
RAPPORT

UPPDRAGSNUMMER 30028245

UTREDNING HANTERING VATTENVERKSSLAM



2022-05-18

Sweco Sverige AB

Anders Kronvall

Sammanfattning

Denna utredning gäller vattenverksslam som uppstår vid kemisk fällning med aluminiumbaserade eller järnbaserade fällningskemikalier vid ytvattenverk.

Vid användning av järn blir slammängden ca 20% högre än vid användning av aluminium på grund av järns högre vikt.

Naturlig avvattning med torkbäddar eller frysning kan vara aktuella om förutsättningar finns, såsom exempelvis markarealer. Frysning är knappast aktuellt i södra Sverige på grund av klimatförhållandena.

Vattenverksslam kan avvattnas mekaniskt med olika tekniker. Tillämpbara tekniker är centrifugering, kammarfilterpress, silbandspress och kolvpress. Energiförbrukning är högst för centrifugering, men tekniken är driftsäker och lätthanterad. Silbandspress ger ungefär samma TS-halt som centrifugering. Kammarfilterpress har potential att åstadkomma hög TS-halt i slammet. Tekniken har rykte om sig att kräva viss handpåläggning, men nyutvecklade maskiner anges ha lågt behov av tillsyn. Det teknik som kan ge högst TS-halt är kolvpress. Dessa maskiner har högre investeringskostnad, men den högre TS-halten kan ge minskat behov av transporter.

Avsättning idag av vattenverksslam (vattenverksmull) från några vattenverk i Sverige:

- SVOA (Stockholm), jordtillverkning och spridning på jordbruksmark
- Norrvatten, deponitäckning samt jordförbättring
- Sydvatten, biogasanläggningar och deponering
- Kretslopp och Vatten (Göteborg), leds till avloppsreningsverk
- Mälarenergi (Västerås), leds till avloppsreningsverk
- NODRA (Norrköping), leds till avloppsreningsverk
- Kungälv, deponering

Det finns ingen tillgänglig etablerad teknik för återanvändning av fällningskemikalier.

Vattenverksslam kan exempelvis användas i cementtillverkning, som fosforbindande material i mark, i biogasanläggningar för svavelvätereduktion (järnslam), för tillverkning av anläggningsjord samt inarbetning i jord.

Deponering av vattenverksslam kan anses okontroversiellt eftersom materialet är harmlöst ur miljösynpunkt.

Före uppförandet av en avvattningsanläggning föreslås att pilotförsök genomförs med olika avvattningstekniker på det specifika vattenverksslammet för utvärdering.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
2	Fällningsslam	1
2.1	Allmänt	1
2.2	Fällningskemikalie och slam	1
2.2.1	Slammängd	1
3	Avvattning av fällningsslam	3
3.1	Centrifug	3
3.1.1	Teknik	3
3.1.2	Vattenverk med centrifug	3
3.2	Kammarfilterpress	4
3.2.1	Teknik	4
3.2.2	Vattenverk med kammarfilterpress	5
3.3	Silbandspress	5
3.4	Skruvpress	7
3.5	Hydraulisk kolvpress	7
3.6	Övrigt	8
3.7	Naturlig avvattning	9
3.7.1	Allmänt	9
3.7.2	Torkbäddar	9
3.7.3	Frysning	9
3.8	Polymeranvändning	9
3.9	Diskussion avvattningsteknik	10
4	Torkning av fällningsslam	11
4.1	Varmluftstork	11
4.2	Soltorkning	12
4.3	Pelletering	12
5	Slambehandling övrigt	12
5.1	Superkritisk oxidation	12
6	Kvittblivning fällningsslam	13
6.1	Möjligheter för nyttjande	13
6.1.1	Användning i rötningsprocess – (Fe)	13
6.1.2	Tillverkning tegelsten - (Al)	13
6.1.3	Fosforreduktion - (Al)	14

6.1.4	Produktion av cement – (A)	14
6.2	Återanvändning - teknisk utveckling	15
6.2.1	REFE / REAL - återanvändning fällningskemikalie	15
6.2.2	"Sockerormen" – återvinning fällningskemikalie	16
6.3	Placering av material – fällningsslam	16
6.3.1	Allmänt	16
6.3.2	Inarbetning i odlad mark	16
6.3.3	Inarbetning i mark för fosforfixering	19
6.3.4	Anläggningsjord	20
6.3.5	Deponier	20
6.4	Diskussion kvittblivning	20
7	Slamhantering vid vattenverk	21
7.1	SVOA	21
7.1.1	Nuvarande hantering	21
7.1.2	Genomförda och pågående försök	22
7.1.3	Planer	22
7.2	Norrvatten	22
7.2.1	Nuvarande hantering	22
7.2.2	Genomförda och pågående projekt	23
7.2.3	Planer	23
7.3	Göteborg, Kretslopp och Vatten	23
7.3.1	Nuvarande hantering	23
7.3.2	Genomförda och pågående projekt	24
7.3.3	Planer	24
7.4	Västerås, Mälarenergi	24
7.4.1	Nuvarande hantering	24
7.4.2	Planerade försök	25
7.5	Norrköping, NODRA	25
7.5.1	Nuvarande hantering	25
7.5.2	Planer	25
7.6	Kungälv kommun	25
7.6.1	Nuvarande hantering	25
7.6.2	Planer	26
7.7	Norge	26
7.7.1	Nuvarande hantering	26
7.7.2	Genomförda och pågående försök och studier	27
7.8	Internationellt övrigt	28
7.8.1	Finland	28
7.8.2	Kanada	28
7.8.3	USA	28
7.8.4	Nya Zeeland	28
7.8.5	Australien	28

7.8.6	Schweiz	29
7.8.7	Japan	29
8	Fällningskemikalie och kvittblivning	29
9	Referenser	30

1 Introduktion

Sweco har genomfört ett uppdrag åt Sydsvatten AB avseende omvärldsbevakning kring möjligheter att hantera fällningsslam som uppkommer vid kemisk fällning. Sydsvatten har tillhandahållit ett antal rapporter som sammanfattas. Uppdraget har innefattat litteraturstudie, intervjuer med personer och möten. Denna rapport är resultatet av det genomförda uppdraget gällande hantering av vattenverksslam från vattenverk som använder kemisk fällning i processen.

2 Fällningsslam

2.1 Allmänt

Fällningsslam uppstår vid processen kemisk fällning, då en fällningskemikalie i form av järn eller aluminiumjoner doseras till vatten och bildar utfällningar av hydroxider som binder humus och partiklar till flockar som kan avskiljas som ett slam.

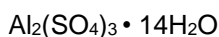
Slammet kan normalt förtjockas till en torrhalt på ca 1-2% i en gravitationsförtjockare med tillsats av polymer, och detta kan anses som en standardhantering och utgångspunkt för avvattning och kvittblivning.

2.2 Fällningskemikalie och slam

2.2.1 Slammängd

Järn väger mer än aluminium och vid samma ekvivalenta dosering, blir den genererade mängden fällningsslam större vid fällning med järn än vid fällning med aluminium.

Aluminiumsulfat innehållande 9,1% Al är en förening som kan skrivas som



I vatten bildar denna förening utfällningar av aluminiumhydroxid, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Beräkning ger att för varje gram aluminiumsulfat (9,1% Al) bildas ca 0,26 gram aluminiumhydroxid.

Uppskattning av mängden slam kan utföras med en formel enligt följande:

$$\text{SP} = 0,26 \times \text{D} + 2 \times \text{G} + 0,2 \times \text{F} + \text{X}$$

SP = Slamproduktion (g SS/m³)

D = Dos aluminiumsulfat (g/m³)

G = Råvattnets turbiditet (FNU)

F = Minskning av råvattnets färgtal

X = Andra ämnen (t ex flockhjälpmiddel)

En annan förenklad uppskattning av slammängd är formeln $\text{SP} = 0,5 \times \text{D}$

Fällning med järn vid vattenverk utförs ofta med järnklorid-lösning (FeCl_3). Vanligtvis är den produkt som används en ca 40% vattenlösning med 13,7% Fe.

