

31085.89-01

i g e

a r i o o l w a t e r -

z u i v e r i n g s i n r i c h t i n g e n

rwzi
2000

R 84-01

SLIBONTWATERING

een voorstudie

111131085,83-01



toeko

vaterzuiveringsinrichtingen RWZI 2000*

secretariaat : postbus 80200, 2508 GE den haag 070 - 512710
projectleiding: postbus 17, 8200 AA IJlstad 03200 - 70411

111131085,83-01

SLIBONTWATERING



TU - Eindhoven:

ir. F.W.H.M. van Dijk
dr. ir. W.J. Coumans
prof. dr. ir. P.J.A.M. Kerkhof

TU - Delft:

ir. R.P. Boulan
ir. A.N. van Breemen
prof. ir. J.H. Kop

Het onderzoek 'Toekomstige generatie rioolwaterzuiveringsinrichtingen/rwzi 2000' is een samenwerkingsverband van de STORA en Rijkswaterstaat (DBW/RIZA).

Inhoudsopgave

Voorwoord

1 Inleiding	1
1.1 Indikken	1
1.2 Voorbehandelen	2
1.2.1 Stabiliseren	3
1.2.2 Conditioneren	3
1.3 Ontwateren	5
1.4 Uiteindelijke bestemming	6
2 Samenstelling en eigenschappen van slib	7
2.1 De samenstelling van de slibvlok	7
2.2 De aard van de waterbinding in slib	9
2.3 De slibontwateringseigenschappen als functie van het zuiveringssysteem	11
3 Slibkarakterisering	13
3.1 Bestaande karakteriseringsmethoden	13
3.1.1 De specifieke filtratieweerstand	13
3.1.2 De compressibiliteitscoëfficiënt	14
3.1.3 De afzuigtijd bij vacuümfiltratie	14
3.1.4 De capillaire zuigtijd	14
3.1.5 De ontwaterbaarheid met de MFT-methode	15
3.1.6 De slibvolume-index	15
3.1.7 De centrifugeerbaarheid	15
3.1.8 Rheologische eigenschappen	16
3.2 Nieuwe (ideeën voor) karakteriseringsmethoden	16
3.2.1 Bepaling van de waterbinding	16
3.2.2 Bepaling van de deeltjesgrootteverdeling	18
3.2.3 Bepaling van de zêta-potentiaal en de geleidbaarheid	18
3.2.4 Bepaling van de verhouding organische/ anorganische stof	19
4 Bestaande ontwateringstechnieken	20
4.1 Natuurlijke ontwatering	20
4.2 Thermische ontwatering	20
4.3 Mechanische ontwatering	21
4.3.1 Sedimenterend centrifugeren	21
4.3.2 Persen	23

5	Nieuwe ontwateringsprincipes	31
5.1	Verbeterde mechanische ontwatering	31
5.1.1	Modificaties van bestaande apparatuur	31
5.1.2	HI-compact	31
5.1.3	Multilaagfiltratie	31
5.2	Magnetische scheiding	32
5.3	Osmotisch ontwateren	32
5.4	Vriesdooien	33
5.4.1	Mechanismen werkzaam bij vriesdooien	33
5.4.2	Uitvoeringsvormen van het vriesdooien	35
5.5	Elektrokinetisch ontwateren	37
5.5.1	Agglomeratie	37
5.5.2	Elektroforese	37
5.5.3	Elektroosmose	38
5.5.4	Elektrolyse	39
5.5.5	Procesvariabelen	40
5.6	Akoestisch ontwateren	41
5.6.1	Lage intensiteit akoestisch ontwateren	41
5.6.2	Hoge intensiteit akoestisch ontwateren	41
5.7	Elektro-akoestisch ontwateren	44
6	Aandachtspunten / Knelpunten	46
6.1	Slibontwatering als functie van het water- zuiveringssysteem	46
6.2	Slibkarakteriseringsmethoden	46
6.3	Het filtratieproces	47
6.4	Nieuwe ontwateringstechnieken	48
7	Literatuur	49

Voorwoord

Op de begroting van het onderzoekplan rwzi-2000* is vijf miljoen gulden uitgetrokken voor fundamenteel onderzoek naar vermindering van slibproductie en verbetering van slib/waterscheiding.

Als uitgangspunt voor het formuleren van onderzoek op laatstgenoemd gebied diende het voorliggende rapport. Het onderzoek dat daaraan ten grondslag ligt, werd uitgevoerd door de Vakgroep Fysische Technologie van de Faculteit Scheikundige Technologie van de Technische Universiteit Eindhoven en de Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing van de Faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Bij de uitvoering van hun werkzaamheden werden deze vakgroepen namens de Stuurgroep rwzi-2000 begeleid door een commissie bestaande uit ir. H.A. Meijer (voorzitter), ir. R.E.M. van Oers, ir. F.W.A.M. Rijnart, dr.ir. W.H. Rulkens, ing. G.Rijs, ir. P.C. Stamperius en ir. W. van Starckenburg. Op basis van deze voorstudie zijn projectvoorstellen voor vervolgstudies opgesteld.

Namens de Stuurgroep rwzi-2000

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff,
secretaris

* Het plan rwzi-2000 is een samenwerkingsverband van de stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater (STORA) en de rijkswaterstaat (Dienst Binnenwateren/RIZA) voor toekomstgericht onderzoek naar de behandeling van afvalwater en zuiveringsslib. De tekst van het plan is verkrijgbaar bij DBW/RIZA en STORA.

1 Inleiding

Bij de reiniging van afvalwater komen jaarlijks grote hoeveelheden zuiveringsslib vrij waarvan de samenstelling en eigenschappen sterk worden bepaald door een scala van omstandigheden bij het zuiveringsproces. Niet alleen in verband met de kosten voor transport, verwerking of storten, maar ook vanwege de afnemende mogelijkheden (ontwaterd) zuiveringsslib af te zetten in de landbouw of op stortplaatsen en de vraag naar hoge droge stofgehalten, ook bij andere verwerkingsmethoden, is het van belang te komen tot een zo groot mogelijke reductie van volume en massa van het slib.

Deze reductie kan in principe op twee manieren geschieden:

- 1) Beperking van de slibproductie door het optimaliseren van bestaande en/of ontwikkelen van nieuwe zuiveringssystemen.
- 2) Verbetering van de slibontwatering door het optimaliseren en ontwikkelen van slibontwateringstechnieken.

Op de tweede mogelijkheid zal de inhoud van deze voorstudie zich richten; de eerste mogelijkheid wordt bestudeerd in een ander RWZI-2000 project.

Om in de huidige stand van de techniek verbetering aan te kunnen brengen, wordt het noodzakelijk geacht meer inzicht te verkrijgen in de fundamentele principes van de slib/waterbinding en in fysisch/chemische principes die binding te beïnvloeden. Zonder verdieping van deze kennis wordt het niet waarschijnlijk geacht doorbraken op het gebied van de slibontwatering te bereiken. Met deze voorstudie wordt beoogd reeds uitgevoerd slibontwateringsonderzoek in kaart te brengen en aan te kunnen geven waar belangrijke onderzoeksvelden of interessante mogelijkheden om de problematiek aan te pakken, aanwezig zijn.

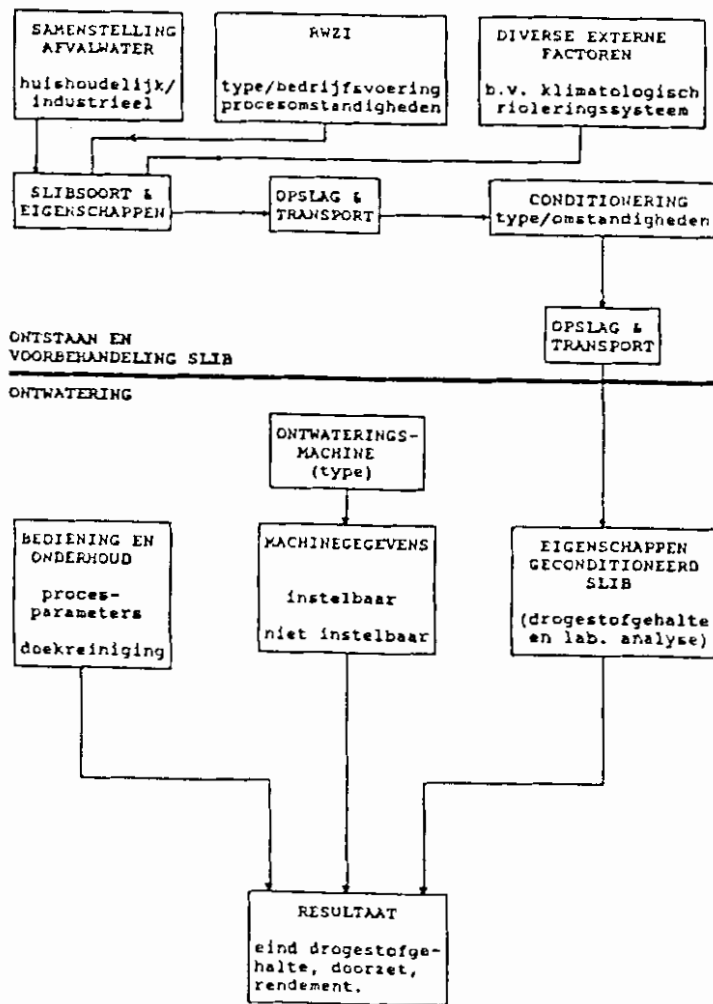
De aard en (ontwaterings)eigenschappen van slib kunnen niet los gezien worden van de ontstaansgeschiedenis van het slib. In figuur 1.1 worden schematisch de factoren weergegeven die van invloed zijn op de ontwateringseigenschappen van het slib.

De slibverwerking kan globaal in de volgende stadia worden onderverdeeld, die in de paragrafen 1.1 tot en met 1.4 zullen worden behandeld.

- 1) Indikken.
- 2) Voorbehandelen.
- 3) Ontwateren.
- 4) Uiteindelijke bestemming.

1.1 Indikken

Gewoonlijk is indikking het eerste proces dat wordt toegepast bij de slibverwerking. Primair slib heeft doorgaans een droge stofgehalte van rond 4%. Bij secundair slib ligt het droge stofgehalte nog lager, rond 2%. Volumereductie is op grond van economische en procestechnische gronden van groot belang.



Figuur 1.1: Ontstaan, voorbehandeling en ontwatering van slib

De meest economische wijze van indikken is over het algemeen sedimentatie-indikking, welke zowel batchgewijs als continu kan geschieden. Bij zeer lichte slibben kan flotatie-indikking een economisch gunstiger oplossing zijn.

1.2 Voorbehandelen

Ingedikt slib vertoont een aantal negatieve eigenschappen:

- 1) Het veroorzaakt stankproblemen.
- 2) Het kan pathogene organismen bevatten.
- 3) Het is vaak moeilijk ontwaterbaar.
- 4) Het kan gifstoffen bevatten.

Onder voorbehandeling van slib wordt hier een proces (of een serie processen) verstaan dat één of meerdere van de bovenstaande eigenschappen verbetert. In het kader van de slibvoorbehandeling worden veelvuldig twee termen genoemd: stabiliseren en conditio-neren.

1.2.1 Stabiliseren

Stabiliseren is vooral gericht op het verbeteren van de eerste twee van de genoemde negatieve eigenschappen en kan zowel aerob als anaerob plaatsvinden.

Bij aerobe gisting wordt de organische stof in aanwezigheid van zuurstof gemineraliseerd. Als gevolg van de oxydatieve mineralisatie komt veel energie vrij, waardoor de temperatuur van het slib tot 50-70 °C kan oplopen. Bij deze temperaturen treedt pasteurisatie op. De eindprodukten die ontstaan zijn energiearme stoffen als koolzuur, water en nitraat (Bruce; 1983). Over de invloed van de aerobe gisting op de ontwaterbaarheid bestaan in de literatuur tegenstrijdige berichten (Karr; 1976).

Composteren is een aerob thermofiel proces onder geconditioneerde omstandigheden. Er ontstaat een humusachtig materiaal, dat kan worden gebruikt als structuurverbeteraar in de landbouw. Om een produkt met een goede bemestingswaarde op te leveren, moet de C/N verhouding 30-40 bedragen. Om dit te bereiken moet zuiveringsslib worden gemengd met huishoudelijk afval, houtsnippers of papierpulp. Composteren kan geschieden met of zonder kunstmatige beluchting of in bioreactoren.

Aardwormstabilisatie is een aerob proces waarbij aardwormen organische stof assimileren en mineraliseren. De wormen leven in symbiose met de micro-organismen in het slib en zorgen voor een intensivering van de afbraak van organische stof. Het droge stofgehalte van het slib, waarbij de beste resultaten worden geboekt bedraagt 9-16%.

Anaerobe gisting wordt gekenmerkt door microbiële afbraak van organisch materiaal onder afwezigheid van zuurstof. Daarbij wordt een deel van het organisch materiaal omgezet in biogas. Dit gas kan worden gebruikt om de gisting bij een hogere temperatuur te laten plaatsvinden, waardoor deze sneller verloopt en de biogasproduktie toeneemt. Bij anaerobe gisting kan door chemische omzettingen fijn gesuspendeerd materiaal ontstaan dat de gisting negatief beïnvloedt (STORA; 1981).

Vrij nieuw is het tweetraps aerobe-anaerobe vergistingssysteem (Dual Digesting System), dat de gunstige eigenschappen van beide gistingprocessen tracht te combineren. De reactiewarmte en pasteurisatie tijdens de aerobe trap en de biogasproduktie tijdens de anaerobe trap. De verblijftijd in de eerste trap is zeer kort (1 dag), waardoor slechts gedeeltelijke mineralisatie plaatsvindt. De eerste trap levert bovendien een makkelijk anaerob te vergisten slib; daardoor kan de verblijftijd in de tweede (stabilisatie)trap sterk worden verkort. Met de uit de eerste trap vrijkomende warmte kan de anaerobe vergisting worden versneld en de methaangasproduktie worden verhoogd (Fuggle; 1985).

1.2.2 Conditioneren

Conditioneren van slib is in de eerste plaats gericht op het verbeteren van de ontwateringseigenschappen van het slib. De con-

ditioneringsprocessen kunnen in drie categorieën worden ingedeeld: Fysische-, chemische- en thermische processen, zie tabel 1.1.

Tabel 1.1: Conditioneringsmethoden voor slib		
CONDITIONERING		
<u>Chemisch</u>	<u>Thermisch</u>	<u>Fysisch</u>
conditioneringsmiddelen:	boven 100 °C: met/zonder lucht	inert materiaal toevoegen, zoals:
organisch	tussen 0 en 100 °C:	slib (verkoold, gedroogd, verast)
anorganisch	beneden 0 °C.	vliegias, zaagsel papierpulp etc.

Bij fysische conditionering wordt door toevoeging van een inert toeslagmateriaal de structuur van het slib verbeterd, waardoor de ontwaterbaarheid verbetert. Als toeslagmateriaal kan slib (gedroogd, verkoold, verast), maar ook bijvoorbeeld vliegias, papierpulp of zaagsel worden gebruikt. Door toevoeging van het toeslagmateriaal wordt ook de verwerkbaarheid van het slib verbeterd. Nadeel van fysische conditionering is de sterke toename van de slibmassa.

Bij chemische conditionering worden (poly)elektrolyten aan het slib toegevoegd die zorgen voor een agglomeratie van kleinere slibdeeltjes, waardoor grotere, compactere en wrijvingsbestendigere vlokken ontstaan die beter filtreerbaar zijn. Als elektrolyt kunnen ijzer(III)- en aluminiumzouten of organische polyelektrolyten worden gebruikt. Bij gebruik van ijzer- en aluminiumzouten zijn hoge doseringen noodzakelijk. Om de vorming van grote sterke vlokken te bevorderen moet de pH door toevoeging van kalk tot boven een waarde van 12 worden gebracht. Hierdoor neemt de droge stof massa sterk toe. Het voordeel van organische polyelektrolyten is dat veel kleinere doseringen kunnen worden gebruikt en dat het organische karakter van het slib behouden blijft.

Thermische conditionering valt naar procestemperatuur onder te verdelen in drie categorieën: Conditioneren bij temperaturen onder 0 °C, bij temperaturen tussen 0 en 100 °C, en bij temperaturen boven de 100 °C.

Door het slib te bevriezen wordt de structuur zodanig verstoord dat de ontwaterbaarheid na ontdooien verbetert. De vlok is echter erg fragiel, waardoor verdere verhoging van het droge stofgehalte door mechanisch ontwateren moeilijk is. Verder zijn de proceskosten erg hoog (Clements; 1950, Reed; 1986).

Bij thermische behandeling van het slib bij temperaturen tussen 0 en 100 °C kunnen wel de pathogenen worden gedood (pasteurisatie),

maar de resultaten met betrekking tot de ontwatering zijn niet éénduidig.

Thermische conditionering bij temperaturen boven de 100 °C kan worden uitgevoerd in aan- of afwezigheid van zuurstof. Door toepassing van het Porteous proces (het slib 30-45 min. verwarmen tot 170-220 °C, bij een druk van 1800-2400 kPa, in afwezigheid van zuurstof) wordt de ontwaterbaarheid sterk verbeterd. Ook bij het Zimpro proces (natte oxydatie, verwarmen tot 180 °C, bij een druk van 21 kPa, in aanwezigheid van zuurstof) verbetert de ontwaterbaarheid sterk. De CZV-waarde van het filtraat kan echter erg hoog worden (Eden; 1983).

Een conditioneringsproces dat onder geen van de voorgaande categorieën valt is elutriatie. Wanneer veel fijn gesuspenseerd materiaal in het slib aanwezig is, kan dit de ontwateringseigenschappen nadelig beïnvloeden. Door de fijne gesuspenseerde stof uit te spoelen met effluent kan de ontwaterbaarheid worden verbeterd. Hierdoor daalt bovendien de alkaliniteit van het slib, waardoor de elektrolytbehoefte vermindert (Eden; 1983, Fair; 1968).

Bij pyrolyse van slib wordt een aantal processtappen in de slibverwerking gecombineerd (stabiliseren, conditioneren, drogen). Pyrolyse is dan ook geen echt conditioneringsproces. Het slib wordt in afwezigheid van zuurstof verhit (optimale temperatuur 900-950 °C), daarbij ontstaan energierijke producten: een brandbaar gas, minerale oliën en een vaste brandstof (charcoal). Veelbelovender dan hoge-temperatuur-pyrolyse is de in Duitsland ontwikkelde en in Canada verder verfijnde lage-temperatuur-pyrolyse. Daarbij worden de energierijke producten gevormd door verhitting tot 350 °C (30 min.) in een zuurstofvrije omgeving (Campbell; 1988, Kasakura; 1982).

1.3 Ontwateren

Na stabiliseren en conditioneren kan het voor verdere verwerking van het slib (b.v. verbranding) nodig zijn het watergehalte verder te verlagen. De ontwateringstechnieken zijn in drie categorieën in te delen.

Natuurlijke ontwatering, waarbij het slib in droogbedden, lagunes of bakken wordt gebracht en het vrije water via een drainagesysteem of via aflaten en door verdamping wordt afgevoerd. Nadelen van natuurlijke ontwatering zijn de discontinue aan/afvoer, het grote ruimtebeslag en de arbeidsintensiviteit. In verband hiermee zijn de kosten van natuurlijke ontwatering hoog.

