

Ontwateren van drinkwaterslib door middel van electro-osmose

1. Inleiding

In de geïndustrialiseerde wereld is er een toenemend aanbod van slibachtige afvalstromen. Door de samenstelling moeten we een deel van dit afval beschouwen als chemisch afval. Bij de behandeling van veel slibachtige afvalstromen neemt concentrering van de slibstoffen door kunstmatige ontwatering een belangrijke plaats in.



IR. P. J. BUYS
Vakgroep Colloïdchemie en
Thermodynamica, TU Eindhoven
Thans KIWA NV
Onderzoek en Advies



IR. H. M. M. KOPPERS
KIWA NV
Onderzoek en Advies



A. J. G. VAN DIEMEN
Vakgroep Colloïdchemie en
Thermodynamica, TU Eindhoven

Voor flocculente slibsoorten zoals bijvoorbeeld drinkwaterslib zijn vaak grote hoeveelheden chemicaliën, hulpstoffen of toeslag vereist om de ontwaterbaarheid van de suspensie te verbeteren. Nadelen van deze werkwijze zijn:

- hoge chemicaliënkosten en bovendien verspilling van grondstoffen zoals kalk en ijzerchloride;
- verdere toename van het slibaanbod, wat leidt tot hogere transportkosten en in geval van stortten, hogere stortkosten;
- vermindering van de nuttige inzetbaarheid: een mengsel van ijzerhoudend drinkwaterslib en kalk bezit een lagere restwaarde dan de afzonderlijke componenten!

Eerder onderzoek bij de vakgroep Colloïdchemie en Thermodynamica (TCT) van de Technische Universiteit Eindhoven op het gebied van de electro-osmose [1, 2, 3, 4] heeft tot de verwachting geleid dat deze werkwijze leidt tot een beter ontwateringsresultaat bij geringe gebruikmaking van chemicaliën, hulpstoffen of toeslag, bij een acceptabel energieverbruik.

Het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer heeft de vakgroep TCT opgedragen onderzoek te verrichten naar toepassingsmogelijkheden van het electro-osmose proces.

Samenvatting

Bij de vakgroep Colloïdchemie en Thermodynamica (TCT) van de Technische Universiteit Eindhoven wordt onderzoek verricht naar het electro-osmotisch ontwateren van slibachtig afval, waaronder drinkwaterslib. Electro-osmose is een techniek die moeilijk ontwaterbare slibsoorten verder kan ontwateren dan huidige conventionele technieken, zoals de zeefbandpers of de decanteercentrifuge, doordat met behulp van een elektrisch veld een extra drijvende kracht voor het ontwateren wordt aangelegd. Door het hoge energieverbruik wordt electro-osmose niet grootschalig toegepast. De vakgroep TCT is erin geslaagd het energieverbruik van het electro-osmose proces te verminderen door het kiezen van de juiste procescondities. In januari 1992 zijn experimenten uitgevoerd bij de NV Waterleidingbedrijf Oost-Twente (WOT) in Enschede. Doel van deze experimenten was het effect van electro-osmose op de vast-/vloeistofscheiding van dit zeer moeilijk ontwaterbare coagulatieslib te meten. Ontwateringsexperimenten werden uitgevoerd met een door TCT gebouwde electro-osmose zeefbandpers en met een zeefband van de WOT, waarbij een electro-osmose zone werd ingebouwd. Hierdoor werd het droge-stofgehalte verhoogd van 7 tot 14 gewichtsprocent, bij een energieverbruik van 0,6 kWh/m³ slib met een aanvangsdroge-stofgehalte van 1,5 gewichtsprocent. De resultaten hebben ertoe geleid dat de WOT een full-scale zeefbandpers heeft geplaatst, die aangepast zal worden voor de toepassing van electro-osmose.

Als onderzoeksmateriaal is gekozen voor drinkwaterslib en baggerspecie. In dit kader is ook aansluiting gezocht bij het project 'kunstmatige ontwatering van drinkwaterslib' dat VEWIN in het kader van haar onderzoekprogramma door KIWA NV Onderzoek en Advies in Nieuwegein laat uitvoeren. Ook is samenwerking overeengekomen met Geveke Werktuigbouw BV en Ballast Nedam Milieutechniek BV. Door deze samenwerking was het mogelijk de voor het onderzoek noodzakelijke apparatuur te krijgen.