Järn väger mer än aluminium och molekivalent är vikten $55,85 / 27 = 2,07$ ggr större för järn i jämförelse med aluminium.

Järnutfällningar som hydroxider ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) bildas vid fällning med järn. Beräkning ger att för varje gram doserad järnklorid (13,7% Fe) bildas 0,26 gram järnhydroxid, dvs lika som för fällning med aluminiumsulfat.

En jämförelse av molvikter för utfällda hydroxider ger att järnhydroxid (molvikt 106,85) väger 1,36 ggr mer än aluminiumhydroxid (molvikt 78). Med utgångspunkt i förenklad formel för slamproduktion vid fällning med aluminiumsulfat ovan, ger en uppskattning att slammängden vid fällning med järn blir ca $(0,26 * 1,36 + (0,5 - 0,26)) / 0,5 = 1,2$ dvs ca 20% större. Detta är naturligtvis en förenklad grov uppskattning, men ger en indikation på skillnad i slamproduktion på grund av att järn väger mer än aluminium.

3 Avvattning av fällningsslam

3.1 Centrifug

3.1.1 Teknik

Dekantercentrifug är en maskin som kan användas för avvattning av slam. Dekantercentrifugen består av en roterande trumma med en utmatningsskruv som roterar med en varvtalsdifferens i förhållande till trumman.

Försök har utförts vid Lovö vattenverk (Eklund, 1998), Norsborgs vattenverk och Tingstäde vattenverk (Calmerman, 1993).

Försök vid Lovö vattenverk 1998 med avvattning av fällningsslam från fällning med aluminiumsulfat (ALG) gav TS-halter på 18-21% vid polymerdosering på 9-15 kg polymer/kg TS. Försöken utfördes med en Noxon NX10 med kapacitet 10 m³/h, men flödet utvärderades som optimalt vid 2,5 m³/h, dvs 25% av maskinens kapacitet.

Försök med avvattning i dekantercentrifug med slam från sedimenteringsbassänger med torrhalt 0,8-1% utfördes vid Tingstäde vattenverk 1993. Torrhalter som uppnåddes för fällningsslammet var på 10-11% TS. Polymerdosen varierades 6-16 kg polymer/kg TS, och det krävdes en polymerdos på 10-15 kg polymer/kg TS samt låg belastning av centrifug för att uppnå en acceptabel rejektvattenkvalitet. I rapport för försöken vid Tingstäde, refereras även till försök vid Norsborgs vattenverk med samma utrustning. Vid försöken på Norsborg uppnåddes torrhalter på 18% TS och polymerdoseringen var 8 kg polymer/kg TS.

Ett examensarbete (Andersen, 2006) med försök vid Norsborgs vattenverk gällande polymerdosering vid slamavvattning i centrifuger gav resultat och slutsatser som att:

- Flockstyrkan har stor betydelse
- God inblandning av polymer är mycket viktigt
- Tendens iaktogs att det synes optimalt med lågladdad polymer till tjockt inkommande slam och högladdad polymer till tunt inkommande slam

På Borgs vattenverk i Norrköping genomfördes försök med slamavvattning med centrifug år 2015. TS-halten blev 19,6 - 22,4% och polymerdoseringen var 12-24 kg polymer/kg TS.

Även Sydsvatten har genomfört försök med centrifugering vid Ringsjöverket, men tekniken valdes inte för applicering för slamavvattning på Rönneholms mosse.

3.1.2 Vattenverk med centrifug

Vattenverken Lovö vattenverk, Norsborgs vattenverk och Görvälnverket i Stockholm använder centrifuger för avvattning av vattenverksslam. På respektive vattenverk finns två centrifuger. Se vidare i avsnitt 7.

Kungälvsvattenverk har en centrifug för avvattning av vattenverksslam.

3.2 Kammarfilterpress

3.2.1 Teknik

Kammarfilterpress är en maskin och en teknik som innebär att en partikelsuspension pumpas in i kammare mellan plattor med dukar. När kammaren trycksätts genom inpumpning, kommer partiklar hållas kvar i kammaren och vatten passera duken. Därmed höjs torrsubstanshalten. En variant på kammarfilterpress är membranfilterpress där kammaren trycksätts ytterligare genom att trycksatt vatten pressar dukarna mot varandra och ökar torrsubstanshalten.

Det finns rapporterade försök med kammarfilterpress med slam från Ringsjöverket från 1983 (Bernt Ericsson, 1983). Slammet härrörde från kemisk fällning med aluminiumsulfat på råvatten från Ringsjön. Försöken utfördes med konditionering med 4% järnklorid och försöken med avvattning till 20% TS gav filterkapacitet 350 g/m²•h i kammarfilterpress och 600 g/m²•h i membranfilterpress. En typisk press-cykel vid försöken var:

1. 20 min inpumpning till 7 bar
2. 60 min komprimering upp till 15 bar
3. 2 min tömning/omställning

Med kammarfilterpress uppnåddes 20% TS-halt och med membranfilterpress uppnåddes 35% TS-halt. Lagring av aluminiumhydroxidslam under flera dygn, med luftning för att undvika anaeroba förhållanden, gav upphov till försämrade avvattningsegenskaper.

Vid Lovö vattenverk genomfördes pilotförsök med kammarfilterpress 1998 (Öman, 1998). Slammet härrör från kemisk fällning med aluminiumsulfat. Slutsatser från försöken var att:

- Slammet kunde avvattnas till höga TS-halter, 27-32%, utan tillsats av kemikalier.
- God kvalitet på rejektvattnet, 11 FTU i medel.
- Inpumpning av slammet måste ske försiktigt och med stegring av trycket.

I ett examensarbete vid Norsborgs vattenverk år 2019 (Hugg, 2019), utfördes försök (under våren då befintlig avvattning ger lägst TS-halt) med kammarfilterpress och membranfilterpress. Slammets torrsubstanshalt vid avvattning i kammarfilterpress blev 17-21% och vid avvattning i membranfilterpress blev torrsubstanshalten 23-28%. Kammarfilterpress var en pilotanläggning av fabrikat Andritz.

Vid kontakter med leverantören Roxia så har de informerat om att de saluför kammarfilterpressar från tyska Aquachem och att de har utvecklat en serie maskiner som de anger har lågt behov av tillsyn. De anger följande förbättringar som möjliggör en hög automatisering med lågt tillsynsbehov:

- Filterduk infäst med tätning till filterplattor, vilket ger möjlighet att blåsa in luft genom filterduk och bakom filterkaka.

- Plan filterduk utan utbuktningar, vilket ger plan yta och homogen filterkaka, vilket minskar risken för att filterkaka inte lossnar från duk.
- Alla filterplattor har egen separat pneumatisk cylinder för skakrensning.
- Sensorer som indikerar om material långsamt byggs på i filterkammare.

3.2.2 Vattenverk med kammarfilterpress

Leverantören Andritz (<https://www.andritz.com>) har på förfrågan skickat en referenslista med 56 referenser på leveranser av kammarfilterpressar för vattenverk. En stor andel av referenserna avser anläggningar i Sydamerika och Asien. I Europa anges en leverans till Zagreb under senare år.

På Uppsalas två stora vattenverk, Gränby och Bäcklösa vattenverk, finns kammarfilterpressar för att avvattna kalkslam.

3.3 Silbandspress

Silbandspress är en teknik där material påförs en silduk och därefter ytterligare en silduk som täcker materialet varefter den dubbla silduken med material emellan pressas mot valsar och vatten pressas ut genom silduken. Sydsvatten använder tekniken för slamavvattning på det fällningsslam som erhålls vid Ringsjöverket.

