

Mededeling 63

ONTWATERING

VAN DRINKWATERSLIB OP

SLIBDROOGBEDDEN

ir. P.J. de Moel

Tevens mededeling nr. 3 van de Werkgroep
Slibverwerking

Rijswijk, maart 1980

Onder de KIWA-commissie Vlokvorming en Vlokverwijdering ressorteren enkele werkgroepen, die een aantal deelstudies uitvoeren op het gebied van het coagulatieproces. Een hiervan is de Werkgroep Slibverwerking die als volgt is samengesteld.

Coördinator:

dr.ir. A. Graveland - Gemeentewaterleidingen
Amsterdam

Secretaris:

ir. H.M.M. Koppers - KIWA N.V.

Leden:

ir. A.N. van Breemen - Laboratorium voor Ge-
zondheidstechniek TH
Delft

ir. F. van Menxel - I.V. Antwerpse Water-
werken N.V.

ir. P.C. Kamp - Provinciaal Waterlei-
dingbedrijf van Noord-
Holland

drs. J. van der Laan - Waterleidingbedrijf
Midden-Nederland

dr.ir. A.P. Meijers - KIWA N.V.

ir. P.J. de Moel - Laboratorium voor Ge-
zondheidstechniek TH
Delft

ir. A.J. van der Veer - Drinkwaterleiding der
Gemeente Rotterdam

De doelstellingen van de Werkgroep Slibverwerking luiden als volgt:

1. Het verkrijgen van inzicht in de eigenschappen en het gedrag van slib, dat vrijkomt bij oppervlaktewater- en grondwaterverwerkende bedrijven.
2. Nagaan hoe met dit inzicht processen kunnen worden beïnvloed om het volume van het vrijkomende slib te verkleinen.
3. Inventariseren en ontwikkelen van technieken en apparatuur, die ten behoeve van deze volumeverkleining worden of kunnen worden gebruikt.
4. Nagaan welke bestemmingsmogelijkheden (inclusief hergebruik) aanwezig zijn of gevonden kunnen worden voor het residu, dat na verwerking overblijft.
5. Contact leggen met de afvalwatersector, vanuit een visie, welke gericht is op toepassing van slibverwerking in de drinkwatersector.

In het kader van deze doelstellingen zal de Werkgroep een aantal rapporten opstellen, die als KIWA-mededeling het licht zullen zien.

In bijgaande derde mededeling van de Werkgroep

wordt een overzicht gegeven van de verwerking van drinkwaterslib op slibdroogbedden.

Deze mededeling kwam tot stand dankzij de welwillende medewerking van:

- Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland
- Laboratorium voor Gezondheidstechniek TH Delft

INHOUD	<u>Blz.</u>
SUMMARY	9
SAMENVATTING	13
1. INLEIDING	17
2. SLIBDROOGBEDDEN	21
2.1 Procesbeschrijving	21
2.2 Uitvoeringsvormen	25
3. PROCESBENADERING	31
3.1 Drainage	31
3.2 Oppervlakte-afvoer	51
3.3 Verdamping	54
3.4 Neerslag	64
3.5 Overige invloeden	71
4. DIMENSIONERING VAN SLIBDROOGBEDDEN	73
4.1 Dimensioneringsparameters	73
4.2 Dimensioneringsprocedure	75
4.3 Experimenteel onderzoek	80
5. DE KOSTEN VAN ONTWATERING OP SLIB- DROOGBEDDEN	83
6. SLIBDROOGBEDDEN IN VERGELIJKING MET ANDERE SLIBVERWERKINGSTECHNIEKEN	87

Vervolg inhoud	Blz.
7. AANBEVELINGEN	91
Bijlage: Dimensioneringsvoorbeelden	93
LITERATUURLIJST	101
BEGRIPPENLIJST	111
SYMBOLENLIJST	115

SUMMARY

Sludge handling can be regarded as a necessary secondary process in water treatment. Sludge handling is directly related to the used water treatment technique since the composition and quantity of the sludges are determined by these treatment techniques. In terms of sludge handling it is necessary to apply treatment methods c.q. chemicals producing limited quantities of sludge which easily dewater. Prior to final disposal, dewatering usually consists of a thickening step combined with mechanical or natural dewatering methods. One method for dewatering sludges is a sludge drying bed.

Dewatering on sludge drying beds can be described as a batch process where dewatering occurs naturally.

Initially water is removed from sludge by gravity; this means by water drainage (cake filtration) and by sedimentation and compression of the sludge particles. A considerable quantity of water can be removed by these processes, drainage being the most important one.

Sludge conditioning will avoid eventual clogging of the drainage medium and also increases the rate and the efficiency of the drainage process.

In most cases evaporation has to complete the dewatering process. The time needed for evaporation is the main factor determining the length of the dewatering process. By applying small sludge depths, the sludge will crack as far as the drainage medium creating a large surface for evaporation. In this case the negative influence of rainfall will be minimized and so the use of translucent covers on the beds will not be necessary.

In winter a natural sludge freezing process can improve the filtrability of the sludge. The effect is only advantageous when the sludge layer is frozen over its whole depth. Given the climatological circumstances the bed area required will mainly depend on the filtrability of the sludge and the operating techniques used.

In most cases an reliable estimation of the required area can be obtained using the dimensioning procedure suggested in this report.

Sludge storage is necessary to compensate the varying dewatering capacity of the sludge drying beds. The sludge storage capacity can be calculated using a formula for the effective rate of evaporation.

Also because their storage capacity, wash water settling basins are very well suited with sludge drying beds.

Sludge drying beds should be equipped with a porous drainage medium. Sand is often used for this purpose.

Underdrain piping is not required in cases of a well permeable soil, however it is preferable because of a more accountable withdrawal of the drained water.

If larger sludge depths are used or in case clogging of the drainage medium is likely to take place it is necessary to provide for the removal of the supernatant.

At the moment sludge drying beds with their highly reliable operation and low energy requirements often are of advantage compared to other dewatering processes. Besides on drying beds sludge can be dewatered to a higher solid content.

Disadvantages of sludge drying beds are objections of aesthetic nature and the amount of space needed when application for large plants is considered.

SAMENVATTING

De verwerking van het slib dat bij de drinkwaterbereiding vrijkomt kan beschouwd worden als een noodzakelijk nevenproces bij de waterzuivering. De slibverwerking kan niet los worden gezien van de drinkwaterbereiding aangezien de hierbij toegepaste zuiveringstechnieken bepalend zijn voor de samenstelling van het slib en de hoeveelheid. Uit oogpunt van slibverwerking is het zinvol zuiveringsprocessen c.q. chemicaliën toe te passen die een beperkte dan wel eenvoudig te verwerken slibstroom produceren.

De verwerking van slib zal meestal bestaan uit een indikfase gevolgd door een ontwateringstechniek en afvoer van het slibresidu. Een van de mogelijkheden om het slib te ontwateren is de toepassing van slibdroogbedden.

Ontwatering op slibdroogbedden is een discontinu proces waarin ontwatering als gevolg van natuurlijke invloeden plaatsvindt.

Aanvankelijk wordt het slib hoofdzakelijk ontwaterd onder invloed van de zwaartekracht, hetgeen enerzijds geschiedt door drainage, een koekfiltratieproces, anderzijds door bezinking en samendrukking van de slibdeeltjes. Door deze mechanismen wordt doorgaans in korte tijd het grootste deel van het af te scheiden water verwijderd waarbij de afgescheiden hoeveelheid

water bepaald wordt door drainage. Eventuele verstopping van het drainagemedium kan door voorafgaande conditionering vermeden worden. Tevens leidt conditionering tot een grotere drainagesnelheid en een hoger drainagerendement.

Veelal zal verdamping de ontwatering dienen te completeren. In dat geval bepaalt de verdampingstijd in belangrijke mate de ontwateringstijd. Door het toepassen van een beperkte opvulhoogte zal als gevolg van het ontstaan van een fijn scheurpatroon tijdens de gehele verdampingstijd een groot uitwendig oppervlak voor verdamping beschikbaar zijn.

Neerslag beïnvloedt de ontwatering in negatieve zin. Bij een beperkte opvulhoogte zal in het slib echter in korte tijd tot op het drainagemedium reikende scheuren ontstaan en zal de invloed van neerslag gering zijn. Een overkapping van de slibdroogbedden kan dan achterwege blijven.

Tijdens de winter kan op slibdroogbedden door bevriezen en ontdooien de ontwaterbaarheid van het slib verbeteren. Het effect hiervan zal vooral van belang zijn indien bevriezing over de gehele hoogte van de sliblaag plaatsvindt.

Het benodigde bedoppervlak zal onder bepaalde klimatologische omstandigheden vooral afhangen van de ontwaterbaarheid door drainage en de

bedrijfsvoering van de slibdroogbedden.

Met behulp van de beschreven dimensioneringsprocedure kan in vele gevallen een voldoende betrouwbare bepaling van het benodigde bedoppervlak worden verkregen.

Daarnaast kan met de gegeven formule voor de effectieve verdampingssnelheid de inhoud van de slibberging worden berekend. Een slibberging is nodig om de variërende verwerkingscapaciteit van slibdroogbedden aan te passen aan de min of meer continue slibproduktie. Mede gezien hun bergend vermogen zijn spoelwatervijvers bij uitstek geschikt om in combinatie met slibdroogbedden te worden toegepast.

Slibdroogbedden dienen in elk geval voorzien te zijn van een goed doorlatend drainagemedium. Veelal zal hiervoor zand worden gebruikt.

In geval van een goed doorlatende ondergrond zou toepassing van drainagebuizen achterwege kunnen blijven, hoewel wegens de mogelijkheid van een meer verantwoorde afvoer van het drainagewater drainagebuizen de voorkeur verdienen. Naarmate hogere opvulhoogten worden toegepast of voor verstopping van het drainagemedium gevreesd dient te worden, wordt een voorziening voor het afvoeren van het bovenstaande water noodzakelijk.

Ruiming van het slib zal in vele gevallen met behulp van een dragline of laadschop plaatsvinden.

Vergeleken met andere slibverwerkingstechnieken zijn slibdroogbedden door hun grote bedrijfszekerheid en geringe energiekosten momenteel veelal in het voordeel. Daarnaast kan slib op slibdroogbedden tot een hoger droge stofgehalte ontwaterd worden.

De belangrijkste nadelen van slibdroogbedden zijn bezwaren van esthetische aard en het ruimtebeslag hetgeen de toepassing van slibdroogbedden als ontwateringstechniek voor grote bedrijven minder wenselijk maakt.

1. INLEIDING

Bij de bereiding van drinkwater uit grond- of oppervlaktewater moeten doorgaans zuiveringstechnieken worden toegepast die een afvalstroom produceren. Veelal omvat deze afvalstroom slibhoudend water, kortweg slib genoemd. De samenstelling van het slib hangt af van de kwaliteit van het ruwe water en de toegepaste zuiveringstechniek. De hoeveelheid slib is voorts afhankelijk van de omvang van de drinkwaterproduktie.

De belangrijkste processen waarbij slib geproduceerd wordt zijn bezinking in een bekken, coagulatie en diverse filtratietechnieken. Als het coagulatieproces wordt toegepast wordt de grootte van de droge stoflast in de afvalstroom doorgaans hoofdzakelijk bepaald door de dosis vlokmiddel. De afvalstroom die dan vrijkomt bij de bezinking omvat 0,07 à 1 % van de hoofdstroom terwijl het droge stofgehalte ligt tussen 0,1 en 2 % droge stof.

Bij flotatie wordt veelal een meer geconcentreerde afvalstroom geproduceerd.

De spoelwaterstroom van de snelfiltratie omvat na coagulatie van oppervlaktewater doorgaans 0,5 tot 5 % van de hoofdstroom, met een droge stofgehalte van 0,01 tot 0,1 %. Dergelijke hoeveelheden en gehalten zijn ook bij de filtratie na beluchting van ijzer- en/of mangaan-

houdend grondwater gangbaar.

Bij ontharding volgens het vlokformingsproces varieert de geproduceerde hoeveelheid onthardingsslib van 0,3 tot 6 % van de hoofdstroom met een droge stofgehalte tussen 2 en 33 %.

In het verleden werden de afvalstromen veelal geloosd op het oppervlaktewater. Door de beheerders van deze wateren worden echter steeds strengere eisen gesteld aan de kwaliteit van dergelijke afvalstromen.

Soms is afvoer van de afvalstromen naar een rioolwaterzuivering mogelijk maar veelal zullen drinkwaterbedrijven zelf tot een verantwoorde verwerking van het slib dienen over te gaan. Gezien de vereiste verwerking is het raadzaam tot vermindering van de slibproduktie te komen. Mogelijkheden hiervoor zijn het verkleinen van de slibstroom door het terugwinnen van het vlokmiddel uit het slib, het gebruik van minder slibproducerende chemicaliën of het terugvoeren van filterspoelwater naar de eerste fase van het zuiveringsproces. Bij nieuwe bouwen bedrijven zal het toepassen van minder slibproducerende zuiveringsprocessen voorop dienen te staan.

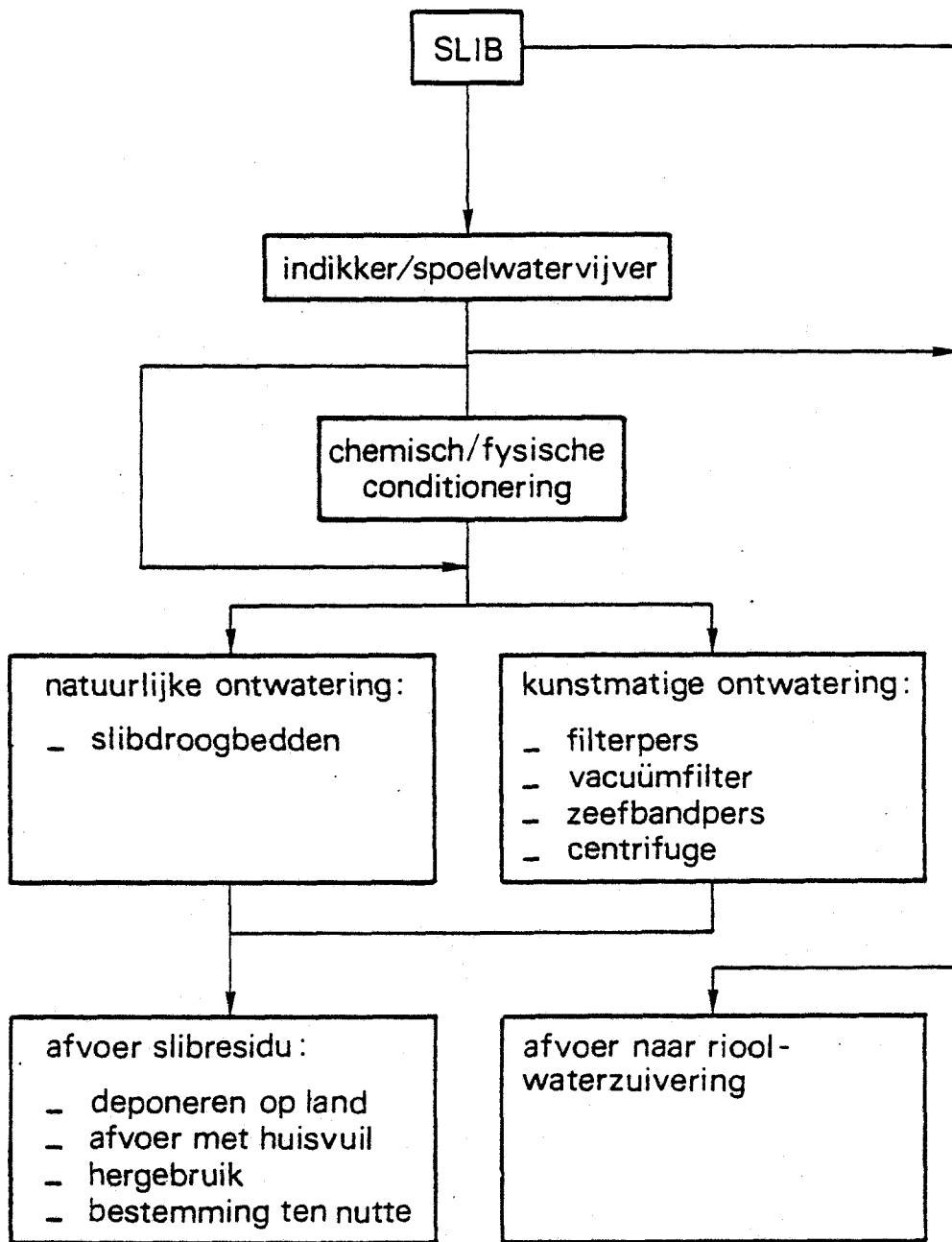
Ondanks voorgenoemde maatregelen zal in het algemeen een slibstroom geproduceerd worden. De verwerking van deze slibstroom zal zodanig

moeten geschieden dat een verantwoorde bestemming of opslag in het milieu plaatsvindt.

De verwerking van het slib zal meestal bestaan uit een indikfase gevolgd door een ontwateringstechniek en afvoer van het slibresidu. Het vrijgekomen slibwater kan worden gerecirculeerd of worden geloosd.

Figuur 1 geeft een globaal overzicht van verschillende slibverwerkingsmethoden.

Deze mededeling gaat nader in op de ontwatering van drinkwaterslib op slibdroogbedden. Aangegeven wordt welke factoren een rol spelen en op welke wijze slibdroogbedden gedimensioneerd en bedreven dienen te worden om tot een optimale en verantwoorde ontwatering te komen. Hoofdstuk 3 gaat in op de meer theoretische aspecten van slibdroogbedden. Door bestudering hiervan kan het inzicht in de werking van droogbedden aanzienlijk verdiept worden. Het rapport kan evenwel ook zonder dit hoofdstuk gelezen worden.



Figuur 1 - De verwerking van drinkwaterslib

2. SLIBDROOGBEDDEN

2.1 Procesbeschrijving

De ontwatering van slib op slibdroogbedden wordt veroorzaakt door drie mechanismen, namelijk drainage, oppervlakte-afvoer en verdamping.

Drainage alleen is in staat binnen korte tijd het slib tot een droge stofgehalte van 5 à 15 % in te dikken. De drainagesnelheid en het droge stofgehalte na drainage hangen af van het initieel droge stofgehalte, de specifieke filtratieweerstand en de samendrukbaarheid van het slib. Deze grootheden bepalen ook de mogelijke toepassing van ontwateringsmethoden die gebaseerd zijn op het filtratieprincipe. Slib dat zich volgens deze methoden moeilijk laat ontwateren, zal daarom ook moeilijk te verwerken zijn op slibdroogbedden (lit. 1).

