

NN31050.83-05

1983-05

stora

Slibontwatering in lagunes

1. Systemen, technologie en ervaring
(inventarisatie)

32

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

1988

stora

postbus 414, 2280 AK rijswijk
sir winston churchill-laan 273

☎ 070 - 980.287

stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

Slibontwatering in lagunes

1. Systemen, technologie en ervaring
(inventarisatie)

CENTRALE LANDBUJWCATALOGUS

0000 0363 4272

23 MAART 1988

	INHOUD	I - II
	TEN GELEIDE	III
1	SAMENVATTING	1 - 2
2	INLEIDING	3 - 4
3	OPZET VAN HET ONDERZOEK	5
4	PRINCIPE VAN HET LAGUNESYSTEEM	6 - 8
4.1	Permanente opslag	6
4.2	Droging tot steekvast	7
4.3	Indikking	7
4.4	Tweetrapssysteem	8
5	HET WATER IN HET SLIB	9 - 10
6	HET ONTWATERINGSPROCES	11 - 18
6.1	Principe	11
6.2	Oppervlakte-afvoer	12
6.3	Infiltratie	12 - 15
6.4	Verdamping	15 - 18
7	ONTWATERINGSBEVORDERENDE MAATREGELEN	19 - 22
7.1	Oppervlakte-afvoer	19 - 20
7.2	Infiltratie	20
7.3	Verdamping	21 - 22
8	DIMENSIONERING	23 - 25
9	TECHNISCH ONTWERP	26 - 38
9.1	Bodemkundig-hydrologische situatie	26 - 28
9.2	Opbouw kaden	28 - 30
9.3	Opbouw bodem	30 - 31
9.4	Slibaanvoer	31 - 34
9.5	Waterafvoer	34 - 38
9.5.1	<i>oppervlaktewater</i>	34 - 36
9.5.2	<i>geïnfiltreerd water</i>	36 - 38
10	BEDRIJFSVOERING	39 - 45
10.1	Vullen	39 - 42
10.2	Aanvullende ontwateringsmaatregelen	42 - 43
10.3	Stankbestrijding	43 - 44
10.4	Ruiming	44
10.5	Onderhoud	44 - 45
11	RESULTATEN DROGING	46 - 49
12	KWALITEIT EINDPRODUKT	50 - 51
12.1	Chemisch	50
12.2	Fysisch	50 - 51
13	HYGIËNISCHE ASPECTEN	52 - 53

Vervolg inhoud

14	KOSTEN	54
15	EVALUATIE EN CONCLUSIES	55 - 56
16	LITERATUUR	57 - 60
	Bijlagen	
1.	CHECKLIST INVENTARISATIE NATUURLIJKE ONTWATERING VAN ZUIVERINGSSLIB IN LAGUNES	61 - 62
2.	GEËNQUETEERDE INSTANTIES EN BEDRIJVEN	63

Ten geleide

Door de geringe energiebehoefte neemt de belangstelling voor de natuurlijke ontwatering van zuiveringsslib in lagunes toe.

In deze literatuurstudie zijn de belangrijkste technische en financiële aspecten van dimensionering, technische uitvoering en bedrijfsvoering van lagunes bijeengebracht. Ook de praktijkervaring in Nederland is geïnventariseerd en verwerkt.

Op basis van dit rapport blijkt verder praktijkonderzoek noodzakelijk ter optimalisering van ontwerp en bedrijfsvoering.

Het onderzoek werd door het algemeen bestuur van de STORA - op voorstel van de Onderzoekadviescommissie* - opgedragen aan Heidemij, Adviesbureau Arnhem B.V. en namens de STORA begeleid door een commissie bestaande uit ing. J. Teerink (voorzitter), ing. J.Th. Haas, ir. H.M.M. Koppers, drs. A.A. Wismeijer en ir. R.J. Wittebrood.

Rijswijk, april 1983.

De directeur van de STORA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

* De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit:
prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en
dr.ir. H.J. Eggink, prof.dr. P.C. Fohr, ir. R. Karper, ir. C.H. Kuggeleijn, ir. J.S.
Kuyper, ir. Th.G. Martijn, ir. H.A. Meijer, ir. H.M.J. Scheltinga, dr.ir. D.W. Scholte
Ubing, ir. J. van Selm, ir. M. Tiessens, drs. A.A. Wismeijer (leden).

1 SAMENVATTING

Door het energievriendelijke karakter van slibontwatering langs natuurlijke weg neemt de belangstelling voor de ontwatering van zuiverings-slib in lagunes toe.

In dergelijke lagunes verliest het slib zijn water via afstroming (langs de oppervlakte), door infiltratie in de bodem en door verdamping.

Om de ontwatering zoveel mogelijk te bevorderen moet:

- het vrijkomende water boven en tussen de opeenvolgende sliglagen kunnen worden afgevoerd;
- de bodem van de lagune bestaan uit goed waterdoorlatend, grof zand met een systeem voor terugvoer van het drainagewater naar de rioolwaterzuiveringsinrichting;
- worden voorkomen dat, bij laagsgewijze gevulde, drooglagunes het nieuw aangevoerde slib onder de reeds ontwaterde oude laag duikt (bij indiklagunes is dat niet nodig);
- gemakkelijk kunnen worden geruimd (op- en afritten).

Uit het hier gerapporteerde onderzoek van de literatuur (in het algemeen) en van de praktijk (in Nederland) blijkt dat als berekeningsgrondslag voor de oppervlakte van een sliblagunebedrijf $1 \text{ à } 2 \text{ m}^3$ vloeibaar slib/ m^2 .jaar wordt aangehouden, bij een uiteindelijke vulhoogte van maximaal circa 1,5 m. Deze waarden gelden voor drooglagunes en netto-oppervlak. Voor een betere onderbouwing van deze berekeningsgrondslag is meer kennis nodig van de optimale laagdikte in relatie tot de periode tussen twee doseringen, de maximale, uiteindelijke dikte, het effect van een rijpingsperiode na de laatste dosering en het effect van vacuümdrainage, begreppelen en mengen.

Over de bedrijfsvoering kunnen geen exacte uitspraken worden gedaan. Wel kunnen de volgende tendensen worden aangegeven:

- het vullen in dunne lagen leidt tot een vergroting van de droogcapaciteit mits onderduiken van het slib wordt voorkomen;
- hetzelfde geldt voor het tussenschakelen van een indik- of bufferlagune (tweetrapsstelsel);
- ontwateringsmaatregelen als begreppelen, en mogelijk ook vacuümdrainage en mengen, kunnen belangrijk bijdragen aan de vergroting van de droogcapaciteit.

Bij het ontwerp van lagunes vragen vooral bodem- en grondwaterbescherming speciale zorg. Andere milieu-aspecten (geluid, stank) leveren slechts bij uitzonderingen problemen op.

Door grote verschillen in uitvoering variëren de investeringskosten van lagunes sterk: van f 20,--/netto m^2 voor zeer eenvoudige uitvoeringen tot circa f 80,--/netto m^2 voor een tweetrapsbedrijf met automatisch gestuurde vulling via schotelsproeiers (prijspeil 1981).

Van de exploitatiekosten bestaat geen duidelijk beeld, omdat deze niet als afzonderlijke post in de exploitatierekening van de zuiveringsinrichtingen worden vermeld.

De kosten van ruiming zijn vrij exact bekend, omdat dit meestal op contractbasis geschiedt: van f 15,-- tot f 35,--/ m^3 ontwaterd slib (prijspeil 1982).

Op basis van dit onderzoek lijkt het tweetrapsstelsel, zowel procesmatig als qua flexibiliteit en terreinbehoefte, de meeste perspectieven te bieden. Zo'n systeem bestaat uit indik-/bufferlagunes met een doorlatende en gedraineerde zandbodem die, in één keer, of althans in dikke lagen (>0,50 m)

worden gevuld en drooglagunes van dezelfde constructie met vulling in dunne lagen ($< 0,10$ m) waarnaar het slib vervolgens wordt overgebracht. Essentieel hierbij is, dat het slib in de indik-/bufferlagunes verpomptbaar blijft. Dit leidt bij goed indikkende slibsoorten tot het toepassen van, bijvoorbeeld, een dichte bak.

2 INLEIDING

Het aanbod van zuiveringsslib zal naar verwachting toenemen, voornamelijk als gevolg van het feit dat een steeds groter deel van de huidige afvalwaterstroom wordt gezuiverd. Soms wordt er ook nog naar gestreefd het rendement van het zuiveringsproces verder te verhogen, bijvoorbeeld door het toepassen van een derde zuiveringstrap.

In de tweede plaats neemt de afvalwaterstroom ook in absolute zin toe. Het slib, zoals dat uit de zuiveringsinrichting vrijkomt, heeft een zeer hoog watergehalte (meer dan 95%). Het dient te worden ontwaterd om het volume te verkleinen (vermindering van de transportkosten) en de verwerkbaarheid te verbeteren (bijvoorbeeld bij toepassing als grondstof voor teelaarde).

Voor de ontwatering van slib zijn vele methoden in gebruik die kunnen worden onderverdeeld in de drie hoofdgroepen:

- mechanische ontwatering;
- thermische ontwatering;
- natuurlijke ontwatering.

Karakteristiek voor de mechanische ontwateringsmethoden met zeefbanden, filterpersen en centrifuges zijn de hoge investeringskosten, het energieverbruik en de toepassing van chemische conditioneringsmiddelen. Het ruimtebeslag is gering en het drogestofgehalte is binnen bepaalde grenzen goed in de hand te houden.

De thermische ontwateringsmethoden kenmerken zich eveneens door hoge investeringskosten en het energieverbruik ligt hoger dan dat van de mechanische methoden. Daar staat tegenover dat geen chemische conditionering wordt toegepast, terwijl de hoeveelheid residu gering is. Thermische ontwatering vergt uitgebreide stankbestrijdingsmaatregelen.

Bij de natuurlijke ontwateringsmethoden wordt gebruik gemaakt van een kosteloos aanbod van energie in de vorm van zon, wind en zwaartekracht. Deze methode vergt echter een relatief grote oppervlakte. De natuurlijke droging van slib kan problemen geven ten aanzien van milieuhygiënische aspecten, met name bodem- en grondwaterverontreiniging en stankhinder.

Mede door de sterk stijgende variabele kosten van de mechanische methoden wordt natuurlijke slibontwatering economisch een steeds interessanter alternatief voor mechanische en thermische ontwateringsmethoden.

Er zijn twee verschillende systemen voor natuurlijke ontwatering:

- droogbedden, gekarakteriseerd door tamelijk frequent opbrengen en ruimen (4 à 5 maal per jaar) van dunne lagen slib;
- lagunes waarin het slib langere tijd verblijft alvorens het wordt geruimd en waarbij grotere vulhoogten worden toegepast.

Droogbedden worden in Nederland vrijwel niet meer aangelegd. Ten opzichte van lagunering heeft het droogbeddensysteem de volgende nadelen:

- hoge ruimingsfrequentie;
- veel zandaanvulling nodig;

- ruimen met handkracht waardoor een relatief hoog drogestofgehalte gewenst is terwijl het bovendien onaantrekkelijk werk is;
- droogbedden kunnen 's winters niet geruimd worden.

Zowel de theoretische achtergrond van de processen die bij lagunedroging een rol spelen, als de ervaring met deze vorm van slibdroging in Nederland zijn te weinig gestructureerd voor een goed inzicht in de technisch/economische aspecten van dit systeem.

Tot voor enkele jaren werd dit gebrek aan inzicht niet als een duidelijk gemis gevoeld, omdat lagunedroging nog weinig werd toegepast en er in het algemeen een tendens aanwezig was in de richting van mechanische en thermische droging. Deze tendens is enigszins omgebogen. Voor de lagunedroging is daardoor behoefte ontstaan aan verbetering van het inzicht door onderzoek, gericht op het formuleren van richtlijnen voor dimensionering, technische uitvoering en bedrijfsvoering (inclusief de financiële aspecten) van lagunes voor de natuurlijke ontwatering van zuiveringsslib.

Het beschreven onderzoek richt zich met name op:

- een inventarisatie van de verschillende systemen van lagunedroging, niet alleen voor zuiveringsslib, maar ook voor slibsoorten met verwante eigenschappen. Daarbij wordt aandacht besteed aan dimensionering, technische uitvoering, bedrijfsvoering en kwaliteit van het eindproduct, mede in verband met de eventuele markt daarvoor; verder aan stankproblemen en het voorkomen van bodem- en grondwaterverontreiniging;
- een inventarisatie van de kosten van aanleg en exploitatie;
- een literatuuronderzoek, voornamelijk gericht op het evalueren van reeds verricht onderzoek en de theoretische achtergronden van het ontwateringsproces in lagunes.

3 OPZET VAN HET ONDERZOEK

Inventarisatie

Alle overheidsinstanties, belast met het beheer van zuiveringsinrichtingen, werden geïnformeerd over het doel van het onderzoek en gevraagd naar onder hun beheer staande inrichtingen met lagune-ontwatering van slib.

Waar dit het geval was is nader geïnformeerd in hoeverre concrete informatie kon worden verstrekt over verwerkte hoeveelheden slib, effect van de lagune-ontwatering, etc.

Op grond van de verkregen informatie is een aantal instanties bezocht en uitgebreid geënquêteerd, waarbij met name aandacht werd besteed aan de volgende aspecten:

- dimensionering;
- technische uitvoering;
- bedrijfsvoering;
- eigenschappen van het eindprodukt;
- bestemming van het eindprodukt.

Laatstgenoemde enquête vond plaats aan de hand van een checklist die in bijlage 1 is weergegeven.

Naast het zuiveringsslib zijn slibsoorten als baggerspecie, bieten-tarra, boorspoeling etc. in het onderzoek betrokken. Op deze wijze wordt een zo volledig mogelijk beeld verkregen van de ervaringen op het gebied van de aard en het effect van ontwateringsbevorderende maatregelen bij het natuurlijke ontwateringsproces. Gebleken is dat ervaringen met lagunedroging van andere slibsoorten slechts incidenteel toepasbaar zijn voor zuiveringsslib vanwege verschillen in eigenschappen en/of bedrijfsvoering.

Literatuuronderzoek

Voor het verzamelen van literatuur is gebruik gemaakt van een computeronderzoek betreffende slibdrogen. Van de geraadpleegde literatuur is alleen de geciteerde in de literatuurlijst opgenomen (p. 58).

Ook is gebruik gemaakt van rapporten van ingenieursbureaus en resultaten van lopend, (nog) niet gepubliceerd onderzoek.

4 PRINCIPE VAN HET LAGUNESYSTEEM

In het kader van deze studie wordt een lagune als volgt gedefinieerd:

- een depot, waarin vloeibaar slib wordt gebracht met als hoofddoel de ontwatering ervan; de toegepaste laagdikte kan oplopen tot enkele meters terwijl de verblijftijd enkele jaren kan bedragen; in sommige gevallen is zelfs sprake van permanente opslag.

De ontwatering vindt plaats door:

- afstroming van vrijstaand water via de oppervlakte van de sliblaag;
- percolatie van water door de sliblaag en infiltratie in de bodem en, afhankelijk van de opbouw ervan, via de kaden;
- verdamping aan de oppervlakte en via begroeiing.

Uit de in dit verband gehanteerde definitie van een lagune blijkt reeds dat er sprake is van een breed scala van mogelijkheden, zowel qua constructie als qua bedrijfsvoering.

Op basis van de bedrijfsvoering kan een aantal verschillende systemen worden onderscheiden waarvan de hoofdlijnen in dit hoofdstuk worden beschreven. De met het verschil in bedrijfsvoering samenhangende constructieverschillen komen eveneens aan de orde.

4.1 Permanente opslag

In geval van permanente opslag worden de lagunes gevuld en niet geruimd. Eventuele maatregelen ter bevordering van de ontwatering dienen ter vergroting van de opslagcapaciteit en ter verbetering van de eigenschappen van het materiaal. Het laatste met name wanneer het betreffende terrein, nadat het gevuld is, een bestemming krijgt in de agrarische-, recreatieve- of woningbouwsector.

In Nederland vindt een dergelijke verwerkingsmethode met zuiverings-slib slechts zeer incidenteel plaats. Als het al plaats vindt, is het slechts als deeloplossing.

Het komt vaker voor in Amerika, Rusland, Canada, Duitsland b.v., waar ruimtegebrek een minder grote rol speelt dan in Nederland.

Een en ander is mede een gevolg van het feit dat, ook na ontwatering, met zuiveringsslib opgehoogde terreinen slechts door middel van vrij ingrijpende maatregelen geschikt te maken zijn voor andere bestemmingen.

Slibsoorten als baggerspecie uit de havens en suikerbietentarra lenen zich beter voor permanente opslag door middel van lagunering omdat deze na ontwatering gunstiger eigenschappen hebben dan zuiverings-slib, met name wat betreft de draagkracht.

Industriële slibsoorten die als chemisch afval moeten worden beschouwd (bijvoorbeeld jarosiet, afkomstig van de zinkfabricage) worden ook wel permanent opgeslagen in lagunes, die in dit geval als stortplaatsen kunnen worden beschouwd.

Gezien de chemische samenstelling kan er van een nuttige eindbestemming in bovengenoemde zin geen sprake zijn. Wel wordt in sommige gevallen rekening gehouden met de terugwinning van mineralen in de verre toekomst.

Baggerspecie, suikerbietentarra, jarosiet, slib van waterleidingbedrijven enz., worden in Nederland vrij algemeen in lagunes opgeslagen. Deze opslag heeft vaak een definitief karakter.

De kaden rond lagunes voor permanente opslag zijn doorgaans opgebouwd uit materiaal uit het terrein zelf. Latere ophogingen vinden, indien het materiaal ervoor geschikt is, plaats met gedroogd slib. Een bodemafdichting wordt toegepast als er kans op onaanvaardbare beïnvloeding van de bodem- en grondwaterkwaliteit bestaat. Ter bevordering van de ontwatering wordt vaak een buizendrainage in de bodem aangebracht. Bij toepassing van een bodemafdichting is het hierop aanbrengen van een (gedraineerde) zandlaag gewenst.

4.2 Droging tot steekvast

Bij dit lagunesysteem voor de verwerking van zuiveringsslib worden de lagunes (veelal laagsgewijs) gevuld met slib waarbij een droging tot "steekvast" materiaal (15-25% droge stof) wordt nagestreefd. In de meeste gevallen krijgt het slib hierbij, nadat de maximale vulhoogte is bereikt, de gelegenheid ongeveer een jaar te rijpen. De bovenste laag heeft dan een gunstige structuur gekregen, vergelijkbaar met venig materiaal.

Het slib wordt vervolgens geruimd en, afhankelijk van de eigenschappen en de afzetmogelijkheden, verwerkt tot b.v. teelaarde voor plantsoenen, afdekgrond voor vuilstorten.

Met name bij de toepassing als teelaarde vindt menging met materialen als zand en veen plaats. Een en ander ter verbetering van de structuur en de chemische samenstelling.

Alle slibsoorten die op deze manier kunnen worden hergebruikt kunnen op deze wijze verwerkt worden, dus ook baggerspecie en suikerbietentarra.

Voorwaarde voor de praktische toepasbaarheid van dit systeem is dat het betreffende slib goed ontwaterbaar is.

Los van het nuttig hergebruik van het slib kan dit systeem ook worden toegepast als voordroging voor verbranding en storten.

Ook bij dit systeem wordt veelal materiaal uit het terrein zelf gebruikt voor de bouw van de kaden. Soms wordt zand aangevoerd ter bevordering van de zijdelingse afstroming, terwijl ook de bodem veelal wordt gevormd door een (gedraineerde) zandlaag.

4.3 Indikking

Daar waar zuiveringsslib gemakkelijk in de landbouw kan worden afgezet worden soms lagunes gebruikt als buffer waarbij nog een zekere mate van ontwatering plaatsvindt. Er is dan echter meer sprake van indikking dan van ontwatering via verdamping en percolatie. Het vrije water wordt wel via de oppervlakte afgevoerd. Het vullen vindt plaats in dikke lagen (> 0,5 m) waardoor soms een vrij-water-laag tussen twee sliblagen ontstaat. In veel gevallen kan dit water via speciale aflaatconstructies worden afgevoerd.