Anläggningen för slamavvattning är placerad på Rönneholms mosse och är ca 10 år gammal. Slammet från lamelledimeringsbassänger på Ringsjöverket har en koncentration på ca 0,5-0,8% och mängden är i dagsläget ca 800 m³/dygn. Slammet pumpas till en gravitationsförtjockare på Ringsjöverket och det förtjockade slammet, ca 200-250 m³/d, håller en torrhalt på ca 2%. Det förtjockade slammet leds med självfall till en pumpstation på Rönneholms mosse, varifrån slammet pumpas till en slamlagertank i slamavvattningsanläggningen. Slamavvattningsanläggningen är försedd med två stycken silbandspressar av fabrikat Bellmer.



Figur 1. Silbandspress på slamavvattningsanläggningen på Rönneholms mosse.



Figur 2. Silbandspress med torrslampump i förgrunden.

Slammet pumpas från slamlagertank och på ledning till silbandspress doseras järnklorid (ca 20-35 g/m³) och polymerlösning (ca 2 kg/ton TS). Silbandspressarna använder

6(31)

RAPPORT
2022-05-18

mycket spolvatten, ca 20 m³/h, och det återanvänds genom att det spolvatten som förbrukats får passera en reningsanläggning bestående av en flockningstank med efterföljande lamellsedimenteringstank. Dekantatet från lamellsedimentering leds till en spolvattentank, varifrån vattnet pumpas till silbandspressar för spolning av silduk. På så sätt recirkuleras en stor del av det vatten som används. Det avvattnade slammet håller en torrhalt på ca 15-18% och pumpas med torrslampumpar (typ excenterskruvpump) till en slamplatta. De verksamheter (biogasanläggningar) som hämtar slam från anläggningen, får slam lastat från slam på slamplattan. Det slam som inte transporteras bort, placeras ut på mark i nära anslutning till slamavvattningsanläggningen.

Det viktigaste underhållsåtgärderna är renovering av torrslampumpar som utförs 3 ggr per år och byte av sildukar som utförs efter ca 1,5 - 2 års drift.

3.4 Skruvpress

Norrköping Vatten och Avfall har genomfört försök under 2015 och 2016 med slamavvattning med skruvpress av typ "Volute" (Karlholm, 2015) (Karlholm, 2016). Vid försöken som genomfördes 2015, var provkörningarna framgångsrika med TS-halter i det avvattnade slammet på 16-22,5% och en polymerdosering på ca 6-9 kg polymer/kg TS. Rejektet var av god kvalitet enligt optisk iakttagelse. Vid försöken 2016 var resultaten sämre med TS-halter på 12,8-16,9%.

SVOA genomförde försök med skruvpress år 2019. Försöken gav sämre resultat med avseende på TS-halt och rejektivattenkvalitet än befintlig centrifug-anläggning och sämre resultat än försöken som genomförts vid NODRA enligt ovan.

3.5 Hydraulisk kolvpres

Företaget Bucher tillverkar filterpressar av en typ med flexibla dräneringsrör i en kammare som pressas ihop med hydrauliska kolvar upprepade gånger. Företaget har angett referenser på applikation för avvattning av vattenverksslam och anger mycket höga TS-halter i avvattnat slam, 28 - 38%. Polymerförbrukning anges till normalt 5-8 kg/ton TS.



Figur 3. Hydrauliska kolvpressar av typ "Buchser HPS".

Tekniken har så vitt känt inte använts på något vattenverk i Sverige men finns på vattenverk i Europa, exempelvis Chateaubourg i Frankrike, Conza i Italien och Farmoor i Storbritannien. Tekniken har använts på avloppsreningsverket Käppalaverket (Thunberg, 2010) i Stockholm för slamavvattning ihop med en slambehandlingsprocess som senare avvecklats. Flertalet avvattningstekniker provades i pilotskala innan projektet genomfördes och den valda tekniken gav högst TS-halt. Driften med hydrauliska kolvpressar gav höga TS-halter och en besparing i minskade transportvolym. Investeringskostnaden var högre än annan teknik, men besparingen i transporter gav kostnadseffektivitet. Rejektvatten var av god kvalitet och energiförbrukningen låg i jämförelse med centrifuger (Thunberg, 2022). Tekniken bedöms intressant för stora anläggningar där en besparing i transportkostnader motiverar en högre investeringskostnad.

Maskinerna behöver kemisk rengöring regelbundet och filterstrumpor behöver bytas med vissa intervall. Kemisk rengöring är automatisk.

Denna teknik är den mekaniska avvattningsteknik som så vitt känt kan ge ett avvattnat vattenverksslam med den högsta TS-halten. Tekniken ger mest effektiv slamavvattning och högst TS-halt.

3.6 Övrigt

Geotextil används för avvattning av t ex muddermassor. Tekniken innebär att suspension pumpas in i geotextiltuber och därefter får vattnet dränera ut genom textilen. Försök har utförts vid Borgs vattenverk i Norrköping (Karlholm, 2015) med avvattning med geotextil. Vid försöken blandades polymer in i slamm (aluminiumhydroxid) och därefter fylldes en geotextilpåse. TS-halten blev ca 6% och rejektet var av dålig kvalitet med mycket suspenderat material. Slutsatsen var att tekniken inte var tillämpbar på Borgs vattenverk.

3.7 Naturlig avvattning

3.7.1 Allmänt

Det är möjligt att låta slam avvattnas genom att låta slammet under längre tid dränera och avdunsta. Frysning gör slammet lättavvattnat.

3.7.2 Torkbäddar

Exempelvis kan slammet läggas ut på torkbäddar. Dräneringsrör läggs i grovt grus och ovanpå detta läggs grus och sand, vilket bildar den torkbädd som slammet läggs på. Torkbäddar kräver lång uppehållstid och är arealkrävande.

Det är möjligt att ytterligare höja TS-halten efter mekanisk avvattning genom att lägga ut slammet på en torkbädd.

3.7.3 Frysning

Frysning av slam ger en förändring av slamstrukturen, så att mycket av vattnet i slammet efter upptining blir lätt att avskilja genom dränering. Energikostnaderna för artificiell frysning gör att tekniken inte är aktuell på konstgjord väg. Men där förutsättningar finns för naturlig frysning vintertid och där markarealer finns tillgängliga, så kan tekniken vara mycket intressant. Slammet läggs ut i lager, exempelvis 8 cm tjockt (Reed, o.a., 1986), som får frysa innan nya lager slam fördelas över det redan frysta slammet.

3.8 Polymeranvändning

Vid mekanisk avvattning tillsätts vanligtvis vattenlösliga polymerer. Dessa produkter är baserade på t ex polyakrylamid, och de kommer att återfinnas i det avvattnade slammet.

I en utredning kring ekotoxikologiska effekter i mark och vatten av polymeranvändning som utförts av Försvarets Forskningsanstalt (Berglind, 1992), presenteras uppgifter om polymerers toxicitet och nedbrytbarhet. I rapporten anges att anjoniska och katjoniska polymerer är kemiskt och biologiskt svårnedbrytbara, med risk för anrikning i sjösediment och jordar, och att de ekologiska konsekvenserna inte är utredda.

Användningen av polymer är mycket utbredd inom slamhantering. Eventuella alternativ med användning av mer biologiskt nedbrytbara produkter skulle vara en tryggare lösning ur miljösynpunkt.

Försök har utförts med stärkelsebaserade polymerer vid avvattning i centrifug respektive kammarfilterpress vid Norsborgs vattenverk 2019 (Hugg, 2019). Förbrukningen var 3-4 gånger högre jämfört med konventionell polymer baserad på polyakrylamid vid avvattning i kammarfilterpress och närmare 10 gånger högre vid avvattning i centrifug. TS-halterna i det avvattnade slammet efter centrifugering blev också lite lägre, 11-14%, jämfört med drift med konventionell polymer, ca 17%.