Oppervlakte-afvoer verwijdert de waterlaag, die door bezinking en samendrukking van de slibvlokken boven het slib ontstaan is. De afvoer is mogelijk met behulp van een overstort of sifon, of via drainage aan de zijwanden. De snelheid en de grootte van de oppervlakte-afvoer hangen af van de bezinking, samendrukking van het slib en de methode van afvoer.

Door verdamping van water uit slib kan het slib overgaan in een korrelige of glasachtige structuur. De verdampingssnelheid benadert de

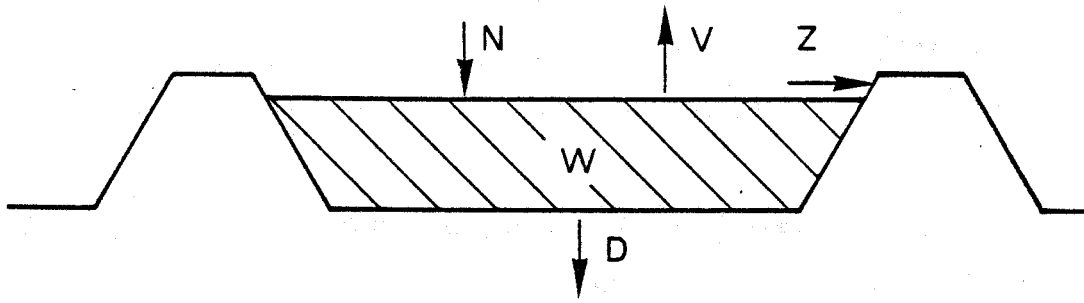
verdampingssnelheid aan een open wateroppervlak zolang er nog vrij water in de bovenste sliblaag aanwezig is. De verdampingssnelheid aan een open wateroppervlak hangt af van de klimatologische factoren te weten relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid, luchttemperatuur en zoninstraling.

Neerslag, waaronder ook mist en dauw gerekend kunnen worden, vertraagt de slibontwatering. Het water zal door bovengenoemde mechanismen weer uit het slib verdwijnen. Een overkapping kan de inval van neerslag voorkomen.

Figuur 2 geeft een overzicht van de waterstromen waarvoor de volgende vloeistofbalans kan worden opgesteld:

$$\Delta W = D + Z + V - N$$

waarin: ΔW = water uit het slib (kg, kg/s)
D = drainage (kg, kg/s)
Z = oppervlakte-afvoer (kg, kg/s)
V = verdamping (kg, kg/s)
N = neerslag (kg, kg/s)



Figuur 2 - Waterstromen bij ontwatering op slibdroogbedden

Gedurende de winter is de verdamping gering en verloopt, door de grotere viscositeit van het water, ook de drainage trager. Bevriezing van het slib kan echter de ontwatering verbeteren. Er treedt dan een soort vriesdooi-proces op, waarbij ijskristallen van zuiver water gevormd worden, die bij aangroeiing de slibvlokken ontwateren en samenpersen tot fijne, harde korrels. Nadat het ijs gesmolten is, kan het water door drainage of oppervlakte-afvoer gemakkelijk verdwijnen.

Tijdens het ontwateringsproces klinkt het slib in, waardoor scheurvorming aan de bovenlaag optreedt. Hierdoor wordt het oppervlak, dat aan verdamping bloot staat groter, hetgeen echter niet betekent dat de verdamping nu ook sneller zal gaan. De droge bovenlaag bevat namelijk niet meer voldoende vrij water, en belemmert daardoor de verdamping. Wel kan via

scheuren, die tot de bodem reiken, het regenwater sneller de bodem bereiken, waardoor neerslag na scheurvorming geen noemenswaardige verlenging geeft van de ontwateringstijd.

In het begin van de ontwatering zijn drainage en oppervlakteafvoer bepalend, terwijl later de verdamping overheerst; echter alle processen kunnen gelijktijdig optreden. Door de eerste twee processen verdwijnt doorgaans het meeste water. Omdat hierdoor meestal geen slib met een acceptabel hoog droge stofgehalte is verkregen, dient verdamping de ontwatering te completeren. Voor de verdamping is vaak meer tijd nodig dan voor drainage en oppervlakteafvoer, hetgeen betekent dat voor een snelle ontwatering een goed verlopen van alle drie processen van essentieel belang is.

Nadat het slib gedroogd is, kan men of het slib eerst ruimen of direct een nieuwe sliblaag aanbrengen. Omdat in dit laatste geval de drainage belemmerd kan worden, moet rekening worden gehouden met een verlenging van de ontwateringstijd. Wanneer het slib zodanig goed ontwaterd is dat een korrelige structuur is ontstaan, zal deze verlenging niet erg groot zijn.

2.2 Uitvoeringsvormen

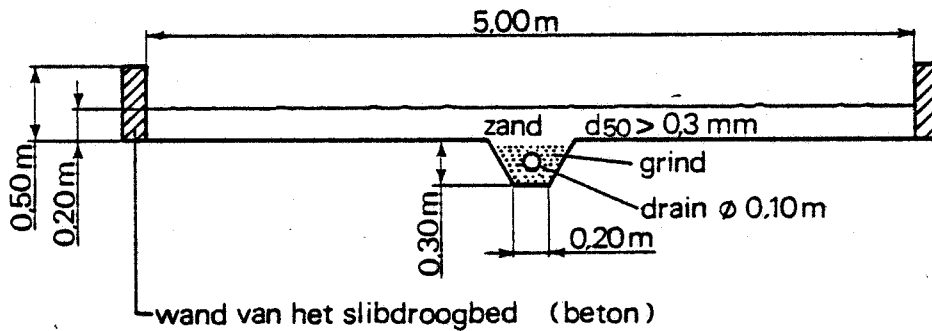
Met de naam slibdroogbedden worden diverse uitvoeringsvormen van natuurlijke ontwatering aangeduid. Veelal betreffen de verschillen de bodemconstructie. Daarnaast kunnen ook open en overdekte slibdroogbedden onderscheiden worden en slibdroogbedden met of zonder oppervlakteafvoer.

Om de ruiming van het gedroogde slib te vereenvoudigen worden in warme streken wel asfaltbodems met een enkele drainagesleuf of een met klinkers bestraat zandbed toegepast. Onder Nederlandse omstandigheden is met een dergelijke bodemconstructie geen goede ontwatering mogelijk.

In Engeland wordt om de slibruiming te vereenvoudigen en om verstopping van de zandbodem en opstijgen van capillair water uit het zand te vermijden, metaalgaas (wedge-wire) gebruikt. Het gaas heeft gewoonlijk maaswijdten van 0,125 - 0,25 mm. Alvorens het slib op te brengen wordt water opgebracht tot 25 mm boven het gaas. Dit maakt het mogelijk de drainagesnelheid met een afsluiter zodanig te regelen dat een helder filtraat wordt verkregen.

Het meest gangbare drainagemedium is zand. In de afvalwaterzuivering bestaat van oudsher de bodemconstructie uit 10 - 30 cm scherp zand boven een 30 - 50 cm gelaagd grindbed, waarin

drainagebuizen op een onderlinge afstand van maximaal 6 meter. Tegenwoordig wordt veelal een vereenvoudigde constructie toegepast (figuur 3, lit. 2). Het slib met een droge stofgehalte van 4 - 10 % wordt opgebracht tot maximaal 30 cm.



Figuur 3 - Standaard droogbedconstructie voor de ontwatering van afvalwaterslib

Bij G.W. Amsterdam te Weesperkarspel zijn de slibdroogbedden voor de ontwatering van coagulatie-ijzerslib in het uit bouwzand bestaande terrein ingegraven. PVC-ribbedrains $\varnothing 0,08 \text{ m}$ liggen 1 meter diep op een onderlinge afstand van 10 meter. De wanden zijn 1 meter hoge zandwallen.

In het "Sec-feld"-systeem (lit. 3) worden de drainagebuizen bemalen om door middel van onderdruk de drainage te versnellen. Dit systeem is vrij gecompliceerd en kwetsbaar.

Wettelijke regelingen kunnen het noodzakelijk maken dat slibdroogbedden beneden de drainagebuizen van een ondoorlatende bodem zijn voor-

zien om infiltratie van het drainagewater in de bodem te voorkomen.

Doorgaans worden slibdroogbedden niet overdekt. In gebieden of perioden met veel neerslag kan echter een overkapping aantrekkelijk zijn. Om de verdamping niet te sterk te belemmeren zijn dergelijke overkappingen lichtdoorlatend.

Slibdroogbedden worden met en zonder mogelijkheid van oppervlakte-afvoer toegepast. Vooral bij hoog opge vulde slibdroogbedden is afvoeren van het bovenstaande water door middel van drainage aan de zijwand, verticale drainage, sifon, standpijp of overstort aantrekkelijk. Bij drainage aan de zijwanden bestaan de wanden uit een aarden- of zandwal. In andere gevallen kunnen ook betonnen wanden toegepast worden.

De vorm van slibdroogbedden wordt mede bepaald door de wijze van slibruiming. Bij handmatig ruimen kan de vorm nog min of meer vrij gekozen worden. Bij mechanische ruiming met behulp van laadschop of dragline ligt een rechthoekige vorm voor de hand. Om te voorkomen dat deze apparatuur het drainagesysteem vernielt, worden soms rijstroken in het zandbed aangebracht. Dit beperkt de vrije wendbaarheid van de ruimers en verkleint het drainage-oppervlak. Indien ruimers met brede banden toege-

past worden en de drainagebuizen voldoende diep liggen, kunnen rijstroken achterwege blijven. Bij slibgraafmachines is een rechthoekige vorm vereist en is de maximale breedte afhankelijk van het type slibgraafmachine.

Verschillende typen mechanische slibruimers worden beschreven door Heijn en Brouwer (lit. 4) en Van de Sande (lit. 5).

In de afvalwaterzuivering worden richtlijnen aangehouden voor de wijze van slibruiming, afhankelijk van de capaciteit van de zuiveringsinstallatie (lit. 2). Uitgaande van een jaarlijkse droge stofproduktie per inwoner-equivalent na slibgisting van 20 kg/j (lit. 6) wordt de volgende onderverdeling verkregen:

droge stofproduktie	wijze van slibruiming
200 ton/jaar	spade en kruiwagen
200 - 400 ton/jaar	spade en transportband
400 - 1000 ton/jaar	mechanische ruiming met laadschop
1000 ton/jaar	mechanische ruiming met slibgraafmachine

Bij de drinkwaterproduktie wordt doorgaans geruimd met behulp van laadschop of dragline, ongeacht de droge stofproduktie. Slibdroogbedden doen namelijk veelal tevens dienst als slibbergingsruimte. Hierbij wordt een minimaal aantal ruiming en geprefereerd boven een optimale ontwatering. Een tijdsduur van meer dan

een jaar tussen de ruiming en is meer regel dan uitzondering. De per ruiming afgevoerde hoeveelheid slib is dan ook groter dan de bij de afvalwaterzuivering gangbare hoeveelheid.

De slibdroogbedden dienen goed bereikbaar te zijn voor de transportmiddelen die de verdere afvoer van het gedroogde slib verzorgen.

Het benodigde aantal slibdroogbedden hangt mede af van de continuïteit in de slibproduktie. Voor de ontwatering van slib afkomstig uit een spoelwaterwaaier of een bezinkbekken met discontinue slibuiming kan veelal met een enkel slibdroogbed worden volstaan. Bij een meer continue slibproduktie zijn meerdere bedden vereist doordat voldoende tijd voor de ontwatering beschikbaar moet zijn.

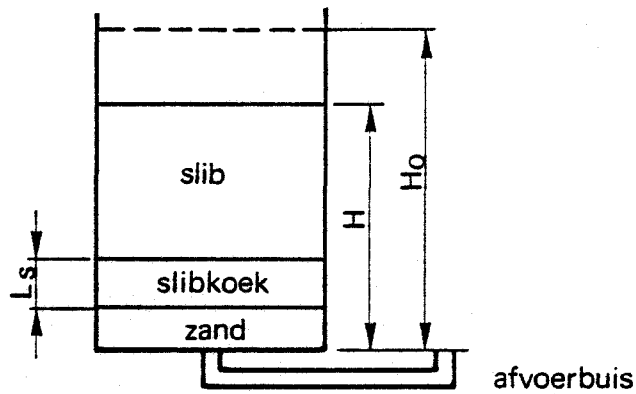
3. PROCESBENADERING

Om meer inzicht te verkrijgen in het ontwateringsproces, zal in dit hoofdstuk nader ingegaan worden op de achtergronden van slibontwatering op slibdroogbedden. Hiervoor wordt gekeken naar de afzonderlijke ontwateringsmechanismen. Hoewel in werkelijkheid deze mechanismen niet onafhankelijk van elkaar zijn, kan toch aangegeven worden hoe de diverse grootheden het proces beïnvloeden. Dit maakt het mogelijk doelgerichter op de specifieke omstandigheden in te spelen.

3.1 Drainage

Om de drainage theoretisch te beschrijven wordt uitgegaan van een geheel met water verzadigde zandbodem, om de invloed van de capillaire werking van het zand te elimineren. Slibdroogbedden, waarin de drainagesnelheid door een afsluiter wordt geregeld, hebben een verzadigde bodem.

Figuur 4 geeft hiervan een doorsnede. De weergegeven grootheden worden later verklaard.



Figuur 4 - Drainagemodel

Voor stroming door een doorlatend medium, geldt de wet van Darcy:

$$q = -k \frac{d\Psi}{dz} \quad (1)$$

waarin: q = specifiek debiet (m/s)

k = doorlatendheidscoëfficiënt (m/s)

Ψ = drukhoogte (m)

z = laagdikte (m)

De waarde van k hangt af van het medium en van de viscositeit van de vloeistof volgens:

$$k = \frac{Kg}{\nu} = \frac{K\rho g}{\eta} = \frac{\rho g}{R\eta} \quad (2)$$

waarin: K = intrinsieke doorlatendheid (m²)

g = valversnelling (m/s²)

= kinematische viscositeit (m²/s)

= dichtheid van de vloeistof (k/m³)

= dynamische viscositeit (Ns/m²)

R = weerstand (m⁻²)

Uit vergl. 1 en 2 volgt:

$$q = - \frac{\rho g}{\eta} \frac{d \Psi}{R dz} \quad (3)$$

De weerstandsterm $R dz$ geïntegreerd over de weerstandshoogte is de som van de weerstand van de slibkoek en de ondersteunende laag:

$$\int R dz = R_S L_S + R_f L_f \quad (4)$$

waarin: R_S = weerstand van de slibkoek (m^{-2})

L_S = dikte van de slibkoek (m)

R_f = weerstand van het filter (m^{-2})

L_f = dikte van het filter (m)

Het drukhoogteverschil d geeft geïntegreerd over de totale hoogte:

$$\int d \Psi = H \quad (5)$$

waarin: H = slibhoogte t.o.v. druknulpunt (m)

De weerstand van het filter is t.o.v. de weerstand van de slibkoek te verwaarlozen, zodat na substitutie van vergl. 4 en 5 in vergl. 3:

$$q = - \frac{\rho g}{\eta} \frac{H}{R_S L_S} \quad (6)$$

Carman (lit. 7) introduceerde de veronderstelling dat de slibkoekdikte L_S evenredig is met het filtraatvolume:

$$L_S = \frac{v_C V_f}{A} = v_C (H_0 - H) \quad (7)$$

waarin: v_C = volume van de afgezette filterkoek per volume-eenheid filtraat (-)

V_f = filtraatvolume (m³)

A = filtratieoppervlak (m²)

H_0 = slibhoogte op $t=0$ t.o.v. druknulpunt (m)

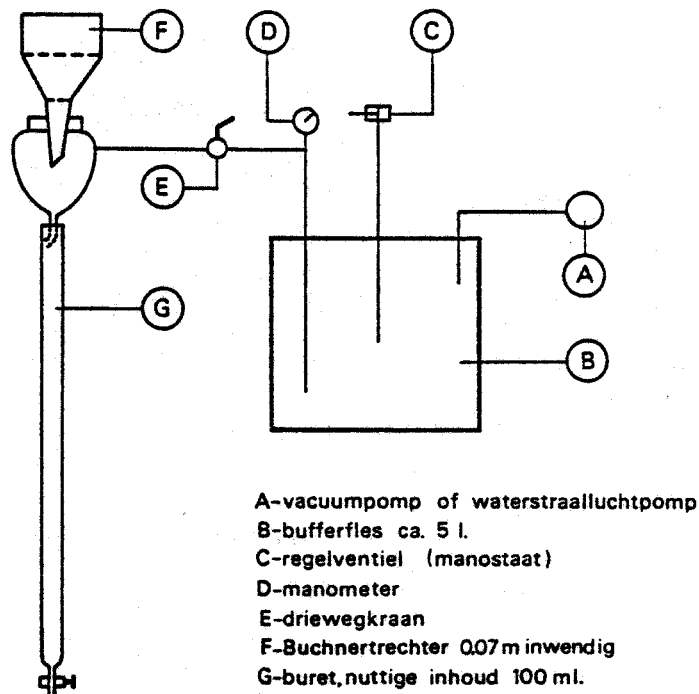
Omdat het volume van de filterkoek moeilijk meetbaar is, wordt voor $v_C R_S$ geschreven:

$$v_C R_S = Cr \quad (8)$$

waarin: C = massa droge stof in de afgezette filterkoek per volume-eenheid filtraat (kg/m³)

r = specifieke filtratieweerstand (m/kg)

De specifieke filtratieweerstand kan men bepalen met een Büchnertrechter of een drukfilter. Hierin filtreert men een slibmonster over filtreerpapier bij een bepaalde onder- respectievelijk overdruk. Bij overdrukfiltratie wordt doorgaans 250 ml slib gefiltreerd bij een druk van 700 kPa, bij onderdrukfiltratie filtreert men 125 ml slib bij 50 kPa. Gezien de geringere verschillen met de drukken die op slibdroogbedden gangbaar zijn (1-15 kPa), verdient onderdrukfiltratie (figuur 5) de voorkeur.



Figuur 5 - Onderdrukfiltratie-apparatuur

Coackley en Jones (lit. 8) nemen als startpunt voor de bepaling twee minuten na aanvang van de filtratie om eerst een filterkoek te laten ontstaan. Redelijkerwijs mag worden aangenomen dat bij filtratie van slib met een droge stofgehalte groter dan 1,5 % een filtraatvolume van 10 ml voldoende is voor de vorming van een filterkoek.