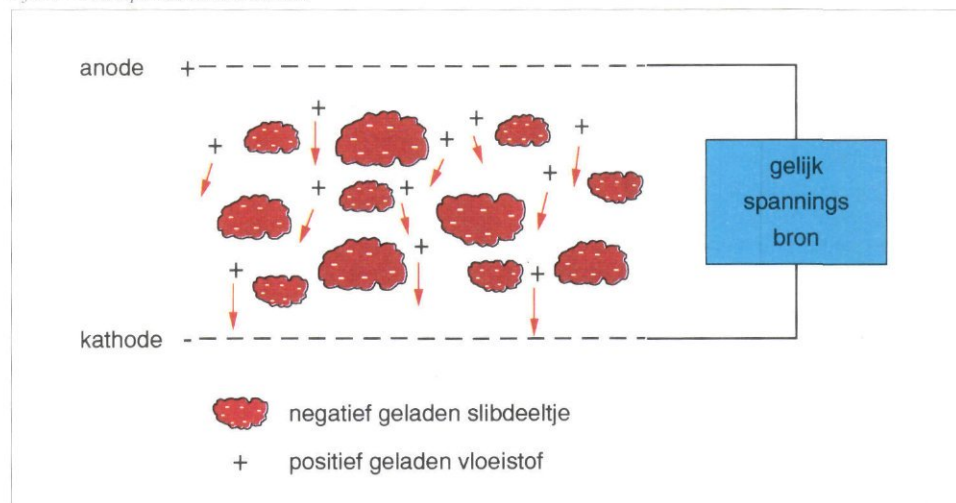
2. Principe van electro-osmose

De definitie van electro-osmose is analoog aan die van osmose: osmose is transport van vloeistof door een poreus medium als gevolg van een chemisch potentiaal verschil; electro-osmose is transport van

vloeistof door een poreus medium als gevolg van een elektrisch potentiaal verschil. Slibdeeltjes hebben een (meestal negatieve) elektrische oppervlaktelading en omdat de suspensie in het geheel elektro-neutraal is, heeft de omringende vloeistof een gelijke, maar tegengestelde lading. Als we nu twee elektroden in het slib steken, die verbonden zijn met een gelijkspanningsbron, dan zal de vloeistof in het slib naar de negatieve elektrode (kathode) bewegen. Dit wordt electro-osmose genoemd (afb. 1).

Op deze manier kan in het slib een scheiding tussen vaste- en vloeibare fase worden bewerkstelligd. Als de vloeistof bij de kathode wordt afgescheiden, dan betekent dit dat het slib ontwaterd wordt. Een bijkomend effect is dat de vaste deeltjes door de kathode worden

Afb. 1 - Principe van electro-osmose.



afgestoten. Zo kan filterdoek dat bij het ontwateren gebruikt wordt, minder vervuild raken.

3. Geschiedenis van electro-osmose

Electro-osmose is een techniek die al lange tijd, met wisselend succes wordt toegepast. Het Kaiserliches Patentamt verleende rond 1900 verschillende patenten aan Graf Botho Schwerin uit Ostpruisen, voor zijn 'Verfahren zur Entwässerung von mineralischen, pflanzlichen oder tierischen Stoffen' [5]. Hij was de eerste die electro-osmose integreerde in ontwateringsapparatuur. Zijn vinding werd aangepast en toegepast door Farbwerke vorm (Meister Lucius & Brüning [6]). Het energieverbruik van deze technieken was zeer hoog. Casagrande [7, 8] onderzocht de mogelijkheid om grond electro-osmotisch te ontwateren. Cooling *et al.* onderzochten het electro-osmotisch ontwateren van

rioolzuiveringslib [9]. Zij concludeerden dat de methode te duur zou zijn om op grote schaal toe te passen. Meer recent werd het ontwateren van koolslurries [10], keramische suspensies [11] en bentoniet-slurries [12] onderzocht. Bentoniet-slurries zijn zeer moeilijk te ontwateren met conventionele filtratie-technieken.

Toepassing van electro-osmose bij het ontwateren van deze slurries is veel goedkoper dan thermisch drogen en wordt in Japan dan ook toegepast. Vrij recent (1988) werd het werk van Casagrande nieuw leven ingeblazen door onderzoekers van Geokinetics BV. Zij ontwikkelden een methode om vervuilde bodem in-situ te reinigen door electro-reclamatie [13]. Dit is een combinatie van electro-osmose met electroforese en electro-dialyse. Om energiekosten te besparen stellen ze voor windenergie te gebruiken voor het opwekken van de

benodigde elektriciteit. De kosten van windenergie zijn echter nog steeds hoger dan die van fossiele brandstoffen.

4. Electro-osmose experimenten op labschaal

Voor het uitvoeren van kleinschalige ontwateringsexperimenten is een opstelling gebouwd waarmee de ontwateringsprestaties van de combinatie van persen met electro-osmose vergeleken kunnen worden met de prestaties van persen alleen. Deze opstelling (zie afb. 3) bestaat uit twee identieke PVC cylinders met een roestvaststalen zuiger. Op de bodem van de cylinders ligt een roestvaststalen zeefplaat.