3.9 Diskussion avvattningsteknik

I det klimat som råder i södra Sverige så är det knappast tillämpligt att använda naturliga avvattningstekniker såsom torkbäddar och frysning för avvattning av vattenverksslam. Avvattning med mekanisk utrustning är tillämpligt och är också det som används där avvattning utförs. Skruvpress är inte en teknik som visat sig vara lämplig för avvattning av vattenverksslam. Tekniker baserade på maskinerna centrifug, kammarfilterpress, silbandspress och kolvpress är alla tillämpliga och har lite olika egenskaper.

En konventionell teknik som har potential till hög TS-halt (20-35%) är kammarfilterpress och då specifikt med varianten membranfilterpress. Tekniken har traditionellt ett rykte om sig att kräva en viss manuell arbetsinsats då filterkakor inte alltid lossnar etc. Tekniken har utvecklats och det finns idag maskiner där leverantören anger lågt behov av tillsyn. Den teknik som har potential till högst TS-halt är hydraulisk kolvpress av typ Bucher HPS. Leverantör anger resultat som är lika eller bättre än kammarfilterpress av typ membranfilterpress, 28-38% TS.

Centrifugering är en vanlig teknik för avvattning, men vattenverksslam är normalt svåravvattnat och det krävs låg belastning av centrifug och kan krävas relativt hög dosering av polymer. Tekniken är relativt sett energikrävande. Tekniken är vanlig och ger normalt en stabil och enkel drift.

Silbandspress är ovanligt på vattenverksslam, men Sydsvatten har god erfarenhet på sin anläggning på Rönneholms mosse. Torrhalten vid anläggningen är ungefär densamma som centrifugering uppnår vid Stockholms vattenverk, ca 15-18%, (se 7.1.1).

Alla de fyra ovan nämnda teknikerna är väletablerade och applicerbara för mekanisk avvattning. Det finns potentiellt processmässiga fördelar med kammarfilterpress med tanke på hög torrhalt. Kolvpress ger högst TS-halt. Centrifugering är konventionell och robust, men med potentiellt hög polymerförbrukning och med hög energiförbrukning. Silbandspress ger ungefär samma resultat som centrifugering.

Kolvpress kräver normalt regelbunden kemisk rengöring med och även kammarfilterpress kan behöva kemisk rengöring, exempelvis rengöring med utspädd syralösning.

För applicering av avvattningsteknik rekommenderas försök med utvärdering av den bäst lämpade tekniken. Vattenverksslam kan ha lite olika egenskaper och driftresultat och jämförelser bör göras med resultat från drift med just det aktuella slammet. Det är mycket lämpligt med pilotförsök där olika tekniker provas på det specifika slam som ska avvattnas.

Fördelar och nackdelar med olika avvattningstekniker visas i Tabell 1 nedan.

Tabell 1. Fördelar och nackdelar med olika avvattningstekniker.

	Centrifug	Silbandspress	Filterpress	Kolvpress
Torrhalt	0	0	+	++
Driftsäkerhet	+	+	?*	?
Energiförbrukn	-	0	0	0
Polymerförbrukn	(-)	0	0	0
Kemisk rengöring	0	0	-	-

*Kammarfilterpressar har generellt rykte om sig att kräva viss handpåläggning. Nyutvecklade maskiner kan ev innebära att denna aspekt inte avviker från andra maskiner, men detta är okänt. Försök och utvärdering krävs.

4 Torkning av fällningsslam

4.1 Varmluftstork

Slam kan torkas genom att extruderas till strängar som sedan torkas med varm luft.

Försök har genomförts på fällningsslam från Norrvatten under 2016 och 2017 (Heindl, 2016) (Heindl, 2017). Prover skickades till leverantören Huber som utförde försök i pilotskala. Slammet hade en torrhalt på ca 16% respektive 20% och det extruderades till strängar med en diameter på 10mm. Torkning utfördes med varmluft 80°C som passerade materialet med en hastighet på 1,1 m/s. En torrhalt på 70% uppnåddes efter ca 270 minuter och slammet nådde inte upp till 90% torrhalt efter 400 minuter. Resultaten visade att fällningsslammet från Norrvatten inte var lämpligt för torkning i aktuell utrustning.

På Gotland utfördes experimentella försök under år 1998-2000 med experimentell utrustning. Slamförtjockning i en "vagga" och sedan formning av slamkakor som torkas i en lokal med kallluft. Försök under 1998-99 var lovande, men försök med en konstruerad pilot gav upphov till problem med förtjockningen.

4.2 Soltorkning

Ett högskoleprojekt vid KTH under år 2020 har studerat soltorkning i växthus och naturnära torkning i torkbäddar för torkning av fällningsslam från Norrvattens vattenverk Görvånverket (Carolina Bergström, 2020). I projektrapporten redovisas ett förslag som erhållits från en leverantör av utrustning för soltorkning i växthus. Leverantörens förslag enligt rapporten innefattar sex torkningskammare, vilka vardera har en dimension på 100 × 12,8 m. Torkningen fungerar inte på vintermånaderna och därför anges ett lagerbehov för slam på 2325 m³. Förutsättningarna har varit en slamproduktion på 7700 ton TS/år och en torrhalt på 17% TS. Slammet förväntas torkas till 60% TS.

Soltorkning används i trakter med mer solinstrålning och varmare klimat.

4.3 Pelletering

Försök (Shen, o.a., 2018) har utförts med att pelletera slam med kaolin för att producera pellets med fosforbindande egenskaper. Slammet torkades, maldes, siktades och blandades sedan med kaolin i olika förhållanden varefter blandningen pelleterades och torkades. Kaolin gav bättre hållfasthet men reducerade adsorptionskapaciteten på pelletsen.

Att pelletera slam kräver energi och är knappast en ekonomiskt tänkbar lösning utan att det finns en tillämpning med motsvarande värde som motiverar energiförbrukning.

5 Slambehandling övrigt

5.1 Superkritisk oxidation

En process för superkritisk oxidation av vattenlösning utvecklades i Sverige av Chematur Engineering i Karlskoga. Processtekniken såldes sedan till det Irländska SCFI Group Ltd (www.scfi.eu) som numera marknadsför processen under namnet AquaCritox.

Processen innebär att slammet värms upp till >374,1°C och ett tryck på minst 221 bar. Vattnet övergår då i en superkritisk fas med förändrade egenskaper. Genom tillsats av syre till det superkritiska vattnet, erhålls en omedelbar snabb oxidation av allt organiskt material i vattnet.

Processen studerades år 2005 genom pilotförsök vid Ringsjöverket i två examensarbeten, (Schuster, o.a., 2008). Driftskostnaden för processen är hög.

6 Kvittblivning fällningsslam

6.1 Möjligheter för nyttjande

Den mesta litteraturen gäller aluminiumbaserat vattenverksslam. I rubriker nedan anges vilken slamtyp (Fe resp Al) som litteratur beskriver. Det bedöms finnas möjligheter att även järnbaserat vattenverksslam kan användas i en del applikationer, men detta måste i så fall utredas.

6.1.1 Användning i rötningsprocess – (Fe)

Fällningsslam som bildas vid Ringsjöverket används sedan 2013 vid biogasanläggningar för att reducera svavelväte i biogasen (Persson, o.a., 2017; Persson, o.a., 2021). Under 2019 och 2020 transporterades ca 56% av det producerade slammet till biogasanläggningar.

Användning av fällningsslam för att reducera svavelväte i biogasanläggningar kan ses som en ur ett samhällsperspektiv bra användning av den biprodukt i form av fällningsslam som uppstår vid dricksvattenproduktion med kemisk fällning med järnbaserad fällningskemikalie. Samhällsekonomiska besparingar kan erhållas både för vattenproducent i form minskad slammängd för omhändertagande och för biogasproducent som kan reducera driftkostnaderna genom att ersätta järnklorid med fällningsslam.

6.1.2 Tillverkning tegelsten - (Al)

Försök med tillverkning av tegelsten med inblandning av torkat vattenverksslam i lera för tegelstenstillverkning har utförts i åtskilliga studier. Resultaten har generellt varit goda och lovande men med varierande resultat avseende inblandningsgrad och egenskaper. Vattenverksslam kan ha en komposition som är likartad lermaterial som används för tillverkning av tegel.