De bepaling wordt voortgezet totdat door scheurvorming het drukverschil wegvalt of totdat geen filtraat meer wordt opgevangen.

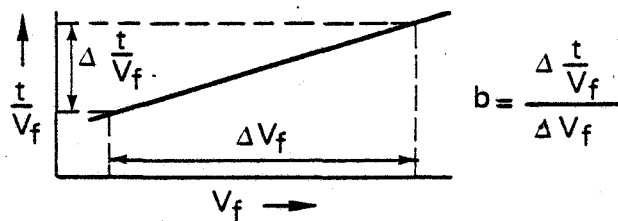
Het filtraatvolume verloopt aanvankelijk parabolisch met de tijd (lit. 7), zodat t/V_f uitgezet tegen V_f een rechte geeft (figuur 6). De helling van deze rechte wordt gebruikt voor de berekening van de specifieke filtratieweerstand volgens:

$$r_B = \frac{2bP_B A^2}{C} \quad (9)$$

waarin: r_B = specifieke filtratieweerstand bij druk (m/kg)

b = de helling van t/V_f uitgezet tegen het filtraatvolume V_f (s/m⁶)

P_B = toegepaste druk (N/m²)



Figuur 6 - Grafische bepaling van de helling b

Aangezien tijdens de filtratie geldt: (10)

$$q = \frac{dH}{dt}$$

kan men voor vergl. 6 na substitutie van vergl. 7, 8 en 10 schrijven:

$$\frac{dH}{dt} = - \frac{\rho g H}{\eta r C (H_0 - H)} \quad (11)$$

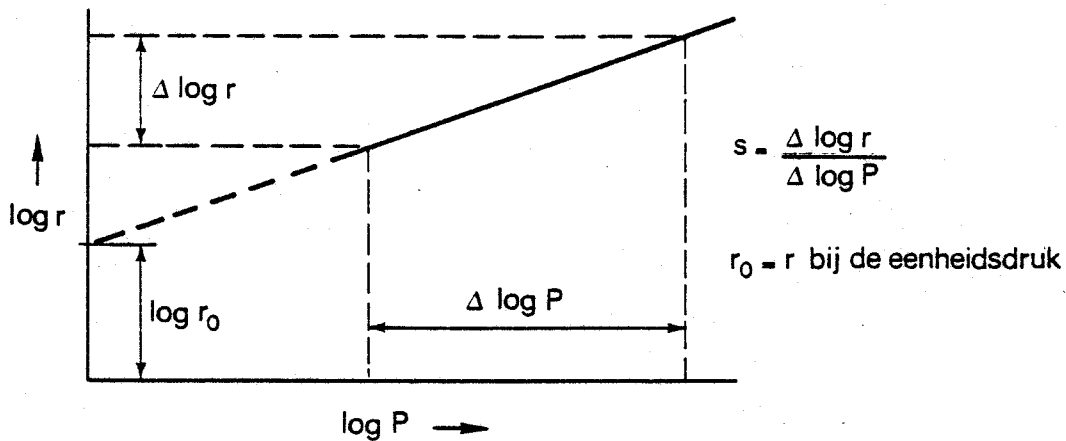
De druk tijdens de drainage is niet gelijk aan de druk P_B die gebruikt is bij de bepaling van de specifieke filtratieweerstand. Omrekening naar een andere druk geschiedt volgens (lit. 7):

$$r = r_B \left(\frac{P}{P_B} \right)^s = r_B \left(\frac{H}{H_B} \right)^s \quad (12)$$

waarin: r = specifieke filtratieweerstand
bij druk P (m/kg)

s = samendrukbaarheid (compressibiliteit) (-)

De waarde van s wordt bepaald door de specifieke filtratieweerstand te bepalen bij diverse drukverschillen, bijvoorbeeld 0,2 - 0,3 - 0,5 en 0,8 kPa. Figuur 7 geeft aan hoe s grafisch bepaald kan worden.



Figuur 7

Grafische bepaling van de samendrukbaarheid s

Na substitutie van vergl. 12 in vergl. 11 en integratie met beginvoorwaarde $H=H_0$ voor $t=0$ vindt men voor de drainagetijd tot een slibhoogte H :

$$t = \frac{\eta r_{BC}}{\rho g H_B^s} \left(\frac{H^{s+1} - H_0^{s+1}}{s+1} + \frac{H_0^{s+1} - H_0 H^s}{s} \right) \quad (13)$$

Nebiker, Sanders en Adrian (lit. 9) voerden een mediumfactor in om het verschil in filtratieëigenschappen van filtreerpapier en het op slibdroogbedden gebruikte zand in rekening te brengen. Experimenteel werden als waarden voor deze factor 0,45, 0,60 en 0,75 gevonden, hoe fijner het zand, hoe groter de mediumfactor.

Clark (lit. 10) schreef de noodzaak van deze factor hoofdzakelijk toe aan een verkeerd gebruik van de specifieke filtratieweerstand. De specifieke filtratieweerstand r_B zou gedeeld moeten worden door $(1+s)$ om de gemiddelde r -waarde over de slibkoekhoogte te verkrijgen. De waarde C geeft de massa droge stof in de afgezette filterkoek per volume-eenheid filtraat weer. Omdat het droge stofgehalte gedefinieerd is als:

$$S = \frac{m_{ds}}{m_{ds} + m_w} \times 100 \quad (14)$$

waarin: S = droge stofgehalte (%)
 m_{ds} = massa droge stof (kg)
 m_w = massa water (kg)

kan het filtraatvolume V_f geschreven worden als:

$$V_f = m_{ds} \left(\frac{100}{S_o} - \frac{100}{S_f} \right) \frac{1}{\rho} \quad (15)$$

waarin: S_o = initieel droge stofgehalte (%)
 S_f = droge stofgehalte na filtratie/drainage (%)
 ρ = dichtheid van water (kg/m³)

zodat voor C geldt:

$$C = \frac{m_{ds}}{V_f} = \frac{\rho}{\frac{100}{S_o} - \frac{100}{S_f}} = \frac{S_o S_f \rho}{100(S_f - S_o)} \quad (16)$$

Lutin, Nebiker en Adrian (lit. 11) gebruiken voor C het droge stofgewicht per volume-eenheid filtraat (N/m^3) en drukken de specifieke filtratieweerstand dan ook uit in (s^2/kg).

Coackley en Jones (lit. 8) gebruiken voor C de droge stofmassa per volume-eenheid voor filtratie (kg/m^3), omdat deze waarde eenvoudiger te bepalen is. Men krijgt dan de zogenaamde schijnbare specifieke filtratieweerstand. Indien S_0 ten opzichte van S_f te verwaarlozen is, is de schijnbare specifieke filtratieweerstand gelijk aan de specifieke filtratieweerstand.

Voor C wordt soms ook de droogrest onopgeloste bestanddelen (kg/m^3) volgens NEN 3235.4.2 gebruikt. Indien de dichtheid van het slib gelijk is aan de dichtheid van het filtraat c.q. water, is deze C-waarde gelijk aan de C-waarde die gebruikt wordt voor de schijnbare specifieke filtratieweerstand.

Vergl. 13 geldt zolang het droge stofgehalte na drainage nog niet is bereikt. Dit droge stofgehalte kan met vergl. 13 niet worden bepaald omdat theoretisch de drainage zou doorgaan totdat $H=0$.

Als aangenomen wordt dat voor een bepaald soort slib het droge stofgehalte na drainage onafhankelijk is van de opvulhoogte en van het droge stofgehalte voor drainage, kan S_f geschreven worden als:

$$S = \text{constant} = \frac{1}{p} S_0 \quad (17)$$

waarin: p = verhouding tussen de droge stof-
gelaten voor en na drainage (-)
De hoeveelheid droge stof per m^2 blijft bij
drainage gelijk. Als het druknulpunt ligt op
het zand/slib-grensvlak geldt bij benadering:

$$H_0 S_0 = H_d S_f \quad (18)$$

waarin: H_d = slibhoogte na drainage (m)
zodat H_d geschreven kan worden als:

$$H_d = p H_0 \quad (19)$$

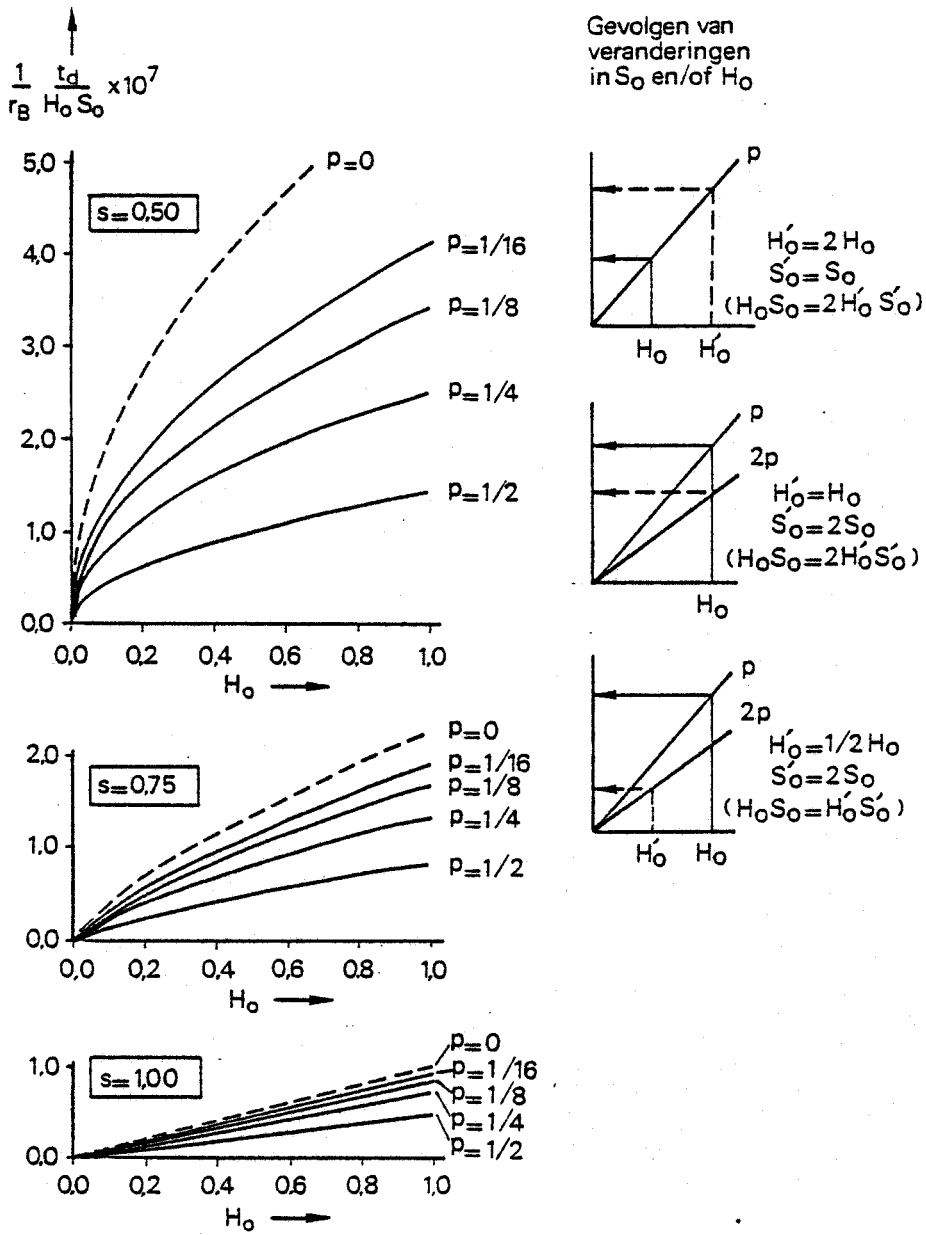
en C door substitutie van vergl. 17 in vergl.
16 als:

$$C = \frac{\rho S_0}{100(1-p)} \quad (20)$$

Substitutie van vergl. 19 en 20 in vergl. 13
geeft de drainagetijd t_d :

$$t_d = \frac{n r_B S_0 H_0^{s+1}}{100 g H_B^s (1-p)} \left(\frac{p^{s+1}-1}{s+1} + \frac{1-p^s}{s} \right) \quad (21)$$

Bij een bepaalde droge stofproduktie is voor
de dimensionering van slibdroogbedden de ont-
wateringstijd per opgebracht droge stofmassa
per m^2 van belang. De samenhang van deze
grootheid met de andere grootheden uit vergl.
21 wordt weergegeven in figuur 8 voor



Figuur 8 - De drainagetijd t_d (s) per $H_0 S_0$ (m.%) als functie van H_0 (m), p (-), s (-) en r_B (m/kg)

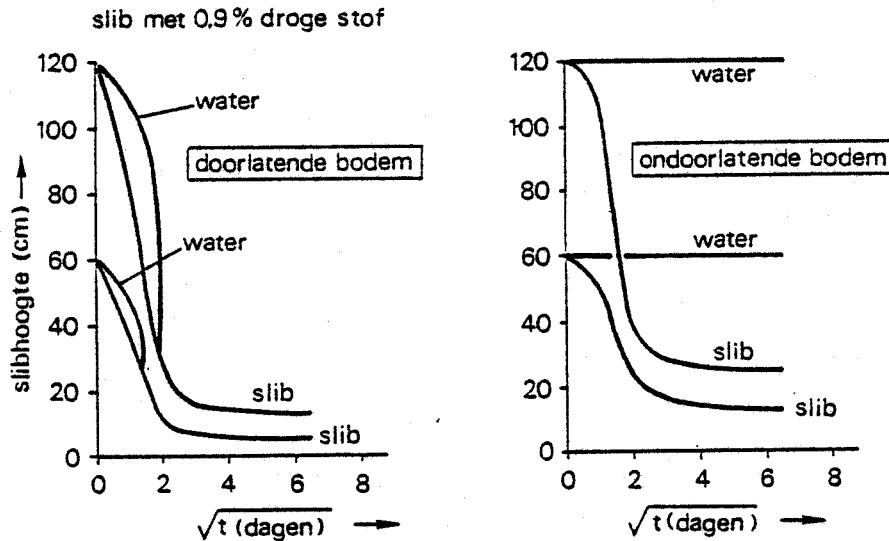
$\eta = 1,01 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ (20 °C), $H_B = 5,10 \text{ m}$ (r_B bij 50 kPa) en $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
Met behulp van figuur 8 kan de drainagetijd bij bekende r_B , s , H_0 , S_0 en p berekend worden.

Figuur 8 laat tevens zien dat vergroting van de opvulhoogte H een onevenredige verlenging van de drainagetijd geeft. Ook een lager initieel droge stofgehalte S_0 beïnvloedt de drainagetijd nadelig. De opvulhoogte en het initieel droge stofgehalte is vooral van belang bij een lagere waarde van de samendrukbaarheid s . De drainagetijd is verder recht evenredig met de specifieke filtratieweerstand r_B .

In de drainagetheorie is verondersteld dat alleen door filtratie een slibkoek wordt opgebouwd. Bij langzaam drainerend slib kan echter ook door bezinking en samendrukking transport van droge stof plaatsvinden. Tevens kan door anaerobe gisting gasontwikkeling optreden. Wanneer de slibkoek het opstijgen van gasbellen toelaat, worden kanaaltjes gevormd en verloopt de samendrukking en/of de drainage sneller.

Figuur 9a (lit. 12) geeft een voorbeeld van wat de gevolgen kunnen zijn van samendrukking en kanaalvorming. De samendrukking verloopt bij grotere opvulhoogten sneller door de grotere korrelspanning. Na kanaalvorming door

gasontwikkeling verdwijnt het bovenstaande water zeer snel. De drainagetijd is voor beide opvulhoogten gelijk. Figuur 9b laat zien dat bezinking en samendrukking vanwege een lagere korrelspanning niet in staat zijn het ontwateringsrendement van drainage te bereiken.

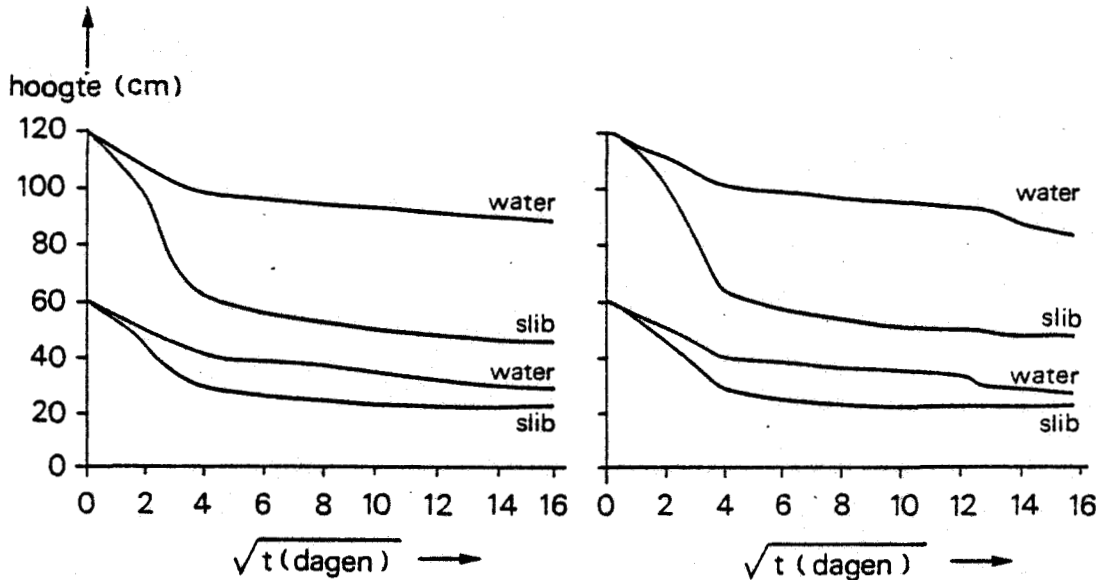


Figuur 9 - Slibontwatering met en zonder drainage

Bij een te grote hoeveelheid opgebracht droge stof per oppervlakte-eenheid kan de gevormde slibkoek zo dicht worden dat gasvorming niet in staat is kanaaltjes te laten ontstaan over de gehele slibkoekhoogte. Een dergelijke slibkoek kan zelfs drainage van het bovenstaande water onmogelijk maken (zie figuur 10, lit. 12). De kanaaltjes die ontstaan zijn in het bovenste gedeelte van de slibkoek versnellen dan enkel de samendrukking.

ongeroid slibmonster
6,2 % droge stof
 $r_B = 2,3 \times 10^{12}$ m/kg
 $s = 0,38$

geroid slibmonster
6,4 % droge stof
 $r_B = 8,1 \times 10^{12}$ m/kg
 $s = 0,45$



Figuur 10 - Onvolledige drainage

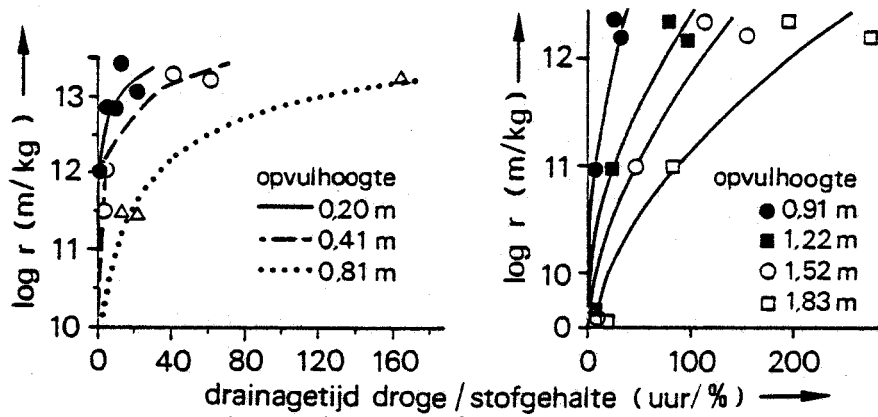
Kos en Adrian (lit. 13) beschouwen drainage als stroming door een medium van onsamendrukbare korrels bij toenemende effectieve korrelspanning. Hun theorie is nog niet zodanig uitgewerkt dat beschrijving van het drainageproces op eenvoudige wijze realiseerbaar is.