Het drogestofgehalte van het slib mag niet hoger worden dan ca. 8%, een percentage waarbij het slib nog uit eigener beweging naar de pomp toestroomt.

In sommige gevallen wordt het op deze manier ingedikte slib afgevoerd naar een centrale verwerkingsplaats ten behoeve van b.v. teelaardebereiding.

Deze lagunes worden vaak als statische indikkers in beton uitgevoerd (indikbakken) zonder de mogelijkheid van de afvoer van water via de bodem. Een dichte bodem voorkomt het ontstaan van niet verpompbare afzettingen. Ook uitvoering met grondkaden komt voor, al dan niet met een gedraineerde zandbodem. De verblijftijd van het slib in deze lagunes bedraagt over het algemeen slechts enkele maanden.

4.4 Tweetrapssysteem

De eerste fase van het tweetrapssysteem bestaat uit indiklagunes waarin het slib wordt rondgepompt en waarbij het wordt ontwaterd tot 8 à 10% droge stof. Het rondpompen dient om het slib homogeen vloeibaar te houden. Vanuit de indiklagunes wordt het in dunne lagen op de drooglagunes gepompt waar de verwerking plaatsvindt zoals in 4.2 is beschreven.

De voordelen van dit systeem zijn:

- de indiklagunes vormen een buffer vanwaaruit de drooglagunes op optimale wijze qua laagdikte en opbrengfrequentie kunnen worden gevuld, waarbij ook klimatologisch ongunstige perioden kunnen worden overbrugd;
- afzet naar de landbouw kan eventueel gebeuren vanuit de indiklagunes;
- het rondpompen van het zuiveringsslib blijkt een extra ontwateringseffect te geven.

Zowel de indik- als de drooglagunes zijn uitgevoerd met grond-/zandkaden en een gedraineerde zandbodem.

Een variant van deze methode is het systeem waarbij sproeiwagens regelmatig, afhankelijk van de weersomstandigheden, zeer dunne laagjes (0,01 à 0,02 m) versproeien over een zandbed waarop eventueel een laag toeslagmateriaal (bijvoorbeeld houtsnippers) is uitgespreid. De bedden liggen onder helling, zodat vrij water oppervlakkig kan afstromen. Bij een sliblaagdikte van in totaal 0,30 à 0,40 m wordt het slib gemengd met het toeslagmateriaal, en ter compostering op hopen gezet.

Bovenstaande onderverdeling in verschillende lagunesystemen geeft slechts de hoofdlijnen weer.

Binnen elk systeem bestaan veelal grote verschillen in technisch ontwerp, vultechniek en laagdikte, onder andere afhankelijk van de aard en de ontwaterbaarheid van het betreffende slib. In de hoofdstukken 7 t/m 12 wordt hierop nader ingegaan.

5 HET WATER IN HET SLIB

Voor een goed begrip van de ontwateringseigenschappen van slib is inzicht nodig in de wijze waarop het water aan het slib i.c. de slibvlokken is gebonden.

In fig. 1 wordt een schematisch beeld gegeven van de verschillende soorten water in het slib.²⁵

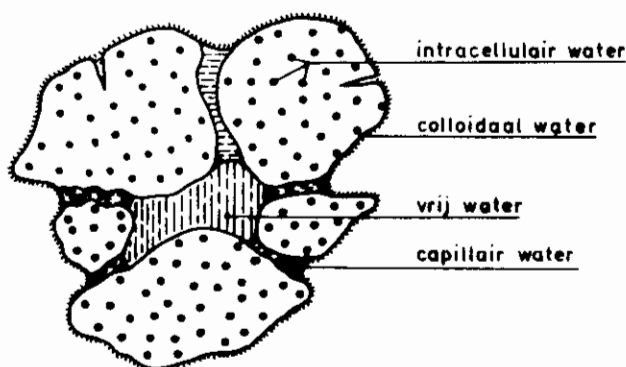


Fig. 1. Schematische weergave van de waterverdeling in een slibvlok²⁵

Het vrije water heeft geen directe binding met de vaste stof en bevindt zich in de poriën tussen de vlokken en gedeeltelijk in de vlokken. Voor het verwijderen ervan is een relatief geringe hoeveelheid energie nodig. Wanneer in de zuiveringsinrichting een indikker is opgenomen kan worden gesteld dat een groot gedeelte van het vrije water onder invloed van de zwaartekracht is verwijderd, dat wil zeggen door bezinking en samendrukking van de slibvlokken. Bij overbrengen van dit slib in een lagune, waarin infiltratie van water in de bodem kan plaatsvinden, zet dit proces zich voort. Met dit verschil, dat percolatie van water door het slib de overhand krijgt boven de bezinking van de vaste deeltjes.

Een belangrijke hoeveelheid water bevindt zich in het slib in gebonden toestand, dat wil zeggen dat voor de verwijdering ervan grotere krachten nodig zijn dan de zwaartekracht. Deze krachten zijn van verschillende aard en hangen samen met de chemisch-fysische eigenschappen van de slibdeeltjes. Slib bevat veel colloïdaal materiaal waardoor water wordt gebonden door elektrische en moleculaire krachten (adsorptie en adhesie). Tevens is er sprake van capillaire krachten in de poriën binnen de vlokken.

Het gebonden water wordt bij de natuurlijke ontwatering gedeeltelijk verwijderd door middel van verdamping. De verdamping wordt bepaald door de bedrijfsvoering, de soort slib en de klimatologische omstandigheden.

Onder intracellulair water wordt niet alleen verstaan de celvloeistof zelf, maar ook het door de celwanden ingesloten water voor zover dat niet in verbinding staat met de andere poriën.

Voor het vrijmaken van dit water is verstoring van de celwand nodig hetgeen slechts door verhitten, bevriezen, expanderen of door microbiologische afbraak mogelijk is. Laatstgenoemd proces heeft overigens de vorming van nieuw intracellulair water tot gevolg.

Op grond van de behandelde indeling is de in tabel 1 gegeven volgorde van toenemende bindingsenergie samengesteld. De cijfers gelden als orde van grootte en liggen voor elk slib verschillend.

aard en binding van het slibwater	hoeveelheid water in uitgegist huishoudelijk slib met 95% watergehalte
vrij	70%
adhaesief en capillair	22%
adsorptief en cellulair	8%

Tabel 1. Binding van het slibwater³⁶

Tenslotte wordt in fig. 2 het verband gegeven tussen het volume en het watergehalte van slib met een begindrogestofgehalte van 5% met de bijbehorende bindingsvormen van het water en de methoden van verwijdering ervan.

Ook in dit geval geldt dat de cijfers een orde van grootte aangeven en in de praktijk voor elk slib verschillend liggen.

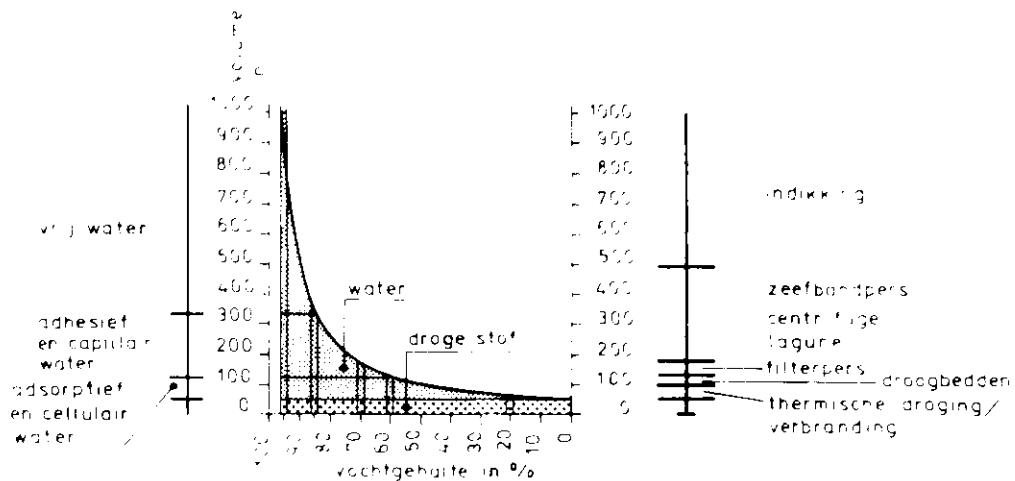


Fig. 2. Volumevermindering van 1 m³ uitgegist slib met 5% drogestofgehalte door afname van het watergehalte²¹

6 HET ONTWATERINGSPROCES

6.1 Principe

Ten behoeve van de beschrijving van het ontwateringsproces dient de volume- en drogestofbalans van een lagune te worden opgesteld.⁴

In fig. 3 zijn de verschillende aan- en afvoercomponenten in beeld gebracht.

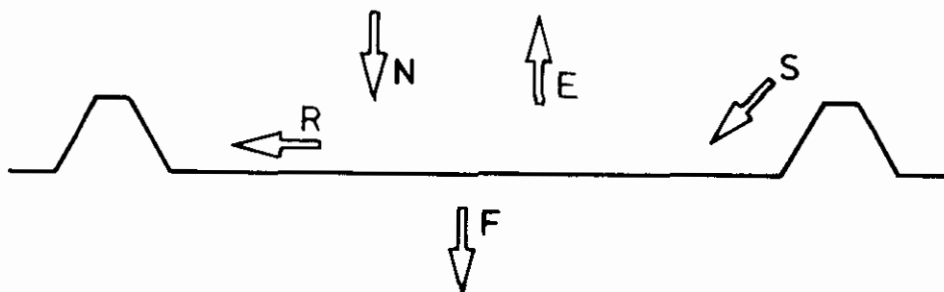


Fig. 3. Aan- en afvoercomponenten van het lagunesysteem⁴

E = verdamping (mm/jr);
R = oppervlakte-afvoer (mm/jr);
N = neerslag (mm/jr);
S = slibaanvoer (mm/jr).

De drogingscapaciteit van de lagune wordt nu als volgt geformuleerd:

$$D = E + R + F - N$$

waarin: D = drogingscapaciteit in mm/jr.

Uit de volumebalans kan nu de vulhoogte h na T jaren worden afgeleid:
 $h = (S-D) T$ waarin: S = slibaanvoer in mm/jr.

De formule geldt over het traject waarin nog geen luchtgevulde poriën en scheuren zijn ontstaan.

In de praktijk is gebleken dat bij een goede bedrijfsvoering de oppervlakte-afvoer een verwaarloosbare hoeveelheid droge stof bevat. Het drogestofgehalte van het infiltratiewater is eveneens verwaarloosbaar klein.

Dit houdt in dat de drogestofbalans als volgt kan worden geformuleerd:

$$x_u = \frac{S}{S-D} x_s$$

waarin: x_u = drogestofgehalte eindprodukt in gewichtsprocenten;
 x_s = drogestofgehalte aangevoerde slib in gewichtsprocenten.

De drogingscapaciteit is dus de bepalende factor voor wat betreft de werking van de sliblagunes. Deze is opgebouwd uit de oppervlakte-afvoer, de neerslag, de infiltratie en de verdamping. Op elk van deze

factoren wordt in de hiernavolgende onderdelen nader ingegaan.

6.2 Oppervlakte-afvoer

Voor een goede werking van het lagunesysteem is het van groot belang te voorkomen dat er zich gedurende langere tijd vrijstaand water op de oppervlakte van de sliblaag bevindt.

Water kan zich aan de oppervlakte verzamelen ten gevolge van:

- a. neerslag;
- b. uit het slib zelf vrijkomend water.

Ad a: Plasvorming door neerslag treedt op als gevolg van de zeer geringe doorlatendheid van de sliblaag waardoor het neerslagwater vrijwel niet of slechts uiterst langzaam door de sliblaag percoleert. Wanneer het slib zodanig is gedroogd dat scheurvorming is opgetreden vindt soms een zodanig verticaal transport plaats dat alle neerslagwater via de sliblaag in de bodem verdwijnt. Horizontale afstroming treedt dan slechts op tijdens extreem neerslagrijke perioden.

Ad b.: In de praktijk is gebleken dat ook uit het slib zelf water vrij kan komen. Met name wanneer in dikke lagen wordt gevuld zoals in indiklagunes.

Het ontstaan van vrij water beperkt zich niet tot de oppervlakte. In veel gevallen ontstaat zogenaamd "tussenwater", dat wil zeggen een laag water met een zeer gering drogestofgehalte tussen twee sliblagen in.

De mechanismen die voor het ontstaan van het vrije water zorgen, zijn niet exact bekend. In veel gevallen speelt bezinking van de vaste stof een rol, vooral bij die slibsoorten die geen na-indikking hebben ondergaan. Verder kan gedacht worden aan microbiologische processen, structuurverlies, stratificatie door temperatuurverschillen en chemische samenstelling.

Uit proeven bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder⁷⁵ is gebleken dat, bij gebruikmaking van eenzelfde slib, een keer wel water aan de oppervlakte of als tussenlaag vrij kwam, een andere keer niet, onder overigens (althans voor zover bekend) gelijke omstandigheden.

Ook uit de inventarisatie werden geen aanwijzingen verkregen voor een eenduidige verklaring voor het al dan niet ontstaan van vrij water.

6.3 Infiltratie

De hoeveelheid water die in de bodem van de lagune infiltreert is afhankelijk van twee factoren:

- de infiltratiecapaciteit van de bodem;
- de snelheid waarmee het water door het slib percoleert c.q. de doorlatendheid van het slib.

Nebiker¹⁹ stelt dat, zolang de filterlaag in casu de bodem, niet bedekt is met een slibafzetting, de infiltratie alleen afhankelijk is van de opbouw van de filterlaag, de vulhoogte (hydrostatische druk) en de viscositeit van het infiltrerende water. Nadat zich een slibafzetting heeft gevormd wordt de doorlatendheid daarvan maatgevend voor de hoeveelheid infiltrerend water. Volgens zijn gegevens, verkregen uit onderzoek ten behoeve van droogbedden, treedt na 1 tot 5 dagen een bijna totale verstopping van de bodem op.

Onderzoek bij de rwzi Zaandam-Oost¹⁰, Haarlem-Waarderpolder²⁶ en Heineken Brouwerijen¹¹ heeft aangetoond dat bij de betreffende slibsoorten sprake was van een langduriger infiltratie, zij het dat deze na verloop van tijd zeer gering wordt.

Dit wordt bevestigd door laboratoriumonderzoek.

Als voorbeeld van een situatie waarbij de infiltratie gedurende langere tijd is gemeten, is in fig. 4 een gedeelte van de resultaten van de proeven bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder gegeven.

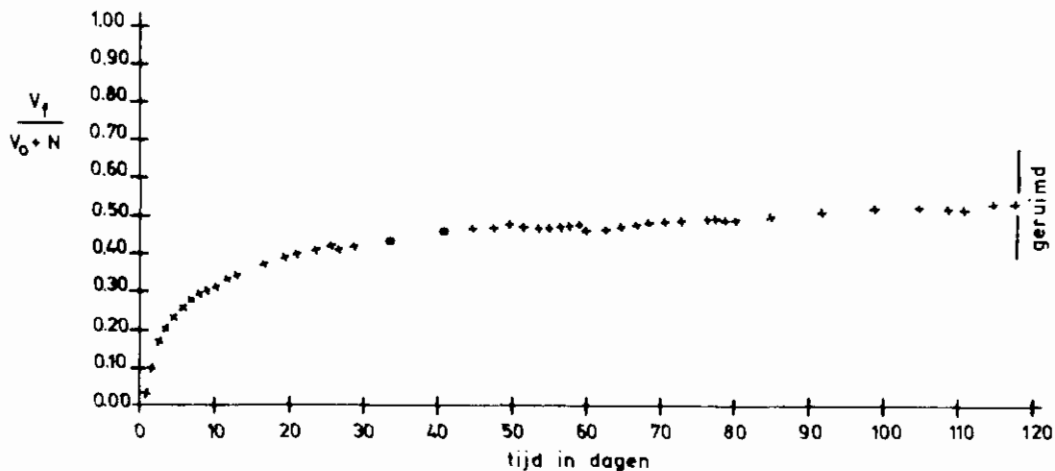


Fig. 4. Infiltratie via de bodem van een gedraineerde lagune bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder

V_f = volume filtraat (m^3).

V_0^f = slibvolume direct na het vullen (m^3).

N^0 = neerslag (m^3).

Het betreft hier een proeflagune (10x10 m) waar zuiverings-slib in een laagdikte van 0,8 m is ingebracht en waarbij de geïnfiltrerde en via het drainagesysteem afgevoerde hoeveelheid water is gemeten. Gedurende de proefperiode was er geen sprake van oppervlakte-afvoer. Duidelijk blijkt dat er sprake is van een vrij langdurig (in elk geval langer dan 1 tot 5 dagen) doorgaande infiltratie.

Voorwaarde voor een effectieve infiltratie is dat het geïnfiltreerde water wordt afgevoerd.

Een ander onderzoek waarbij een belangrijk effect van de infiltratie werd geconstateerd, betreft proeven met de lagunes bij de rwzi Beemster.³⁷ Slib met een drogestofgehalte van 3,2% (carrousel-slib uit na-indikker) werd in een gedraineerde lagune gebracht.

In 45 dagen werd een hoeveelheid van 3770 m³ ingelaten waarbij gedurende dezelfde periode 596-884 m³ water via de drains werd afgevoerd, ofwel 16-23% van het opgebrachte slibvolume.

Uit praktijkwaarnemingen (onder andere in Uden-Veghel) blijkt dat de verticale waterbeweging door het slib zodanig kan zijn, dat de neerslag via de sliblaag in de bodem infiltreert, zodat geen oppervlakteafvoer plaats vindt.

Bij een laagsgewijs vullen van de lagunes wordt overigens in de meeste gevallen geconstateerd dat er na 1 à 2 jaar geen water meer via het drainagesysteem wordt afgevoerd, c.q. dat geen infiltratie meer optreedt.

Behalve de zeer geringe doorlatendheid van de onderste sliblagen en het verstopping van de bodem kunnen nog andere factoren een rol spelen, bijvoorbeeld de verstoring van de drainage tijdens de ruiming. Een drainagesysteem dat geen water afvoert, is dan ook geen bewijs dat er geen water in de bodem infiltreert. Voor een juiste beoordeling dient het gehele bodemkundig hydrologische systeem te worden beschouwd. Bij een te ondiepe ligging van de drains en de afwezigheid van een ondoorlatende laag onder het drainagesysteem kan het geïnfiltreerde water naar het grondwater wegzakken.

Verstopping van de drains zelf (of het filtermateriaal) kan eveneens een oorzaak zijn. Bij de lagunes in Amersfoort is dit geconstateerd bij drains met nylondoekomhulling. Bij opgraven van enkele proefstukken bleek het doek gedeeltelijk te zijn verteerd, terwijl slijmvorming was opgetreden. Drains met cocosomhulling blijken in dit opzicht beter te voldoen.

Samenvattend kan worden gesteld dat de gegevens betreffende infiltratie zowel uit de praktijk als uit de literatuur soms tegenstrijdig zijn. Voor een deel is dit te wijten aan onvoldoende inzicht in de werking van een drainagesysteem in relatie tot de totale bodemkundig hydrologische situatie van een laguneterrein. De belangrijkste oorzaak is echter het grote verschil in ontwateringseigenschappen tussen de diverse slibsoorten. Bovendien variëren deze eigenschappen in de tijd. In het algemeen kan daarbij worden gesteld dat, naarmate de doorlatendheid groter is, het ontwaterende effect van infiltratie eveneens groter is. Dit blijkt ook bij andere slibsoorten dan zuiverings-slib. Uit proeven met baggerspecie is bijvoorbeeld gebleken dat drainage in de bodem (of in de gerijpte bovenlaag van de vorige laag) een belangrijk snellere ontwatering geeft. Vanwege het hogere gehalte aan minerale delen is de doorlatendheid groter dan die van zuiverings-slib.

Tenslotte dient nog te worden vermeld dat de doorlatendheid van zuiverings-slib uiteraard belangrijk verbetert nadat rijping (scheurvorming, doorworteling) is opgetreden. Dit is het geval bij drogestofgehalten

van 25-35% (afhankelijk van de soort slib, de snelheid van ontwateren en het begindrogestofgehalte).