En översikt (Kadir, o.a., 2014) redovisar resultat från olika studier. I en studie blev resultatet att tryckhållfastheten ökade vid inblandning med 5% vattenverksslam, men minskade vid högre inblandning. En studie som redogjorde för försök med tillverkning av tegel från 25-75% vattenverksslam och aska från risrest och vid tegelbränning vid olika temperaturer 900-1200°C gav resultat att tryckhållfastheten blev 2,82 - 7,84 MPa i jämförelse med referenstegel med 5,7 - 6,8 MPa tryckhållfasthet. Vattenabsorptionen ökade i tegel av vattenverksslam. En studie som redovisade försök med tillverkning av tegelstenar med 0-20% inblandning i lera för tegeltillverkning gav som resultat att tegelstenar med ökad inblandning av vattenverksslam gav lägre tryckhållfasthet, lägre vikt och högre vattenabsorption.

I en studie i Egypten 2008 (Ramadan, o.a., 2008) utfördes försök med tillverkning av tegelstenar i blandningar av vattenverksslam och lera. Vattenverksslammet soltorkades under 14 dagar och värmdes sedan till 350°C under 1 timme för att reducera det organiska innehållet i slammet. Därefter maldes slammet i mortel till ett pulver. Leran torkades och finfördelades. Komponenterna slam och lera blandades mekaniskt i

förhållanden 50 - 80% slam och sedan tillfördes 30% vatten. Teglet brändes vid fyra olika temperaturer i spannet 950 - 1100°C. De producerade tegelstenarna undersöktes och resultatet var att en högre bränningstemperatur gav högre tryckhållfasthet och lägre vattenabsorption och att tegelstenarna med 50% inblandning hade bäst kvalitet. De producerade tegelstenarna var av bättre kvalitet än kommersiellt tillgängligt tegel på den egyptiska marknaden.

En studie i Irland (Zhao, o.a., 2016) med tillverkning av tegelstenar från vattenverksslam och lera genomfördes med inblandning av 0 - 40% vattenverksslam. Materialen torkades, maldes och siktades innan blandning och tillverkning av tegel. Resultatet från undersökningar av de producerade tegelstenarna var att tegelstenar med 20% slam som brändes vid 1200°C och tegelstenar med 5% slam som brändes vid 1100°C uppfyllde de Irländska och Europeiska kvalitetskraven på tegelstenar. En högre inblandning av slam gav lägre tryckhållfasthet och lägre vikt på de producerade tegelstenarna.

Sammanfattningsvis är det möjligt att tillverka tegelsten genom inblandning av vattenverksslam, men applikationen är knappast tillämpbar i Sverige eftersom vi inte har någon tegelproduktion i landet för närvarande.

6.1.3 Fosforreduktion - (AI)

Vattenverksslam har egenskapen att det binder fosfor. Denna egenskap kan utnyttjas för att minska fosfor i ytvatten genom att placera slammet i mark så att avrinning passerar vattenverksslammet som placerats i jord på lämplig plats. I en studie (Agyin-Birikorang, o.a., 2007) som utförts i Michigan i USA, utvärderades två platser där vattenverksslam använts för att minska ytavrinning av fosfor. Resultatet var att $\geq 60\%$ av vattenlöslig fosfor reducerades och att fosfor var stabilt bunden till slammet efter 7,5 år.

I en studie (Wang, o.a., 2022) föreslås en möjlighet att binda fosfor i sediment genom tillsats av vattenverksslam i sediment i botten på akvatiska system (såsom sjöar, vattendrag, dammar och hav). Förslaget baseras på försök som givit resultat att 76% av mobil fosfor i sediment immobiliserats efter tillsats av vattenverksslam.

Tillsats av aluminium eller järn har använts för fastläggande av fosfor i sediment i sjöar (Huser, o.a., 2014).

Vattenverksslam har potential att förbättra miljön i system där fosfor bidrar till eutrofiering genom placering på ställen där vattenverksslammet kan binda mobil fosfor i mark och i sediment.

6.1.4 Produktion av cement – (AI)

I en översikt (Ahmad, o.a., 2016) som redovisar möjligheter att återanvända slam från vattenrening, anges artiklar som redovisar försök med tillverkning av cement med inblandning av vattenverksslam. I en studie som refereras, blandades 10% vattenverksslam med ca 39% kalkslam, ca 39% kalksten, ca 10% sand och ca 2% aska, vilket gav en cement som hade högre tryckhållfasthet efter 28 dygn än kontrollprovet med konventionella ingredienser.

En artikel (Chen, o.a., 2010) redovisar försök med tillverkning av cement med användning av 4 - 10% vattenverksslam som råvara vid tillverkning av cement. Försöken resulterade i att inblandning med $\leq 7\%$ gav lika eller något högre tryckhållfasthet efter 28 dygn än referenscement. Vid inblandning 8 - 10% blev tryckhållfastheten efter 28 dygn något lägre än cement utan vattenverksslam. Slutsatsen var att vattenverksslam är tillämpbar som råvara vid tillverkning av cement.

Vancouver i västra Kanada producerar sitt dricksvatten från ytvatten genom kemisk fällning med polyaluminiumklorid. Det slam som uppstår avvattnas med silbandspressar till ca 15-20% TS-halt. Slamm transporteras sedan år 2017 till cementtillverkaren LaFargeHolcim i Vancouver där det blandas med andra råmaterial innan tillverkningsprocessen. Mängden slam som tas emot är ca 8000 ton per år och inblandningen är $<1,5\%$. En film som presenterar samarbetet finns tillgänglig via Internet:

[\[www.metrovancouver.org/media-room/video-gallery/solid-waste/224523328\]](http://www.metrovancouver.org/media-room/video-gallery/solid-waste/224523328)

Sammanfattningsvis är användning av vattenverksslam (aluminiumbaserat) som delråvara för tillverkning av cement en tillämpning som både gett goda resultat vid försök och som används i fullskala i samarbete mellan vattenverk och cementfabrik.

6.2 Återanvändning - teknisk utveckling

6.2.1 REFE / REAL - återanvändning fällningskemikalie

Behandling av fällningsslamm för återvinning av järn eller aluminium i en form som kan återanvändas som fällningskemikalie är en tilltalande idé.

Försök och utveckling av teknik har utförts av företaget Feralco, med en process (REFE, REAL) där fällningsslamm genomgår en process i ett antal steg:

1. pH-sänkning (tillsats av syra)
2. Ultrafiltrering (slam/retentat alkaliseras och slamm avvattnas)
3. pH-höjning av filtrat (tillsats av alkali)
4. Filtrering (Filtrat nanofiltreras och bortleds, retentat recirkuleras)
5. Upplösning av bortfiltrerat slam med syra (vilket ger lösning med fällningskemikalie)

Försök med processen har utförts på flera ställen. Men processen har inte applicerats eller tillämpats på någon anläggning. Enligt muntlig information (Westrin, 2021) från Feralco, så har problemet med processen varit att medfällda ämnen ackumuleras och att kostnaderna blivit för höga. Det är helt enkelt inte ekonomiskt.

Arbetet med processen är i princip nedlagt.

6.2.2 "Sockerormen" – återvinning fällningskemikalie

SVOA har genomfört labbförsök i samarbete med Hans Ulmert. Tekniken som provats har innefattat tillsättning av svavelsyra till torkat slam. En exoterm reaktion uppstår och temperaturen ska öka till >100 °C då vatten avgår. Vid processen erhålls en torr rest i form av granuler innehållande aluminiumsulfat som kan användas som fällningskemikalie. Kemikalieåtgången blev hög och fällningsförsök på reningsverk gav som resultat att produkten fungerade något sämre än ny produkt.

