem geval is slib, dat zeer langzaam bezinkt, waarbij gestopt wordt met laden als het overvloeieniveau is bereikt.

De bezinksnelheid van het materiaal bepaalt het verloop van de laadcurve. Bezinkt een materiaal slecht, dan zal er na aanvang van overvloeien weinig nuttige lading per tijdseenheid bijkomen. De laadtijd is dan kort. Bij goed bezinkend materiaal, bijvoorbeeld grint, loopt de laadcurve na overvloeien steil. De optimale laadtijd is dan kort.

2 Subsystemen van de sleephopperzuiger

In dit hoofdstuk worden de subsystemen van de sleephopperzuiger beschreven.



afb. 2.1: De sleephopperzuiger

2.1 Het casco

Het casco is de scheepsconstructie compleet met accommodatie en scheepspijpleidingen, exclusief alle daaraan verbonden of daardoor gedragen delen.

Het casco is bepalend voor de weerstand, het drijfvermogen en het reserve drijfvermogen van het schip. De positie van de accommodatie is belangrijk in verband met de veiligheid en de plaats van de overige scheepsonderdelen. Tegenwoordig wordt de accommodatie veelal voor op het schip geplaatst. De hopper wordt steeds vaker gesloten uitgevoerd. Hierdoor ontstaat een gesloten profiel dat zich stijver gedraagt. Een lange hopper is beter voor de bezinking van deeltjes maar de hopper kan vanwege constructieve beperkingen niet te lang worden gemaakt.

2.2 Het aandrijfsysteem

Bij een schip wordt onderscheid gemaakt tussen hoofd- en hulpaandrijvingen. De hoofdaandrijvingen bij een sleeppopperzuiger zijn die aandrijvingen, welke bestemd zijn voor de voortstuwing en de baggerpompen. De hulpaandrijvingen zorgen voor de aandrijving van overige gebruikers. Als primaire aandrijvers worden tegenwoordig vrijwel uitsluitend dieselmotoren toegepast vanwege het lage brandstofverbruik, het betrekkelijk geringe gewicht en de aanvaardbare koppel-toeren karakteristiek.

Door het vermogen vereist voor zowel de voortstuwing als de baggerpompen uit gemeenschappelijke dieselmotoren te betrekken, kan worden bereikt dat:

- Een gering aantal cilinders nodig is.
- Geen vervuilingproblemen ontstaan als gevolg van niet continu gebruik van de baggerpompen, resulterend in intermitterend dieselgebruik.
- Afhankelijk van het geïnstalleerd vermogen een relatief hoge vaarsnelheid kan worden bereikt.
- Eerder zware olie kan worden gebruikt.
- Veelal niet meer primair vermogen hoeft te worden geïnstalleerd en soms zelfs minder doordat het geïnstalleerd vermogen onder wisselende omstandigheden kan worden afgegeven. Bovendien is een variabele vermogensverdeling tussen voortstuwing en baggerpomp aandrijving mogelijk.

~~van de pomp~~
Warrige zijn!

formele overguls

Wat is mogelijk?

Pomp

Er zijn vijf mogelijkheden voor de koppeling tussen de aandrijver en de baggerpomp.

- **Onafhankelijke aandrijving via een dieselmotor met een mechanische transmissie:** Dit heeft als voordeel dat een hoog rendement op de aandrijving wordt bereikt.
- **Elektrisch aandrijving:** Het is mogelijk het primair geïnstalleerd vermogen tijdens de vaart te gebruiken. Een bijkomend voordeel is dat een elektromotor vergeleken met een dieselmotor weinig aandacht vergt en minder ruimte vereist.
- **Hydraulisch aandrijving:** Dit principe wordt alleen toegepast bij de sleeppopperzuiger in het geval dat de pomp aan de zuigbuis is bevestigd. Tegenover het geringe gewicht en de geringe afmetingen van een hydromotor vergeleken met een elektromotor, staat doorgaans een complex en dikwijls kwetsbaar geheel van leidingen en slangen op en naar de zuigbuis en bovendien een slechter rendement van de aandrijving.
- **Wrijvingskoppeling met regelbare slip:** Deze configuratie vindt niet alleen toepassing in geval van een achter het laadruim opgestelde baggerpomp, die door een gemeenschappelijke hoofdmotor voor de pomp en de schroef wordt aangedreven, doch ook in geval van een aandrijving door een kortsluitankermotor. In beide gevallen heeft de aandrijfmotor een nagenoeg constant toerental. Vanzelfsprekend gaat bij slip een deel van het toegevoerde vermogen verloren en wordt omgezet in af te voeren warmte. Daartegenover staat dat het toereengebied waarin geregeld wordt doorgaans klein is, zodat het vermogensverlies beperkt blijft. De voordelen van deze configuratie zijn, het automatisch fungeren van de koppeling als beveiliging bij het vastslaan van de waaier in de pomp en het inschakelen van de pomp als de dieselmotor niet op toeren hoeft te worden teruggebracht.
- **Gemeenschappelijke hoofdmotor voor de pomp en de schroef via een mechanische transmissie met schakelkoppeling:** Deze configuratie komt niet veel voor.

Voortstuwing

De meest gebruikelijke voortstuwert is **de sloopsschroef**, door de eenvoud en het relatief hoge rendement. Andere mogelijke voortstuwerters zijn: **het slooppenrad**, **de Voith-Schneider propeller** en **de waterstraalvoortstuwing**. Deze laatste wordt enkel toegepast als de omstandigheden het gebruik van de normale sloopsschroef uitsluiten of bezwaarlijk maken. Het rendement van de voortstuwinginstallatie wordt, naast het rendement van de aandrijver en de overbrenging van het vermogen naar de schroef, niet alleen bepaald door het schroefrendement, maar ook door de vorm van het sloop en het roer.

De snelheid van een sloop kan worden uitgedrukt in vergelijking 2.1, die volgt uit de modelwet van Froude. De waarde van de admiraliteitscoëfficiënt, C , varieert bij een sleehopperzuiger tussen de 0,5 en 0,8.

Het verband tussen vrijvarende sloopssnelheid, deplacement en voortstuwingvermogen kan worden uitgedrukt in de zogenaamde admiraliteitsformule:

$$P = \frac{\Delta \cdot 0,5 \cdot v_s^3}{C} \quad (2.1)$$

met:

P	W	voortstuwingvermogen
Δ	m^3	deplacement
v_s	m/s	sloopssnelheid
C	m^4/kg	admiraliteitscoëfficiënt

De admiraliteitscoëfficiënt is onder andere afhankelijk van het sloopstype, de sloopsgrootte, de snelheid, de volheid en de schroefeigenschaften. Het benodigde vermogen is evenredig met de derde macht van de vaarsnelheid.

Er zijn drie mogelijkheden voor de koppeling tussen de aandrijver en de voortstuwert.

- **Schroef met vaste spoed, gecombineerd met omkeerreductiekasten:** Deze wordt toegepast op kleine sleehopperzuigers. Het vermogen van de onafhankelijk aangedreven baggerpomp is dan niet groot vergeleken met het voortstuwingvermogen.
- **Elektrische schroefaandrijving:** Deze komt weinig voor, ondanks de aantrekkelijkheid voor schepen die altijd korte afstanden varen.
- **Verstelbare schroef gekoppeld met een dieselmotor:** Deze is uit het oogpunt van het brandstofverbruik duidelijk in het voordeel.

2.3 Het zuigsysteem

In deze paragraaf worden de processen en installaties met betrekking tot het transport van deeltjes vanaf de bodem tot aan de hopper beschreven. Het zuigsysteem is meestal aan weerszijde van het schip uitgevoerd. Er bestaan ook sleepoppers met één zuigsysteem.

Sleepkop

De sleepkop is vaak aanpasbaar of instelbaar voor een bepaald soort op te zuigen materiaal. De sleepzuigmonden zijn in de volgende drie uitvoeringen in te delen: met relatief grote intrede opening voor slib, met kleine intrede opening voor zand en grind, met mechanische losmaakmiddelen voor vast gepakte cohesieve grondsoorten en zachte rots.

Voor het verbreken van de grondsamenhang wordt de sleepkop veelal voorzien van een spuitwaterinstallatie.

De sleepzuigmond bestaat hoofdzakelijk uit een vaste kop en één of meer vizieren, die scharnierend met de helm zijn verbonden. De instelling van het vizier, die de grote van de doorstroomopening bepaald, kan worden gevarieerd. De doorgangopening van het vizier is zelfinstellend of deze wordt met hydraulische cilinders geregeld. Door middel van de instelling van het vizier, de stand van de sleepkop en eventuele watertoevoeging wordt de mengselconcentratie geregeld.

In of nabij de inlaatopening van het vizier is meestal een rooster geplaatst, dat grote delen tegenhoudt. Deze zouden problemen in de pomp kunnen veroorzaken. De onderdelen van de sleepkop die contact maken met de bodem worden onderworpen aan grote schurende slijtage. Deze worden uitgevoerd in slijtbestendig of eenvoudig vervangbaar materiaal.

Sleepzuigbuis

De sleepzuigbuis verzorgt het verticale transport van specie vanaf de sleepkop tot aan het schip.

De eisen die aan de sleepzuigbuis gesteld worden zijn:

- Instelbare zuigdiepte
- Voldoende bewegingsvrijheid
- Geringe weerstanden: betreffende het varen en het verticaal mengseltransport
- Kleine buigende momenten: zodat een lichte buisconstructie mogelijk is
- Voldoende sterkte
- Verantwoorde constructie: dit houdt onder andere in dat bij vastlopen van de zuigmond de schade beperkt blijft

De zuigbuis bestaat uit een onder- en een bovenbuis, die cardanisch zijn verbonden. Het flexibele deel van de buis tussen onder- en bovenbuis bestaat uit gewapend rubber.

Op verschillende punten is de zuigbuis aan draden opgehangen. Deze draden maken deel uit van het deiningscompensatiesysteem. Dit systeem zorgt voor het handhaven van bodemcontact met een zo constant mogelijke druk. Dit deiningscompensatiesysteem is bij de sleepopperzuiger nodig vanwege hoogtevariaties in het water- en het bodemoppervlak.

Pompsysteem

Het binnenboord plaatsen van het pompsysteem is het eenvoudigst. Echter bij grote baggerdiepten wordt het gunstig en uiteindelijk noodzakelijk de pomp onder water aan de zuigbuis te bevestigen.

Wanneer de vaste deeltjes in suspensie zijn draagt het water het gewicht van de vaste stof. Zolang de vaste deeltjes de viscositeit van het water niet beïnvloeden, kan de schoonwaterkarakteristiek van de pomp worden gehanteerd. Bij de interpretatie van de drukhoogten moet worden gerekend met het volumegewicht van het mengsel.

De manometrische druk van een pomp is gedefinieerd als

$$p = p_p - p_z + \rho \cdot g \cdot (h_p - h_z) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (u_p^2 - u_z^2) \quad (2.2)$$

met:

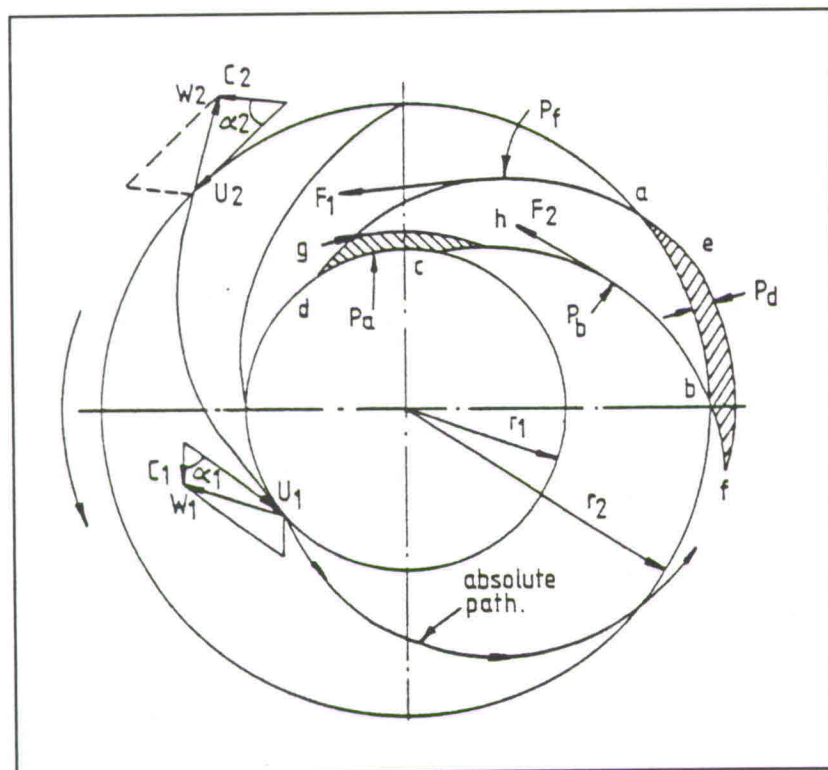
h_z m hoogte meetpunt aan zuigzijde t.o.v. hartpomp

h_p m hoogte meetpunt aan perszijde t.o.v. hartpomp

indices:

p perszijde

z zuigzijde



afb. 2.2: Deeltjesbaan in pompwaaier

De pompkarakteristieken

De vergelijking die het verband aangeeft tussen de dichtheid, de in- en uitreesnelheden en de concentraties met de druk is gegeven door de wet van Euler.

$$p_e = \rho \cdot (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1})$$

Wanneer het toerental van de waaier constant is geldt voor de druk:

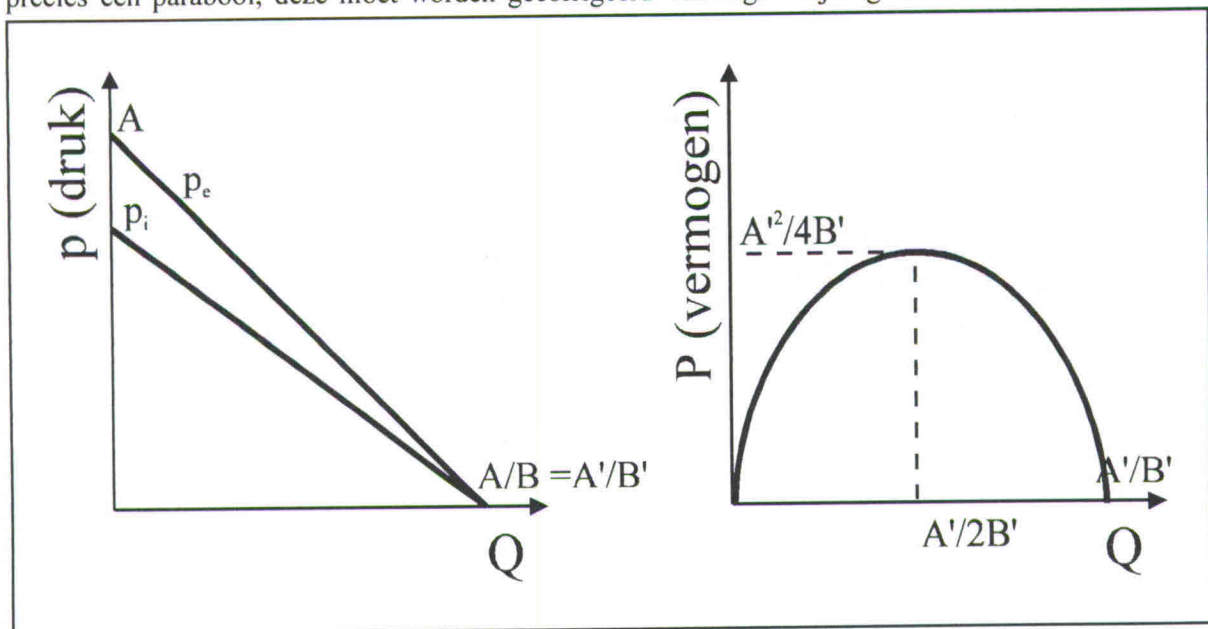
$$p_e = A - B \cdot Q$$

$$B = \rho \left[\frac{u_2^2}{r_2 \tan \beta_2} - \frac{u_1^2}{r_1 \tan \beta_1} \right] \quad \wedge \quad A = \rho \cdot (u_2^2 - u_1^2)$$

Dit is een vergelijking van een rechte lijn. Het vermogen kan worden geschreven als:

$$P = A' - B' \cdot Q^2$$

Dit is de vergelijking van een parabool. Een pompkarakteristiek uit de praktijk (afb. 2.2) is niet precies een parabool, deze moet worden gecorrigeerd vanwege wrijving- en de stootverliezen.



afb. 2.3: Pompkarakteristiek

Binnenboord

De pomp moet niet cavitatie gevoelig zijn. Een lage plaatsing heeft tot gevolg dat de opvoerhoogte aan de zuigzijde klein is. Dit maakt het zuigen van specie met een grotere

dichtheid of met een groter debiet mogelijk. Het is gunstig als de draairichting van de pompen overeenstemt met de stroomrichting van het mengsel die door stroming in bijvoorbeeld bochtstukken ontstaat in de buizen.

Onderwater

De punten die voor de binnenboord geplaatste pomp gelden, gelden hier weer. Het grote voordeel van het onderwater plaatsen van een pomp is het minder snel optreden van cavitatie. Hierdoor kunnen het debiet en de dichtheid van het te verpompen mengsel groter zijn. Bij het verpompen van specie van diepten groter dan ongeveer veertig meter wordt het noodzakelijk een onderwaterpomp toe te passen.

Enige nadelen die het plaatsen van de pomp onder water met zich mee brengt zijn:

- Het onderwater plaatsen van de pomp betekent een dure en lastig te onderhouden installatie.
- Het baggervaarttuig krijgt een grotere stromingsweerstand en wordt lastig te manoeuvreren.
- De kans op schade aan de pomp is groter.
- Tenslotte is het moeilijk de onderwaterpomp in te zetten bij het lossen van de hopper.

Voorbehandelingsystemen

Voorbehandelingsystemen worden zo geplaatst dat deze effect hebben op het instromende mengsel voor het in de hopper aankomt en meestal voor het pompsysteem. Een voorbehandelingsstelsel kan tot taak hebben het mengsel te ontdoen van grote objecten, gas en zoveel mogelijk water. Als voorbehandelingsstelsel worden de volgende installaties toegepast.

Gasafzuiginstallatie

De specie kan gas bestaande uit ontbindingsproducten van organisch materiaal bevatten. Dit kan het afslaan van de pomp tot gevolg hebben. Gasbelletjes hebben tevens een nadelige invloed op het bezinkproces in de hopper. Dit systeem wordt dus voor de pomp geplaatst.

Rooster

Dit zeft de nog in het mengsel aanwezige grote delen eruit. Een rooster wordt voor de pomp toegepast, zodat geen grote delen de pomp kunnen beschadigen. Om te voorkomen dat grote delen in de zuigbuis komen wordt een rooster voor de zuigmond geplaatst.

Cyclonenseparator

Tot op heden is de cyclonenseparator niet toegepast aan boord van sleehopperzuigers. Door middel van de middelpunt vliedende kracht ontstaat een dichtheidsgradiënt in de stroming. Voor het instromen in de hopper zou het mengsel met de minste nuttige deeltjes reeds kunnen worden afgescheiden. Er gaan dan deeltjes verloren, maar het debiet in de hopper wordt kleiner, waardoor de andere deeltjes meer gelegenheid krijgen om te bezinken.

2.4 De hopper

Constant tonnage laadsysteem

Bij het constant tonnage laadsysteem is het hoppervolume in tegenstelling tot bij het constant volume laad systeem varieerbaar. Voordelen van het Constant Tonnage Systeem zijn de grote overvloeihoogte en het grote hoppervolume.

Er wordt minder potentiële energie in zwaarte energie omgezet, doordat het hoogteverschil tussen plaats van instroming en plaats van uitstroming kleiner is.

Door het grotere hoppervolume heeft de suspensie stroom meer ruimte om neer te slaan, minder gehinderde bezinking treedt op.

Het Constant Tonnage Systeem heeft de volgende eigenschappen. De uiteindelijke diepgang wordt bereikt bij het begin van overvloeien. Deze diepgang wordt bepaald door de instromende mengseldichtheid. Het overvloeiniveau is continu in hoogte verstelbaar. Dit gebeurt automatisch doordat de diepgang constant blijft.

Het grote voordeel van het snel op maximale diepgang zijn van het schip is dat de baggerpomp zich dan zo laag mogelijk bevindt. Hierdoor is de zuig lengte van het verticale transport klein.

Als inlaatsysteem wordt een dieplaadsysteem toegepast. Dit systeem zorgt voor een gering hoogteverschil tussen instroming en uitstroming van het mengsel. Bij het baggeren van slib duurt het beladen totdat de hoogste stand van de overvloei is bereikt.

Losinrichting

Hieronder komen de losinrichtingen aan de orde. Schepen kunnen met een aantal van deze systemen zijn uitgerust.

Onderlossend

■ Splijtsysteem

De scheepsromp is geheel of gedeeltelijk over de lengte uit twee symmetrische splijtbare scharnierend verbonden helften opgebouwd. Het openen en sluiten gebeurt met hydraulische cilinders.

Dit type losinrichting heeft als voordelen dat snel kan worden gelost en dat klevende lading weinig problemen oplevert. Nadelen zijn de lastige doseerbaarheid van de lading bij het lossen en het baggerwerktuig is ingewikkeld en duur.

■ Deurensysteem

Dit systeem bestaat uit horizontaal gelegen deuren.

■ Kleppensysteem

De voordelen van het kleppensysteem zijn het niet voorkomen van scharnierende delen op plaatsen waar grote slijtage optreedt en het minder onder de scheepsbodem uitsteken van dit systeem bij het lossen.

■ Bodemschuiven

De voordelen zijn dat bij het lossen geen delen onder de scheepsbodem uitsteken en dat er geen obstructie in het laadruim ten behoeve van het bewegingsmechanisme is.

Nadelig zijn de grote gevoeligheid voor storingen als er deeltjes tussen de langs elkaar schuivende delen komen en de lastige bereikbaarheid van het systeem.

Zelfleegzuigend

■ Zelfleegzuigkanalen

Onder de hopper bevindt zich een kanalenstelsel, waardoor water wordt gepompt. Bij het lossen opent men schuiven tussen de hopper en de kanalen. Het mengsel dat ontstaat wordt afgevoerd.

■ Zelfleegzuigleidingen

Het transportwater, waarmee het zand in de hopper wordt vermengd stroomt door een buizenstelsel onder de hopper. Door opening van kleppen tussen deze buizen wordt het zand in de hopper vermengd met dit water. Het op deze wijze verkregen zand water mengsel wordt door dit buizenstelsel onderlangs de hopper afgevoerd.

Een andere wijze is het toevoeren van water door een waterspuitinstallatie, waarna het zandwatermengsel door een zuigmond in de hopper wordt afgevoerd.

2.5 De besturing

Voor het optimaal op elkaar afstemmen van de verschillende processen, die van belang zijn gedurende een baggerproces, is het van belang dat voldoende survey gegevens voorhanden zijn. Gedurende een baggercyclus worden profielmetingen gedaan die centraal worden verwerkt.

Functies die in een geautomatiseerd systeem kunnen worden opgenomen:

- Pompsnelheidsregeling
- Zuigkoplierbesturing
- Deiningscompensatieregeling
- Bodemdrukbeplating voor de zuigkop
- Zuigbuispositiebewaking
- Sleepsnelheidsoptimalisatie
- Overvloeistandregeling
- Zuigtijdoptimalisatie
- Baggerplan presentatie
- Survey gegevens modificatie aan boord

3 De hopper

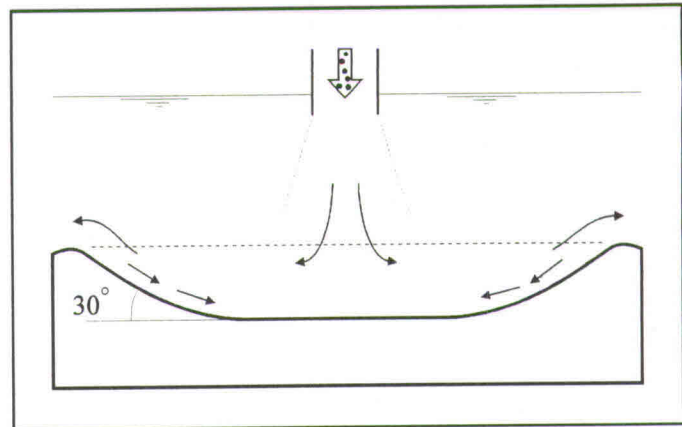
Dit hoofdstuk is toegespitst op de conventionele hopperbezinksystemen. Getracht wordt de fysische verschijnselen algemeen te beschouwen, zodat deze eveneens toepasbaar zijn op andere sedimentatiesystemen.

3.1 Subsystemen

De hopper wordt in drie subsystemen verdeelt, de instroom, het bassin en de uitstroom.

Instream

Het mengsel moet rustig en gelijkmatig de hopper instromen. Dit betekent dat moet worden voorkomen dat het instromende mengsel valt. De stroomsnelheid dient zo veel mogelijk te worden afgeremd. Opname van lucht is nadelig, verderop zullen stijgende luchtbellendeeltjes mee omhoog voeren. Er vindt entrainment plaats, dit is het meevoeren van reeds in de hopper aanwezig mengsel. Bij een naar beneden gerichte instroom ontstaat een krater in het bezonken zandbed (afb. 3.1). Er vindt meer entrainment plaats naarmate de afstand van de inlaatopening tot de krater groter is.



afb. 3.1: Krater

Bassin

Het bezinktraject moet voldoende lang zijn, zodat de deeltjes de bodem kunnen bereiken. De stroming kan in banen worden geleid door het aanbrengen van schotten. Er ontstaat uitschuring als de hopper bijna gevuld is, waardoor uiteindelijk net zoveel bezinkt als uitschuurt. Tevens dient het bassin als opslagruimte gedurende het horizontale transport.