Drainage dient het karakter te hebben van een koekfiltratieproces. Bij het binnendringen van slibdeeltjes in het filtermedium zou namelijk

de drainage belemmerd worden door verstopping van het medium en regelmatige vernieuwing van het medium noodzakelijk zijn.

Voor een goed verlopend koekfiltratieproces is het onder meer van belang dat de initiële drainagesnelheid niet te groot is. Doorgaans zal de initiële drainagesnelheid voldoende klein zijn als het slib een droge stofgehalte van meer dan één procent heeft en de effectieve diameter van het zand kleiner is dan 1,2 mm.

Novak en Montgomery (lit. 1) gaan voor de voorspelling van de drainagetijd uit van het initieel droge stofgehalte, de specifieke filtratieweerstand bij 38,1 cm Hg (50,8 kPa) en de opvulhoogte. De drainagetijd definiëren zij als de tijd nodig om 90 % van het draineerbaar water te verwijderen, omdat bij langzaam drainerend slib het exacte tijdstip, waarop drainage eindigt, moeilijk te bepalen is. Het door hen gevonden verband uit experimenten met $\text{Al}(\text{OH})_3$ -, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ - en CaCO_3 -slibben, die ongeveer 70-80 % draineerbaar water bevatten, is weergegeven in figuur 11. Hierin zijn ook de resultaten van Novak en Langford (lit. 14) voor grotere opvulhoogten opgenomen.



Figuur 11

De drainagetijd als functie van de specifieke filtratieweerstand, de opvulhoogte en het initieel droge stofgehalte

Wat betreft de invloed van de opvulhoogte, de specifieke filtratieweerstand en, mits p klein is, het initeel droge stofgehalte komen deze resultaten redelijk overeen met de drainage-theorie van figuur 8. De grotere drainagetijd bij kleinere samendrukbaarheid wordt toegeschreven aan verstopping van de bodem hetgeen vooral bij grotere opvulhoogten en grover zand van belang zou zijn. Bij een samendrukbaarheid groter dan 0,7 is het droge stofgehalte van het filtraat klein hetgeen erop wijst dat er geen slibdeeltjes in het filtermedium zijn doorgedrongen.

Op grond van bovenstaande resultaten wordt de volgende aanbeveling voor opvulhoogten gegeven (lit. 1):

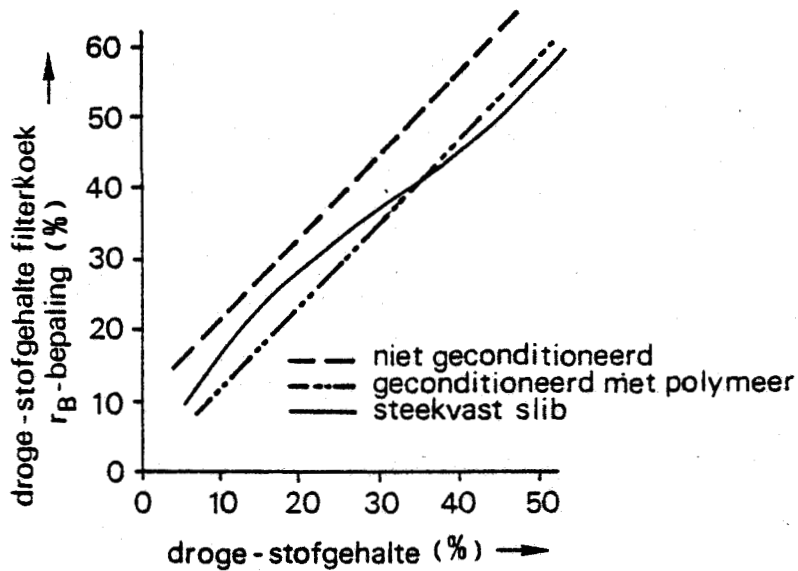
r bij 50,8 kPa	s 0,7	s 0,7
$r < 10^{12}$ (m/kg)	opvulhoogte > 0,95 (m)	filtraat niet direct lozen
$10^{12} < r < 3 \times 10^{12}$ (m/kg)	0,45 opvulhoogte < 0,95 (m)	ongeschikt
$3 \times 10^{12} < r < 10 \times 10^{12}$ (m/kg)	opvulhoogte < 0,45 (m)	voor slib-
$10 \times 10^{12} < r$ (m/kg)	opvulhoogte < 0,30 (m)	droogbedden

Drainage kan aanzienlijk worden verbeterd door chemische conditionering van het slib.

Novak en O'Brien (lit. 15) tonen aan dat voor drinkwaterslib anionische polymeren vanwege hun grote molecuulgewicht zeer geschikt zijn en de specifieke filtratieweerstand kunnen reduceren tot 0,06 maal de oorspronkelijke waarde. Doordat ook de samendrukbaarheid vergroot wordt tot waarden boven 0,7 (lit. 14,15) bestaat geen gevaar voor verstopping van het drainagemedium.

Hoewel de polymeren het droge stofgehalte van de filterkoek, verkregen bij de bepaling van de specifieke filtratieweerstand niet verhogen, wordt door drainage wel een hoger droge stofgehalte verkregen. Novak en Langford (lit. 14) vermelden zelfs dat na conditionering met anionische polymeren in vele gevallen door drainage een steekvast slib kan worden verkre-

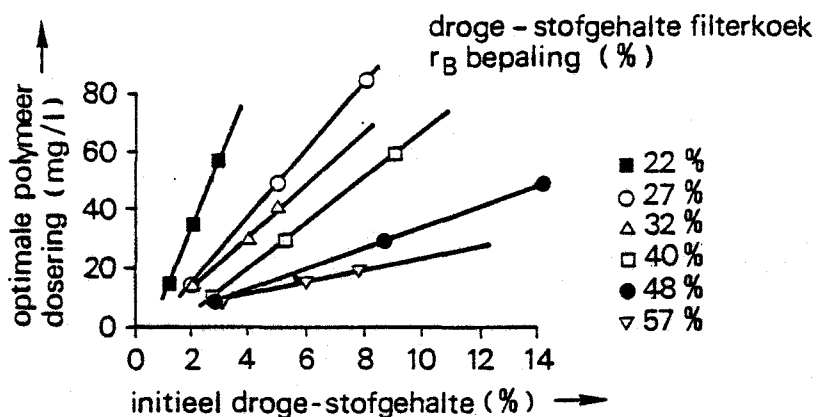
gen, hetgeen zonder conditionering niet het geval is (figuur 12). Een steekvast slib wordt gekenmerkt door een schuifweerstand van meer dan $3,8 \text{ kN/m}^2$ (lit. 16).



Figuur 12

Het droge stofgehalte na drainage met en zonder slibconditionering en het droge stofgehalte van een steekvast slib

Naast een indicatie omtrent het te verwachten droge stofgehalte na drainage kan het droge stofgehalte van de slibkoek, verkregen bij de specifieke filterweerstandsbepaling, ook een idee geven van de polymeedosis welke een zo laag mogelijke specifieke filtratieweerstand met zich meebrengt (figuur 13, lit. 15).



Figuur 13

Optimale dosis anionische polymeren als functie van het droge stofgehalte van het slib en de filterkoek

De ontwaterbaarheid van slib door drainage hangt sterk af van de samenstelling van het slib.

Onthardingsslib is relatief zeer goed draineerbaar tot hoge droge stofgehalten. De specifieke filtratieweerstand ligt bij onderdrukfiltratie veelal tussen 10^{11} en 10^{12} m/kg.

Bij lage Ca/Mg-verhouding en bij de aanwezigheid van gelatineuze deeltjes is de draineerbaarheid minder goed. Onthardingsslib is thixotropisch van aard hetgeen wil zeggen dat door agitatie het slib kan overgaan in een meer vloeibare vorm.

Coagulateslib is over het algemeen thixotropisch en gelatineus. Slib afkomstig van water

met een hoog zwevend stofgehalte is minder gelatineus en laat zich beter ontwateren dan slib afkomstig van water met een hoge kleur en een laag zwevende stofgehalte. De specifieke filtratieweerstand van coagulateslib ligt bij onderdrukfiltratie veelal tussen 10^1 tot 10^{14} m/kg met voor ijzerslib lagere waarden dan voor aluminiumslib. De samendrukbaarheid van aluminiumslib ligt bij 0,5 à 0,6 hetgeen betekent dat bij drainage gevaar voor verstopping bestaat. De samendrukbaarheid van ijzerslib ligt in de buurt van 1,0.

De draineerbaarheid van slib bestaande uit onthardings- en coagulateslib ligt tussen die van beide afzonderlijke slibsoorten.

Ook de draineerbaarheid van spoelwaterslib laat zich min of meer voorspellen uit het hydroxiden- en zwevende stofgehalte van het gefiltreerde water.

3.2 Oppervlakte-afvoer

De oppervlakte-afvoer is moeilijk te kwantificeren. De grootte van de afvoer hangt af van de bezinking, samendrukking van het slib en de methode van afvoeren.

Bezinking en samendrukking van het slib kunnen bij slib met een droge stofgehalte tot enkele procenten een aanzienlijk grote hoeveelheid water van het slib afscheiden. Bij hogere dro-

ge stofgehalten zal deze hoeveelheid kleiner zijn.

Onder invloed van de zwaartekracht treedt in het slib consolidatie op. Het in de vlokken aanwezige vrije water zal omhoog stromen. Wanneer de door rotting gevormde gasbelletjes voldoende groot zijn om uit het slib op te stijgen, wordt door kanaalvorming de opwaartse waterstroom vereenvoudigd.

De mate van consolidatie is afhankelijk van het soort slib en de opvulhoogte. Bij grote consolidatie wordt de doorlatendheid van het slib kleiner, zodat de drainage moeizamer verloopt. Dit proces is niet in de formule voor de drainagetijd (vergl. 21) verdisconteerd. Daarin is verondersteld, dat de stromingsweerstand rechtevenredig is met het filtraatvolume, en dat er geen slibtransport onder invloed van de zwaartekracht plaatsvindt.

Voorbeelden van consolidatie zijn weergegeven in figuren 9 en 10 (lit. 12).

Figuur 9 laat zien dat bij verstopping van de bodem de oppervlakte-afvoer niet in staat is de drainage geheel te vervangen, hoewel door oppervlakte-afvoer wel een aanzienlijke hoeveelheid water kan worden afgevoerd. Bij de opvulhoogte van 1,2 m bedraagt het verschil in slibkoekhoogte 0,13 m hetgeen bij een verdampingssnelheid van 700 mm/jaar een verlenging van de ontwateringstijd betekent van 68 dagen.

Dit geeft het belang aan van een goede drainage tot een zo hoog mogelijk droge stofgehalte. Bij een niet te dichte slibkoek en een doorlatende bodem kan het bovenstaande water ook door drainage verdwijnen (figuur 9a). Bij een te dichte slibkoek is dit niet het geval (figuur 10), zodat dan oppervlakte-afvoer onontbeerlijk is voor een snelle ontwatering.

Oppervlakte-afvoer kan plaatsvinden met behulp van een overstort of sifon, of door drainage aan de zijwanden. Bij de eerste twee methoden is de snelheid van de afvoer regelbaar via instelling van de overstorthoogte. Bij de laatste methode is de afvoersnelheid afhankelijk van de infiltratiecapaciteit van de wand, die door verstopping verkleind kan zijn.

De afvoersnelheid heeft invloed op de grootte van de oppervlakte-afvoer. Als de afvoersnelheid laag is, kunnen verdamping en drainage via de bodem een gedeelte van het water afvoeren.

Oppervlakte-afvoer door drainage aan de zijwanden heeft het voordeel, dat al het bovenstaande water te verwijderen is, terwijl bij een overstort of een sifon een gedeelte van het water, om het meevoeren van slib te voorkomen, niet kan worden afgevoerd.

Bij toepassing van een overstort of sifon kan de zijwand van het droogbed uitgevoerd worden in beton of metselwerk. Bij drainage via de

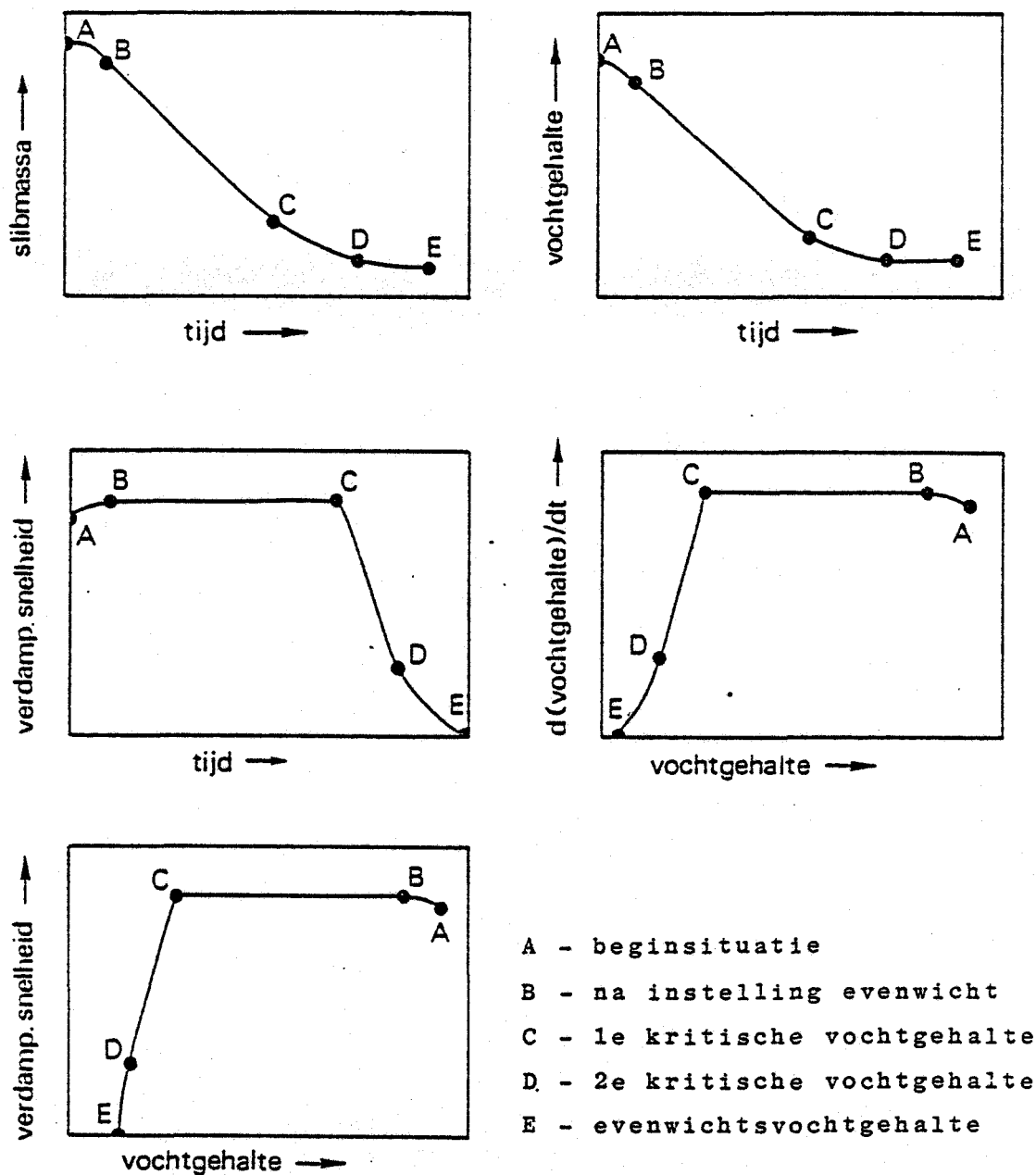
zijwanden zal doorgaans de wand bestaan uit zandwallen hetgeen een talud met zich meebrengt, waardoor de ruiming van het slib bemoeilijkt kan worden.

3.3 Verdamping

De verdampingssnelheid van het water uit het slib blijkt ongeveer gelijk te zijn aan de verdampingssnelheid aan een open wateroppervlak, zolang er zich voldoende water in het slib bevindt om het sliboppervlak geheel nat te houden. Gedurende deze periode vindt ook de drainage plaats.

Nebiker (lit. 17) onderscheidt drie verschillende verdampingsperioden. Na de periode met de constante verdampingssnelheid neemt vanaf het eerste kritische vochtgehalte de snelheid lineair af, tot het tweede kritische vochtgehalte. Hierna neemt de snelheid minder snel af tot nul. Dan is het evenwichtsvochtgehalte bereikt.

Figuur 14 geeft de karakteristieke verdampingscurven weer.