6.3 Placering av material – fällningsslam

6.3.1 Allmänt

Det slam som uppstår vid fällningsprocessen är ett material som måste placeras någonstans, oavsett hur slammet avvattnas.

Vattenverksslam är ett material med lågt näringsinnehåll och är ett relativt stabilt material med låg mineraliseringshastighet och som vanligtvis innehåller lägre metallhalter (exkluderat järn eller aluminium) än till exempel slam från avloppsreningsverk. En hög andel av slammet är aluminium eller järn.

6.3.2 Inarbetning i odlad mark

En frågeställning som diskuterats är vad som händer med jordens kvalitet och eventuell påverkan på växter som växer i jorden, om vattenverksslam blandas in i jord.

En artikel (Jonasson, 1995) som beskriver försök som utförts vid Sveriges Lantbruksuniversitet i Uppsala, redovisar analyser av fosfor i marken och odlingsförsök. Försök gjordes på sandjord med lågt pH (4,9) och lerjord med något högre pH (5,7). Vid försöken framkom att fosfor i marken binds vid tillförsel av vattenverksslam (aluminiumbaserat) och att pH-värdet i marken höjs. Odlingsförsök gav en positiv förändring, vilket bedömdes kunna bero på den pH-höjning som slamtilförseln medförde och det kväve som tillförs med slammet.

I en rapport från SLU (Jonasson, 1995) redovisas en litteraturöversikt kring inarbetning av vattenverksslam i odlad mark och resultat av försök. Litteraturöversikten redovisar sammanfattande resultat från olika studier och viktiga punkter som noteras är en entydig bild av att tillförsel av vattenverksslam binder fosfor och reducerar den växttillgängliga fosfor i marken. Resultat från tillväxtstudier är inte entydiga, det finns studier som visar på en negativ påverkan på tillväxt, men även resultat som visar på en positiv effekt vid låg inblandning av vattenverksslam (0,5-1%). De försök som redovisas i rapporten visade på mycket olika effekter på olika jordkvaliteter. Sur jord med slamtilfsats fick en tydlig förändring av kemiska och biologiska egenskaper. Slamtilfsats gav en pH-höjning som medförde en övergång av järn och aluminium i jorden till fast fas och en positiv effekt på tillväxt. I annan jordkvalitet gav slamtilfsats väldigt liten effekt på egenskaperna, förutom en minskning av den växttillgängliga fosfor.

I Connecticut i USA genomfördes odlingsförsök i jord (Bugbee, o.a., 1985) med inblandning av vattenverksslam (aluminiumbaserat). Resultat av försöksodlingarna vara att inblandning av vattenverksslam reducerade tillväxt i försöksodlingar utom i ett fall. Orsaken till minskad tillväxt angavs till minskad tillgänglighet på fosfor och undantaget förklarades med en positiv effekt beroende på förbättrad jordstruktur efter inblandning. Försök utfördes även med slamspridning i skogsmark. Detta medförde en pH-höjning (+0,5-1 pH-enheter), men ingen effekt på skogen noterades. Författarna till rapporten noterar dock att försök måste utföras under många år för att kunna utvärdera om det finns eventuella långtidseffekter.

I Newport News, Virginia, USA genomfördes 1989 spridning av vattenverksslam i skogsmark (Geertsema, o.a., 1994). När det gått 30 månader sedan spridningen av slam, utfördes analyser och utvärdering av markegenskaper och grundvattenkvalitet. Kopparhalten och kvävehalten (TKN) ökade i det översta jordlagret, då slammet hade förhöjda halter koppar och kväve. Men ingen urlakning av metaller observerades och ingen effekt på tillväxt av tallskogsplantor observerades.

Vid Norsborgs vattenverk utfördes 1998 försök (Blomberg, 1999) med spridning av vattenverksslam på åkermark. Olika gödselspridare provades med varierande resultat, men god spridning erhöles med en robust byggd spridare som hyrdes in av lantbrukare i trakten.

Studie kring spridning av vattenverksslam på åkermark har utförts vid SLU i Uppsala (Jonasson, 1995). Försöken visade att det inte var enkelt att erhålla en jämn spridning av slammet på jorden, och studie av tillväxt visade inte någon tillväxthämmande effekt. Tvärtom ökade tillväxten på ytor med de högsta givorna.

Effekter på dräneringsvatten från jord med tillförsel av vattenverksslam har studerats vid försök vid Norsborgs vattenverk i Stockholm. Slamtilleförsel reducerade läckage av mängden löst reaktivt fosfor, men partiklar som läckt ut har haft en högre fosforhalt.

Fosforläckage från odlade jordar med och utan tillförsel av aluminiumhaltigt vattenverksslam har studerats (Ulén, o.a.), med samma resultat som vid försöken vid Norsborg, dvs en minskning av läckage av löst reaktivt fosfor, men förhöjd förlust av partikelbunden fosfor i dräneringsvatten.

En studie av förändringar i matjorden efter tillsats av vattenverksslam från Norsborgs vattenverk har utförts av SLU (Ulén). Analyser utfördes 2011, mer än 10 år efter inarbetning av vattenverksslam. Resultaten var att jorden som tillförts vattenverksslam hade hög mullhalt, medan fosfortalet (P-AL) var mindre än hälften i jämförelse med yta som inte tillförts vattenverksslam. Fosfortalet är en analys och ett mått på mängden växttillgängligt fosfor i jorden.

I en sammanfattande rapport (Siman, o.a., 1999) kring forskning om användbarhet av vattenverksslam inom jord- och skogsbruk, redovisas olika aspekter som framkommit vid studier rörande inarbetning av vattenverksslam i jord:

I. Fosforbindning

Vattenverksslam har hög fosforbindande förmåga.

Vissa studier har gett fosforbrist efter slamtillförsel och vissa studier har inte påvisat någon fosforbrist.

II. Tungmetaller

Tillförsel av vattenverksslam kan ge en ökad halt av vissa metaller såsom koppar och nickel. Men vattenverksslam har normalt låga halter tungmetaller och slammet ger inte upphov till mobilisering av tungmetaller.

III. pH-höjning

Slamtillsats medför en pH-höjning i jorden.

IV. Markfysikaliska effekter

Inblandning av vattenverksslam kan förbättra markens fysikaliska egenskaper med ökad vattenhållande förmåga och god dränering.

V. Växtnäring

Lågt innehåll av växtnäringsämnen. Det finns organiskt bunden kväve och svavel som kan bidra till växternas näringsförsörjning.

VI. Kolloidernas rörlighet i mark

Kolloider i slammet kan bli mer mobila efter inbindning av fosfor.

En bild av kunskapsläget kring inarbetning av vattenverksslam i odlad mark och effekter på växtlighet kan sammanfattas i följande punkter:

- Tillförsel av vattenverksslam ger en pH-höjande effekt i marken, vilket kan ge en tydlig höjning av pH-värdet och stor påverkan på sur jord, men liten effekt på jord med högre pH-värde och högre buffrande förmåga. Denna pH-höjning kan ge en positiv effekt på växttillväxt på jordar med lågt pH-värde.
- Tillförsel av vattenverksslam kan medföra en gödsling med kväve, då det finns kväve bundet i slammet. Detta kväve utsöndras långsamt vid nedbrytning av organiskt material i slammet. Detta kan ge en positiv tillväxt.
- Tillförsel av vattenverksslam medför en inbindning av fosfor vilket minskar den växttillgängliga fosfor. Detta bedöms vara orsaken till försöksresultat med minskad tillväxt som rapporterats.

- Det finns resultat som visar både ökad tillväxt respektive minskad tillväxt efter tillförsel av vattenverksslam.
- Inga negativa effekter med näringsläckage eller metaller i dräneringsvatten har observerats.

Kunskapsläget är begränsat kring långtidseffekter på jord med inblandning av vattenverksslam. Jordens kvalitet har stor betydelse och det behöver göras långtidsförsök på olika typer av jordar.