Uitstroom

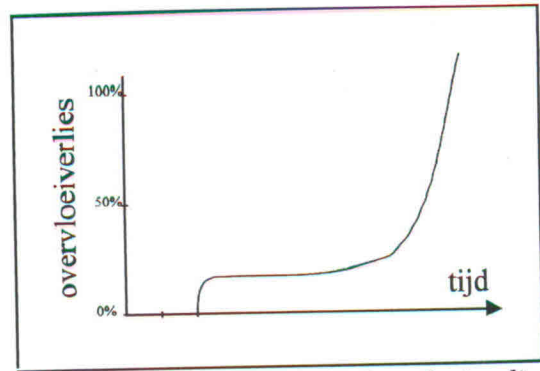
De uitstroom kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. Mogelijkheden zijn: een overvloei langs één of meerdere wanden, een ronde overvloei of een lamellenbezinker als uitstroom. Opvallend is de door de corioliskrachten van de aardbol aangedreven draaistroom met een bepaalde draairichting bij een ronde overvloei.

Een probleem vormt het schommelen van het schip door deining, waardoor de stroming bij de overvloei onderbroken kan worden. Het overvloeiniveau dient zo hoog mogelijk te zijn ten opzichte van de instroming, zodat veel kinetische energie wordt omgezet in potentiële energie.

halen je dat
Schommelen?

3.2 Beladingsverloop

In de eerste fase is er geen overvloed en dus geen overvloedverlies. Na het begin van overvloed neemt het verlies in de tweede fase steeds meer toe. De derde fase begint als de toename van het overvloedverlies kleiner wordt. Ten slotte begint de vierde fase daar waar gemiddeld geen deeltjes in de hopper achterblijven. Het overvloedproces is dan honderd procent geworden.



afb. 3.2: Overvloedverlies

3.3 Fysische processen

Valsnelheid

- Algemeen voor een bol

$$w_0 = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{g \cdot d}{C_d}} \quad (3.1)$$

- Indeling naar Reynoldswaarde [KONING DE: BAGGEREN A]

Reynolds	Valsnelheid, w_0	karakterisering van de stroming
$Re = \frac{w \cdot R_h}{\nu} = \frac{w \cdot d_{50}}{4 \cdot \nu}$		
$Re < 1$ <i>Stokes</i>	$424 \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot d_{50}^2$	laminair visceuze krachten overheersen
$1 < Re < 1000$ <i>Budryk</i>	$\frac{8.925}{d_{50}} \cdot \left[\sqrt{1 + 85 \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot d_{50}^3} - 1 \right]$	overgangsgebied
$Re > 1000$ <i>Ritinger</i>	$87 \cdot \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot d_{50}}$	turbulent traagheidskrachten overheersen

tab.3.1: Valsnelheid

Voor de Reynoldswaarden in het Stokesgebied kunnen de volgende vergelijkingen [VELDEN VAN DER: 56] worden gebruikt. De vergelijkingen gelden voor deeltjesdiameters die liggen tussen de 50 μm en 300 μm liggen. Bij een temperatuur van 18 $^{\circ}\text{C}$ geldt:

$$\log\left(\frac{1}{w}\right) = 0,4949 \cdot (\log D_{50})^2 + 2,4113 \cdot (\log D_{50}) + 3,7394$$

Bij 10 $^{\circ}\text{C}$:

$$\log\left(\frac{1}{w}\right) = 0,4758 \cdot (\log D_{50})^2 + 2,1795 \cdot (\log D_{50}) + 3,1915$$

*zo mach se
geen referenties
coll. die ook zijn
referentie
(3.2)*

■ **Afhankelijkheid van de concentratie** [VELDEN VAN DER: 57]

$$w_s = w_0 \cdot (1 - C)^\alpha \quad \text{met: } Re_{\text{groot}} \Rightarrow \alpha = 2.3 \quad \wedge \quad Re_{\text{klein}} \Rightarrow \alpha = 4.6 \quad (3.3)$$

■ **Temperatuurinvloed op de viscositeit**

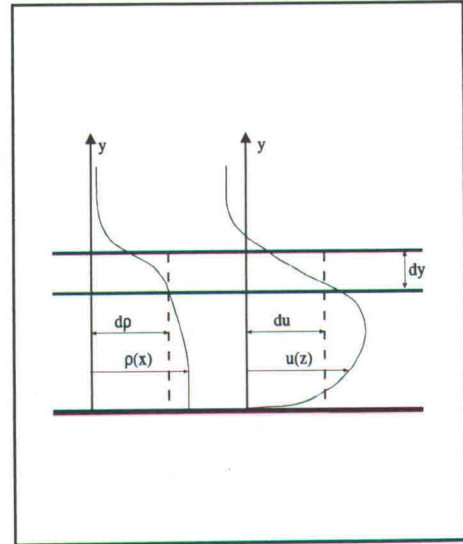
Temperatuur	T	0 $^{\circ}\text{C}$	10 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$
Dynamische viscositeit	η in mPas	1.8	1.3	1.0
Kinematische viscositeit	ν in $\mu\text{m}^2/\text{s}$	1.8	1.3	1.0

tab.3.2: Viscositeit

■ Richardson [KRANENBURG: 103]

Het grensvlak tussen twee ten opzichte van elkaar bewegende vloeistoflagen is over het algemeen instabiel. Er ontstaan interne golven, deze rollen en breken, zodat de twee lagen ter plaatse gemengd worden. Er ontstaat een menglaag met dikte dy , waarin de dichtheid en de snelheid geleidelijk verlopen tussen de aangrenzende waarden in onder- en bovenlaag (afb. 3.3). Wanneer de menglaag voldoende is ontwikkeld, kan een stabiele gelaagde situatie ontstaan. Een criterium voor de stabiliteit van de menglaag is het getal van Richardson:

$$Ri = \frac{-g \cdot \frac{d\rho}{dy}}{\rho \cdot \left(\frac{du}{dy}\right)^2} \quad (3.4)$$



afb. 3.3: Menglaagstabiliteit

De menglaag is stabiel als geldt: $Ri > 1/4$.

Vergelijking (3.4) geeft aan dat een grotere dichtheidsgradiënt $|d\rho/dy|$ de gelaagdheid stabielier maakt, terwijl een toename van de snelheidsgradiënt $|du/dy|$ destabiliserend werkt.

Turbulentie

Een mengselstroming is weinig turbulent als Reynolds klein is: $Re < 2000$ [HUISMAN: 3-33]

$$Re = \frac{u \cdot R}{\nu} \quad (3.5)$$

Wandwrijving

Onder wandwrijving wordt ook de bodemwrijving verstaan. Onderstaande formule geeft de grootte van de wandschuifspanning. [MASTBERGEN]

$$\tau_o = \frac{1}{8} f_o \cdot \rho_m \cdot u^2 \quad (3.6)$$

In de bovenstaande formule is f_o de Darcy Weisbach wrijvingscoëfficiënt afgeleid van turbulente viscositeit.

Stromingswrijving

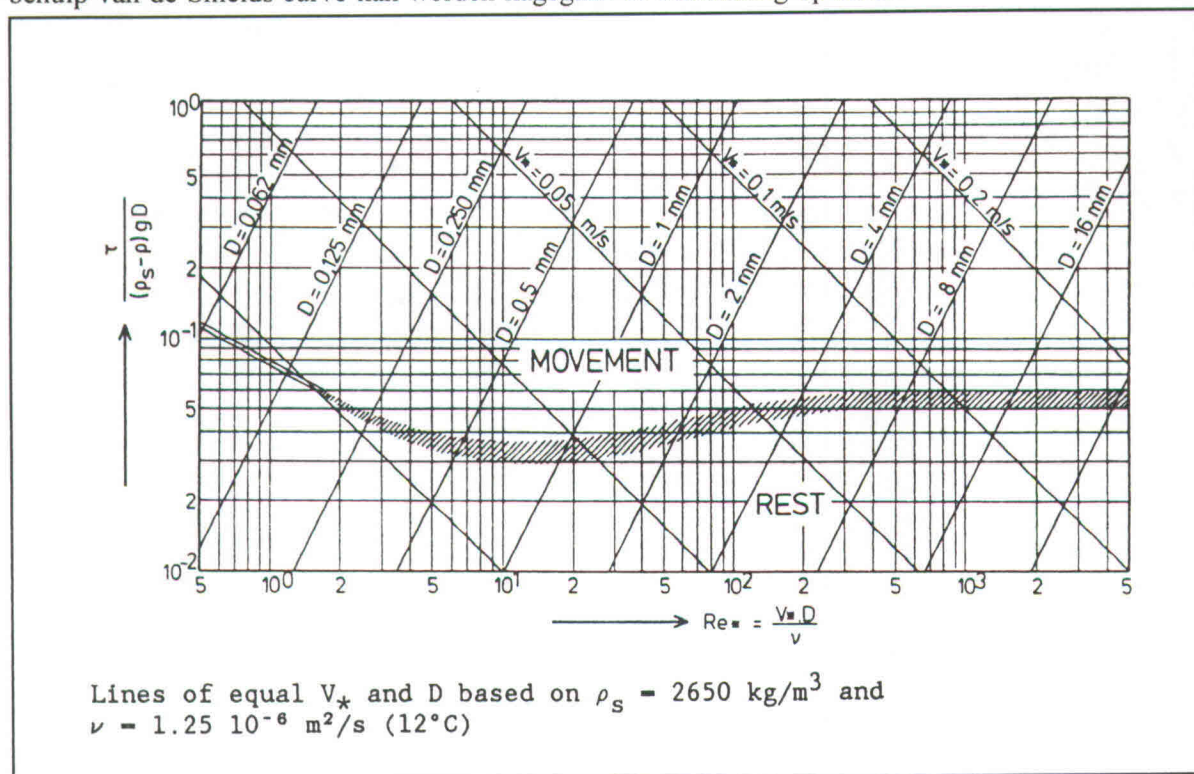
Onderstaande formule geeft de grootte van de schuifspanning die een mengselstroom ondervindt van een andere stroming, die een andere snelheid en dichtheid heeft. [MASTBERGEN]

$$\tau_i = \frac{1}{8} f_i \cdot \rho_m \cdot u^2 \quad \wedge \quad f_i \approx \frac{1}{3} f_o \quad (3.7)$$

De stroomsnelheid u in deze formule is het snelheidsverschil tussen de twee stromingen.

Uitschuring [VELDEN VAN DER]

Het optreden van uitschuring is afhankelijk van de stroomsnelheid en de korreldiameter. Met behulp van de Shields curve kan worden nagegaan of uitschuring optreedt.



afb. 3.4: Shields curve

In de Shields curve wordt het snijpunt bepaald van de lijn waarop de korreldiameter staat weergegeven met het schuin doorstreepte gebied, dat de grens tussen beweging en rust weergeeft. Wanneer dit punt bekend is kan op de verticale as een waarde die een functie van Reynolds is worden bepaald. En op de horizontale as kan ook een waarde van Reynolds worden bepaald.

De waarde op de verticale as is gelijk aan de volgende vergelijking:

$$f(Re) = \frac{\tau_{\text{crit}}}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D}$$

De enige onbekende in deze vergelijking τ_{crit} , de kritieke schuifspanning kan worden bepaald door het invullen van de andere waarden en de waarde die uit de grafiek is afgelezen.

De waarde op de horizontale as is gelijk aan de volgende vergelijking:

$$Re_* = \frac{V_* \cdot D}{\nu} \quad (3.9)$$

Hiervoor moeten de schuifspanningsnelheid, V_* , nog bekend zijn:

$$V_* = V \cdot \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (3.10)$$

Voor het berekenen van de schuifspanningsnelheid is berekening van de Chezy coëfficiënt vereist:

$$C = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h}{r}\right) \quad (3.11)$$

Wat is r?

Uit de vier laatste vergelijkingen volgt de waarde voor de kritieke stroomsnelheid voor uitschuring.

Entrainment

Dit is het verschijnsel dat de instromende mengselstraal het mengsel dat zich in het bezinkstelsel bevindt met zich meesleept en opneemt. Hierbij wordt de straal afgeremd en wordt het omliggende mengsel (pluim) versneld. Dit verschijnsel veroorzaakt het ontstaan van een bredere straal met een lagere concentratie.

3.4 Invloed van de procesparameters

Debiet

Een groot debiet in een bezinkstelsel betekent dat er meer deeltjes binnenkomen. Echter door de hogere stroomsnelheden worden de stromingen turbulenter (Reynolds groot) en krijgen de deeltjes minder tijd om te bezinken. Inmiddels bezonken deeltjes worden bij grote stroomsnelheden opgewerveld of het bezonken zandpakket gaat door overschrijding van de kritieke schuifspanning bewegen.

Concentratie

De concentratie beïnvloedt de bezinksneldheid, doordat deeltjes elkaar hinderen bij het bezinken. Het grootste aantal deeltjes bezinkt bij een vaste stof concentratie van ongeveer 20% [KONING DE, DICTAAT BAGGEREN A]. De vaste stof concentratie is volgens de onderstaande vergelijking te schrijven als functie van de mengseldichtheid.

$$c = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_v - \rho_w} \quad (3.12)$$

Mengseleigenschappen

Korrels

- Grootte: kleine deeltjes bezinken slechter.
- Vorm: platte deeltjes richten zich in de richting van de stroming of gaan roteren.
- Verdeling van korreldiameter.

Luchtgehalte

Luchtbellen slepen bij opstijging deeltjes mee omhoog, er moet worden voorkomen dat het instromende mengsel lucht mee in het bezinkstelsel sleept.

Overige

Slib: beïnvloedt de viscositeit en de cohesie.

Zout: verhoogt de viscositeit.

Temperatuur: van 0 tot 30°C neemt de viscositeit met een factor vier toe.

Hopperbelasting

De hopperbelasting is het quotiënt van het debiet en het bassinbodemoppervlak. Dit is een maat is voor het verlies, dat een bepaald hopperontwerp zal opleveren.

Zad best

4 Hopperconfiguraties

In dit hoofdstuk wordt de hopper in drie soorten subsystemen verdeeld: de instroming, het bassin en de uitstroming. Een hopperconfiguratie bevat minstens één van iedere soort subsystemen. Het is mogelijk meerdere subsystemen van één soort te combineren. Bijvoorbeeld kan een schotelinstroomsysteem (afb. 4.7) als diepladinstroomsysteem (afb. 4.2) worden uitgevoerd.

Er dient rekening te worden gehouden met de stabiliteit en de sterkte van het baggervaartuig. Hierdoor is de diversiteit van de mogelijke hopperconfiguraties beperkt ten opzichte van soortgelijke systemen aan wal.

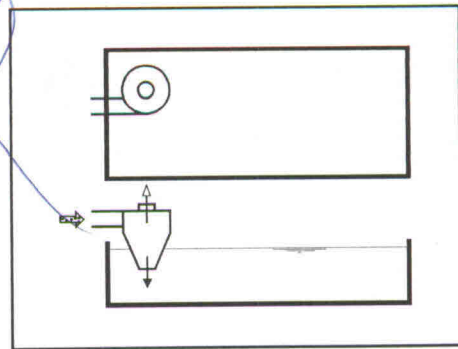
De hoppersubsystemen die in dit hoofdstuk aan de orde komen zijn voor een groot deel ideeën. De beoordeling van de diverse systemen is veelal subjectief, doch de systemen moeten worden beoordeeld voor het vergelijken.

4.1 Instroomsysteem

4.1.1 Soorten

Cycloon

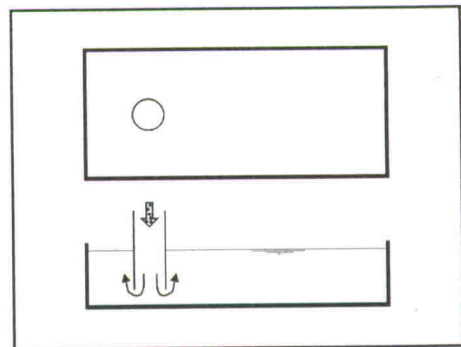
- Dit systeem is een separatiesysteem gebaseerd op centrifugaalkracht op de deeltjes. Hoofdstuk 5 behandelt de cyclonen uitgebreid.
- De Hopperbelasting is kleiner doordat het debiet dat in het bassin stroomt lager is. De slecht bezinkende deeltjes zijn er al uit.
- Veel slijtage zal optreden op plaatsen in de cycloon waar de stroomsnelheid hoog en de dichtheid groot is. Grote snelheden zijn vereist voor het verkrijgen van voldoende centrifugaalkracht.
- Voor het bereiken van goede resultaten met sleephoppers die met een cyclonenseparatiesysteem zijn uitgerust, zoals in het volgende hoofdstuk zal blijken, minimaal een tiental grote cyclonen aan boord vereist. Dit grote aantal betekent een systeem met veel aanvoertakkingen en een groot gewicht.
- Een nadeel van dit systeem is dat gedurende het hele laadproces altijd overvloeiverlies optreedt.



afb. 4.1: Cycloon

Dieplader

- Weinig potentiële energie komt in het bezinkbassin.
- Er ontstaat een cilindervormige wand rond de instroompijp. Tussen de instroompijp en deze wand stroomt het mengsel naar boven. De afstand die het mengsel in het bassin moet afleggen is groot. Het mengsel moet eerst naar boven en dan horizontaal door het bassin naar de uitstroom.
- De kans op uitval is groot als de instroomdichtheid laag wordt. De wand rond de instroompijp kan dan afschuiven waardoor de instroomopening verstopt raakt. Dit laatste kan worden voorkomen door de pijp omhoog te bewegen, waarna het verder in het laadproces nauwelijks meer mogelijk is de pijp omlaag te bewegen door het bezonken bed dat er dan onder ligt.

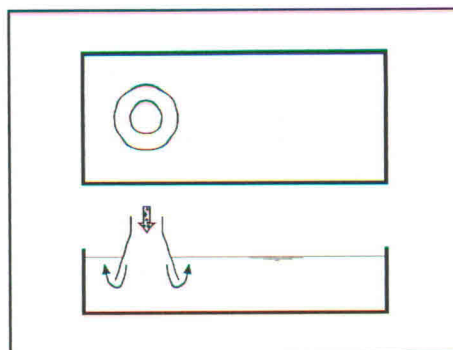


afb. 4.2: Dieplader

het sero
zegg
als al
fish tail
is!
besprok

Diffusor

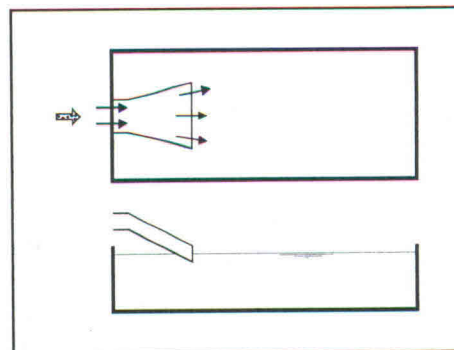
- Net als bij het fishtailsysteem is de instroomsnelheid laag en wordt de instroming goed verdeeld.
- Het doorstroomde oppervlak kan niet te snel worden vergroot, aangezien de stroming het contour van de wand dan niet kan volgen. Het aanbrengen van ringvormige geleidingsschotten, net als de geleidingsschotten bij het fishtailsysteem is constructief niet eenvoudig.
- Goede verdeling van het instromende mengsel
- De hoek waaronder het conische deel staat mag niet groter dan 6° worden. Anders treedt loslating van de stroming aan de wand op en zal een doorn in het midden moeten worden geplaatst.



afb. 4.3: Diffusor

Fishtail

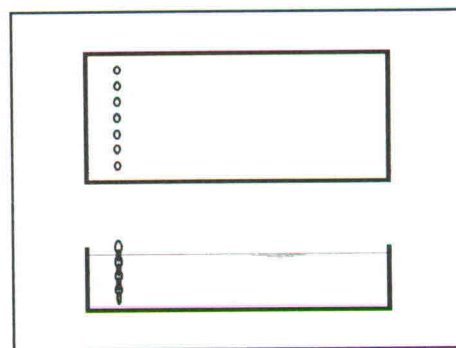
- Dit is een eenvoudig en veel voorkomend systeem.
- Het mengsel wordt gelijkmatig over de hopperbreedte verdeeld. Voor het goed verlopen van de verbreding van de instroom kunnen geleidingsschotten in de richting van de stroom worden opgesteld. Hierdoor komt er ook voldoende stroming aan de zijwanden van de fishtail.
- Het instromen kan over de halve breedte plaatsvinden. Intermitterend laden is mogelijk door om en om langs de linkerhelft en langs de rechterhelft in te stromen.
- De hoek waaronder het instroomvlak staat kan worden aangepast aan het instromende mengsel en aan de fase in het laadproces.
- Diverse varianten zijn mogelijk zoals verdronken instromen en het afdekken van de bovenkant van de fishtail, zoals in de afbeelding.



afb. 4.4: Fishtail

Kettingen

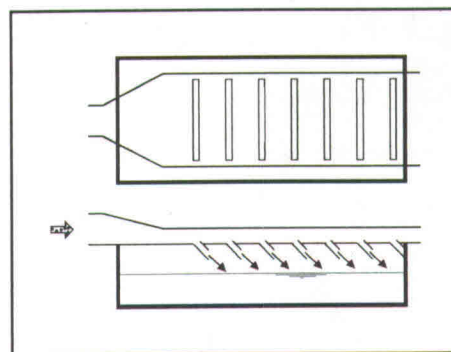
- Grote wervels worden gebroken, waardoor opwerveling van reeds bezonken deeltjes minder wordt.
- De stroomsnelheid is goed verdeeld over het doorstroomde oppervlak, hierdoor neemt de totale kinetische energie van de mengselstroom af. Dit wordt beschreven door een eenvoudig voorbeeld in de volgende subparagraaf.



afb. 4.5: Kettingen

Schaaf

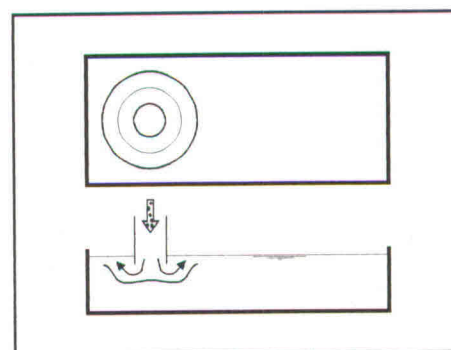
- Dit systeem zorgt voor een scheiding voordat het mengsel het bassin instroomt. Doordat een kleiner debiet het bassin instroomt wordt de hopperbelasting lager. Er komen minder slecht bezinkende deeltjes in het bassin.
- Als dit systeem met veel openingen wordt uitgevoerd ontstaat een regenachtige instroming. Het mengsel komt over het hele horizontale vlak het bassin binnen.
- Het gewicht van dit systeem is groot.
- Net als bij de cycloon treedt altijd overloeverlies op.



afb. 4.6: Schaaf

Schotel

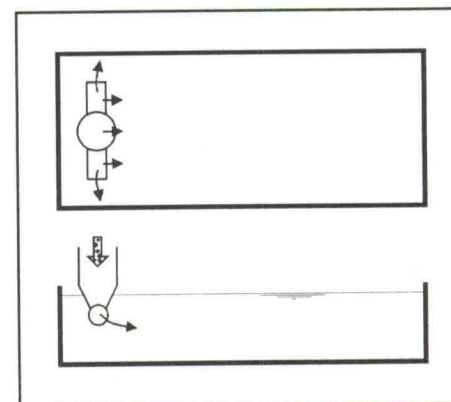
- Dit is een kunstmatige krater, er treedt minder uitschuring op bij de instroom.
- Het instromende mengsel wordt goed over de bodem verdeeld. Het toepassen van een ovale schotel sluit beter aan bij de rechthoekige hoppersvorm.
- De afstand tussen de uitstroompipij en de schotel kan worden aangepast aan het mengsel en aan de fase in het laadproces.



afb. 4.7: Schotel

Sproeier

- Goede verdeling van het instromende mengsel over de hopperbreedte.
- Eenvoudig systeem dat hoogteinstelbaar en intermitterend kan worden uitgevoerd.
- De instroomgaten van de sproeier zouden verstopt kunnen raken door grote deeltjes. Ter voorkoming hiervan kunnen de zijanten van de horizontale pijp worden opengelaten. Zodat de grote deeltjes hierdoor de hopper in kunnen stromen.

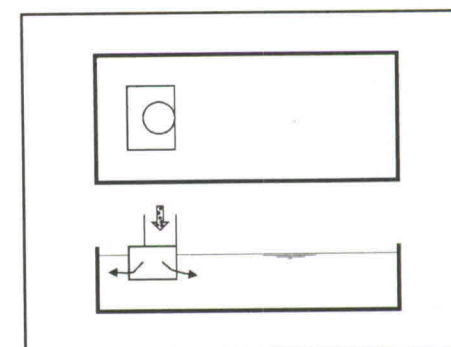


afb. 4.8: Sproeier

Woelbak

- De instroomsnelheid is laag echter het mengsel komt zeer turbulent in het bassin. Dit systeem draagt niet bij aan het scheiden van de deeltjes uit de vloeistof.
- Ten opzichte van de andere instroomsystemen is er veel slijtage. Het inwendige van de woelbak zal dus uit slijtvaste of eenvoudig te vervangen delen moeten bestaan.

meer de bij systemen?



afb. 4.9: Woelbak

4.1.2 Eigenschappen

Proces criteria

Mengselsnelheid

De instroomsnelheid is normaal bij het dieplaadsysteem.