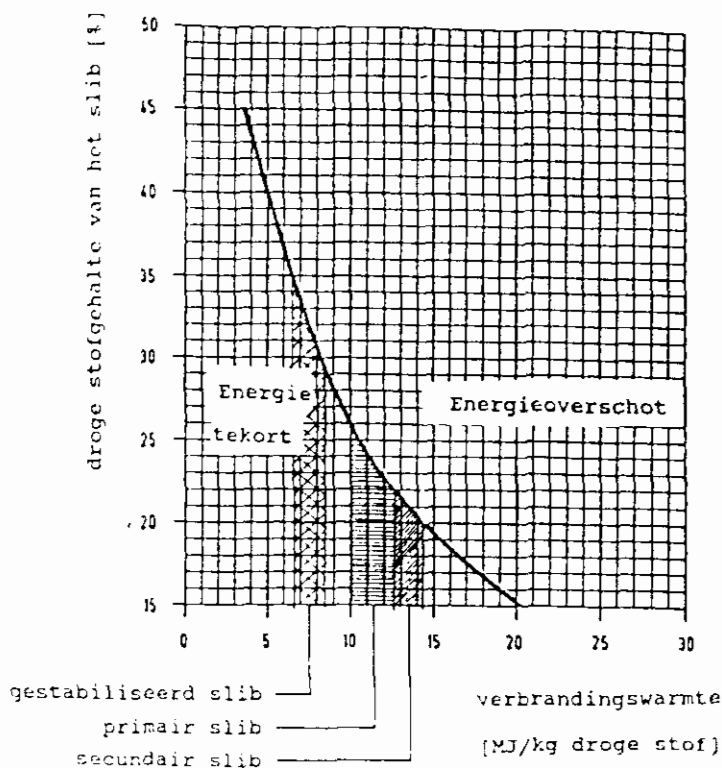
Bij mechanische ontwatering wordt door het aanleggen van een centrifugaal- of drukveld het water verwijderd. Mechanische ontwatering is veel goedkoper dan thermische ontwatering. Het maximale droge stofgehalte dat met (de huidige technieken voor) mechanische ontwatering kan worden bereikt ligt rond 30 gew.% droge stof. Het is van belang dit bereikbare droge stofgehalte zo ver mogelijk te verhogen. Daarbij wordt niet alleen gekeken naar processen gebaseerd op drukverschillen, maar ook naar de toepassing van andere krachtenvelden (elektrisch, akoestisch). Deze methoden worden in hoofdstuk 5 nader behandeld.

Bij thermische ontwatering wordt het water verwijderd door verdamping. Thermische ontwatering wordt meestal alleen toegepast indien er een verkoopbaar eindproduct ontstaat. Daarnaast kan thermische ontwatering toegepast worden indien er een goedkope energiebron aanwezig is (zie ook 4.2).

1.4 Uiteindelijke bestemming

De laatste stap in de slibverwerkingsketen wordt gevormd door de uiteindelijke bestemming van het slib. Het slib kan worden afgezet in de landbouw in natte of gecomposteerde vorm. Daarbij is het van belang dat het slib hygiënisch betrouwbaar is (wat eventueel desinfectie noodzakelijk maakt) en dat het niet schadelijk is voor de volksgezondheid. Afzet in de landbouw lijkt in de toekomst van steeds minder belang te worden bij de slibverwerking.

Als verwerking in de landbouw niet mogelijk is zal het slib gecontroleerd moeten worden gestort. In verband met ruimtebeslag en de daarmee samenhangende kosten dient het stortvolume zover mogelijk te worden beperkt. Veruit de grootste volumereductie is te bereiken door verbranding van het slib. Bij verbranding is het droge stofgehalte van het slib van groot belang. Bij droge stofgehaltes boven een bepaald percentage kan het slib autotherm worden verbrand. Bij lagere droge stofgehaltes neemt de energiebehoefte sterk toe. Figuur 1.2 geeft voor verschillende slibben het droge stofgehalte weer dat nodig is voor autotherme verbranding. Dit percentage is o.a. afhankelijk van de verhouding organische/anorganische stof.



Figuur 1.2: Slibkenmerken voor autotherme verbranding

2 Samenstelling en eigenschappen van slib

Slib is een mengsel van vast anorganisch en organisch materiaal en water, met daarin opgeloste stoffen. De samenstelling van het slib is van verschillende factoren afhankelijk:

- 1) De samenstelling van het influent (het aangeboden afvalwater). Zo kan de verhouding van de hoeveelheden industrieel/huishoudelijk afvalwater een grote invloed hebben op de uiteindelijke samenstelling van het slib.
- 2) Het type rioolwaterzuiveringsinrichting (rwzi) en de bedrijfsvoering. Afhankelijk hiervan kunnen verschillende slibsoorten worden onderscheiden die alle verschillende ontwateringseigenschappen hebben:
 - a) Primair slib, slib uit voorbezinktanks.
 - b) Secundair of actief slib, slib uit beluchtingsruimten.
 - c) Humusslib, slib uit oxydatiebedden
 - d) Uitgegist slib, slib uit gistingstanks (anaeroob of aeroob).
 - e) Chemisch slib, slib dat vrijkomt bij een fysisch-chemische zuivering (defosfatering).
 - f) Samengesteld slib, een veel voorkomende combinatie is een mengsel van primair en secundair slib.
- 3) Externe factoren zoals klimatologische omstandigheden, rioolsysteem. Zo kan onder zomerse omstandigheden het slib verder gemineraliseerd worden (hoger asgehalte) dan bij lage temperaturen in de winter.

De bouwsteen van slib is de slibvlok. Om enig inzicht te krijgen in de ontwateringseigenschappen van slib is het in eerste instantie noodzakelijk om de volgende twee facetten nader te bekijken:

- 1) De samenstelling van de slibvlok (zie 2.1).
- 2) De aard van de waterbinding in slib (zie 2.2).

In 2.3 wordt besproken hoe de samenstelling van het slib afhangt van het influent en van de proceskeuze (oxydatiesloot, actief slib installatie, oxydatiebed, gegist slib).

2.1 De samenstelling van de slibvlok

De slibvlok kan globaal in drie delen worden gesplitst (zie tabel 2.1).

Tabel 2.1: Samenstelling van de slibvlok		
slibvlok		
anorganisch	organisch - levend - niet levend	water

Het anorganische gedeelte bestaat uit zand- en kleiachtig materiaal maar ook uit opgeloste zouten.

Het organische materiaal kan in twee gedeelten worden gesplitst: levend en niet levend materiaal.

Het niet levende materiaal bestaat uit afvalstoffen van bacteriën en biologisch minder snel afbreekbare stoffen zoals bijvoorbeeld cellulose.

Onder de levende organismen worden verstaan de organismen die een stofwisseling onderhouden. De fractie levende organismen is zowel qua grootte als qua samenstelling sterk afhankelijk van milieufactoren (procesparameters zoals BZV-waarde van de voeding, slibleeftijd, zuurstofgehalte, temperatuur en ionensterkte) en bepaalt in belangrijke mate de sedimentatie- en ontwateringseigenschappen van het slib. Het blijkt zeer moeilijk te zijn om de fractie levende organismen te bepalen. De hoeveelheid organisch materiaal wordt gewoonlijk bepaald door de gewichtsafname van de droogrest van het slib te meten na 45 minuten gloeien bij 600 °C. Hiermee is echter nog niets bekend omtrent de fractie levende organismen. Voor het bepalen van de biomassa worden vaak metingen van ATP, NAD en DNA toegepast (Schönborn). Voor het meten van de fractie bacteriën die tot reproductie in staat zijn is de DNA-meting het meest geschikt. Bij reïnculturen van bacteriënstammen is een goede relatie gevonden tussen het aantal levende cellen en de ATP-waarden. Zowel DNA- als ATP-waarden zijn afhankelijk van het soort bacterie. NAD-metingen geven informatie over de biochemische activiteit en zijn minder geschikt voor het meten van de biomassa.

Er zijn tenminste twee kenmerken van levende organismen bekend die de sedimentatie- en ontwateringseigenschappen beïnvloeden:

- 1) De hoedanigheid waarin micro-organismen aanwezig zijn; vrij zwemmend, draadvormend, vlokvormend.
De filtreerbaarheid wordt negatief beïnvloed door een overmaat niet vlokgebonden bacteriën in het slib (Parker; 1972, Tenney; 1969).
Bij draadvormige micro-organismen ontstaan ijle, volumieuze, moeilijk bezinkbare slibvlokken. In de literatuur wordt een reeks ervaringen weergegeven die het ontstaan van draadvormende micro-organismen beïnvloedt. Coackley (1985) geeft hier een overzicht van. In hoeverre deze ervaringen algemeen geldend zijn is moeilijk vast te stellen (geen fundamenteel onderzoek).
Naast bacteriën komen in het actief slib ook protozoa voor. De belangrijkste functie van protozoa is het verwijderen van vrij zwemmende bacteriën en organische deeltjes, die als voedselbron kunnen worden gebruikt (Coackley, 1985).
- 2) Vlokvorming met behulp van het door micro-organismen uitscheiden exocellulair materiaal. Het exocellulaire materiaal dat de vlokvorming kan veroorzaken is een uitscheidingsproduct van de stofwisseling van de micro-organismen. Exocellulair materiaal vormt bruggen tussen bacteriën waardoor vlokvorming ontstaat. Dit materiaal kan tot zo'n 10% van de droge stof van het slib uitmaken. In de literatuur worden polysachariden, eiwitten en poly- β -hydroxyboterzuur (een

intracellulaire bron van reservevoedsel) als brugvormende polymeren genoemd (Crabtree; 1969, Parker; 1972, Tenney; 1973). Exocellulaire polymeren worden zeer langzaam biologisch afgebroken. Indien het slib te lang onder endogene omstandigheden wordt gehouden treedt afbraak op van het exocellulair materiaal, met als resultaat dispersie van de vlok.

Metingen gebaseerd op de absorptie van kleurstoffen, hebben aangetoond dat het specifieke oppervlak van actief slib varieert van 43 tot 155 m²/g. Indien de droge stofconcentratie van de slibvlokken bekend is, is het mogelijk om de afmeting van de slibvlokken te berekenen. De straal van de deeltjes die op deze manier wordt berekend, is maximaal ongeveer 0,58 µm. De vlokdeeltjes die zijn waargenomen zijn echter aanzienlijk groter. Dit wijst erop dat de vlokken een poreuze structuur bezitten. Dit is in overeenstemming met de sponsachtige structuur die is waargenomen bij onderzoek van slib met een elektronenmicroscop (Coackley; 1985).

Bacteriën bestaan voor ongeveer 80% uit water en voor 20% uit droge stof. De droge stof bestaat voor 50% uit eiwit, 20% uit celwanden, 10-20% uit RNA, 10% uit lipiden en 3-5% uit DNA (Schlegel; 1976)

2.2 De aard van de waterbinding in slib

Het water in het slib kan worden verdeeld in de twee hoofdgroepen: intern en extern slibwater.

- 1) Intern slibwater is water dat zich in de slibdeeltjes zelf bevindt en is ingesloten door celwanden. Dit interne slibwater kan alleen worden verwijderd indien de celwanden worden vernietigd of door osmose of langs biologische of biochemische weg (stabilisatie, compostering).
- 2) Extern slibwater is water dat zich buiten de deeltjes bevindt en kan, afhankelijk van de bindingskrachten, verder worden onderverdeeld in:

- a) Adsorptiewater
- b) Adhesiewater
- c) Capillair water
- d) Vrij water.

a) Adsorptiewater is water dat direct aan het oppervlak van de vaste stof is gebonden. Adsorptiewater is sterk gebonden en alleen door thermische krachten te verwijderen. Slechts een klein gedeelte van het water bestaat uit adsorptiewater (zie tabel 2.2).

b) Adhesiewater is niet zo sterk gebonden aan de vaste stof dan adsorptiewater vanwege de grotere afstand tussen de vaste stof en het adhesiewater.

c) Capillair water is water dat in kleine holtes zit opgesloten en door capillaire krachten is gebonden. Voor deze capillaire

bindingskrachten kunnen mathematische vergelijkingen worden opgesteld (Batel; 1961). Deze capillaire krachten zijn afhankelijk van de straal van de poriën, de oppervlaktetensioning en de contacthoek.

d) Vrij water heeft geen of een zeer geringe binding met de vaste stof. Dit water is gemakkelijk te verwijderen door bijv. gravitatie indikking. 70% van het water, in een uitgestort slib met 5% droge stof, bestaat uit vrij water. Indien al dit vrije water wordt verwijderd is het droge stofgehalte ongeveer 15%.

Tabel 2.2: Watertypen en hoeveelheden	
Type slibwater	hoeveelheid van het watertype in een gestort slib met 5% d.s. [%]
vrij water	ongeveer 70
adhesiewater	ongeveer 22
capillair water	
adsorptiewater	ongeveer 8
intern water	

De grenzen tussen deze verschillende soorten water zijn niet scherp. In de literatuur komen dan ook verschillende indelingen voor. Vesilind (1986) verdeelde het water in de volgende vier categorieën:

- 1) Vrij water kan worden afgescheiden door sedimentatie. Geen binding tussen vaste stof en water.
- 2) Vlokwater kan door mechanische ontwatering worden afgescheiden door de vlokken als het ware uit te persen.
- 3) Capillair water kan niet door mechanische ontwatering worden afgescheiden, tenzij extreem hoge drukken worden gebruikt. Capillaire binding van water aan de deeltjesmatrix.
- 4) Deeltjeswater kan alleen chemisch of thermisch worden verwijderd indien het deeltje wordt veranderd. Chemische binding tussen vaste stof en water.

Smollen (1988) geeft dezelfde soort indeling als Vesilind, alleen de naamgeving van de watersoorten verschilt. Smollen noemt de vier categorieën resp. vrij water, geïmmobiliseerd water, gebonden water en chemisch gebonden water.

Indien het mogelijk is om te bepalen hoeveel water er van elke categorie aanwezig is in het slib, kan hieruit worden afgeleid of het slib moeilijk of makkelijk te ontwateren is. Deze waterverde-

ling zou met behulp van een droogexperiment bepaald kunnen worden (zie 3.2).

2.3 De slibontwateringseigenschappen als functie van het zuiveringssysteem

De ontwateringseigenschappen van slib zijn afhankelijk van een groot aantal factoren, waaronder de samenstelling van het afvalwater en het type zuiveringsproces (zie figuur 1.1).

De samenstelling van het afvalwater is mede bepalend voor de verhouding primair/secundair slib. Industriële verontreinigingen kunnen de slibeigenschappen nadelig beïnvloeden (afvalwater van vezelverwerkende industriën kan b.v. lichte volumineuze slibvlokken veroorzaken).

De slibsoorten bepalen in hoge mate de resultaten van het ontwateringsproces. Primair slib en uitgegist slib laten zich beter ontwateren dan secundair slib. Een mengsel van vers surplus slib en actief slib ontwatert slechter dan een mengsel van vers primair- en humusslib. Slib uit oxydatiesloten laat zich slecht ontwateren. Dit wordt wellicht veroorzaakt doordat het slib enige tijd onder endogene omstandigheden verkeert. Hierdoor treedt afbraak van het exocellulair materiaal op met als resultaat dispersie van de vlok (STORA; 1981).

Slib dat koud wordt vergist, ontwatert slechter dan slib dat thermofiel wordt vergist (Haworth; 1973). Ook de buitentemperatuur is van invloed op de ontwatering. Bij hoge temperaturen in de zomer wordt het slib verder gemineraliseerd (hoger asgehalte) dan bij lage temperaturen in de winter (STORA; 1981, De Korte; 1988).

De invloed van de slibleeftijd is niet geheel duidelijk. STORA meldt een positieve invloed van de slibleeftijd op de ontwaterbaarheid, de Gemeenschappelijke Technische Dienst Oost Brabant (Den Burger; 1988) meldt dat bij toename van de slibleeftijd de ontwaterbaarheid afneemt (hoogbelaste processen ontwateren beter dan laagbelaste).

Uitgegist slib kan (door chemische veranderingen) veel fijne deeltjes bevatten, waardoor een hoge polyelektrolytdosering is vereist. Door elutriatie kunnen de fijne deeltjes worden uitgewassen en de elektrolytbehoefte worden beperkt. Ellenbroek (1988) meldt dat aeroob gestabiliseerd slib een hoger chemicaliënverbruik vraagt dan anaeroob gestabiliseerd slib. Volgens Gerstle (1974) neemt de benodigde hoeveelheid conditioneringsmiddel toe naarmate het slib meer actief slib bevat.

Slibindikkers blijken vaak maar matig te functioneren. Daardoor moeten grote volumina waterrijk slib worden verwerkt. Tijdens indikking (opslag) vallen de slibvlokken uiteen als gevolg van veroudering (Gale; 1967, Niemitz; 1965, White; 1974). Bij hoogbelast actief slib vindt dit uiteenvallen sneller plaats dan bij laagbelast actief slib en slib uit een oxydatiesloot.

Door veranderingen in het zuiveringsproces kunnen de ontwateringseigenschappen van het slib veranderen. (Chemische) defos-

fatering kan de ontwaterbaarheid verbeteren doordat grote hoeveelheden ijzerzouten worden toegevoegd. Bij het ontwikkelen van nieuwe zuiveringstechnieken zullen de ontwateringseigenschappen in ogenschouw moeten worden genomen.

De ontwateringseigenschappen van slib blijken regionale verschillen te vertonen. Afvalwater uit Amsterdam blijkt aanzienlijk moeilijker te ontwateren dan afvalwater uit landelijke regio's (Regge en Dinkel, Brabant, Kennemerland en West-Friesland). In Duitsland worden met identieke apparatuur betere resultaten geboekt dan in Nederland. Dit kan een gevolg zijn van de grotere gloeirest van het slib in Duitsland. Ook is door het hogere verhang de verblijftijd van het water in de riolen in Duitsland korter, waardoor het minder aanrot.

Menging van verschillende soorten slib (b.v. aeroob en anaeroob gestabiliseerd slib) heeft een nadelige invloed op de ontwaterbaarheid (Vesilind; 1986, Ellenbroek; 1988). De ontwatering kan wellicht worden verbeterd door de verschillende slibsoorten afzonderlijk te behandelen.

3 Slibkarakterisering

3.1 Bestaande karakteriseringsmethoden

De ontwateringseigenschappen van slib kunnen op verschillende manieren worden gekarakteriseerd. In de NEN-voorschriften wordt een vijftal methoden aangegeven om de ontwatering te karakteriseren:

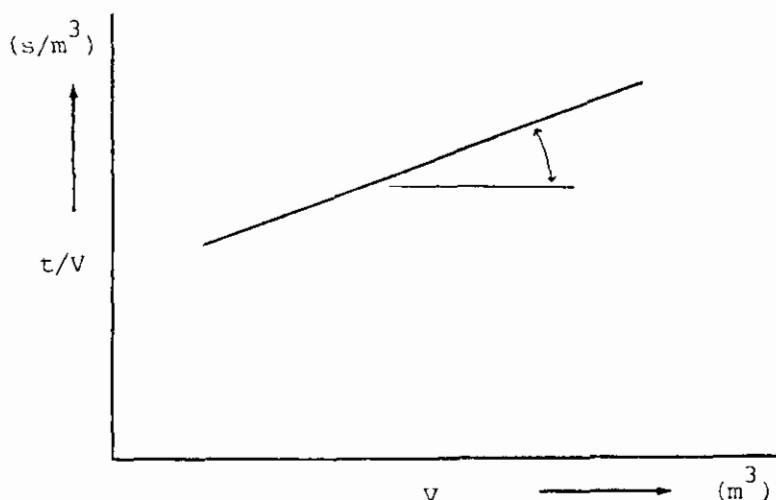
- 1) De specifieke filtratieweerstand. NEN 6685, NEN 6686 (1983).
- 2) De compressibiliteitscoëfficiënt. NEN 6687, NEN 6688 (1983).
- 3) De afzuigtijd bij vacuümfiltratie. NEN 6689 (1983).
- 4) De capillaire zuigtijd (CST-waarde). NEN 6690 (1983).
- 5) De ontwaterbaarheid met de MFT-methode. NEN 6691 (1988).