Beide cylinders brengt men met perslucht onder druk. De rechte cylinder fungeert als electro-osmose pers; de zuiger dient als anode, de zeefplaat als kathode. Het uit de persen stromende water wordt

Optimaliseren van het electro-osmose proces

De lineaire snelheid waarmee vloeistof door een porie beweegt onder invloed van een aangelegd drukverschil is evenredig met het kwadraat van de poriediameter. Bij electro-osmose is de vloeistofsnelheid onafhankelijk van de poriediameter. Naarmate de slibdeeltjes kleiner zijn, zal electro-osmose een grotere bijdrage leveren aan het ontwaterresultaat, bij toepassing van een combinatie van drukfiltratie en electro-osmose. Herschrijven van de vergelijking van Von Schmoluwchowski [14] levert als verband tussen de slibeigenschappen, procescondities, en de electro-osmosesnelheid:

$$V_{eff} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \zeta}{\eta} \cdot E$$

- waarbij:
- v = de lineaire watersnelheid in de poriën [m.s⁻¹]
 - ε₀ = de permitiviteit van het vacuüm [F.m⁻¹]
 - ε_r = de relatieve dielektrische constante van de waterfase in het slib
 - ζ = de zeta-potentiaal van het slib [V]
 - η = de dynamische Viscositeit van de waterfase [Pa.s]
 - E = het aangelegde elektrische veld [V.m⁻¹]

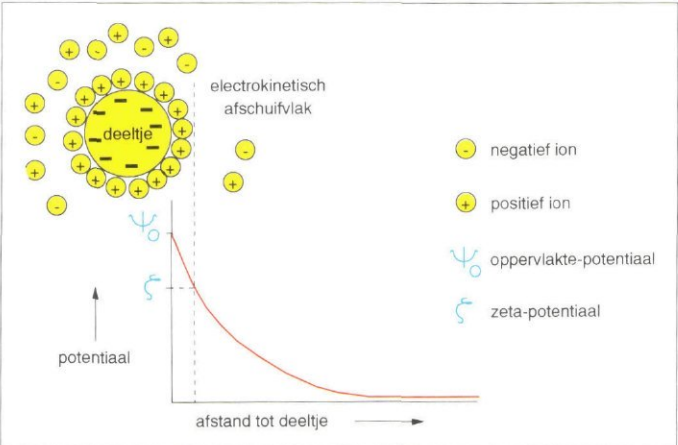
De ontwateringsnelheid door het electro-osmose proces hangt dus onder andere af van:

- de aangelegde spanning: als de spanning tussen de elektroden ver-

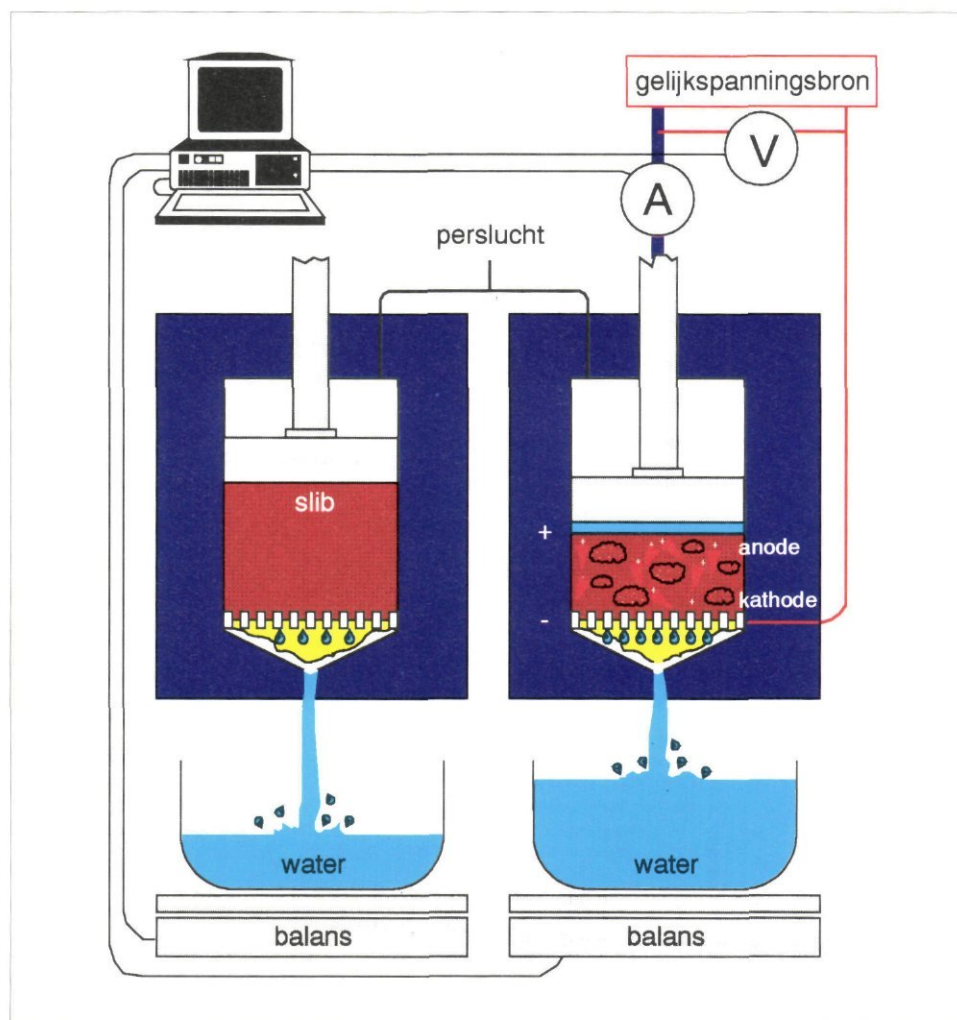
hoogd wordt, neemt de ontwateringsnelheid lineair toe. Dit heeft echter een toename van het energieverbruik tot gevolg, doordat de elektrische stroom door de slibkoek toeneemt;