De instroomsnelheid is laag bij de fishtail, de cycloon en de woelbak. De hopperbelasting is laag bij de cycloon en de schAAF, doordat het in het bassin stromende debiet klein is.

De instroomsnelheid is zeer laag bij de diffusor, de schotel en de schAAF.

Een gelijkmatig verdeelde mengselsnelheid betekent dat de kinetische energie laag is. Dit wordt met een eenvoudig voorbeeld in de volgende paragraaf weergegeven.

Uitschuring

Dit staat in verband met de mengselsnelheid en is ook afhankelijk van de turbulentie en de stroomgeleiding.

Deining

Veel invloed bij de dieplader, de wand rond de pijp kan instorten.

Verder heeft de deining waarschijnlijk weinig invloed op de instromingssystemen.

Constructieve criteria

Eenvoud

Niet eenvoudig zijn de cycloon en de schAAF.

Gewicht

Voor de schAAF en het cyclonensysteem hebben een groot gewicht.

Slijtage

Vermoedelijk hebben de woelbak en de cycloon afhankelijk van de scherpte van de deeltjes de meeste last van slijtage.

Overige criteria

Uitval

Dit vormt het grootste probleem bij de dieplader en de cycloon. Echter ook bij de sproeier en de schAAF kan er verstopping optreden door bijvoorbeeld grote delen in het systeem.

Kosten

Dit is in hoge mate afhankelijk van de eenvoud van het systeem en ook van slijtage. Bij cyclonen is een hogere aanvoerleidingdruk vereist, hierdoor zijn sterkere leidingen nodig. Ook het verkrijgen van hogere druk kost meer.

Bestaand concept

Met name cyclonen worden op grote sleephopperzuigers tot nog toe niet toegepast. Veel proeven en bijstellingen in de praktijk zullen nodig zijn om een dergelijk systeem optimaal te maken.

4.1.3 Beoordeling en vergelijking

	Proces			Constructief			Overige		
	snelheid	uitsch.	deining	eenvoud	gewicht	slijtage	uitval	kosten	bestaat
Cycloon	+	+	+	-	0	-0	-	-	-?
Dieplader	0	0	-	0	+	+	-	0+	0?
Diffusor	+	0	+	0	+	+	0	0+	+
Fishtail	0+	0	0	+	+	+	+	+	+
Kettingen	+	0	+	+	+	+	+	+	+
Schaaf	+	+	0+	-0	-0	0	0	-	-
Schotel	0+	+	+	0	0+	0	0	0	0
Sproeier	0	0+	0	+	+	0	0	+	?
Woelbak	0+	0+	+	-0	0+	-0	-0	+	+

tab.4.1: Beoordeling instroomsystemen

Zo'n vergelijking ^{ziet}
er leuk uit maar het is
niet meer de lader
Nergens in Hfdst. 4 heb ik een
getal gezien om je conclusies
te onderbouwen

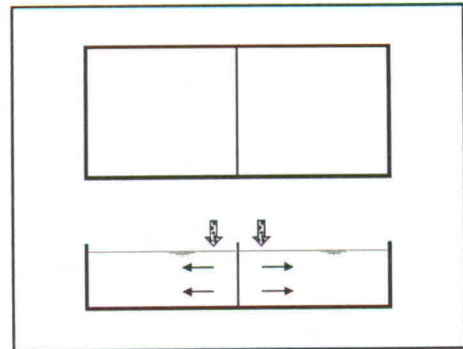
4.2 Bassinsysteem

Het bassin heeft twee functies het laten bezinken van de deeltjes en het dient als opslagruimte gedurende het transport naar de plaats van bestemming. De vorm en grootte van het bassin hangen af van de scheepsvorm. Veelal zijn de bassins rechthoekig.

4.2.1 Soorten

Gesplitst bassin

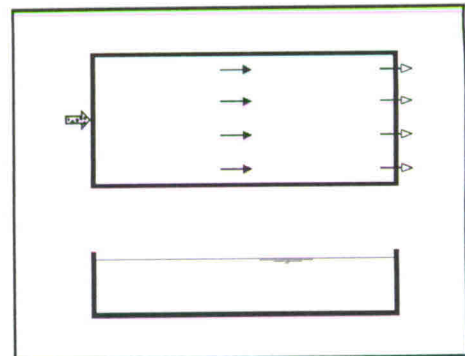
- De stroomsnelheid is laag, waardoor de uitschuursnelheid minder snel wordt bereikt. En de bezinklengte is klein.
- Het is mogelijk intermitterend te laden, waardoor een gunstig effect op de suspensiestromen over de bodem wordt verkregen. De twee bassins worden dan om en om gevuld. Na iedere vulling krijgen de wervels de gelegenheid tot rust te komen.
- Het dekhuis wordt meestal in het midden tussen de bassins geplaatst, ten behoeve van de scheepsterkte.



afb. 4.10: Gesplitst bassin

Open bassin

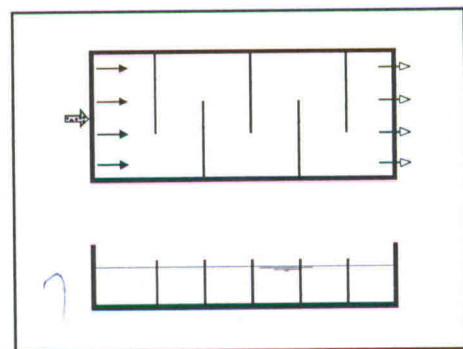
- Dit is het meest eenvoudige bassin. Dit bassin is als referentie bij proevenseries te gebruiken. Er zijn obstakels als kippekooi en kleppenstangen in aanwezig. Ten behoeve van de sterkte van het vaartuig kunnen balken dwars door het bassin worden toegepast.
- De grote wervels, ter grote van de hopperbreedte kunnen blijven bestaan.
- Door deining kan het laadproces ongelijkmatig verlopen. Het bezonken deeltjes bed kan door schuine stand van het vaartuig bijvoorbeeld gaan schuiven, waardoor ongelijkmatige belading over het bodemoppervlak plaats vindt.



afb. 4.11: Open bassin

Schotten dwars

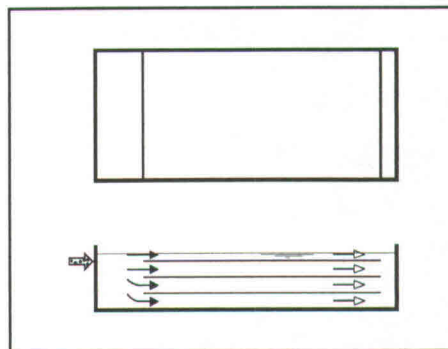
- De hopperlengte is als het ware vergroot.
- Waarschijnlijk werken deze schotten zeer verstrendend op het bezinkproces. Afronding van bochten en plaatsing van geleidingsschotten zou positief kunnen werken.
- Door centrifugaalkrachten in de bochten van de stroming zullen meer deeltjes aan de zijwand van het bassin terecht komen.



afb. 4.12: Schotten dwars

Schotten horizontaal

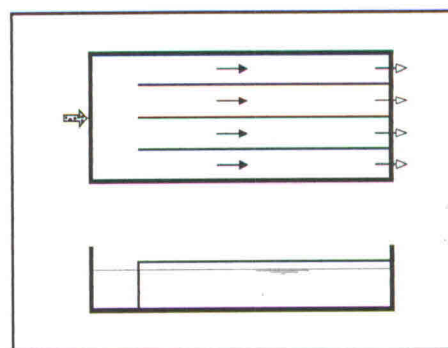
- Dit is het enige bassinsysteem waarbij de hopperbelasting verandert. De hopperbelasting wordt lager.
- De toegankelijkheid van de hopper is een probleem en het lossen is moeilijk.
- Schotten moeten sterk zijn in verband met buiging, met name door het gewicht van het bezonken deeltjes bed zal er een grote kracht op worden uitgeoefend.
- Evenals bij de verticale lamellen is de hydraulische straal kleiner en dus de uitstroming minder turbulent.
- De uitschuring zal toenemen doordat het totale bovenvlak van bezonken deeltjes bed groter is. Echter door de geleidingsschotten zal de stroming minder uitschurend werken, doordat minder hoge stroomsnelheden voorkomen en door de afwezigheid van grote wervels.



afb. 4.13: Schotten horizontaal

Schotten vertikaal

- ↳ dit zo?
- Het enige verschil met het open bassin zijn de geleidingsschotten. Door deze schotten wordt de stroomsnelheid constanter en dus de kinetische energie kleiner.
 - De grote wervels krijgen minder kans te bestaan, dus opwerveling door stromingscomponenten dwars op de doorstroombreedte ontstaat minder snel.
 - De deïningsinvloed is minder in tegenstelling tot het open bassin. De geleidingsschotten verdelen de stroming gelijkmatig over de hopperbreedte.



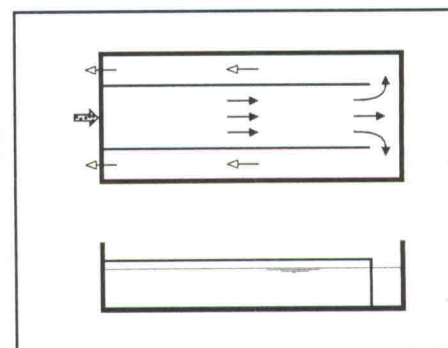
afb. 4.14: Schotten vertikaal

Schotten vertikaal kerend

- De stroomsnelheid is hier hoog en de bezinklengte is groot. Door de hoge stroomsnelheid zal eerder de uitschuursnelheid worden bereikt. De hydraulische straal is klein, met behulp van Reynolds blijkt dat het mengsel dan minder turbulent is.
- De totale kinetische energie is kleiner dan bij het open bassinsysteem, doordat de doorstroombreedte kleiner en daardoor de stroomsnelheid constanter over de breedte is.
- Door de symmetrische uitvoering zoals afgebeeld, wordt de hopper gelijkmatig over de breedte beladen.

De kans bestaat dat als het schip scheef hangt aan de ene zijde meer wordt beladen dan de andere zijde. Ook kan het zijn dat een ophoping aan één van de zijden ontstaat, waardoor daar de doorstroming wordt belemmerd.

- Het niet symmetrisch uitvoeren door het plaatsen van één schot in het midden, maakt een vorm van intermitterend laden mogelijk en zorgt ervoor dat de problemen van het symmetrisch beladen niet kunnen optreden.



afb. 4.15: Schotten vert. kerend

Bewijs dat es

4.2.2 Eigenschappen

Proces criteria

Mengselsnelheid

De snelheid is laag bij het gesplitste bassin. De snelheid is normaal bij het open bassin en bij alle bassins met schotten, behalve bij het schotten vertikaal kerende bassin. Bij dit laatste bassin is de snelheid hoog.

Met behulp van het volgende eenvoudige rekenvoorbeeld is in te zien dat de kinetische energie kleiner is bij een zelfde debiet, als de stroomsnelheid beter is verdeeld.

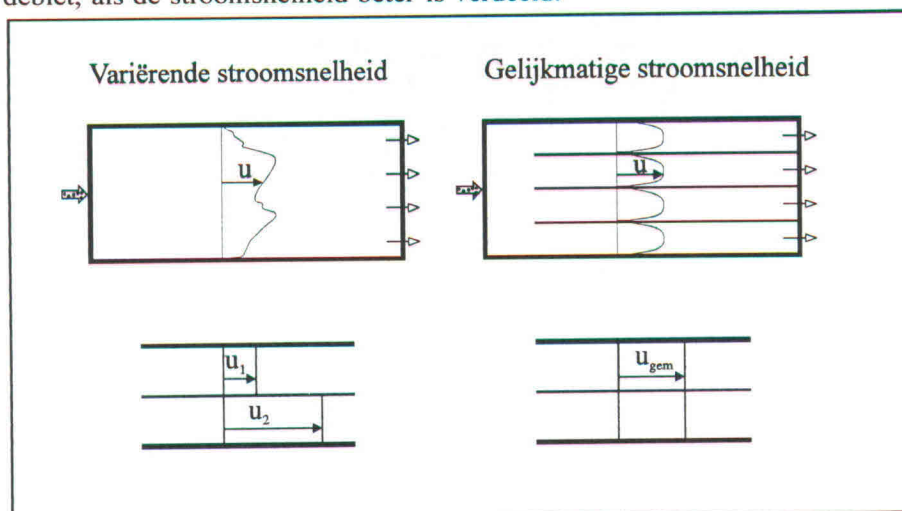
Er geldt:

$$u_1 = \frac{1}{2}u$$

$$u_2 = \frac{3}{2}u$$

$$u_{\text{gem}} = u$$

$$m_1 = m_2 = m$$



afb. 4.16: Kinetische energie

Variërende stroomsnelheid:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2 = \frac{1}{2}m \cdot \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\right)^2 \right) u^2 = \frac{5}{4}m u^2$$

Gelijkmatige stroomsnelheid:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}m_1u_{\text{gem}}^2 + \frac{1}{2}m_2u_{\text{gem}}^2 = m u^2$$

Uitschuring

Dit is wederom in grote mate afhankelijk van de mengselsnelheid en de turbulentie. Het wervelcircuit, bij toepassing van stroomgeleidingsplaten, is in het vlak dwars op de hoofdstroomrichting kleiner, waardoor er minder uitschuring en opwerveling door dergelijke stromingen op treden.

Deining

Schotten werken over het algemeen positief, ze verdelen het mengsel goed.

Constructieve criteria

Eenvoud

Met name de schotten horizontaal is niet eenvoudig, de schotten moeten voldoende sterk zijn en de hopper is slecht toegankelijk. Het lossen vormt bij dit systeem ook een probleem.

Gewicht

Verticale schotten hoeven niet sterk te zijn, aangezien de belasting aan weerszijde van de schotten even groot zal zijn. Schotten horizontaal moeten wel van sterk en waarschijnlijk zwaar materiaal worden vervaardigd.

Slijtage

Speelt over het algemeen geen rol, daar de stroomsnelheden over het algemeen laag zijn.

Overige criteria

Uitval

Kan problemen opleveren bij het lossen van schotten horizontaal.

Kosten

Schotten horizontaal is duur vanwege de vereiste sterkte.

Bestaand concept

Met name het intermitterend laden is niet veel toegepast, waardoor veel model en mathematisch onderzoek nodig zal zijn voordat een eventueel optimaal systeem in de praktijk kan worden ingezet.

4.2.3 Beoordeling en vergelijking

	Proces			Constructief			Overige		
	snelheid	uitsch.	deining	eenvoud	gewicht	slijtage	uitval	kosten	bestaat
Gesplitst	+	+	0	0	0	+	+	-0	+
Open	0	0	0	+	+	+	+	+	+
Sch. dwars	0	0	0	0	0	+	+	0	
Sch. hor.	0	0+	0+	-	-	+	-	-	
Sch. vert.	0	0	+	0+	0	+	+	0	
Sch. vert.k.	-	-	+	0	0	+	+	0	

tab.4.2: Beoordeling bassinsystemen

4.3 Uitstroomsysteem

4.3.1 Soorten

Drijvende uitstroom

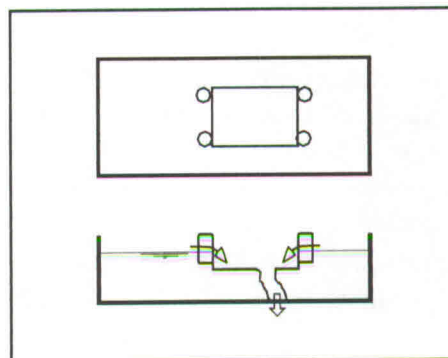
- Dit systeem is tot op heden niet toegepast.
- De deininginvloed is kleiner, waardoor het uitstroombepaalde proces gelijkmatiger wordt. De uitschuring zal dus bij de uitstroom minder zijn. Het drijfvermogen is te verkrijgen door aan het uitstroomsysteem bevestigde drijvers.

Bij aanvang van het laadproces dient de uitstroom geen mengsel door te laten totdat een bepaald hopperniveau is bereikt. Gedurende dit deel van het laadproces kan men de drijvende uitstroom zo hoog boven het hopperniveau plaatsen dat er geen mengsel door stroomt.

- Vertikaal kan de afstand tussen het mengselniveau en de overvloeihoogte van het uitstroomsysteem worden veranderd door het drijfvermogen te veranderen. In de drijvers kan mengsel in of uit worden gepompt ter verkrijging van een ander drijfvermogen.

Horizontale positionering kan met ophanging aan een ketting worden verkregen, eventueel kan een tweetal kettingen worden toegepast, echter dit doet afbreuk aan de deiningcompensatie. Bij ophanging aan meer dan drie draden is er geen sprake meer van deiningcompensatie en werkt het systeem dus niet.

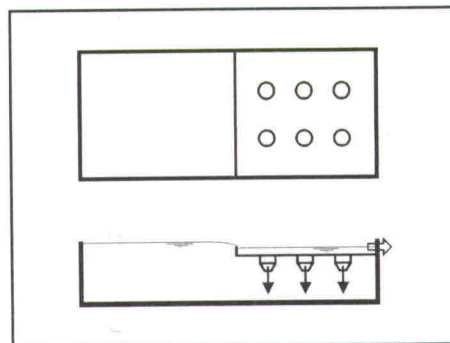
- Dit uitstroomsysteem is niet eenvoudig, dus hangt het van de invloed van deining op het uitstroombepaalde proces af of het zinvol is om het toe te passen.



afb. 4.17: Drijvende uitstroom

Flappen doorlaat

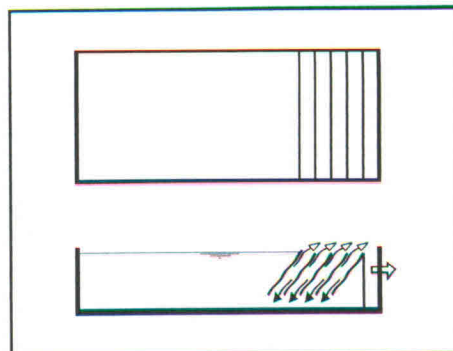
- Dit systeem is tot op heden niet toegepast.
- Hierbij wordt het bezinkoppervlak vergroot en neemt de hopperbelasting dus af.
- Het systeem werkt als volgt. Als voldoende deeltjes in de trechters boven de flappen doorlaat zijn neergedaald, gaan de flappen open en wordt de bezonken suspensie naar beneden afgevoerd.
- Uitschuring vindt voornamelijk plaats als de flappen bijna vol zijn.



afb. 4.18: Flappen doorlaat

Lamellen

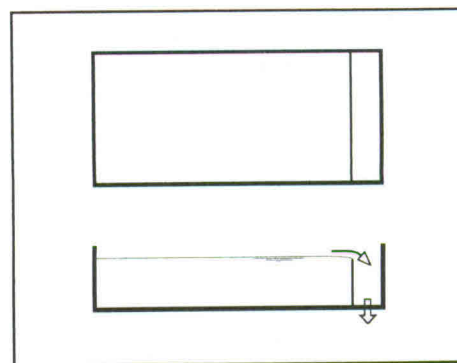
- Dit systeem is tot op heden nooit toegepast.
- De hopperbelasting wordt net als bij het schotten horizontaal bassin verkleind. De goed bezinkende deeltjes, die een grote diameter hebben en turbulentie verhogend werken zijn inmiddels in het bassin bezonken. De deeltjes moeten op de lamellen neerdalen en daarlangs neerwaarts bewegen.
- Er ontstaan een soort suspensiewiggen die door de zwaartekracht naar beneden bewegen en worden tegengewerkt door de plaatwrijving en de mengselwrijving.
- Uitschuring vindt onder in het lamellen uitstroomsysteem plaats. Gezien de lage stroomsnelheden die daar heersen zal er niet veel uitschuring optreden.
- Hoofdstuk 6 behandelt het lamellen uitstroomsysteem uitgebreid.
- Onder is het mogelijk de lamellen met flappen uit te rusten. Als de lamellen van opzij worden ingestroomd en het mengsel dus dwars van de ene zijde naar de andere zijde in horizontale richting door de lamellen stroomt, volgens het dwarsstroomprincipe (afb. 6.1). De flappen laten bezonken suspensie door als er voldoende bezonken deeltjes onder in de lamellendoorgangen is opgehoopt.



afb. 4.19: Lamellen

Rechte uitstroom

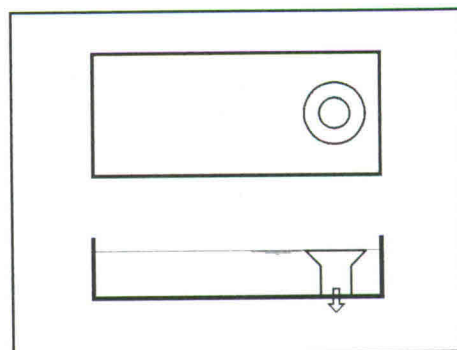
- Bij plaatsing als afgebeeld is er veel verstoring door deining. Dit kan verminderd worden door plaatsing in het midden in de langsrichting van de hopper.
- Ook dit uitstroomsysteem wordt meestal continu in hoogte verstelbaar uitgevoerd.



afb. 4.20: Rechte uitstroom

Ronde uitstroom

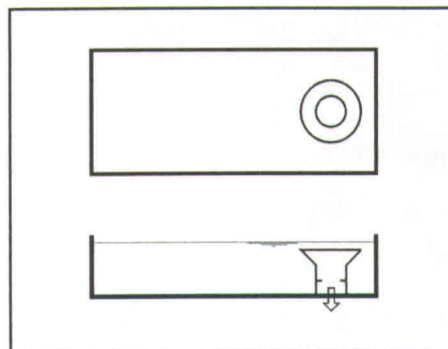
- Dit is een veel toegepast en eenvoudig systeem. Het wordt meestal continu in hoogte verstelbaar uitgevoerd.
- Er ontstaat een draaistroom rond de trechter, die voor extra uitschuring zou kunnen zorgen. Met behulp van geleidingsschotten kan deze stroom worden afgezwakt.
- Opstelling in het midden betekent minder deininginvloed.



afb. 4.21: Ronde uitstroom

Verdronken

- Weinig last van deining, met als gevolg een gelijkmatiger uitstroomproces.
- Snelheid op het zandbed is klein, door het grotere dwarsdoorstroomde oppervlak. Dit heeft waarschijnlijk minder uitschuring tot gevolg.
- De uitstroom moet worden bemoeilijkt zodat het mengsel zich boven de uitstroom ophoopt. Dit kan door verkleining van de uitstroompip of door het gedeeltelijk openzetten van afsluiters in deze uitstroompip. De mate van verdronkenheid is tevens met een eventuele afsluiter regelbaar. Ook door de draaiing van het mengsel onder invloed van de corioliskrachten kan verdrinking van de uitstroom ontstaan.
- Kans op uitval bestaat als de hopper bijna gevuld is, aangezien er dan mengsel met een hoge concentratie uitstroomt. Dit mengsel met een hogere concentratie stroomt moeilijker, waardoor verstopping kan ontstaan.



afb. 4.22: Verdronken

4.3.2 Eigenschappen

Proces criteria

Mengsnelheid

De mengsnelheid is het laagst bij de lamellen separator. Bij de ronde overvloed is deze snelheid hoog. Bij de verdronken iets gunstiger doordat het doorstroomvlak in verticale richting groter is.

Uitschuring

Bij de lamellenbezinker vindt de minste uitschuring plaats, doordat de stroomsnelheden overal laag zijn.

Deining

De minste deininginvloed treedt op bij de drijvende uitstroom. De uitstromen die voornamelijk in het midden staan, zoals de ronde uitstroom, hebben relatief minder last van deining dan de anderen, zoals de rechte uitstroom en de lamellen.

Constructieve criteria

Eenvoud

De meest eenvoudige systemen zijn de ronde en de rechte uitstroom. De ingewikkeldste zijn de flappen doorlaat en de drijvende uitstroom.

Gewicht

De drijvende uitstroom is zwaarder dan de ronde en de rechte uitstroom. De lamellen en de flappen doorlaat zijn het zwaarst.

Slijtage

Door de lage stroomsnelheden is de slijtage het kleinst bij de lamellen. Veel slijtage zal waarschijnlijk optreden bij de flappen doorlaat aan de flappen. Het afvoersysteem van de drijvende uitstroom zal ook slijtage gevoelig zijn, aangezien een flexibele, bijvoorbeeld rubberen pijp, als afvoer wordt toegepast.

Economische criteria

Uitval

Het verdronken uitstroomsysteem kan verstopt raken als de concentratie vaste deeltjes te groot wordt in de uitstroom.

De afvoer naar de scheepsbodem bij de drijvende uitstroom vormt een kwetsbaar geheel omdat het een flexibel geheel moet zijn.

Bij het lamellensysteem kan verstopping ontstaan doordat klonten materiaal tussen de lamellen vast komen te zitten. Dit kan een probleem vormen tijdens het onderbreken van het laadproces en bij het lossen.

Kosten

De lamellen zijn waarschijnlijk duur. De drijvende uitstroom en de flappen doorlaat zullen het duurst zijn.

Bestaand concept

Waarschijnlijk zijn de drijvende uitstroom, de lamellen en de flappen doorlaat in de praktijk niet of nauwelijks toegepast en zal er voor eventuele toepassing eerst veel onderzoek moeten worden gedaan naar de eigenschappen van deze systemen.