Deze karakteriseringsmethoden worden in paragrafen 3.1.1 t/m 3.1.5 kort besproken. Naast de in de NEN-voorschriften opgenomen bepalingen die specifiek gericht zijn op de ontwaterbaarheid zijn er nog andere toetsen die een indruk kunnen geven van de ontwateringseigenschappen, zoals de slibvolume-index (3.1.6), de centrifugeerbaarheid (3.1.7) en rheologische eigenschappen (3.1.8).

Al deze ontwateringseigenschappen zullen sterk afhangen van de eventueel toegepaste conditioneringsmethode.

3.1.1 De specifieke filtratieweerstand

Uit het filtratieverloop (het volume filtraat als functie van de filtratietijd) kan de specifieke filtratieweerstand worden bepaald. De specifieke filtratieweerstand wordt bij constante druk bepaald en kan zowel bij vacuüm (50 kPa) als bij overdruk (700 kPa) worden bepaald. Het volume filtraat wordt uitgezet tegen het quotiënt van tijd en volume (zie figuur 3.1). Uit de hellingshoek van de lijn kan met een formule, gebaseerd op de filtratietheorie van Darcy, Carman en anderen, de specifieke filtratieweerstand worden bepaald.



Figuur 3.1: Bepaling van de specifieke filtratieweerstand

3.1.2 De compressibiliteitscoëfficiënt

De compressibiliteitscoëfficiënt is een maat voor de samendrukbaarheid van de slibkoek (niet samendrukbaar, $s=0$, sterk samendrukbaar, $s=1$). Er bestaat een empirische relatie die de specifieke filtratieweerstand als functie van de druk beschrijft:

$$r = r_0 \cdot p^s \quad \text{of} \quad : \log(r) = \log(r_0) + s \cdot \log(p) \quad [4.1]$$

waarin: r = specifieke filtratieweerstand.

r_0 = constante.

p = filtratiedrukverschil [kPa]

s = compressibiliteitscoëfficiënt.

De compressibiliteitscoëfficiënt kan worden bepaald door bij een aantal verschillende drukken (onderdrukken: 20, 30, 50 en 80 kPa, of overdrukken: 100, 300, 700 en 1500 kPa) de specifieke filtratieweerstand te bepalen. Door op dubbel logaritmisch papier $\log(r)$ als functie van $\log(p)$ uit te zetten kan uit de hellingshoek de compressibiliteitscoëfficiënt worden bepaald.

3.1.3 De afzuigtijd bij vacuümfiltratie

De afzuigtijd bij vacuümfiltratie wordt gebruikt als snelle en eenvoudige methode voor het karakteriseren van de ontwateringssnelheid van het slib. Een analyse monster wordt bij kamertemperatuur onderworpen aan een vacuümfiltratie bij een onderdruk van 50 kPa. De tijdsduur waarin 75 ml filtraat wordt verkregen wordt bepaald. De afzuigtijd is afhankelijk van het droge stofgehalte. In verband met onderlinge vergelijkingen verdient het aanbeveling het droge stofgehalte voor de bepaling op 1,5 gew.% droge stof te brengen.

3.1.4 De capillaire zuigtijd

De meest eenvoudige test voor het verkrijgen van een indruk van de ontwaterbaarheid van slib is de capillaire zuigtijd (Capillary Suction Time, CST). Het principe van de test berust op de capillaire werking van vochtabsorberend filtreerpapier. Het slib wordt in een cilindervormige slibhouder gebracht die op een filtreerpapier rust. Er vindt ontwatering plaats waarbij de capillaire zuigkracht als drijvende kracht optreedt. De snelheid waarmee het vloeistoffront zich in het papier voort beweegt is een maat voor de ontwateringssnelheid. De tijd waarin het vloeistoffront zich over een bepaalde afstand verplaatst wordt gemeten.

Bij de zogenaamde "geroerde CST-test" wordt voorafgaande aan de bepaling enige tijd (10, 40, 100 s) geroerd. Met deze "geroerde CST-test" wordt een indruk verkregen van de sterkte van de slibvlokken.

Het resultaat van de CST-test is afhankelijk van een aantal factoren, zoals de eigenschappen van het filtreerpapier, de oppervlaktespanning, de temperatuur en het droge stofgehalte van het slib. Het droge stofgehalte is veruit de belangrijkste in-

vloedsfactor. Bij de opgave van een CST-waarde moet het droge stofgehalte worden vermeld.

Er zijn door enkele onderzoekers (Loll; 1977, Hennerkes; 1972, Gale; 1972) relaties gevonden tussen de r-waarde (specifieke filtratieweerstand) en de CST-waarde. Bij bepaling van de specifieke filtratieweerstand zijn gelijksoortige processen werkzaam als bij de bepaling van de CST-waarde. In beide gevallen wordt d.m.v. onderdruk water uit het slib gezogen. Bij bepaling van de r-waarde met vacuüm als drijvende kracht, bij bepaling van de CST-waarde met de capillaire zuigkracht als drijvende kracht. Indien er een verband bekend is, kan met behulp van de CST-waarde de specifieke filtratieweerstand worden bepaald. Daar de CST-waarde snel en eventueel geautomatiseerd kan worden uitgevoerd, biedt dit aanzienlijke voordelen.

3.1.5 De ontwaterbaarheid met de MFT-methode

Door TNO is de MFT (Modificatie van de Filtratie Test) methode ontwikkeld, waarbij niet alleen de snelheid van de filtratie, maar ook het bereikbare eind droge stofgehalte kan worden onderzocht. Bij de bepaling van het MFT-percentages droge stof wordt het monster onderworpen aan een vacuümfiltratie bij een onderdruk van 50 kPa, gevolgd door uitpersen van de slibkoek gedurende 10 minuten. De sliblaag wordt kort na aanvang van de filtratie luchtdicht afgedekt met een kunststoffolie, waardoor de slibkoek wordt uitgeperst met een drukverschil gelijk aan de aangelegde onderdruk en de atmosferische druk. De druk wordt over de slibkoek verdeeld door een laagje water op het folie te brengen. Na 10 minuten wordt de filtratie beëindigd en wordt de indamprest van de gevormde slibkoek bepaald.

3.1.6 De slibvolume-index

De slibvolume-index is het volume in milliliters dat slib met een drogestofgewicht van 1 gram na een half uur bezinken innemt. De slibvolume-index wordt sporadisch gebruikt voor het karakteriseren van de ontwaterbaarheid van slib. De bruikbaarheid van de slibvolume-index als parameter lijkt beperkt tot een indicatie over de bezinkbaarheid en de centrifugeerbaarheid van slib. Slib dat slecht bezinkt zal ook slecht centrifugeerbaar zijn.

3.1.7 De centrifugeerbaarheid

Door het slib achtereenvolgens bij verschillende toerentallen te centrifugeren en de vrijkomende hoeveelheden water te meten, ontstaat een onderverdeling van het slibwater. Deze test, hier kortweg centrifugeerbaarheid genoemd, kan een indruk geven van de ontwaterbaarheid van slib. Hiermee zou informatie kunnen worden verkregen over de bezinkbaarheid, het afschuifgedrag en de vloksterkte van het slib (Vesilind; 1974).

3.1.8 Rheologische eigenschappen

Behalve ontwateringskenmerken kunnen ook de rheologische eigenschappen van het slib van belang zijn (vooral in verband met het storten van slib). Door het bepalen van de viscositeit van het slib wordt een indruk verkregen van de vlokvorming bij het doseren van elektrolyt. Ook kan een indruk worden verkregen van de sterkte van de vlokken. Bij grote turbulentie slaan de vlokken stuk en daalt de viscositeit.

Voor slib dat wordt gestort is de draagkracht van belang. Deze kan worden bepaald met een vleugelsonde, valkegel of laststempel. Met de vleugelsonde wordt de schuifspanningsweerstand van het slib bepaald. Door een elektromotortje wordt een steeds groter wordend moment op de sonde uitgeoefend. Als het slib afschuift, neemt de weerstand plotseling af. De waarde van het moment op het ogenblik dat het slib gaat afschuiven wordt afgelezen. De maximale weerstand kan worden bepaald uit het maximale moment en de geometrische verhoudingen van het monster (Otte-Witte; 1988).

3.2 Nieuwe (ideeën voor) karakteriseringsmethoden

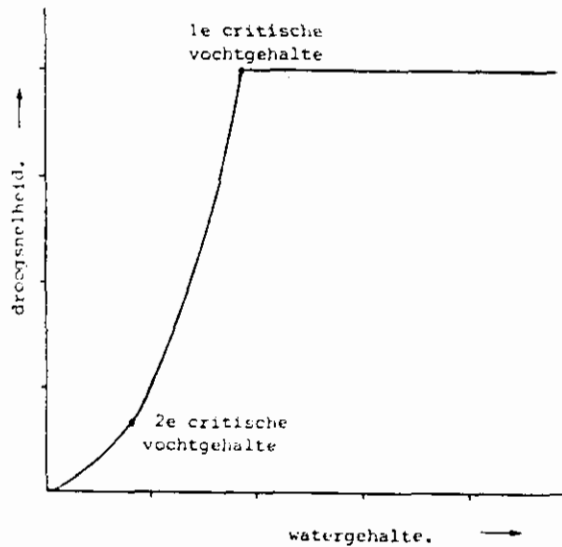
De huidige toetsen zijn vrijwel uitsluitend gericht op de filterbaarheid van het slib. Wanneer nieuwe ontwateringsmethoden worden ontwikkeld zijn deze toetsen wellicht ontoereikend. Er moet worden gezocht naar algemeen bruikbare, of op de nieuwe technieken toegespitste testen. Hiervoor komt een aantal parameters in aanmerking.

3.2.1 Bepaling van de waterbinding

Een mogelijkheid om het slib te karakteriseren is het maken van een onderverdeling van het slibwater in verschillende watertypen. Deze karakterisering kan bijv. door het meten van droogcurves of vriescurves worden uitgevoerd.

Drogen van slib houdt in het verdampen van water en het verwijderen van de damp uit de te drogen stof. De droogsnelheid hangt af van externe (temperatuur, relatieve vochtigheid, luchtsnelheid, geometrische afmetingen van het te drogen materiaal e.d.) en interne factoren (chemische en fysische opbouw van het materiaal). Het droogproces is vaak op te delen in een periode van constante en een periode van afnemende droogsnelheid (Coulson; 1978), zie figuur 2.1.

Gedurende de eerste fase van het droogproces is de droogsnelheid constant. Water diffundeert vanuit het binnenste van een deeltje naar het oppervlak met dezelfde snelheid als de verdampingssnelheid aan het oppervlak. De dampspanning van water aan het deeltjesoppervlak is gelijk aan die van zuiver water. Hieruit volgt dat de wateractiviteit gelijk is aan 1, zodat het water niet gebonden is. De droogsnelheid wordt in deze periode uitsluitend door externe factoren bepaald. De periode van constante droogsnelheid duurt tot een bepaald vochtgehalte, het eerste kritische vochtgehalte, is bereikt. Dit kritische vochtgehalte is mede afhankelijk van de droogcondities.



Figuur 2.1: Een voorbeeld van een droogcurve

De periode van dalende droogsnelheid is over het algemeen in twee delen op te splitsen.

Tijdens de eerste periode van dalende droogsnelheid is het vochttransport van binnen het vaste materiaal naar het oppervlak het snelheidsbepalende mechanisme. Tijdens de tweede periode van dalende droogsnelheid is het vocht zo ver van het oppervlak verwijderd dat verdamping plaatsvindt binnen in het vaste materiaal. Factoren die de dampdiffusie beïnvloeden zullen de droogsnelheid bepalen.

Smollen (1986) heeft voor de onderverdeling van water in verschillende categorieën een procedure ontwikkeld die neerkomt op vacuümfiltratie, gevolgd door droging bij constante temperatuur (30 °C) en vochtigheid. De grens tussen geïmmobiliseerd water en gebonden water werd bepaald door de overgang van een constante droogsnelheid naar een in de tijd afnemende droogsnelheid. De hoeveelheid chemisch gebonden water werd gekenmerkt door het feit dat dit water te verwijderen is door droging bij een temperatuur boven 105 °C.

Halde (1979) voerde de droogkarakterisering uit onder vacuüm, omdat bij de lange droogtijden die optreden indien het slib bij 30 °C en atmosferische druk wordt gedroogd (bij Smollen zo'n 15 uur), het slib sterk kan veranderen als gevolg van de activiteit van de micro-organismen. Verhoging van de temperatuur tot ongeveer 100 °C kan niet worden toegepast om de droogtijden te verkorten, aangezien bij deze temperatuur een conditionerende werking optreedt.

Door het meten van droogcurves moet het mogelijk zijn om het slibwater te karakteriseren. Aan de hand van deze karakterisering is het wellicht mogelijk om inzicht te krijgen in welke richting verdergaande ontwatering van slib gezocht moet worden. Verder zou het mogelijk kunnen zijn om met behulp van een droogkarakterisering het optimale ontwateringsproces te selecteren.

Een andere manier om de hoeveelheid gebonden water te bepalen berust op de aanname dat het gebonden water onder lage temperaturen (bijv. -20°C) niet bevriest (Katsiris; 1987). Door een hoeveelheid slib te onderwerpen aan temperaturen van -20°C zal al het vrije water bevriezen. Indien wordt gemeten hoeveel energie nodig is om dit slib weer naar de omgevingstemperatuur te brengen kan de hoeveelheid vrij water worden berekend. Als het totale watergehalte bekend is kan de hoeveelheid gebonden water worden bepaald.

3.2.2 Bepaling van de deeltjesgrootteverdeling

Eén van de belangrijkste parameters die de ontwaterbaarheid beïnvloedt, is volgens Karr (1978) de deeltjesgrootte. Om de deeltjesgrootteverdeling (textuur) te bepalen ontwikkelde hij een fractioneringsmethode waarbij de vaste deeltjes in vijf groepen worden onderverdeeld:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1) Starre bezinkbare deeltjes
(blijven op een $100\ \mu\text{m}$ zeef liggen) | $\geq 100\ \mu\text{m}$ |
| 2) Vervormbare bezinkbare deeltjes
(bezinken, na flocculeren, binnen 1 uur) | $\geq 100\ \mu\text{m}$ |
| 3) Supra colloïdale deeltjes | $1 - 100\ \mu\text{m}$ |
| 4) Colloïdale deeltjes | $0,001 - 1\ \mu\text{m}$ |
| 5) Opgelost materiaal | $\leq 0,001\ \mu\text{m}$ |

Indien de deeltjesgrootteverdelingen van twee slibben niet op elkaar lijken, kunnen deze op elkaar gelijkend gemaakt worden, door aan één van de slibben bepaalde deeltjesfracties toe te voegen. De filtratieweerstand van slibben die, qua deeltjesgrootteverdeling op elkaar leken, kwam in de meeste gevallen goed overeen (Karr; 1976, 1978). Dit wijst er op dat de deeltjesgrootte-(verdeling) inderdaad een belangrijke invloed heeft op de ontwaterbaarheid van het slib.

Door het bepalen van de deeltjesgrootteverdeling kan nuttige informatie verkregen worden omtrent de ontwaterbaarheid van slib d.m.v. filtratie. De deeltjesgrootteverdeling is in principe een apparaat-onafhankelijke parameter, zodat de resultaten onderling vergelijkbaar zouden moeten zijn. Daarnaast is kennis van de deeltjesgrootteverdeling van belang, indien men het filtratieproces wil modelleren.

3.2.3 Bepaling van de zêta-potentiaal en de geleidbaarheid

De zêta-potentiaal is een belangrijke parameter bij coagulatie en elektrokinetisch ontwateren. In oplossingen met een hoge zêta-potentiaal zullen de deeltjes elkaar sterk afstoten, waardoor vlokvorming wordt tegengegaan. Door toevoeging van een elektrolyt wordt de zêta-potentiaal verlaagd, waardoor de afstotende krachten tussen deeltjes afnemen. De deeltjes zullen elkaar zo dicht kunnen naderen dat de aantrekkende Vanderwaalskrachten groter worden dan de afstotende elektrostatische krachten. Er zal vlok-vorming optreden. Voor het destabiliseren van de suspensie is dus een lage zêta-potentiaal vereist.

Bij elektrokinetische processen wordt daarentegen de ontwatering bevorderd door een hoge zêta-potentiaal. Bij elektroforese (zie 5.5.1) is de stroomsnelheid van de deeltjes evenredig met de zêta-potentiaal. Bij elektrosmose (zie 5.5.2) is de stroomsnelheid van de vloeistof evenredig met de zêta-potentiaal.

Via bepaling van de zêta-potentiaal kan wellicht een indruk worden verkregen of een goede vlokvorming mogelijk is en welke chemicaliëndoseringen hiervoor nodig zijn. Daarnaast kan de zêta-potentiaal aangeven of elektrokinetisch ontwateren (economisch) mogelijk is. Er kan op grond van de zêta-potentiaal wellicht een keuze worden gemaakt tussen verschillende ontwateringsprocessen:

- 1) Coaguleren gevolgd door mechanisch ontwateren of nieuwe technieken, zoals akoestisch ontwateren in combinatie met vriesconcentreren, bij vloeistoffen met een lage zêta-potentiaal.
- 2) Elektrokinetische ontwatering bij vloeistoffen met een hoge zêta-potentiaal.

Wanneer de geleidbaarheid van een vloeistof hoog is zal het energieverbruik bij elektrokinetische ontwatering hoog zijn. Elektrokinetisch ontwateren wordt hierdoor economisch onaantrekkelijker. Bepaling van de geleidbaarheid kan een indruk geven van de haalbaarheid van elektrokinetisch ontwateren.

3.2.4 Bepaling van de verhouding organische/anorganische stof

De verhouding organische/anorganische stof kan worden bepaald door de gewichtsafname van de droogrest te bepalen na 45 minuten gloeien bij 600 °C.

De ontwateringsresultaten zijn in Duitsland bij gebruik van identieke apparatuur beter dan in Nederland. Dit wordt verklaard met de kortere verblijftijd in de riolen en de hogere gloeirest van het slib. Anorganisch materiaal is minder samendrukbaar dan organisch materiaal. Een hoger gehalte aan anorganisch materiaal (hogere gloeirest) zal de filtratieprocessen positief beïnvloeden. Bovendien zal anorganisch materiaal bij opslag van het slib (zoals bij na-bezinking) geen structuurveranderingen zoals rotting ondergaan waardoor de ontwatering negatief wordt beïnvloed. Bepaling van de verhouding organisch/anorganisch materiaal kan een indruk geven van de ontwaterbaarheid.