Det är tänkbart att tillförsel av vattenverksslam kan vara positivt på vissa sura jordar eller för mullbildning, och att inbindning av fosfor kan kompenseras genom tillförsel av fosfor.

Det finns en effekt i naturen, där växter kan utsöndra ämnen som hämmar tillväxten av andra växter. Denna effekt benämns allelopati. Om sådana allelopatiska ämnen skulle kunna vara en del av vattenverksslam och ge en tillväxthämmande effekt på vissa växter är okänt. I arbetet med denna utredning har inga rapporter hittats gällande frågeställningen om en sådan effekt skulle kunna finnas med vattenverksslam.

Sammanfattningsvis bedöms kunskapsläget sådant att det behövs fler studier för ökad kunskap kring effekter på kort sikt och framförallt lång sikt vid inarbetning av vattenverksslam i odlad jord. Den kunskap som finns tyder på att det på vissa jordar kan vara markförbättrande, men att kompensationsgödsling med fosfor då kan behövas.

I Stockholm omhändertar en entreprenör (Colebring, 2022) vattenverksslammet (vattenverksmull) från Norsborgs vattenverk. Vattenverksslammet hämtas med lastbil och körs till tre gårdar i Södermanland för spridning på åkermark. Slammet läggs på hög och sprids 3 - 4 gånger per år under perioden april-oktober. Slammet sprids som jordförbättring för ökning av mullhalt. Gårdarna är växtodlingsgårdar utan djurhållning. Mottagandet av vattenverksslam är kostnadsneutralt för gårdarna och entreprenören transporterar och sprider slammet.

6.3.3 Inarbetning i mark för fosforfixering

Som tidigare angetts (se 6.1.3) har vattenverksslam en god fosforbindande förmåga. Det förekommer jordar med förhöjt fosforläckage via avrinning och erosion, som medför att fosfor tillförs vattendrag och sjöar och ger upphov till eutrofiering. Det kan finnas möjligheter att använda vattenverksslam som fosforfälla genom att använda slammet som material vid byggande av dagvattendammar och liknande anordningar.

Med spridning av kunskap om den fosforfixerande förmågan hos vattenverksslam, så kan detta material vara en tänkbar komponent i ett byggande som bidrar till minskad eutrofiering genom användning av vattenverksslam som är en biprodukt från dricksvattenberedning.

6.3.4 Anläggningsjord

Vattenverksslam från Lovöverket i Stockholm används för närvarande av entreprenören Econova (Rauke, 2022) för tillverkning av anläggningsjord. Slammet transporteras med lastbil med släp från vattenverket till en anläggning söder om Nora, Järle mosse, där Econova har en jordfabrik. Transportsträckan är ca 20 mil. Vattenverksslammet läggs ut i tunt lager och får torka och harvas regelbundet. På sommarhalvåret vid bra väder kan torktiden vara några dagar, medan på vintern får slammet ligga fram till våren. Slammet torkar till ca 40% TS. En hårdgjord yta ska byggas för att underlätta torkning och hantering. Det torkade vattenverksslammet blandas med andra massor, såsom sand, torv, fiberslam, schaktmassor mm för tillverkning av anläggningsjord. Inblandning är olika för olika produkter, men typiskt används ca 10 - 30 volym-% vattenverksslam. Econova hämtar ca 5500 - 6000 ton per år från Lovöverket och tillverkar anläggningsjord av detta. Utöver detta transporteras ca 1000 ton/år till två gårdar nära Stockholm, där slammet sprids på åkermark för mullförbättring.

6.3.5 Deponier

Vattenverksslam är ej lämpligt som material för tätskikt på deponier (Mizgalewicz, 2001). Deponering av vattenverksslam kan knappast anses som kontroversiellt eftersom materialet är harmlöst ur miljösynpunkt.

6.4 Diskussion kvittblivning

Det finns ingen generell väg för kvittblivning av vattenverksslam. De möjligheter som finns för användning av vattenverksslammet i andra applikationer i samhället bör prioriteras och utnyttjas till sin fulla potential. Exempel på detta är användning av vattenverksslam (järnbaserat) för reduktion av svavelväte i biogasanläggningar och användning av vattenverksslam för tillverkning av cement. En annan användning är tillverkning av anläggningsjord, vilket praktiseras på flera håll.

För de mängder vattenverksslam som inte kan användas i produktion, så återstår att placera materialet i samhället. Försiktighet bör tillämpas vid ev inarbetning på åkermark, med hänsyn till den fosforbindande förmågan. Däremot kan den fosforbindande förmågan utnyttjas för att binda rörlig fosfor som kan orsaka eutrofiering i sjöar, vattendrag och hav. Inblandning av vattenverksslam runt åkermark eller dammar kan vara en bra tillämpning. En möjlighet skulle kunna vara att lägga vattenverksslam på bottnar i sjöar och hav för att binda rörlig fosfor i bottensediment. En sådan tillämpning kräver dock först forskning och studier för att säkerställa att inga negativa effekter kan uppstå för bottenfauna.

Det ska poängteras att vattenverksslam inte är miljöfarligt. Det är naturliga ämnen som bildar ett material som tar plats, men som inte är skadligt för natur och människor. I princip är det frågan om en omflyttning av material i samhället. Var vattenverksslammet bäst kan placeras är en frågeställning som helt beror på lokala förutsättningar. En viktig aspekt är närheten till det vattenverk där vattenverksslammet produceras för att minimera transporter och därmed energiförbrukning.

7 Slamhantering vid vattenverk

7.1 SVOA

Nedanstående är baserat på intervjusamtal (Mellander, 2021).

7.1.1 Nuvarande hantering

SVOA i Stockholm har två stora ytvattenverk, Lovö vattenverk och Norsborgs vattenverk.

Fällningskemikalie vid vattenverken är aluminiumsulfat (ALG) och med vattenglas som flockhjälpmedel. Slammet avskiljs i sedimenteringsbassänger av typ Lovöbassänger. Slammet på översta planet återförs till flockning och slammet på nedre planet i Lovöbassäng skrapas till slamutlopp varifrån slammet pumpas till ett slamlager.

Det finns 2 centrifuger på varje vattenverk. Slammet avvattnas till 15-18%, medel ca 16,5%. När vattnet är kallt (vårvinter) blir TS lägre och tvärtom så blir TS-halten högre vid varmare vatten (sensommar).

Polymerförbrukningen är 6-7 kg/ton TS. och polymerdoseringen styrs på rejektvattenkvalitet.

Centrifuganläggning är robust, självgående och fungerar bra. Anläggningen ronderas dagligen. Nackdelar är strömförbrukningen och mycket buller, vilket ger dålig arbetsmiljö. Högre redundans i anläggningen, med ytterligare en centrifug hade varit önskvärt.

Avvattnat slam (vattenverksmull) transporteras med skruv från utmatning på centrifuger och läggs på hög utanför avvattningsanläggning.

Upphandlad entreprenör hämtar vattenverksmullen. Kontrakt gäller för en period på 5 år (3 år med möjlighet till 2 års förlängning) och det finns två kontrakt och två entreprenörer, en för Norsborgs vv och en för Lovö vv. Vattenverksmullen går idag till tillverkning av jordprodukter samt spridning på jordbruksmark. Ersättningen är ca 600 kr/ton avvattnad mull för avsättningen inom tillverkning av jordprodukter. Ersättningen är ca 660 kr/ton avvattnad mull för avsättningen inom jordbruksspridning. Vid den senaste upphandlingen av entreprenör, inkom 8 anbud med följande fördelning av applikation för omhändertagande:

- Spridning på jordbruksmark, 3st
- Jordtillverkning och andra metoder som ersätter naturresurser, 3 st anbudsgivare
- Förbränning, 1 st anbudsgivare
- Deponering, 1 st anbudsgivare

7.1.2 Genomförda och pågående försök

SVOA har gjort försök med inarbetning på egen mark. Det jordbruk som bedrivs på marken som ägs av SVOA är numera ekologiskt jordbruk, och då får ej mull som avvattnats med polyakrylamidbaserad polymer användas. Spridning på egen mark har därför upphört.