4.3.3 Beoordeling en vergelijking

	proces			constructief			overige		
	snelheid	uitsch.	deining	eenvoud	gewicht	slijtage	uitval	kosten	bestaat
Drijvend	0	+	+	-	0	-0	-	-	-
Flappen	0	0+	0	-	-0	-0	-0	-	-
Lamellen	+	+	-0	0	-0	+	0	-0	-
Recht	0	0+	-0	+	+	0+	+	+	+
Rond	-	-0	0	+	+	0+	+	+	+
Verdronk.	-	-0	0	0+	+	0+	0+	+	+

tab.4.3: Beoordeling uitstroomsystemen

4.4 Te beproeven hopperconfiguraties

Deze paragraaf geeft een kort overzicht van de diverse hopperconfiguraties. Mede na bespreking met de HAM research afdeling is besloten welke hopperconfiguraties in de 2^e afstudeeropdracht zullen worden beproefd.

Instroomsystemen

- Cycloon: lastig mathematisch te beschrijven; groot aantal nodig; altijd overvloeiverlies; slijtage; gevoelig voor eigenschappen van instromende mengsel.
- Dieplaad: grote bezinklengte; verstoppingsgevaar.
- Diffusor: redelijk systeem; veel uitschuring.
- Fishtail: eenvoudig systeem; veel toegepast; functioneert redelijk, gesloten bovenzijde heeft mits geen cavitatie optreedt remmende werking op de instroomsnelheid.
- Ketting: redelijk systeem.
- Schaaf: constructief problematisch; altijd overvloeiverlies.
- Schotel: als diffusor echter de uitschuring wordt voorkomen.
- Sproeier: veelbelovend; eenvoudig; goede verdeling; weinig uitschuring
- Woelbak: goed systeem, volgens eerdere proeven is hiermee de hoogste beladingsgraad te behalen.

Voor beproeving komt **de sproeier** als instroomsysteem in aanmerking. Weliswaar levert de woelbak de hoogste beladingsgraad, zoals uit eerdere proeven is gebleken, toch maakt het wat betreft de overvloeiverliezen niet veel uit welk instroomsysteem wordt toegepast, volgens eerdere proevenseries van diverse instroomsystemen. De sproeier verspreidt het instromende mengsel goed en de instroomrichting kan met dit systeem worden bepaald.

Bassinsystemen

- Gesplitst: het effect van intermitterend laden is niet bekend.
- Open: eenvoudig systeem; kan dienen als referentie.
- Schotten dwars: werkt zeer stromingsverstoring.
- Schotten horizontaal: constructief lastig; probleem bij het lossen.
- Schotten verticaal: probleem bij verdeling mengsel over hopper; goed tegen schuiven van het bezonken bed over hopperbodem.
- Schotten verticaal kerend: veelbelovend en interessant; net als schotten verticaal.

Voor beproeving komt **het schotten verticaal kerend** als bassinsysteem in aanmerking. Dit systeem wordt niet symmetrisch, een hopper met een schot in het midden uitgevoerd. Het beladen wordt op normale wijze en intermitterend beproefd. Bij het intermitterend laden bevindt de instroom zich afwisselend aan weerszijde van de hopperbreedte.

Het open bassin zal als referentie worden beproefd.

dit geldt dus voor alles wat je doet.

Uitstroomsystemen

- Drijvend: ingewikkeld; rendementsverbetering is niet bekend.
- Lamellen: veelbelovend; gunstig door lage concentratie van de uitstroom; mathematisch tweedimensionaal te beschrijven.
- Flappen: veelbelovend en interessant of het werkt; effect is onbekend.
- Recht: redelijk.
- Rond: uitstroom is regelmatig; toepasbaar als referentie systeem
- Verdrongen: is in feite een in hoogte verstelbare ronde uitstroom.

Voor beproeving zijn de volgende uitstroomsystemen interessant: **de lamellen (met flappen), de flappen doorlaat en de ronde uitstroom**. De ronde uitstroom dient voornamelijk als referentie voor de twee anderen.

Hopperconfiguraties

Tabel 4.4 geeft alle mogelijke hopperconfiguraties met beoordeling over of deze goed zijn te combineren weer. De voor beproeving meest interessante en veelbelovende systemen zijn vet weergegeven.

De vijf te beproeven hopperconfiguraties

Het instroomsysteem is bij alle configuraties **het sproeiersysteem (afb. 4.8)**.

1. **Open bassin (afb. 4.11)**
Ronde uitstroom (afb. 4.21)
2. **Schotten verticaal kerend bassin (afb. 4.15)**
Ronde uitstroom
3. **Schotten verticaal kerend bassin; intermitterend beladen**
Ronde uitstroom
4. **Open bassin**
Lamellen met flappen (afb. 4.19)
5. **Open bassin**
Flappen doorlaat (afb. 4.18)

uitstr	bassin	instroom								
		Cycloon	Dieplaad	Diffusor	Fishtail	Ketting	Schaaf	Schotel	Sproeier	Woelbak
Drijf	Gespl.	+	+	0	0	0	0	0	+	0
	Open	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Sch.dw.	-	-?	-	-	-	-	-	0	-
	Sch.hor.	-	-	?	0?	0	-	-	-	-
	Sch.vert.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sch.v.k.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Linatex	Gespl.	+	+	0	0	0	0	0	0	0
	Open	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Sch.dw.	-	-	-	0	-	-?	-	0	0
	Sch.hor.	-	0	-?	-?	-	-	-	-	-
	Sch.vert.	-	-	+?	-0	+	+	-0	0	+
	Sch.v.k.	-	-	0	-	+	-	-	0	?
Lamel	Gespl.	+	+?	0	0	0	0	0	+	0
	Open	+	+?	+	+	+	+	+	+	+
	Sch.dw.	-	-	-	0	-	-?	-	0	-0?
	Sch.hor.	-	0	-?	-?	-	-	-	-	-
	Sch.vert.	-	+	+	+	+	+	0	0	+
	Sch.v.k.	-	0	0	0	+	-	-	-	?
Recht	Gespl.	+	+	0	0	0	0	0	0	0
	Open	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Sch.dw.	-	-	+	0	-	-?	-	0	0
	Sch.hor.	-	0	-	-?	0	-	-	-	-
	Sch.vert.	-	+	-?	+	+	+	0	+	+
	Sch.v.k.	-	0	+	0+	+	-	-	+	?
Rond	Gespl.	+	+	0	0	0	0	0	0	0
	Open	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Sch.dw.	-	-	0	0	-	-?	-	0	0
	Sch.hor.	-	0	-?	-?	0	-	-	-	-
	Sch.vert.	-	0	0+	0	+	+	0	+	+
	Sch.v.k.	-	0	0	0	0	-	-	+	0
Verdr.	Gespl.	+	+	0	0	0	0	0	0	0
	Open	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Sch.dw.	-	-	-	0	-	?	?	-	?
	Sch.hor.	-	0	-?	-?	0	-	-	-	-
	Sch.vert.	-	0+	+	0	+	+	0	+	+
	Sch.v.k.	-	0+	0	0	0+	-	-	+	?

tab.4.4: Combineerbaarheid van subsystemen tot hopperconfiguraties

5 Cyclonenseparator

Dit hoofdstuk bevat achtereenvolgens: een inleidend deel, met daarna de belangrijkste separatie theorieën, de cycloonprestaties en tenslotte conclusies.

5.1 Inleiding

In deze paragraaf komen de basisprincipes, de stroomsnelheidsverdeling, het effect van de ontwerpparameters, de cycloonvariabelen en het verwachte hopperrendement aan de orde.

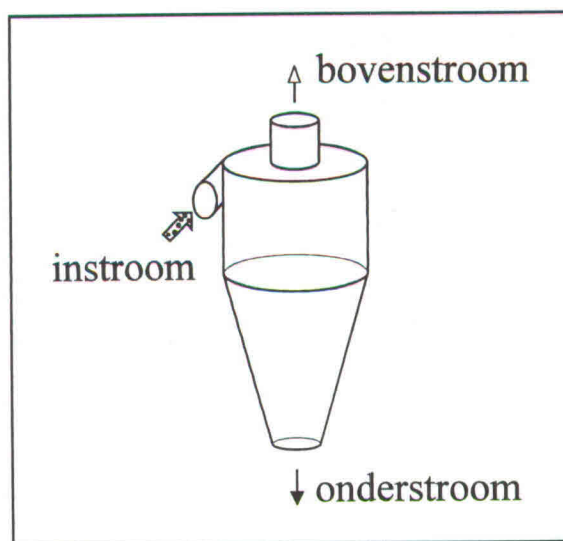
5.1.1 Basisprincipe

Het separatieproces [MUSCH] in een cycloon is voornamelijk gebaseerd op centrifugaalkracht. Gezien de toepassing van cyclonen met een grote hoofddiameter is de zwaartekrachtinvloed niet altijd verwaarloosbaar. Afgezien hiervan is het niet goed de cycloon horizontaal op te stellen, in verband met de kans op verstopping bij stilstand. Bovendien is het gunstig een cycloon verticaal op te stellen in verband met de hoge daalsnelheid van grote deeltjes. Op het bovenste deel bij de inlaat na, is de cycloon als cirkelsymmetrisch te beschouwen. De nevenstaande afbeelding is een algemene weergave van een cycloon.

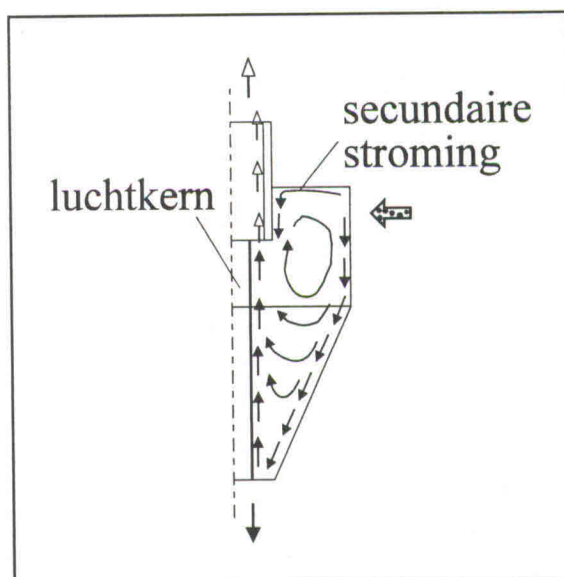
De stromingen in een cycloon, afbeelding 5.2, zijn tamelijk complex. Het mengsel stroomt tangentieel door de instroom naar binnen. De oorspronkelijke lineaire stroming wordt cirkelvormig. De deeltjes in het mengsel ondervinden afhankelijk van het soortelijke gewicht en het deeltjesvolume een centrifugaalkracht. Door de netto naar binnen gerichte mengselstroom ondervindt een deeltje een sleepstroom naar binnen, die afhankelijk is van de deeltjeseigenschappen en de mengselstroomsnelheid.

Het krachtenspel heeft tot gevolg dat de dichtheid toeneemt met een toename van de straal. Het mengsel in het midden, met een lage dichtheid stroomt spiraalvormig naar boven en verlaat de cycloon via de vortex-finder. Langs de buitenwand ontstaat een stroming met een hoge dichtheid naar beneden. Deze stroming langs de wand wordt aangedreven door het instromende mengsel, dat het in de cycloon stromende mengsel langs de wand naar beneden duwt. Hierdoor gaat het zwaardere mengsel langs de wand richting de onderstroom. Het lichtere mengsel in het centrum kan via de bovenstroom uit de cycloon stromen.

Boven in de cilindrische dwarsdoorsnede heerst een secundaire stroming naar de ingang van de vortex-finder. Deze stroming moet klein worden gehouden omdat die veel deeltjes bevat.



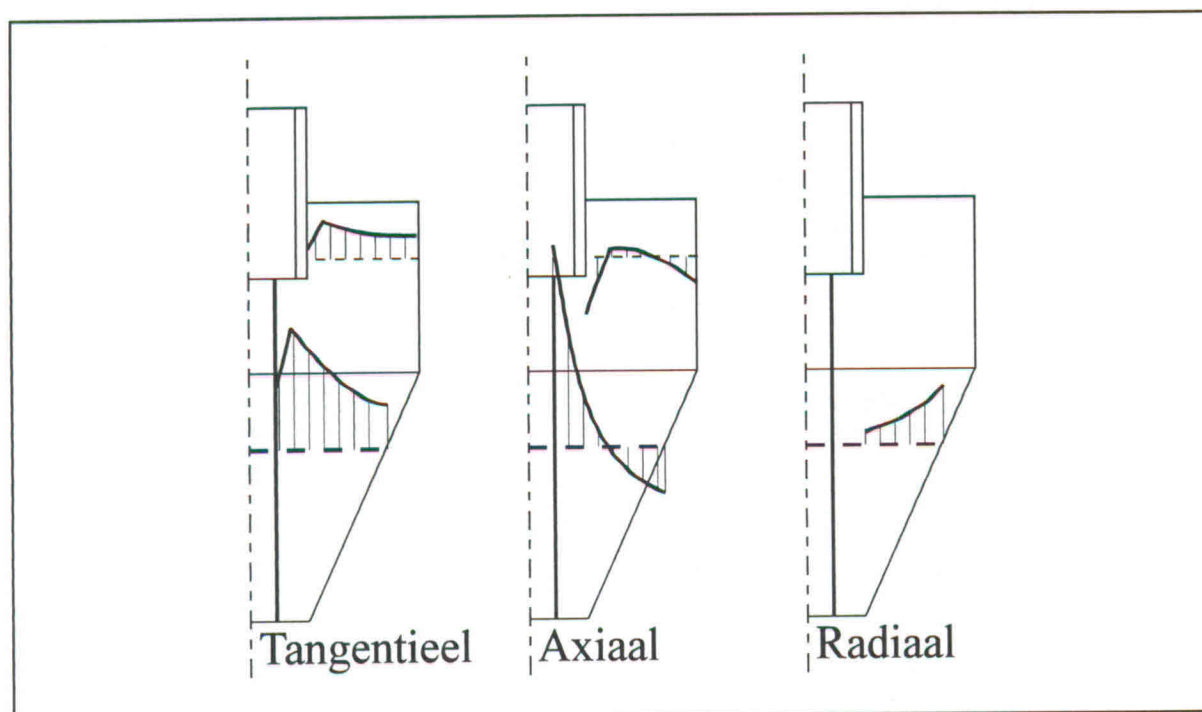
afb. 5.1: Cycloon



afb. 5.2: Stromingen [SVAROVSKY: 32]

5.1.2 Verdelingen van de stroomsnelheid

Het stroomsnelheidsverloop [SVAROVSKY:35-37] wordt in de onderstaande afbeelding in de orthogonale richtingen weergegeven.



afb. 5.3: Stroomsnelheidsverloop

- De **tangentiële snelheid** neemt af met een toenemende straal. Alleen vlak bij de luchtkern neemt de tangentiële snelheid toe met een toenemende straal.
- De **axiale snelheid** wordt veroorzaakt door de wervelvorming als gevolg van de stroming door de vortex-finder. Met name in het centrum zijn de axiale snelheden in de richting van de vortex-finder hoog.
- De **radiale snelheid** is de laagste van de drie, deze is netto naar het centrum gericht en neemt volgens metingen toe met een toename van de radius. Deze snelheid is het moeilijkst te meten en te berekenen, aldus is er weinig over het precieze verloop bekend.

5.1.3 Het effect van de ontwerp parameters

Wandruwheid

Bij een lage wandruwheid is de cycloonweerstand hoog, door de hoge tangentiële snelheden langs de wand, die zorgen voor grote centrifugaalkrachten [SVAROVSKY: 108]. Door de grote centrifugaalkracht heeft het instromende mengsel meer moeite met het vanuit de baan ver uit het centrum, naar het centrum te komen, alwaar het mengsel via de onderstroom en bovenstroom uitstroomt.

Cycloongrootte

De hoofddiameter, D , is de diameter van de middelste cilinder van de cycloon. Over het algemeen zijn de andere afmetingen gerelateerd aan deze hoofddiameter. De scheidingsdeeltjesdiameter, d_s , is kleiner, dit betekent meer vaste deeltjes separatie, bij een kleinere cycloondiameter.

Instroom opening en vorm

De grootte van de instroomopening, is belangrijk voor de capaciteit en de separatie efficiency. De grootte van de instroomopening bepaald de instroomsnelheid en daardoor grotendeels de tangentiële snelheden in de cycloon. De hydraulische instroomdiameter, D_i , kan uit het meestal ronde of rechthoekige instroomoppervlak worden bepaald. Het is belangrijk dat de straal die door de instroomopening in de cycloon stroomt niet te veel in de richting van de vortex-finder staat, aangezien anders veel turbulentie ontstaat.

Vortex-finder diameter, wanddikte en lengte

Het verkleinen van de vortex finder diameter, D_b , doet de scheidingsdeeltjesdiameter afnemen. Dit kan worden verklaard doordat het uitstroomoppervlak meer in het centrum met de kleinere deeltjes ligt en doordat de verblijftijd van het mengsel groter is. Wordt de buitenstraal van de vortex-finder, $D_b/2 + t$, kleiner dan de straal waar de tangentiële snelheid maximaal is (afb. 5.3), dan wordt de scheidingsdeeltjesdiameter juist weer groter.

Een grote wanddikte, t , van de vortex-finder is gunstig, de deeltjes in de secundaire stroming krijgen hierdoor weer een kans in een neerwaartse stroming te worden opgenomen.

De lengte van het stuk van de vortex-finder, dat in de cycloon steekt, l , is van belang om de secundaire stroom tegen te gaan. Bij hoofddiameters groter dan 600 mm maakt het weinig verschil of de bovenstroompijp in de cycloon steekt [BRADLEY].

De vorm van de vortex-finder heeft weinig invloed op het separatie proces. Aldus wordt meestal een cilindrische in plaats van een conische vorm toegepast.

Conische vorm

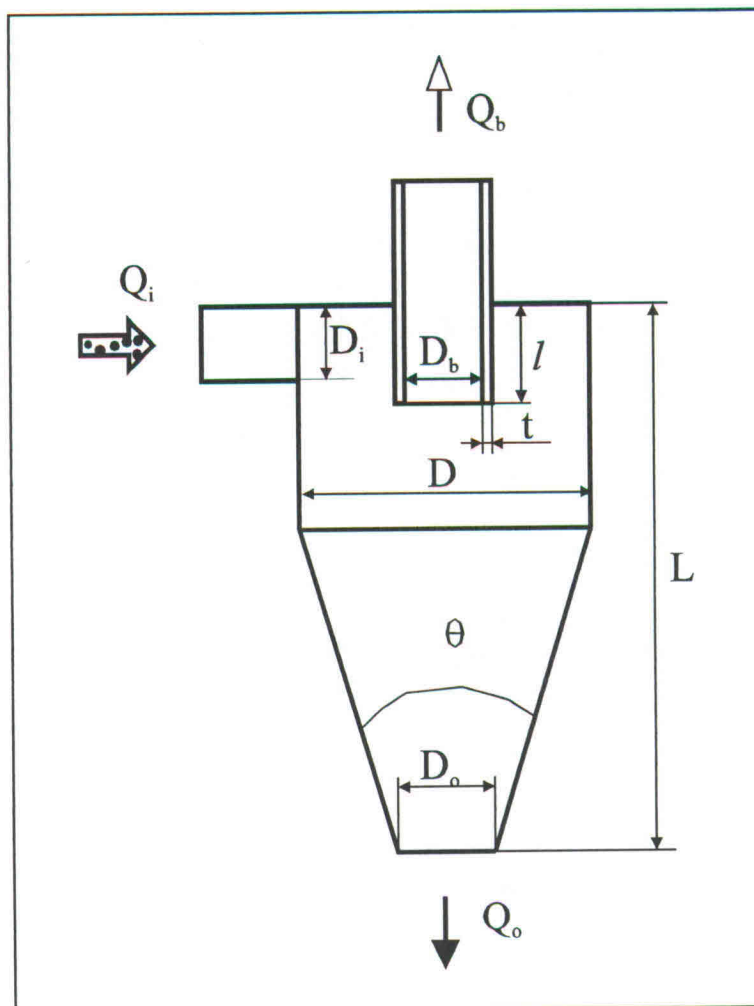
Het conische deel van de cycloon heeft een drietal voordelen. Ten eerste vindt de uitstroom van vaste deeltjes plaats bij een lage druk en worden de deeltjes bijeen geveegd in de richting van de onderstroom.

Verder wordt het verlies aan impuls door het via de bovenstroom uitstromen van mengsel gecompenseerd door het kleiner worden van de radius. Dit heeft tot gevolg dat gelijke tangentiële snelheidsprofielen langs de vlakken loodrecht op de centrumlijn van de cycloon zijn te vinden. Door de conische vorm krijgen secundaire stromingscirculaties minder kans om op te treden.

De van belang zijnde afmetingen van een standaard cycloon staan in afbeelding 5.4.

Parameters van invloed op het functioneren

- Afmetingen: D ; D_i ; D_o ; D_b ; L ; l ; t
- Oppervlakken: profiel; ruwheid
- Capaciteit: Q
- Mengseleigenschappen: dichtheid; concentratie; viscositeit



Tabel 5.1 geeft de invloed van bepaalde parameters op het separatieproces en de conditie van een cycloon weer.

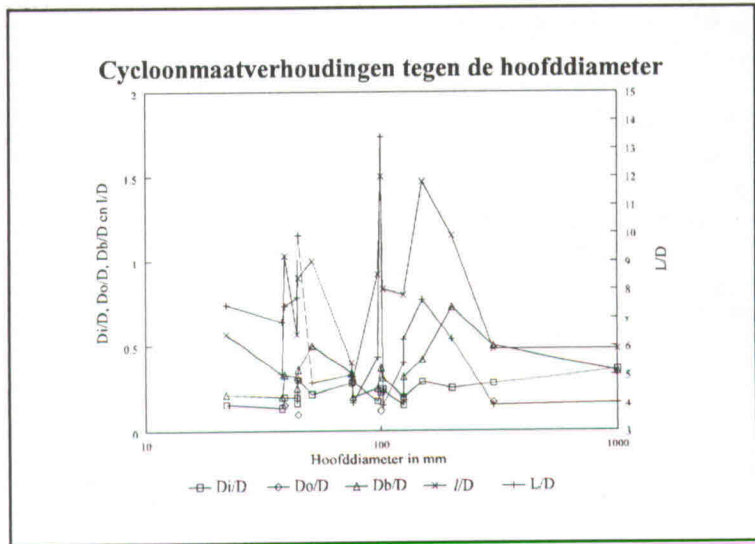
afb. 5.4: Cycloonmaten

		D	D_i	D_b	D_o	L	l	θ
Capaciteit	$Q \uparrow$	\uparrow	\uparrow	\uparrow		\uparrow	\downarrow	
Scheidingsdiameter	$d_s \downarrow$	\downarrow	\downarrow	\downarrow		\uparrow	\downarrow	\downarrow
Scheidingscherpte	beter			\uparrow				\uparrow
Rendement	$R_f \uparrow$			\downarrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow	
Abrasie	\downarrow	\uparrow	\uparrow					

tab.5.1 Invloed van parameters op het separatieproces [SVAROVSKY: 109]

Maatverhoudingen

In de grafiek rechts zijn de verhoudingen van diverse cyclonen weergegeven. Het blijkt hieruit dat veel variatie in verhoudingen voor de verschillende cyclonen optreedt. Deze grafiek bevat verschillende typen cyclonen die eventueel voor baggertoepassingen geschikt zouden kunnen zijn.



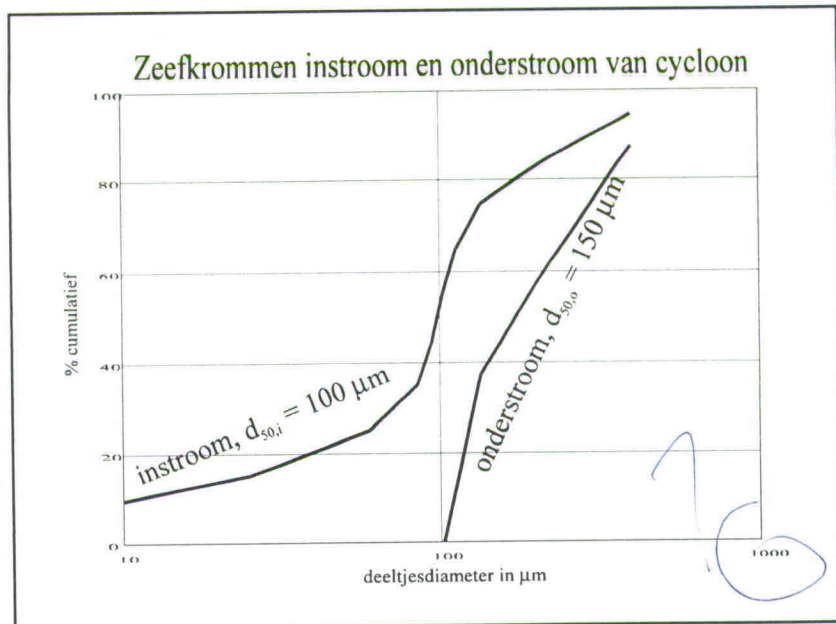
afb. 5.5: Maatverhoudingen

5.1.4 Hopperrendement

In deze subparagraaf wordt, aan de hand van een voorbeeld, het hopperrendement bij toepassing van een cyclonenseparatiesysteem bepaald. Het hopperrendement is het quotiënt van de volumina van de in de hopper achtergebleven deeltjes en de ingestroomde deeltjes voor een hele optimale laadcyclus. De waarden van de zeefkrommen van de instroom en van de onderstroom staan in de onderstaande tabel. Tevens zijn deze beide krommen in afbeeldingen 5.6 weergegeven.