Deze verbetering kan zelfs zodanig zijn dat eventuele neerslag direct door de sliblaag percoleert.

6.4 Verdamping

De verdamping speelt een zeer belangrijke rol in het ontwateringsproces, met name in de zomermaanden.

Het verdampingsproces is door verschillende onderzoekers bestudeerd waarbij sterk uiteenlopende resultaten worden verkregen, onder andere mede als gevolg van de talrijke wisselende factoren die op de verdamping van invloed zijn.

Reeds in 1951 heeft Lundesgaard¹⁵ geprobeerd een betrekking te vinden tussen de gewichtsafname van slib door verdamping en de verdamping aan een vrij wateroppervlak. Het betrof uitgegist, vloeibaar slib in een laagdikte van 28 cm. Hij vond dat de verdampingsintensiteit van dit slib bij windsnelheden tussen 0 en 9,1 km/uur ca. 30% van die van vrij water bedroeg.

Vater³⁴ vergeleek beide factoren door een overeenkomstige proef in petrischalen en vond dat in beide gevallen in eenzelfde periode eenzelfde hoeveelheid water verdampte. Met andere woorden: een verdampingsintensiteit van 100%.

Swanwick³⁰ verkreeg overeenkomstige resultaten als Vater bij metingen aan vers en uitgegist slib op miniatuur droogbedden onder atmosferische omstandigheden. Hij vond tevens een afnemende verdampingsintensiteit naarmate het karakter van het sliboppervlak veranderde van vloeibaar naar vast. De verdampingsintensiteit bleek dus afhankelijk van het vochtgehalte.

De verdampingsintensiteit bij afnemend watergehalte van het slib werd door Coackley³ gedetailleerd onderzocht aan 1 cm dikke sliblagen in een klimaatkamer.

Hij vond daarbij een verloop van de verdampingsintensiteit zoals dat in figuur 5 in beeld is gebracht.

De verdampingsintensiteit blijft constant tot een bepaald watergehalte, het zogenaamde eerste kritieke vochtgehalte. Gedurende deze periode is E_s/E_o vaak groter dan 1, hetgeen kan worden toegeschreven aan de donkere kleur van het slib, waardoor de temperatuur hoger wordt dan van water onder dezelfde omstandigheden.

Na dit eerste kritieke punt vermindert de verdampingsintensiteit plotseling en neemt lineair met het vochtgehalte af tot het tweede kritieke punt waarna de helling van lijn geringer wordt. De verdamping houdt tenslotte op voordat alle water is verdwenen.

Uit de proeven van Coackley³ bleek het eerste kritieke punt te liggen tussen vochtgehalten van 63,5 en 77% en het tweede tussen 37,5 en 55,5%. Tenslotte vond hij dat grotere vlokken sneller drogen dan kleine.

Het verloop van de verdampingscurve is te verklaren uit de verschillende waterbindingen in de verschillende verdampingsfasen.³⁶ In het

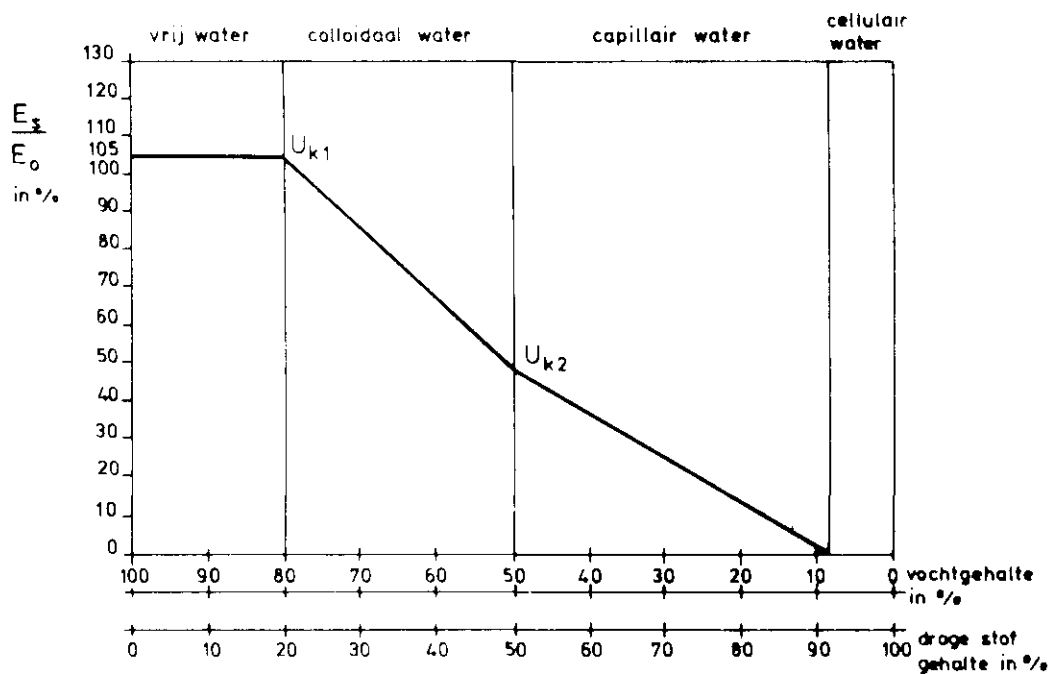


Fig. 5. Verdampingsintensiteit van zuiveringsslib in afhankelijkheid van het vochtgehalte

E_s = verdamping slib
 E_o = verdamping open water
 U_{k1} = eerste kritieke vochtgehalte
 U_{k2} = tweede kritieke vochtgehalte

eerste, horizontale deel van de curve verdampt water dat geen bijzondere binding heeft. De dampdruk is derhalve constant. In de daaropvolgende fasen is het water op verschillende wijzen gebonden, wat resulteert in een dampdrukverlaging. Voor het onttrekken van water uit het slib door verdamping zal het water zich in en door het slib naar de oppervlakte moeten bewegen. Dit geschiedt door capillaire opzuiging, verplaatsing onder invloed van een dampdrukgradiënt in capillairen en osmose door concentratieverschillen.

De snelheid van drogen wordt in het tweede deel van de curve steeds minder naarmate de grotere capillairen uitdrogen en het aandeel van de micro-capillairen groter wordt.

De vloeistof (dat wil zeggen het niveau in de capillairen) trekt zich steeds verder terug in het slib en de vloeistof moet door inwendige verdamping worden verwijderd via de met lucht gevulde poriën.

De verklaring voor het derde deel van de curve is momenteel nog onduidelijk.

De onderverdeling zoals in fig. 5 is gegeven is arbitrair, gezien het feit dat het water gedurende het transport door het slib tegelijkertijd aan verschillende bindingskrachten onderhevig is. Bovendien werken capillaire krachten, door de aanwezigheid van capillairen met verschillende diameters, over een groot bindingstraject.

De in het voorgaande genoemde onderzoekresultaten zijn vrijwel alle gebaseerd op proeven onder zeer geconditioneerde omstandigheden waarbij alleen de verdamping werd onderzocht bij afwezigheid van de mogelijkheid tot infiltratie.

Hierdoor is een vergelijking van de onttrekking door infiltratie, respectievelijk verdamping onder praktijkomstandigheden, niet mogelijk. Bij de proeven op de rwzi Haarlem-Waarderpolder werden wat dit betreft resultaten gevonden die in fig. 6 in beeld zijn gebracht.

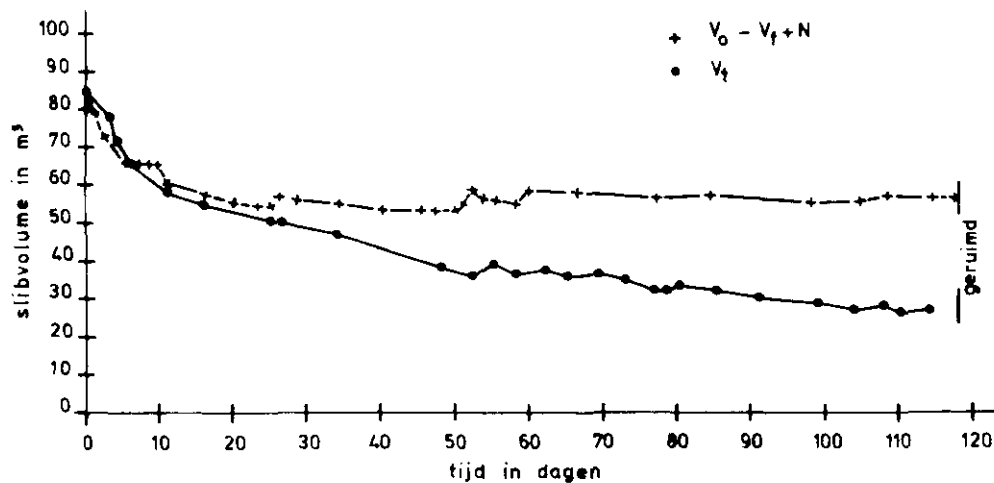


Fig. 6. Slibvolumevermindering op een gedraineerde lagune bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder

V_0 = slibvolume direct na het vullen (m³)
 V_f^0 = volume geïnfiltreerd water (m³)
 N^f = neerslag (m³)
 V_t = slibvolume op tijdstip t (m³)

Het volumeverlies c.q. de wateronttrekking via verdamping (V_v) kan nu berekend worden uit:

$$V_v = (V_0 - V_t) - V_f + N$$

Gedurende de proefperiode heeft namelijk geen oppervlakteafvoer plaats- gevonden. In fig. 7 is V_v zowel als E_0 uitgezet tegen de tijd.

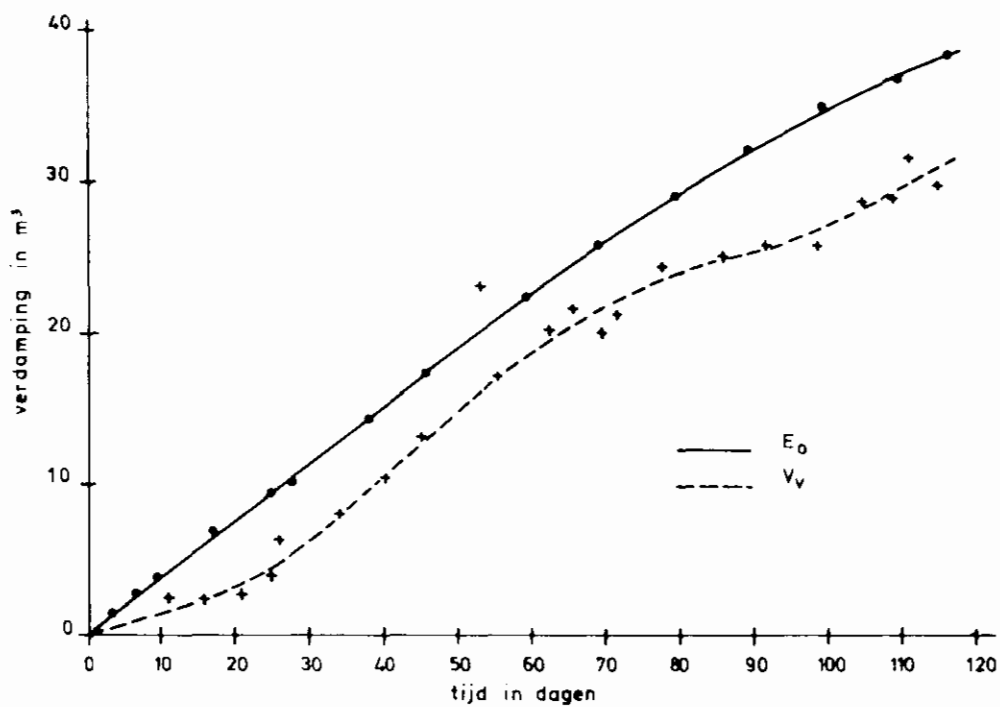


Fig. 7. Vergelijking van de werkelijke met de potentiële verdamping op een gedraineerde lagune bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder

- E_o = verdamping van open water volgens Penman
- V_o = slibvolume direct na het vullen (m³)
- V_i = volume geïnfilteerd water (m³)
- N^i = neerslag (m³)
- V_t = slibvolume op tijdstip t (m³)

Tollenaar³² vindt bij de proeven bij de rwzi Beemster een aandeel van de verdamping en de oppervlakteafvoer samen, van 10-18% van de slibaanvoer. Hierbij dient te worden aangetekend dat de metingen slechts 5 dagen nadat de lagune vol was, zijn voortgezet.

Als aandeel van de infiltratie is bij deze proeven gedurende de vulperiode 16-23% van het aangevoerde slibvolume gevonden.

7 ONTWATERINGSBEVORDERENDE MAATREGELEN

De ontwatering kan worden bevorderd door het maximaliseren van:

- oppervlakte-afvoer;
- verdamping;
- infiltratie.

De te nemen maatregelen hebben zowel betrekking op het technisch ontwerp van de lagunes als op de bedrijfsvoering ervan. In dit hoofdstuk worden alleen de principes aangegeven, terwijl de concrete, in de praktijk toegepaste maatregelen in de hoofdstukken 9 en 10 worden beschreven.

7.1 Oppervlakte-afvoer

De afvoer van vrijstaand water op de oppervlakte kan worden bevorderd door:

- het aanbrengen van één of meer aflatconstructies langs de zijde(n) van de lagune. Deze constructies dienen zodanig te worden uitgevoerd dat de daling van de sliboppervlakte als gevolg van de ontwatering, voldoende nauwkeurig kan worden gevolgd. Bij vullen met (een) dikke la(a)g(en), waardoor de kans op de vorming van een tussenlaag vrij water bestaat, dienen zodanige voorzieningen te worden getroffen dat deze laag kan worden opgezocht en afgevoerd;
- een zodanige vulmethode dat de sliboppervlakte een helling krijgt in de richting van de aflatconstructies. Dit pleit, met name bij het vullen in dunne lagen, voor een aanvoer van het slib in het midden van de lagunes, met een aflatconstructie in elk der hoeken. Een andere mogelijkheid is de vulconstructie aan één zijde en de aflatconstructie(s) aan de tegenoverliggende zijde. Slib met een drogestofgehalte van minder dan 5% is over het algemeen zo dun vloeibaar dat er tijdens het vullen geen helling kan ontstaan, tenzij het in zeer dunne lagen wordt opgebracht, met voldoende lange tussenpozen ten behoeve van de verdamping. Overigens is een zeer lichte helling (bijvoorbeeld 1:200 à 300) al voldoende om een gunstig effect te realiseren;
- indien het slib enige stevigheid heeft (i.c. een relatief droge laag aan de oppervlakte) kan de sliblaag worden begreppeld. Het regenwater kan zich in deze greppels verzamelen en via de aflatconstructies afstromen. Voorwaarde voor een goede werking is dat het greppelsysteem op de juiste wijze in verbinding wordt gebracht met de aflatconstructie(s). Ligt de sliboppervlakte onder een helling, dan dient met de helling mee te worden begreppeld;
- het stimuleren van het vrijkomen van water uit het slib zelf door toevoeging van stoffen die de vlokvorming bevorderen (conditionering). Hiervan kunnen worden genoemd: kalk, ijzerverbindingen, diverse polymeren (flocculanten). Toepassing van dergelijke stoffen heeft ook invloed op de doorlatendheid van het slib c.q. de percolatie van water door het slib en de infiltratie in de bodem van de lagune. De genoemde stoffen beïnvloeden behalve de ontwaterbaarheid ook de

structuur en de stankvorming. Kalk is in dit opzicht gunstig. Van de andere stoffen zal het nut van de toepassing als ontwateringsbevorderend middel moeten worden afgewogen tegen een eventuele ongunstige beïnvloeding van de structuur. Een en ander in relatie tot de bestemming van het slib.

7.2 Infiltratie

De doorlatendheid van het slib kan worden bevorderd door:

- het mengen van de sliblaag.
De ingedroogde, gescheurde en daardoor goed doorlatende bovenlaag, wordt daarbij gemengd met het nog natte, slecht doorlatende materiaal waardoor de gemiddelde doorlatendheid verbetert.
Eventuele storende lagen, bijvoorbeeld ontstaan door vacuüm drainage, worden daarbij verbroken. In de praktijk blijken de resultaten van het mengen twijfelachtig;
- het toevoegen van stoffen als kalk, ijzerverbindingen en polymeren, die de vlokvorming bevorderen. Door de grotere vlokken worden de poriën eveneens groter waardoor het water gemakkelijker wordt afgevoerd;
- het bevriezen van het slib. Nadat de sliblaag weer is gedooid blijkt de doorlatendheid sterk te zijn verbeterd. In de praktijk is dit effect voor het lagunesysteem slechts van belang in een klimaat waar het onder natuurlijke omstandigheden lang en streng vriest.

De infiltratie van uit het slib percolerend water in de bodem van de lagune is te bevorderen door:



- het aanbrengen van een goed doorlatende, gedraineerde bodem waarvan de drainage regelmatig dient te worden gereinigd c.q. doorgespoten. Langdurige anaërobie van de bodem blijkt de infiltratiecapaciteit sterk negatief te kunnen beïnvloeden. Bij gebruik van grof zand (M50-cijfer * meer dan 300µm) en een goed werkend afvoersysteem zal deze situatie niet of slechts zelden ontstaan.
Bij het ruimen dient al het slib te worden verwijderd, waarbij, afhankelijk van de wijze van ruimen, tevens een zandlaagje van één tot enkele centimeters wordt afgevoerd.
Dit is gunstig voor het op peil houden van de infiltratiecapaciteit. Regelmatig dient zandaanvulling plaats te vinden;
- het aanbrengen van een onderdruk in het zandbed. Hiermee zijn in laboratoriumproeven gunstige resultaten bereikt. De resultaten van de praktijkproeven zijn wisselend.
Onder sommige omstandigheden ontstaat een zeer slecht doorlatend laagje direct op het zandbed waardoor het effect ten opzichte van het niet toepassen van deze zogenaamde vacuüm drainage tot nul terugloopt.

* M50-cijfer = korreldiameter waar 50 gewichtsprocenten van de zandfractie boven en 50 gewichtsprocenten beneden ligt.

7.3 Verdamping

De verdamping kan worden bevorderd door:

- de verwijdering van vrijstaand water via oppervlakte-afvoer. Tabel 2 illustreert het effect van het afvoeren van het vrije water.³⁵

	jan.	febr.	mrt	apr.	mei	juni	juli	aug.	sept.	okt.	nov.	dec.	jaar-totaal
Gem. neerslag	68	48	43	41	45	49	66	82	83	84	81	64	754
Gem. verdamping	6	18	42	81	113	133	127	107	71	34	13	5	750
Neerslagoverschot	62	30	1	-40	-68	-84	-61	-25	12	50	68	59	4
Verdampingsperiode aan slibopp. zonder afvoer neerslag													
Verdampingsperiode aan slibopp. met afvoer neerslag													

Tabel 2. Neerslag-verdamping (K.N.M.I.-station Naaldwijk) in mm

Uit deze tabel blijkt dat door het afvoeren van het neerslagoverschot het verdampingsoverschot niet beperkt blijft tot de maanden april t/m augustus, maar dat ook in de rest van het jaar effectieve verdamping optreedt, ook al is deze in de maanden december en januari zeer gering. Zonder afvoer van de neerslag zou de verdamping veel later direct het sliboppervlak beïnvloeden dan met afvoer, omdat eerst het vrijstaand water (in hoofdzaak door verdamping) moet verdwijnen;

- de oppervlaktevergroting die als gevolg van begreppeling plaatsvindt. Deze is, wanneer het slib nog dik vloeibaar is, zeer gering. In een later stadium, bij aanwezigheid van een droge slibkoek aan de oppervlakte, kunnen de greppels zo diep worden gemaakt dat de oppervlaktevergroting een merkbare rol gaat spelen.

Uiteraard kan een diepere begreppeling slechts worden toegepast bij een laguneringssysteem met een voldoende lange verblijftijd en een voldoende lange rustperiode na de laatste vulling (of tussen twee opeenvolgende vullingen);

- het vullen in dunne lagen (< 0,40 m).