Figuur 14 - Karakteristieke verbanden bij verdamping van slib onder gelijkblijvende omstandigheden

Omdat het vochtgehalte gedefinieerd is als:

$$U = 100 \frac{m_w}{m_{ds}} \quad (22)$$

waarin: U = vochtgehalte (%)

m_w = massa water (kg)

m_{ds} = massa droge stof (kg)

geldt voor de verdampingssnelheid I :

$$I = - \frac{d_{mw}}{A dt} = - \frac{m_{ds}}{100A} \frac{dU}{dt} \quad (23)$$

Integreren over de tijd, waarin het vochtgehalte daalt van naar U_t , geeft:

$$t = \frac{m_{ds}}{100A} \int_{U_t}^{U_0} \frac{U_0 dU}{I} \quad (24)$$

De verdamping heeft een constante snelheid I_c zolang het vochtgehalte U_t groter is dan het eerste kritische vochtgehalte U_{cr} , zodat:

$$t_{vc} = \frac{m_{ds}}{100A I_c} (U_0 - U_t) \quad (25)$$

waarin: t_{vc} = verdampingstijd van U_0 tot $U_t \geq U_{cr}$ (s).

Als de afnemende verdampingssnelheid lineair wordt verondersteld met het vochtgehalte tot aan het evenwichtsvochtgehalte U_e , dan is voor $U_{cr} \geq U_t \geq U_e$:

$$I = I_c \frac{U_t - U_e}{U_{cr} - U_e} \quad (26)$$

Substitutie van vergl. 26 in vergl. 24 en integreren tot de bovengrens U_{cr} , geeft:

$$t_{va} = \frac{m_{ds}(U_{cr} - U_e)}{AI_c 100} \ln \left(\frac{U_{cr} - U_e}{U_t - U_e} \right) \quad (27)$$

waarin t_{va} = verdampingstijd van U_{cr} tot U_t (s).

Nebiker (lit. 17) vindt empirisch als formule voor het eerste kritische vochtgehalte van afvalwaterslib:

$$U_{cr} = 30000 \left(\frac{I_c m_{ds}}{A} \right)^{0,5} \quad (28)$$

waarin: U_{cr} = eerste kritische vochtgehalte (%)

m_{ds}/A = droge stofmassa per oppervlakte (kg/m^2)

I_c = constante verdampingsnelheid (kg/m^2s)

Lo (lit. 18) geeft als formule voor het eerste kritische vochtgehalte van coagulatieslib:

$$U_{cr} = 6 \times 10^5 S_o^{0,32} H_o^{0,2} I_c^{0,5} \quad (29)$$

waarin: H_o = opvulhoogte (m).

Onderstaande tabel geeft de range aan waarbinnen het eerste kritische vochtgehalte zich volgens beide formules bevindt:

I_c (kg/m ² s)	H_0 (m)	S_0 (%)	Nebiker		Lo	
			U_{cr} (%)	S_{cr} (%)	U_{cr} (%)	S_{cr} (%)
$2,3 \times 10^{-6}$ (=0,2 mm/dag)	0,1	0,5	32	76	460	18
$46,4 \times 10^{-6}$ (=4,0 mm/dag)	1,0	6,0	1580	5,9	7230	1,4

S_{cr} = eerste kritische droge stofgehalte (%) (zie verg. 34)

Volgens Clark (lit. 10) en een WRA-onderzoek op kleine schaal (lit. 19) kan een steekvast slib worden verkregen tijdens de periode met constante verdampingssnelheid. Dit zou betekenen dat voor het verkrijgen van een steekvast slib de verdampingstijd per opgebracht droge stofmassa per m² onafhankelijk is van de opvulhoogte en uit oogpunt van de verdampingstijd geen voorkeur voor bepaalde opvulhoogten bestaat.

Omdat vanaf het tweede kritische vochtgehalte de verandering van de verdampingssnelheid kleiner wordt, kan het verband tussen vochtgehalte en verdampingssnelheid na het eerste kritische vochtgehalte tot het evenwichtsvochtgehalte ook benaderd worden door een parabool. Het evenwichtsvochtgehalte is vol-

gens Nebiker (lit. 17) gemiddeld 8 %, zodat het verwaarloosbaar is ten opzichte van het eerste kritische vochtgehalte, dat volgens Clark (lit. 10) ligt tussen 270 en 840 %. Het verband tussen vochtgehalte en verdampings-snelheid kan dan weergegeven worden door:

$$I^2 = 2hU \quad (30)$$

Daar voor $U=U_{cr}$ geldt dat $I=I_c$, is:

$$2h = \frac{I_c^2}{U_{cr}} \quad (31)$$

zodat:

$$I = I_c \sqrt{\frac{U}{U_{cr}}} \quad (32)$$

Substitutie van vergl. 32 in vergl. 24 en integreren van U_t tot U_{cr} geeft:

$$t_{va} = \frac{m_{ds}}{100AI_c} \left(2U_{cr} - 2\sqrt{U_{cr}U_t} \right) \quad (33)$$

De totaal benodigde tijd voor de verdamping tot een vochtgehalte U_t U_{cr} wordt verkregen door in vergl. 25 te substitueren $U_t=U_{cr}$ en daarna vergl. 25 te sommeren met vergl. 27 of 33.

Clark (lit. 10) vindt uit experimenten met drinkwaterslib, dat de benadering door een parabool een hogere correlatiecoëfficiënt geeft, zodat vergl. 33 de verdampingstijd van U_{cr}

tot U_t beter weergeeft.

De grootheden vochtgehalte en verdampingssnelheid, die hierboven gebruikt zijn, zijn te herleiden tot de meer gangbare grootheden droge stofgehalte en mm verdampt water per dag. Door substitutie van vergl. 14 in vergl. 22 en omgekeerd worden de volgende betrekkingen gevonden tussen het vochtgehalte U (%) en het droge stofgehalte S (%):

$$S = \frac{10000}{U+100} \quad \text{en} \quad U = \frac{10000}{S} - 100 \quad (34)$$

De betrekkingen tussen de verdampingssnelheid E_0 (mm/dag) en de verdampingssnelheid I_c (kg/m²s) zijn, omdat 1 mm = 1 kg/m² ($\rho = 1000$ kg/m³):

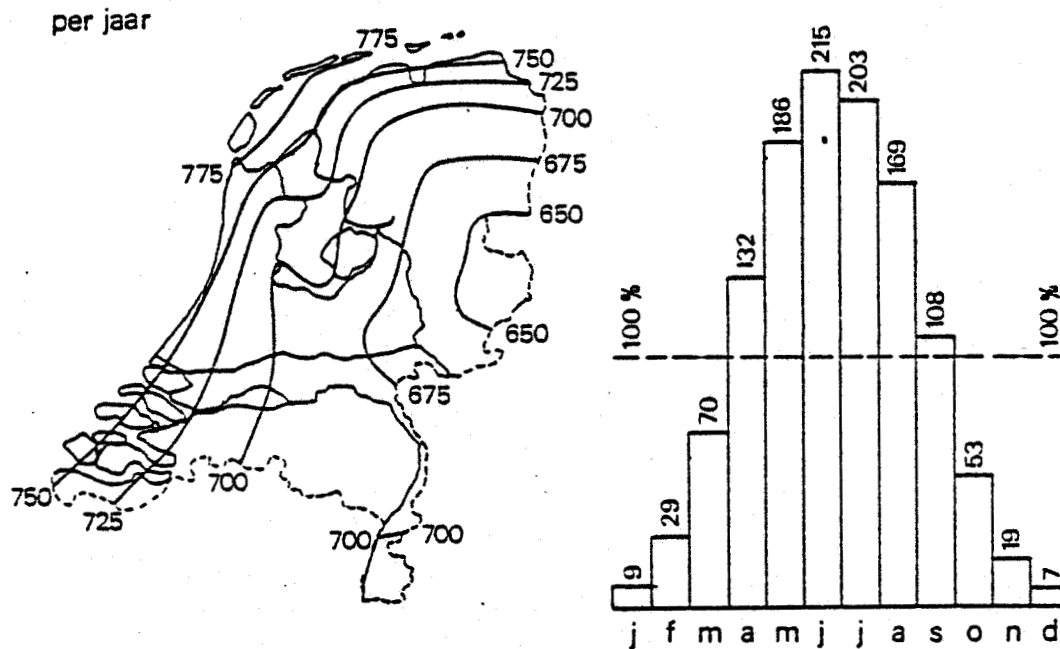
$$I_c = 1,16 \times 10^{-5} E_0 \quad \text{en} \quad E_0 = 0,864 \times 10^5 I_c \quad (35)$$

De constante verdampingssnelheid ligt tussen 90 en 105 % van de verdampingssnelheid aan een open wateroppervlak (lit. 17 en 18). Door stralingsabsorptie van het donkere slib kan de verdampingssnelheid groter zijn dan die aan een open wateroppervlak, maar drijvende slibdeeltjes kunnen de verdamping vertragen.

De verdampingssnelheid aan een open wateroppervlak kan berekend worden met de formule van Penman (lit. 20) en is afhankelijk van de zoninstraling, de luchttemperatuur, de relatieve vochtigheid en de windsnelheid. De verdampings-

snelheid volgens Penman wordt gepubliceerd in het "Maandelijks Overzicht der Weersgesteldheid in Nederland" van het KNMI (lit. 21).

In Nederland bedraagt de verdamping, berekend met de formule van Penman, gemiddeld 702 mm per jaar (periode 1931-1960). De verdamping kan van plaats tot plaats en met de tijd variëren (figuur 15, lit. 21 en 22).



Figuur 15 - De gemiddelde jaarlijkse verdamping in mm in Nederland volgens Penman en de fluctuatie rond dit gemiddelde over het jaar

Figuur 15 laat zien dat in de maanden mei t/m augustus ongeveer 65 % van de jaarlijkse verdamping plaatsvindt en in april t/m september 85 %. In de maanden november t/m februari is de totale verdamping slechts 5 % van de jaarlijkse verdamping.

Volgens Gauntlett en Packham (lit. 19) ligt, voor de ontwatering tot een steekvast slib de verdampingstijd enkel in de vier zomermaanden in dezelfde orde van grootte als de drainage-tijd. In de andere maanden is de verdampings-tijd groter, ondanks dat door drainage meer water wordt afgevoerd.

Bij grotere opvulhoogten neemt de verdampings-tijd onevenredig toe.

Wanneer het filtermedium uit fijn zand, bijvoorbeeld bouwzand, bestaat kan de ontwatering langzamer verlopen indien tijdens de verdampingsfase capillair water uit het zand het slib vochtig houdt.

Novak en Montgomery (lit. 1) vinden een afwijkend verdampingspatroon.

De verdamping zou in twee fasen plaatsvinden. In de eerste fase is de verdampingssnelheid laag en constant. De verdampingssnelheid is in deze fase ongeveer 50 % van de verdampings-snelheid aan open water. In de tweede fase wordt de verdampingssnelheid aan open water

benaderd. Een verklaring van dit verdampingspatroon wordt niet gegeven.

Indien het slib na drainage nog niet steekvast is, zal verdamping de ontwatering moeten completeren. De verdampingstijd voor het verkrijgen van een steekvast slib kan men berekenen door te veronderstellen dat het te verdampen water in beide fasen voor de helft verdwijnt (lit. 14).

Scheurvorming zou de verdampingssnelheid niet noemenswaardig beïnvloeden en de conclusie van Neubauer (lit. 23), dat scheurvorming de tweede fase veroorzaakt, wordt tegengesproken. Het uitdrogen van de bovenlaag werkt namelijk de invloed van het grotere oppervlak na scheuren tegen.

Bij een te grote hoeveelheid opgebracht droge stof per oppervlakte-eenheid ontstaat na drainage een dikke slibkoek. Tijdens de verdampingsfase zijn in deze dikke slibkoek drie lagen te onderscheiden namelijk een onderlaag, die door compressie goed is ontwaterd, een dunne bovenlaag die door verdamping goed is ontwaterd en een relatief natte tussenlaag. Doordat de bovenlaag als het ware drijft op de tussenlaag ontwikkelt zich bij het inklinken van de bovenlaag geen fijn scheurpatroon maar ontstaan weinig brede en ondiepe scheuren.

De belemmering van de verdamping door de droge bovenlaag wordt dan onvoldoende gecompenseerd door een groter oppervlak. Dit heeft tot gevolg dat de verdampingstijd wordt verlengd (lit. 12).

3.4 Neerslag

De invloed van neerslag is eveneens een niet eenvoudig te benaderen aspect van de ontwatering op slibdroogbedden. Dit niet alleen omdat neerslag een stochastische variabele is, maar ook omdat de invloed van neerslag gedurende de ontwateringstijd niet constant is.

Lo (lit. 18) probeert de invloed van neerslag in een model te beschrijven om de slibontwatering in een slibdroogbed zonder zijdelingse drainage te simuleren. Hij onderscheidt neerslag, die valt voordat het eerste kritische vochtgehalte bereikt is en neerslag die daarna valt.

Vóór het eerste kritische vochtgehalte wordt de invloed van de neerslag verdisconteerd in het model voor drainage, omdat gedurende deze periode zowel drainage als verdamping plaatsvindt, waarbij drainage het water veel sneller verwijdert.

Het model voor drainage dient daarom te worden uitgebreid, waarvoor twee mogelijkheden openstaan. Ten eerste het mengingmodel, waarin er-

van uitgegaan wordt, dat de neerslag na inval zich direct volledig mengt met het slib. Ten tweede het bovenwatermodel, waarin men veronderstelt, dat de neerslag een waterlaag op het slib vormt en daarna door drainage wordt afgevoerd. De werkelijkheid ligt tussen beide modellen. Lo vond dat de resultaten van deze modellen minder dan 5 % van elkaar verschillen. Uitgaande van het mengingmodel kan de drainage-tijd bij het optreden van neerslag benaderd worden door in vergl. 21 de totale neerslag tijdens de drainagefase te verdisconteren in H_0 , S_0 en p .

Bij het eerste kritische vochtgehalte stopt volgens Lo de drainage en ontstaan in de meeste slibsoorten scheuren. Een gedeelte van de neerslag wordt nu opgenomen door het slib, terwijl de rest via de scheuren in de bodem verdwijnt of op het slib blijft liggen en later verdampt. Uit laboratoriumproeven bleek voor een droge stofgehalte tussen 15 en 20 %, het vochtgehalte na opname van neerslag in Al-slib berekend kan worden uit:

$$U_n = 3,44 U_v^{0,807} N_d^{0,0095} \quad (36)$$

waarin: U_n = vochtgehalte na neerslag (%)

U_v = vochtgehalte voor neerslag (%)

N_d = totale neerslag van één dag (mm)

Omdat uit vergl. 22 volgt dat voor de toename van de waterhoeveelheid Δm_w geldt:

$$\Delta m_w = \frac{m_{ds}}{100} (U_n - U_v) \quad (37)$$

is vergl. 36 te herschrijven als:

$$\Delta m_w = \frac{m_{ds}}{100} (3,44 U_v^{0,807} N_d^{0,0095} - U_n) \quad (38)$$

De door het slib opgenomen fractie van de neerslag is $\Delta m_w / N_d \times A$. Bijgaande tabel geeft deze fractie aan voor verschillende neerslag en vochtgehalten voor neerslag.

	$U_v = 567 \%$ $S = 15 \%$	$U_v = 471 \%$ $S = 17,5 \%$	$U_v = 400 \%$ $S = 20 \%$	
$N_d = 1 \text{ mm}$	0,067	0,230	0,329	x $\frac{m_{ds}}{A}$
$N_d = 10 \text{ mm}$	0,019	0,034	0,043	x $\frac{m_{ds}}{A}$
$N_d = 20 \text{ mm}$	0,012	0,019	0,023	x $\frac{m_{ds}}{A}$

De tabel laat zien dat de opgenomen fractie lineair afhankelijk is van de droge stoflast m_{ds}/A en dat het drogere slib, door een meer poreuze structuur, een grotere fractie opneemt.

Uit de tabel is tevens op te maken dat bij hogere droge stofgehalten de opgenomen waterhoeveelheid nagenoeg onafhankelijk is van de neerslaghoeveelheid en dat vergl. 36 enkel geldt voor een droge stoflast $< 1/0,329 = 3 \text{ kg/m}^2$ (opgenomen fractie < 1).

Walski (lit. 24) combineert de invloed van de neerslag met de verdamping. Hij introduceert hiervoor het begrip effectieve verdampings-snelheid. Dit is de verdampingssnelheid van het water uit het slib verminderd met de toename van de hoeveelheid water in het slib veroorzaakt door neerslag.

De netto hoeveelheid water, die verdampt moet worden, gedeeld door de effectieve verdampings-snelheid geeft de verdampingstijd:

$$t_v = 8,64 \times 10^7 \frac{H_0 S_0}{a E_0 - d N_0} \left(\frac{1}{S_f} - \frac{1}{S_v} \right) \quad (39)$$

waarin: t_v = verdampingstijd (s)

H_0 = opvulhoogte (m)

S_0 = initieel droge stofgehalte (%)

S_f = droge stofgehalte na drainage (%)

S_v = droge stofgehalte na verdamping (%)

E_0 = verdampingssnelheid aan open water (mm/dag)

a = correctiefactor voor verdamping uit slib (-)

N_0 = neerslag (mm/dag)

d = door het slib opgenomen fractie van de neerslag (-)

Water Pollution Research 1965 (lit. 25) vermeldt dat, voor de ontwatering van uiteenlopende soorten slib tot een steekvast slib, aangehouden kan worden: $a = 0,75$ en $d = 0,57$. Voor coagulatie-ijzerslib werd, bij een slib-

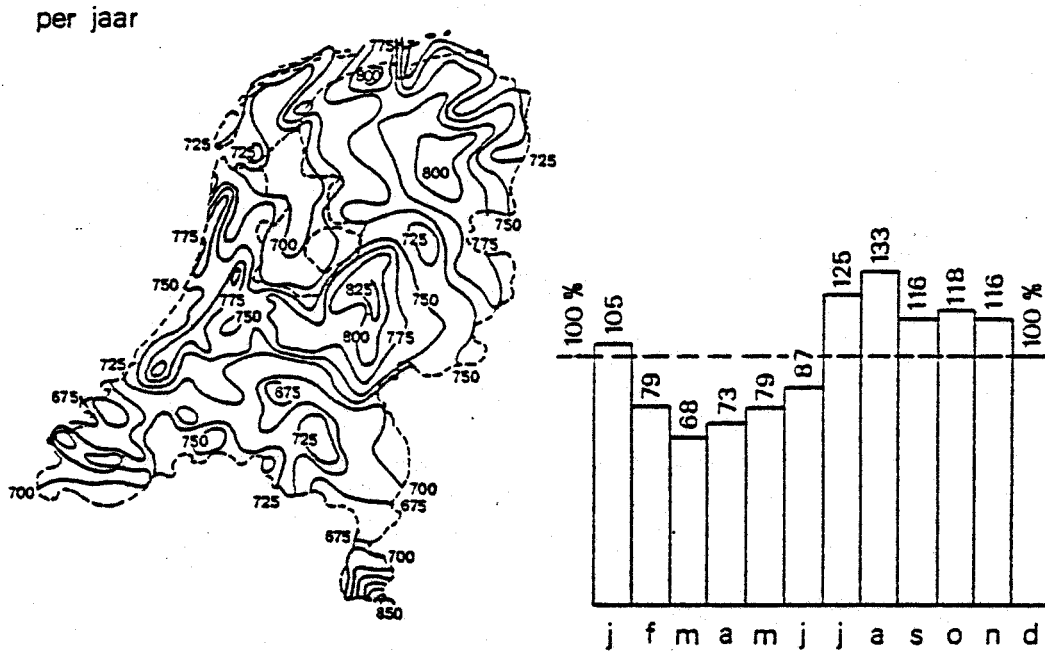
koekhoogte na drainage kleiner dan 0,10 m tot zeer vergaande ontwatering gevonden: $a = 1,2$ en $d = 0,2$ (lit. 12).