% gebied	d_{50} in μm	$d_{50,\text{gem}}$ in μm	% zeefkromme onder
0-10	0-10	5	
10-20	10-40	25	
20-30	40-80	60	
30-40	80-90	85	
40-50	90-100	95	
50-60	100-105	102,5	
60-70	105-120	112,5	25
70-80	120-150	135	25
80-90	150-300	225	25
90-100	300-500	400	25

tab. 5.2: Zeefkromme waarden



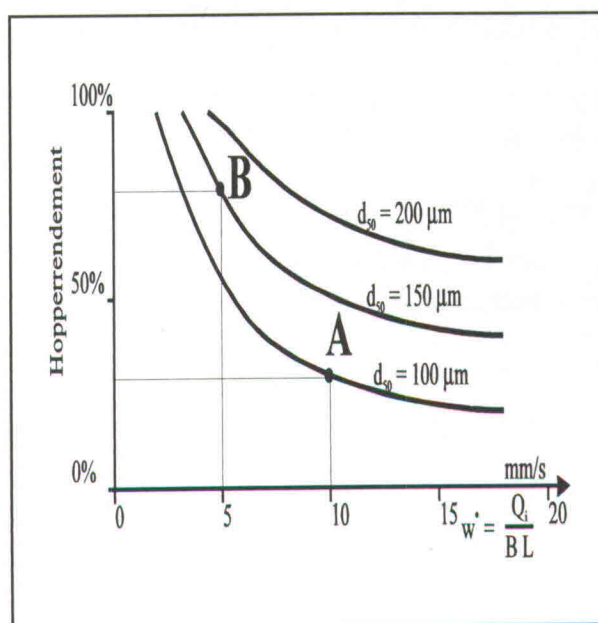
afb. 5.6: Zeefkromme van instroom en onderstroom

In de nevenstaande grafiek geldt punt A voor de situatie, waarbij geen cyclonen worden toegepast. Het totale debiet komt in het bassin terecht en de gemiddelde diameter bedraagt ongeveer $100 \mu\text{m}$, bij een hopperbelasting, $w^* = 10 \text{ mm/s}$. Op de verticale as is het bijbehorende hopperrendement van 29 % af te lezen.

Voor de situatie in punt B is hopperrendement van 79 % af te lezen op de curve bij $d_{50} = 150 \mu\text{m}$ en $w^* = 5 \text{ mm/s}$. Het hoppertotaalrendement moet worden vermenigvuldigd met het cycloonrendement. Wel duurt het twee maal zolang voordat de hopper volledig gevuld is. Ook wordt er een grote hoeveelheid vaste deeltjes voor niets van de bodem naar het baggervaartuig getransporteerd, deze gaan via de overstroom van de cycloon overboord.

Het totale hopperrendement bedraagt $\frac{1}{2} \cdot 79 \% \approx 40 \%$.

Het totale hopperrendement verbetert volgens dit voorbeeld met een factor 1,4. In de praktijk zal deze factor kleiner zijn doordat de situaties minder ideaal zijn. Met name het niet constant zijn van de eigenschappen van het instromende mengsel vormt een probleem.



afb. 5.7: Hopperrendement

*Ik is een
meer-edge
edge
definitie
probleem stels*

5.2 Separatie theorieën

De beschikbare theorieën kunnen in drie basisgroepen naar achterliggende gedachten worden geclassificeerd: de evenwichtsbaan theorie, de verblijftijd theorie en de crowding theorie.

Evenwichtsbaan theorie [DRIESSEN; CRINER]

Het deeltje komt in een baan terecht waarvoor geldt dat de naar buiten gerichte, door de centrifugaalkrachten opgewekte snelheid, gelijk is aan de radiale vloeistofstroomsnelheid:

$$v_r = C \cdot \frac{u_t^2}{r} \quad (5.1)$$

Deze theorie houdt geen rekening met:

- Verblijftijd
- Turbulentie
- Invloed van concentratie

Verblijftijd theorie [RIETEMA]

De verblijftijd theorie gaat uit van de kans dat een deeltje de wand bereikt. De scheidingsdiameter is dan de diameter van het deeltje dat als het in het midden van de instroomopening binnenkomt, precies de cycloonwand bereikt gedurende de verblijftijd. In de nevenstaande afbeelding is dit het gebied tussen de cycloonwand en de streeplijn.

$$\int_0^T v_r \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot D_i \quad (5.2)$$

Radiale deeltjessnelheid:

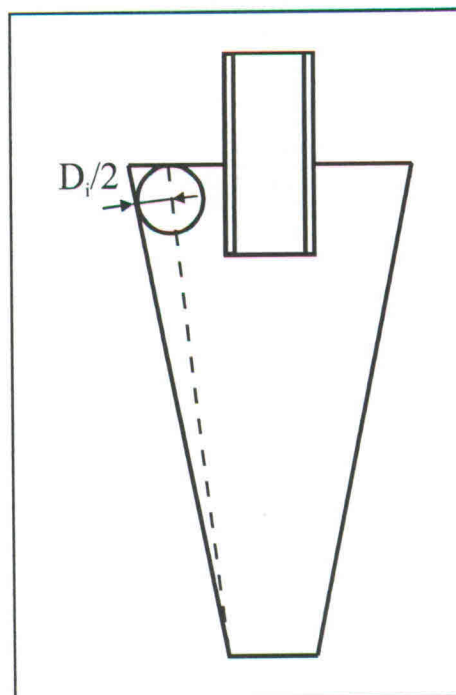
$$v_r = \frac{d_s^2 \cdot \Delta \rho \cdot u_t^2}{18 \cdot \eta \cdot r}$$

Axiale vloeistof snelheid gaat langs de wand:

$$u_z = \frac{dz}{dt} \quad \wedge \quad \frac{dz}{dr} = \frac{L}{R}$$

Statische drukval:

$$\frac{U_t^2}{r} = \frac{dp}{\rho_w \cdot dr} \quad \Rightarrow \quad \Delta p = \rho_w \cdot \int_0^R \frac{U_t^2}{r} \cdot dr$$



afb. 5.8: Verblijftijd theorie

Uit het voorgaande volgt de volgende dimensieloze parameter:

$$\frac{d_s^2 \cdot \Delta \rho \cdot L \cdot \Delta p}{\eta \cdot \rho_w \cdot Q} = \frac{36 \cdot U_z \cdot R}{\pi \cdot U_i \cdot D_i} = Cy_{50} \quad (5.7)$$

Rietema stelt dat Cy_{50} constant is voor een bepaalde cycloon. Het middelste deel van de vorige formule is inderdaad constant voor grote Reynoldswaarden, aangezien dan de axiale snelheid en de instroomsnelheid gelijk zijn. Uit proeven van Rietema met cyclonen met een hoofddiameter van 76 mm bleek een Cy_{50} van ongeveer 3,5 optimaal te zijn.

Deze theorie houdt geen rekening met:

- Radiale vloeistofstroming
- Traagheidskrachten
- Turbulentie
- Invloed van concentratie

Crowding theorie [FAHLSTROM]

De crowding theorie veronderstelt dat de scheidingsdiameter in eerste instantie een functie van de onderstroomcapaciteit en de instroomdeeltjesverdeling is. Deze theorie legt de nadruk op de ophoping van deeltjes onder in de cycloon. De scheidingsdiameter is, volgens deze theorie afhankelijk van de verhouding tussen de vaste deeltjes via de bovenstroom en de onderstroom.

5.3 Cycloonprestaties

In deze paragraaf wordt naar de prestaties van cyclonen gekeken. Achtereenvolgens komen aan de orde: nomogrammen van de fabrikanten Dorrlclone en Krebs, gegevens van de fabrikant Krebs en rekenmethodes uit de literatuur.

5.3.1 Volgens fabrikanten

Nomogrammen

Onderstaande tabel bevat ruwe schattingen omtrent de werking van cyclonen, afgelezen uit nomogrammen van fabrikanten (bijlage).

		Q (m ³ /s)	d _s (μm)	D (m)
type	Dorrlclone: 48"FR	0.1	80	1.22
	Dorrlclone: 28"RP	0.3	80	0.70
	Krebs: D-26	0.1	70 tot 150	0.67
	Krebs: D-33	0.25	100 tot 220	0.84
	Krebs: D-50	0.4	150 tot 250	1.27

tab.5.2: Gegevens uit nomogrammen van fabrikanten

Krebs cyclonen

Uit de gegevens van Krebs, bijlage 2, geldt voor een cycloon met $D = 1.27$ m:

$n = 12$ (aantal cyclonen)

Het debiet door alle cyclonen is: $Q = 5$ m³/s

$$\begin{array}{lll}
 Q_i = Q/12 & \rho_i = 1440 \text{ kg/m}^3 & c_i = 27 \% \\
 Q_b = 43 \% \cdot Q_i & \rho_b = 1130 \text{ kg/m}^3 & c_b = 8 \% \\
 Q_o = 57 \% \cdot Q_i & \rho_o = 1870 \text{ kg/m}^3 & c_o = 53 \%
 \end{array}$$

$$d_{50} = 200 \text{ } \mu\text{m}$$

$$d_s = 75 \text{ } \mu\text{m}$$

Een twaalfstal cyclonen is veel voor plaatsing aan boord. De scheepsstabiliteit is geen groot probleem aangezien het cyclonensysteem het zwaarst is gedurende het laadproces. Dan is het schip stabiel doordat het zwaartepunt van de zuigbuizen laag ligt. Gedurende het varende transport bevindt zich geen mengsel in de cyclonen, waardoor het cyclonensysteem veel lichter is en geen gevaar voor de stabiliteit oplevert. Volgens een leverancier van de fabrikant Krebs gaan de cyclonen zes tot zeven jaar mee zonder extreme slijtage.

5.3.2 Berekeningen

Rekenmethodes

In deze paragraaf staat een aantal rekenmethodes waarmee het effect van verschillende cyclonen kan worden vergeleken. De formules van de rekenmethodes zijn gebaseerd op de theorie van Rietema. Er wordt door de formules getracht effecten als gehinderde bezinking en turbulentie zo goed mogelijk weer te geven.

Eerste methode, Svarovsky [SVAROVSKY:130]

$$d_s = \sqrt{\frac{9 \cdot \eta \cdot D^3 \cdot C_1 \cdot (1 - R_f) \cdot e^{C_2 \cdot c}}{2 \cdot Q \cdot \Delta \rho}} \quad \wedge \quad R_f = \frac{Q_o}{Q_i} \quad (5.8)$$

met: $C_1 = 0.000093$
 $C_2 = 6.33$

Deze formule wordt in Svarovsky gebruikt voor instroomdichtheid tot ongeveer 1200 kg/m^3 en de uitstroomdichtheid mag ongeveer 1650 kg/m^3 worden. De debieten waar deze formule voor geldt liggen rond de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een hoofddiameter van ongeveer $0,220 \text{ m}$

Tweede methode, Plitt [SVAROVSKY:131]

Dit is een iteratieve methode.

$$\Delta p = \frac{1.316 \cdot 10^5 \cdot Q^{1.78} \cdot e^{0.55 \cdot c}}{D^{0.37} \cdot D_i^{0.94} \cdot (L - l)^{0.28} \cdot (D_o^2 + D_b^2)^{0.87}} \quad (5.9)$$

$$d_s = \frac{0.0269 \cdot D^{0.46} \cdot D_i^{0.6} \cdot D_b^{1.21} \cdot e^{6.3 \cdot c}}{D_u^{0.71} \cdot (L - l)^{0.38} \cdot Q^{0.45} \cdot (\Delta \rho)^{0.5}} \quad (5.10)$$

Deze formules zijn geldig voor soortgelijke situaties als bij de eerste methode.

Derde methode, Zyklon [HILLIGARDT:185]

Deze methode houdt rekening met gehinderde sedimentatie, doch is in eerste instantie niet bedoeld voor hoge dichtheden. De formules werden toegepast en de constanten zijn ingesteld voor dichtheden van maximaal 1150 kg/m^3

$$d_s = 0.12 \cdot \sqrt{\frac{D \cdot v \cdot e^{0.085 \cdot c_i \cdot C} \cdot \ln \frac{Q_b}{Q_o}}{\rho_v - \left(\rho_w + \frac{c_i}{\rho_v} \cdot \Delta \rho\right) \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_w} + c_i \cdot \Delta \rho}}} \quad (5.11)$$

De praktijkmetingen liggen allen binnen een foutmarge van 20 %. Deze formule is in het rapport van Hilligardt geijkt voor gebruik voor cyclonen met hoofddiameters tot ongeveer 1 m. En voor instroomconcentraties tot ongeveer 1200 kg/m^3 , bij debieten van rond de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor de debietverhouding, het quotiënt van de onderstroom en de instroom, R_p , geldt dat deze

maximaal ongeveer $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ bedroeg, bij een debiet van ongeveer $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gegevens ten behoeve van berekeningen met formules

De volgende rekenwijzen zijn bedoeld voor debieten van ongeveer $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is laag in vergelijking tot het debiet dat is vereist voor toepassing op sleephoppers. De concentratie in het volgende rekenvoorbeeld is $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$, ook dit is enigszins aan de lage kant.

Gegevens:

Q_i en D zijn variabel

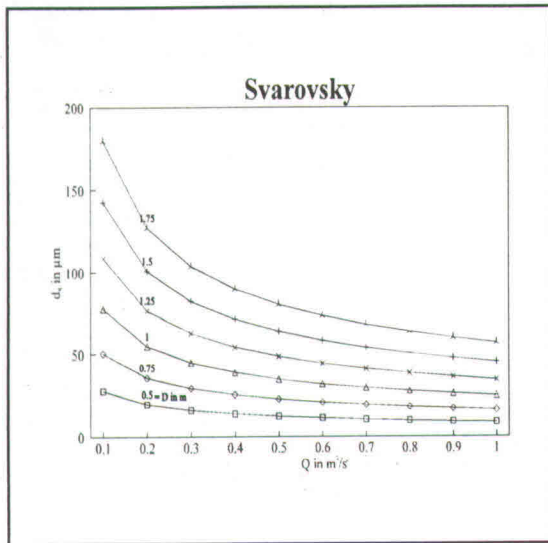
$$\begin{array}{lll} Q_i = 100 \% & \rho_i \approx 1300 \text{ kg}/\text{m}^3 & c_i = 18 \% \\ Q_b = 76 \% \cdot Q_i & \rho_b \approx 1200 \text{ kg}/\text{m}^3 & c_b = 12 \% \\ Q_o = 24 \% \cdot Q_i & \rho_o \approx 1650 \text{ kg}/\text{m}^3 & c_o = 40 \% \end{array}$$

$$\Delta p \approx 10^5 \text{ Pa}$$

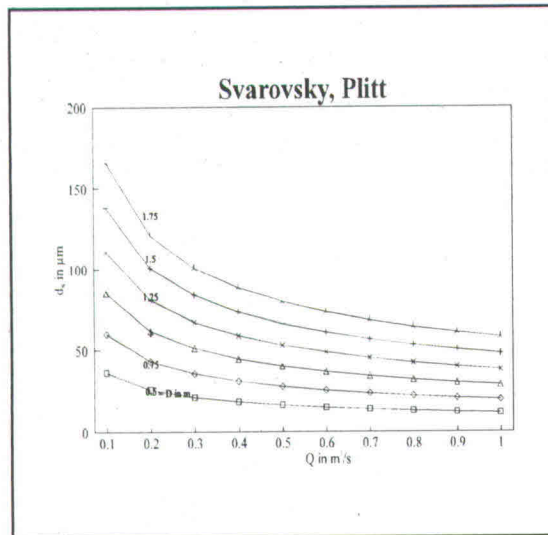
Lengteverhoudingen AKW RW2515 cycloon:

$$\frac{D_i}{D} = 0.2 \quad \wedge \quad \frac{D_b}{D} = 0.32 \quad \wedge \quad \frac{D_o}{D} = 0.21 \quad \wedge \quad \frac{l}{D} = 0.80 \quad \wedge \quad \frac{L}{D} = 6.24$$

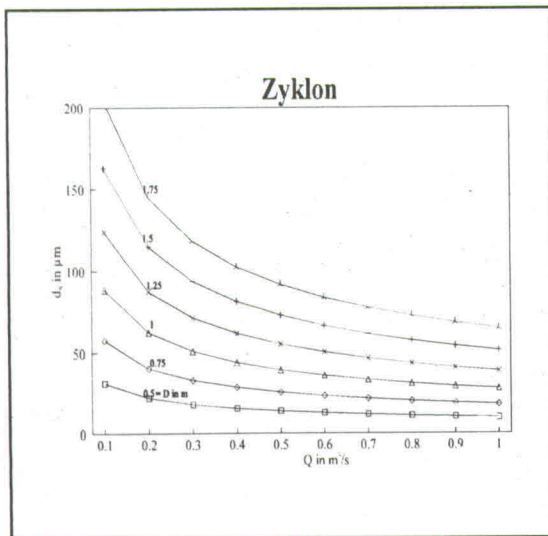
In afbeelding 5.12 staan de drie verschillende rekenmethodes voor een hoofddiameter van 1 m bij elkaar. Het verschil blijkt gering te zijn, dit kan komen doordat de formules afhankelijk zijn.



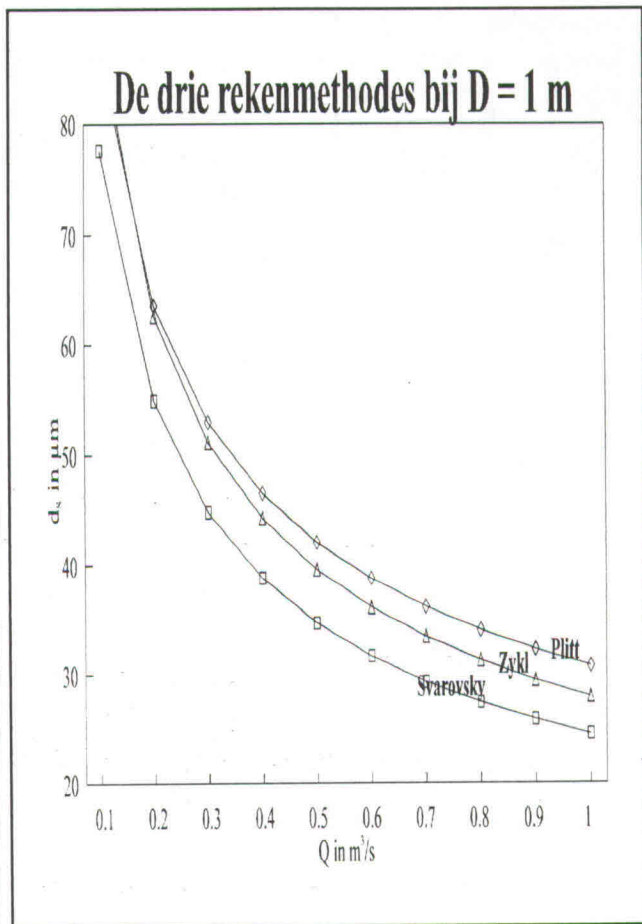
afb. 5.9: 1^e methode, Svarovsky



afb. 5.10: 2^e methode, Svarovsky, Plitt



afb. 5.11: 3^e methode, Zyklon



afb. 5.12: Vergelijking rekenmethodes

Instroomsnelheid bij bepaalde cycloonlengte en aantal

Instroomsnelheid bij bepaalde cycloonlengte en aantal (totale debiet gedeeld door debiet per cycloon). Aangenomen worden maatverhoudingen volgens de eerder genoemde AKW RW2515 cycloon.

$$D_i = \frac{D}{5} \quad \wedge \quad D = \frac{L}{6}$$

Voor het instroomoppervlak geldt:

$$A_i = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 = \frac{\pi \cdot L^2}{3600}$$

De instroomsnelheid volgt uit het totale debiet, Q , het aantal cyclonen, n , en het instroomoppervlak, A_i .

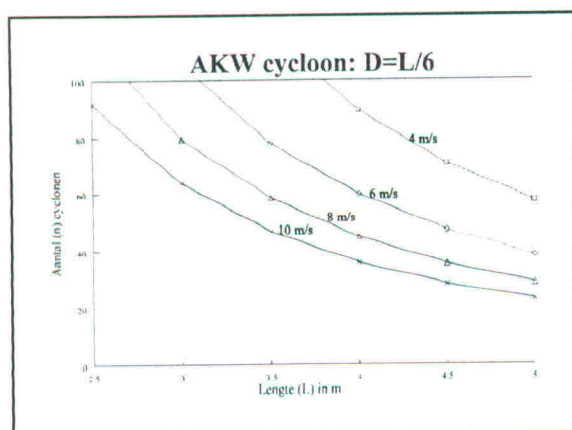
$$Q_i = \frac{Q}{n} \quad \wedge \quad u_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad \Rightarrow \quad u_i = \frac{3600 \cdot Q}{\pi \cdot n \cdot L^2} \quad (5.15)$$

Het aantal cyclonen kan geschreven worden als:

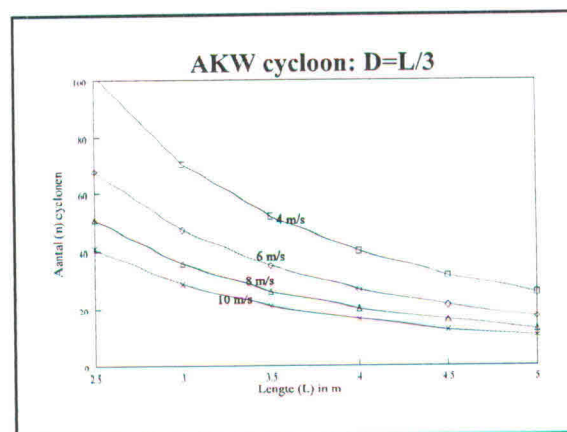
$$D = \frac{L}{6} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{3600 \cdot Q}{\pi \cdot u_i \cdot L^2}$$

Gezien het feit dat dit waarschijnlijk tot grote cycloonlengten leidt wordt de vorige formule ook opgesteld voor een gehalveerde cycloonlengte. Als verder alles gelijk wordt gehouden volgt hieruit de volgende vergelijking voor het aantal cyclonen.

$$D = \frac{L}{3} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{900 \cdot Q}{\pi \cdot u_i \cdot L^2}$$



afb. 5.13: Instroomsnelheid als $D=L/6$



afb. 5.14: Instroomsnelheid als $D=L/3$

Er blijkt dat instroomsnelheden groter dan 10 m/s nodig zijn, anders zijn er teveel cyclonen nodig. Deze hoge snelheden veroorzaken veel slijtage en wrijvingsverlies. Volgens deze beschouwing is het toepassen van een cyclonensysteem niet goed mogelijk.

5.4 Conclusies

De werking van een cycloon is zeer ingewikkeld en het stromingsverloop is niet volledig bekend. Dit betekent dat de formules die de prestaties van cyclonen voorspellen slechts beperkt bruikbaar en onnauwkeurig zijn.

De berekeningen geven geen veelbelovende voorspelling omtrent het separatie rendement van cyclonen.

Het toepassen van tientallen cyclonen lijkt gunstig, echter dit is praktisch niet realiseerbaar aan boord van sleephoppers. Bovendien treedt door het grote aantal verdeelingsen veel drukverlies en slijtage op.

Bij grote cyclonen, met een hoofddiameter van 1 m wordt de centrifugaalkracht van dezelfde orde van grootte als de zwaartekracht. Deze grote cyclonen zijn nodig vanwege de grote debieten. Hoge instroomsnelheden zijn anders nodig, deze veroorzaken grote drukverliezen en veel slijtage.

De cyclonen van de fabrikant Krebs zijn veelbelovend, doch is een groot aantal is nodig en de praktijk moet uitwijzen of deze werkelijk zo goed werken.

In het gunstigste geval verbetert het totale hopperrendement door toepassen van een cyclonenseparatiesysteem met een factor 1,4.

Met name door de grote variatie van de eigenschappen van het instromende mengsel zal een cyclonensysteem in de praktijk minder goed werken.

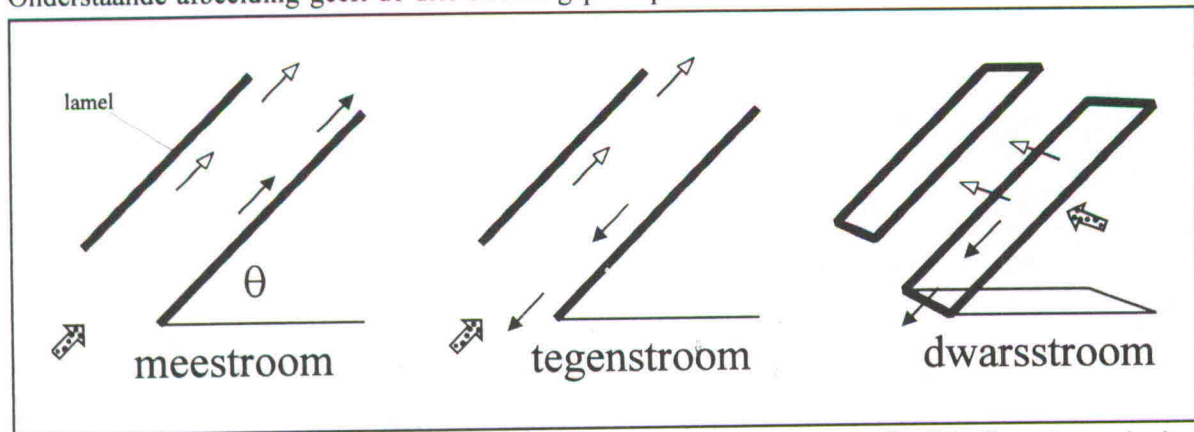
6 Lamellenbezinker

Het lamellenbezinkstelsel is gebaseerd op vergroting van het bezinkoppervlak en het uit de mengselstroom scheiden van de deeltjes. De lamellenbezinker bestaat uit evenwijdige platen die onder een hoek staan. De deeltjes van het mengsel, dat tussen de lamellen wordt geleid, dalen neer op de lamellen. Er ontstaan neerwaartse stromingen van deeltjes die op de lamellen zijn neergekomen. Deze stroming wordt aangedreven door de gravitatie kracht en tegengewerkt door enerzijds de plaatwrijving en anderzijds de stromingswrijving door de mengselstroom tussen de lamellen.