Bij vullen in dunne lagen met voldoende lange tussenpozen kan de verdamping optimaal worden benut. Elke laag kan op deze wijze tot het eerste kritieke vochtgehalte (6.4) indrogen;

- oppervlaktevergroting door op ruggen zetten.

Hiervoor moet het slib tot minstens "steekvast" zijn ingedroogd (15-25% drogestof) terwijl er bovendien slechts van een geringe laagdikte sprake mag zijn. Het ingedroogde slib wordt op langwerpige hopen gezet, waarbij relatief grote holle ruimten ontstaan en de aan de lucht blootgestelde oppervlakte belangrijk wordt vergroot.

In feite is dit een bewerking die niet tot het lagunesysteem moet

worden gerekend; in een lagune gedroogd slib kan op deze manier elders een bewerking ondergaan.

- het stimuleren van begroeiing.

Op vele slibsoorten, en zeker op zuiveringsslib afkomstig van huishoudelijk afvalwater, blijkt een weelderige vegetatie-ontwikkeling mogelijk.

Om een goede ontkieming te garanderen dient er wel voor te worden gezorgd dat op de oppervlakte geen vrijstaand water aanwezig is, en snel groeiende gewassen worden gebruikt, bijvoorbeeld moerasandijvie. Plantenwortels kunnen een grote zuigkracht ontwikkelen (cultuurgewassen b.v. 16 atm.) en bevorderen de verdamping aanzienlijk omdat de wortels tot op grote diepte doordringen. Bovendien wordt de structuur sterk verbeterd door de stimulering van de bodem(micro)flora en -fauna.

Deze maatregel is slechts effectief wanneer de lagune minstens het grootste deel van een groeiseizoen met rust gelaten wordt.

Op lagunes die gedurende een lange tijd met rust worden gelaten, ontwikkelt zich spontaan een vegetatie, bestaande uit diverse plantensoorten.

Bij inzaaien ontstaat een monoculture die gunstiger is in verband met een later gebruik van het slib als component van teelaarde.

Het gehalte en de diversiteit aan onkruidzaden is geringer dan van slib dat spontaan is begroeid.

8 DIMENSIONERING

De benodigde oppervlakte voor de lagunedroging van slib hangt af van:

- de geproduceerde hoeveelheid slib;
- het begindrogestofgehalte;
- de ontwateringseigenschappen;
- het gewenste c.q. te bereiken einddrogestofgehalte;
- de benodigde oppervlakte voor wegen, kaden e.d.;
- de vulhoogte;
- de rusttijd.

Wanneer de vier eerstgenoemde factoren bekend zijn, kan de netto benodigde oppervlakte worden berekend. Combinatie met factor 5 geeft de bruto benodigde oppervlakte.

Het dimensioneringscriterium kan worden uitgedrukt op de volgende manieren:

i.e./m² of m²/i.e.
m³/m².jr.
kg.d.s./m².jr.

Laatstgenoemde eenheid heeft rechtstreeks betrekking op de hoeveelheid te ontwateren slib, maar geeft geen directe aanwijzing voor de dimensionering, omdat daarbij ook het watergehalte van het uitgangsmateriaal moet worden betrokken.

De eenheid i.e./m² (of m²/i.e.) levert geen eenduidige aanduiding van de capaciteit van een lagunesysteem vanwege het feit dat de geproduceerde hoeveelheid droge stof per i.e., afhankelijk van het zuiveringsstelsel en de aard van het influent, sterk kan variëren. Analooft geldt voor de eenheid m³/m².jr. dat het drogestofgehalte van het slib sterk kan variëren. Overigens wordt in de praktijk overwegend gebruik gemaakt van m³/m².jr. en i.e./m².

De dimensionering van lagunesystemen bij nieuw te bouwen zuiveringsinrichtingen vindt thans plaats op basis van praktijkervaringen en verwachtingen ten aanzien van de genoemde factoren. Bovendien wordt gebruik gemaakt van de ervaringen die inmiddels zijn opgedaan met bestaande lagunesystemen.

Een moeilijkheid hierbij wordt gevormd door de vrij grote variaties in geproduceerde hoeveelheid droge stof per i.e., het begindrogestofgehalte en de ontwateringseigenschappen van het slib. Dit geldt zowel voor verschillende zuiveringsinrichtingen als voor de situatie per zuiveringsinrichting in de loop van de seizoenen.

De dimensioneringscriteria, zoals deze in de literatuur zijn vermeld, variëren mede gezien het bovenstaande vrij sterk. Bovendien wordt vaak niet vermeld welke soort slib het betreft, wat het gewenste c.q. te bereiken einddrogestofgehalte is en met welke verblijftijd wordt gerekend.

Er moet onderscheid worden gemaakt tussen indik-/bufferlagunes en drooglagunes.

Indik-/bufferlagunes, gebruikt voor tijdelijke opslag bij natte afvoer of als eerste trap bij het tweetrapslagunesysteem, vergen veel minder ruimte dan drooglagunes.

Miller¹⁷ noemt voor bufferlagunes een oppervlakte van 0,15 m²/i.e. bij een verblijftijd van een jaar en een vulhoogte van 3-4 m.

Onder deze omstandigheden treedt een verhoging van het drogestofgehalte van ca. 4% naar ca. 8% op. Dit, gezien de lange verblijftijd, relatief geringe ontwateringseffect is hoogstwaarschijnlijk vooral een gevolg van de grote laagdikte.

Voor de drooglagunes dient een veel geringere belasting te worden aangehouden. In tabel 3 is een aantal literatuur- en inventarisatiegegevens weergegeven betreffende de ontwerpbelasting van lagunes.

zuiverings- inrichting	soort slib	dimensionerings- grondslag bij ontwerp ¹⁾
Beemster	aëroob gestabiliseerd	4,6 m ³ /m ² .jr. ²⁾
Geestmerambacht	idem	53 kg d.s./m ² .jr.
Nieuwe Niedorp	idem	0,8 m ³ /m ² .jr.
Stolpen	idem	1,5 m ³ /m ² .jr.
Wervershoof	idem	1,3 m ³ /m ² .jr.
Wieringen	idem	3,3 m ³ /m ² .jr.
Amsterdam-West	anaëroob gestabiliseerd	1,7 m ³ /m ² .jr.
Amsterdam-Zuid	idem	1,4 m ³ /m ² .jr.
Amsterdam-Noord	idem	2,0 m ³ /m ² .jr.
Dongemond	idem	4 i.e./m ²
Gouda	idem	6 i.e./m ² (na-calculatie)
Literatuur:		
Noack en Baumann ²³	aëroob gestabiliseerd	1,0 m ³ /m ² .jr.
	anaëroob gestabiliseerd	1,2 m ³ /m ² .jr.
Handboek V.S. ²²	divers	35-40 kg d.s./m ² jr.
Imhoff ¹⁵	idem	1 m ³ /m ² -2 i.e./m ²
Möller ¹⁸	idem	1,8 m ³ /m ² .jr.
Coppes ⁴	idem	2-2,5 i.e./m ²
Miller ¹⁷ (bufferlagune)	idem	6 m ² /i.e.

Tabel 3. Dimensioneringscriteria uit de literatuur en de inventarisatie

- 1) Gezien de variaties in drogestofgehalten en drogestofproductie per i.e. zijn de gegeven waarden niet omgerekend.
Het gaat in alle gevallen om vloeibaar zuiverings-slib.
- 2) Ruimtegebrek.

Uit de tabel blijkt dat er een grote spreiding in ontwerpbelasting bestaat. De keuze geschiedt in eerste instantie op basis van de verwachte ontwaterbaarheid van het slib.

Hoewel voor de bepaling hiervan eenvoudige laboratoriumproeven bestaan worden deze, althans in het kader van het bepalen van de ontwerpbelasting van lagunes, sporadisch toegepast.

Enerzijds is dit een gevolg van het feit dat bij nieuw te bouwen zuiveringsinrichtingen nog geen slib ter beschikking is, anderzijds is er onvoldoende bekend over de relatie tussen de laboratoriumuitkomsten en de aan te houden ontwerpbelasting.

De bedoelde laboratoriumproeven zijn:

- bepaling van de capillaire zuigtijd (CST-waarde).²⁸
- bepaling van de afzuigtijd bij vacuümfiltratie.²⁷
- bepaling van de filtratieweerstand.

Met deze methoden is het mogelijk een goede indruk te krijgen van de relatieve ontwaterbaarheid van verschillende slibsoorten. Een eenduidige vertaling naar een ontwerp-lagunebelasting is echter (nog) niet mogelijk.

In het voorgaande is alleen de ontwerpbelasting aan de orde geweest, op basis waarvan de netto benodigde oppervlakte kan worden berekend. Om de totaal benodigde oppervlakte te verkrijgen, dient de oppervlakte, benodigd voor wegen en kaden, erbij te worden opgeteld. Doorgaans wordt hiervoor 25 à 30% van de netto oppervlakte aangehouden.

9 TECHNISCH ONTWERP

9.1 Bodemkundig-hydrologische situatie

Om tot een technisch verantwoord ontwerp van lagunes te komen is een goed inzicht nodig in de bodemkundig-hydrologisch-grondmechanische situatie in verband met:

- de stabiliteit van de kaden;
- het optreden van eventuele zettingen;
- de ontwatering van de bodem;
- de kans op bodem- en grondwaterverontreiniging;
- de fundering van aan- en afvoerconstructies.

De stabiliteit van de kaden dient te zijn gewaarborgd om doorbraak te voorkomen. Gegeven de kwaliteit van het kademateriaal en de opbouw van het grondprofiel worden de minimale afmetingen van de kade bepaald, kruinbreedte en talud. Bij relatief hoge kaden (>1 m) en een slappe ondergrond verdient het aanbeveling stabiliteitsberekeningen te verrichten.

Wanneer in het grondprofiel samendrukbare klei- en/of veenlagen voorkomen, treden er bij belastingverhoging zettingen op. Het is van belang een indruk te hebben van de grootte ervan in verband met de gewenste uiteindelijke hoogteligging. Het ontwerp van een eventueel drainageplan is afhankelijk van de grootte van de zettingen; daarbij gaat het ook om de zettingsverschillen bijvoorbeeld tussen de kaden en de rest van het terrein.

Het drainagesysteem dient bij aanleg zodanig te worden gelegd dat het ook na het optreden van de zettingen zijn ontwaterende functie blijft behouden.

Ook voor het ontwerp van het slibaanvoersysteem is een prognose van de te verwachten zettingen nodig.

De ontwatering van de bodem van een sliblagune blijkt van groot belang voor het functioneren van een lagune. Onderzoek ter plaatse van de sliblagunes van de rwzi Zaandam-Oost¹⁰ heeft aangetoond dat hoge grondwaterstanden onder de lagunes leiden tot vermindering van de infiltratie van uit het slib percolerend water in de bodem en zodoende tot een vermindering van de droogcapaciteit.

De versnelling van de ontwatering van slib door een goede ontwatering van de bodem is ook geconstateerd bij de verwerking van onderhoudsbaggerspecie uit de Rotterdamse havens.

De aanleg van een drainagesysteem in de gerijpte bovengrond van het reeds opgespoten slib bleek een zeer gunstige invloed te hebben op de ontwateringssnelheid van de volgende laag.

Behalve de hoogte van de grondwaterstand heeft ook de samenstelling van de bodem een belangrijke invloed op de infiltratiecapaciteit van de bodem. Het aanbrengen van een zandlaag (indien niet aanwezig) bevordert de infiltratie, waarbij de grofheid van het zand mede bepalend is voor het effect. Ter illustratie hiervan dient fig. 8.

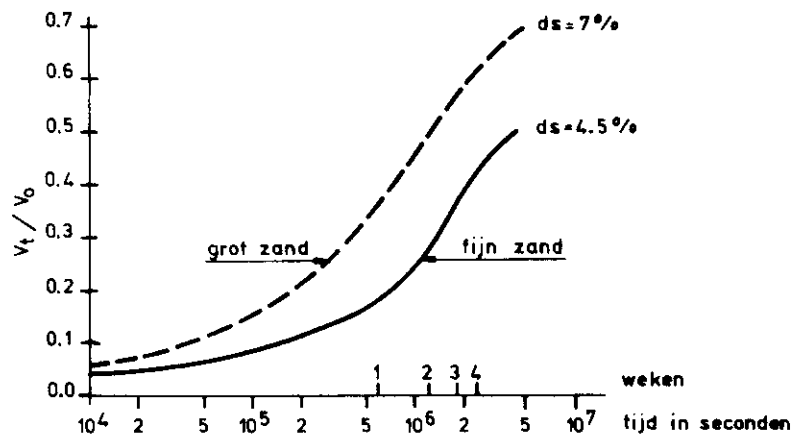


Fig. 8. Het effect van verschillende zandkwaliteiten van de bodem op de ontwateringssnelheid van zuiveringsslib²

Het zand dient voldoende grof te zijn om niet te veel weerstand te geven en de kans op verstopping tot een minimum te beperken. Het mag echter ook weer niet zo grof zijn dat doorslag van het slib plaatsvindt.

De juiste korreldiameter is afhankelijk van de soort slib.

Onderzoek van slib, afkomstig van de drinkwaterbereiding²¹, op ongesorteerd rivierzand heeft aangetoond dat van slib met een compressibiliteit van minder dan 0,7 een relatief hoog percentage in het zand penetreerde.

Fig. 9 geeft de resultaten van dit onderzoek weer.

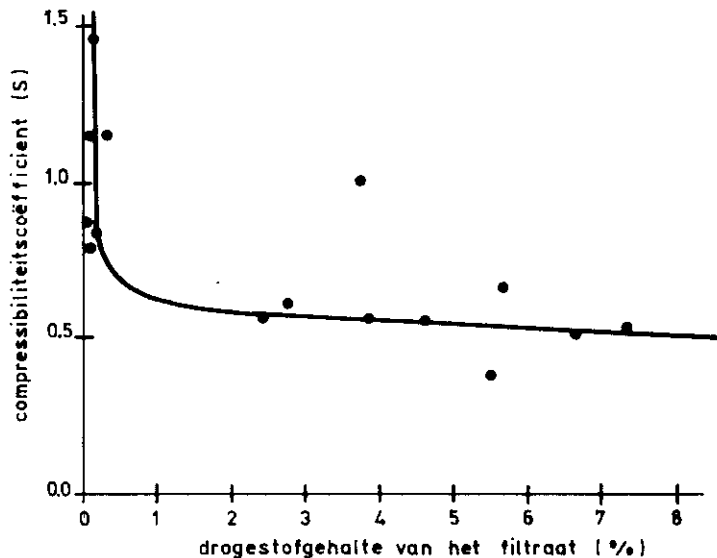


Fig. 9. Effect van de compressibiliteitscoëfficiënt (S) op de penetratie van slib in de zandbodem²¹

Hoewel de relatie slibeigenschappen-gewenste zandkwaliteit nog onvoldoende is onderzocht om tot gedetailleerde uitspraken te kunnen komen kan, op basis van ervaringen met droogbedden en lagunes wel worden gesteld dat het zand een M50-cijfer van minimaal 300 μm dient te hebben, terwijl het humus- en lutumarm dient te zijn (lutum = fractie $< 2 \mu\text{m}$, voornamelijk kleimineralen vertegenwoordigend).

In het zand dient een drainagesysteem te worden gelegd dat het water afvoert naar de zuiveringsinrichting.

Met het oog op het eventueel optreden van bodem- en grondwaterverontreiniging is eveneens een goed inzicht in de opbouw van het grondprofiel en in de stromingsrichting van het grondwater noodzakelijk. Het onderzoek moet antwoord geven op de vraag in hoeverre eventueel niet door het drainagesysteem opgevangen percolatiewater door het grondwater naar grotere diepten en/of buiten het laguneterrein kan worden gevoerd.

Een dik klei- en/of veenpakket⁹ belemmert de migratie van verontreinigingscomponenten in sterke mate vanwege:

- de zeer geringe doorlatendheid van deze lagen;
- de samendrukbaarheid, waardoor bij belasting de grondwaterstroming in de bovenste lagen naar boven is gericht;
- de vastlegging van diverse verontreinigingscomponenten aan het bodem-materiaal.

Ook wanneer er sprake is van een kwelsituatie¹⁰ wordt de migratie van percolaat tot buiten het laguneterrein sterk belemmerd.

Wanneer de grond goed doorlatend is, terwijl er bovendien sprake is van wegzijging verdient het treffen van maatregelen aanbeveling.

Veelal wordt volstaan met het aanbrengen van een drainagesysteem op een zodanige diepte dat een permanente (kunstmatige) kwelstroming ontstaat (zie fig. 10).

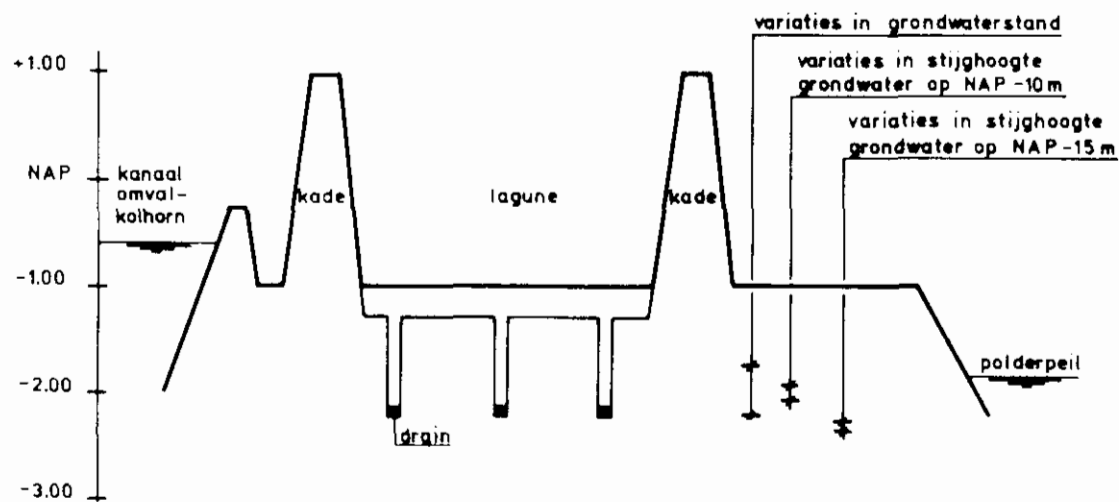


Fig. 10. Schema van het drainagesysteem van de lagunes bij de rwzi Niedorp¹⁰

9.2 Opbouw kaden

Bij buffer-/indiklagunes worden de wanden veelal in beton uitgevoerd. In de meeste andere gevallen vindt de aanleg van de kaden plaats met materiaal dat onttrokken wordt aan het terrein, soms afgedekt met een asfaltverharding.¹⁶

Voor drooglagunes wordt een afdichting van de kaden doorgaans achterwege gelaten.

Soms worden de kaden uit zand opgebouwd of wordt een zandlaag op de kaden aangebracht ter bevordering van de infiltratie.²⁰ Fig. 11 geeft een beeld van de opbouw van de kaden van de proeflagunes bij de rwzi St. Annaparochie.

Hierbij is tevens verondersteld dat de horizontale doorlatendheid van het slib groter zou kunnen zijn dan de verticale. Ter onderbouwing van beide veronderstelde effecten staan geen concrete onderzoeksresultaten ter beschikking. De verwachting is echter gerechtvaardigd dat de invloed gering zal zijn.

De rechtopstaande drainbuis is bedoeld voor oppervlakteafvoer en/of tussenwater.

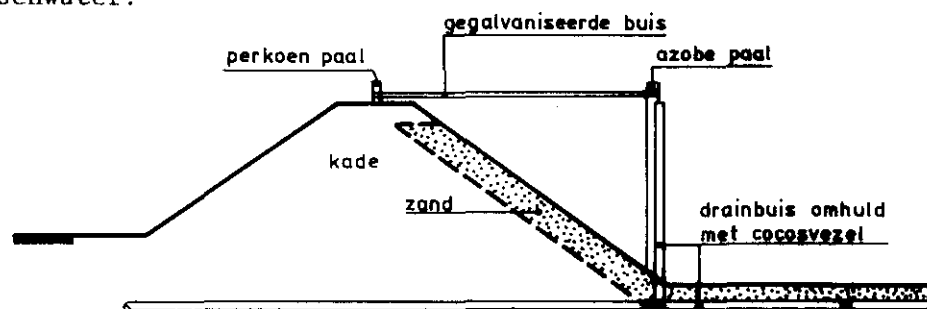


Fig. 11. Opbouw van de kaden van de proeflagunes bij de rwzi St. Annaparochie

Bij gebruikmaking van het tweetrapslagunesysteem worden ook voor de indiklagunes grondkaden toegepast.