De verbrandingswaarde van slib hangt in belangrijke mate af van het percentage organische stof in het ontwaterde materiaal. Via de bepaling van het gehalte organische stof kan wellicht worden nagegaan tot welk percentage droge stof moet worden ontwaterd om autotherme verbranding mogelijk te maken.

4 Bestaande ontwateringstechnieken

4.1 Natuurlijke ontwatering

De natuurlijke ontwatering is gericht op het afscheiden van het vrije water. Deze ontwatering kan plaatsvinden in droogbedden, lagunes en in slibbakken. Bij deze drie methoden wordt het slib in een omdijkte of ommuurde, gedraineerde ruimte gevoerd. Het vrije water wordt afgevoerd door het drainagesysteem en/of met behulp van verstelbare pijpen en door verdamping. Verschillen tussen de drie methoden bestaan uit verschil in verblijftijd van het slib, verschil in diepte van de ruimte en verschil in het bereikbare eind droge stofgehalte (zie tabel 4.1).

Tabel 4.1: Enkele verschillen tussen drie natuurlijke ontwateringssystemen			
	droogbedden	slibbakken	lagunes
verblijftijd	enige dagen tot enige maanden	3 tot 6 maanden	10 tot 15 jaar
eind droge stofgehalte	10-25 gew%	10-25 gew%	20-35 gew%
capaciteit ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{jaar}$)	1 à 3	2 à 4	1 à 2

De natuurlijke ontwatering van slib kan worden verbeterd c.q. versneld door toevoeging van polyelektrolyten. Verder wordt ter verbetering van het ontwateringsresultaat in lagunes ook wel beplanting met bijv. riet toegepast. Nadelen van natuurlijke ontwatering zijn de discontinue aan- en afvoer van het slib, de relatief hoge arbeidsintensiteit en de relatief hoge kosten in verband met het grote ruimtebeslag. De toepassing van de natuurlijke ontwateringsmethoden zal in de toekomst bij de eindverwerking van zuiveringsslib een ondergeschikte rol gaan spelen, onder meer door de stringenter wetgeving ten aanzien van de emissies en de grondwaterverontreiniging. Met het oog hierop zullen deze ontwateringsmethoden in het verdere verloop van deze studie buiten beschouwing worden gelaten.

4.2 Thermische ontwatering

Het doel van de thermische ontwatering (ofwel droging) is meestal niet zo zeer het bewerkstelligen van een aanzienlijke volumereductie, doch veeleer het verkrijgen van een milieuhygiënisch betrouwbaar eindprodukt, dat verkoopbaar is als meststof. Beschikbaarheid van goedkope energiebronnen (bijv. methaangas van de slibgisting, afvalverbrandingswarmte) kan een overweging zijn om droging toe te passen met als hoofddoel volumereductie.

Om het drogingsproces zo rendabel mogelijk uit te voeren moet het droge stofgehalte van het slib 30 gew% of meer bedragen. Het slib moet dus eerst mechanisch voorontwaterd worden. Voordat dit voorontwaterde slib wordt gedroogd, wordt het opgemengd met reeds gedroogd slib tot het droge stofgehalte ca. 50 gew% is. Dit heeft als voordeel dat het droogoppervlak wordt vergroot en het voorkomt korrelvorming, waarbij een droge schil wordt gevormd en de kern nat blijft. Bovendien geven te lage droge stofgehalten bij de invoer van de droger kans op aankleving op de drogerwanden.

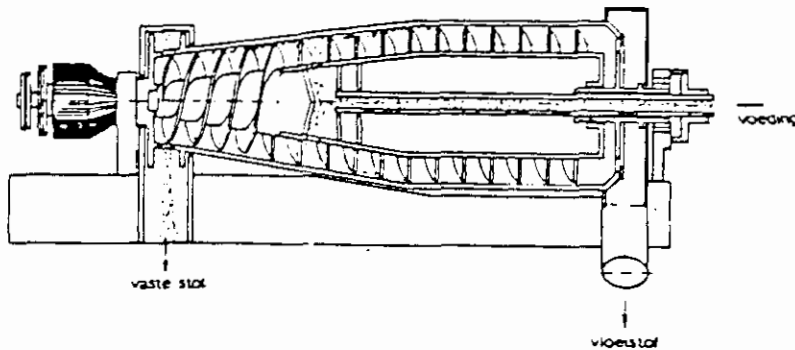
De slibsamenstelling en eigenschappen zijn voor het drogingsproces van weinig of geen belang, uiteraard wel voor de verkoopbaarheid van het produkt en voor de mate waarin stankvorming tijdens het droogproces optreedt. Het droge stofgehalte van het gedroogde slib bedraagt 90 tot 95 gew%, het slib is dan dus verstuijft. Het gedroogde slib moet opgeslagen worden bij een temperatuur beneden 60 °C vanwege de kans op broeien in de opslagsilo, hetgeen kan resulteren in brand. Al met al is droging in combinatie met mechanische ontwatering, een technisch eenvoudige slibverwerkingsmethode.

Een tamelijk nieuwe ontwikkeling in het drogen van slib is het toepassen van het Carver-Greenfield proces. Bij dit proces wordt aan de te drogen substantie een olie toegevoegd om de slurry verpompbaar te houden en om afzetting van de vaste delen op de drogerwand tegen te gaan. In Japan en de VS zijn reeds enkele fabrieken voor de verwerking van rwzi-slib gebouwd (Plueneke; 1986). Aan het tot 5% ingedikte slib wordt een olie toegevoegd waarna dit naar een drietraps verdampingseenheid wordt gevoerd. De gedroogde slurry wordt gecentrifugeerd om de olie van het slib te scheiden. Volgens deze publicatie bevat de koek na centrifugatie zo'n 14% water, 63% vaste stof en 22% olie. Het gehalte aan olie in de koek kan verder worden teruggebracht. Hier is het oliegehalte zo hoog omdat deze koek als brandstof, voor energieopwekking wordt gebruikt.

4.3 Mechanische ontwatering

4.3.1 Sedimenterend centrifugeren

Sedimenterend centrifugeren, een gravitatie techniek, kan worden uitgevoerd in een decanteercentrifuge (zie figuur 4.1). Door de centrale invoerpijp wordt het slib met het conditioneringsmiddel toegevoerd. In de roterende trommel wordt het slib in rotatie gebracht, waarbij door de centrifugale kracht scheiding tussen vaste en vloeibare fase optreedt. Het afgescheiden (= ontwaterde) slib wordt door de transportschroef, die met een iets hoger toerental dan de trommel draait, gelost. Het centrifugaat wordt via een keer- annex overloopschijf, ter hoogte van de slibinvoer afgevoerd.



Figuur 4.1: Een decanteercentrifuge

Met behulp van de wet van Stokes kan het scheidingsproces theoretisch worden bekeken.

$$v = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot \omega^2 \cdot r}{18 \cdot \mu} \quad [4.1]$$

waarin: v	= bezinksnelheid (slib)deeltje	[m/s]
r	= straal centrifuge	[m]
ω	= hoeksnelheid ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$)	[rad/s]
ρ_s	= soortelijke massa (slib)deeltjes	[kg/m ³]
ρ_w	= soortelijke massa water	[kg/m ³]
d	= diameter (slib)deeltje	[m]
μ	= dynamische viscositeit	[kg/m.s]

Het scheidingsrendement van een decanteercentrifuge is vaak een probleem. De werking van centrifuges kan met behulp van de zogenaamde scheidingsdiameter (d_t) - dit is de diameter van de deeltjes die nog juist worden afgescheiden - worden gekarakteriseerd (Reuter; 1961):

$$d_t = \frac{3}{r_h} \sqrt{\frac{Q \cdot \mu}{(\rho_s - \rho_w) \cdot \omega^2 \cdot \pi \cdot L}} \quad [4.2]$$

waarin: d_t	= afscheidingsdiameter	[m]
Q	= debiet	[m ³ /s]
r_h	= diameter overloop	[m]
L	= lengte van de trommel	[m]

Uit deze formule is af te leiden hoe de afscheidingsdiameter en daarmee dus het scheidingsrendement beïnvloed kan worden.

Het toerental van de trommel (n), het verschil in toerental tussen trommel en schroef (Δn) en het vloeistofniveau in de centrifuge (h) zijn de voornaamste machinevariabelen. Verhoging van het toerental zal een hoger droge stofgehalte en een beter scheidingsrendement opleveren. Om praktische redenen, zoals slijtage van de machine, kan het toerental niet onbeperkt

worden opgevoerd. Door te hoge centrifugale krachten zou bovendien vlokbeschadiging op kunnen treden.

Door variatie van het verschil in toerental kan de koekinhoud in de droogzone en daarmee de verblijftijd van de vaste stof worden gevarieerd. Verkleining van het verschil in toerental geeft een grotere verblijftijd en daardoor een hoger eind droge stofgehalte.

Door verstelling van de keerschijf kan de grootte van de droogende vloeistofzone worden ingesteld. Een grote diameter van de keerschijf resulteert in een grote droogzone en een ondiepe vloeistofzone (h klein). Hierdoor wordt de verblijftijd van de vloeistof in de centrifuge korter, waardoor het scheidingsrendement afneemt. Het droge stofgehalte van het ontwaterde slib neemt dan evenwel toe.

Het eind droge stofgehalte is afhankelijk van de soort en de dosering van het polymeer en van het begin droge stofgehalte van het slib. Uit verschillende literatuurbronnen (STORA; 1981) werd voor verschillende soorten slib onderstaand bereik van eind droge stofgehalten verkregen:

- 1) Primair slib: 23 - 35 gew%
- 2) Primair + actief slib: 18 - 24
- 3) Primair + humusslib: 20 - 25
- 4) Actief slib: 12 - 16
- 5) Humusslib: 15 - 20
- 6) Gemineraliseerd slib: 12 - 18
- 7) Uitgist slib: gem. 25

4.3.2 Persen

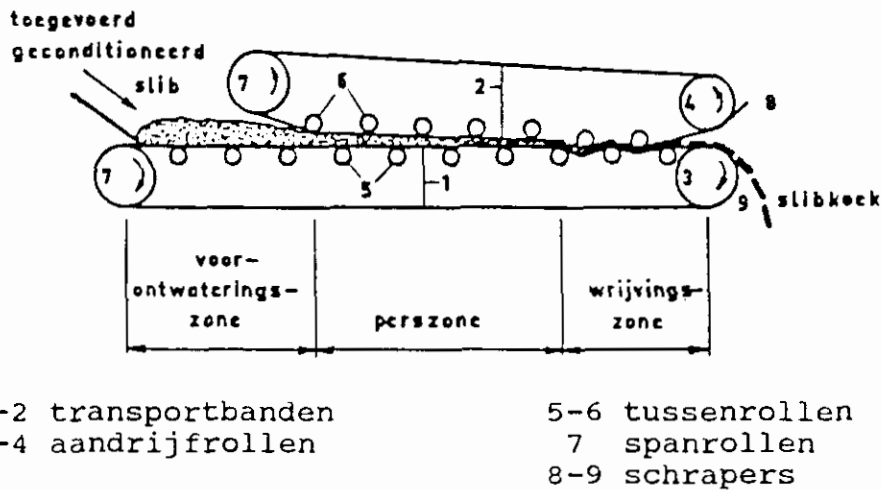
Persen is een filtratietechniek, die kan worden uitgevoerd in een zeefbandpers, een kamerfilterpers of een vacuümfilter.

De zeefbandpers

In figuur 4.2 is het principe van de werking van een zeefbandpers schematisch weergegeven. Het te ontwateren slib wordt in een doseer- annex menginrichting (meestal een roterende trommel) geconditioneerd en van daaruit op de zeefband gebracht. Het geconditioneerde slib passeert achtereenvolgens een (voor)ontwateringszone, een perszone en een wrijvingszone. Aan het eind van de pers wordt het ontwaterde slib met behulp van schrapers van de band gelost.

De bandsnelheid en de druk op de banden zijn de voornaamste instelbare machinevariabelen. Het eind droge stofgehalte van de koek van de zeefbandpers is echter moeilijk te beïnvloeden. Dit wijst op een beslissende invloed van het uitgangsslib en van het type zeefbandpers op het eind droge stofgehalte.

Qua uitvoeringsvorm onderscheidt men naar de vorm van de band, twee verschillende soorten zeefbandpersen: De vlakke en de "zigzagvormige". Met de zigzagvormige zeefbandpersen wordt doorgaans een iets hoger eind droge stofgehalte behaald. Dit komt omdat er in een zigzagvormige zeefbandpers schuifspanningen worden opgewekt, waardoor de koek minder snel dichtslaat.

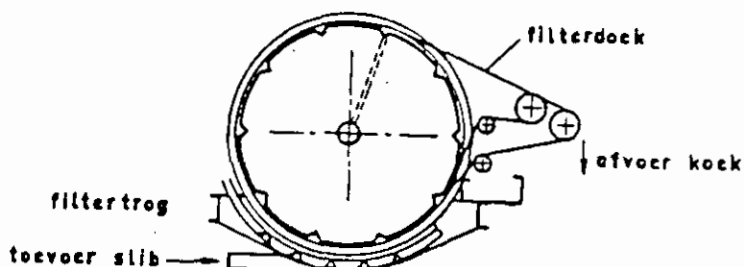


Figuur 4.2: Schematische voorstelling van een vlakke zeefbandpers

Met vlakke zeefbandpersen kan voor primair, uitgegist en actief-slib maximaal een eind droge stofgehalte behaald worden van respectievelijk 25, 28 en 12 gew%. Voor persen met zigzagvormige banden zijn deze percentages: 30, 31 en 24 gew%.

Het vacuümfilter

Bij de ontwatering met vacuümfilters wordt het water onder onderdruk (± 60 kPa) uit het slib gezogen. Dit gebeurt via een langzaam draaiende, met filterdoek bespannen trommel, die het slib vanuit een filtertrog aanzuigt. Het filtraat wordt via een verdeelkop weggepompt. Het ontwaterde slib wordt na passage van een droogzuigsectie van het doek losgemaakt en afgevoerd. Een en ander is schematisch weergegeven in figuur 4.3.



Figuur 4.3: Roterend vacuümfilter

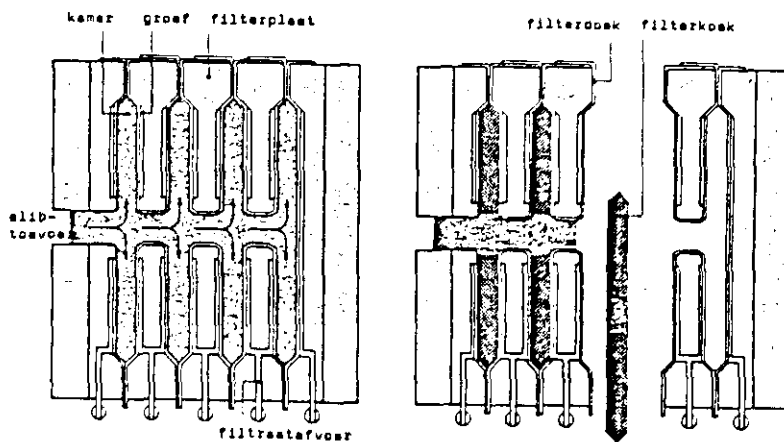
Het toerental van de trommel en de indompeldiepte zijn de instelbare machinevariabelen. De filtratiedruk is de instelbare procesvariabele.

Uit de literatuur (STORA; 1981) is voor diverse soorten slib het onderstaande bereik in droge stofgehalte gevonden:

- 1) Vers primair: 25 - 38 gew%
- 2) Uitgegist primair: 25 - 32
- 3) Primair + humus: 20 - 30
- 4) Primair + actief: 16 - 28
- 5) Anaeroob uitgegist primair + actief: 14 - 22.

De filterpers

Van de verschillende typen filterpersen wordt de kamerfilterpers het meest gebruikt voor de ontwatering van slib. De pers is opgebouwd uit een groot aantal naast elkaar geplaatste ontwateringsruimten, de kamers (zie figuur 4.4). Het (geconditioneerde)



Figuur 4.4: Doorsnede van een kamerfilterpers (schematisch)

slib wordt centraal ingevoerd. De vaste slibdeeltjes worden in de filterkamers, afgezet. Het afgescheiden water wordt door het filterdoek via het geribde oppervlak van de filterplaten afgevoerd. Als de filterkamers gevuld zijn met ontwaterd slib, wordt de filterpers geopend en de slibkoek gelost. Het ontwateren van slib met een filterpers is een discontinu proces.

Naast de kamerfilterpers bestaat er ook zgn. membraanfilterpers. Dit is een gemodificeerde kamerfilterpers, waarbij zich tussen het filterdoek en de filterplaat een elastisch membraan bevindt. Hiermee kan de kamerdiepte worden verkleind en kan de koek worden nageperst.

De filterpers heeft geen instelbare machinevariabelen, wel een instelbare procesvariabele, nl. de filtratiedruk. Ook de drukopbouw (toename van de filtratiedruk als functie van de tijd) kan als variabele worden beschouwd. Een drogestofgehalte van 30 tot 45% is haalbaar; afhankelijk van de slibsoort zijn hier meer of minder conditioneringsmiddelen voor nodig en is de cyclustijd korter of langer.

N.B. Uit gesprekken met afvalwaterzuiveraars blijkt dat de voor deze ontwateringsapparaten aangegeven droge stofgehalten in de praktijk vaak niet bereikt worden.

De filtratietheorie

De theoretische beschrijving van het filtratieproces gaat in principe op de onderstaande wijze (Coulson; 1978):

$$\text{snelheid} = \frac{\text{drijvende kracht}}{\text{weerstand}}$$

$$u = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot l \cdot R_t} \quad [4.3]$$

waarin: u = superficiële stromingssnelheid [m/s]
 A = dwarsoppervlak van het bed [m²]
 V = hoeveelheid doorgelopen filtraat op tijdstip t [m³]
 t = tijd [s]
 ΔP = drukverschil [Pa]
 μ = viscositeit [Pa.s]
 l = dikte van de filterkoek [m]
 R_t = totale specifieke filtratieweerstand [m⁻²]

Indien wordt aangenomen dat de porositeit (ϵ) constant en de weerstand van het filtermedium verwaarloosbaar is, kan volgens Kozeny de totale weerstand, R_t , als volgt worden uitgedrukt:

$$R_t = \frac{K_0 \cdot (1-\epsilon)^2 \cdot S^2}{\epsilon^3} \quad [4.4]$$

waarin: S = specifiek oppervlak van de deeltjes [m⁻¹]
 K_0 = constante van Kozeny

Vaak wordt voor K_0 de waarde 5 gebruikt, hoewel K_0 afhankelijk is van o.a. de porositeit en de deeltjesvorm.

Bij het ontstaan van een filterkoek zal de porositeit echter niet constant zijn, maar zal afhankelijk zijn van de aard van het ondersteunend materiaal, geometrie en oppervlaktestructuren en van de snelheid van de koekgroei. De beginfase van de koekvorming is erg belangrijk vanwege:

- 1) In het begin is de filtratiesnelheid hoog en de weerstand klein.
- 2) Hoge beginsnelheden kunnen verstopping van het filterdoek veroorzaken waardoor hoge weerstanden ontstaan.
- 3) De oriëntatie van de deeltjes in de eerste lagen kan een belangrijke invloed hebben op de structuur van de gehele filterkoek.