6.1 Basisprincipe en werking

Stromingsprincipes [MEINEMA]

Onderstaande afbeelding geeft de drie stromingsprincipes weer.



afb. 6.1: Stromingsprincipes

Meestromend

De bezinkende deeltjesstroom en de mengselstroom hebben dezelfde richting, er treedt niet snel opwerveling op.

Tegenstromend

Het bezinkproces wordt door de doorstroming belemmerd. De afstand tussen de platen kan kleiner worden genomen, doordat de bezonken deeltjes buffer onderaan ontbreekt. Echter het snelheidsverschil tussen de bezonken deeltjesstrooming en de mengselstrooming is groot, zodat opwerveling eerder optreedt. Grote schommelingen in belasting zijn mogelijk zonder verstoppingsproblemen.

Dwarsstromend

Hierbij is het van groot belang dat een gelijkmatige verdeling van de suspensie over het aanstroomoppervlak wordt verkregen. Op deze wijze kunnen de voordelen van het meestroom en het tegenstroomprincipe worden benut.

Doorstroomprofielvorm

Er zijn diverse plaatvormen mogelijk zoals onder andere:

- Vlakke plaat
- Golfplaat
- Zaagtand

Rendement

Het rendement van een lamellenbezinker is afhankelijk van de volgende factoren:

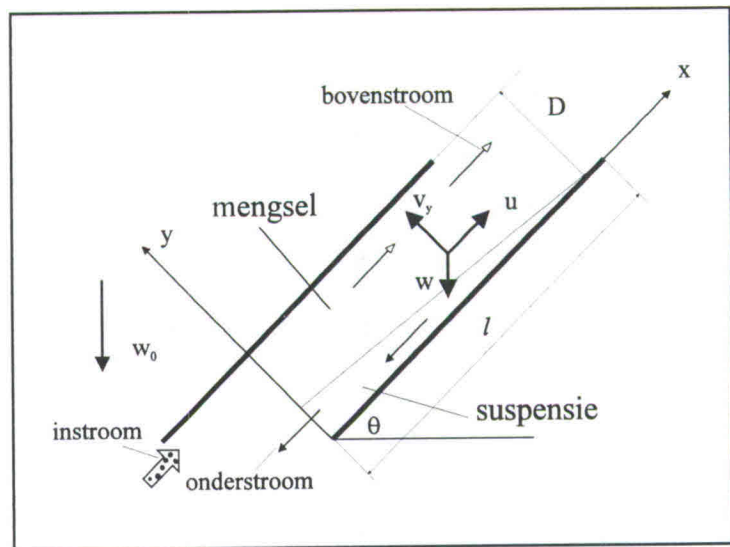
- Oppervlakte belasting
- Verblijftijd
- Instroomsnelheid
- Turbulentie

6.1.1 Scheidingsdiameter

De valsnelheid, w_0 , van de deeltjes die juist bezinken, bij een bepaalde lamellenopstelling waar een bepaald debiet doorstroomt, wordt in deze subparagraaf bepaald. Uitgegaan wordt van ideale lamellen bezinking, waarbij onder andere geen rekening wordt gehouden met gehinderde bezinking.

De bewegingsvergelijking van een discreet deeltje in een laminaire stroom is:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = \Delta \rho \cdot V \cdot g - F_s \quad (6.1)$$



afb. 6.2: Strooming tussen lamellen

Voor een laminaire stroom kan de wet van Stokes gebruikt worden voor de weerstandskracht van de strooming:

$$F_s = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_d \cdot (v - u)$$

Als het traagheidseffect wordt verwaarloosd, geldt voor de bezinksnelheid:

$$w_0 = \frac{\Delta \rho \cdot V \cdot g}{3 \pi \cdot \eta \cdot d_d}$$

De snelheid van een deeltje [WARD] is:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = u_x - w_0 \sin\theta \quad \wedge \quad v_y = \frac{dy}{dt} = -w_0 \cos\theta \quad (6.2)$$

De twee formules gecombineerd geeft:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-w_0 \cos\theta}{u - w_0 \sin\theta}$$

Deze vergelijking is de differentiaalvergelijking van een traject van een discreet deeltje, dat het resultaat is van de gecombineerde effecten van vloeistof weerstand en gravitatie bezinking. Wanneer deze vergelijking geïntegreerd wordt, ontstaat de volgende formule:

$$\int u_x(y) \cdot dy - w_0 \cdot y \sin\theta + w_0 \cdot x \cos\theta = C_0$$

Door deze vergelijking te delen door u , de gemiddelde stroomsnelheid, en D , de diepte van de stroom loodrecht op de stroomrichting gemeten, wordt de volgende vergelijking verkregen:

$$\int \frac{u_x(y)}{u} \cdot dY - \frac{w}{u} \cdot Y \sin\theta + \frac{w}{u} \cdot X \cos\theta = C_1$$

met C_1 als aangepaste integratie constante, $Y=y/D$ en $X=x/D$. Deze vergelijking is de algemene vergelijking van de baan van een deeltje.

Voor de stroomsnelheidsverdeling, $u_x(y)$, bij laminaire stroming tussen twee evenwijdige platen geldt:

$$\frac{u_x(y)}{u} = 6 \cdot (Y - Y^2)$$

De twee voorgaande vergelijkingen en de randvoorwaarde, met $L = l/D$, $X=L$ en $Y=0$ geven:

$$6 \cdot \left(\frac{Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3} \right) - \frac{w_0}{u} \sin\theta + \frac{w_0}{u} \cdot (X-L) \cos\theta = 0$$

Deze vergelijking met de randvoorwaarden $X=0$ en $Y=1$ geeft:

De daalsnelheid is als volgt uit te drukken in de bezinksnelheid:

$$w = -\frac{dh}{dt} = w_0 \cdot \left(1 + \frac{h}{b} \cos\theta \right)$$

De twee bovenstaande vergelijkingen leiden tot:

$$\frac{u}{w_0} = (1 + L \sin\theta \cos\theta) \cdot (\sin\theta + L \cos\theta)$$

Dit is ook te schrijven als:

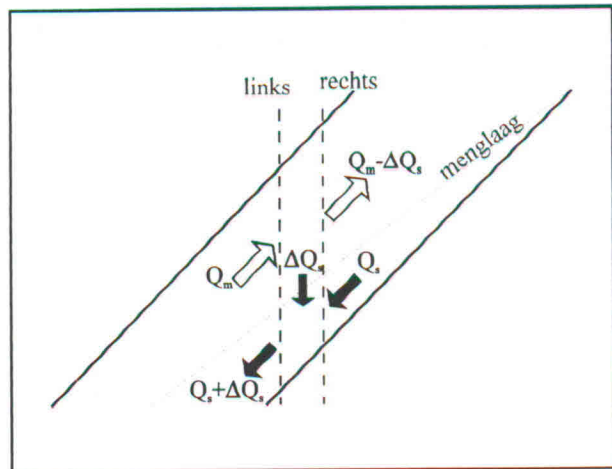
$$\frac{Q}{w_0} = (1 + L \sin\theta \cos\theta) \cdot (\sin\theta + L \cos\theta) \cdot n \cdot B \cdot D \quad (6.3)$$

6.1.2 Laagdikte tussen de lamellen

In de nevenstaande figuur is in de leidingdoorsnede geen bufferwerking. De netto instroom door de linkergrens en de rechtergrens is dus nul.

$$Q_{\text{links}} = Q_{\text{rechts}}$$

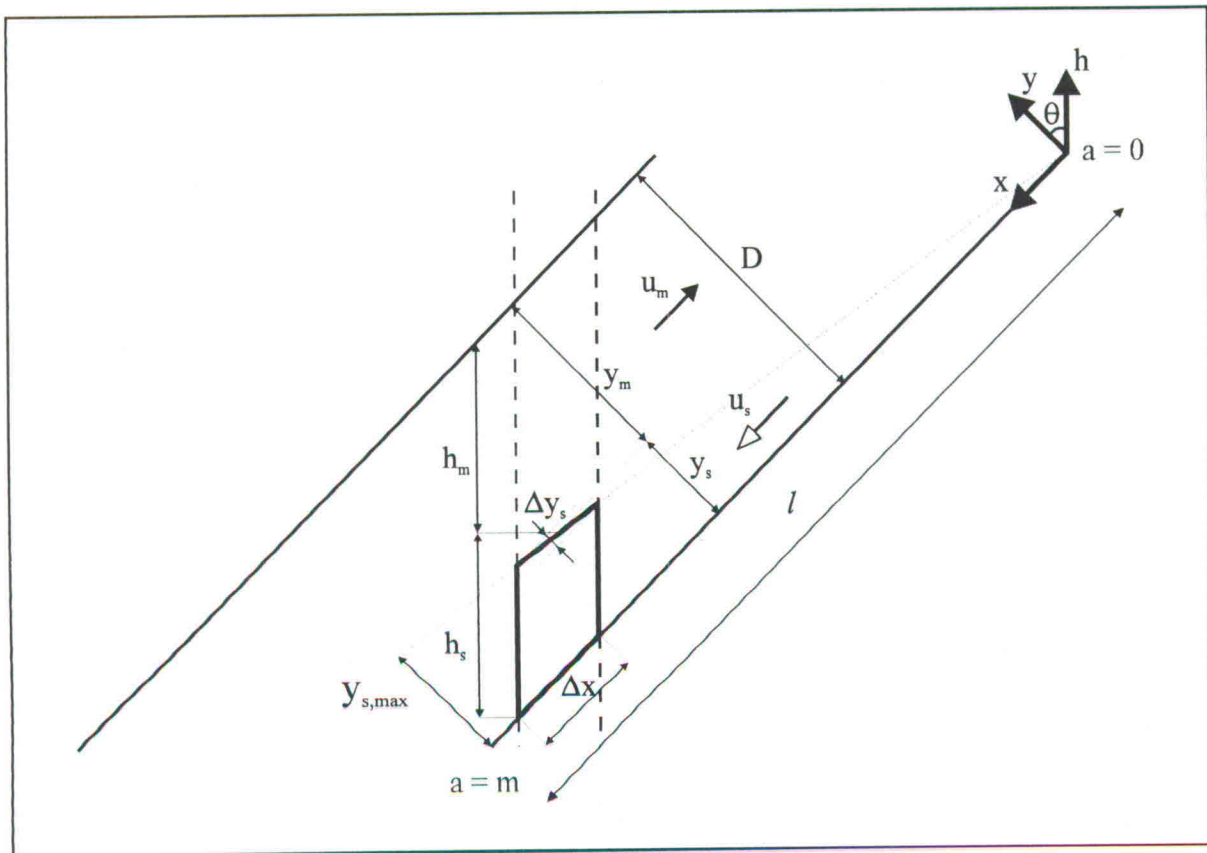
$$Q_m - (Q_s + \Delta Q_s) = Q_m - \Delta Q_s - Q_s$$



afb. 6.3: Continuïteit in dwarsdoorsnede

Voor verdere modellering is het belangrijk de hoeveelheid sedimentatie, ΔQ_s per leidingdoorsnede te kennen. Dit is een functie van diverse variabelen:

$$\Delta Q_s = f(c_m; u_m; u_s; d_{50})$$



afb. 6.4: Modellering van een dwarsdoorsnede

Aangenomen wordt dat de stroomsnelheid van het mengsel, u_m , constant is over de dwarsdoorsneden en dat de suspensieconcentratie overal gelijk is.

Voor de modellering wordt in eerste instantie de invloed van de mengselstroomsnelheid beschouwd. Voor de stroomsnelheden in de linker en in de rechter grens geldt volgens de continuïteit respectievelijk:

$$u_{m,l} = \frac{Q_m}{B \cdot (D - y_s)} \quad \wedge \quad u_{m,r} = \frac{Q_m}{B \cdot (D - y_s - \Delta y_s)}$$

De suspensie dikte in de y -richting, verandert door het neerdalen van deeltjes, ΔQ_s , en het veranderen van de suspensiestroomsnelheid, u_s . Hieruit volgt:

$$\Delta y_s = \frac{\Delta Q_s \cdot \Delta t}{B \cdot dx} - \frac{y_s}{u_s} \cdot du_s \quad \wedge \quad \Delta t = \frac{dx}{u_m} \Rightarrow \frac{\Delta Q_s \cdot dx}{B \cdot dx \cdot u_m} = \frac{\Delta Q_s}{B \cdot u_m}$$

Integratie van de suspensiedoorsneden geeft:

$$y_s(x) = \int_0^x \frac{dy_s}{dx} \cdot dx \quad \wedge \quad \frac{dy_s}{dx} = \frac{\Delta y_s}{\Delta x} = \frac{\Delta Q_s}{\Delta x \cdot B \cdot u_m} - \frac{y_s}{u_s} \cdot \frac{du_s}{\Delta x}$$

$$\Rightarrow y_s(x) = \int_0^x \left(\frac{\Delta Q_s}{\Delta x \cdot B \cdot u_m} - \frac{y_s}{u_s} \cdot \frac{du_s}{\Delta x} \right) \cdot dx$$

Het volume dat in een dwarsdoorsnede sedimenteert, ΔV_s is per tijdseenheid, Δt :

$$\Delta V_s = \frac{c_m}{c_s} \cdot (h_{m,s} \cdot \Delta x \cdot \cos \theta \cdot B) \quad \wedge \quad h_{m,s} = w \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta V_s = \frac{c_m}{c_s} \cdot (w \cdot \Delta t \cdot \Delta x \cdot \cos \theta \cdot B)$$

De hoeveelheid sedimentatie per tijdseenheid is:

$$\Delta Q_s = \frac{\Delta V_s}{\Delta t} = \frac{c_m}{c_s} \cdot (w \cdot \Delta x \cdot \cos \theta \cdot B)$$

De verandering van de dikte in de y -richting is:

$$\Delta y_s = \frac{\Delta Q_s}{B \cdot u_m} - \frac{y_s}{u_s} \cdot du_s = \frac{c_m}{c_s} \cdot \frac{w}{u_m} \cdot \Delta x \cdot \cos \theta - \frac{y_s}{u_s} \cdot du_s \quad (6.4)$$

Voor kleine Δy_s kan worden gesteld dat:

$$u_m = \frac{Q_m}{B \cdot (D - y_s)}$$

Voor de suspensiesnelheid, afhankelijk van de laagdikte en de wrijvingen geldt [BAGT 384: P35]:

$$u_s = \sqrt{\frac{g}{f_o + f_i} y_s \sin\theta \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g} = C \cdot \sqrt{y_s} \quad \wedge \quad du_s = C \cdot d\sqrt{y_s}$$

De twee bovenstaande vergelijkingen in vergelijking 6.4 invullen geeft:

$$y_s(x) = \int_0^x \left(\frac{c_m}{c_s} \cdot \frac{w}{Q_m} \cdot \cos\theta \cdot B \cdot (D - y_s) - \frac{\sqrt{y_s} \cdot d\sqrt{y_s}}{\Delta x} \right) dx \quad (6.5)$$

De lamel wordt over de lengte in de x-richting in m stukken die Δx lang zijn verdeeld.

$$dx = \Delta x \quad \wedge \quad \frac{a}{m} = \frac{x}{l}$$

Op positie a geldt voor de laagdikte van bezonkendeeltjes op de lamel:

$$y_s(a) = \sum_{a=0}^m \left(\frac{c_m(a)}{c_s} \cdot \frac{w}{Q_m} \cdot \cos\theta \cdot B \cdot (D - y_s(a-1)) \cdot \Delta x - \sqrt{y_s(a)} \cdot (\sqrt{y_s(a-1)} - \sqrt{y_s(a)}) \right) \quad (6.6)$$

Voor het concentratie verloop in de mengselstroom wordt gesteld dat:

$$c_m(a) = c_b + \frac{a}{m} \cdot (c_i - c_b) \quad (6.7)$$

Door het lineair zijn van de vergelijkingen 6.6 en 6.7 geldt dat de verhouding $y_{s,max}/D$ gelijk blijft als de overige eigenschappen van een lamellenconfiguratie gelijk blijven.

6.1.3 Mengselstroomsnelheden

Er wordt in het vervolg ten behoeve van de eenvoud gesteld dat de dikte van de suspensie op de lamellen lineair verloopt van $y_s = 0$ m bovenaan de lamel naar $y_s = y_{s,max}$ onderaan de lamel.

$$y_s(x) = \frac{x}{l} y_{s,max} \quad \wedge \quad y_m(x) = D - \frac{x}{l} y_{s,max}$$

$$A_s(x) = n y_s(x) \cdot B \quad \wedge \quad A_m(x) = n y_m(x) \cdot B$$

Stel dat op iedere plaats langs de lamel een even grote hoeveelheid deeltjes neerslaat:

$$Q_s(x) = \frac{x}{l} Q_o \quad \wedge \quad Q_m(x) = Q_i - \frac{l-x}{l} Q_o$$

Snelheid in de mengselstroom en snelheid in de suspensiestroom:

$$u_s(x) = \frac{Q_s(x)}{A_s(x)} = \frac{Q_o}{n \cdot B \cdot y_{s,max}} \quad \wedge \quad u_m(x) = \frac{Q_m(x)}{A_m(x)} = \frac{Q_i - \frac{l-x}{l} \cdot Q_o}{n \cdot B \cdot (D - \frac{x}{l} \cdot y_{s,max})} \quad (6.8)$$

Continuïteit van volumina

Het verloop van de stroomsnelheden van de mengselstroom en de suspensiestroom kan met de twee onderstaande vergelijkingen worden berekend.

Snelheid in de suspensie laag:

$$u_s = \sqrt{\frac{8}{f_o + f_i} \cdot y_s \cdot \sin\theta \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g} \quad \wedge \quad f_o = 0,5 \quad \wedge \quad f_i = \frac{1}{2} f_o \quad (6.9)$$

Snelheid in de mengselstroom:

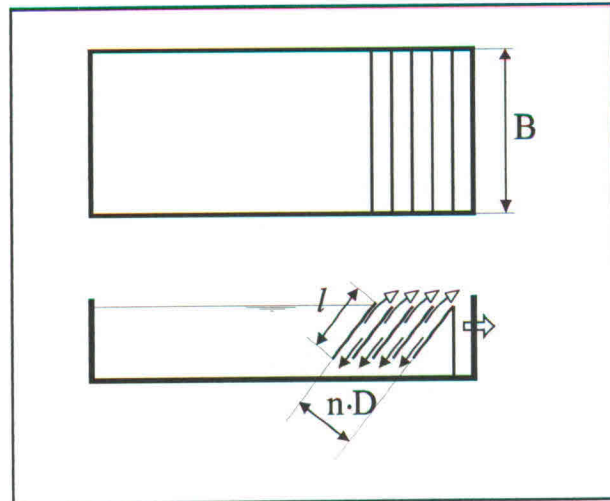
$$u_m(x) = \frac{Q_i - \frac{l-x}{l} \cdot Q_o}{n \cdot B \cdot (D - \frac{x}{l} \cdot y_{s,max})} \quad (6.10)$$

6.2 Berekening van een lamellensysteem

Allereerst wordt in deze paragraaf een lamellensysteem beschreven, dat vervolgens wordt nagerekend.

Beschrijving van lamellenbezinkstelsysteem

$B = 10 \text{ m}$
 $n \cdot D = 10 \text{ m}$
 $l = 1 \text{ m}$
 $D = 100 \text{ m}$
 $L = l/D = 10$
 $\theta = 60^\circ$
 $n = 100 \text{ doorgangen}$
 $m = 100 \text{ stappen}$
 $\Delta x = l/m = l/100 = 10 \text{ m}$
 $Q_m = Q_i/n = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$
 $d_{50} = 150 \mu\text{m} \Rightarrow w \approx 0,015 \text{ m/s}$



afb. 6.5: Hopper met maten

Voor de stromingen wordt aangenomen

$Q_i = 6,1 \text{ m}^3/\text{s}$	$\rho_i = 1200 \text{ kg/m}^3$	$c_i = 12 \%$
$Q_b = 5 \text{ m}^3/\text{s}$	$\rho_b = 1050 \text{ kg/m}^3$	$c_b = 3 \%$
$Q_o = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$	$\rho_o = 1900 \text{ kg/m}^3$	$c_o = 54 \%$

$dy = 10 \text{ mm}$ (dikte menglaag volgens afbeelding 3.3)

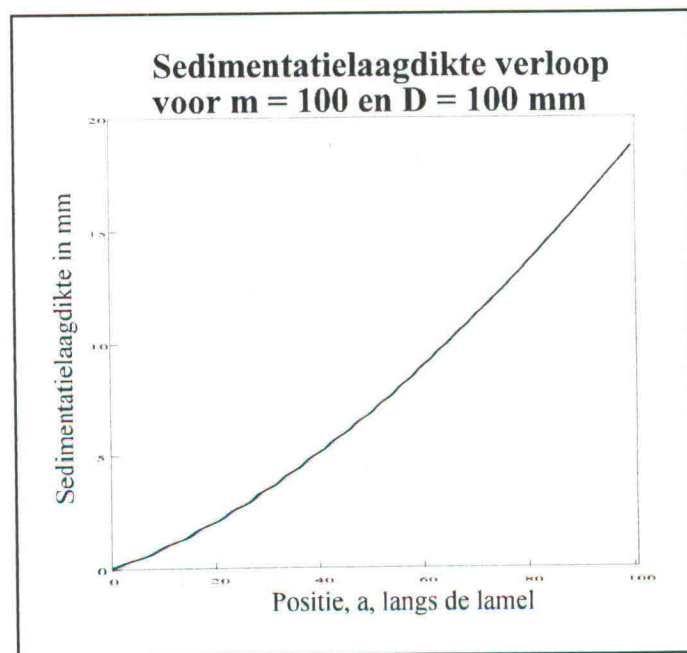
6.2.1 Bezonken laagdikte

Door het invullen van de bovenstaande gegevens in de vergelijkingen 6.5 en 6.6 wordt de nevenstaande grafiek verkregen. Deze grafiek laat het verloop van de bezonken laagdikte tegen de positie langs de lamel zien.

Ten behoeve van de eenvoud werd het verloop van de bezonken laagdikte lineair verondersteld in de verdere berekeningen.

De maximale bezonken laagdikte bevindt zich onder aan de lamel in de grafiek bij $a = 100$.

$y_{s,\text{max}} \approx 0,013 \text{ m}$



afb. 6.6: Bezonken laagdikte op de lamel

6.2.2 Mengselstroomsnelheden

Door het invullen van vergelijking 6.9 en 6.10 wordt het volgende verkregen:

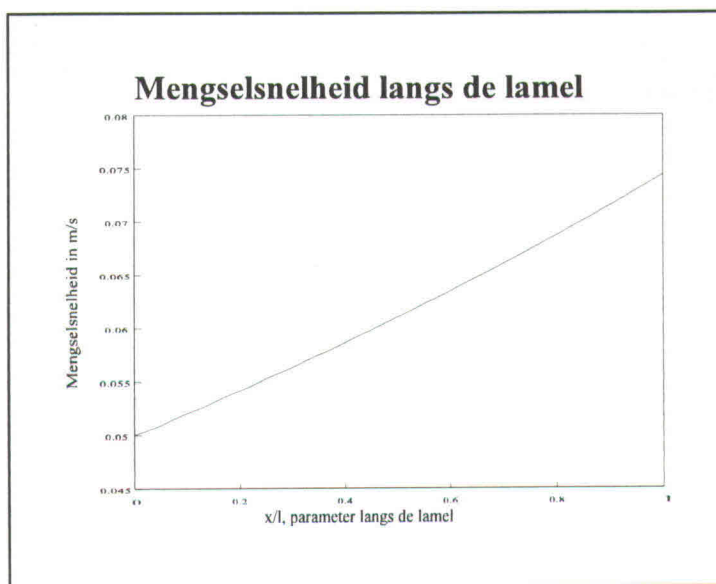
$$u_s(x) = 9,6 \cdot \sqrt{y_s} \text{ m/s}$$

$$u_m(x) = \frac{5 + 1,1 \cdot x}{100 - 18 \cdot x}$$

De grafiek rechts geeft het stroomsnelheidsverloop van de mengselstroming langs de lamellen weer. Het volgende wordt uit deze grafiek afgelezen:

$$u_{m, \text{onder}} \approx 0,075 \text{ m/s}$$

$$u_{m, \text{boven}} \approx 0,05 \text{ m/s}$$



afb. 6.7: Mingselsnelheid langs de lamel

6.2.3 Stabiliteit

Het criterium van Richardson geeft een indicatie over de stabiliteit van de grenslaag. De dikte van de grenslaag is eerder in deze paragraaf gesteld op $dy = 0,01 \text{ m}$.

$$Ri = \frac{-g \cdot \frac{d\rho}{dy}}{\rho_{\text{gem}} \cdot \left(\frac{du}{dy}\right)^2} = > \frac{1}{4} \Rightarrow dy > \frac{1}{-g} \cdot \frac{du^2 \cdot \rho_{\text{gem}}}{d\rho} \quad (6.11)$$

Onderaan de lamellen geldt:

$$du = u_{m, \text{onder}} + u_s = 0,135 \text{ m/s} \wedge \rho_{\text{gem}} = \frac{\rho_o + \rho_i}{2} = 1550 \text{ kg/m}^3 \wedge d\rho = \rho_o - \rho_i = 700 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow dy > 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Bovenaan de lamellen geldt:

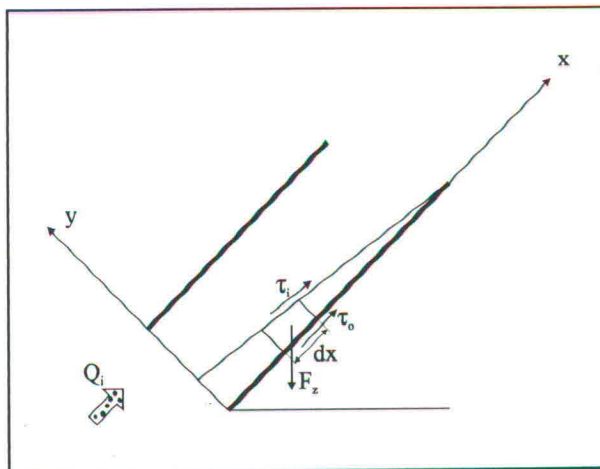
$$du = u_{m, \text{boven}} + u_s = 0,11 \text{ m/s} \wedge \rho_{\text{gem}} = \frac{\rho_o + \rho_b}{2} = 1475 \text{ kg/m}^3 \wedge d\rho = \rho_o - \rho_b = 850 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow dy > 2 \cdot 10^{-3}$$

Hierbij moet de kanttekening worden geplaatst dat door het bewegen en het trillen van het baggervaartuig het bezinkproces verstoord wordt, zodat de grenslaag groter zal moeten zijn wil het scheidingsproces stabiel zijn. Een menglaagdikte volgens de formules hierboven levert geen problemen op, aangezien deze in de orde van grote van ruim tienmaal de korreldiameter ligt. De menglaag moet minimaal ongeveer een tienvoud van de maximale korreldiameter zijn.