De hoogte van de kaden bedraagt bij drooglagunes in het algemeen 1,5-2,0 m. Van buffer-/indiklagunes zijn de wanden/kaden vaak hoger (tot meer dan 4 m). De optimale hoogte is in principe afhankelijk van:

- de bedrijfsvoering;
- het gewenste einddrogestofgehalte;
- de beschikbare oppervlakte.

De ontwerphoogte is meestal niet gebaseerd op onderzoeksresultaten maar moet meer als een "gewoonte" worden gezien. Afhankelijk van de bedrijfsvoering en de slibontwateringseigenschappen zouden grotere laagdikten dan tot nu toe gebruikelijk (en dus hogere kaden) kunnen worden toegepast.

Voorzieningen ten behoeve van het ruimen van de lagune worden soms aangebracht in de vorm van damwand met uitneembare planken waardoor het ruimingsmaterieel de kaden kan passeren. Meer algemeen is de aanleg van op- en afritten waardoor het transport over de kade heen plaats kan vinden.¹⁸

Bij toepassing van vacuüm drainage dient ook de kade luchtdicht te zijn afgesloten bijvoorbeeld door middel van een kunststoffolie. In fig. 12 is een dergelijke situatie weergegeven (sec-feld-proeven rwzi Haarlem-Waarderpolder).

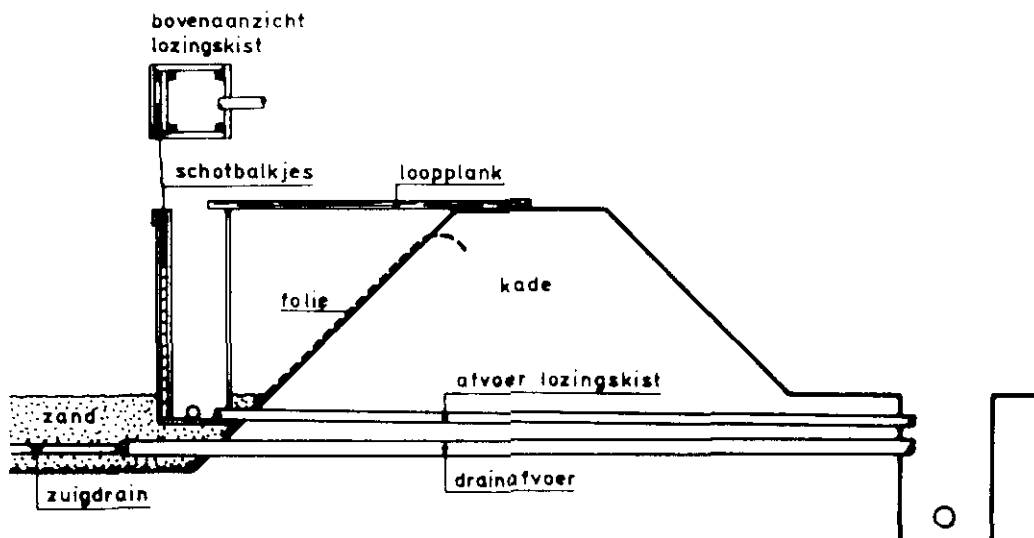


Fig. 12. Doorsnede van de kade rond het sec-feld Haarlem-Waarderpolder ter plaatse van een lozingskist

9.3 Opbouw bodem

De opbouw van de bodem moet in principe afhankelijk worden gesteld van:
 - de bodemkundig-hydrologische situatie;
 - de eis tot maximaal ontwateringseffect.

Dit leidt tot de constructie van een goed doorlatende (zand)bodem met een drainagesysteem ten behoeve van de afvoer van in de bodem geïnfiltreerd percolatiewater.

Indik-/bufferlagunes, die worden voorzien van een waterdichte beton- of asfaltbodem, voldoen niet aan het genoemde criterium.

Afscheiding van water uit het slib kan in deze gevallen slechts plaatsvinden door bezinking van de slibdeeltjes. De indik-/bufferlagunes zoals deze bij het tweetrapssysteem zijn uitgevoerd hebben wel een zandbodem, voorzien van een drainagesysteem. Hoewel hierover geen exacte, vergelijkende gegevens bekend zijn zal de ontwatering in deze bufferlagunes sneller verlopen dan in die met een dichte bodem.

De drooglagunes voldoen in het algemeen wel aan deze eis, zeker die lagunes die de afgelopen jaren zijn aangelegd; andere lagunes zijn veelal direct op het bestaande maaiveld aangelegd, zonder de toepassing van speciale voorzieningen (Uithoorn).

In verband met de mogelijkheid van bodem- en grondwaterverontreiniging wordt het drainagesysteem in veel gevallen dieper gelegd dan de zandlaag dik is en wel zodanig dat er een permanente kwelstroom ontstaat (zie fig. 10). Het is van belang deze kwelstroom zo gering mogelijk te laten zijn om niet nodeloos een grote hoeveelheid (zuiver) water naar de zuiveringsinrichting af te moeten voeren. Gezien de fluctuaties in de grondwaterstand wordt het afwateringsniveau van het drainagesysteem dan ook regelbaar gemaakt.

Op dit moment wordt bij zuiveringsslib slechts in uitzonderingsgeval-
len ten behoeve van het voorkomen van bodem- en grondwaterverontreini-
ging een waterdichte bodem toegepast in de vorm van kunststoffolie.
Voor sterk giftige slibsoorten (b.v. jarosiet) is het regel.
Waterdichte constructies onder de gedraineerde zandbodem verhogen in
belangrijke mate de investeringen.

Wanneer vacuümdrainage wordt toegepast dient onder de zandbodem een
luchtdichte afsluiting te worden aangebracht (zie fig. 12). Uit de proe-
ven bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder is gebleken²⁶ dat zeer kleine lek-
ken zoals peilbuizen door het slib in de zandbodem reeds leiden tot
moeilijkheden bij het opbouwen van een onderdruk in het zandbed.

Ten behoeve van het ruimen van het ontwaterde slib worden soms verhar-
de rijstroken aangebracht¹⁸, aansluitend op op- en afritten tegen de
kaden.

Bij een voldoende dikke zandlaag en wanneer voor het ruimen niet te
zwaar materieel wordt ingezet is het gebruik van verharde rijstroken
niet noodzakelijk.

De bodem van de indik-/bufferlagune van de rwzi Alkmaar is licht hel-
lend uitgevoerd met een betongoot in de richting van de pompput. Ook de
bodems van de geasfalteerde lagunes van de rwzi 's-Hertogenbosch liggen
hellend in de richting van de aftappunten.

Wil een dergelijke hellende bodem aan zijn doel beantwoorden dan mag
het opgeslagen slib niet zodanig ver indrogen dat het te visceus wordt;
het drogestofgehalte mag zeker niet hoger worden dan 8 à 10%.

9.4 Slibaanvoer

De meest eenvoudige constructie voor de aanvoer van het vloeibare slib
bestaat uit een buisleiding vanwaaruit het slib aan één van de zijden
in de lagune stroomt.

In het verleden werd vrijwel uitsluitend volgens deze methode gevuld.
In de huidige situatie worden de indik-/bufferlagunes nog steeds op deze
wijze gevuld.

Bij het laagsgewijze vullen van drooglagunes treedt echter het probleem
op dat de nieuwe sliblaag onder de oude duikt.

De bovenlaag droogt dan sterk in onder invloed van de verdamping, ter-
wijl in het ondergedoken slib slechts ontwatering optreedt onder in-
vloed van de zwaartekracht. Er zijn veel experimenten uitgevoerd om
tot een aanvoerconstructie te komen die het onderduiken van het slib
voorkomt.

Van Giffen³³ vermeldt experimenten met het gebruik van zogenaamde slib-
kegels waarbij het slib langzaam uit een rechtopstaande buis via een
kegelvormige plaat in de lagune stroomt. Een dergelijk systeem is ook
beproofd in de proeflagunes bij de rwzi Rijen. De resultaten van deze
proefnemingen waren niet bevredigend, althans niet bij slibben met een
gering drogestofgehalte.

Het onderduiken van het slib bleek er niet voldoende door te worden
voorkomen.

Wolters en Rösler²⁷ beschrijven een aanvoer-constructie die leidt tot de opbouw van een licht hellende slibkegel waarin het betreffende slib (actiefslib, drogestofgehalte 8%, toevoeging van $0,5 \text{ kg Ca (OH)}_2/\text{m}^3$) goed ontwaterde.

Het vloeibare slib wordt onder tegen een kegelvormige plaat gespoten en versproeid. De vrij steile helling van de ontstane slibkegel is een gevolg van het relatief hoge begindrogestofgehalte. Vanwege het hellende sliboppervlak wordt het uit het slib vrijgekomen water en het neerslagwater rechtstreeks naar de zijden afgevoerd en opgevangen in een drainagesysteem van waaruit het wordt afgevoerd naar de zuiveringsinrichting (zie fig. 13).

Door het Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland is een aanvoerconstructie ontwikkeld waarbij het slib onder tegen een horizontale schijf wordt gespoten waarop zich schoepen bevinden. Door de kracht waarmee wordt gespoten en de aanwezigheid van de schoepen gaat de schijf draaien, waarbij het slib wordt weggeslingerd (zie fig. 14).

Dit systeem voldoet aan de verwachtingen. Het slib duikt niet meer onder, terwijl bij toediening van het slib in dunne lagen (enkele cm's) een helling ontstaat naar alle zijden, ook bij slibben met een laag drogestofgehalte.

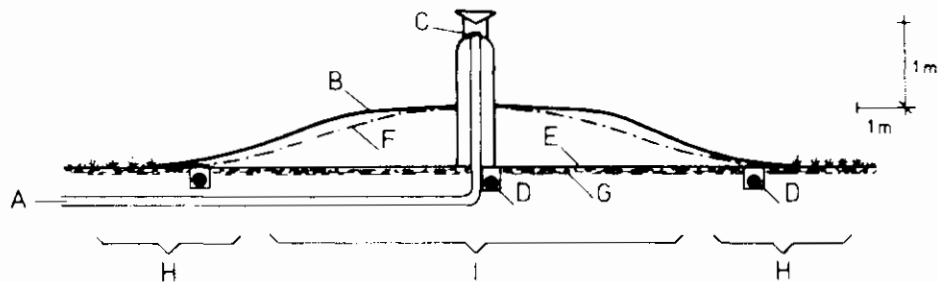


Fig. 13. Slibvulling onder helling²⁷

A.	slibafvoer	E.	verdichtings zone
B.	sliboppervlakte	F.	slibwaterspiegel
C.	sputmond	G.	gerijpte grond
D.	drainage	H.	aërobe zone
		I.	anaërobe zone

In het slib mogen geen grove delen aanwezig zijn in verband met de mogelijkheid van verstopping van de spuitmond. Ook bij vorst kan verstopping optreden. Om dit zoveel mogelijk te voorkomen moet het debiet (c.q. de druk) voldoende hoog zijn, terwijl de spuitmond in flexibel rubber moet zijn uitgevoerd.

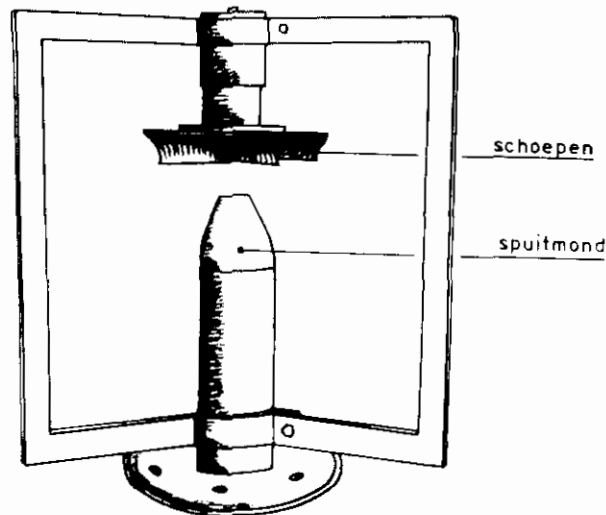


Fig. 14. Schotelsproeier, ontwikkeld door het Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland

Op één van de twee proeflagunes van de rwzi St. Annaparochie functioneert een slibaanvoersysteem dat eveneens bevredigend werkt. Het bestaat uit een horizontale arm die roteert om een verticale as, die electricch wordt aangedreven. In de horizontale arm bevindt zich een aantal spuitkoppen waaronder metalen plaatjes zijn aangebracht om het slib te spreiden (zie fig. 15).

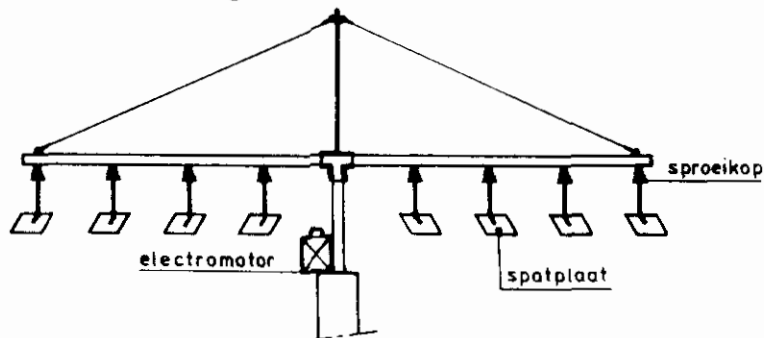


Fig. 15. Principe van de slibsproeier van de experimentele lagune bij de rwzi St. Annaparochie

Ook bij deze sproeier bestaat verstoppingsgevaar als er zich grove delen in het slib bevinden, terwijl hij vorstgevoeliger is dan de eerder beschreven schotelsproeier.

In de andere proeflagune te St. Annaparochie is een rechtopstaande slibaanvoerbuis geplaatst in een mantelbuis, waarin zich op verschillende hoogten gaten bevinden. Deze constructie voldoet niet omdat het onderduiken van het slib er niet mee wordt voorkomen.

Voor de lagunes van de rwzi Weesp is een aanvoerconstructie ontworpen, waarbij de rechtopstaande slibaanvoerbuis is geplaatst in een met zand gevulde en met beton afgedekte betonbuis met een diameter van 1 m. Over het functioneren hiervan zijn nog geen gegevens bekend.

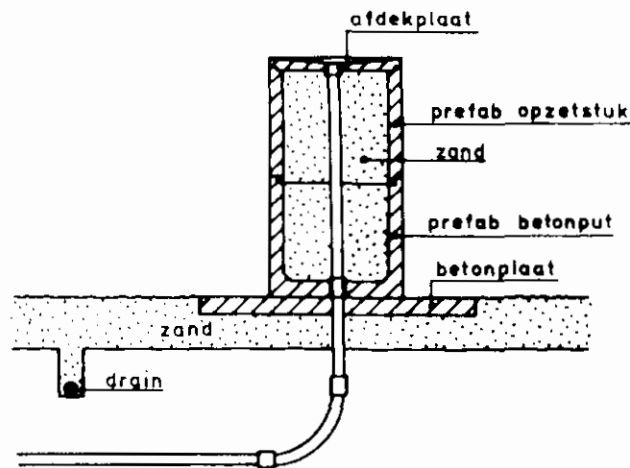


Fig. 16. Aanvoerconstructie rwzi Weesp

Behalve de mantelbuisconstructie te St. Annaparochie staan alle genoemde aanvoerconstructies opgesteld in het midden van de lagunes. De opzet hiervan is het creëren van een helling naar de zijanten, zodat het water oppervlakkig kan afstromen.

Bij slibsoorten als onderhoudsbaggerspecie, suikerbietentarra etc. wordt vanaf de zijden gespoten. De gewenste helling kan worden gecreëerd door het toepassen van een bepaalde spuittechniek waarbij beurtelings van verschillende zijden wordt gespoten.

Wanneer de depots bijna vol zijn, moet dan vanaf één zijde worden gespoten.

Het wisselen van de plaats van de spuitmond dient om een zo homogeen mogelijke opbouw van het depot te verkrijgen. Bij zuiveringsslib speelt dit aspect doorgaans een geringere rol. Enerzijds omdat de lagunes veel kleiner zijn en anderzijds omdat het slib homogener is van samenstelling.

Bij afwezigheid van een zandvang en/of voorbezinking is er wel een zodanige variatie in deeltjesgrootte dat bij het vullen van de lagune classificatie optreedt.

9.5 Waterafvoer

De afvoer van water uit de lagunes is te onderscheiden in twee stromen. In de eerste plaats de afvoer van vrijstaand water via de oppervlakte. Dit bestaat enerzijds uit water dat vrijkomt door bezinking van het slib en anderzijds uit neerslagwater.

In de tweede plaats het percolatiewater onder uit de sliblaag.

Beide stromen moeten naar de zuiveringsinrichting worden teruggevoerd. De in de praktijk gebruikte voorzieningen worden in de volgende hoofdstukken voor beide componenten apart behandeld.

9.5.1 oppervlaktewater

Het vrijstaande water op de oppervlakte wordt in de meeste gevallen afgelaten via lozingskisten, ook wel decanteeraflaten genoemd. In zijn

eenvoudigste vorm bestaat een dergelijke aflaatconstructie uit een houten kist die op (of enigszins in) de bodem van de lagune rust. Aan een zijde bestaat de wand uit losse schotbalkjes, gevat in sponningen. Deze balkjes kunnen worden verwijderd al naar gelang de daling van de sliboppervlakte. Fig. 12 toont een dergelijke kist inclusief de loopplank vanaf de kade. Deze dient om verwijdering van de schotbalkjes en controle van de afvoer mogelijk te maken. Onderin de kist bevindt zich een opening met daarin de afvoerbuis. In principe is het ook mogelijk de kist zonder bodem uit te voeren, zodat het water via de zandbodem en het drainagesysteem wordt afgevoerd. Een dergelijk systeem is vrij kwetsbaar gezien de mogelijkheid van verstopping van het zand.

Wanneer zich tussenwater vormt, kan dit worden gelokaliseerd en afgevoerd door een spie op de juiste hoogte tussen de schotbalkjes te brengen.

Er bestaan vele uitvoeringen die alle op hetzelfde principe berusten. De kist kan in beton worden uitgevoerd. Door het toepassen van grotere afmetingen kan de toegankelijkheid worden verbeterd, hetgeen met name bij grote laagdikten (indik-/bufferlagunes) aantrekkelijk is. Bovendien worden wel treden in één der wanden aangebracht. Meestal wordt de loopplank voorzien van een leuning.

Het opzoeken van het tussenwater is bij de beschreven lozingskist een enigszins omslachtige en bovendien weinig aantrekkelijke bezigheid. Vandaar dat gezocht is naar mogelijkheden om hierin verandering te brengen. Verschillende constructies worden hier thans voor gebruikt die alle berusten op het vervangen van de schotbalkjes door een vaste wand met afsluitbare, vanaf de bovenzijde van de kist te bedienen openingen.

Een voorbeeld hiervan is een constructie bestaande uit een geheel roestvrijstalen wand, waarin zich op verschillende hoogten stalen schuiven bevinden die elk afzonderlijk met een stang kunnen worden bediend; de zgn. Frieslandkist. Door de schuiven beurtelings op te trekken kan het tussenwater worden opgezocht en tot afvoer worden gebracht.

Bij de bufferlagunes van de rwzi Alkmaar is de wand in hout uitgevoerd, waarin gaten op verschillende hoogten zijn aangebracht die elk door middel van een schuif zijn afgesloten.

Aan elke schuif bevindt zich een ring die door middel van een pikhaak kan worden bediend. Het opzoeken en laten afvoeren gebeurt zoals hiervoor is beschreven.