De filtratieweerstand wordt vaak gesplitst in een koekweerstand en een mediumweerstand:

$$u = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot (r \cdot C \cdot V/A + R_m)} \quad [4.5]$$

waarin: r = specifieke weerstand per massaeenheid koek [m/g]
 C = massa droge stof in filterkoek per volume-eenheid filtraat [g/m³]
 R_m = weerstand van het filtermedium [1/m]

De weerstand van het filtermedium wordt op verschillende manieren in de berekening opgenomen. Er kan verondersteld worden dat deze weerstand constant is, of de filterweerstand kan gelijkgesteld worden aan de weerstand die optreedt door filtratie van een bepaalde hoeveelheid filtraat. Ook kan de filtratieweerstand van het medium verwaarloosd worden door het filtraat dat in de eerste fase (bijv. de eerste 2 minuten) ontstaat, niet te beschouwen. Hierdoor ontstaat de volgende vergelijking:

$$u = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot r \cdot C \cdot V/A} \quad [4.6]$$

of na integratie:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \cdot r \cdot C}{2 \cdot P \cdot A^2} \cdot V \quad [4.7]$$

Notebaert (1975) toonde aan dat de weerstand van een schoon filtermedium te verwaarlozen is t.o.v. de weerstand van de filterkoek, zelfs al is deze zeer dun. Hieruit concludeerde hij dat het realistisch is om de filtratieweerstand van het medium op te nemen in de filtratieweerstand van de koek. Zodoende wordt de weerstand die optreedt als gevolg van het dichtslibben van het medium beschouwd als een karakteristiek van het slib.

De filterkoek die ontstaat tijdens de filtratie kan wel en niet samendrukbaar zijn. Bij niet samendrukbare filterkoeken is de stromingsweerstand niet afhankelijk van het drukverschil. Een samendrukbare filterkoek vormt bij een hoger drukverschil een dichtere filterkoek met een hogere weerstand. Slib is een materiaal dat een samendrukbare filterkoek oplevert. Samendrukbare koeken zijn nog verder onder te verdelen in irreversibel en reversibel (elastisch) samendrukbare koeken. Bij irreversibel samendrukbare koeken is het van belang dat het drukverschil tijdens het filtreren geen "uitschieters naar boven" vertoont. Bij elastische filterkoeken zou door intermitterend persen de ontwatering kunnen verbeteren. De meeste samendrukbare koeken zijn irreversibel samendrukbaar.

Voor samendrukbare filterkoeken zijn verschillende vergelijkingen opgesteld die de invloed van de druk op de filtratieweerstand en de porositeit weergeven. Deze relaties zijn van de volgende vorm:

$$r \sim p^s$$

waarin: p = de toegepaste druk [Pa]
 s = de compressibiliteit of samendrukbaarheid [-]

Daarnaast is de porositeit van de filterkoek een functie van de afstand tot het filtermedium (Tiller; 1977). Als de deeltjes worden afgezet op het oppervlak van de filterkoek, stroomt de vloeistof door de open ruimten tussen de deeltjes. Vanwege de wrijvingskrachten die de deeltjes uitoefenen op het passerende water vindt er over de koek een afname van de hydraulische druk (p_L) plaats. Door de meesleepkrachten op de deeltjes treedt er een samendrukking op, waardoor de porositeit afneemt. De totale meesleepkracht wordt van het ene op het andere deeltje doorgegeven en wordt de samendrukkende meesleepdruk, p_S , genoemd. De hydraulische druk en de meesleepdruk zijn als volgt aan elkaar gerelateerd:

$$p_S + p_L = p$$

$$dp_S + dp_L = 0$$

waarbij de toegepaste druk, p , constant is of een functie van de tijd, t . Verder zijn p_S en p_L een functie van de afstand tot het medium, x , en eventueel van de tijd. Indien wordt aangenomen dat de lokale porositeit, ϵ , en de lokale filtratieweerstand, α , (of de permeabiliteit, K) alleen een functie zijn van p_S , geldt de onderstaande stromingsvergelijking (Tiller; 1986):

$$\frac{dp_L}{dw} = \mu \cdot \alpha \cdot (u - eq) \quad [4.8]$$

waarin: α = lokale filtratieweerstand [m/kg]
 w = massa droge stof per oppervlakte-eenheid [kg/m²]
 e = void ratio = $\epsilon/(1-\epsilon)$ [-]
 ϵ = porositeit [-]
 q = superficiële stromingssnelheid van de vaste stof [m/s]

Voor vaste bedden geldt dat $q = 0$ en voor verdunde slurries kan q verwaarloosd worden:

$$\frac{dp_L}{dw} = - \frac{dp_S}{dw} = \mu \cdot u \cdot \alpha \quad (\text{verg. van Ruth}) \quad [4.9]$$

of

$$\frac{dp_L}{dx} = - \frac{dp_S}{dx} = \frac{1}{K} \cdot \mu \cdot u \quad (\text{verg. van Darcy}) \quad [4.10]$$

waarin: K = permeabiliteit = $1/(\mu_S \cdot \alpha \cdot (1-\epsilon))$ [m⁻²]

De vergelijking van Darcy [4.10] kan anders geschreven worden:

$$\mu \cdot u \cdot dx = -K \cdot dp_S$$

Deze vergelijking kan geïntegreerd worden over een gedeelte van de koek en de gehele koek. De randvoorwaarden zijn als volgt:

	x	p_s	p_L
medium	0	p	0
binnen de koek	x	p_s	p_L
grensvlak slurry/koek	L	0	p

$$\mu \cdot u \cdot (L-x) = \int_0^{p_s} K \cdot dp_s \quad [4.11]$$

$$\mu \cdot u \cdot L = \int_0^p K \cdot dp_s \quad [4.12]$$

Deze laatste vergelijking geeft de relatie tussen de koekdikte, L, de stromingssnelheid, u, en de drukval over de koek, p.

Tiller (1973) toonde aan dat bij filtratie van samendrukbare materialen, waarbij een snelle verandering in filtratieweerstand optreedt bij lage drukken, een dunne huid van droog materiaal wordt gevormd tegen het medium. In deze dunne huid vindt het grootste gedeelte van de hydraulische drukval plaats. Verhoging van de druk heeft daarom weinig effect op de gemiddelde porositeit, zodat toepassen van hogere hydraulische drukken dan ook niet effectief is voor verdere ontwatering.

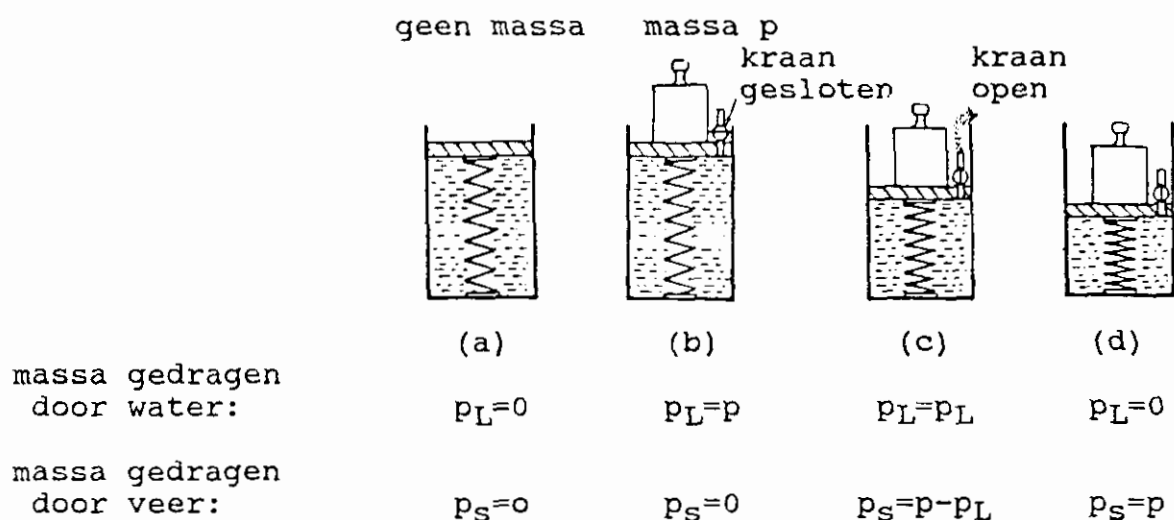
Indien het ontwateringsproces zover is gevorderd dat de gehele slurry uit filterkoek bestaat, kan het ontwateringsproces niet meer met de filtratievergelijkingen beschreven worden. Verdere ontwatering, door Wakeman (1986) post-filtratie genoemd, kan dan als volgt worden bewerkstelligd:

- 1) door mechanische compressie
bijv. membraancompressie in een membraanfilterpers.
- 2) door hydraulische compressie
bijv. het leiden van wasvloeistof door de filterkoek.
- 3) door drainage
bijv. verdringing door gasen, elektro-osmose

Bij mechanische compressie, consolidatie, is het de bedoeling dat de porositeit van de koek wordt verkleind, waardoor het water dat in de poriën zit wordt verdreven. Om het consolidatieproces beter te begrijpen wordt het volgende gedachtenexperiment uitgevoerd (Terzaghi; 1948), zie figuur 4.5. In een cilinder die gevuld is met water zit een veer (a). Op het water wordt een wrijvingsloze zuiger aangebracht met daarop een massa, die een druk p veroorzaakt (b). Deze massa wordt geheel door de vloeistof gedragen. Indien de zuiger wordt voorzien van een kraantje zal bij opening van het kraantje de zuiger zakken (c). De vloeistofdruk is dan p_L en de druk op de veer p_s . Op een bepaald ogenblik is er een evenwicht bereikt (d). De vloeistofdruk is dan nul geworden en de gehele opgelegde druk wordt door de veer gedragen ($p_s=p$). De veer in het model van Terzaghi stelt de vaste stof voor en het water in de cilinder stelt het water in de poriën voor.

Shirato (1986) heeft, met relaties uit de grondmechanica, de consolidatieperiode theoretisch beschreven. Het resultaat is een

vergelijking waarin de mate van consolidatie (inklinking van het bed) wordt beschreven als functie van de consolidatietijd.



Figuur 4.5: Schematische weergave van het Terzaghi model

Om de ontwatering van sterk samendrukbare, huidvormende filterkoeken te verbeteren kan na de filtratie de stromingsrichting omgedraaid worden (Tiller; 1983). Dit is een voorbeeld van hydraulische compressie. Indien de stromingsrichting verandert dient de huid als zuiger die het nog niet samengedrukte deel van de koek samendrukt. Volgens Tiller is afvalwaterslib een materiaal waarbij huidvorming optreedt, en waarbij het principe van verandering van de stromingsrichting dus toegepast kan worden.

Ontwatering door verdringing met gassen, bijv. lucht, wordt voornamelijk toegepast op filterkoeken die een grotere permeabiliteit hebben en die opgebouwd zijn uit grovere deeltjes die weinig samendrukbaar zijn (Wakeman; 1986). Door de verdringing wordt een gedeelte van het water vervangen door lucht. Slib is een materiaal dat niet aan de bovenstaande voorwaarden voldoet. Over toepassing van verdringing met lucht op slib is in de geraadpleegde literatuur dan ook niets gevonden.

Door verandering van de structuur van het slib, bijv. door fysische of chemische conditionering, is het wellicht mogelijk om door verdringing met lucht toch een verdergaande ontwatering te bereiken. Verder is het met de verdringingstechniek misschien mogelijk om de stromingsrichting in de filterkoek om te keren, zodat naast een gedeeltelijke verdringing ook een compressie-effect optreedt. Een voorwaarde voor het succesvolle toepassen van de verdringingstechniek met lucht is dat er niet te veel kanaalvorming ("channeling") optreedt.

5 Nieuwe ontwateringstechnieken

5.1 Verbeterde mechanische ontwatering

5.1.1 Modificaties van bestaande apparatuur

Er zijn de laatste jaren enkele ontwateringsapparaten ontwikkeld die gebaseerd zijn op reeds bestaande apparaten. In de meeste van deze apparaten hoopt men door toevoeging van een extra compressietrap een verdergaande ontwatering te bereiken. Voorbeelden van deze nieuwe apparaten zijn de centripers, de CHP-hogedrukfilterpers en de membraanfilterpers.

De centripers (Gildemeister; 1988) is een decanteercentrifuge waaraan een uitperszone de zgn. compactiezone is toegevoegd.

De CHP-hogedrukfilterpers (Loll; 1986, 1988) is een continu werkende filterpers waarbij aan het einde de druk op kan lopen tot zo'n 2000 kPa (CHP = Continues High Pressure).

De membraanfilterpers (Wöstmann; 1988) is reeds in 4.3.2 kort besproken.

5.1.2 HI-compact

Het HI-compact proces (Gildemeister; 1988) is een tweede stap ontwateringsproces. Het, bijvoorbeeld op een zeefbandpers, voorontwaterde slib wordt gepelleteerd en bedekt met een poedervormige drainagelaag. Indien deze pellets uitgeperst worden, ontstaat een netwerk van drainagelaagjes waarlangs het water kan worden afgevoerd. Het water hoeft in dit proces dus maar een kleine afstand met een hoge stromingsweerstand af te leggen, tot het een drainagelaag bereikt. Bij fysisch conditioneren wordt ook een drainagemateriaal toegevoegd aan het slib alvorens dit uit te persen. Het grote verschil is dat bij fysisch conditioneren het drainagemateriaal homogeen gemengd wordt. Hierdoor zullen bij persen van dit mengsel, veel doodlopende drainagekanaaltjes worden gevormd.

De voorontwatering van het slib moet een koek opleveren waar pellets van gemaakt kunnen worden. Dit komt neer op koek die zo'n 20 tot 28% droge stof bevat. Als drainagemateriaal kan bijv. vliegask, maar ook as van slibverbranding worden gebruikt. De optimaal toe te voegen hoeveelheid drainagemateriaal is ongeveer 50%, berekend op droge stofbasis.

Door toepassing van de HI-compact kunnen droge stofgehaltes van 55 tot 65% bereikt worden met druk van 5000 kPa en een perstijd van slechts 1,5 tot 2 minuten. Met vergelijkbare hoeveelheden conditioneringsmateriaal kan in een filterpers 40 tot 45% d.s. worden behaald.

HI-compact is ontwikkeld door de firma KHD Humboldt Wedag AG te Koln, met financiële steun van het ministerie van onderzoek en technologie te Bonn.

5.1.3 Multilaagfiltratie

In de Franse suikerindustrie is de ultrapers ontwikkeld (Pléver; 1988). Dit is een radiale membraanpers waarbij het principe van

de multilaagfiltratie wordt toegepast. Bij multilaagfiltratie worden vele dunne laagjes te ontwateren materiaal boven elkaar gestapeld met daartussen steeds een filterdoek, waardoor het water afgevoerd kan worden. In de ultrapers wordt dit principe als volgt uitgevoerd: Het slib wordt uitgespreid op een filterdoek, dat om een ronde staaf wordt gewikkeld in concentrische lagen. Dit geheel wordt in een met rubber gevoerde cilinder geleid en onder druk gezet door het rubbermembraan met behulp van waterdruk tegen de cilinder te persen. Het water uit het te ontwateren produkt wordt door het filterdoek naar de uiteinden van de cilinder getransporteerd, waar het kan worden afgevoerd. Het eerste industriële prototype is in 1985 toegepast in de suikerindustrie. Experimenten met andere te ontwateren produkten waaronder rwzi-slib zijn zeer hoopvol. Slib met een aanvangsdroge stofgehalte van 15% kan worden ontwaterd tot 60% droge stof.

Nadere gegevens zijn tot dusverre niet bekend.

5.2 Magnetische scheiding

Magnetische velden kunnen toegepast worden voor de scheiding van vaste stof en vloeistof. In het verleden was deze methode alleen toepasbaar op stoffen met ferromagnetische eigenschappen. Door de ontwikkeling van magneten met grotere veldsterkte is het ook mogelijk om stoffen met paramagnetische eigenschappen af te scheiden (High Gradient Magnetic Separation - HGMS).

Rwzi-slib heeft zelf geen paramagnetische eigenschappen. Door enting van dit slib met paramagnetische stoffen, zoals bijv. magnetiet, is het toch mogelijk om het slib van het water te scheiden. Onderzoeken naar de toepassing van magnetische velden in de ontwatering van slib beperken zich tot verbetering van de indikking van het actief slib uit het aëratiebassin. De resultaten daarvan lijken hoopvol. Uit economisch oogpunt zal de entstof die vermengd is met het slib teruggewonnen moeten worden.

Het schijnt niet mogelijk te zijn om door toepassing van magnetische velden te komen tot hoge droge stofgehalten. In hoeverre magnetische velden in combinatie met andere velden het ontwateringsproces positief kunnen beïnvloeden is in de bestudeerde literatuur niet beschreven.

5.3 Osmotisch ontwateren

Osmose is een proces waarbij er transport van water ontstaat van een sterk geconcentreerde oplossing naar een minder sterk geconcentreerde oplossing indien deze oplossingen gescheiden zijn door een semi-permeabel membraan.

Indien aan een kant van een semi-permeabel membraan slib en aan de andere kant een geconcentreerde zoutoplossing wordt gevoerd ontstaat er een drijvende kracht die het water uit het slib naar de zoutoplossing transporteert. Door dit proces zal de zoutoplossing verdund worden, waardoor de drijvende kracht afneemt. Om de drijvende kracht constant te houden moet de zoutoplossing steeds opnieuw geconcentreerd worden. Dit is technisch eenvoudiger te realiseren dan de ontwatering van slib.

Er is niet veel onderzoek verricht naar deze slibontwaterings-techniek. Het grote voordeel van osmotisch ontwateren is volgens Pugsley (1975) dat zonder toevoegingen aan het ruwe slib, toch hoge droge stofgehaltes (tot 35 gew%) haalbaar zijn. Pugsley concludeerde dat er nog veel onderzoek moet worden verricht om te bezien in hoeverre het proces economisch verantwoord is. In verband hiermee moet ook onderzocht worden hoe de waterflux kan worden verhoogd, bijv. door verbetering van het membraan.

5.4 Vriesdooien

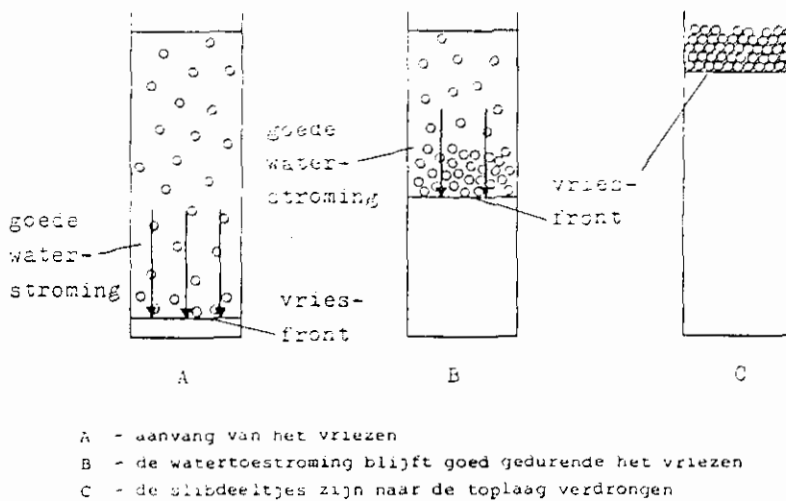
Door achtereenvolgens bevriezen en weer ontdooien van slib wordt de ontwaterbaarheid sterk verbeterd. Vriesdooien is een conditioneringstechniek die bij het ontwateren van drinkwaterslib (dat in tegenstelling tot afvalwaterslib veel anorganisch materiaal bevat) erg succesvol is gebleken. Voor afvalwaterslib is nog niet erg veel onderzoek naar deze methode verricht. Vriesdooien is in de praktijk voor afvalwaterslib alleen toegepast in gevallen waarin het klimaat voor natuurlijke invriezing borg staat. In deze gevallen was sprake van een zeer goede ontwatering. Droge stofgehaltes tot 70% bleken haalbaar (Reed; 1986, 1987). Kunstmatig vriesdooien wordt in de meeste literatuur als te duur beschouwd.