- de viscositeit van de vloeistoffase: door toevoegen van additieven zoals oppervlakte actieve stoffen en vlokmiddelen neemt de viscositeit van de waterfase toe. Vaak valt deze (negatieve) invloed op de viscositeit in het niet bij de positieve effecten die de additieven hebben op andere factoren die de ontwatering beïnvloeden (zoals de zeta-potentiaal of de specifieke filtratieweerstand).
- de zeta-potentiaal van de vaste stof: de deeltjes in het slib hebben een oppervlaktelading. Deze lading uit zich in een potentiaalverschil tussen het deeltje en de vloeistof op grote afstand van dat deeltje, de oppervlaktepotentiaal. Aan het deeltje zijn tegengestelde ionen geadsorbeerd. Deze ionen zitten onbeweeglijk vast. Net buiten deze laag ionen kan de vloeistof stromen, deze plaats heet het elektro-kinetisch afschuifvlak (zie afb. 2)

De potentiaal die heerst bij dit vlak is de zeta-potentiaal. De zeta-potentiaal is het deel van de oppervlakte-potentiaal dat werkelijk fysisch merkbaar en meetbaar is. De ontwateringsnelheid is lineair afhankelijk van de zeta-potentiaal. Verhogen van de zeta-potentiaal kan bijvoorbeeld door het toevoegen van oppervlakte actieve stoffen [3]. Een hoge zeta-potentiaal zal in het algemeen leiden tot een zeer compacte sedimentstructuur, wat leidt tot een hoge specifieke filtratieweerstand van het slib. Een manier om de zeta-potentiaal in absolute zin te verhogen en tegelijkertijd de ontwaterbaarheid te verbeteren is het toevoegen van polyelektrolieten. Adsorptie van een anionisch polyelektroliet aan een deeltje veroorzaakt een verhoging van de zeta-potentiaal door de extra lading die op het deeltje gebracht wordt en veroorzaakt vlokking door interactie van polymeerketens die op verschillende deeltjes geadsorbeerd zijn. Het is noodzakelijk de juiste soort en concentratie polyelektroliet te weten voor een gunstige beïnvloeding van het ontwateringsproces. Vaak wordt de keuze gemaakt aan de hand van visuele interpretatie van eenvoudige schudproefjes. In de praktijk zal dit snel leiden tot een verkeerde polyelektrolietdosering. Een te lage dosering geeft geen vlokking, een te hoge dosering leidt tot een stabiele suspensie en verhoging van de viscositeit van de waterfase. Om de invloed van polyelektrolieten en andere additieven op de zeta-potentiaal vast te stellen werden elektro-akoestoforetische metingen uitgevoerd. Hiermee werd de zeta-potentiaal van het slib afhankelijk van de polyelektrolietconcentratie bepaald. Aan een monsterbeker met slib werd stapsgewijs polyelektroliet toegevoegd. Na elke stap werd de zeta-potentiaal gemeten. Uit de vorm van de titratiecurve kon de optimale polyelektrolietconcentratie worden bepaald. Door meting van de filtratie eigenschappen van het slib door de Capillary Suction Time (CST) en door het meten van de viscositeit van het slib tijdens de titraties bleek dat de vlokking werkelijk optimaal was bij de gevonden polyelektrolietconcentratie.



Afb. 2 - Potentiaalverloop om een deeltje in vloeistof.



Afb. 3 - Laboratoriumopstelling voor electro-osmose.

opgevangen op balansen, gewogen en geregistreerd. De spanning op en de stroom door de electro-osmose pers worden gemeten en door de computer verwerkt. Het daarvoor ontwikkelde computerprogramma Ontwater [15] verwerkt deze gegevens. Het programma berekent het vermogen, het totale energieverbruik en het energieverbruik per kilogram onttrokken water.