Fig. 17 toont de afvoerwand van de lozingskist van de rwzi Alkmaar.

Bij het Ruhrverband in Duitsland is een constructie in gebruik⁶, die bestaat uit een betonnen of kunststofbuis met een diameter van ca. 0,5 m. In deze buis bevinden zich spleten op verschillende hoogten, terwijl de buis is gevuld met cokes of grind.

Dergelijke ontwateringsbuizen worden in een regelmatig patroon over de gehele lagune geplaatst op onderlinge afstanden van 5-10 m.

De buizen dienen tijdens het ruimen te worden verwijderd.

De eerder beschreven lozingskisten staan langs de zijden van de lagunes.

Het aantal lozingskisten is afhankelijk van de aard van lagune, van de methode van slibaanvoer en van de inzichten van de ontwerper.

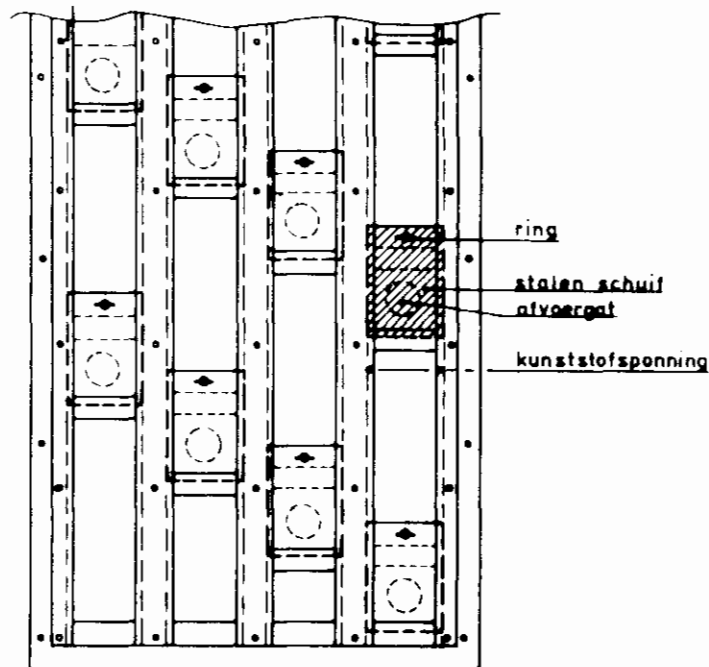


Fig. 17. Constructie van de afvoerwand van de aflatconstructie in de bufferlagune bij de rwzi Alkmaar

In indik-/bufferlagunes wordt doorgaans één lozingskist aangebracht, in drooglagunes meer. Bij vulling vanuit het midden verdient het aanbeveling in elk der hoeken van de lagune een lozingskist te plaatsen; bij vulling vanaf één der zijden, één of twee lozingskisten aan de tegenoverliggende zijde.

Bij grote lagunes worden wel meerdere vulpunten per lagune aangebracht. In een dergelijk geval wordt de plaats van de lozingskisten daaraan aangepast. Midden tussen de vulpunten wordt dan aan iedere zijde van de lagune een lozingskist geplaatst.

Van het aanbrengen van een zandlaag op de kade wordt ook verwacht dat deze mede zorgt voor de afvoer van oppervlakte- en tussenwater; het effect hiervan is echter relatief gering.

9.5.2 *geïnfiltreerd water*

Voor afvoer van percolatiewater, dat vanuit het slib in de bodem is geïnfiltreerd, zijn in sommige oudere lagunes geen voorzieningen getroffen. Dit water wordt dan, gemengd met grondwater, mee afgevoerd door de grondwaterstroming.

In de meeste gevallen wordt het echter afgevoerd via een drainagesysteem dat in de bodem van de lagune is gelegd. Een dergelijk systeem bestaat in principe uit een aantal zuigdrains, op onderlinge afstanden van 2-5 m die door middel van putten zijn aangesloten op een verzamelleiding. Deze laatste voert het water af naar de zuiveringsinrichting. De verzamelleiding kan zich binnen of buiten de lagune bevinden.

Het voordeel van situering buiten de lagune is dat de zuigdrains kunnen worden doorgespoten via de aansluitputten. Bij situering binnen de lagune liggen ook de aansluitputten erbinnen. In dat geval dient een doorspuitmogelijkheid te worden gemaakt aan de andere zijde van de zuigdrains door deze door te trekken tot in de kruin van de kade. In fig. 18 is dit in beeld gebracht.

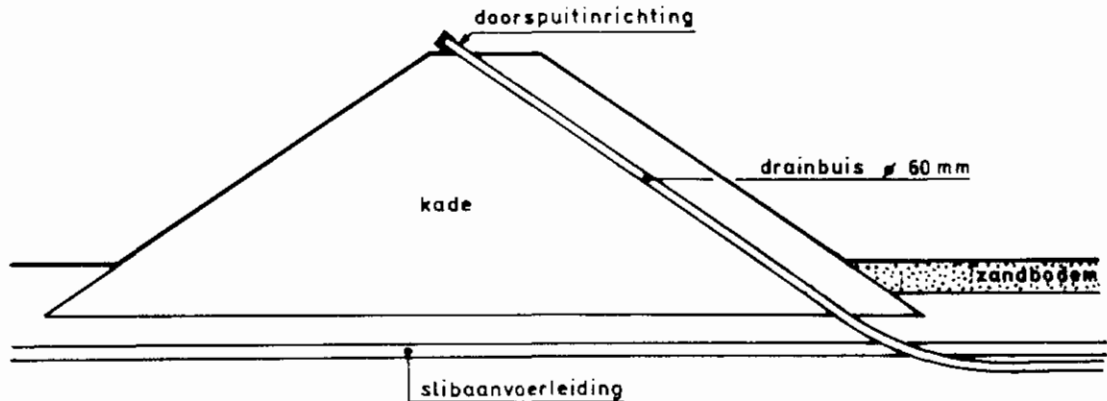


Fig .18 Doorspuitinrichting in kade

Fig. 19 toont schematisch een mogelijkheid voor een drainagesysteem voor een lagune.

Hierbij is uitgegaan van een situering van de verzamelleiding buiten de lagune.

Het verdient aanbeveling om, wanneer dit mogelijk is, de verzamelleiding buiten de lagune te leggen. Dit vergemakkelijkt niet alleen het doorspuiten, ook de controle op de werking wordt gemakkelijker, met name wanneer de aansluitputten worden doorgetrokken tot in het maai-veld.

In zettingsgevoelige gebieden dient de verzamelleiding binnen de lagune te worden gelegd. De grotere zetting ter plaatse van de kaden kan namelijk een verstoring van de zuigdrains tot gevolg hebben.

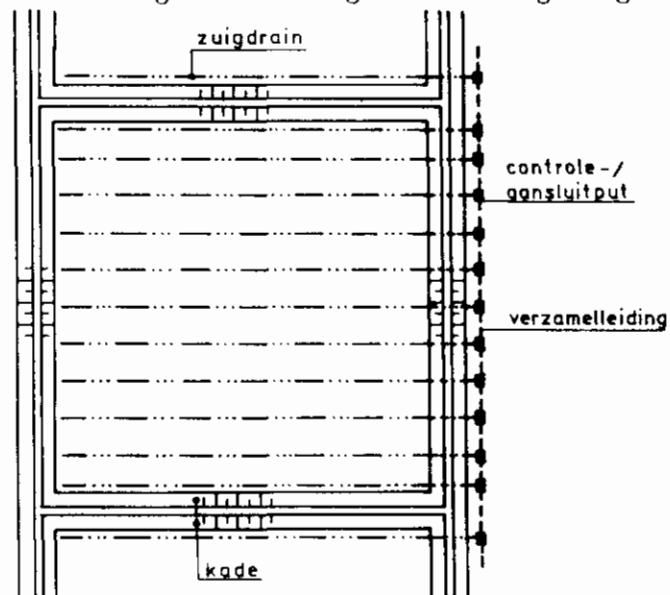


Fig. 19. Schematische weergave van een drainagesysteem van een lagune

Als drainagemateriaal wordt overwegend geperforeerde pvc-ribbelbuis gebruikt met als omhullingsmateriaal cocosvezel, turfvezel of acrylvezel. Bij toepassing van nylonweefsel als omhulling werd verslijming geconstateerd als gevolg van microbiële activiteit, waardoor de intree- weerstand dermate werd vergroot dat de afvoerfunctie van de drains werd verstoord. De ontwateringssnelheid van het slib liep daardoor belangrijk terug (rwzi Amersfoort).

Na herdrainage met met cocosvezel omhulde drains zijn geen problemen meer opgetreden.

Bij de toepassing van vacuümdrainage ligt de verzamelleiding eveneens binnen de lagune. Deze kan dan op één punt door de bodem- c.q. kadeafsluiting worden gevoerd (zie fig. 10) en op een pomp worden aangesloten.

10 BEDRIJFSVOERING

10.1 Vullen

Voor het vullen van lagunes worden twee principieel verschillende methoden gebruikt:

- a. in één keer opbrengen van het slib, vervolgens gedurende enige tijd laten ontwateren en dan ruimen;
- b. het laagsgewijs aanbrengen van het slib, waarbij tussen de verschillende lagen een ontwateringsperiode wordt aangehouden en vervolgens (eventueel na een rijpingsperiode) ruimen.

ad. a.

Deze methode wordt met name toegepast bij indik-/bufferlagunes, waarbij het eindvochtgehalte zodanig hoog blijft, dat het slib verpompbaar blijft. Bij droogbedden gebeurt de bedrijfsvoering op overeenkomstige wijze met sliblaagdicken van 0,20-0,30 m; het einddrogestofgehalte ligt dan hoger (20-30%).

Het sec-feld-systeem^{26,11} gaat ook uit van een vulling in één laag bij een (natte) laagdikte van meer dan 0,5 m en een ruiming van elke opgebrachte en ingedroogde laag afzonderlijk. Bij laatstgenoemd systeem wordt ook een zo hoog mogelijk drogestofgehalte nagestreefd; in elk geval tot steekvast.

De consequenties van deze bedrijfsvoering zijn:

- bij indroging tot steekvast (of verder) moet relatief vaak een geringe hoeveelheid worden geruimd;
- droging en rijping kunnen maximaal worden bevorderd onder andere door begreppeling en het toepassen van begroeiing;
- de kwaliteit na rijping is optimaal over de gehele uiteindelijke laagdikte.

In de praktijk wordt dit systeem bij lagunes nog weinig toegepast, althans voor wat betreft zuiveringsslib. Voor baggerspecie uit watergangen is het vrij gebruikelijk.

Op de lagune bij de rwzi Amersfoort wordt het slib in één keer opgebracht in een (natte) laagdikte van 0,60 m. Dit betreft goed ontwaterbaar, uitgegist slib met een begindrogestofgehalte van 6%.

ad. b.

Op verreweg de meeste drooglagunes wordt het zuiveringsslib laagsgewijs opgebracht.

Hoewel de toegepaste laagdikte en de ontwateringsperiode per laag nogal verschillen, geldt dit ook voor slibsoorten als suikerbietentarra, baggerspecie etc., zowel in het geval van permanente als van tijdelijke opslag.

De consequenties van deze bedrijfsvoering zijn:

- ten gevolge van de langere opslagtijd en de grotere uiteindelijke laagdikte heeft minder vaak te worden geruimd, terwijl bovendien grotere hoeveelheden kunnen worden afgevoerd;

- het aanbrengen van iedere laag heeft een nadelige invloed op de kwaliteit van de vorige omdat eventuele scheuren en poriën weer worden gevuld;
- ook bij toepassing van een rijpingsperiode na het aanbrengen van de laatste laag blijft een groot gedeelte van de totale sliblaag ongerijpt.

Voor zuiveringsslib wordt in de literatuur^{13,26} in het algemeen een toe te passen laagdikte van 0,20-0,30 m aangegeven met een ontwateringsperiode van enkele weken. Opvallend is dat gegevens ontbreken over verschillen tussen de zomer- en wintersituatie.

Wolters en Rösler³⁷ beschrijven een systeem waarbij het slib, gemengd met $\text{Ca}(\text{OH})_2$, wordt opgebracht c.q. versproeid (fig. 13) vrijwel continu in een hoeveelheid van 0,005 m/dg.

Ook bij het gebruik van de schotelspoeier (fig. 14) worden zeer dunne lagen toegepast (enkele centimeters per week).

Nebiker¹⁹ heeft onderzoek verricht naar de optimale laagdikte van de slibdosering. Hij vond een relatie tussen het (eerste) kritieke drogestofgehalte enerzijds en de verdamping, het begindrogestofgehalte van het aangevoerde slib en de laagdikte van de slibdosering anderzijds. Coppes⁴ heeft deze relatie als volgt in formule gezet:

$$U_k = \frac{1}{1 + a \cdot U_s \cdot d} \text{ waarin:}$$

U_k = (eerste) kritieke drogestofgehalte (%)

U_s = begindrogestofgehalte (%)

d = laagdikte (mm)

a = faktor, afhankelijk van de atmosferische omstandigheden en bepalend voor de verdamping (mm^2).

De faktor a kan variëren van 0 tijdens neerslag tot 2,4 op een heldere, zonnige dag.

Gebaseerd op een gemiddelde jaarlijkse verdamping van 700 mm/jr. kan de gemiddelde waarde van a op 1,4 worden gesteld.

Wanneer optimaal gebruik moet worden gemaakt van de verdamping mag niet verder worden ingedroogd dan tot het kritieke drogestofgehalte.

Uit de gevonden betrekking blijkt dat bij hoge drogestofbelastingen het kritieke drogestofgehalte eerder wordt bereikt c.q. het kritieke drogestofgehalte lager komt te liggen. Optimale benutting van de verdamping houdt dan ook in dat de laagdikte van de slibdosering een bepaalde waarde niet mag overschrijden, uitgaande van een gewenst einddrogestofgehalte en een gegeven begindrogestofgehalte.

Deze kritieke laagdikten kunnen uit fig. 20 worden afgeleid.

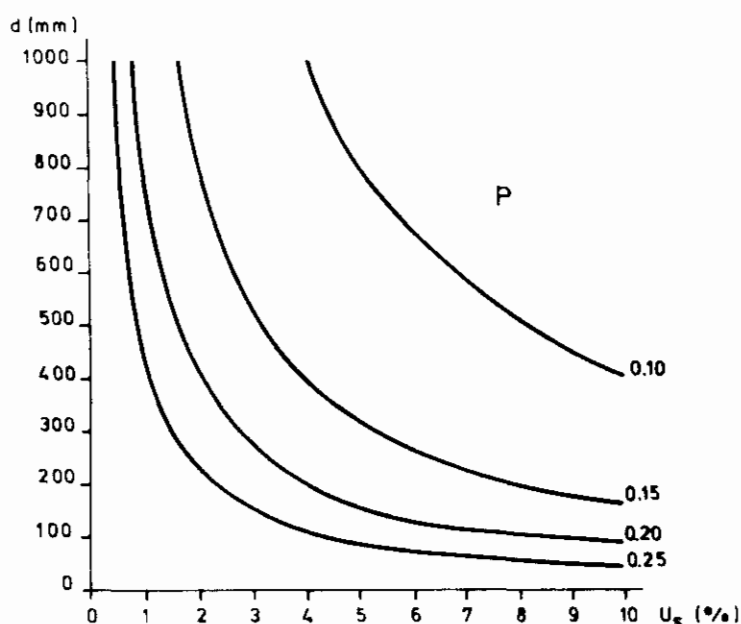


Fig. 20. De kritieke laagdikte als functie van het drogestofgehalte

p = gewenst drogestofgehalte
d = kritieke laagdikte
U_s = begindrogestofgehalte

De genoemde betrekkingen zijn empirisch afgeleid en gebaseerd op kleine laagdikten (0,05-0,40 m), waarbij ervan uit is gegaan dat de sliblagen na het bereiken van het kritieke drogestofgehalte worden geruimd. Bovendien is geen rekening gehouden met infiltratie.

Met name voor wat betreft de grotere laagdikten is het zeer de vraag of het gebruik van de formule gerechtvaardigd is. Mede gezien de reeds genoemde restricties en het feit dat de proeven van Nebiker onder min of meer geconditioneerde omstandigheden zijn opgezet, kunnen in de praktijk grote afwijkingen optreden.

Bovenstaande gegevens lijken in tegenspraak met de resultaten op de beide proeflagunes bij de rwzi Rijen. Het "eind"drogestofgehalte bijvullen met 0,02 m/wk bleek nauwelijks te verschillen van dat bij vullen met 0,04 m/wk (7% ten opzichte van 8,5%).

Eenzelfde verschijnsel doet zich voor bij de lagunes in St. Annaparochie, hetgeen blijkt uit tabel 4. Er blijkt geen significant verschil tussen beide lagunes, hoewel ze verschillend worden belast. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat de vulconstructie van beide lagunes verschillend is. Lagune I wordt gevuld met een elektrische roterende sproeier en lagune II met een aanvoerbuus in een mantelbuus.

Uit het voorgaande blijkt dat, op basis van de ter beschikking staande gegevens, geen eenduidige conclusies kunnen worden getrokken ten aanzien van de optimale laagdikte.

Van de lagunebedrijven die niet experimenteel maar volledig operationeel zijn, zijn niet voldoende gegevens bekend om tot een duidelijke uitspraak te kunnen komen.

Er zijn nog weinig bedrijven met een duidelijk vul- en ruimschema.

datum	lagune I		Lagune II	
	laagdikte (cm)	d.s.-gehalte (%)	laagdikte (cm)	d.s.-gehalte (%)
2- 7-79	14-23	11,7-20,3	23-30	14,5-17,2
8-10-79	14-42	11,5-23,5	37-52	13,5-15,8
13- 2-80	45-58	12,5-16,7	58-74	11,3-16,7
6- 5-80	35-50	16,4-18,8	50-70	15,2-16,4
18- 8-80	30-58	20,1-23,8	60-82	15,5-19,5
15- 7-81	-	13,5-19,0	-	13,3-17,4

Tabel 4. Verloop van het drogestofgehalte op de lagunes te St. Annaparochie

Een van de weinige voorbeelden hiervan is Zaandam-Oost waar 4 lagunes gedurende 3 jaar in een roulatiesysteem worden gevuld. Daarna wordt een rijpingsperiode van 1 jaar aangehouden waarna de lagunes worden geruimd.

Noack en Naumann²⁰ noemen een cyclus van 1 jaar vullen, 18 maanden rijpen en 6 maanden braak liggen. Ook hieruit blijken de grote verschillen die in de praktijk optreden.

Bij de rwzi Geestmerambacht is het roulatiesysteem geautomatiseerd. Op een tweetal velden zijn 10 automatische vulpunten c.q. buizen aangebracht, op ieder veld 5. Deze punten schakelen continu om de twee uur naar een volgend tappunt met een debiet van 7 m³/u. De afmetingen van de velden bedragen 200x40 m bij een vulhoogte van 0,5 m.

Ook bij de rwzi Dongemond is een automatisch vulsysteem aangebracht, waarbij het slib met schotelsproeiers wordt opgebracht. Op het moment van dit onderzoek was dit systeem nog niet in werking.

10.2 Aanvullende ontwateringsmaatregelen

In de praktijk worden de mogelijk te nemen ontwateringsmaatregelen niet alle op zuiveringsslib toegepast. Zowel bij indik-/bufferlagunes als bij drooglagunes blijven de werkzaamheden ten behoeve van de ontwatering beperkt tot het bedienen van de aflaatconstructies. Het belang van het aflaten van vrijstaand water aan de oppervlakte wordt algemeen erkend.

Op een toenemend aantal plaatsen wordt door toepassing van schotel-sproeiers (fig. 14) getracht het slib onder een helling op de drooglagunes te brengen. Naarmate het begindrogestofgehalte hoger is, lukt dit beter. Mede daarvoor is overgegaan op de toepassing van het tweetrapssysteem.

Voor zuiveringsslib wordt begreppeling nog vrijwel niet op praktijk-schaal toegepast. Alleen bij de sec-feld-proeven bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder en op de lagunes bij de rwzi Uden-Veghel.