5.4.1 Mechanismen werkzaam bij vriesdooien

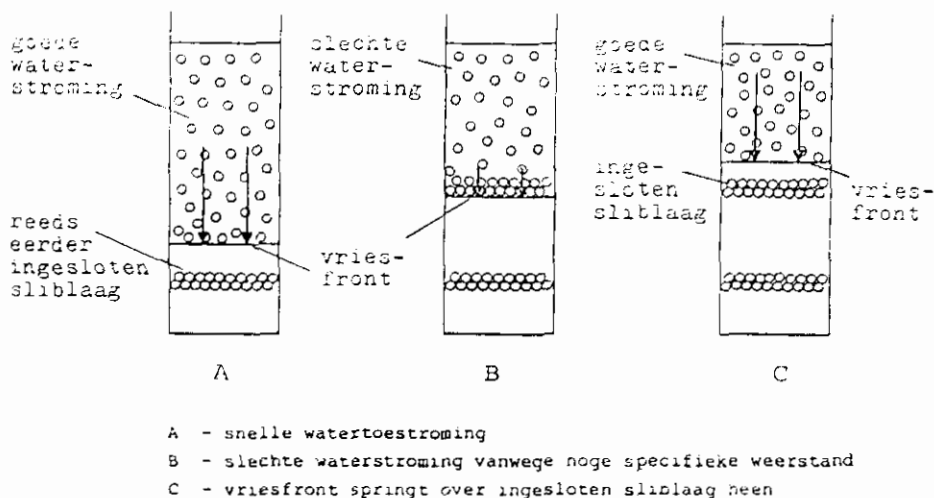
Door het invriezen van slib wordt de structuur zodanig gewijzigd dat na ontdooien een sterke verbetering van de ontwaterbaarheid optreedt. Bij onderzoek naar o.a. het invriezen van coagulatieslib (Koreman; 1988) en afvalwaterslib (Bahrs; 1978) is enig inzicht verkregen in de mogelijk optredende mechanismen bij vriesdooien:

- 1) In eerst instantie werd gedacht dat de druk, die werd uitgeoefend op het colloïdale systeem, door de volumevergroting van het ijs tijdens invriezen, coagulatie veroorzaakte. Dit wordt echter tegengesproken door verschillende experimenten. Wanneer het slib onder hoge druk wordt gebracht, treedt geen conditionerende werking op. Wanneer slib zodanig wordt ingevroren dat nauwelijks druk kan optreden, of in een medium dat niet uitzet bij invriezen treedt echter wel conditionering op.
- 2) Wanneer slib langzaam (eenzijdig) wordt ingevroren worden de vaste stofdeeltjes verdrongen, waarbij gelijktijdig water wordt onttrokken aan de waterholten van de vaste deeltjes. De molekulen nabij het vriesfront schikken zich zodanig, dat zij in de kristalstructuur van ijs passen. Inpassing van andersoortige deeltjes in het netwerk gaat gepaard met grote lokale spanningen. Vaste deeltjes worden weggedrukt uit de laag kristalliserend water. Er wordt een zich concentrerende slibdeken voor het vriesfront uitgedreven. Boven de slibdeken is de samenstelling van de vloeistof ongewijzigd. Door diffusie verplaatst het water zich door de slibdeken naar het vriesfront waar het kristalliseert (zie figuur 5.1).

Wanneer de concentratie gesuspendeerde deeltjes hoog is, zoals bij afvalwater het geval is, neemt de weerstand tegen de waterverplaatsing door de slibdeken snel toe. De inpas-sing van watermolekullen in de ijsstructuur wordt steeds sterker belemmerd. Er ontstaat onderkoeling aan het vries-front. De onderkoeling neemt af door de slibdeken heen. Aan de andere zijde van de slibdeken gaan gunstige omstandighe-den heersen voor de vorming van kristallisatiekernen. De vriesisotherm verplaatst zich naar plaatsen waar de omstan-digheden voor watertoetreding gunstig zijn. De slibdeken wordt door het ijs ingesloten en aangroei van een nieuwe ijslaag begint van voren af aan. Er ontstaat een opeenvol-ging van lagen ijs en geconcentreerd slib (zie figuur 5.2).

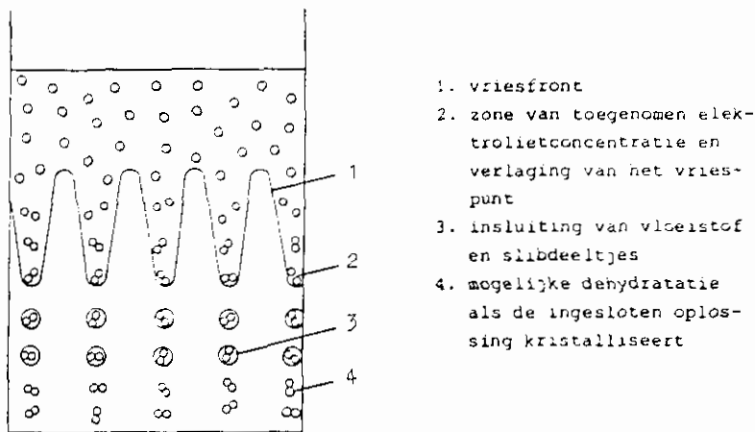


Figuur 5.1: Vriesdooimechanisme bij langzaam invriezen



Figuur 5.2: Vriesdooimechanisme bij hoge concentraties disperse deeltjes

- 3) Ook opgeloste stoffen verstoren de opbouw van de netwerkstructuur bij bevriezing en zullen voor het vriesfront worden uitgedreven. Door hun valentie verstoren zij de polaire bindingen van het ijs. Wanneer de opgeloste stoffen niet snel genoeg diffunderen zal een sterke concentratiegradiënt vlak boven het vriesfront ontstaan en zal als gevolg hiervan een vriespuntsverlaging optreden. Op enige afstand van het vriesfront zal eerder stolling kunnen optreden, waardoor vaste en opgeloste deeltjes zullen worden ingesloten (zie figuur 5.3). De zouten in het slib worden tijdens invriezen in het nog niet bevroren water geconcentreerd.



Figuur 5.3: Vorm van het vriesfront bij een hoge elektrolytconcentratie

- 4) Door bevriezing vindt een scheiding van water en vaste stof plaats. Als wezenlijke oorzaak van deze scheiding kan de "ijs-water verschildruk", voortkomende uit de grensvlakspanning tussen ijs, water en vaste stof, worden aangewezen. Door deze druk stroomt een hoeveelheid water naar het vriesfront, waardoor de vaste stof door het aangroeiende ijs wordt verdrongen. Het conditioneringsmechanisme kan op deze manier als filtratie beschreven worden, waarbij de filtratiedruk door het invriezen wordt voortgebracht.

5.4.2 Uitvoeringsvormen van het vriesdooien

Het kunstmatig invriezen van slib kan in principe op twee manieren worden uitgevoerd:

- 1) Direct invriezen, waarbij het slib rechtstreeks in contact wordt gebracht met een (verdampend) koelmiddel.

Door Randall (1975) werd slib ingevroren door er vloeibaar butaan door te laten borrelen. Door het slib slechts tot een slurry te bevriezen worden de celwanden van het slib niet kapot gedrukt en is de kwaliteit van het filtraat beter dan bij bevriezing tot het slib geheel de vaste toestand heeft

bereikt. Bovendien is de ontwaterbaarheid volgens dit onderzoek bij partiële bevriezing beter dan bij totale bevriezing. Het conditionerende effect is vergelijkbaar met, of beter dan conditionering door hittebehandeling. Het butaan kan uit economisch oogpunt worden teruggewonnen. Volgens de auteur zijn de kosten van het directe vriesproces lager dan die van de meeste andere momenteel in gebruik zijnde processen. Het proces wordt, met aanzienlijk resultaat, op uitgebreide schaal toegepast voor ontzouten.

Murdoch (1976) heeft een apparaat gepatenteerd bestaande uit een buis gevuld met koelvloeistof (bijv. butaan), waar het slib druppelsgewijs aan wordt toegevoerd. Het butaan dat boven uit de buis komt wordt onderin teruggevoerd. Onderin de buis vindt ook het dooiproces plaats. Er vormt zich een waterlaag waarin de slibdeeltjes uitzakken.

Door Abson (1972) is een ontwateringsproces gepatenteerd, waarbij vóór het vriesproces zout aan het slib wordt toegevoegd. Het zout veroorzaakt een vriespuntsdaling van het vrije water. Door nu een koelvloeistof aan het slib toe te voegen moet niet het vrije water, maar het intra-cellulaire water bevriezen. De cellen breken hierdoor open en bij ontdooien komt het intra-cellulaire water vrij. Zowel de koelvloeistof als het zout kunnen worden teruggewonnen. Over de kwaliteit van het filtraat wordt niets vermeld.

- 2) Indirect invriezen, waarbij het slib wordt bevroren aan warmtewisselende oppervlakken.

Farrell (1973) concludeert dat de toepassing van het vriesdooiproces ernstig wordt beperkt door de noodzaak het slib langzaam in te vriezen. Cheng (1970) concludeert echter dat bij slib dat in dunne lagen (5,2-6,4 mm) en bij een klein temperatuurverschil wordt ingevroren de snelheid van invriezen geen noemenswaardige invloed heeft op het resultaat van het proces. Volgens Cheng is toevoegen van een conditioneringsmiddel noodzakelijk voor een goede ontwatering.

Matsumura (1972) heeft primair-, spui- en gemengd slib onderworpen aan vriesdooien. Door vriesdooien agglomereren de vaste stofdeeltjes tot grotere deeltjes, die na ontdooien makkelijker bezinken. Toevoegen van een (kationische) polyelektrolyt verbetert het resultaat. Voor spui- en gemengd slib had de invriessnelheid geen invloed, bij primair slib bleek langzaam invriezen het meest effectief. Volgens Matsumura neemt de volumereductie (de verhouding van de volumina ongeconditioneerd en geconditioneerd slib na 30 minuten bezinken) toe, bij een afname van het droge stofgehalte (ontwatering verbetert).

Bahrs (1978) concludeert daarentegen dat een hoger droge stofgehalte van het slib de ontwatering verbetert. Bahrs onderzocht de technische en economische haalbaarheid van indirect vriesdooien. Het slib werd ingevroren in een bak, met daarin plaatvormige bakken waar de koelvloeistof doorheen werd gevoerd. De laagdikte van het slib moet liggen tussen 12 en 24 mm, de temperatuur moet -5 °C of lager zijn. De eindconclusie luidt dat het indirecte vriesdooiproces

zeer duur is. Het is alleen haalbaar bij een zeer slecht ontwaterbaar slib, als tweede trap na voorontwatering tot minimaal 12 gew.% droge stof.

Het vriesdooiproces blijkt erg duur te zijn. Er zijn twee methodes waarmee de kosten van het proces kunnen worden verminderd.

- 1) Het vriesdooiproces kan worden toegepast als tweede trap in het ontwateringsproces. Moeilijk te ontwateren slib wordt met goedkope ontwateringsmethoden zo ver mogelijk voorontwaterd. Daardoor nemen de volumina slib die moeten worden ingevroren, en daarmee ook de kosten van het proces, sterk af. Het slib kan daarna met vriesdooien zo ver worden ontwaterd dat het autotherm kan worden verbrand.
- 2) Partieel invriezen.
Wanneer het slib wordt ingevroren, treedt er een scheiding op tussen het water en de vaste stof. Door het slib gedeeltelijk in te vriezen kan vrij zuiver ijs worden gescheiden van het geconcentreerde slib. De energiebehoefte van het proces kan op deze wijze worden beperkt. Om de scheiding tussen water en vaste stof te bevorderen kunnen eventueel trillingen op het slib worden overgebracht. Bij partieel invriezen wordt het vriesproces niet meer als een conditioneringstechniek gebruikt, maar als een ontwateringstechniek.

5.5 Elektrokinetisch ontwateren

Fijne (colloïdale) deeltjes in water bezitten over het algemeen een (negatieve) lading. De afstotende krachten tussen de deeltjes als gevolg van deze lading voorkomt agglomeratie en houdt de suspensie stabiel, waardoor deze moeilijk ontwaterd. Bij elektrokinetisch ontwateren wordt juist gebruik gemaakt van deze lading. Wanneer het slib wordt blootgesteld aan een elektrisch veld zal er een aantal mechanismen optreden die de ontwatering bevorderen: Agglomeratie (5.5.1), Elektroforese (5.5.2), elektroosmose (5.5.3) en elektrolyse (5.5.4). In paragraaf 5.5.5 worden de procesvariabelen nader bekeken.

5.5.1 Agglomeratie

In een elektrisch veld kunnen de ladingen van de deeltjes worden geneutraliseerd. Daardoor treedt agglomeratie op en wordt de ontwatering verbeterd (Muralidhara; 1986).

5.5.2 Elektroforese

Wanneer geladen deeltjes worden blootgesteld aan een elektrisch veld zullen ze zich naar de elektrode begeven met een lading tegengesteld aan hun eigen lading, dit wordt elektroforese genoemd. De maximale snelheid van de deeltjes wordt bereikt wanneer de wrijvingskracht gelijk is aan de elektrische kracht. Dit wordt weergegeven in de Helmholtz-Smoluchowski vergelijking:

$$V_e = \frac{d \cdot Z \cdot E}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \quad [5.1]$$

waarin: V_e = snelheid [m/s]
 d = diëlektrische constante [F/m]
 Z = zêta-potentiaal [V]
 μ = viscositeit [Pa.s]
 E = veldsterkte [V/m]

Volgens Krishnaswamy (1986) is V_e afhankelijk van de grootte, vorm en lading van de deeltjes. Hiermee wordt rekening gehouden door een factor f toe te voegen.

$$V_e = f \cdot \frac{d \cdot Z \cdot E}{\pi \cdot \mu} \quad [5.2]$$

De factor f varieert tussen 0 en $1/4$ en is afhankelijk van de verhouding tussen de diameter van het deeltje en de dikte van de elektrische dubbellaag.

Met elektroforese kan het dichtslaan van filters worden tegengegaan door tijdens de filtratie de deeltjes van het filter af te laten bewegen. Ook kan met elektroforese de sedimentatie van deeltjes worden versneld en de consolidatie van het bezonken materiaal worden verbeterd (Muralidhara; 1986, Murase; 1988).

5.5.3 Elektroosmose

Met elektroosmose kan water door een membraan of sliblaag worden verplaatst. De elektroosmotische flow is gebaseerd op de aanwezigheid van de elektrische dubbellaag aan de wand van capillairen. Ten gevolge van de oppervlaktelading van capillairen, zullen de ionen in de oplossing zodanig worden gerangschikt, dat deze lading wordt geneutraliseerd. De elektrische dubbellaag is opgebouwd uit twee lagen: De Sternlaag, 4 tot $10 \cdot 10^{-10}$ m dik en sterk gebonden aan de wand van het capillair en de diffuse (Gouy-Chapman) laag, die veel verder in de vloeistof reikt. Daar het systeem als geheel neutraal is moet de som van de lading in de Stern- en de Gouy-Chapman-laag gelijk zijn aan de oppervlaktelading van het capillair.

Wanneer nu een spanning wordt aangebracht aan de uiteinden van een capillair zal de lading in de diffuse laag zich in de richting van één elektrode begeven en een gedeelte van het water in de laag met zich mee slepen. Ook aan het oppervlak van geladen deeltjes en ionen zal zich water hechten. Onder invloed van een elektrisch veld kunnen de ionen en het daaraan gehechte water worden verplaatst.

In een slibkoek kunnen de vaste stofdeeltjes als immobiel worden beschouwd. Er treedt geen elektroforese meer op, alleen nog elektroosmose.

Onder deze omstandigheden kan het, met elektroosmose door een capillair verplaatste debiet, als volgt worden weergegeven (Krishnaswamy; 1986):

$$Q = A \cdot V_e = \frac{A \cdot d \cdot Z \cdot E}{4 \cdot \pi \cdot \mu} \quad [5.3]$$

waarin: Q = debiet door een capillair

A = oppervlak van de doorsnede van het capillair

A kan uit deze formule worden geëlimineerd:

$$E = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{i}{A} \quad [5.4]$$

waarin: λ = de specifieke geleidbaarheid

[S/m]

i = de stroomsterkte

[A]

Zodat:

$$Q = \frac{d \cdot Z \cdot i}{4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \lambda} \quad [5.5]$$

Yoshida (1986) splitst de specifieke geleidbaarheid nog in een specifieke geleidbaarheid van de vloeistof (λ_1) en een specifieke geleidbaarheid van de deeltjes (λ_p).

$$V_e = \alpha \cdot E \quad [5.6]$$

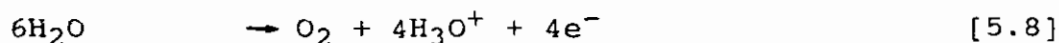
$$\alpha = \frac{d \cdot Z}{f} \cdot \frac{a \cdot \lambda_p}{b \cdot \lambda_1 + \lambda_p} \quad [5.6a]$$

a en b zijn constanten.

5.5.4 Elektrolyse

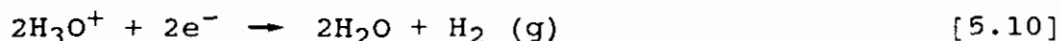
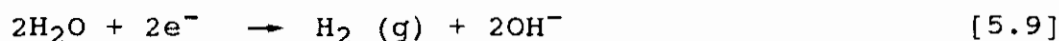
Volgens Lockhart (1986) wordt het effect van elektro-ontwateren niet alléén verklaard door de elektrokinetische processen (elektroforese en elektroosmose). Ook elektrolyse zou een belangrijke rol spelen.

Aan de anode kunnen de volgende reacties plaats vinden:



De aan de anode vrijkomende kationen gaan in oplossing en worden uitgewisseld tegen de aan de vaste deeltjes verbonden kationen.

Aan de kathode kunnen de volgende reacties plaats vinden.



Suspensies met kationen (Ca^{2+} , Na^+ , Al^{3+}) die moeilijk aan de kathode worden afgegeven (reactie [5.9] vindt plaats) bleken aanzienlijk moeilijker te ontwateren dan suspensies met kationen (Cu^{2+} , H_3O^+) die makkelijk aan de kathode worden afgegeven (reacties [5.10] en [5.11] vinden plaats). Het bleek mogelijk elektro-ontwatering in stand te houden uitsluitend gebaseerd op galvanische processen. Met een Mg-anode en een Cu-kathode werd een kleisuspensie ontwaterd.

Verder wordt in het onderzoek vermeld dat een deel van de ontwatering misschien wordt veroorzaakt door draaiende bewegingen ten gevolge van het zich richten van deeltjes in een elektrisch veld.

5.5.5 Procesvariabelen

Het resultaat van elektrokinetisch ontwateren is afhankelijk van een aantal parameters.