Vergl. 39 komt overeen met vergl. 25 met dien verstande dat de constante verdampingssnelheid nader is gekwantificeerd en dat in plaats van vochtgehalten droge stofgehalte worden gebruikt.

In Nederland bedraagt de gemiddelde neerslag 742 mm per jaar (periode 1931-1960).

De neerslag is veel gelijkmatiger over het jaar verdeeld dan de verdamping. Gedurende de eerste 6 maanden van het jaar valt er over het algemeen iets minder neerslag, 40 % van het gemiddelde jaartotaal (figuur 16, lit. 21 en 22).

De actuele maandcijfers van de neerslag kunnen aanzienlijk afwijken van de gemiddelde maandcijfers. Dit in tegenstelling tot de actuele maandcijfers van de verdamping die doorgaans in de buurt van het gemiddelde liggen.



Figuur 16

De gemiddelde jaarlijkse neerslag in mm in Nederland en de fluctuatie rond dit gemiddelde over het jaar

Volgens Graveland (lit. 26) verlengt neerslag, die valt nadat scheurvorming is opgetreden de ontwateringstijd niet merkbaar, omdat de neerslag via de scheuren snel de bodem kan bereiken.

De neerslag die valt voordat scheurvorming is opgetreden, zal door drainage, verdamping en oppervlakte-afvoer weer moeten verdwijnen. Hoewel door verdunning van het slib neerslag de drainagesnelheid verhoogt, wordt de totale drainagetijd verlengd. Neerslag, die gedurende de periode van oppervlakte-afvoer valt, wordt met deze afvoer verwijderd.

Na de periode van oppervlakte-afvoer kan door verdunning van de bovenste sliblaag een gedeelte van de neerslag eventueel nog via drainage aan de zijwanden worden afgevoerd.

Een overkapping kan de eventuele verlenging van de ontwateringstijd door neerslag vermijden. Om de verdamping niet nadelig te beïnvloeden moet een dergelijke overkapping lichtdoorlatend zijn.

Gauntlett en Packham (lit. 19) vinden in slibdroogbedden zonder oppervlakte-afvoer dat gedurende de vier zomermaanden een lichtdoorlatende overkapping geen verkorting van de ontwateringstijd geeft, maar dat in de overige maanden de ontwateringstijd door een overkapping met 20 % bekort wordt. Bij lage opvulhoogten heeft door de aanwezigheid van meer tot de bodem reikende scheuren neerslag weinig nadelige invloed.

Een overkapping kan de verwijdering van het gedroogde slib belemmeren, en wordt dan ook vaak verrijdbaar gemaakt. Na scheurvorming

in het slib is het mogelijk een verrijdbare overkapping boven een ander bed te rijden, zodat er minder overkappingen nodig zijn. Tevens verloopt de verdamping dan beter door de vrije inwerking van wind en zonnestraling.

3.5 Overige invloeden

Naast de eerdergenoemde processen die de slibontwatering op droogbedden beïnvloeden, spelen ook vorst, gasontwikkeling en algengroei een rol.

Bij vorst treedt in het slib een vriesdooiproces op. Hierbij worden de slibvlokken door aangroeiing van de ijskristallen ontwaterd en samengeperst tot fijne, harde korrels. Nadat het ijs gesmolten is, kan het water door drainage of oppervlakteafvoer verdwijnen.

Indien de vorst over de volle hoogte doordringt, kan het vrijgekomen water door drainage snel en volledig afgevoerd worden en is een verhoging van het droge stofgehalte tot boven 50 % mogelijk. Bij een niet volledige bevriezing belemmert de onderste sliblaag de drainage en is het effect van vorst aanzienlijk geringer, doordat oppervlakte-afvoer minder effectief is dan drainage (lit. 12).

Het effect van gasontwikkeling is reeds besproken bij de drainage en de oppervlakte-

afvoer. De mate waarin gasontwikkeling optreedt hangt af van de hoeveelheid en aard van de organische stof in het slib en de temperatuur.

Bij een aanzienlijke gasontwikkeling kunnen stankbezwaren optreden.

Bij de ontwatering van een algenrijk slib kan in het bovenstaande water algenbloei plaatsvinden. Wanneer het bovenstaande water door drainage wordt afgevoerd, vormt zich op de slibkoek een zeer slecht doorlatende algenlaag.

Deze algenlaag voorkomt de drainage van neerslag, tenzij scheurvorming de laag doorbreekt. Bij grote slibkoekhoogten en in perioden met veel neerslag kan de invloed van een dergelijke laag belangrijk zijn (lit. 12).

4. DIMENSIONERING VAN SLIBDROOGBEDDEN

De in de praktijk toegepaste methoden voor de dimensionering van slibdroogbedden variëren van het hanteren van simpele vuistregels tot uitgebreid experimenteel onderzoek.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht van algemeen gangbare dimensioneringsparameters gegeven. Daarnaast wordt een procedure gegeven waarmee slibdroogbedden te dimensioneren zijn, uitgaande van klimatologische omstandigheden en enige eigenschappen van het te ontwateren slib. Eventueel zal voor toepassing van deze procedure uitgebreid experimenteel onderzoek noodzakelijk zijn.

4.1 Dimensioneringsparameters

Een in de afvalwaterzuivering veel gebruikte dimensioneringsparameter is het benodigd bedoppervlak per inwonerequivalent. Het gebruik van een dergelijke parameter is mogelijk doordat de hoedanigheid van het slib na gisting doorgaans goed voorspelbaar is en bij de afvalwaterzuivering altijd een opvulhoogte van 20-30 cm wordt aangehouden.

Een meer algemeen toepasbare parameter is de bruto bedbelasting, uitgedrukt in kilogrammen droge stof per m² per jaar. Voor afvalwater-

slib worden waarden genoemd, afhankelijk van het soort slib, van 50 - 120 kg/m².j voor open bedden en van 60 - 200 kg/m².j voor overdekte bedden (lit. 27).

Swanwick, Lussignea en Baskerville (lit. 28) geven voor uitgegist afvalwaterslib een verband aan tussen bruto bedbelasting en specifieke filtratieweerstand bij 49,0 kPa. De bruto bedbelasting varieert van 54 kg/m².j (bij 40 x 10¹³ m/kg) tot 217 kg/m².j (bij 2 x 10¹³ m/kg).

Haseltine (lit. 29) vindt, eveneens voor afvalwaterslib, een lineaire relatie tussen bruto bedbelasting en het droge stofgehalte van het opgebrachte slib: $BBB = 57 S_o - 104 k$

In Technical Report 61 van de WRC (lit. 30) wordt voor drinkwaterslib een bruto bedbelasting van 50 kg/m².j aangehouden en voor afvalwaterslib 81 kg/m².j.

Uit een onderzoek op kleine schaal met wedge-wirebedden concludeerde Sankey (lit. 31) dat Al-slib met een droge stofgehalte van 2 % in een 21-daagse cyclus ontwaterd kan worden tot 25 % droge stof. Hiervoor zouden de bedden gedurende de eerste helft van de ontwaterings-tijd een lichtdoorlatende overkapping moeten hebben en opgevuld mogen worden tot 30 cm. De overeenkomstige bruto bedbelasting bedraagt 104 kg/m².j.

Bij bekende bruto bedbelasting is het benodigd slibdroogbedoppervlak te berekenen door de

jaarlijkse droge stofproduktie te delen door de bruto bedbelasting.

Een variant van de bruto bedbelasting is de parameter $\text{kg Fe/m}^2\text{.j}$.

Een Oostduitse ontwerpnorm (lit. 32) geeft een waarde van $55 \text{ kg Fe/m}^2\text{.j}$ voor de ontwatering van slib vrijgekomen bij de ontijzering van grondwater.

De bruto bedbelasting hangt af van het droge stofgehalte bij slibruiming. Doorgaans wordt een bruto bedbelasting gegeven voor de ontwatering tot een steekvast slib. Via de netto bedbelasting, gedefinieerd als het produkt van de bruto bedbelasting en de droge stoffractie in het slib bij ruiming, is het droge stofgehalte na ontwatering in de dimensionering te betrekken.

Volgens Haseltine (lit. 29) is voor afvalwaterslib de netto bedbelasting lineair afhankelijk van het droge stofgehalte van het opgebrachte slib: $\text{NBB} = 21 S_0 - 30 \text{ kg/m}^2\text{.j}$.

Indien de netto bedbelasting bekend is, is de bruto bedbelasting te berekenen door de netto bedbelasting te delen door de gewenste droge stoffractie in het slib bij ruiming.

4.2 Dimensioneringsprocedure

Gezien de grote verschillen in klimatologische

omstandigheden en in de ontwaterbaarheid van slib, lenen bovengenoemde parameters zich minder goed voor een uiteindelijke dimensionering. Onderstaande dimensioneringsmethode ondervangt deze bezwaren goeddeels. De te volgen procedure is als volgt:

1. Breng in een doorzichtige filterbuis het gewenste drainagemedium aan (figuur 17).
2. Bepaal het droge stofgehalte van het slib (S_0 in %).
3. Vul de buis met het slib tot een zodanige opvulhoogte (H_0 in meter) dat na drainage de slibkoekhoogte 8 à 10 cm zal zijn. Bij een dergelijke slibkoekhoogte ontstaan in korte tijd tot de bodem reikende scheuren.
4. Bepaal de tijd (t_d in dagen) waarin het slib geheel is gedraineerd c.q. samenge-drukt.
5. Verwijder eventueel het bovenstaande water en bepaal het droge stofgehalte na drainage (S_f in %).
6. Laat de slibkoek op een schaal door verdamping verder ontwateren totdat het slib de gewenste hoedanigheid heeft, bijvoorbeeld steekvast of kruimelig.
7. Bepaal het droge stofgehalte van het ontwa-terde slib (S_v in %).
8. Bereken de verdampingstijd (t_v in dagen)

(zie vergl. 39):

$$t_v = 365 \frac{1000 H_0 S_0}{1,2 E_0 - 0,2 N_0} \left(\frac{1}{S_f} - \frac{1}{S_v} \right)$$

waarin: E_o = verdampingssnelheid aan
open water (mm/j)

N_o = neerslag (mm/j)

9. Bereken de bruto bedbelasting (BBB in kg/m².j):

$$BBB = 365 \frac{10 H_o S_o}{t_d + t_v + t_r}$$

waarin: t_r = ruimings- en voorbereidings-
tijd per opvulling (dagen)

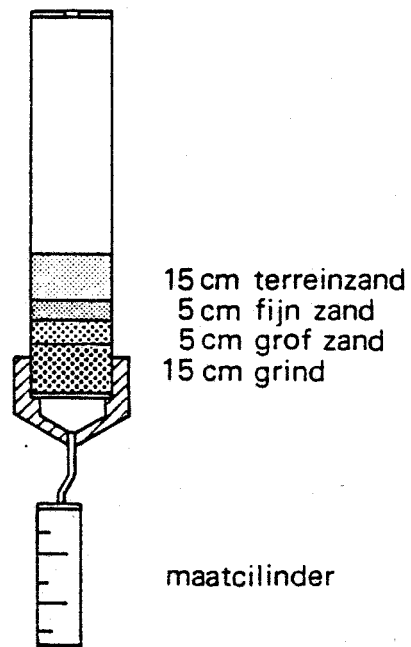
Indien ontwaterd wordt tot een kruimelig en goed doorlatend slib, kan ruiming achterwege blijven en omvat t_r enkel de voorbereidingstijd (bijvoorbeeld onkruidverwijdering).

De ontwatering vangt direct nadat slib is opgebracht aan zodat de opvultijd niet in de ontwateringstijd hoeft te worden verdisconteerd.

10. Bereken het benodigde bedoppervlak (A in m²):

$$A = \frac{DSP}{BBB}$$

waarin: DSP = droge stofproduktie (kg/j)



Figuur 17 - Voorbeeld van een opstelling voor de drainageproef

Voor een globale dimensionering kan in plaats van bovenstaande procedure volstaan worden met de bepaling van de specifieke filtratieweerstand en een schatting van het vereiste droge stofgehalte na drainage.

Het droge stofgehalte na drainage S_f volgt uit figuur 12 en de opvulhoogte H_0 uit vergl. 18 met $H_d = 0,10$ m.

De drainagetijd t_d is nu met behulp van

figuur 8 te berekenen.

In de berekening van het benodigd bedoppervlak is een over het jaar constante ontwaterings-snelheid verondersteld hetgeen door de variërende effectieve verdampingssnelheid niet met de werkelijkheid in overeenstemming is.

Om toch met het berekende bedoppervlak te kunnen volstaan zal berging van het te ontwateren slib noodzakelijk zijn. Deze berging moet in staat zijn de continue slibproductie af te stemmen op de variërende ontwateringscapaciteit.

Slib afkomstig van snelfilters wordt doorgaans in spoelwatervijvers ingedikt. Het slibbergend vermogen van dergelijke vijvers is veelal toereikend voor de aanpassing aan de ontwateringscapaciteit.

Indien geen slibberging aanwezig is, zal het benodigde bedoppervlak groter zijn dan het onder punt 10 berekende.

In de bijlage worden twee voorbeelden gegeven van de dimensionering van slibdroogbedden.

Gauntlett en Packham (lit. 19) gaan, analoog aan bovenstaande procedure, uit van 430 mm/j als verdamping aan open water. Indien de effectieve verdampingssnelheid hieraan gelijk is, kan op een droogbed 17 keer per jaar het droge stofgehalte van een 5 cm dikke slibkoek worden verdubbeld.

Uitgaande van een droge stofgehalte na drainage van 8 % en bij verwaarlozing van de drainage-tijd en de ruimings- en voorbereidingstijd bedraagt de maximale bruto bedbelasting 70 kg/m².j. Gezien de vele verwaarlozingen zou voor toepassing in de praktijk deze bruto bedbelasting gedeeld moeten worden door 2,7 of, in geval van conditionering door polyelektrolieten, door 1,3.

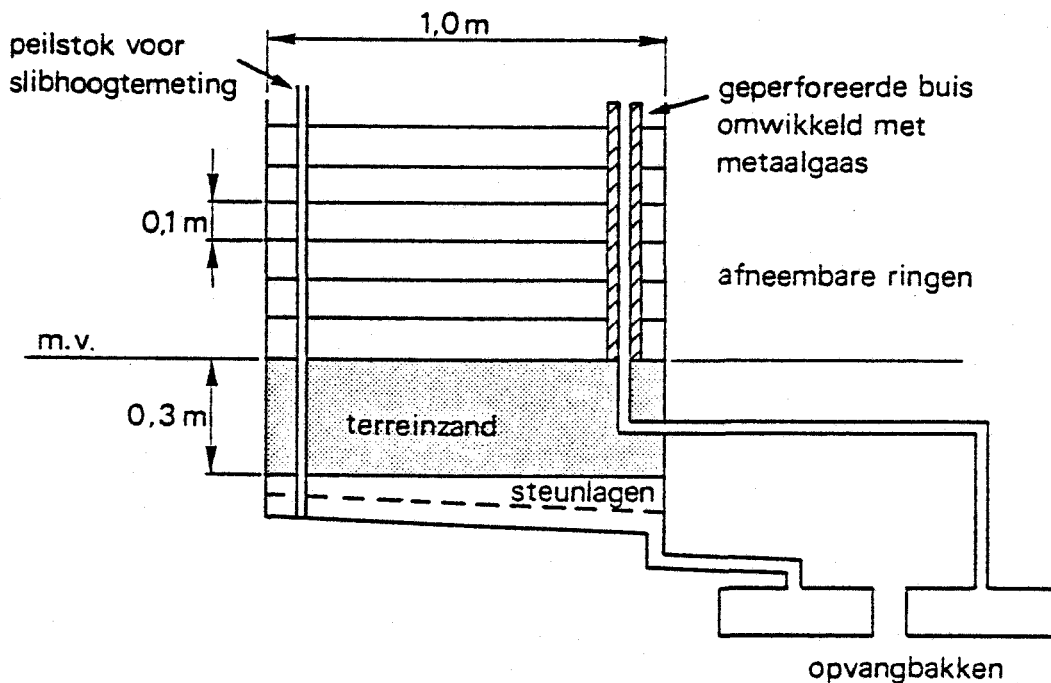
4.3 Experimenteel onderzoek

Voornoemde dimensioneringsprocedure gaat uit van een effectieve verdampingssnelheid van $1,2 E_0 - 0,2 N_0$ bij een slibkoekhoogte na drainage van 8 à 10 cm. De effectieve verdampingssnelheid hangt echter af van het scheurpatroon en de doorlatendheid van het slib voor neerslag, die vooral worden beïnvloed door de opvulhoogte.

Om redenen van bedrijfsvoering kan het wenselijk zijn een hogere opvulhoogte toe te passen. In dat geval verdient het aanbeveling de effectieve verdampingssnelheid voor de gewenste opvulhoogte experimenteel te bepalen. Ook voor bedrijven met een grote droge stofproductie kan het zinvol zijn de effectieve verdampingssnelheid onder de specifieke bedrijfsomstandigheden te bepalen.

Figuur 18 (lit. 12) geeft een voorbeeld van een opstelling voor de bepaling van de effec-

tieve verdampingssnelheid. De afneembare ringen maken een goede inwerking van zon en wind tijdens het gehele ontwateringsproces mogelijk. Door de opvangconstructie kan zowel het effect van drainage en oppervlakte-afvoer als mede de gedraineerde fractie van de neerslag bepaald worden. Simultaan aan het ontwateringsproces dienen de verdamping aan open water en de neerslag gemeten te worden. Voor de dimensionering dient men voor deze grootheden de langjarige gemiddelden van figuur 15 en 16 aan te houden.