Begreppeling vindt wel algemene toepassing bij depots voor baggerspecie uit de havens en suikerbietentarra.

Voor de baggerspecie is op basis van onderzoek en ervaring een systeem ontwikkeld waarbij in eerste instantie twee maal wordt begreppeld met behulp van een amfibievoertuig (Amfirol). De sporen van dit voertuig fungeren als greppels. In een volgend stadium worden de greppels verdiept met behulp van een discuss wiel waarna, wanneer de bovengrond voldoende draagkracht heeft gekregen, verdere verdieping plaatsvindt met een lichte hydraulische kraan.

Voor de begreppeling van zuiveringsslib en andere slibsoorten, waarvan de depots relatief klein zijn, zijn discusswielen ontwikkeld die worden bediend met behulp van een lier. De zwaarte van de wielen kan worden geregeld door ze met meer of minder water te vullen.

Bij slibontwatering op lagunes vindt niet of nauwelijks toepassing van vlokmiddelen plaats. Wolters en Rösler³⁷ noemen de toepassing van $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Onderzoek van Reuter²³ met synthetische, organische vlokmiddelen toonde een duidelijk effect, zowel op de ontwateringssnelheid als op het uiteindelijke drogestofgehalte. In fig. 21 zijn deze resultaten in beeld gebracht.

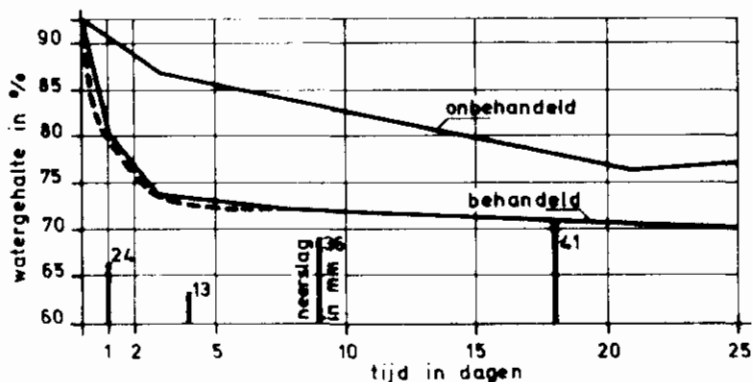


Fig. 21. Natuurlijke ontwatering van uitgegist primair slib zonder en met toediening van organische, synthetische vlokmiddelen²³

Het bevorderen van de ontwatering door begroeiing wordt incidenteel toegepast. Wanneer de lagune lang genoeg met rust wordt gelaten, ontstaat begroeiing spontaan.¹² Deze heeft een zeer gunstig effect op de rijping. Bij laagsgewijs vullen is de doseringsfrequentie doorgaans zodanig dat er zich geen vegetatie kan ontwikkelen. Als het slib onderduikt bestaat deze mogelijkheid wel.

In de lagunes van de rwzi Gouda bevindt de vulopening zich op de bodem, waardoor zich aan de oppervlakte vegetatie kan ontwikkelen.

10.3 Stankbestrijding

In het algemeen vindt geen stankbestrijding plaats. Wanneer de lagunes zich op korte afstand van woonbebouwing bevinden, kunnen zich wel problemen voordoen. Incidenteel vindt bestrooiing met kalk plaats om stankhinder tegen te gaan. De toediening hiervan heeft een positief neveneffect op de ontwaterbaarheid van het slib.³⁷

Bij het vullen in één keer treedt duidelijk minder stankhinder op dan bij laagsgewijs vullen. De aard van het slib speelt uiteraard ook een belangrijke rol. Bij anaëroob gestabiliseerd slib vindt in het algemeen minder stankontwikkeling plaats dan bij aëroob gestabiliseerd slib. Mogelijke oplossingen ter bestrijding van stankhinder zijn een combinatie van oppervlakte-afdekking door polystyreen-chips of stro en besproeiing met desodoriserende middelen zoals kalksalpeter. Eerstgenoemde mogelijkheid is beperkt toepasbaar vanwege de windgevoeligheid. Bovendien zal door het afdekken een belangrijke vermindering van de verdamping optreden.

10.4 Ruiming

Afhankelijk van de consistentie c.q. het drogestofgehalte vindt het verwijderen van het slib plaats met een vaste of een mobiele pompinstallatie, dragline, laadschop e.d. Vanuit indik-/bufferlagune wordt het slib gepompt naar drooglagunes of tankauto's.

De verwijdering van niet verpompbaar slib vindt op diverse manieren plaats. Indien de benodigde op- en afritten aanwezig zijn kan het materieel tot in de lagunes rijden, vanwaaruit het slib met een laadschop of dragline op vrachtwagens kan worden geladen. Het slib dient in dat geval tenminste steekvast te zijn. Een veel toegepaste methode is ook het doorgraven van de kade om tot in de lagunes te kunnen komen. Is de consistentie minder dan "steekvast" (drogestofgehalte 10-15%) dan wordt het slib wel door middel van een bulldozer met aangepast blad naar één punt geschoven en daar met een dragline verwijderd.

Ook steekvast slib kan uiteraard met een bulldozer bijeen worden geschoven. Het voordeel van dit systeem is dat de dragline op een vaste plaats kan blijven staan, terwijl het slib over de kade in het transportmiddel wordt geladen.

Een nadeel is dat de rupsen van de bulldozer het zandbed zodanig kunnen omwoelen dat een ondiep drainagesysteem (minder dan 0,50 m beneden het maaiveld) wordt verstoord.

Bij het ruimen van lagunes met een zandbodem wordt bij elke ruiming een hoeveelheid zand mee afgevoerd. Wanneer zorgvuldig te werk wordt gegaan behoeft dit niet meer te zijn dan enkele centimeters. Regelmatig dient zandsuppletie plaats te vinden.

Wanneer alleen het bovenste, vervuilde zandlaagje wordt afgevoerd, heeft dit een gunstig effect op de infiltratiecapaciteit van de bodem.

10.5 Onderhoud

Het onderhoud van de lagunes dient met name gericht te zijn op het voorkomen van stagnaties in de waterafvoer. In de praktijk vindt een regelmatige controle van de aflatconstructies plaats tijdens het bedienen.

Speciale aandacht moet worden besteed aan het drainagesysteem. Regelmatig (in elk geval na iedere ruiming) dient controle plaats te vinden via de controle-/aansluitputten. Direct na de aanleg moet de drai-

nage worden doorgespoten, vervolgens naar behoefte.
Het verdient aanbeveling een doorspuitfrequentie van tenminste één
keer per 4 à 5 jaar aan te houden.
Bij lagunes met grondkaden strekt het onderhoud zich ook uit tot het
maaien van de kaden.

11 RESULTATEN DROGING

Een vergelijking van de resultaten van natuurlijke ontwatering van zuiveringsslib in lagunes is op basis van de ter beschikking staande inventarisatie- en literatuurgegevens slechts in zeer grove lijnen mogelijk; vergelijking wordt bemoeilijkt door de volgende factoren:

- grote variatie in ontwateringseigenschappen van slibben, afkomstig van verschillende zuiveringsinrichtingen; bovendien kunnen de eigenschappen van een slib in de loop van de tijd nog sterk variëren;
- sterk wisselende bedrijfsvoering, met name de vulmethode;
- tussentijdse afvoer van vloeibaar slib, hetgeen leidt tot onregelmatigheden in de lagunevulling, met onbekend effect;
- in het algemeen zijn slechts gegevens bekend van de begin- en eind-situatie, terwijl vooral het verloop van bijvoorbeeld het drogestofgehalte gedurende de tijd van belang is voor een juiste beoordeling van het ontwateringsproces;
- het ontbreken van gegevens als slibsoort, vulmethode, ontwateringsperiode etc. in de literatuur.

Om toch enigszins een beeld te geven van de tot nu toe in Nederland bereikte resultaten is tabel 5 samengesteld. Qua slibsoorten is slechts onderscheid gemaakt tussen aëroob en anaëroob gestabiliseerd slib. In de praktijk is gebleken dat deze slibsoorten sterk verschillen in ontwateringseigenschappen. Hoewel ook andere factoren mede bepalend zijn voor de ontwateringseigenschappen van zuiveringsslib leidt een verdere onderverdeling niet tot een duidelijker beeld van de situatie. Gesteld kan worden dat anaëroob gestabiliseerd (uitgegist) slib gunstiger ontwateringseigenschappen heeft dan aëroob gestabiliseerd slib. Vergelijk Uden-Veghel met Amersfoort, waar in beide gevallen het slib in één keer is opgebracht.

De gunstige invloed van het laagsgewijs vullen komt duidelijk naar voren uit de resultaten van Veghel ten opzichte van die van Geestmerambacht en Beemster, hoewel St. Annaparochie en Rijen hiermee niet in overeenstemming lijken te zijn. Vermoedelijk spelen hierbij respectievelijk de aard van de installatie en de kwaliteit van het influent een rol. De rwzi St. Annaparochie is een Pasveersloot zonder voorbezinking, terwijl de rwzi Geestmerambacht en Beemster carrouselinstallaties zijn. De rwzi Rijen is een carrouselinstallatie met voorbezinking. Op deze inrichting wordt veel water van leerlooierijen gezuiverd wat leidt tot een zeer slecht ontwaterbaar slib.

Möller¹⁶ geeft een grafisch overzicht van de capaciteit van natuurlijke droogsystemen (fig. 22) in afhankelijkheid van het einddrogestofgehalte.

Tabel 5. Vergelijking resultaten natuurlijke droging van zuiveringsslib op lagunes in Nederland

plaats zuiverings-	soort installatie	soort slib	volmethode	verbliftijd	beginndrogestof-gehalte (%)	einddrogestof-gehalte (%)
Zandam-Dorst	oxydatiebed	idem	anaëroob gestabiliseerd	laagsgewijs, eindlaagdikte 1,5 m	7	20
idem	idem	idem	idem	in één keer 1 m vloerbaar	2 jr.	15
Vinkel	actief slib	idem	idem	in één keer 1 m vloerbaar	5 mnd.	15
Maatla	oxydatiebed	idem	idem	laagsgewijs	3 jr.	20
Amersfoort	idem	idem	idem	in één keer 0,8 m vloerbaar	1 jr.	10-11
St. Annaparochie	oxydatiesloot	anaëroob gestabiliseerd	idem	laagsgewijs tot in eindlaagdikte	2 jr.	13-19
Rijswijk	carroussel	idem	idem	laagsgewijs tot 0,7-1,2 m eindlaagdikte	2,5 jr.	7-8
Veghel	idem	idem	idem	in één keer	20 à 30 dg.	9-1
Geestmerambacht	idem	idem	idem	in één keer 1 m vloerbaar	8 mnd.	9
idem	idem	idem	idem	laagsgewijs in totaal 2 m vloerbaar	1 jr.	18
idem	idem	idem	idem	idem	8 mnd.	11
Beemster	idem	idem	idem	laagsgewijs in totaal 1,8 m vloerbaar	1 jr.	10-17
Haarlem-Waarderpolder (sectie D)	actief slib	anaëroob gestabiliseerd	idem	in één keer 0,8 m vloerbaar	3-5 wk.	9
Indijk-/butterlagunes (sectie D)	divers (vnl. carroussel)	idem	idem	in één keer	x	17-28-28

1) Insluist het op ruggen zellen
 2) Het Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland

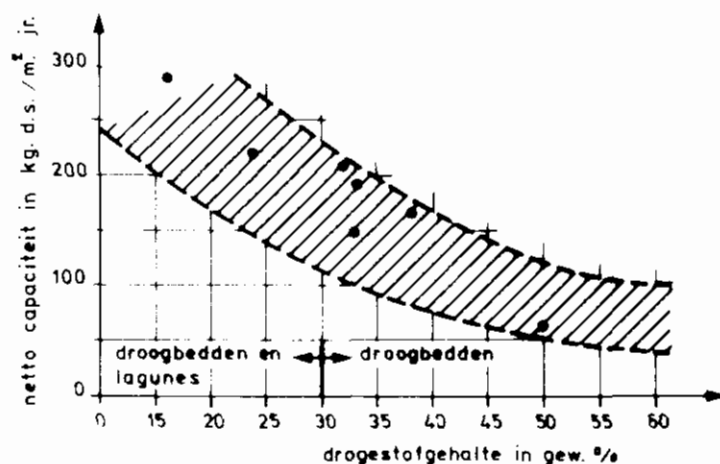


Fig. 22 De capaciteit van natuurlijke droogsystemen in afhankelijkheid van het einddrogestofgehalte¹⁸

De capaciteit van lagunes is hier echter niet rechtstreeks uit af te leiden. Behalve met de in de grafiek weergegeven parameters is ook bekendheid nodig met:

- de slibparameters:
 - ° begindrogestofgehalte
 - ° waterbindend vermogen
 - ° ontwateringsgedrag
- de bedrijfsparameters:
 - ° drogestofbelasting per dosering
 - ° aantal en frequentie van de doseringen
 - ° benodigde tijd voor rijping en ruiming

In Amerikaanse literatuur⁷² wordt voor lagunes aangegeven, dat droging mogelijk zou zijn van een sliblaag met een drogestofgehalte van 5% en een dikte van 0,60-1,20 m naar een drogestofgehalte van 40-45% in een periode van 2 à 3 jaar. Deze cijfers moeten uit een droog klimaat afkomstig zijn. In Engeland bijvoorbeeld treedt in lagunes zelden of nooit ontwatering tot een hoger drogestofgehalte dan 30% op. Dit is in overeenstemming met de Nederlandse praktijkgegevens. Het is wel mogelijk zonder uitzonderlijk lange rijpingsperioden door natuurlijke droging tot hogere drogestofgehalten te komen, maar dan dienen andere maatregelen te worden genomen zoals op ruggen zetten. Ook wanneer er sprake is van permanente opslag zal beneden een niveau van 0,75-1,00 m beneden de oppervlakte geen verdere droging (en rijping) plaatsvinden dan tot drogestofgehalten van 20 à 30%, en bij slecht ontwaterbare slibben nog lager. Een voorbeeld hiervan zijn de lagunes in St. Annaparochie, waar het slib in dunne laagjes is opgebracht. Uit tabel 4 blijkt dat de ontwatering geheel plaatsvindt direct na het opbrengen. Gedurende een vulperiode van enkele jaren vindt geen merkbare verhoging van het drogestofgehalte van de onderste lagen plaats.

Bij indik-/bufferlagunes wordt over het algemeen een verhoging van het drogestofgehalte met enkele procenten bereikt binnen enkele maanden. Dit leidt soms tot een halvering van het oorspronkelijke volume. Miller¹⁷ noemt een verdubbeling van het drogestofgehalte na 1 jaar. Deze geringe ontwatering is vermoedelijk een gevolg van de grote dikte van de opgebrachte laag.

Het effect van het toepassen van vacuüm drainage is wisselend. Tichovidiv e.a.³¹ melden gunstige resultaten met uitgest slib in een laagdikte van 1 m. Binnen 8 uur daalde het vochtgehalte van 94 naar 80,8% hetgeen een volumereductie tot ca. 1/3 betekent.

Bij de sec-feld-proeven bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder ontwaterde het slib in een zomerperiode van drie maanden van ca. 3% droge stof tot 13,5 en 11%, respectievelijk met en zonder vacuüm drainage. Eenzelfde proef in een winterperiode gaf geen significante verschillen te zien.

In fig. 23 zijn deze resultaten in beeld gebracht.

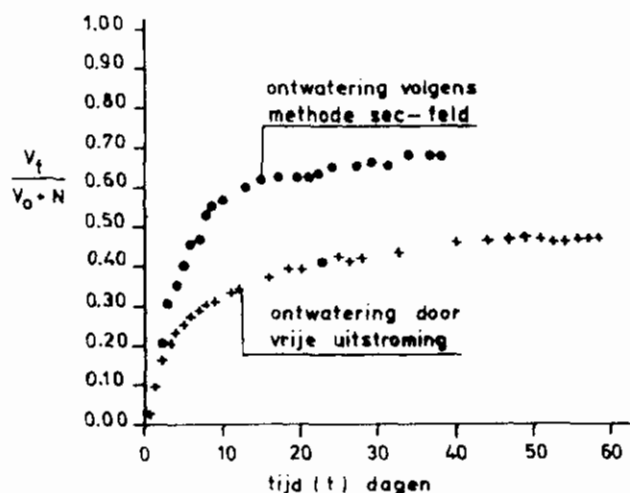


Fig. 23 Resultaten van de sec-feld-proeven bij de rwzi Haarlem-Waarderpolder in de zomer van 1981

12 KWALITEIT EINDPRODUKT

12.1 Chemisch

Zuiveringsslib heeft een bemestende waarde door de aanwezigheid van voedingsstoffen. Tevens kan de organische stof in sommige grondsoorten (bijvoorbeeld zand en klei) een gunstige werking hebben op de structuur c.q. de lucht-waterhuishouding.

Tabel 6 geeft een overzicht van de chemische samenstelling van het Nederlandse zuiveringsslib in het jaar 1979⁶. De gehalten zijn gebaseerd op droge stof.

	gemiddeld (totaal)
org. stof %	57,6
N	5,3
P ₂ O ₃	5,1
CaO	7,9
K	0,5
Mg	0,5
Cl	0,6
Zn ppm	1106
Pb	364
Cu	564
Cr	351
Cd	8
Ni	63
Hg	4

Tabel 6. Chemische samenstelling van zuiveringsslib⁶

Van de plantenvoedende elementen zijn vooral N, P en Ca van belang. De K-gehalten zijn erg laag omdat K-verbindingen goed oplosbaar zijn en met het effluent worden afgevoerd.

Ten gevolge van droging en rijping kunnen veranderingen optreden in het gehalte en de beschikbaarheid van de diverse elementen voor de plant; hierover is weinig bekend.

Bij droging en rijping van slib, waarbij organische stof wordt omgezet, vermindert het N-gehalte door uitspoeling en mineralisatie.

Goed uitgerijpt slib bevat nog slechts weinig op korte termijn voor de plant vrijkomende N.

Het P-gehalte ten opzichte van droge stof verandert niet door droging en rijping. Het K-gehalte is gering en als voedingselement verwaarloosbaar. Het K-gehalte zal door uitspoeling bij droging en rijping nog verder worden verlaagd.

Voor het Ca-gehalte geldt hetzelfde als voor P.

Er zijn (nog) geen gegevens bekend over de invloed van droging en rijping op het gedrag van de zware metalen, pesticiden e.d. stoffen.

12.2 Fysisch

De fysische kwaliteit van zuiveringsslib is rechtstreeks afhankelijk van het vochtgehalte. Afhankelijk van de aard van het slib is het ver-

pompbaar tot maximaal 15% droge stof. Vanaf minimaal 15% is het steekvast, en plastisch tot maximaal 30%. Vanaf 35 à 40% heeft het een kruimelige structuur en is het strooibaar.

Het drogestofgehalte tijdens het ruimen varieert sterk, afhankelijk van de bedrijfsvoering. In indik-/bufferlagunes wordt ernaar gestreefd het slib vloeibaar te houden. Om een goede toestroming naar de pompinstallatie te waarborgen dient het drogestofgehalte niet hoger te zijn dan circa 10%.

In drooglagunes wordt in principe een zo hoog mogelijk drogestofgehalte nagestreefd.

In de praktijk worden geen hogere drogestofgehalten bereikt dan 20-25%. Om een goede structuur te krijgen voor hergebruik wordt dan ook een verdere behandeling toegepast (menging met zand, veen, of compostering met toeslagmaterialen zoals houtsnippers en zaagsel).

De bovenste laag van drooglagunes die 1 jaar of meer de gelegenheid gekregen heeft te rijpen, waardoor er een dichte begroeiing op is ontstaan, heeft een goede kruimelige structuur en een bruine kleur.

13 HYGIËNISCHE ASPECTEN

Bij de aanleg van een lagunebedrijf moeten de volgende milieuhygiënische aspecten in het ontwerp worden betrokken⁴:

- a. bodemverontreiniging;
- b. grondwaterverontreiniging;
- c. oppervlaktewaterverontreiniging;
- d. geluidhinder;
- e. stankoverlast;
- f. terreinbehoefte;
- g. energiegebruik;
- h. hygiëne.

ad a. en b.