6.2.4 Afstroming langs lamellen

Op een deeltje dat op een plaat ligt werken twee schuifkrachten en de zwaartekracht. De schuifkrachten worden veroorzaakt de plaatwrijving en de stromingswrijving.



afb. 6.8: Krachten op suspensie

Wrijving

Plaatwrijving

Voor wrijving langs een plaat geldt [VRIES DE, B70]:

$$\tau_o = \frac{1}{8} \cdot \rho_s \cdot u_s^2 \cdot f_o \quad \wedge \quad F_o = \tau_o \cdot B \cdot dx \quad (6.12)$$

Stel: $f_o = 0,5$; $\rho_s = 1900 \text{ kg/m}^3$; $u_s = 0,06 \text{ m/s} \Rightarrow \tau_o = 0,43 \text{ N/m}^2$

Stromingswrijving

De schuifspanning die een suspensie als gevolg van een mengselstroom met een lagere concentratie boven zich ondervindt kan als volgt worden uitgedrukt:

$$\tau_i = \frac{1}{8} \cdot \rho_s \cdot du^2 \cdot f_i \quad \wedge \quad F_i = \tau_i \cdot B \cdot dx \quad (6.13)$$

Stel: $f_i = 1/3 f_o = 0,17$; $\rho_s = 1900 \text{ kg/m}^3$; $du = u_m + u_s \approx 0,135 \text{ m/s} \Rightarrow \tau_i = 1,1 \text{ N/m}^2$

Krachtenspel

Zwaartekracht

$$F_{z//} = \sin\theta \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot d_s \cdot B \cdot dx \quad (6.14)$$

Stel: $\Delta\rho = \rho_s - \rho = 900 \text{ kg/m}^3$; $\theta = 60^\circ \Rightarrow F_z = 16000 \cdot y_s(x) \cdot B \cdot dx$

Resulterende kracht

$$F_{res//} = F_{z//} - \tau_o - \tau_i \quad (6.15)$$

Deze kracht is neerwaarts gericht als:

$$(1,1 + 0,43) \cdot B \cdot dx < 16000 \cdot y_s(x) \cdot B \cdot dx \Rightarrow y_s(x) > 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Deze afmeting is in de orde van grote van de diameter van de korreldeeltjes. Volgens deze controle schuiven de pakketten bezonken deeltjes over het algemeen zoals gewenst neerwaartslang de lamellen.

6.2.5 Berekening

Volgens deeltjesbaan theorie

Invullen van vergelijking 6.3 geeft:

$$\frac{5}{w_0} = (1 + 10 \cdot \sin 60^\circ \cdot \cos 60^\circ) \cdot (\sin 60^\circ + 10 \cdot \cos 60^\circ) \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \Rightarrow w_0 \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Hierbij hoort een d_{50} , van ongeveer 50 μm .

SLS cursus methode om lamellenbezinker te berekenen [WARD]

Minimale plaatafstand:

$$D^3 > \frac{192 \tan(90^\circ - \theta) \cdot w_0 \cdot \eta \cdot l}{g \cdot \Delta \rho \cdot c_i} = 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot w_0 \Rightarrow D > 6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6.16)$$

Reynolds getal voor sedimentatie:

$$Re_{\text{sed.}} = \frac{h \cdot w_0 \cdot \rho}{\eta} \quad \wedge \quad h = \sin \theta \cdot l \Rightarrow Re_{\text{sed.}} = 4,3 \cdot 10^5 \cdot w_0 \quad (6.17)$$

Grashof:

$$Gr = \frac{h^3 \cdot g \cdot \rho \cdot \Delta \rho \cdot c_i}{\eta^2} = 3,6 \cdot 10^{11} \quad (6.18)$$

Verhouding tussen de gravitatiekrachten en de traagheidskrachten:

$$\Lambda = \frac{Gr}{Re_{\text{sed.}}} = \frac{h^2 \cdot g \cdot \Delta \rho \cdot c_i}{\eta \cdot w_0} = \frac{7,3 \cdot 10^5}{w_0} \quad (6.19)$$

De vergelijkingen 6.14 en 6.16 kunnen de separatie goed voorspellen als geldt dat:

$$10^4 < \Lambda < 10^7 \quad \wedge \quad 0 < Re_{\text{sed.}} < 10$$

Het invullen van de voorwaarde voor het Reynoldsgetal voor sedimentatie, $Re_{\text{sed.}}$, in vergelijking 6.17 betekent dat voor de valsnelheid moet gelden dat: $0 \text{ m/s} < w_0 < 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

Het invullen van de voorwaarde voor de verhouding tussen de gravitatiekrachten en de traagheidskrachten, Λ , in vergelijking 6.19 betekent dat voor de valsnelheid moet gelden dat: $73 \text{ m/s} < w_0 < 0,073 \text{ m/s}$. Voor geen enkele valsnelheid van de deeltjes blijken beide vergelijkingen geldig te zijn.

6.3 Gewenst bezinkingseffect

Methode uit de voorgaande paragraaf weer toepassen, stellen dat d_{50} , 150 μm , ofwel $w_0 \approx 0,015$ m/s moet zijn. Hieruit volgt met behulp van de ideale deeltjes baan theorie hoeveel lamellen nodig zijn.

Alleen het aantal lamellen wordt in deze paragraaf als veranderlijke gesteld, verder blijft alles gelijk aan het gestelde in de vorige paragraaf.

De volgende eigenschappen veranderen niet:

- Continuïteit van volumina
- Stabiliteit op het grensvlak
- Krachtenevenwicht

Deeltjesbaan theorie

Vergelijking 6.3 herschrijven:

$$\frac{Q}{w_0} = (1 + L \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta) \cdot (\sin\theta + L \cdot \cos\theta) \cdot n \cdot B \cdot D \quad \wedge \quad D \cdot n = 10 \text{ m} \quad \wedge \quad L = \frac{n \cdot l}{10}$$

invullen van $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$, $B = 10 \text{ m}$, $D = 0,10 \text{ m}$, $l = 1 \text{ m}$ en $\theta = 60^\circ$ geeft:

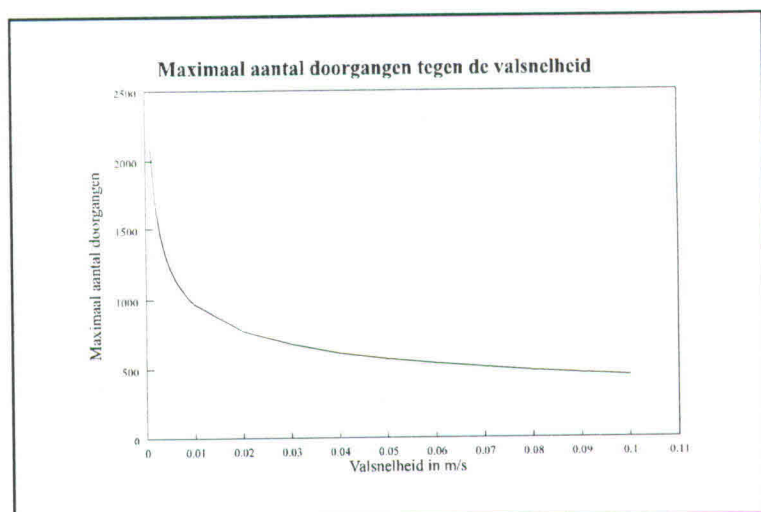
$$w_0 = \frac{0,05}{(1 + 0,0433 n) \cdot (0,866 + 0,05 n)}$$

SLS cursus methode

Minimale plaatafstand, uit vergelijking 6.16:

$$D^3 = \left(\frac{L}{n}\right)^3 > \sqrt[3]{1,1 \cdot 10^{-4} \cdot w_0} \Rightarrow n < \frac{208}{\sqrt[3]{w_0}}$$

Uit de grafiek rechts blijkt dat dit kritieke aantal in hoppersystemen niet zal worden bereikt.



afb. 6.9: Aantal doorgangen tegen valsnelheid

6.4 Rendementsverbetering

In paragraaf 6.2 werd gesteld dat een mengsel met een in de lamel gaande concentratie van $c_i = 12\%$ en een uit de lamel gaande concentratie van 3% mogelijk is. Ervan uitgaande, dat de concentratie van het mengsel dat de hopper instroomde ongeveer 27% ($\rho = 1450 \text{ kg/m}^3$) bedroeg.

Dit betekent dat het hopperrendement zonder lamellen het volgende zou zijn:

$$R = 1 - \frac{\text{deeltjes ing.}}{\text{deeltjes uitg.}} = 1 - \frac{12}{27} = 56\%$$

Met lamellen als alle aannames kloppen en de situatie redelijk ideaal is:

$$R = 1 - \frac{3}{27} = 89\%$$

Aldus is een verhoging van het hopperrendement met een factor 1,6 in het geval dat de bovenstaande stromingsconcentraties optreden met behulp van een lamellenbezinkstelsel te bereiken.

6.5 Conclusies

Het lamellenbezinkstelsysteem is in dit hoofdstuk veelbelovend gebleken. Voor in de werkelijkheid mogelijke hoppersituaties met een lamelafstand van ongeveer 100 mm ontstaat volgens een ontworpen rekenmodel, dat de lamel over langs in segmenten verdeelt, een verbetering van het hopperrendement. De maximale laagdikte van de bezonken deeltjes bedraagt ongeveer 20 mm. Het concentratieverloop werd vereenvoudigd in de formules verwerkt.

De resulterende kracht, opgebouwd uit schuifspanningen en zwaartekracht, op de bezonkendeeltjes laag is neerwaarts langs de lamellen gericht voor een laagdikte groter dan $1 \cdot 10^{-4}$ m. Deze minimale laagdikte ligt in de orde van grote van de diameter van de deeltjes die moeten bezinken.

Het is gewenst dat tussen de mengselstroom en de suspensiestroom een stabiele menglaag optreedt. De stabiliteit van deze menglaag zal in grote mate afhankelijk zijn van de korreleigenschappen, de sloopstrillingen en de stroomsnelheid.

Het lamellenbezinkstelsysteem is relatief eenvoudig om te zetten in een fysisch of een mathematisch model. Dit komt doordat het systeem tweedimensionaal te beschrijven is.

Als de concentraties volgens paragraaf 6.4 optreden is het hopperrendement bij het toepassen van lamellen een factor 1,6 groter dan zonder deze toepassing.

Conclusies

Instroomsystemen

De cycloon kan door de verlaging van de hopperbelasting en door de grotere gemiddelde deeltjes diameter leiden tot betere hoppersystemen. Combinaties van meerdere instroomsystemen kan tot goede resultaten leiden. Bijvoorbeeld het toepassen van een diepladende diffusor met eventueel een schotel eronder.

De schaaf is groot, zwaar en maakt het bassin minder toegankelijk. Bij de schaaf en de cycloon treedt gedurende iedere fase van het laadproces overvloeiverlies op.

Aangezien bij eerdere proeven is gebleken dat het weinig uitmaakt welk instroomsysteem wordt toegepast wordt gekozen voor **de sproeier**. De sproeier verdeelt het instromende mengsel goed over de breedte en remt de stroomsnelheid af.

Bassinsystemen

Het toepassen van geleidingsschotten heeft een gunstige werking op de turbulentie van de stroom en de kinetische energie van het mengsel neemt af. Door minder wervels in dwarsrichting zullen minder uitschuur en opwervel processen optreden. Met name het plaatsen van verticale langsschotten lijkt gunstig.

Interessant en veelbelovend is **het schotten verticaal kerend systeem** dat ook intermitterend kan worden toegepast. Bij het intermitterend toepassen moet het systeem waarschijnlijk worden omgekeerd op het moment dat de suspensie de uitstroom bijna heeft bereikt.

Als referentie systeem kunnen proeven met **het open bassin** worden gedaan.

Uitstroomsystemen

Het uitstroomsysteem kan op twee manieren deingingsgecompenseerd worden, ten eerste door plaatsing in het midden en ten tweede door het systeem drijvend uit te voeren. De drijvende uitvoering geeft veel constructieve problemen.

De hoogte van de overvloeien en de verdrunkenheid zouden kunnen worden geoptimaliseerd naar mengsel en naar tijd in het laadproces.

Interessant uitstroomsystemen zijn **de lamellen, doorlaat flappen** en **de ronde uitstroom**.

Cyclonenseparator

Door toepassen van de cyclonenseparator als instroomsysteem kan de laadtijd worden gehalveerd. Voor de toepassing aan boord van grote sleephoppers is een tiental cyclonen met bijna een meter diameter en een lengte van ongeveer drie meter nodig. Het grote aantal cyclonen geeft problemen wat betreft de aanvoervertakkingen naar de verschillende cyclonen, hierbij zal veel drukverlies optreden. Het hoog geconcentreerde mengsel dat het bassin betreedt verspreid zich moeilijk over het bassinoppervlak. De cyclonen moeten goed verspreid worden opgesteld en geleidingsschotten in het bassin moeten niet worden toegepast.

Mathematische beschrijvingen van de cycloonwerking in de literatuur gelden voornamelijk voor laag geconcentreerde mengsels. Verschaling ten behoeve van schaalmodellen is gecompliceerd, door de geringe kennis tot op heden over het stromingsmechanisme in cyclonen. Het testen van de cyclonenseparator zou kunnen door bijvoorbeeld het plaatsen van één cycloon aan een by-pass van de normale instroomsysteem aan boord van een sleephopper. Wel moet voor voldoende druk worden gezorgd.

Onder ideale omstandigheden zou een cyclonenseparatiesysteem het totale hopperrendement met ongeveer een factor 1,4 kunnen verbeteren.

Lamellenbezinker

De lamellenbezinker geeft het beste resultaat bij plaatsing als uitstroomsysteem, door de lage concentratie en de kleine gemiddelde deeltjesdiameter aldaar.

In dit rapport werd aan de hand van diverse beschouwingen geverifieerd of lamellen separatie systeem volgens verwachtingen werkt. Onder andere werd gekeken naar krachten evenwicht, volume continuïteit en naar stabiliteit van de stroming.

Er zijn vergelijkingen uit de literatuur gebruikt die voornamelijk betrekking hebben op mengsels met lage concentraties, waardoor de toepasbaarheid voor hoppersystemen twijfelachtig is.

Het voordeel van de lamellenbezinker is dat het proces tweedimensionaal kan worden beschreven. Er is een mathematisch model opgesteld dat de werking moet voorspellen.

Een verhoging van het totale hopperrendement met ongeveer een factor 1,6 zou onder de juiste omstandigheden mogelijk zijn.

Te beproeven hopperconfiguraties

Uit tabel 4.4 en uit de veelbelovendheid van de hoppersubsystemen blijken de volgende hopperconfiguraties voor beproeving in aanmerking te komen.

Het instroomsysteem is bij alle configuraties **de sproeier instroom**.

1. **Open bassin**
Ronde uitstroom
2. **Schotten verticaal kerend bassin**
Ronde uitstroom
3. **Schotten verticaal kerend bassin; intermitterend beladen**
Ronde uitstroom
4. **Open bassin**
Lamellen met flappen
5. **Open bassin**
Doorlaat flappen

Iedere configuratie zal op vier verschillende wijzen worden beproefd. Namelijk bij de verschaalde debieten 8 l/s en 16 l/s en bij de verschaalde dichtheden 1200 kg/m³ en 1400 kg/m³.

Dit geeft in totaal twintig verschillende proeven.

Referenties

- BRADLEY D., *The hydrocyclone*, Pergamon Press, London, 1965.
- CAMP T.R., *Sedimentation and the design of settling tanks*, Trans American Society of Civil Engineering, 1946.
- CRINER H. E., *The Vortex Thickener*, Int. Conf. on Coal Preparation, Paris, 1950.
- DRIESSEN M. G., *Review of Industrial Mining*, Special Issue No. 4:449-61 St. Etienne, 1951.
- FAHLSTROM P.H., *Proc. Int. Min. Processing Congress (p632-643)*, Inst. Mining and Metallurgy, 1960.
- HILLIGARDT R., *Zum Einsatz von Hydrozyklonen für die mechanische Aufbereitung organikhaltiger Baggerschlämme*, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1986.
- HUISMAN L., *Sedimentation and flotation mechanical filtration*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1973.
- KONING J. DE, *Constant Tonnage Loading Systems of Trailing Suction Hopper Dredgers*, Internationale Cursus: Modern Dredging, 1977.
- KRANENBURG C., *Dichtheidsstromen en interne golven, Handleiding college b81*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1981.
- MASTBERGEN D.R., *Zandwatermengselstromingen, wiskundig model terrasvormig stort*, (deel 1, hoofdrapport WL BAGT 432).
- MEINEMA K., *Lamellenbezinkers tussen beluchting en nabezinking*, Technische Universiteit, Faculteit der Civiele Techniek, 1992.
- MIEDEMA S. A., *Het stromen van baggerspecie in en uit hoppers en het bezinkproces in hoppers*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1981.
- MUSCH P. A., *Scriptie over cyclonen*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde, 1969.
- RIETEMA K., *Performance and design of hydrocyclones*, Parts I to IV, Chemical Engineering Science, 1961.
- SVAROVSKY L., *Hydrocyclones*, University of Bradford, 1984.
- VELDEN VAN DER E.T.J.M., *Coastal Engineering*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1990.
- VRIES M. DE, *Inleiding Vloeistofmechanica, b70*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1984.
- WARD A.S., *Lamella, inclined plate or tube separators*, Solid Liquid Separation Technologie, Technological Institute KVIV, 1992

Symbolen

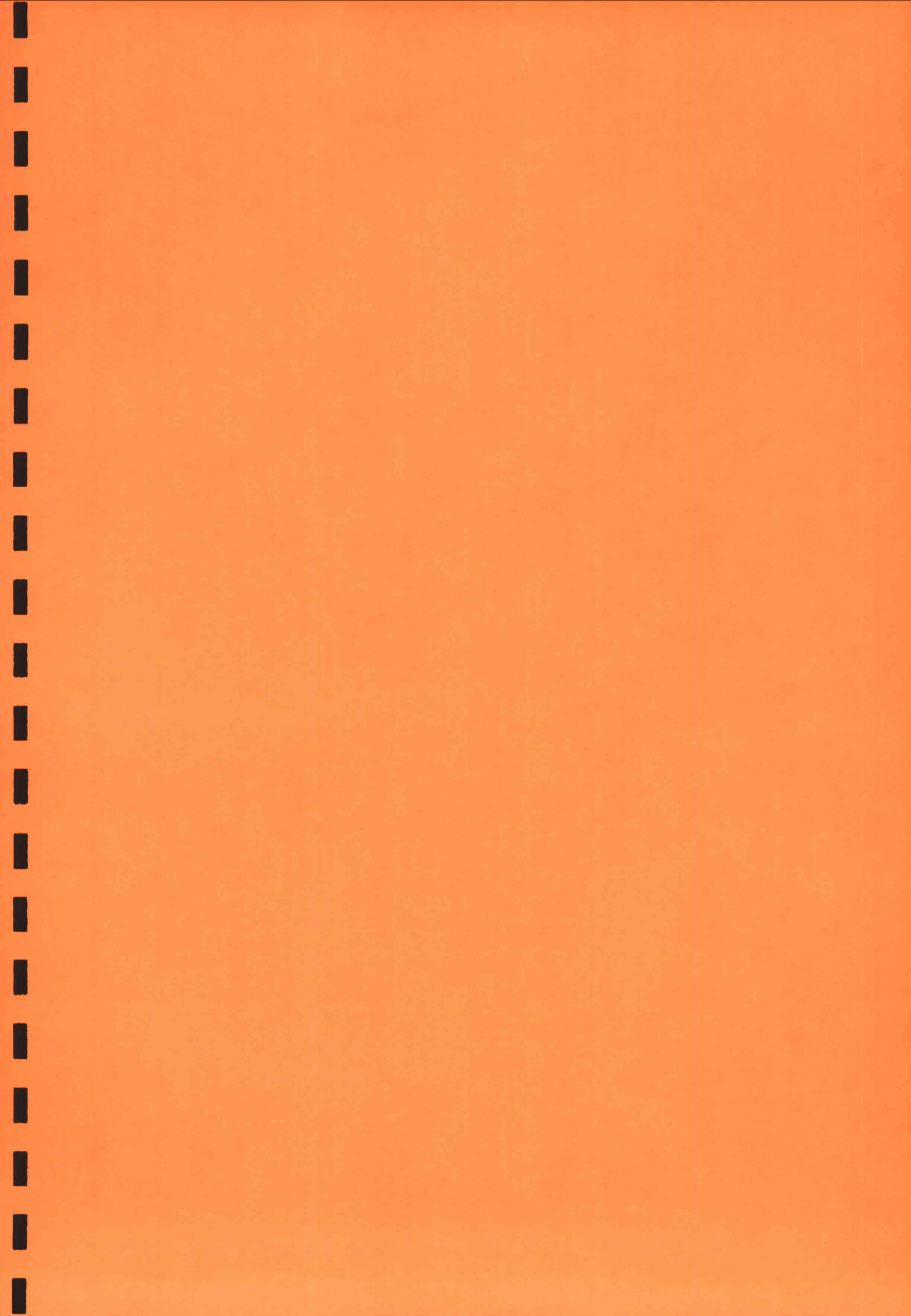
$\Delta\rho$	kg/m^3	dichtheid verschil vaste en vloeibare stof	
η	$\text{kg/m}\cdot\text{s}$	dynamische viscositeit	$1,5\cdot 10^{-3}$
θ		hoek	
λ	m/m	geometrische lamel variabele, l/d	
Λ		verhouding gravitatiekrachten en traagheidskrachten	
ν	m^2/s	kinematische viscositeit	$1,5\cdot 10^{-6}$
ρ_v	kg/m^3	dichtheid vaste stof	2650
ρ_w	kg/m^3	dichtheid water	1000
A	m^2	oppervlak	
B	m	breedte hopper	
c	%	concentratie volume vaste stof in mengsel	
C		constante	
Cy_{50}		dimensieloze parameter	
d	m	diameter deeltje (hydraulisch)	
D	m	diameter (hoofd)	
d_{50}	μm	diameter van korrel waarvoor geldt dat 50% massa kleiner is	
d_s	μm	scheidingsdiameter, 50% vaste deeltjes gaat aan weerszijden eruit (cycloon)	
Eu		Euler kental	
F	N	kracht	
f_i		Darcy-Weisbach coëfficiënt stroming	
f_o		Darcy-Weisbach coëfficiënt wand	
Fr	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$	Froude kental	
g	m/s^2	versnelling gravitatie	9.81
Gr		Grashof kental	
h	m	Diepte water	
K		constante	
l	m	lengte vortex-finder	
L	m	lengte totaal	
m	kg	massa deeltje	
n		aantal	
p	N/m^2	druk	
Q	m^3/s	debiet	
r	m	straal	
R	%	rendement hoppersysteem	
R_f	%	debiet onderstroom gedeeld door debiet instroom	
Re	m	straal (hydraulisch); Reynolds sedimentatie getal	
t	s	tijd; wanddikte	
u	m/s	snellheid vloeistof	
u_s	m/s	snellheid uitschuring	
v	m/s	snellheid deeltje	
V	m^3	volume; stroomsnellheid	
w	m/s	daalsnellheid	
w^*	m/s	hopperbelasting	
w_0	m/s	bezinksnellheid van deeltje zonder gehinderde sedimentatie en zonder stroming	
x	m	positie x-richting	
y	m	positie in y-richting	
z	m	positie in z-richting	

Indices

θ	tangentiaal
a	axiaal
b	bovenstroom
c	centrifugaal
d	deeltje
i	instroom
l	lamellen
m	mengsel
o	onderstroom
r	radiaal
s	sleep; suspensie
u	uitstroom
v	vast
w	vertikaal
x	x-richting
y	y-richting
z	z-richting

Tekens

↓	laag; klein
↑	hoog; groot
+	goed; ja; positief
0	middelmatig
-	slecht; nee; negatief
?	onbekend



Bijlage

KREBS CYCLONE PROBLEM ANALYSIS

SHEET 1

1205 Chrysler Drive, Menlo Park, CA 94025-0920

DATE 17-Feb-93

TEL: (415) 325-0751 FAX (415) 326-7048

BY DOM

CLIENT HAM-HOLLAND

PROBLEM TO CLASSIFY 13,009 MTPH OF 0 TO 4 MM SAND FROM 18,000 M3/HR OF PULP AT 150 MICRONS.