Voor experimenten worden de cilindrs gevuld met een gelijke hoeveelheid slib. Beide cilindrs zet men onder druk waarbij tegelijkertijd een spanning wordt aangelegd op de electro-osmose cilinder. De maximale spanning bedraagt 30 Volt en de maximale persdruk 4 bar. De experimenten duren circa 30 minuten of korter als de filtraatstroom stopt. Tijdens het experiment worden meetresultaten grafisch weergegeven (zie afb. 4).

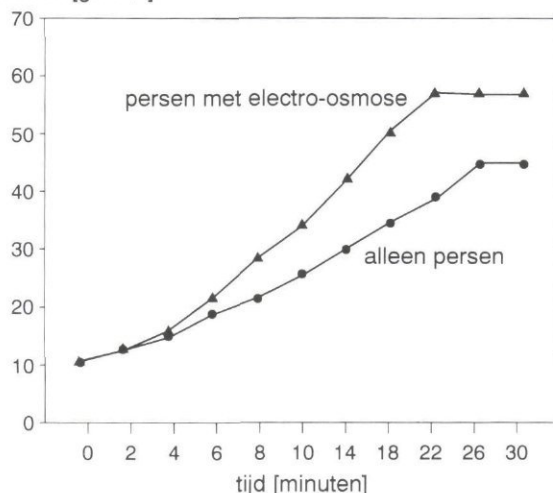
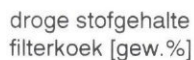
De ontwateringscurves tonen aan dat de combinatie van electro-osmose met persen een snellere en meer volledige ontwatering geeft dan persen alleen.

Alleen in het begin van het experiment zijn de ontwateringssnelheden identiek, wat betekent dat daar de bijdrage van electro-osmose is te verwaarlozen. Als

enig water onttrokken is, daalt de ontwateringssnelheid van de pers waarbij géén electro-osmose wordt toegepast. Vanaf dit punt is de bijdrage van electro-osmose aan het ontwateringsproces substantieel. Bij electro-osmose hangt de snelheid niet af van de poriediameter, in tegenstelling tot het ontwateringsproces onder invloed van druk alleen. Bij een gelijk droge-stofgehalte is de ontwateringssnelheid mét electro-osmose groter dan zonder.

Experimenten zijn uitgevoerd met twee soorten drinkwaterslib: kleihoudend coagulatieslib van de NV WRK te Nieuwegein (waterwinstation ir. Cornelis Biemond) en aluminiumhoudend flotatieslib van de NV WOT Enschede (pompstation Elsbeekweg). Voor beide slibsoorten is met behulp van electro-akoestoforetische titraties de optimale polyelektrolietdosering bepaald. Voor het WRK-slib werd een anionisch polyelektroliet gebruikt met een molecuulgewicht van $15\text{--}20 \cdot 10^6$ g/mol, de optimale dosering bedroeg 2,0 kg/ton d.s.. Voor het WOT-slib werd gebruik gemaakt van een anionisch polyelektroliet met een molecuulgewicht van $8\text{--}10 \cdot 10^6$ g/mol, de optimale dosering bedroeg 2,4 kg/ton d.s.

Het effect van electro-osmose is het grootst voor het aluminiumhoudend flotatieslib; door toepassing van electro-osmose werd de massa slib met circa 38% gereduceerd t.o.v. alleen persen. Voor het WRK-slib is dit circa 21%. Electro-osmose is dus juist voor moeilijk ontwaterbaar slib een effectieve methode; de bijdrage aan de ontwatering van makkelijker ontwaterbaar slib is echter ook substantieel.



Afb. 4 - Ontwatering van
coagulatieslib afkomstig
van waterzuiverng
ir. Cornelis Biemond
te Nieuwegein.

Tabel I – Resultaten van labschaal electro-osmose experimenten.

	Begin d.s.	D.s. na persen	Na persen en electro-osmose	Energieverbruik electro-osmose*
WRK	10%	45%	57%	25-30 kJ/kg H ₂ O
WOT	4%	16%	26%	30-40 kJ/kg H ₂ O

* energieverbruik per kilogram water dat door electro-osmose verwijderd is.

5. Electro-osmose experimenten op semi-praktijkschaal

Aan het begin van het project stond de vakgroep TCT een zeefband ter beschikking, die na grondige aanpassingen geschikt gemaakt kon worden als electro-osmotische zeefbandpers. Dit apparaat (zie afb. 5) bestaat uit twee zeefbanden, die aan één kant tegen elkaar lopen. Hierdoor ontstaat een perswerking. De snelheid van de bovenste band bedraagt bovendien 17/16 maal de snelheid van de onderste, waardoor het slib een afschuifkracht ondervindt. De bovenste zeefband dient als anode, de onderste als kathode. Experimenten in het laboratorium bewezen dat het apparaat inderdaad werkt als electro-osmose zeefbandpers. Naar aanleiding van deze experimenten werd besloten het apparaat in te zetten bij beproevingen op lokatie.