Figuur 18 - Opstelling voor experimenteel onderzoek

5. DE KOSTEN VAN ONTWATERING OP SLIBDROOGBEDDEN

Bij de keuze voor slibdroogbedden als slibverwerkingssysteem is in de eerste plaats van belang de beschikbaarheid van voldoende terreinoppervlak of de mogelijkheid van de verwerving ervan. Indien aan deze eis wordt voldaan zal de keuze vooral afhangen van de kosten van de verschillende slibverwerkingssystemen.

Doordat de kosten verbonden aan slibontwatering op slibdroogbedden per bedrijf zeer sterk kunnen verschillen, is het niet mogelijk een betrouwbare schatting van de kosten te geven. De verschillen in de kosten worden voornamelijk veroorzaakt door de verschillen in slibproductie, ontwaterbaarheid van het slib, bedrijfsvoering en in de toerekening van kapitaalslasten aan de slibontwatering. Doorgaans zullen de kosten verbonden aan de slibverwerking op slibdroogbedden kleiner zijn dan 1,0 ct/m³ geproduceerd drinkwater (prijspeil 1979).

In hoeverre het benodigd terrein als kapitaalskosten in de ontwateringskosten wordt meegerekend is sterk bedrijfsafhankelijk.

Veel kleine bedrijven beschikken reeds over voldoende terreinoppervlak terwijl daar niet of nauwelijks een andere nuttige functie voor aanwezig is. De kapitaalskosten worden in dergelijke gevallen toegerekend aan het bedrijf

en niet aan de slibverwerking.

Indien het terrein uitsluitend voor de slibverwerking verworven is, behoren de kapitaalskosten van het terrein wel bij de slibverwerking. Dit geldt eveneens voor reeds in eigendom zijnde terrein dat door verpachten of verhuren een economische waarde kan vertegenwoordigen.

Uit hoofdstuk 2 blijkt dat van een uniforme uitvoeringsvorm van slibdroogbedden geen sprake is. Evenmin is de ontwaterbaarheid van alle slibsoorten gelijk, noch de droge stofproductie per m³ geproduceerd drinkwater. Afhankelijk van de ruwwaterkwaliteit varieert de droge stofproductie van enige grammen tot enige tientallen grammen per m³.

De specifieke bedrijfssituatie zal bepalend zijn omtrent de constructie van de droogbedden, de wijze van slibruiming en de bedrijfsvoering zodat de aanleg- en exploitatiekosten van slibdroogbedden van bedrijf tot bedrijf aanzienlijk kunnen verschillen.

Slibdroogbedden worden bij de drinkwaterbereiding doorgaans bedreven met het oogmerk het aantal slibruiming en de droogbedden tot een minimum te beperken. Vaak gaat dit ten koste van een goede ontwatering waardoor de af te voeren hoeveelheid slib omvangrijk is.

Uit kostenoverwegingen kan opvullen tot kleine

opvulhoogten en veelvuldig ruimen aantrekkelijk zijn. Niet alleen omdat minder slib hoeft te worden afgevoerd maar ook omdat dan een snellere ontwatering mogelijk is waardoor met een kleiner bedoppervlak kan worden volstaan.

In dit verband wordt verwezen naar de afvalwaterzuivering waar men slibdroogbedden voor de ontwatering van uitgegist slib, dat in enkele opzichten overeenkomsten vertoont met ingedikt drinkwaterslib, nooit hoger opvult dan 0,30 m en het gedroogde slib ruimt vóór heropvulling van het droogbed.

Hoewel bij de ontwatering op slibdroogbedden dosering van polymeren voor de conditionering van het slib nog weinig toepassing vindt, kan een polymeerdosering de ontwateringskosten verlagen. Door de verhoging van de samendrukbaarheid wordt een eventuele verstopping van de bodem voorkomen en kan regeling van de drainagesnelheid of de toepassing van duur metaalgaas achterwege blijven.

Daarnaast vergroot een polymeerdosering zowel het rendement als de snelheid van drainage. Dit betekent dat hogere opvulhoogten toegepast kunnen worden en een geringer bedoppervlak nodig is, hetgeen gepaard gaat met lagere investerings- en ruimingskosten.

6. SLIBDROOGBEDDEN IN VERGELIJKING MET ANDERE SLIBVERWERKINGSTECHNIEKEN

Slibontwatering op slibdroogbedden is een bedrijfszeker proces dat weinig energie, onderhoud, toezicht en bediening vraagt. Bovendien is bij een zorgvuldige bedrijfsvoering een hoog eind droge stofgehalte te bereiken.

De belangrijkste nadelen van slibdroogbedden zijn het grote ruimtebeslag en de fluctuerende verwerkingscapaciteit. Daarenboven kunnen slibdroogbedden bezwaren van esthetische aard met zich meebrengen.

Hoewel slibdroogbedden vaak gezien worden als een slibverwerkingsmethode voor bedrijven met een kleine slibproductie, hebben recent enkele grote oppervlaktewaterbedrijven aan slibdroogbedden de voorkeur gegeven. De waterleidingbedrijven van Amsterdam en Rotterdam kozen voor hun zuiveringsbedrijven te Weesperkarspel respectievelijk Kralingen na onderlinge vergelijking met filterpersen en vriesdooien voor slibdroogbedden met mechanische ruiming. Ook op het zuiveringsstation van de WRK-III nabij Enkhuizen zal slibontwatering op droogbedden plaatsvinden.

Op slibdroogbedden wordt slib in relatief dunne lagen opgebracht. Dit in tegenstelling tot lagunes waarin hoge opvulhoogten worden toegepast dan wel continu slibaanvoer plaatsvindt.

Door het ontbreken van een goed drainagesysteem vindt in continu opgevolde lagunes ontwatering slechts plaats door bezinking en samendrukking zodat geen steekvast slib wordt verkregen. Dergelijke lagunes zijn te beschouwen als bezinkvijver om het slib in te dikken. Door hun bergend vermogen en goede indikresultaten kunnen lagunes/bezinkvijvers goed in combinatie met slibdroogbedden worden toegepast.

In lagunes die discontinu worden opgevuld kan weliswaar door verdamping een hoger droge stofgehalte worden bereikt, maar door de slechte afvoer van neerslag en het ontstaan van een uitgedroogde slibkorst op het gedeeltelijk ontwaterde slib verloopt de ontwatering zeer traag.

Gelet op het bereikbaar droge stofgehalte lijken filterpersen een goed alternatief voor slibdroogbedden. Filterpersen zijn echter voor de ontwatering van kleine slibhoeveelheden duur in aanschaf en exploitatie. De WRC (lit. 33) stelt dat bij een droge stofproduktie van minder dan 365.000 kg/j slibdroogbedden goedkoper zijn dan filterpersen.

Ten opzichte van slibdroogbedden hebben filterpersen als voordelen de constante verwerkingscapaciteit en het geringe ruimtebeslag.

Andere mechanische ontwateringstechnieken, zoals zeefbandpersen, vacuümfilters en centrifuge-

ges worden bij de drinkwaterbereiding nagenoeg uitsluitend toegepast voor de ontwatering van het goed ontwaterbare onthardingsslib. Voor de ontwatering van coagulatieslib komen deze technieken enkel in aanmerking na uitgebreide conditionering.

7. AANBEVELINGEN

Bedrijven die slibdroogbedden willen gaan toepassen dienen over voldoende terreinoppervlak te beschikken. In vele gevallen zal met behulp van de dimensioneringsprocedure van paragraaf 4.2 een betrouwbare bepaling van het benodigd terreinoppervlak mogelijk zijn.

Dit rapport geeft onder meer de gevolgen aan van de verschillende wijzen van bedrijfsvoering. Praktijkervaring zal echter moeten uitwijzen wat onder de gegeven omstandigheden de meest optimale bedrijfsvoering is.

Het is gewenst nader onderzoek te doen naar de effectieve verdampingssnelheid voor verschillende slibsoorten en opvulhoogten.

Bijlage - Dimensioneringsvoorbeelden

Ter illustratie van de beschreven dimensioneringsprocedure zullen in deze bijlage twee voorbeelden worden gegeven van de dimensionering van slibdroogbedden. In de berekeningen wordt verondersteld dat de dichtheid van slib zich niet wijzigt tijdens de ontwatering.

Het eerste voorbeeld heeft betrekking op grondwaterzuivering door snelfiltratie na beluchting met spoelwaterafvoer naar een spoelwatervijver.

Het tweede voorbeeld heeft betrekking op ingedikt coagulatieslib, vrijgekomen bij de zuivering van oppervlaktewater. In het voorbeeld worden diverse bedrijfsvoeringen onderling vergeleken.

Spoelwaterslib

Bedrijfsgegevens:

produktiecapaciteit : 5 miljoen m³ per jaar
zuiveringsschema : beluchten, snelfiltratie
kwaliteit ruw water : Fe = 3,0 mg/l → 5,7 mg/l
Fe(OH)₃
Mn = 0,30 mg/l → 0,47 mg/l
MnO₂
slibbehandeling : spoelwatervijver, slib-
droogbed
klimat. omstandigh. : verdamping E_o = 702 mm/j
neerslag N_o = 742 mm/j

Slibgegevens:

droge stofgehalte van slib uit de spoelwater-
vijver $S_o = 8 \%$

droge stofgehalte na drainage $S_f = 18 \%$

drainagetijd $t_d = 3$ dagen

droge stofgehalte ontwaterde slib $S_v = 50 \%$

droge stofproduktie DSP = $(5,7 + 0,47) \times 10^{-3}$
 $\times 5 \times 10^6 = 30.850 \text{ kg/j}$

Dimensionering:

opvulhoogte H_o : $H_o \times S_o = H_d \times S_f$ met H_d
 $= 0,10 \text{ m}$
 $H_o \times 8 = 0,10 \times 18$ $H_o =$
 $0,23 \text{ m}$

verdampingstijd t_v : $t_v =$
 $365 \frac{1000 \times 0,23 \times 8}{1,2 \times 702 - 0,2 \times 742} \left(\frac{1}{18} - \frac{1}{50} \right)$

$t_v = 34$ dagen

bruto bedbelasting BBB: indien $t_r = 2$ dagen

$BBB = 365 \frac{10 \times 0,23 \times 8}{3 + 34 + 2} = 172 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{j}$

bedoppervlak A : $A = \frac{30.850}{172} = 180 \text{ m}^2$

Bedrijfsvoering met één slibdroogbed:

droge stoflast per opvulling = $10 H_o S_o \times A =$

$10 \times 0,23 \times 8 \times 180 = 3310 \text{ kg}$

aantal opvullingen: $\frac{30.850}{3310} = 9,3$ opvullingen

per jaar

ontwaterd door verdamping per opvulling

$$1000 H_2O S_0 \left(\frac{1}{S_f} - \frac{1}{S_v} \right) = 1000 \times 0,23 \times 8 \frac{1}{18} - \frac{1}{50}$$

gemiddelde mogelijke verdamping per opvulling

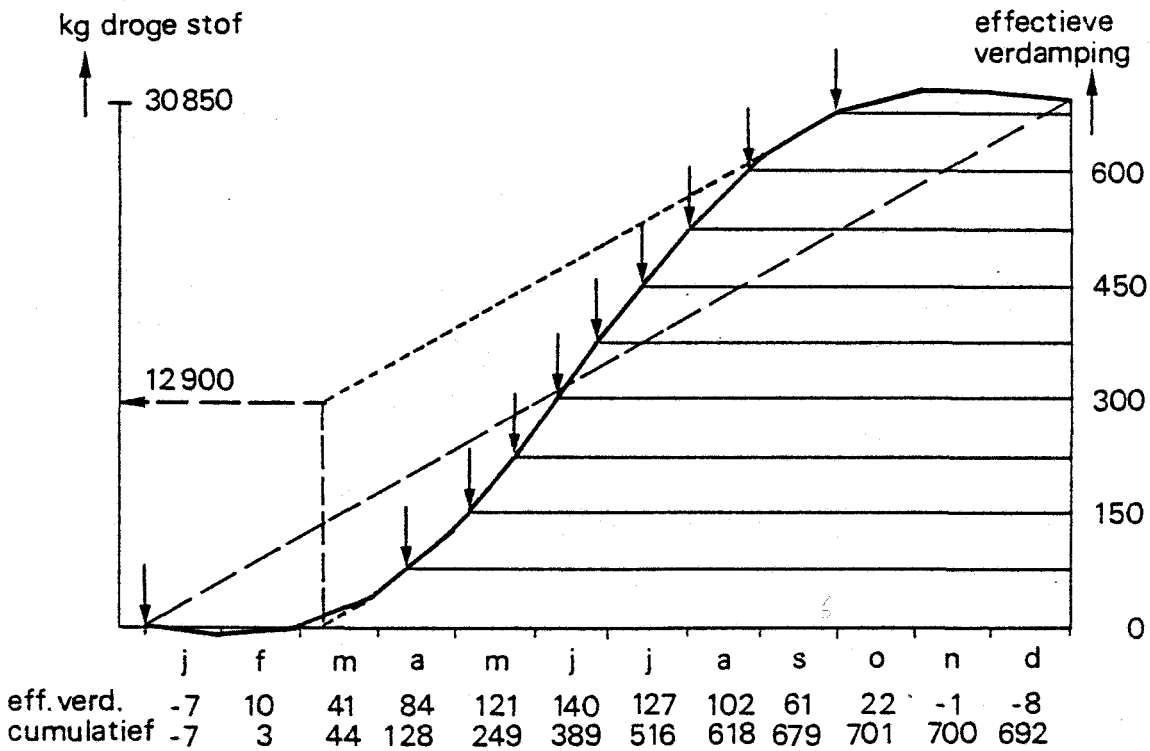
$$\frac{1,2 \times 702 - 0,2 + 742}{9,3} = 75 \text{ mm}$$

de vultijden volgen uit onderstaande figuur
waarin is weergegeven

de cumulatieve effectieve verdamping, berekend uit figuur 15 en 16 met $E_0 = 702 \text{ mm/j}$
en $N_0 = 742 \text{ mm/j}$.

het slibbergend vermogen van de spoelwater-
vijver moet bij continue opvulling 12.900
kg droge stof zijn, dit is 42 % van de
jaarlijkse droge stofproduktie. Bij discon-
tinue opvulling komt hierbij maximaal de
droge stofhoeveelheid voor één opvulling:
3310 kg. Het voor berging benodigde volume
bedraagt

$$\frac{12.900 + 3310}{0,08} \times 10^{-3} = 200 \text{ m}^3.$$



Coagulatieslib:

Bedrijfsgegevens:

produktiecapaciteit : 20 miljoen m³ per jaar

zuiveringsschema : chemicaliëndosering,
vlokvorming, bezinking,
snelfiltratie

doseringen : 20 mg/l Fe 38,2 mg/l
Fe(OH)₃

1 mg/l vlokhulpmiddel

kwaliteit ruw water : 25 mg/l zwevende stof

slibbehandeling : indikker, slibdroogbed
klimat. omstandigh. : verdamping $E_0 = 702 \text{ mm/j}$
neerslag $N_0 = 742 \text{ mm/j}$

Slibgegevens:

droge stofgehalte van slib uit de indikker S_0
 $= 6 \%$

droge stofgehalte na drainage $S_f = 13 \%$

drainagetijd $t_d = 4$ dagen

droge stofgehalte ontwaterd slib $S_v = 25 \%$

droge stofproduktie $DSP = (38,2 + 1 + 25) \times 10^{-3} \times 20$
 $\times 10^6 = 1.2$

Dimensionering:

opvulhoogte H_0 : $H_0 \times 6 = 0,10 \times 13$ $H_0 =$
 $0,2$

verdampingstijd t_v : $t_v = 365 \frac{1000 \times 0,22 \times 6}{1,2 \times 702 - 0,2 \times 742}$

$$\left(\frac{1}{13} - \frac{1}{25}\right) = 26 \text{ dagen}$$

bruto bedbelasting BBB: indien $t_r = 2$ dagen

$$BBB = 365 \frac{10 \times 0,22 \times 6}{4 + 26 + 2} = 150 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{j}$$

bedoppervlak A : $A = \frac{1.284.000}{150} = 8.600 \text{ m}^2$

Bedrijfsvoering:

a. Zonder berging en een constante opvulhoogte:

De droogbedden hebben nu ook een bergende functie. Uit bovenstaande figuur blijkt dat de berging minimaal 42 % van de slibproductie moet kunnen bevatten. Bij $S_0 = 6 \%$ en een opvulhoogte van 0,22 m is het benodigd bedoppervlak

$$\frac{0,42 \times 1.284.000}{0,06 \times 0,22} \times 10^{-3} = 40.900 \text{ m}^2$$

- b. Zonder berging en een variabele opvulhoogte:

Vult men gedurende de maanden oktober t/m maart de bedden op tot 0,66 m, dan is hiervoor

$$\frac{6}{12} \times \frac{1.284.000}{0,06 \times 0,22} \times 10^{-3} = 16.200 \text{ m}^2$$

nodig. Bij een onvolledige drainage tot 10 % droge stof bedraagt de benodigde cumulatieve effectieve verdamping:

$$1000 \times 0,66 \times 6 \times \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{25} \right) = 238 \text{ mm.}$$

In de periode april t/m september is de cumulatieve verdamping 593 mm en de cumulatieve neerslag 383 mm, zodat ook bij een geringe neerslagafvoer via drainage een goede ontwatering mogelijk is. Praktijkervaring zal moeten uitwijzen of ook met een grotere opvulhoogte nog een goede ontwatering wordt bereikt.

De bedden worden gedurende de maanden april t/m september opgevuld tot 0,22 m. Bij een constant veronderstelde effectieve verdampingssnelheid gedurende deze maanden van

100 mm/maand, bedraagt de verdampingstijd
15 dagen en het benodigde bedoppervlak
2800 m².

De bedden met een opvulhoogte van 0,66 m
worden éénmaal per jaar opgevuld en de bed-
den met opvulhoogte van 0,22 mm

$$\frac{1}{2} \times \frac{365}{4 + 15 + 2} = 9 \text{ keer per jaar}$$

Het totale bedoppervlak is 19.000 m².

c. Aparte berging:

Het benodigde bedoppervlak is 8600 m²

Bij 8 bedden van 1075 m²:

- droge stofflast per opvulling:

$$10 \times 0,22 \times 6 \times 1075 = 14.200 \text{ kg}$$

- inhoud berging:

$$0,42 \times 1.284.000 \times 14.200 = 553.500 \text{ kg}$$

- indien het slib tijdens de berging wordt
ingedikt tot 10 % droge stof is het volu-
me van de berging

$$\frac{553.500}{0,10} \times 10^{-3} = 5540 \text{ m}^3$$

hetgeen bij een diepte van de berging van
2,00 m overeenkomt met een oppervlak van
2770 m².