NUMBER, MODEL KREBS CYCLONE 12-OPERATING D50-S-270 KREBS CYCLONES

INLET	VORTEX FINDER	APEX	PRESSURE
ORIFICES: <u>220.0 sq.in.</u>	<u>14.0 in.</u>	<u>9.0 in.</u>	<u>0.99 Bars</u>

SPECIFIC GRAVITY: SOLIDS	2.7	LIQUID	1.0	LIQ VISC, cP	1.5
--------------------------	-----	--------	-----	--------------	-----

	<u>FEED</u>	<u>OVERFLOW</u>	<u>UNDERFLOW</u>
--	-------------	-----------------	------------------

MTPH SOLIDS	<u>13009</u>	<u>2294</u>	<u>10715</u>
-------------	--------------	-------------	--------------

MTPH LIQUID	<u>13166</u>	<u>9594</u>	<u>3672</u>
-------------	--------------	-------------	-------------

MTPH PULP	<u>26175</u>	<u>11889</u> <i>→ 45%</i>	<u>14286</u> <i>→ 55%</i>
-----------	--------------	---------------------------	---------------------------

% SOLIDS WT	<u>49.7</u>	<u>19.3</u>	<u>75.0</u>
-------------	-------------	-------------	-------------

S.G. PULP	<u>1.455</u>	<u>1.138</u>	<u>1.895</u>
-----------	--------------	--------------	--------------

% SOLIDS VOL	<u>26.8</u> <i>→ 40</i>	<u>8.1</u>	<u>52.6</u> <i>→ 10%</i>
--------------	-------------------------	------------	--------------------------

U.S. GPM PULP	<u>79211</u>	<u>46001</u>	<u>33210</u>
---------------	--------------	--------------	--------------

M3 / HR PULP	<u>17995</u>	<u>10451</u>	<u>7545</u>
--------------	--------------	--------------	-------------

CYCLONE MK1 4.0 6U

MICRON	FEED			OVERFLOW			UNDERFLOW			RECOVERY
	CUM % +	IND % +	MTPH	CUM % +	IND % +	MTPH	CUM % +	IND % +	MTPH	
850	13.0	13.0	1691.2	0.0	0.0	0.0	15.8	15.8	1691.2	100.0
800	21.0	8.0	1040.7	0.0	0.0	0.0	25.5	8.7	1040.7	100.0
425	30.0	9.0	1170.8	0.0	0.0	0.0	36.4	10.9	1170.8	100.0
300	41.0	11.0	1431.0	0.0	0.0	0.0	49.8	13.4	1431.0	100.0
212	51.0	10.0	1300.9	0.0	0.0	0.0	61.9	12.1	1300.9	100.0
150	60.0	9.0	1170.8	0.1	0.1	2.0	72.8	10.9	1168.8	99.8
106	68.0	8.0	1040.7	1.5	1.4	32.2	82.2	9.4	1008.5	98.9
75	75.0	7.0	910.8	9.1	7.6	174.0	89.1	6.9	736.7	80.9
63	78.0	3.0	390.3	14.6	5.5	126.4	91.6	2.5	263.8	67.6
-63	100.0	22.0	2862.0	100.0	85.4	1959.6	100.0	8.4	902.4	31.5
TOTAL		100.0	13009.0		100.0	2294.2		100.0	10714.8	82.4

syscom bv

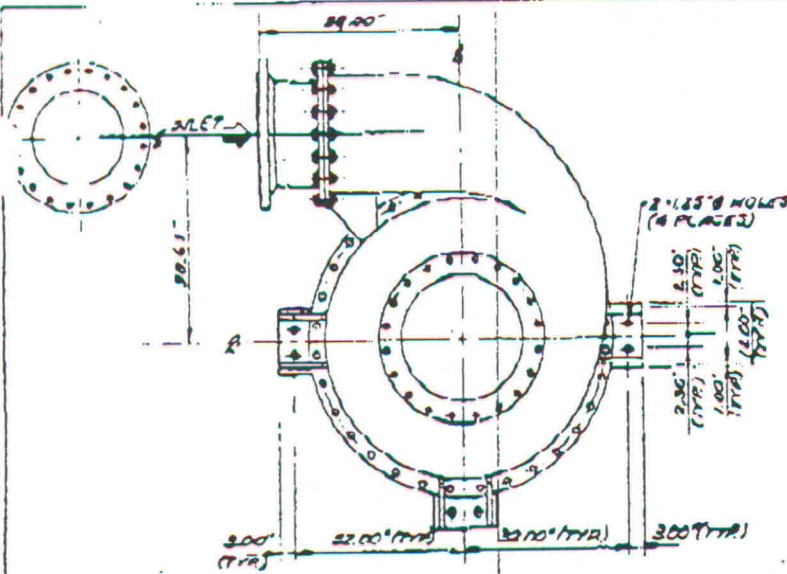
Industrial Equipment
 Postbus 96957
 2509 JJ Den Haag - Holland
 Tel. 02522-20100 Fax 02522-20800

KRFBS CYCLONE

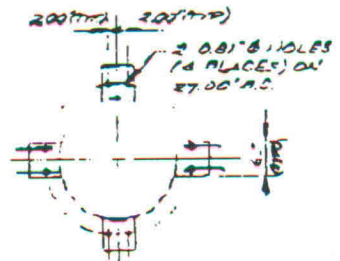
MODEL D50.S270

PARTS LIST INDEX

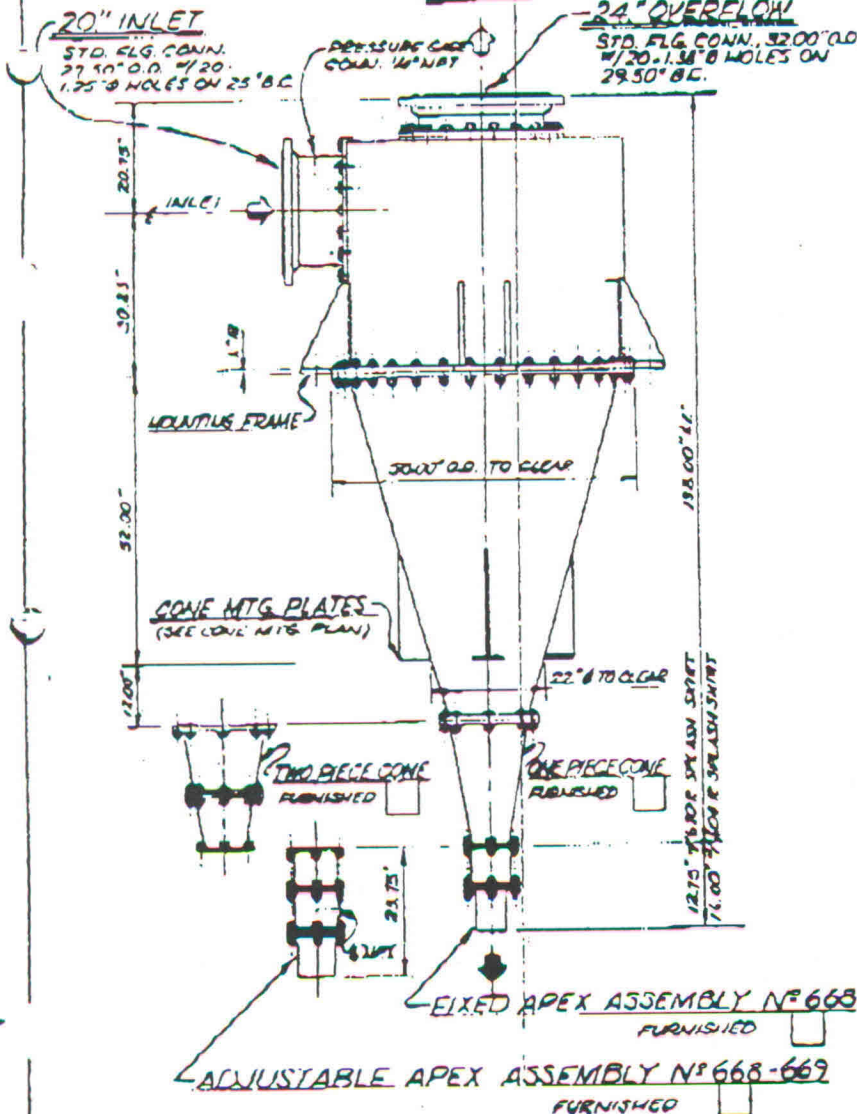
PARTS LIST A	
APEX ASSEMBLY	2 PARTS, TWO PIECE OR
668 FIXED	PL 1741 PL 1745
668-669 ADJUSTABLE	PL 1742 PL 1746



PLAN



CONE MOUNTING PLAN



GAGE & FITTINGS

	FURNISHED	NOT FURNISHED
INLET HEAD LINER PART N°	SEE	
VORTEX FINDER PART N°	Ø 189	
APEX CRIFICE PART N°	SEE	
BARE WEIGHT		SHIPPING WEIGHT

syscom bv

Industrial Equipment
Postbus 98957
2509 JJ Den Haag • Holland
Tel. 02522-20100 Fax 02522-20800

KREBS ENGINEERS			
128 ORVILLE DRIVE	MIRALTA PARK, CALIF., 94570		
Drawn	9-13-92	Check by	1899
GENERAL ARRANGEMENT			
KREBS CYCLONE - MODEL D50.S270			
WITH OPTIONAL APEX ASSEMBLIES			
DOC NO			3-270

THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF KREBS ENGINEERS, WORLD WIDE, CALIFORNIA, AND IS LOANED TO YOU BY OUR COMPANY. IT IS NOT TO BE REPRODUCED OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, ELECTRONIC OR MECHANICAL, INCLUDING PHOTOCOPYING, RECORDING, OR BY ANY INFORMATION STORAGE AND RETRIEVAL SYSTEM.

REVISION



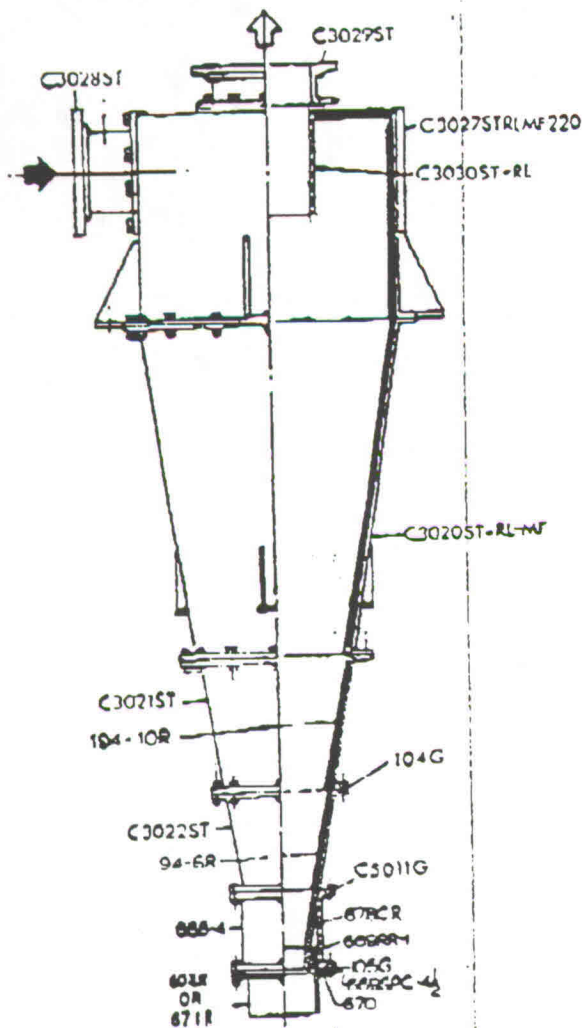
KREBS CYCLONE PARTS LIST

PL 1943

APR 25 1979

REVISED TO DATE

Model D50-S-270 With No. 668 Fixed Apex Assembly



PART NO.	DESCRIPTION
C30275TRLMF220	Inlet Head
C30285T-20"	Inlet Flanged Adapter, Spool Piece, 20" Std. Flg. Conn.
C30295T-24"	Overflow Flanged Adapter, Spool Piece, 24" Std. Flg. Conn.
C30305T-RL(Size)	Vortex Finder, Rubber Covered Steel, 18", 20", 22" or 24" Sizes.
C30205T-RL-MF	Upper Cone Section, Rubber Lined.
C30215T	Upper Cone Section, Cone Liner.
194-10R	Cone Liner.
C30225T	Lower Cone Section, Cone Liner.
94-6R	Cone Liner.
670(SIZE)	REFRAX APEX INSERT, 2 1/2", 3", 3 1/2", 3 3/4", 4", 4 1/2", 4 3/4", 5", 5 1/2", 5 3/4", & 6" SIZES.
668R-1	SPACER RING (RUBBER) USE WITH 2 1/2", 3", 3 1/2" & 3 3/4" APEX INSERT SIZES.
668R-2	SPACER RING (RUBBER) USE WITH 3 1/2", 3 3/4", 4" & 4 1/2" APEX INSERT SIZES.
668R-3	SPACER RING (RUBBER) USE WITH 4 1/2", 4 3/4", 5", 5 1/2" & 5 3/4" APEX INSERT SIZES.
105G	LOWER GASKET, USE WITH 2 1/2" THRU 3 1/2" APEX INSERT.
105GL	LOWER GASKET, USE WITH 3 3/4" THRU 4 1/2" APEX INSERT.
64CGU	LOWER GASKET, USE WITH 4 3/4" THRU 6" APEX INSERT.
6695PC-4 1/2	RETAINER PLATE, USE WITH 2 1/2", 3", 3 1/2", 3 3/4", 4" & 4 1/2" APEX INSERT SIZES.
6695PC-5	RETAINER PLATE, USE WITH 4 1/2", 4 3/4", 5", 5 1/2" & 5 3/4" APEX INSERT SIZES.
6695PC-6	RETAINER PLATE, USE WITH 5 1/2" & 6" APEX INSERT SIZES.
670	SPLASH SKIRT (RUBBER) (USED ONLY ON 2 1/2" THRU 6" APEX INSERT SIZES.)
604R	SPLASH SKIRT (RUBBER) (USE ONLY WITH 2 1/2" THRU 3 1/2" APEX INSERT SIZES.)
671R	SPLASH SKIRT (RUBBER) (USE ONLY WITH PART NO 670 ON 3 3/4" THRU 6" APEX INSERT SIZES.)
668-4	APEX HOUSING.

STANDARD LINER MATERIAL

Pure Gur, Rubber or Neoprene.
Other Materials Available Upon Request.

STANDARD ACCESSORIES *

Pressure Gage for Inlet Line. (0-30 psi)
Diaphragm Body for Gage.
18" Victaulic Coupling and Weld Adapter Nipple for Inlet.
20" Victaulic 90° Elbow, 2 Couplings, and Weld Adapter Nipple for Overflow.

SPECIAL PARTS AVAILABLE

194-10N	Lower Cone Section Liner, Nihard.
94-6CR	Cone Section Liner - Retrax.
94-6N	Cone Section Liner - Nihard.
505RL-Size	Vortex Finder, Rubber Lined 18" or 20" Size.
C5011G	Gasket - If Req.
104G	Gasket - If Req.

syscom bv

Industrial Equipment
Postbus 96957
2509 JJ Den Haag - Holland
Tel.02522 20100 Fax02522-20800

PLEASE SPECIFY PART NUMBER AND CYCLONE SERIAL NUMBER WHEN ORDERING PARTS

CCMP

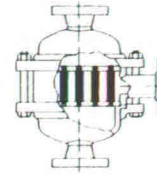
KREBS

TOTAL P.04

A guide to DorrClone specification.

The charts shown below will allow you to make some preliminary judgments. As to whether or not a DorrClone cyclone will add to the efficiency of your process. As to what type and size of DorrClone will do the job most effectively

To use the charts it is required that you know the particle size of your separation in microns. For final and accurate specification refer to the Problem Analysis Worksheet on page 19



INTERNALLY MANIFOLDED CYCLONES

Type TM, TMC, C, RC and CA



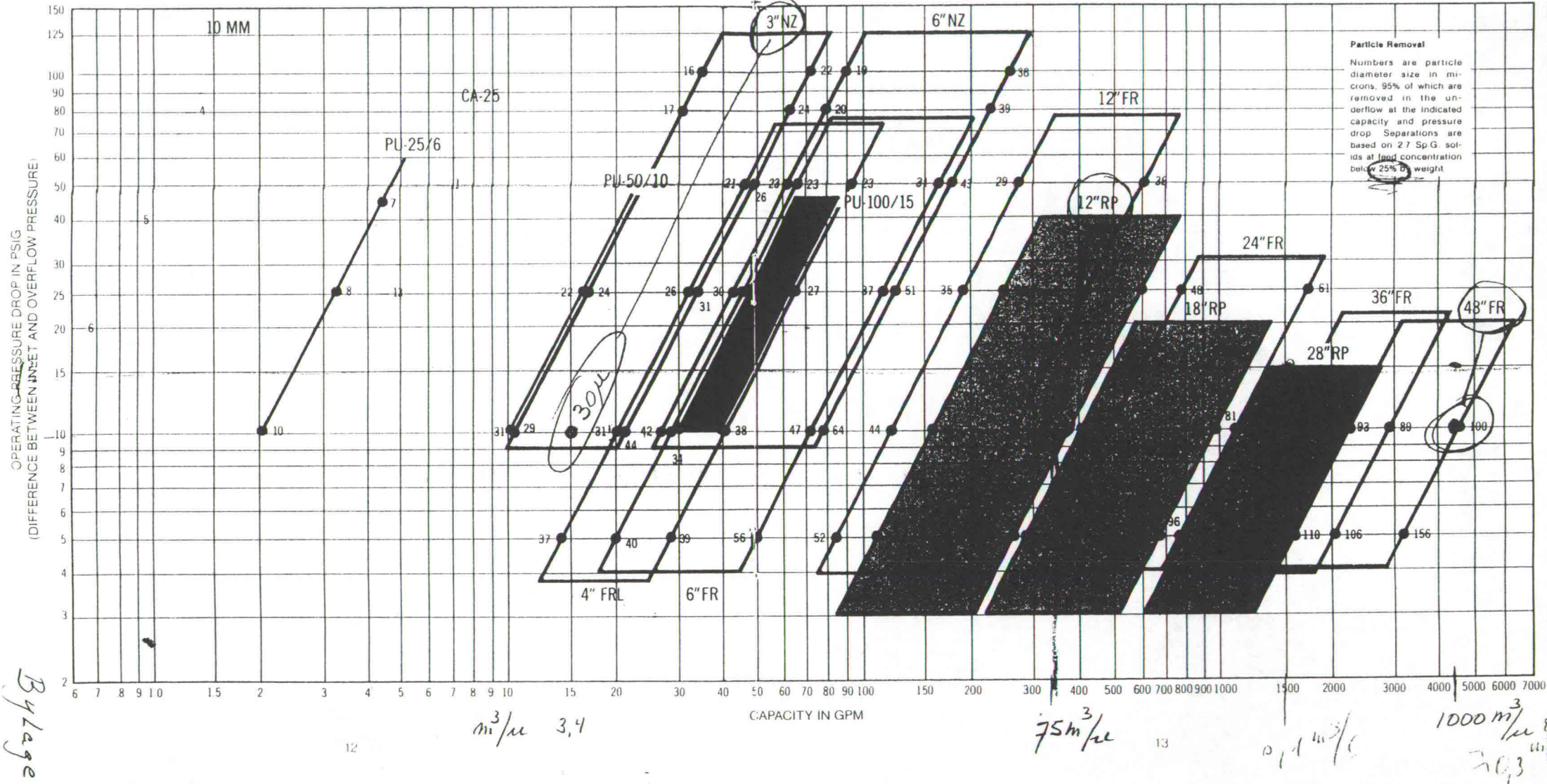
UNLINED DORRCLONE CYCLONES

Type NZ, PU



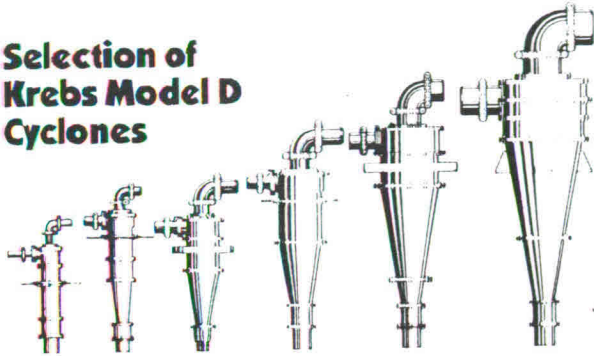
LINED DORRCLONE CYCLONES

Type FR, RP



By page 3.

Selection of Krebs Model D Cyclones



The Cyclone Performance Chart below offers a means for selecting Krebs Model D Cyclones for a wide range of applications. The following precautions regarding the cyclone feed characteristics must be observed in using the chart.

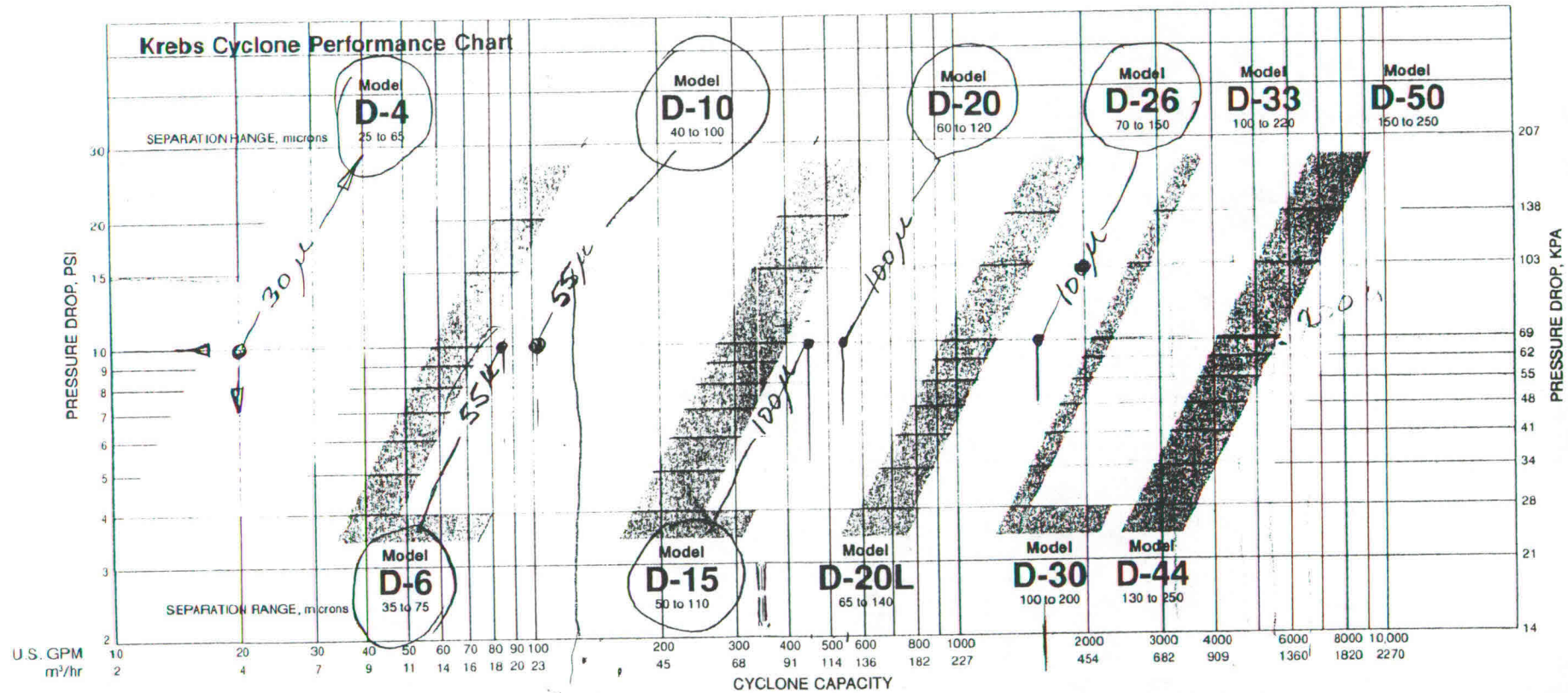
1. The feed solids must have an average specific gravity in the range 2.5 to 3.2. The liquid must be water or an aqueous solution.
2. The feed concentration must be less than 30 percent solids by weight.
3. The feed must not be unusually viscous as might be true for feed with a high content of clay or primary slimes.

Values shown along the horizontal axis of the chart indicate cyclone feed flow rates. Cyclone pressure drop, shown on the vertical axis, is the difference between pressure at the cyclone feed inlet and at the cyclone overflow connection. Because the cyclone overflow normally discharges at atmospheric pressure, a pressure gauge mounted at the cyclone feed inlet usually indicates cyclone pressure drop.

Cyclone selections are made by first determining the cyclones that will make the separation required. Then the best selection will most often be the model that per-

mits the use of the smallest number of cyclones when the pressure drop is in the range of 5 to 15 psi (34 to 103 Kpa). "Separation" for the purposes of this procedure is defined as the diameter in microns of the coarsest 1 to 5 percent of solids in the cyclone overflow. An example cyclone selection for a closed circuit grinding application is given on Page 10.

*Krebs Engineers will recommend cyclones for feed with solids of a higher or lower average specific gravity, such as iron ore or coal, but separations shown by the chart would not be accurate for these applications. For cyclone feeds with more than 30 percent solids concentration, see Page 10.



Bylage 2.