Het waterdebiet is tijdens elektro-ontwateren (bij één bepaalde suspensie en één bepaald droge stofgehalte) evenredig met de stroomsterkte (Lockhart; 1986, Krishnaswamy; 1986, Yoshida; 1988). De snelheid van ontwateren is dus (wanneer de overige dimensies constant blijven) evenredig met het aangelegde spanningsverschil tussen de elektroden. Bij hogere spanningen (en stroomsterkten) neemt het rendement echter af, doordat meer energie verloren gaat door warmteproductie en elektrode-reacties (Greyson; 1971).

Daar de ontwateringssnelheid evenredig is met de stroomsterkte, is deze bij gelijkblijvende spanning evenredig met het oppervlak van de elektroden en omgekeerd evenredig met de afstand tussen de elektroden. Voor een snelle ontwatering is het gunstig elektroden met een groot oppervlak dicht bij elkaar te plaatsen. Lockhart (1986) concludeert dat de energiebehoefte per liter verwijderd water onafhankelijk is van de afstand tussen en het oppervlak van de elektroden. Greyson (1971) vond echter dat de energiebehoefte toeneemt bij toenemende afstand tussen de elektroden. Hij wijt dit aan het groter wordende weerstandsverlies bij toenemende afstand tussen de elektroden. Voor een hoog ontwateringsrendement moet de afstand tussen de elektroden klein worden gehouden.

Wanneer elektrolyten in water worden opgelost, beïnvloeden deze de geleidbaarheid. De anionen en kationen die in oplossing gaan bewegen zich in tegengestelde richting. De elektroosmotische flux wordt niet verhoogd. Deze neemt in verhouding tot de ionenconcentratie af.

Door het toevoegen van elektrolyten wordt tevens de zêta-potentiaal verlaagd. Er is echter een hoge zêta-potentiaal nodig voor een stabiele suspensie en een goede elektro-ontwatering.

Volgens Lockhart (1986) is het resultaat van elektro-ontwateren mede afhankelijk van de elektrolyse-reacties. De vorming en afgifte van ionen aan de elektroden bepalen dan mede de stroomsterkte. De voor de elektroosmotische flux bepalende stroomsterkte verandert nu verhoudingsgewijs niet ten opzichte van de ionenconcentratie. Hogere concentraties ionen zijn volgens dit onderzoek niet nadelig voor de ontwatering, ze bleken in veel gevallen zelfs voordelig.

5.6 Akoestisch ontwateren

Het effect van akoestisch ontwateren is gebaseerd op de voortplanting van (ultrasone) golven door een medium. De voortplantingssnelheid is afhankelijk van onder andere de elasticiteit en de traagheid van het materiaal. Akoestische golven planten zich met sterk verschillende snelheden voort in gas, vloeistof en vaste stof. Ten gevolge van grote verschillen in akoestische impedantie ontstaan spanningen aan het vloeistof-vaste stof scheidingsvlak. Deze spanningen kunnen de viscositeit en de oppervlaktespanning beïnvloeden. Het water kan makkelijker van de deeltjes worden gescheiden en verdampt makkelijker, waardoor de ontwatering wordt verbeterd (Ensminger; 1986).

Er moet bij akoestisch ontwateren onderscheid worden gemaakt tussen systemen met een laag en systemen met een hoog vochtgehalte. Bij het eerste soort wordt een groot deel van de poriënruimte ingenomen door lucht. Bij systemen met een hoog vochtgehalte is bijna alle beschikbare poriënruimte gevuld met water. Bij het ontwateren van slib hebben we te maken met het tweede soort systeem. In dit geval kunnen twee verschillende methoden worden onderscheiden:

- 1) Akoestisch ontwateren bij een lage intensiteit, waarbij geen cavitatie optreedt.
- 2) Akoestisch ontwateren bij een hoge intensiteit, waarbij wel cavitatie optreedt.

5.6.1 Lage intensiteit akoestisch ontwateren

Bij lage intensiteit akoestisch ontwateren wordt in de suspensie een staande golf opgewekt. De vloeistofbeweging is in de knopen van de golf nul en neemt toe in beide richtingen tot een maximum. Door druk- en schuifspanningen, veroorzaakt door de vloeistofbeweging, worden de gesuspenderde deeltjes in de richting van een knoop gedwongen. In een knoop zullen de deeltjes in rust blijven (Ensminger; 1988).

Staande golven kunnen worden gebruikt voor het uitvlokken van fijn gesuspenderd materiaal. Wanneer staande golven worden overgebracht op een suspensie concentreren de vaste stofdeeltjes zich na verloop van tijd in lagen in de knopen van de golven. Er treedt coagulatie op, waardoor grotere agglomeraten worden gevormd. Na enige tijd worden de trillingen onderbroken om het geflocculeerde materiaal de gelegenheid te geven te bezinken.

5.6.2 Hoge intensiteit akoestisch ontwateren

Bij hoge intensiteit akoestisch ontwateren speelt, afhankelijk van de eigenschappen van de vloeistof en de vaste stofdeeltjes, een aantal effecten een rol (Ensminger; 1986, 1988, Kowalska; 1988, Muralidhara; 1986):

- 1) Wanneer de intensiteit van de golven een bepaalde waarde (cavitation threshold) overschrijdt, ontstaat cavitatie. Deze intensiteit hangt ondermeer af van: de frequentie, de

temperatuur, de oppervlaktespanning, de hydrostatische druk, de weerstand van de vloeistof tegen cavitatie en de graad van verzadiging met gas. Bij erg hoge frequenties wordt ook bij hoge intensiteiten geen cavitatie waargenomen. Het fenomeen cavitatie en de mechanismen die het veroorzaken zijn erg complex en kunnen tot op heden nog niet geheel worden verklaard.

Door cavitatie kunnen vrije ionen worden gegenereerd, deeltjes worden geërodeerd, vloeistoffen worden ontgast en uniforme dispersies worden gevormd.

- 2) Door trillingen kan de viscositeit van de vloeistof worden beïnvloed. Bij Newtonse vloeistoffen verandert de viscositeit niet. Bij dilitante vloeistoffen neemt de viscositeit toe bij dynamische (ultrasone) belasting. Bij thixotrope vloeistoffen neemt de viscositeit af bij dynamische belasting.
- 3) De trillingen bevorderen het verwijderen van gruis van een oppervlak, waardoor een groter vloeistofcontactoppervlak ontstaat. Door dit mechanisme wordt dichtslaan van filters tegengegaan en wordt het filtratieproces bevorderd.
- 4) Door ultrasone golven kan zowel coagulatie als dispersie worden veroorzaakt. Het is moeilijk vast te stellen wanneer coagulatie en wanneer dispersie zal optreden.

In een vloeistof met een colloïdale suspensie van deeltjes vindt volgens Kowalska alleen bij hogere frequenties coagulatie plaats. Coagulatie zou alleen plaatsvinden bij intensiteiten boven de cavitation threshold. Wanneer echter hoge intensiteiten lang worden gehandhaafd treedt weer dispersie op. Volgens Muralidhara treedt echter, wanneer er sprake is van cavitatie, direct afbraak van de vlokken en dispersie op.

De coagulatie hangt volgens Kowalska ondermeer af van de deeltjesgrootte, de suspensie en de frequentie. Er vormen zich zones, waar de vaste deeltjes zich concentreren en agglomereren tot grotere clusters. De chaotische beweging van deze deeltjes veroorzaakt botsingen en verder aangroeien.

Een andere oorzaak van de coagulatie is volgens Kowalska de verstoring van de elektrische dubbellaag van de deeltjes door de bewegingen. Er ontstaan dipolen, waardoor deeltjes elkaar kunnen aantrekken en coagulatie optreedt.

Muralidhara meldt dat door ultrasone trillingen verschillende krachten worden opgewekt (orthokinetische-, Bernoulli-, Stokes- en Oseenkrachten) die gezamenlijk coagulatie veroorzaken.

- 5) De trillingen veroorzaken een verhoging van de verdampings-snelheid aan het vloeistof-gas oppervlak. Door de trillingen ontstaan grote drukvariatiën. Gedurende één cyclus zal hierdoor afwisselend aan beide zijden van een deeltje vacuüm optreden.

- 6) Ultrasonische trillingen kunnen wanneer zij goed op een medium worden overgebracht "rectified diffusion" veroorzaken. Het materiaal wordt blootgesteld aan een opeenvolging van compressie en decompressie met de frequentie van de opgelegde golf. Het water wordt verwijderd op de wijze waarop een spons wordt uitgeknepen. Bij elke samenpersing komt een kleine hoeveelheid water vrij, tot evenwicht is bereikt. Elke opeenvolging van compressie en decompressie veroorzaakt een kleine vloeistofverplaatsing. Dit effect is waargenomen in materialen met een vezelachtige en sponsachtige structuur met een laag watergehalte (veel lucht in de poriën).

Het mechanisme treedt ook op bij materialen met een hoog watergehalte, zoals zuiveringsslib, wanneer het materiaal poriën bevat waardoor het vrijkomende gas en water kunnen ontsnappen. In vloeistoffen en vaste stoffen worden met ultrasonische trillingen veel hogere spanningen opgewekt dan in gassen. Als de statische druk niet te hoog is zal de slibkoek bij elke decompressie "breken" in een richting loodrecht op de golfvoortplantingsrichting en bij elke compressie in een richting parallel aan de voortplantingsrichting van de golven. Daarbij worden kleine kanaaltjes gevormd waardoor het uit de structuur geperste water kan ontsnappen. Bij een statische druk worden de poriën dichtgeslagen, bij akoestische trillingen worden de poriën in stand gehouden of gevormd, waardoor de ontwatering verbetert.

Ultrasonische golven planten zich door een medium voort met een snelheid die afhankelijk is van de fysische eigenschappen van het medium. Ten gevolge van absorptie, verstrooiing en schuifspanningen dempen de trillingen uit:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad [5.12]$$

Waarin: I_0 = Bronsterkte [dB]
 I_x = Intensiteit op een afstand x van de bron [dB]
 α = Dempingsfactor [1/m]

Op een bepaalde afstand van de bron zal de intensiteit van de golven onvoldoende zijn om ontwatering te bewerkstelligen. De laagdikte is bij akoestisch ontwateren beperkt.

Naast de intensiteit en de frequentie (20-50 kHz) noemt Ensminger (1986) nog een aantal factoren die de akoestische ontwatering beïnvloeden:

- 1) De mogelijkheid het vrijgekomen of verdampte water snel af te voeren.
- 2) De golflengte in relatie tot de deeltjesgrootteverdeling.
- 3) De traagheid van de vastestofdeeltjes. Is deze groot ten opzichte van het omgevende medium, dan treedt er een drukvariatie op met de frequentie van de golf, waardoor gedurende de cyclus aan beide zijden van het deeltje een vacuüm ontstaat. Daardoor treedt er een verhoogde verdamping op.
- 4) De deeltjesgrootte. Het effect van akoestisch ontwateren is afhankelijk van het oppervlak dat wordt blootgesteld aan de drukvariatie.

- 5) De akoestische impedantie, o.a. afhankelijk van de dichtheid van de vaste stofdeeltjes t.o.v. het omringende medium.
- 6) Mechanische eigenschappen van de deeltjes (vorm, stijfheid).
- 7) Temperatuur.

5.7 Elektro-akoestisch ontwateren

Bij elektro-akoestisch ontwateren worden drie afzonderlijke ontwateringstechnieken met elkaar gecombineerd. Wanneer akoestische ontwatering wordt toegepast in combinatie met elektrokinetisch ontwateren en filtratie treden synergistische effecten op (Ensminger; 1988, Muralidhara; 1986).

Elektrokinetische en akoestische ontwatering werken samen om het water uit de poriën en capillairen vrij te maken en te transporteren naar het filteroppervlak. Daar wordt het onder druk verwijderd.

De ultrasone trillingen bevorderen het verwijderen van druppeltjes van het filteroppervlak. De druppeltjes worden door hun traagheid van het filteroppervlak getrild. De diffusie door het filter wordt door de trillingen verbeterd.

Wanneer de slibkoek wordt samengeperst kunnen door de trillingen de schuifspanningen worden overwonnen (Muralidhara; 1986). De filterkoek consolideert in de meest compacte structuur. Het dichtslaan van het filter wordt tegengegaan en poriën worden in stand gehouden. Het verwijderen van gasbelletjes uit het slib wordt bevorderd.

Door de trillingen blijft de continuïteit in de vloeistof zo lang mogelijk gehandhaafd. Er wordt voorkomen dat het elektrisch veld (en daarmee de elektrokinetische ontwatering) wordt onderbroken. Door elektrolyse reacties bij elektrokinetisch ontwateren wordt er aan de elektroden gas gevormd. Door de trillingen wordt het gas verwijderd en wordt aankoeken van slib voorkomen. Het contact tussen de elektroden en de vloeistof blijft zo lang mogelijk gehandhaafd.

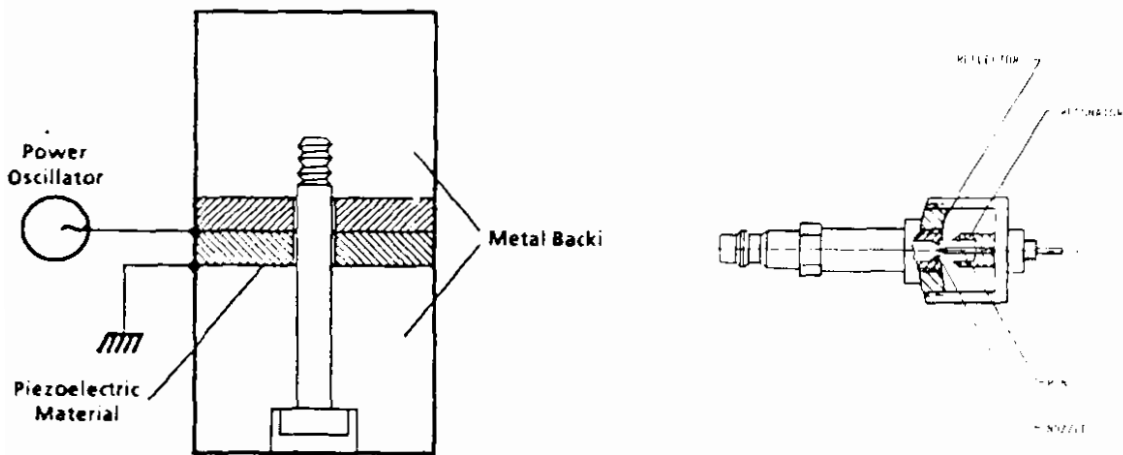
Akoestische trillingen verbeteren het resultaat van elektrokinetische ontwatering en filtratie aanzienlijk. Combinatie van deze drie technieken leidt tot een sterk verbeterde ontwatering.

Er zijn in de literatuur geen voorbeelden gevonden van praktijktoepassing van elektro-akoestisch ontwateren. Door Batelle (Muralidhara; 1986, Ensminger; 1986) is wel veel onderzoek op laboratoriumschaal gedaan.

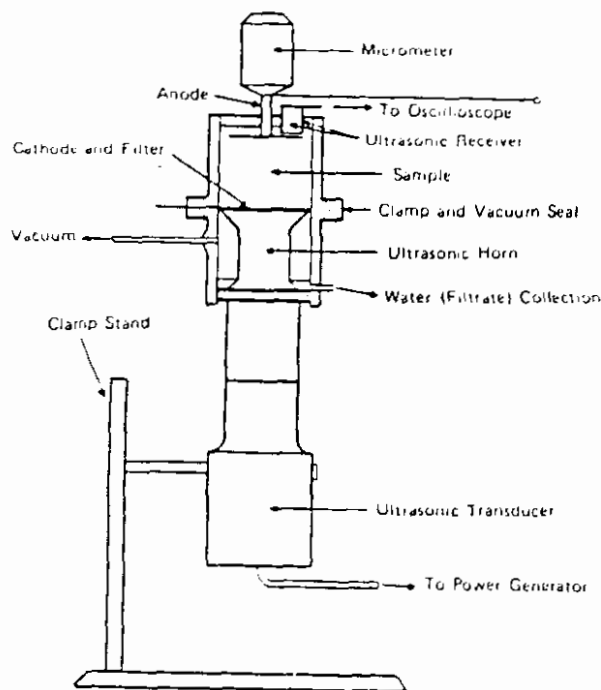
Er werden met piëzoelektrische elementen of "pneumatic transducers" trillingen overgebracht op een monster, zie figuur 5.4.

Tegelijkertijd werd een elektrisch veld aangelegd en vacuümfiltratie toegepast, zie figuur 5.5.

Bij deze experimenten werden duidelijk betere resultaten geboekt dan met conventionele ontwatering (centrifugeren, filtratie).



Figuur 5.4: Een piëzoelektrisch element en een ultrasone transducer



Figuur 5.5: Proefopstelling voor elektro-akoestisch ontwateren

Muralidhara meldt dat met elektro-akoestische ontwatering droge stofgehaltes zijn bereikt van 36 (actief slib) tot 38 gew.% (uitgegist slib), terwijl met conventionele ontwatering 18 tot 20 gew.% droge stof werd bereikt.

Ensminger (1988) meldt drogestofgehaltes van 38 (actief slib) tot 45 gew.% (anaeroob gestabiliseerd slib). In Nederland is de haalbaarheid van dit proces op kleine schaal onderzocht. Voor Nederlandse zuiveringsslibben zijn droge stofgehaltes van 35 tot 46 gew% gehaald (STORA; 1988).

6 Aandachtspunten / Knelpunten

6.1 Slibontwatering als functie van het waterzuiveringssysteem.

Het is duidelijk dat de samenstelling van het afvalwater en de aard van het zuiveringsproces van invloed zijn op het resultaat van de slibontwatering. De mate waarin en de manier waarop deze invloed wordt uitgeoefend is echter niet duidelijk en verdient nader onderzoek.

Een aantal vragen is uit het vooronderzoek naar voren gekomen:

- 1) Wat is de invloed van de herkomst van het afvalwater (industrieel/huishoudelijk, landelijk/stedelijk, Nederland/Duitsland) op het resultaat van de ontwatering.
- 2) Wat is de invloed van het zuiveringsproces op de slibontwatering. Kan de invloed van het influent op de ontwatering worden beperkt door de keuze van het zuiveringsproces.
- 3) Kan de slibontwatering worden verbeterd door het gescheiden behandelen van slib (aerob gestabiliseerd en anaerob gestabiliseerd, primair en surplusslib).
- 4) Is er een verbetering van de bedrijfsvoering mogelijk waardoor de ontwatering kan worden verbeterd.
- 5) Wat verandert er aan de ontwatering als indikking geschiedt met flotatie (korte verblijftijden, geen afbraak van exocellulair materiaal) in plaats van sedimentatie.
- 6) Heeft de slibgisting invloed op de ontwatering (gistingstijd, anaerobe of thermofiele aerobe gisting, hoedanigheid van het slib: aangerot of levend aerob).

6.2 Slibkarakteriseringsmethoden

De huidige technieken voor het karakteriseren van slib met betrekking tot de ontwatering zijn vrijwel uitsluitend gericht op filtratie van het slib. Wanneer nieuwe technieken worden ontwikkeld voor het zuiveren van afvalwater zijn ook nieuwe technieken gewenst voor karakterisering van het slib. De huidige technieken zijn alleen toereikend om, als eenmaal een ontwateringstechniek is gekozen, de ontwatering te optimaliseren. Ze zijn echter niet in staat te voorspellen welke ontwateringstechniek voor een bepaald slib het meest in aanmerking komt. Daarvoor zijn algemenere, minder op filtratie gerichte, karakteriseringsmethoden gewenst.