- ieder bed wordt vanuit de berging $\frac{1}{8} \times$
 $\frac{1.284.000}{14.200} = 11,3$ keer per jaar
opgevuld.

- het totale terreinoppervlak is 11.370 m².

d. Slibconditionering en aparte berging:

Polymeerdosering volgens figuur 13:

$$120 \text{ mg/l} = 0,02 \text{ kg/kd ds}$$

$$\begin{aligned} \text{Verlaging } r_B \text{ met factor } 0,06 \quad t_d &= 0,06 \times 4 \\ &= 0,24 \text{ dagen} \end{aligned}$$

$$\text{Droge stofgehalte na drainage } S_f = 18 \text{ \%}.$$

$$\begin{aligned} \text{Opvulhoogte } H_o &: H_o \times 6 = 0,10 \times 18 \quad H_o \\ &= 0,30 \text{ m} \end{aligned}$$

Verdampingstijd t_v :

$$t_v = 365 \frac{1000 \times 0,30 \times 6}{1,2 \times 70 - 0,2 \times 742} \left(\frac{1}{18} - \frac{1}{25} \right) = 15 \text{ dagen}$$

Bruto bedbelasting BBB:

$$\text{BBB} = 365 \frac{10 \times 0,30 \times 6}{0,24 + 15 + 2} = 381 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{j}$$

$$\text{Bedoppervlak } A : A = \frac{1.284.000}{381} = 3370 \text{ m}^2$$

LITERATUURLIJST

In het rapport zijn geciteerd:

1. Novak, J.T.; Montgomery, G.E.
Chemical sludge dewatering on sand beds
J. Envir. Engng. Div. (ASCE), 101 (1975) 1
p. 1-14
2. Bos, J.
Slibontwatering
In: St. P.V. Gez. Techn., Verw. v. slib v.
rioolwat.zuiv.inricht., 1978-'79
3. Christen, N.P.; Van Nes, A.W.
Optimalisering van natuurlijke ontwatering
H₂O, 11 (1978) 22, p. 499-504
4. Heijn, J.P.; Brouwer, W.A.H.
Constructie van slibdroogvelden ten behoe-
ve van mechanische ruiming
H₂O, 5 (1972) 5, p. 86-93
5. Van de Sande, A.J.
Een gemodificeerde standaardtrekker als
slibruimmachine
H₂O, 5 (1972) 13, p. 278-279
6. Koot, A.C.J.
Soorten en hoeveelheden slib
In: St. P.V. Gez. Techn., Verw. v. slib v.
rioolwat.zuiv.inricht., 1978'79
7. Carman, P.C.
A study of the mechanism of filtration
J. Soc. Chem. Ind. (Transp. and Comm.),
52 (1933) 36, p. 280T-282T

53 (1934) 22, p. 159T-165T

53 (1934) 38, p. 302T-309T

8. Coackley, P.; Jones, B.R.S.
Vacuum sludge filtration: interpretation of results by the concept of specific resistance
Sew. and Ind. Wastes, 28 (1956) 11, p. 963-976
9. Nebiker, J.H.; Sanders, T.G.; Adrian, D.D.
An investigation of sludge dewatering rates
J. Wat. Pollut. Contr. Fed., 41 (1969) 8, p. R255-R266
10. Clark, E.E.
Water treatment sludge drying and drainage on sand beds
Amherst, University of Massachusetts, 1970, EVE 24-70-4
11. Lutin, P.A.; Nebiker, J.H.; Adrian, D.D.
Experimental refinements in the determination of specific resistance and coefficient of compressibility
In: D.D. Adrian/J.H. Nebiker, Source controle of water treatment waste solids, Amherst, University of Massachusetts, 1969, EVE 14-69-2
12. De Moel, P.J.
Ontwatering van WRK-III-ijzerslib of slib-droogbedden, verslag afstudeerwerk
Delft, Afdeling der Civiele Techniek TH, 1979

13. Kos, P.; Adrian, D.D.
Transport phenomena applied to sludge dewatering
J. Envir. Engng. Div. (ASCE), 101 (1975) 6
p. 947-965
Discussion by J.H. Nebiker, 102 (1976) 6,
p. 1295-1297
14. Novak, J.T.; Langford, M.
The use of polymers for improving chemical sludge dewatering on sand beds
J. Am. Water Wks. Ass., 69 (1977) 2,
p. 106-110
15. Novak, J.T.; O'Brien, J.H.
Polymer conditioning of chemical sludges
J. Wat. Pollut. Contr. FEd., 47 (1975) 10,
p. 2397-2410
16. Novak, J.T.; Calkins, D.C.
Sludge dewatering and its physical properties
J. Am. Water Wks. Ass., 67 (1975) 1,
p. 42-45
17. Nebiker, J.H.
The drying of wastewater sludge in the open air
J. Wat. Pollut. Contr. Fed., 39 (1967) 4,
p 608-626
18. Lo, K.L.
Digital computer simulation of water and wastewater sludge dewatering on sand beds
Amherst, University of Massachusetts,
1971, EVE 27-71-1

19. Gauntlett, R.B.; Packham, R.F.
The dewatering of a clarification sludge
on drying beds
Water Research Ass., TP80, 1971
J. Inst. Wat. Engrs., 26 (1972) 4,
p 185-200
20. Van Dam, J.C.
Waterhuishouding, 1. Hydrologische grond-
slagen
collegediktaat
Delft, Afdeling der Civiele Techniek TH,
1976
21. Maandelijks overzicht der weersgesteldheid
in Nederland
Kon. Ned. Meteor. Inst.
22. Kon. Ned. Meteor. Inst.
Klimaatatlas van Nederland
's-Gravenhage, Staatsuitgeverij, 1972
23. Neubauer, W.K.
Waste alum sludge treatment
J. Am. Water Wks. Ass., 60 (1968) 7,
p. 819-826
24. Walski, T.M.
Mathematical model simplifies design of
sludge drying beds
Wat. and Sew. Wks., 123 (1976) 4, p.
64-65
25. Dewatering of industrial sludges on beds
Water Pollution Research 1965, p. 89-93
26. Graveland, A.
Coagulateslib en zijn verwerking

- In: St. P.V. Gez. Techn., Het coag.proc.
in de waterzuiv., 1975-'76
27. Vesilind, P.A.
Treatment and disposal of wastewater
sludges
Michigan, Ann Arbor Science Publishers
Inc., 1974
28. Swanwick, J.D.; Lussignea, F.W.;
Baskerville, R.C.
Recent works on the treatment and de-
watering of sewage sludge In: W.W. Ecken-
felder, Advances in water pollution
research dl. 2, Oxford, Pergamon Press,
1964, p. 387-401
29. Haseltine, T.R.
Measurement of sludge drying bed
performance
Sew. and Ind. Wastes, 23 (1951) 9,
p. 1065-1083
30. Water Research Centre
Technical Report TR 61, Cost information
for water supply and sewage disposal,
1977, p. 216/396
31. Sankey, K.A.
The problem of sludge disposal at the
Arnfield treatment plant J. Inst. Wat.
Engrs., 21 (1967) 4, p. 367-384
32. Kittner, H.; Starke, W.; Wissel, D.
Wasserversorgung; 2e dr., p. 341
Berlijn, VEB Verlag für Bauwesen; 1967

33. Gregory, R.

Cost of sludge disposal

In: Proceedings WRC Seminar: Alum sludge
disp.-curr. prac. and trends, 16 februari
1978

OVERIGE LITERATUUR

34. Dewatering of industrial sludge
Water Pollution Research 1964, p. 108-110
35. Kershaw, M.A.; Wood, R.
Sludge treatment and disposal at Maple Lodge
J. and Proc. of the Inst. of Sew. Purif.,
1966 dl. 2, p. 75-93
36. Swanwick, J.D.; Baskerville, R.C.
Sludge dewatering on drying beds
J. and Proc. of the Inst. of Sew. Purif.,
1966 dl. 1, p. 153-167
37. Gates, C.D.; McDermott, R.F.
Characterization and conditioning of water
treatment plant sludge
J. Am. Water Wks. ass., 60 (1968) 3,
p. 331-344
38. Young, E.F.
Water treatment plant sludge disposal
practices in the United Kingdom
J. Am. Water Wks. Ass., 60 (1968) 6,
p. 717-732
39. AWWA Research Foundation Report
Disposal of wastes from water treatment
plants
J. Am. Water Wks. Ass., 61 (1969)
10, p. 541-566
11, p. 619-638
12, p. 681-708

40. Randall, C.F.; Koch, C.T.
Dewatering characteristics of aerobically digested sludge
J. Wat. Collut. Contr. Fed., 41 (1969) 5,
p. R215-R238
41. King, P.H.; Medding, W.S.; Randall, C.W.
Lagoon disposal of water treatment plant wastes
J. San. Engng. Div. (ASCE), 96 (1970) 5,
p. 1031-1033
42. Glenn, R.W.; Judkins, J.F.; Morgan, J.M.
Filtrability of water-treatment-plant sludge
J. Am. Water Wks. Ass., 65 (1973) 6,
p. 414-417
43. Environmental Protection Agency
Process design - Manual for sludge treatment and disposal
EPA 625/1-74-006, 1974
44. Hawkins, F.C.; Judkins, J.F.; Morgan, J.M.
Water treatment sludge filtration studies
J. Am. Water Wks. Ass., 66 (1974) 11,
p. 653-658
45. Hubbs, S.A.; Pavoni, J.L.
Optimization of sludge dewaterability in sludge-disposal lagoons
J. Am. Water Wks. Ass., 66 (1974) 11,
p. 658-663
46. Motamedi, M.
Dewatering of ferric chloride coagulation sludge

- Water Research, 9 (1975) 10, p. 861-864
47. Notebeart, F.F.; Wilms, D.A.; Van Haute, A.A.
A new deduction with larger application of the specific resistance to filtration of sludges
Water Research, 9 (1975) 7, p. 667-673
48. Beardsley, J.A.
Sludge drying beds are practical
Wat. and Sew. Wks., 123 (1967) 7, p. 82-84
8. p. 42.44
49. Dekker, R.H.
Inventarisatie van verwerkingstechnieken van coagulatieslib vrijkomend bij de bereiding van drinkwater
Rijswijk, KIWA, 1977. Mededeling nr. 52
50. Dimowski, C.
Die Bemessung von Schlamm-trockenbeeten
Wasser und Bodem, 29 (1977) 11, p. 319-322
51. Valat, J.L.
Lits de sechage en assainissement - Moyen efficace ou desuet?
Liason Cortambert (bull. du groupe de la Lyonnaise des eaux), 46 (1976) p. 3-12
52. Adrian, D.D.
Sludge dewatering and drying on sand beds.
Cincinnati, U.S. Envir. Prot. Agency, 1978, EPA-600/2-79-141
53. AWWA Sludge Disposal Committee
Water treatment plant sludges - an update of the state of the art

J. Am. Water Wks. Ass., 70 (1978)

9, p. 498-503

10, p. 548-554

54. Ettlich, W.F.; Hinrichs, D.J.; Lineck, T.S.
Operation manual - Sludge handling and
conditioning
Washington, U.S. Envir. Prot. Agency,
1978, EPA 430/9-78-002
55. Van der Heide, J.
Slibverwerking met behulp van filterpersen
Rijswijk, KIWA, 1978. Mededeling nr. 55

BEGRIPPENLIJST

- Slib Het bij de drinkwaterbereiding ontstane residu, waarvan de kwaliteit en kwantiteit afhangt van zowel de toegepaste zuiveringstechnieken als van de in bewerking genomen grondstof.
- Slibontwatering Het in voldoende mate verwijderen van de vloeistoffase, zodat het slib dan beschouwd en gehanteerd kan worden als vaste stof.
- Slibvolume Het volume dat een bepaalde hoeveelheid slib inneemt op een bepaald tijdstip (m^3/kg).
- Droge stofgehalte Afhankelijk van de bepalingmethode gedefinieerd als:
- a) de concentratie van de onopgeloste bestanddelen in het slib (kg/m^3). Na concentrering door filtratie van een bepaald slibvolume wordt de massa van de droogrest bepaald;
 - b) de massa van de droogrest van het slib als percentage van de oorspronkelijke massa

van het slibmonster (%).

Deze grootheid wordt gehanteerd voor slibben die veel onopgeloste bestanddelen bevatten, zodat concentrering achterwege kan blijven.

Voor slibben met veel onopgeloste bestanddelen geldt bij benadering: $1 \text{ kg/m}^3 = 0,1 \%$ droge stof.

Specifieke fil- De weerstand die de uit het
slib gevormde slibkoek biedt
tegen verdere passage van het
nog in het slib aanwezige wa-
ter (m/kg).

Samendrukbaar- Deze grootheid geeft het ver-
heid band weer tussen de specifieke
filtratieweerstand en de toe-
gepaste druk.

De samendrukbaarheid varieert
van 0 (niet samendrukbaar) tot
1 (volledig samendrukbaar) en
is dimensieloos.

Slibindikking Scheiding van de vaste stof en
de vloeistof in het slib door
middel van bezinking of flota-
tie.

- Conditioneren Het doseren van chemicaliën aan het slib ofwel het verhitten of bevriezen van het slib, waardoor een verbetering optreedt in de ontwateringseigenschappen van ingedikt slib.
- Filterpersen De ontwatering van ingedikt slib door middel van filtreren onder druk over een filterdoek.
- Vacuümfiltratie De ontwatering van ingedikt slib door middel van filtreren onder vacuüm over een filterdoek.
- Zeebandpers Een installatie, waarbij de ontwatering van ingedikt slib geschiedt door middel van gelijktijdig persen door een persband en filtreren door een zeeband.
- Centrifuge Een installatie waarbij de ontwatering van ingedikt slib geschiedt onder invloed van de centrifugaalkracht.
- Vriesdooien Een proces ter verbetering van de ontwateringseigenschappen

van het slib door middel van bevriezen en ontdooien.

Slibdroogbedden Zandbedden al dan niet voorzien van een inzamelsysteem voor het drainagewater, waarop slib door middel van drainage, bezinking, samendrukking en verdamping wordt ontwaterd.

Wedge-wire droogbedden Van slibdroogbedden afgeleid ontwateringssystemen met wedge-wire (metaalgaas) als drainagemedium en zodanig geconstrueerd dat de drainage-snelheid instelbaar is.

Lagune/slibvijver Natuurlijk of kunstmatig aangelegd bassin, hetgeen dient als tijdelijke opslagplaats of als permanente voorziening te behoeve van de ontwatering van slib. Indien niet ingedikt slib wordt ingevoerd, wordt veelal gesproken over een bezinkvijver of spoelwatervijver. Een lagune onderscheidt zich van slibdroogbedden, doordat een goede voorziening voor drainage ontbreekt en vaak een min of meer continue slibinvoer plaatsvindt.

SYMBOLENLIJST

- A = oppervlak (m^2)
a = correctiefactor voor verdamping uit
slib (-)
BBB = bruto bedbelasting ($kg/m^2.j$)
b = de helling van t/V_f uitgezet tegen
het filtraatvolume V (s/m^6)
C = massa droge stof in afgezette filter-
koek per volumeëenheid filtraat (kg/m^3)
D = drainage ($kg, kg/s$)
DSP = droge stofproduktie (kg/j)
d = door het slib geabsorbeerde fractie van
de neerslag (-)
 E_o = verdampingssnelheid van open water
(mm/dag)
g = valversnelling (m/s^2)
H = slibhoogte t.o.v. druknulpunt (m)
 H_d = slibhoogte na drainage (m)
 H_o = slibhoogte op $t=0$ t.o.v. druknulpunt/
opvulhoogte (m)
I = verdampingssnelheid (kg/m^2s)
 I_c = constante verdampingssnelheid (kg/m^2s)
K = intrinsieke doorlatendheid (m^2)
k = doorlatendheidscoëfficiënt (m/s)
 L_f = dikte van het filter (m)
 L_s = dikte van de slibkoek (m)
 m_{ds} = massa droge stof (kg)
 m_w = massa water (kg)
N = neerslag ($kg, kg/s$)
 N_d = totale neerslag van één dag (mm)

N_O	= neerslag (mm/dag)/(mm/j)
P_B	= toegepaste druk (N/m ²)
p	= verhouding tussen de droge stofgehalten voor en na drainage (-)
q	= specifiek debiet (m/s)
R	= weerstand (m ⁻²)
R_f	= weerstand van het filter (m ⁻²)
R_s	= weerstand van de slibkoek (m ⁻²)
r	= specifieke filtratieweerstand (m/kg)
r_B	= specifieke filtratieweerstand bij druk P_B (m/kg)
S	= droge stofgehalte (%)
S_{cr}	= eerste kritische droge stofgehalte (%)
S_f	= droge stofgehalte na filtratie/drainage
S_O	= initieel droge stofgehalte (%)
S_v	= droge stofgehalte na verdamping (%)
s	= samendrukbaarheid (=compressibiliteit) (-)
t	= tijd (s)
t_d	= drainagetijd (s)
t_r	= ruimings- en voorbereidingstijd per opvulling (dag)
t_v	= verdampingstijd (s)
t_{vc}	= verdampingstijd van U_O tot U_t U_{cr} (s)
t_{va}	= verdampingstijd van U_{cr} tot U_t (s)
U	= vochtgehalte t.o.v. droge stof (%)
U_{cr}	= eerste kritische vochtgehalte (%)
U_e	= evenwichtsvochtgehalte (%)
U_n	= vochtgehalte na neerslag (%)
U_O	= initieel vochtgehalte (%)
U_t	= vochtgehalte op tijdstip t (%)

U_v	=	vochtgehalte voor neerslag (%)
V	=	verdamping (kg, kg/s)
V_f	=	filtraatvolume (m ³)
V_c	=	volume van de afgezette filterkoek per volume-eenheid filtraat (-)
W	=	water in het slib (kg)
Z	=	oppervlakte-afvoer (kg, kg/s)
z	=	laagdikte (m)
η	=	dynamische viscositeit (Ns/m ²)
ν	=	kinematische viscositeit (m ² /s)
ρ	=	dichtheid van de vloeistof (kg/m ³)
ψ	=	drukhoogte (m)