Als proeflokatie is gekozen voor het pompstation Elsbeekweg (WOT). Het water uit het Twentekanaal ondergaat hier een voorzuivering voor infiltratie. Het zuiveringsproces bestaat uit een verwijdering van het grofvuil met trommelzeven, coagulatie met behulp van polyaluminiumhydroxydechloride, vlokafschieding door middel van flotatie, gevolgd door open infiltratie van het flotaat [16]. Het afgescheiden flotatieslib

bezit een droge-stofgehalte van circa 1,5 gewichtsprocent en heeft een zeer hoge specifieke filtratieweerstand (78 Tm/kg). Dit slib wordt geconditioneerd met een anionisch polyelektrolyet en ingedikt op zeefbandindikkers. Het aldus ingedikte slib (4-5% droge-stof) wordt gedroogd op droogbedden en vervolgens afgevoerd naar een stort. De WOT onderzoekt de mogelijkheden om de ontwateringsprestaties van beide zeefbandindikkers te verbeteren [17]. Door het breekbare karakter van de vlok was het aanvankelijk niet mogelijk een drukplaat op de band te plaatsen. Door toepassen van 'ploegjes' die het slib op de band keerden, werd een betere ontwatering bereikt. Verder was de WOT geïnteresseerd in de mogelijkheden van het electro-osmose proces. Hiertoe werden oriënterende experimenten uitgevoerd met de door TCT ontwikkelde electro-osmose zeefbandpers. Ook is één van de zeefbandindikkers van de WOT provisorisch omgebouwd tot electro-osmose apparaat. De volgende experimenten hebben plaatsgevonden:

1. Optimalisatie van het zeefband-indikproces:
 - met behulp van electro-akoestoforetische titraties werd de optimale polyelektrolyetconcentratie bepaald. Deze bedroeg 2,5 kg/ton d.s.; de door WOT

toegepaste dosering bedroeg circa 4 kg/ton d.s.;

- de mengintensiteit van het polyelektrolyet met het slib werd vergroot, waardoor een compactere, stevigere vlok ontstond;
- er werd een drukplaat aangebracht, wat mogelijk werd doordat de vlokken steviger waren;
- door deze maatregelen werd het droge-stofgehalte van het ingedikte slib verhoogd van 4,5 tot 7%.

2. Electro-osmose zonder polyelektrolyet-dosering met TCT zeefband:

- ongeconditioneerd flotatieslib werd met behulp van electro-osmose ingedikt van 1,4% tot 9%;
- bij een spanning van 20 Volt kwam het energieverbruik uit op 1,9 kWh/m³ ingaand slib.

3. Electro-osmose met geconditioneerd en voorontwaterd slib, met TCT zeefband:

- met polyelektrolyet behandeld slib (2,5 kg/ton d.s.) werd voorontwaterd op de WOT zeefbandindikker tot 7% droge stof;
- met de TCT zeefband werd vervolgens het droge-stofgehalte verhoogd van 7% naar 19%, bij een spanning van 20 Volt;
- het energieverbruik bedroeg 1,4 kWh/m³ voorontwaterd slib.

4. Electro-osmose met zeefbandindikker van de WOT:

- één van beide zeefbandindikkers werd provisorisch omgebouwd tot electro-osmose apparaat, door de drukplaat als anode te gebruiken en een geperforeerde staalplaat onder de zeefband als kathode;
- zonder electro-osmose werd een droge-stofgehalte van 7% bereikt; bij een spanning van 30 Volt kwam het droge-stofgehalte uit op 14%;
- het energieverbruik beliep 0,6 kWh/m³ ingaand slib.

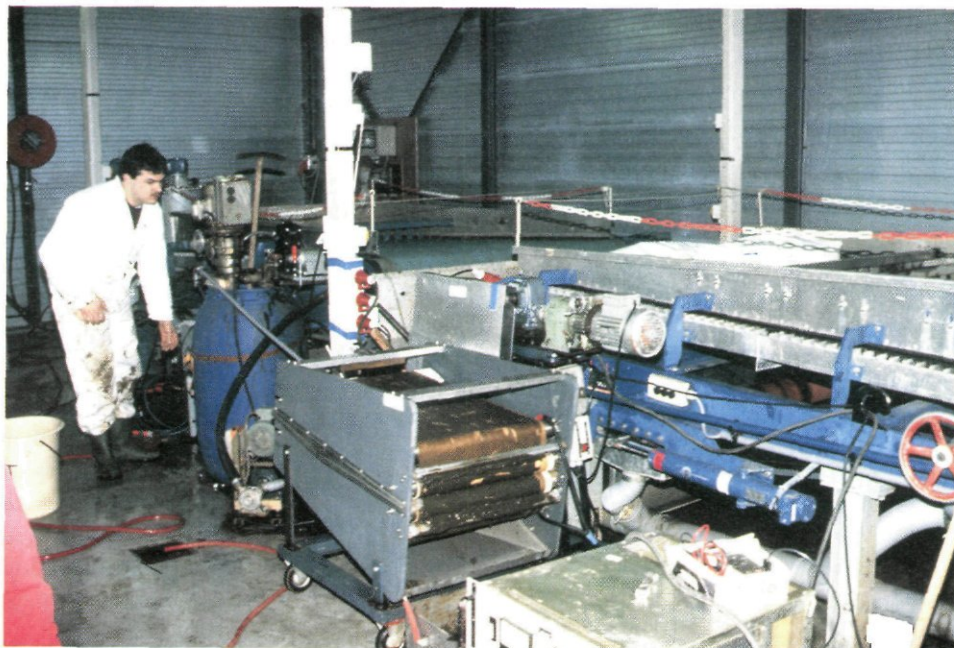
Het energieverbruik van het proces hangt ook af van de snelheid waarmee het water kan worden afgevoerd. Een ophoping van vloeistof bij de kathode geeft plaatselijk een hogere geleidbaarheid, waardoor de stroom stijgt, zonder dat dat resulteert in verdere ontwatering.