Daarbij kan worden gedacht aan: droogcurven, zêta-potentiaal, het bepalen van de verhouding organisch/anorganisch materiaal. Door het meten van droogcurves is het mogelijk om het slibwater in verschillende categoriën onder te verdelen (zie 3.2.1). Aan de hand van deze onderverdeling is het mogelijk een uitspraak te doen over de bindingskracht waarmee het water aan het slib is gebonden. In literatuur over drogen wordt vaak de sorptie-isotherm gebruikt om de waterbinding te karakteriseren. De sorptie-isotherm is de relatie tussen de evenwichtsrelatieve vochtigheid van de lucht en het watergehalte van het te ontwateren materiaal. Indien de wateractiviteit (en dus ook de evenwichtsrelatieve vochtigheid) gelijk is aan 1 dan spreekt men meestal van vrij water. Indien de wateractiviteit kleiner is dan 1 spreekt men van

gebonden water. Van slib zijn in de geraadpleegde literatuur geen sorptie-isothermen gemeten terwijl hieruit juist informatie verkregen kan worden over de sterkte van de slib-waterbinding. In hoeverre deze, op thermische wijze verkregen informatie is te vertalen naar mechanische ontwatering dient nader te worden onderzocht.

Het nadeel van de karakterisering met behulp van een droogcurve is dat het meten van een droogcurve een langdurig experiment is. Hierdoor is deze karakterisering niet te gebruiken om het proces te regelen. Uit een droogkarakterisatie is wellicht wel informatie te halen omtrent het maximaal bereikbare einddrogestofgehalte en de manier waarop dit bereikt kan worden.

Via bepaling van de zêta-potentiaal kan wellicht een indruk worden verkregen of een goede vlokvorming mogelijk is en welke chemicaliëndoseringen hiervoor nodig zijn. Daarnaast kan de zêta-potentiaal aangeven of elektrokinetisch ontwateren (economisch) mogelijk is. Er kan op grond van de zêta-potentiaal wellicht een keuze worden gemaakt tussen verschillende ontwateringsprocessen.

De verhouding tussen anorganisch en organisch materiaal is van invloed op de ontwaterbaarheid. Anorganisch materiaal is minder samendrukbaar dan organisch materiaal. Een hoger gehalte aan anorganisch materiaal (hogere gloei-rest) zal de filtratieprocessen positief beïnvloeden.

De verbrandingswaarde van slib hangt in belangrijke mate af van het percentage organische stof in het ontwaterde materiaal. Via de bepaling van het gehalte organische stof kan wellicht worden nagegaan tot welk percentage droge stof moet worden ontwaterd om autotherme verbranding mogelijk te maken.

6.3 Het filtratieproces

De structuur van de filterkoek heeft een belangrijke invloed op het ontwateringsgedrag van het slib. Zo is het bijv. bekend dat de aanwezigheid van draadvormige bacteriën een negatieve invloed heeft op de bezinking van slibvlokken (zie 2.1). Ook andere slibkenmerken zouden een belangrijke invloed kunnen hebben op de te vormen structuur van de slibfilterkoek. Hierbij valt te denken aan de volgende punten:

- 1) De beginfase van de koekvorming is erg belangrijk (zie 4.3.2). Het toepassen van elektrische, magnetische of akoestische velden in het begin van de filtratie zou de structuur in gunstige zin kunnen beïnvloeden.
- 2) Indien de afvoervoorziening van het filtraat wordt verbeterd zijn hogere eind droge stofgehalten te verwachten. Verbetering van de drainage wordt in de multilaagfiltratie en in de HI-Compact toegepast. Het dient nog nader onderzocht te worden of deze processen snel genoeg verlopen en daarmee dus economisch haalbaar zijn. Het principe van multilaagfiltratie zou ook toegepast kunnen worden door afwisselende lagen van slib en een drainagemateriaal op een filter aan te brengen.

- 3) Indien de koek sterk irreversibel samendrukbaar is, kan er een huid gevormd worden nabij het filtermedium (zie 4.3.2). Het is dan wellicht mogelijk om de filterkoek verder te ontwateren door de stromingsrichting om te keren (Tiller; 1983). Deze omkering van de stromingsrichting kan met water of misschien zelfs met lucht worden uitgevoerd.

Combinaties van de drie bovengenoemde technieken zouden mogelijk een nog betere ontwatering kunnen geven. Indien bijv. door een multilaagfiltratie met een drainagemateriaal het slib goede drainage-eigenschappen bezit, kan een gedeelte van het water wellicht door lucht verdrongen worden door het slib met lucht na te persen.

De snelheid waarmee de filtratie verloopt is afhankelijk van de viscositeit van het filtraat (zie verg. 4.5). Door verhoging van de temperatuur zal de viscositeit afnemen, hierdoor zal de filtratiesnelheid toenemen. Voor water is de viscositeit bij 20 °C 10^{-3} Pa.s en bij 80 °C $0,36 \cdot 10^{-3}$ Pa.s.

Als verhoging van de temperatuur alleen invloed heeft op de viscositeit zal door een temperatuurverhoging van 20 naar 80 °C de filtratiesnelheid ruim 2,5 maal zo groot worden. Indien er een energieafvalstroom in het afvalwaterreinigingsproces aanwezig is (bijv. door een methaangisting of door verbranding van het slib) kan het filtratieproces worden versneld door de te filtreren slurry eerst op te warmen. Wat voor invloed deze versneling heeft op de structuur van de filterkoek en of het proces economisch rendabel is moet nader worden onderzocht.

6.4 Nieuwe ontwateringstechnieken

Met de huidige ontwateringstechnieken wordt vaak een onvoldoende hoog drogestofgehalte bereikt om autotherme verbranding mogelijk te maken. Er zullen, gezien de plaats die verbranding in de slibverwerking gaat innemen, nieuwe ontwateringstechnieken moeten worden ontwikkeld.

Elektro-akoestische ontwatering in combinatie met bestaande ontwateringstechnieken lijkt goede perspectieven te bieden en zal dan ook nader bekeken moeten worden.

Daarnaast is gebleken dat met cryogene technieken een goede ontwatering kan worden bereikt. Deze techniek is echter erg duur. Door slib voor te ontwateren met een goedkope ontwateringstechniek kan de volumestroom die moet worden ingevroren worden beperkt. Wanneer dan nog vriesconcentreren (zie hoofdstuk 5) in combinatie met elektro-akoestisch ontwateren wordt toegepast kan met cryogene technieken wellicht economisch worden ontwaterd tot droge stofgehalten die op zijn minst autotherme verbranding mogelijk maken.

Er zal moeten worden gezocht naar slibverwerkingslijnen waarin het slib eerst met goedkope methoden wordt voorontwaterd tot een bepaald droge stofgehalte, waarna met duurdere technieken zover wordt ontwaterd dat het gewenste eind droge stofgehalte bereikt is.

7 Literatuur

Abson, J.W., Improvements in or relating to the dewatering of biological sludges. Patent (Brit.) GB 1352279 (1972).

Bahrs, D., Konditionieren von Abwasserschlämmen durch Gefrieren. Dissertation, Braunschweig (1978).

Batel, W., Menge und Verhalten der Zwischenraumflüssigkeit in körnigen Stoffen. Chemie-Ing.-Techn. 33 (1961) 8, 541-7.

Bruce, A.M., Campbell, H.W., Balmer, P., Processing and trends in sludge processing techniques. In: Processing and use of sewage sludge, proceedings of the third international symposium held at Brighton (1983) 19-38.

Burger, J. den, Gemeenschappelijke Technische Dienst Oost Brabant (GTDOB), persoonlijk gesprek. (1988).

Campbell, H.W., A status report on environment Canada's oil from sludge technology. Preprint of the EWPCA/CEC conference on "Sewage sludge treatment and use", Amsterdam (1988).

Cheng, C., Sludge dewatering by high-rate freezing at small temperature differences. Environmental science & technology 4 (1970) 12, 1145-47.

Clements, C.S., Stephenson, R.J., Regan, C.J., Sludge dewatering by freezing with added chemicals. The public works municipal services congress. Olympia, Londen. (1950) 318-37.

Coackley, P., Activated sludge - fundamental process properties and the bulking phenomenon. In: Topics in wastewater treatment, ed. by J.M. Sidwick (1985) 1-22.

Coulson, J.M., Richardson, J.F., Chemical Engineering, vol. 2, Unit operations. Pergamon press (1978).

Crabtree, K., Boyle, W., McCoy, E., Rohlich, G.A., Mechanism of floc formation of Zoogloea Ramigera. Journal Water Poll. Control Fed. 38 (1966) 1968.

Eden, G.E., Modern trends in sludge management: Sludge conditioning. Wat. sci. techn. 15 (1983) 37-48.

Ellenbroek, H.J., Waterschap Regge en Dinkel, persoonlijk gesprek. (1988).

Ensminger, D.E., Acoustic and electroacoustic methods of dewatering and drying. Drying Technology 6 (1988) 3, 473-99.

Ensminger, D.E., Acoustic dewatering. In: Advances in solid-liquid separation, ed. by H.S. Muralidhara (1986) 321-35.

Fair, J.M., Geyer, J.G., Okun, D.A., Water and wastewater engineering, volume 2, water purification and wastewater treatment and disposal. (1968) 21: 9, 36: 18-20.

Farrel, J.B., A status report on the utilisation of freezing in the dewatering of sludges. Proc.int. congr. refrig. volume 1 (1973) 739-43.

Fuggle, R.W., New developments in sludge digestion and pasteurization. Water pollution 84 (1985) 33-43.

Gale R.S., Baskerville, R.C., Swanwick, J.D., Investigations of pressure filtration of raw sewage sludges. Water pollution control 66 (1967) 622-32.

Gale, R.S., Research in filtration of sewage sludges. Filtration and Separation 9 (1972) 431-36.

Gerstle, R.W., Get ready for another inspector. Water and wastewater engineering 11 (1974) 12, 13.

Gildemeister, H.H., Sludge dewatering technology in perspective. Preprint of the EWPCA/CEC conference on "Sewage sludge treatment and use", Amsterdam (1988).

Greyson, J., Rogers, H.H., Dewatering sewage sludges by electro-osmosis. Advances in water pollution research, proceedings of the int. conference. volume 1 (1971) II-26/1-15.

Halde, R.E., Sewage sludge characterization by vacuum drying. Filtration and Separation (1979) 238-42.

Haworth P.J., The filterbelt press. Effluent and water treatment journal 13 (1973) 617-25.

Hennerkes, J.J., Über die thermische Konditionierung von Emscher-Belebtschlamm. Gewässerschutz. Wasser. Abwasser. 9 (1972)

Karr, P.R., Factors influencing the dewatering characteristics of sludge. Dissertation, Clemson University (1976).

Karr, P.R., Keinath, T.M., Influence of particle size on sludge dewaterability. Journal Water Poll. Control Fed. (1978) 1911-30.

Kasakura, T., Hiraoka, M., Pilotplant study on sewage sludge pyrolysis I. Water Research 16 (1982) 1335-48.

Kasakura, T., Hiraoka, M., Pilotplant study on sewage sludge pyrolysis II. Water Research 16 (1982) 1569-75.

Katsiris, N., Kouzeli-Katsiri, A., Bound water content of biological sludges in relation to filtration and dewatering. Water Research 21 (1987) 11, 1319-27.

Koreman, E.A., Van Breemen, A.N., Toepassing van het vriesdooi-proces bij de ontwatering van coagulatieslib. Medelingen van de vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing (1988) 15.

Korte, K.F. de, Dienst openbare werken Amsterdam, persoonlijk gesprek. (1988).

- Kowalska, E., Bien, J., Zielewicz-Madej, E., Ultrasound in the suspension separation methods. *Drying Technology* 6 (1988) 3, 447-71
- Krishnaswamy, P., Klinkowski, P., Electrokinetics and electrofiltration. In: *Advances in solid-liquid separation*, ed. by H.S. Muralidhara (1986) 291-319.
- Lockhart, N.C., Electro-dewatering of fine suspensions. In: *Advances in solid-liquid separation*, ed. by H.S. Muralidhara (1986) 241-74.
- Loll, U., Bestimmung der kapillaren Flieszeit in der Praxis der maschinellen Klärschlammwässerung, *Korrespondenz Abwasser* 24 (1977) 295-99.
- Loll, U., Development and dewatering capacity of the continuously operating CHP-high-pressure filter press. *Recycling International II*, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik (1986) 1041-8.
- Loll, U., Hochdruckentwässerung mit Polymerkonditionierung als Voraussetzung zur energieautarken Verbrennung von Klärschlamm. Preprint of the EWPCA/CEC conference on "Sewage sludge treatment and use", Amsterdam (1988).
- Matsumura, T., Dewaterability of municipal sewage sludge by freeze-thawing process. Annual report of the center of Osaka prefecture 13 (1972) 33-44.
- Muralidhara, H.S., Senapati, N., Beard, R.B., A novel electro-acoustic separation process for fine particle suspensions. In: *Advances in solid-liquid separation*, ed. by H.S. Muralidhara (1986) 335-74.
- Murase, T., Iwata, M., Aragaki, T., Shirato, M., Electroforced sedimentation of thick slurries in consolidation region. *Drying Technology* 6 (1988) 3, 361-88.
- Murdoch, M., Verfahren und Vorrichtung zur Aufbereitung von Schlamm. Patent (Ger. offen) 2246639 (1976).
- Nederlands normalisatie instituut, Slib: Bepaling van de specifieke filtratieweerstand bij vacuümfiltratie. NEN 6685 (1983).
- Nederlands normalisatie instituut, Slib: Bepaling van de specifieke filtratieweerstand bij drukfiltratie. NEN 6686 (1983).
- Nederlands normalisatie instituut, Slib: Bepaling van de compressibiliteitscoëfficiënt bij vacuümfiltratie. NEN 6687 (1983).
- Nederlands normalisatie instituut, Slib: Bepaling van de compressibiliteitscoëfficiënt bij drukfiltratie. NEN 6688 (1983).
- Nederlands normalisatie instituut, Slib: Bepaling van de afzuigtijd bij vacuümfiltratie. NEN 6689 (1983).
- Nederlands normalisatie instituut, Slib: Bepaling van de capillaire zuigtijd (CST-waarde). NEN 6690 (1983).

Nederlands normalisatie instituut, Slib: Bepaling van de ontwaterbaarheid met de MFT-methode. NEN 6691 (1988).

Niemitz, W., Fuss, K., Der spezifische Filterwiderstand und die Kompressibilität von Klärschlämmen. Wasser. Abwasser. GWF (1965) 778-83.

Notebaert, F.F., Willms, D.A., Van Haute, A.A., A new deduction with a larger application of the specific resistance to filtration of sludges. Water Research, 9 (1975) 10, 667-73.

Otte-Witte, R., Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften des zu deponierenden Klärschlammes. Preprint of the EWPCA/CEC conference on "Sewage sludge treatment and use", Amsterdam (1988).

Parker, D.G., Randall, C.W., King, P.H., Biological conditioning for improved sludge filterability. Journal Water Poll. Control Fed. 44 (1972) 11, 2067-77.

Pléver, R., Courvoisier, C., Enhanced extraction and dehydration by ultrapresse. Handout at the International Drying Symposium, IDS'88, Versailles (1988).

Plueneke, K.A., An innovative drying process with divers applications. In: Drying '86, vol. 2, edt. by A.S. Mujumdar (1986) 617-24.

Pugsley, E.B., Dewatering of sludge by osmosis, dissertatie, Denver (1975).

Randall, C.W., Kahn, Z.M.A., Stephens, N.T., Waste activated sludge conditioning by direct slurry freezing. Water Research 9 (1975) 917-25.

Reed, S.C., Bouzon, J., Medding, W., A rational method for sludge dewatering via freezing. Journal Water Poll. Control Fed. 58 (1986) 9, 911-16.

Reed, S.C., Sludge freezing for dewatering. Biocycle (1987) 12, 32-34.

Reuter, H., Problematik der Durchsatzberechnung und Strömungsvorgänge in Überlaufzentrifugen. Chemie- Ing.-Techn. 33 (1961) 11, 758.

Schlegel, H.G., Allgemeine Mikrobiologie. Georg Thieme (1976).

Schönborn, W., Bestimmung der aktiven Biomasse im belebten Schlamm, biologischer Abwasserreinigungsanlagen. Heft 18 Deutschen Dokumentations Zentrale Wasser e.V. (DZW), Berlin-Bielefeld-München, Erich Schmidt.

Shirato, M., Murasa, T., Iwata, M., Deliquoring by expression - theory and practice. In: Progress in filtration and separation 4, Edt. by R.J. Wakeman (1986) 181-287.

- Smollen, M., Categories of moisture content and dewatering characteristics of biological sludges. Proceedings of the 4th world filtration congress, Ostend, Belgium (1986) 14.35-14.41.
- Smollen, M., Moisture retention characteristics and volume reduction of municipal sludges. Water SA, 14 (1988) 1, 25-8.
- STORA, Slibontwatering, 2. Slibeigenschappen en resultaten van slibverwerkingsapparatuur (literatuur). (1981).
- STORA e.a, Elektro-akoestisch ontwateren van zuiveringsslib en varkensdrijfmest; de haalbaarheid van het Battelle EAD-proces. (1988).
- Tenney, M.W., Proc. 24rd Ind. Waste Conf. Purdue Univ. Ext. Ser. 135 (1969) 142.
- Tenney, M.W., Verhoff, F.H., Chemical and autoflocculation of microorganisms in biological wastewater treatment. Biotechnol. Bio - Eng. 15 (1973) 1045-73.
- Terzaghi, K., Peck, P.B., Soil mechanics in engineering practice. John Wily & Sons (1948).
- Tiller, F.M., Green, T.C., Role of porosity in filtration IX: Skin effect with highly compressible materials. AIChE Journal 19 (1973) 6, 1266-9.
- Tiller, F.M., Alciatore, A., Shirato, M., Filtration in the Chemical process industry. In: Filtration, principles and practices, part I, edt. by C. Orr (1979).
- Tiller, F.M., Horng, L., Hydraulic deliquoring of compressible filter cakes, part I: Reverse flow in filter presses. AIChE Journal 29 (1983) 2, 297-305.
- Tiller, F.M., Yeh, C.S., Introduction to solid-liquid separation: Principles and theoretical aspects. In: Advances in solid-liquid separation, edt. by H.S. Muralidhara (1986) 1-36.
- Vesilind, P.A., Treatment and disposal of wastewater sludges. Ann arbor science publishers (1974).
- Vesilind, P.A., Hartman, G.C., Skene, E.T., Sludge management & disposal, for the practicing engineer. Lewis Publishers (1986).
- Wakeman, R.J., Post-filtration processes and their impact on drying. Drying '86, vol. 1, edt. by A.S. Mujumdar (1986) 30-8.
- White, M.J.D., Baskerville, R.C., Lockyear, C.F., Continous thickening of biological sludges and the influence of stability. Water pollution control 73 (1974) 86-97.
- Wöstmann, L., Continue volautomatische membraanfilter lost koek zonder operator. I-kwadraat (1988) 9, 13-7.
- Yoshida, H., Electroosmotic dewateringprocess and design equations. Drying Technology 6 (1988) 3, 389-414.