Bij de aanleg van lagunes bestaat in principe de mogelijkheid dat bodem- en grondwaterverontreiniging optreedt. Afhankelijk van de geohydrologische situatie kan percolatiewater aanleiding zijn tot verontreiniging van diepere grondlagen en verspreiding van de verontreiniging tot buiten het laguneterrein. In de praktijk wordt hieraan reeds aandacht besteed (9.1, 9.2 en 9.3). De belangrijkste maatregel is de terugvoer van het uit de lagunes komende water naar de zuiveringsinrichting.

ad. c.

Oppervlaktewaterverontreiniging kan indirect plaatsvinden via het grondwater. Wanneer grondwaterverontreiniging wordt voorkomen zal in de regel geen sprake zijn van oppervlaktewaterverontreiniging.

ad d.

Min of meer continue geluidsbronnen in de vorm van pompinstallaties zijn alleen aanwezig bij het tweetrapssysteem en bij toepassing van vacuümdrainage. Het geluidniveau hiervan is eenvoudig tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen. Dit is minder het geval voor de afvoer van vloeibaar slib uit indik-/bufferlagunes. Er is dan tijdelijk sprake van verkeerslawaai. De situering van de meeste zuiveringsinrichtingen is zodanig dat dit weinig problemen oplevert. Voor het overige kan nog lawaai ontstaan bij het ruimen (graafwerkzaamheden, transport). Gezien de geringe ruimingsfrequentie van drooglagunes heeft dit een incidenteel karakter.

ad e.

In het algemeen blijken weinig stankproblemen op te treden, althans bij de lagunedroging van anaëroob gestabiliseerd zuiveringsslib. Bij aëroob gestabiliseerd slib treedt vaker stankontwikkeling op. In een aantal gevallen wordt aan dit aspect in de praktijk reeds aandacht besteed (10.3).

ad f.

De terreinbehoefte van natuurlijke ontwatering in lagunes kan ook door de aanwezigheid van kaden en wegen aanzienlijk zijn.

Uit veiligheidsoverwegingen verdient het aanbeveling het laguneterrein van een afrastering te voorzien, zeker wanneer de lagunes buiten het terrein van de zuiveringsinrichting zijn gelegen.

ad g.

De ontwatering van slib in lagunes is energetisch aantrekkelijk. Er wordt gebruik gemaakt van een kosteloos aanbod van energie in de vorm van zon, wind en zwaartekracht. Afgezien van vacuümdrainage en het rondpompen van het slib bij toepassing van het tweetrapssysteem komen er geen mechanische ontwateringstechnieken aan te pas. Fossiele brandstof wordt verder alleen gebruikt bij het ruimen.

ad h.

De hygiënische kwaliteit van het eindprodukt wordt in belangrijke mate bepaald door de kwaliteit van het in de zuivering geproduceerde slib. De lange verblijftijd in de lagune leidt tot een reductie van het aantal pathogenen.

Bij hoge omgevingstemperaturen kunnen incidenteel insektenplagen optreden. Dit is grotendeels te voorkomen door het consequent aflaten van het vrijstaande water.

14 KOSTEN

De kosten van de natuurlijke droging van zuiveringsslib in lagunes worden onderverdeeld in:

- a. investeringskosten;
- b. exploitatiekosten;
- c. kosten van ruiming.

ad a.

Door de grote verschillen in uitvoering van de lagunes variëren de investeringskosten sterk. In veel gevallen zijn deze kosten moeilijk te achterhalen; de lagunes of onderdelen ervan zijn dan in eigen beheer aangelegd en de kosten zijn (gedeeltelijk) ondergebracht in de exploitatie van de zuiveringsinrichting. De verkregen gegevens variëren van ca. f 20,--/netto m² voor zeer eenvoudig uitgevoerde lagunes tot ca. f 80,--/netto m² voor een tweetrapslagunebedrijf met automatisch gestuurde vulling door middel van schotelsproeiers (prijspeil 1981).

Bij de inrichting van een lagunebedrijf dienen de volgende investeringen te worden gepleegd:

- aankoop grond;
- aanleg lagunes inclusief vul- en afvoerconstructies, drainage;
- aanleg infrastructuur (wegen, aan- en afvoerleidingen).

ad b.

Van de exploitatiekosten van het lagunesysteem bestaat geen duidelijk beeld, omdat deze niet afzonderlijk in de exploitatiekosten van de totale zuiveringsinrichting worden vermeld.

In de exploitatie van een lagunebedrijf dienen de volgende kostenfactoren te zijn opgenomen:

- rente en aflossing;
- bediening lozingskisten;
- vullen lagunes;
- doorspuiten drainage;
- onderhoud kaden en constructies.

ad c.

De kosten van het ruimen zijn vrij exact bekend omdat deze werkzaamheden in het algemeen op contractbasis door derden worden uitgevoerd. De contractvoorwaarden kunnen verschillen.

Algemeen voorkomend is de afname van het ontwaterde slib uit de lagunes tegen een vooraf vastgestelde prijs per m³. De hoogte van deze prijs wordt in overwegende mate bepaald door de transportafstand en de afzetmogelijkheden.

Een minder vaak voorkomende contractvorm is de verrekening op basis van de hoeveelheid vloeibaar slib zoals het in de lagune terecht komt. In dit geval komt ook het onderhoud en de zandsuppletie voor rekening van de afnemer.

Prijzen van f 15,-- - f 35,--/m³ ontwaterd slib zijn op dit moment (1982) normaal.

15 EVALUATIE EN CONCLUSIES

De natuurlijke ontwatering van zuiverings-slib in lagunes blijkt een systeem met duidelijke toekomstperspectieven.

Het is zeer energievriendelijk en levert een qua fysische eigenschappen aantrekkelijk eindprodukt. Het te bereiken drogestofgehalte is zodanig dat het systeem als voordroging voor een eventuele verbranding belangrijke besparingen kan opleveren.

De flexibiliteit van het systeem wordt nog vergroot bij het tweetraps-systeem. Het slib kan dan vanuit de indik²/bufferlagunes in vloeibare vorm worden afgevoerd. Het slib wordt met een hoger drogestofgehalte op de drooglagunes gebracht waardoor de capaciteit wordt vergroot. Tenslotte leidt ook de grote buffercapaciteit, die inherent is aan het lagunesysteem, tot een vergroting van de flexibiliteit.

De constructie van lagunes behoeft, op grond van de bestaande technieken en ervaringen, geen problemen op te leveren.

Het oppervlaktebeslag van een lagunebedrijf kan een beperkende factor voor dit systeem zijn.

Op basis van het onderhavige onderzoek is niet eenduidig vast te stellen op welke wijze een lagunebedrijf moet worden ingericht en welke bedrijfsvoering moet worden toegepast om een zo hoog mogelijk drogestofgehalte bij een zo gering mogelijk oppervlaktebeslag te verkrijgen. Op dit moment wordt als berekeningsgrondslag voor de oppervlakte een waarde aangehouden die, afgezien van de extremen, ligt tussen 1 en 2 m³ vloeibaar slib/m² jr. bij een uiteindelijke vulhoogte van maximaal ca. 1,5 m (deze waarden gelden voor drooglagunes en hebben betrekking op de netto-oppervlakte).

Hoewel exacte uitspraken niet kunnen worden gedaan zijn er wel tendensen aan te geven'

- het vullen in dunne lagen leidt tot een vergroting van de droogcapaciteit mits onderduiken van het slib wordt voorkomen;
- hetzelfde geldt voor het tussenschakelen van een indik-/bufferlagune (tweetraps-systeem);
- bij lagunering ontwatert het slib vrij snel tot een voor het slib karakteristiek vochtgehalte, daarna vindt nog slechts een zeer langzame daling van het vochtgehalte plaats; dit karakteristiek vochtgehalte is lager naarmate de laagdikte per dosering geringer is, dit uiteraard afhankelijk van de tijdsperiode en de weersomstandigheden tussen twee vullingen;
- het aflaten van vrijstaand water op de oppervlakte is essentieel;
- de infiltratie van percolatiewater uit het slib in de bodem van de lagune speelt een belangrijke rol;
- ontwateringsmaatregelen als begreppelen, vacuüm drainage en mengen kunnen een belangrijke bijdrage leveren tot vergroting van de droogcapaciteit.

Uitgaande van het voorgaande lijkt onderstaande opzet van een lagunebedrijf voor de ontwatering van aëroob of anaëroob gestabiliseerd slib van een zuiveringsinrichting, zowel procesmatig als voor wat betreft flexibiliteit en terreinbeslag, de meeste perspectieven te bieden.

- indik-/bufferlagunes met een doorlatende en gedraineerde zandbodem (eventueel vacuümdrainage) in één keer, of althans in dikke lagen (0,50 m) te vullen;
- drooglagunes van in principe dezelfde constructie met vulling in dunne lagen (0,10 m).

Essentieel hierbij is, dat het slib in de indik-/bufferlagunes verpompbaar blijft. Dit leidt bij goed indikkende slibsoorten tot het toepassen van een andere constructie, bijvoorbeeld een dichte bak.

De keuze van het lagunesysteem dient per geval te worden bepaald, in afhankelijkheid van vooral de grootte en de aard van de zuiveringsinrichting.

Voor het opstellen van gedetailleerde dimensioneringscriteria is meer kennis vereist van:

- de optimale doseringsdikte in relatie tot de periode tussen twee doseringen;
- de maximale uiteindelijke dikte;
- het effect van een rijpingsperiode na de laatste dosering;
- het effect van vacuümdrainage, begreppelen en mengen.

Dit alles voor verschillende slibsoorten en in relatie tot de atmosferische omstandigheden. Bovendien verdient het aanbeveling na te gaan of een eenvoudige laboratoriumproef (bijvoorbeeld C.S.T.-methode) een relatie kan leggen tussen de ontwateringseigenschappen van verschillende slibsoorten en de benodigde netto oppervlakte van een sliblagunebedrijf.

16 LITERATUUR

- 1 Adviesbureau Arnhem B.V.,
Drainageproef havenslib Kralingen 1972/1973,
onderzoek in opdracht van de Dienst Gemeentewerken Rotterdam,
project nr. 8366 (1974)
- 2 Christen, N.P. en Van Nes, A.W.,
Optimalisering van natuurlijke ontwatering van zuiveringsslib,
H₂O,11 (1978) 22:499-504 en 512
- 3 Coackley, P. en Allos, R.,
The drying characteristics of some sewage sludges,
J. Inst. Serv. Purif. 6 (1962) 557.
- 4 Coppes, J.G.A.,
Hydrologische aspecten van slibontwatering in lagunes
H₂O,10 (1977) 25: 562-566
- 5 De Haan, S.,
Afvalwaterzuiveringsslib als meststof of grondverbeteringsmiddel,
Landbouwkundig Tijdschrift 88 (1976) 1: 21-27
- 6 Duvoort-Van Engers, L.E.,
De productie en bestemming van zuiveringsslib,
H₂O,15 (1982) 2: 25-27
- 7 Fieggen, W.,
Rapport betreffende het onderzoek van zuiveringsslib op pesticiden in 1978,
Unie van Waterschappen (1980)
- 8 Hegemann, W.,
Entwässerungsverfahren Vom Trockenbeet bis zum Trevira-Schwerkraft-
filter,
In: A.T.V. - Fortbildungskurs, Schlammbehandlung und Schlammbeseitigung,
Bonn, Bundesmin. des Innern der Bund.rep.Deutschland (1979) IV 31IV 41
- 9 Heidemij Nederland B.V.,
De ontwatering van slib in lagunes, r.w.z.i. Nieuwegein,
onderzoek in opdracht van de Provinciale Waterstaat van Utrecht,
rapport nr. 687-78/3 (1978)
- 10 Heidemij Nederland B.V.,
De ontwatering van zuiveringsslib in lagunes,
onderzoek in opdracht van het Hoogheemraadschap van de Uitwaterende
Sluizen in Kennemerland en Westfriesland voor de r.w.z.i.'s:
 - a. Wervershoof en Zaandam-Oost rapport nr. 637-77/3 (1977);
 - b. Katwoude rapport nr. 644-77/3 (1977);
 - c. Stolpen rapport nr. 660-77/3 (1977);
 - d. Niedorp rapport nr. 663-77/3 (1977);
 - e. Den Helder rapport nr. 604-79/3 (1979).

- 11 Heidemij Nederland B.V.,
Praktijkproef sec-feld-slibdroging, onderzoek in opdracht van
Heineken Brouwerijen Zoeterwoude,
rapport nr. 627-81/3 (1981)
- 12 Hubbs, S.A., Pavoni, J.L. en Hawkins, F.C.,
Optimization of sludge dewaterability in sludge-disposal lagoons,
Journal Am.Wat.Wks.Ass 66 (1974) 11: 658-663
- 13 Imhoff, K.R.,
Die Eindickung von Schlamm und die weitere Entwässerung von stabilisierten
Schlamm durch natürliche Verfahren.
In: Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie, Band 13,
Die Verwertung und Beseitigung von häuslichen und industriellen Abwasser-
schlamm, R. Oldenbourg, München (1966), 72-92
- 14 Koppers, H.M.M.,
Verwerking en bestemming van drinkwaterslib,
H₂O, 13 (1980) 25, 627-630
- 15 Lundesgaard, T.F.,
Evaporation from Digested Sludge,
diss., Univ. of Iowa (1951)
- 16 Maréchal, J.A.H.,
Sliblagune bij rioolwaterzuivering,
Asfalt, 3 (1976) 2, 70-74
- 17 Miller, O.,
Schlammstapelsämme - ein Entwässerungsverfahren?
Vortrag anl. der Tagung der A.T.V.-landesgruppe Bayern,
Hof, 4 (1977)
- 18 Möller, O.,
Behandlung und Beseitigung van Abfallschlämme,
MUA 65 4gV (1982) Kennzahl 3160, 3190
- 19 Nebiker, J.H.,
Die Trocknung der Klärschlamm durch Verdunstung,
diss. Schweiz. Zeits. Hydrol. (1965), 273-367
- 20 Noack, D. en Naumann, H.,
Hinweise zur Projektierung von natürlichen Schlammmentwässerungsanlagen
In: Behandlung und Verwertung kommunaler Abwasserschlämme,
VEB, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, (1976)
- 21 Novak, J.T.,
Characterization and dewaterability of water treatment plant residues,
Springfield (Virginia), U.S. Department of Commerce, (1974), PB-239.228
- 22 Process design manual for sludge treatment and disposal,
U.S. Environmental Protection Agency (1974): 7.58 - 7.64

- 23 Reuter, J.,
Entwässerung von Schlämmen aus häuslichen, industriellen oder kommunalen
Abwässern,
Zeits. Wasser, Luft und Betrieb, (1969) 13: 246 - 249 en 296 - 303
- 24 Richtlijn voor de afzet van vloeibaar zuiveringsslib ten behoeve van gebruik
op bouw- en grasland,
Unie van Waterschappen (1980)
- 25 Schmidtke, N.W.,
Sludge thickening, conditioning and dewatering fundamentals
In: Sludge Utilization and Disposal,
Conference Proceedings No. 6,
Toronto, Ontario, Ministry of the Environment, (1978): 173 - 216
- 26 Sec-feld proeven bij de r.w.z.i. Haarlem-Waarderpolder,
niet gepubliceerd.
- 27 Slib - bepaling van de specifieke filtratieweerstand bij vacuümfiltratie,
NEN 6685,
- bepaling van de afzuigtijd bij vacuümfiltratie, NEN 6689,
Ned. Norm. Inst., Rijswijk (Z.H.)
- 28 Slib - bepaling van de capillaire zuigtijd (CST-waarde), NEN 6690,
Ned. Norm. Inst., Rijswijk (Z.H.)
- 29 Strijbis, K.,
Beleidsontwikkelingen t.a.v. de verwijdering van zuiveringsslib
H₂O, 15 (1982) 5: 86 - 93
- 30 Swanwick, J.D., White, K. en Davidson, M.F.,
Some recent investigations concerning the dewatering of Sewage Sludges,
J. Inst. Sew. Purif., 5 (1962), 394
- 31 Tichovidiv, B.D., Lopin, A.V., Olejnik, E.I.,
De toepassing van vacuümbemaling voor intensieve ontwatering van zuiverings-
slib (vert. H.J. Vinkers)
Khar'kov., Construct Eng. Inst. Water Supply & Sanit. Eng. (1980): 21 - 23
- 32 Tollenaar, P.,
Natuurlijke droging van zuiveringsslib,
Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfries-
land,
Edam, (1980)
- 33 Van Giffen, A.E., De natuurlijke ontwatering van zuiveringsslib,
H₂O, 11 (1978) 22: 505 - 512
- 34 Vater, W.,
Die Entwässerung, Trocknung und Beseitigung von Städtischen Klärschlamm,
diss., T.H. Hannover, (1956)

- 35 Willet, J.R.,
Bodemfysisch gedrag van opgespoten baggerspecie uit de Rotterdamse havens,
De Ingenieur, 84 (1972) 7: B.1 - B.12
- 36 Wismeijer, A.A.,
Slib, soorten en eigenschappen,
Cursus Slibverwerking 1973-1974
- 37 Wolters, N. en Rösler, N.,
Ablagerung von flüssigem Klärschlamm bei gleichzeitiger Entwässerung,
Korrespondenz Abwasser, 21 (1974) 11: 271 - 276

CHECKLIST INVENTARISATIE NATUURLIJKE ONTWATERING VAN ZUIVERINGSSLIB IN LAGUNES

1. Naam en adres
bedrijf

2. Aard van het
bedrijf

3. Herkomst slib/
soort installatie

4. Samenstelling:

Factoren van belang bij ontwatering	Ontwaterbaarheid Droge stof Organische stof Colloïdaal materiaal Korrelverdeling Kalk (natuurlijk) IJzer (natuurlijk)
-------------------------------------	---

Bodemvruchtbaarheidsfactoren	Stikstof Fosfor Kali pH Chloride
------------------------------	--

Milieuhygiënische factoren	Zware metalen Pesticiden Pathogenen Aromatische verbindingen Diversen (specifieke stoffen i.v.m. herkomst)
----------------------------	--

5. Hoeveelheden

m ³ nat	
ton d.s.	
Verdeling in de tijd	

6. Slibdroging:

Dimensionering lagunes/droogvelden	Oppervlakte (netto)) Max. vulhoogte) Inhoud Ontwerpbelasting
------------------------------------	--

Technisch ontwerp lagunes/droogvelden	Bodemkundig-hydrologische situatie Opbouw kaden Opbouw bodem Aanvoerconstructie Afvoermogelijkheden Zuivering afgevoerd water
---------------------------------------	--

Bedrijfsvorming	Vul- en ruimschema Vultechniek Toevoeging flocculanten, coagulanten etc. Ontwateringsmaatregelen Stankbestrijding Onderhoud velden Insectenplagen Ruiming
7. Relatie zuiveringsproces - slibdroging	Eventuele ingrepen in het zuiveringsproces met het oog op verbetering van de lagunedroging
8. Resultaten droging	Droogsnelheid d.s.-gehalte Ruiming Belasting in m ³ /jaar en ton d.s./jaar Begroeiing
9. Kwaliteit eindprodukt	Aanwezigheid pathogenen Chemische samenstelling Fysische en mechanische eigenschappen
10. Bestemming	Ophoging ter plaatse of elders Elders dumpen Nuttig hergebruik Mengen/verdelen
11. Kosten	Investerings (incl. intern transport) Exploitatie Lagunes (incl. intern transport) Loonkosten Opbrengst eindprodukt

GEËNQUETEERDE INSTANTIES EN BEDRIJVEN

Budelco	-	Budel
Centrale Suiker Maatschappij	-	Vierverlaten
Electriciteitsbedrijf voor Groningen en Drenthe		
Gemeenschappelijke Technische Dienst Oost-Brabant		
Hoogheemraadschap van Rijnland		
Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland		
Hoogheemraadschap West-Brabant		
Provinciale Waterstaat van Friesland		
Provinciale Waterstaat van Utrecht		
Openbare Werken Amsterdam		
Rutte, J.B., B.V.	-	Amsterdam-Osdorp
Zuiveringsschap Amstel- en Gooiland		