Het energieverbruik van de zeefband-indikker inclusief electro-osmose van de WOT is veel lager dan dat van de TCT zeefband, doordat de waterafvoer beter is, ook door gebruik van een minder fijnmazig filterdoek.

6. Zeefbandvervuiling

Een belangrijk neveneffect van electro-osmose kan zijn dat het filtratiemedium (in dit geval de zeefband) minder vervuild

Afb. 5 – Proefapparaat electro-osmose.



raakt. Dit komt doordat de zeefband uitgevoerd als kathode de negatieve slib-deeltjes afstoot. Hierdoor blijft de ontwateringsprestatie van het apparaat op peil en heeft minder spoelwater voor de reiniging van de band gebruikt te worden. De TCT pers werkt zonder bandspoeling.

Zeefbandvervuiling zou grote effecten hebben op de ontwaterprestatie. Het droge-stofgehalte van het uitgaande slib werd gemeten als functie van het aantal omwentelingen van de band (zie afb. 6). Uit de grafiek blijkt dat bij toepassing van electro-osmose geen zeefbandvervuiling optreedt, terwijl zonder aangelegde elektrische spanning de zeefband na één omwenteling vervuild raakte en na twee omwentelingen zelfs bijna geheel verstopte.

7. Filtraatkwaliteit

Bij ontwateringsprocessen is de filtraatkwaliteit van groot belang. De kwaliteit bepaald immers of terugvoer naar de zuivering, dan wel lozing op zijn plaats is. Een mogelijke bron van vervuiling van het filtraat is het oplossen van de anode (de kathode is immers electro-chemisch stabiel). Bij de experimenten werd een roestvaststalen anode toegepast. In het filtraat werden verhoogde chroom en nikkelgehalten aangetroffen. Het effect van spanning op het oplossen van de anode wordt onderzocht door TCT. Het

probleem is op te lossen door of een ijzeren elektrode te nemen, die zonder nadelige effecten op kan lossen, of door een hoogwaardige inerte elektrode toe te passen. Speciaal voor electro-osmose zijn met magnetiet gecoate elektrodes ontwikkeld.

8. Conclusies

Door aanpassing van de procescondities (vooral de polyelektrolyt dosering) is het gelukt electro-osmose tot een veelbelovende techniek te maken voor het ontwateren van slib. Uit oriënterende metingen is gebleken dat met behulp van electro-osmose een hoger droge-stofgehalte bereikt kan worden, tegen geringe energiekosten. Vanaf 0,6 tot 1,9 kWh/m³ ingaand slib is het mogelijk gebleken het droge-stofgehalte van aluminiumhoudend flotatieslib te verhogen van circa 7 gewichtsprocent tot 14 gewichtsprocent, waarmee het slib-volume tot de helft wordt teruggebracht. Vooral moeilijk ontwaterbaar slib komt in aanmerking voor electro-osmose. Bestaande ontwateringsapparaten, in het bijzonder zeefbandpersen en filterpersen zijn mogelijk aan te passen voor electro-osmose.

Behalve een hoger droge-stofgehalte levert electro-osmose ook minder zeefbandvervuiling. Dit bespaart spoelwater.

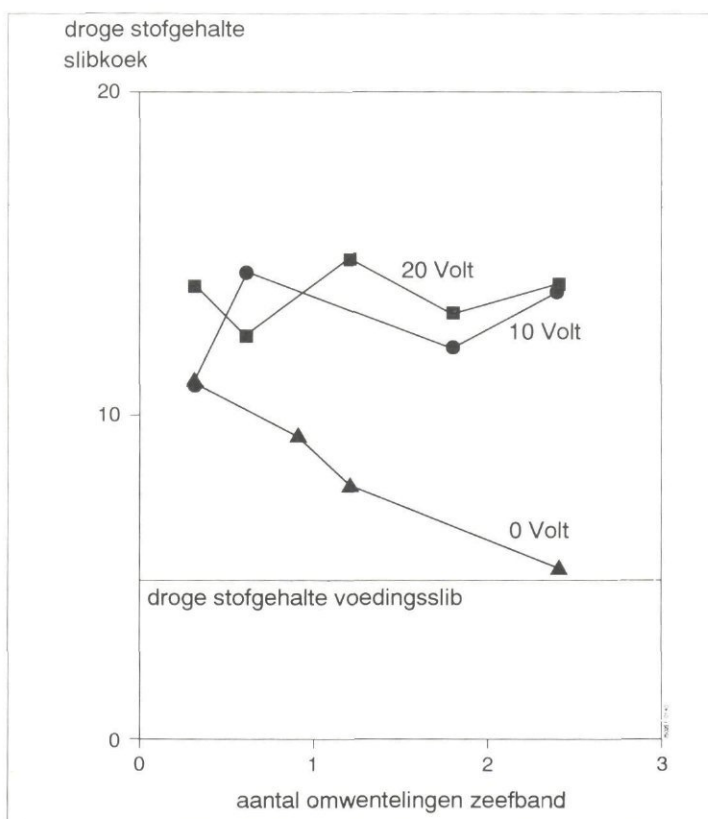
Met de juiste elektrodes is electro-osmose een techniek die ten opzichte van bestaande drukfiltratietechnieken betere resultaten levert tegen een acceptabele meerprijs.

9. Verantwoording

De auteurs zijn de NV Waterleidingbedrijf Oost-Twente zeer erkentelijk voor de verleende medewerking. Bijzondere dank gaat uit naar ing. A. B. H. Klaucke, J. H. Heynen en naar de medewerkers van de technische dienst die op korte termijn belangrijke wijzigingen aan de zeefband-apparatuur hebben aangebracht.

Literatuur

1. Kuin, A. J. *Electrokinetic and hydrodynamic transport through porous media*. Media proefschrift Technische Universiteit Eindhoven.
2. Kuin, A. J. and Stein, H. N. (1988). *Changing the intersurface cementitious materials/aqueous solution for performing electro-osmosis*. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 114, 289-293.
3. Diemen, A. J. G. van, Vet, M. J. H. de and Stein, H. N. *Influence of Surfactants on Electro-osmotic Dewatering of Sludges*.
4. Vet, M. J. H. (1988). *Electro-osmotisch ontwateren van afzetslibben*. Afstudeerverslag Technische Universiteit Eindhoven.
5. Schwerin, B. *Duits patent 124509; 124510; 128085 (1900); 131932 (1901); 150069 (1902)*.
6. *Farbwerke Meister Lucius & Brüning Duits patent 179086 (1903)*.
7. Casagrande, L. (1935). *Verfahren zur Verfestigung toniger Boden*, Duits patent 621694.
8. Casagrande, L. (1949). *Electro Osmosis in Soils*. Geotechnique 1 (3), 159-177.
9. Cooling, L. F., Jones, E. E. and Pettet, A. E. J. (1952). *Dewatering of sewage sludge by electro-osmosis*. The Water and Sanitary Engineer, Nov. 1952, 246-250.
10. Lockhart, N. C. and Stickland, R. E. (1984). *Dewatering coal washery tailings ponds by electro-osmosis*. Powder Technology 40, 215-221.
11. Knye, U. (1988). *Anwendungsreife Druckelectro-osmose eröffnet neue Wege zur Entwässerung keramischer Schlicker*. Sprechsaal, 121 11, 1065-1067.
12. Yoshida, M., Shinaka, T. and Yukawa H. (1985). *Water content and Electric Potential Distributions in Gelatinous Bentonite Sludge with Electro-osmotic Dewatering*. J. Chem. Eng. Japan, 18 (4) 337.
13. Lageman, R., Pool, W. en Seffinga, G. A. (1988). *Electroreclamatie, een nieuwe techniek voor in-situ reiniging*. Milieutechniek nr. 5, 117-121.
14. Schmoluwchowski, M. von (1903). *Bull. Akad. Sci. Bracovire classe Sci. Math. Natur* 1, 182.
15. *PP van Mierlo Ontwater, programma voor electro-osmotisch ontwateren, geschreven in ADDACOM*. Eindhoven 1991.
16. Klaucke, A. B. H. (1988). *Lezing Workshop Flotatie II*. Nieuwegein 26 oktober 1988, SWI 89.113, J. C. Schippers.
17. Westhof, D. J. (1992). *Slibverwerking: droge stof?* Stageverslag Hogeschool Enschede afdeling Werktuigbouwkunde.



Afb. 6 - Effect van electro-osmose op vervuiling van de zeefband bij ontwatering van WOT-slib.