Det pågår försök med olika applikationer för användning av mull på mark på lokala jordbruk i Ekerö kommun.

SVOA har genomfört försök med samförbränning, vilket fungerade tillräckligt bra för att energiföretaget som genomförde förbränningsförsöket skulle lämna anbud för omhändertagande av mullen. Förbränningsanläggningar är ofta utformade för en viss vattenhalt i materialet som förbränns, där rökgasreningen fungerar sämre om materialet är för torrt. Mullens bidrag till processen skulle utifrån detta främst vara att kunna blandas in i torrare avfallsslag för att höja vattenhalten.

Försök med skruvpress fungerade ej bra.

Försök med filterpress gick bra, hög TS med membranfilterpress.

Försök med återvinning i samarbete med Hans Ulmert har genomförts, med en ny variant av ReAl-processen som Hans kallar "sockerormen". Processen fungerade bra, men förbrukar dock mycket syra.

Försök med tegeltillverkning planerades på tegelbruk i Enköping, men genomfördes ej. Kräver torkad och mald mull. Produktionen vid tegelbruket lades ned år 2020.

Försök med frysning har genomförts, långsam frysning gav god effekt på struktur och avvattning.

7.1.3 Planer

Ingen ändring i hantering av slammet och mullen planeras för närvarande.

7.2 Norrvatten

Nedanstående är baserat på intervjusamtal (Hugg, 2021).

7.2.1 Nuvarande hantering

Görvålverket är Norrvattens vattenverk. Råvatten tas från Mälaren och vattenverket är baserat på kemisk fällning med aluminiumsulfat.

Slammet sedimenterar i sedimenteringsbassänger och slamskrapor och slamsugutrustning ger ett relativt jämnt uttag av slam. Det finns även en bassäng av typ "pulsator", vilken ger ett tunt slam, och en bassäng med utrustning för flotation, vilket ger ett uttag av floterande slam. Slammet från sedimenteringsbassängerna, pulsator-bassäng och flotationsbassäng samlas i en slamtank och TS-halten blir ca 0,4 - 0,6%. Till detta slam doseras polymer och sedan leds slammet till två parallella lamellseparatorer, med flockningstank före inlopp, där slammet förtjockas till storleksordningen 2 - 3% TS.

22(31)

RAPPORT
2022-05-18

Det förtjockade slammet tas ut ur botten på lamellseparatorerna och leds till en slamtank, varifrån slammet pumpas till två centrifuger för avvattning, med polymertillsats före centrifugerna. Det avvattnade slammet har normalt en TS-halt på ca 17-18%, med tidvis upp mot 20% TS-halt. Rejektvatten från centrifugerna leds tillbaka till lamellseparatorerna. Det avvattnade slammet transporteras ut på en slamplatta.

Polymerförbrukningen på Görvålverket är ca 8-10 kg /ton TS

De problem som ibland uppstår i slambehandlingen är till största delen knutna till förtjockningens funktion och en resulterande ojämn slamkvalitet i slammet från förtjockningen som pumpas till centrifugerna. Igensättningar i slamuttag och flytslam är förekommande problem.

Slammet hämtas av entreprenör som använder slammet till jordförbättring och deponitäckning. Kostnad för kvittblivning av slammet är ca 470 kr/ton. Avtal med nuvarande entreprenör slöts år 2021 och kontraktstiden är 5 år (3 år + 2 års förlängning om avtalet inte sägs upp).

Vid upphandlingen inkom sex anbud med en spridning i anbudspriser på storleksordningen 470 - 600 kr/ton. Nuvarande entreprenör avsätter vattenverksslammet för deponitäckning och har angett en målsättning att även använda slammet som fosforfälla runt jordbruksmark.

7.2.2 Genomförda och pågående projekt

Inga försök med slamavvattning har utförts vid Görvålverket de senaste åren, men under 2019 utfördes avvattningsförsök med filterpress i samarbete med Stockholm Vatten och Avfall (SVOA) på deras anläggning i Norsborg.

7.2.3 Planer

Görvålverket ska byggas ut och i samband med utbyggnaden kommer avvattningen att ses över. Det är möjligt att ny avvattningsteknik kan övervägas och då kommer det att bli aktuellt med pilotförsök. Den teknik som bedöms kunna vara ett alternativ till centrifuger är filterpressar, som kan ge lägre polymerförbrukning och högre TS-halt.

7.3 Göteborg, Kretslopp och Vatten

Nedanstående är baserat på intervjusamtal (Engblom, 2021) samt rapport (Nordén, 2010).

7.3.1 Nuvarande hantering

De två stora vattenverken i Göteborg, Lackarebäcks vattenverk och Alelyckans vattenverk skickar båda sitt fällningsslam till avloppsreningsverket Ryaverket. Vattenverken använder aluminiumsulfat som fällningskemikalie. Lackarebäcks vattenverk

leder även filterspolvatten till spillvattennätet som leder till Ryaverket. På Alelyckans vattenverk leds filterspolvatten till Göta älv.

Ryaverket som drivs av Gryaab får ett tillskott av hydraulisk belastning med störst bidrag från filterspolvatten från Lackarebäcks vattenverk, och ett tillskott av slam och därmed ett tillskott av TS. Ca 10% av inkommande TS till Ryaverket härrör från vattenverksslam från vattenverken.

Vattenverksslammets bidrag av föroreningar till slammet vid Ryaverket är generellt en mindre andel än tillförd mängd TS. Parametrarna glödningsrest och kalium är de parametrar som står för en procentuellt större andel än totalbidraget TS (Nordén, 2010).

7.3.2 Genomförda och pågående projekt

Kretslopp och Vatten tog 2017 beslut om fortsatt central hantering. Då analysen som låg till grund för beslutet innefattade en rad osäkerheter, utarbetades en femårsplan för att utreda dessa. Under innevarande femårsperiod har en lokaliseringsutredning genomförts för att utreda ev lokalisering av slamhantering vid vattenverken. Vidare har slammets påverkan på reningsverket studerats i ett ex-jobb. Mycket av slammet avskiljs i försedimenteringen på reningsverket, men till exakt vilken grad var till stor del beroende av inkommande slammängd. Som tredje studie ska avsättning av vattenverksslam studeras.

7.3.3 Planer

Nuvarande bedömning är att den befintliga storskaliga slamhanteringen lokaliserad till reningsverket är en ändamålsenlig och effektiv slamhantering.

En ny femårsplan ska utarbetas under 2022.

7.4 Västerås, Mälarenergi

Nedanstående är baserat på intervjusamtal (Forsberg, 2021).

7.4.1 Nuvarande hantering

Råvatten till Hässlö vattenverk tas från Mälaren och fällningskemikalie är polyaluminiumklorid. Slammet som bildas i fällningsprocessen leds till avloppsreningsverket och mängden motsvarar ca 500 ton TS/år. Slammet från reningsverket är Revaq-certifierat, men under det senaste året har avloppsslammet vid flertal tillfällen inte klarat kraven på grund av för höga metallhalter. Då avloppsslammet har godkända värden sprids slammet på åkermark, men vid de tillfällen då metallhalterna varit för höga, har slammet istället eldats upp i förbränningsanläggning. Slammängden från reningsverket motsvarar ca 3000 ton TS/år.

7.4.2 Planerade försök

Mälarenergi planerar ett försök med att under en period upphöra med överledningen av vattenverksslam till avloppsreningsverket för att se vilka eventuella effekter det får på processen vid avloppsreningsverket. Försöksperioden avses att vara minst 5 månader.

Processen på avloppsreningsverket ska följas upp noggrant under försöksperioden.

7.5 Norrköping, NODRA

Nedanstående är baserat på intervjusamtal (Pettersson, 2021).

7.5.1 Nuvarande hantering

Borgs vattenverk ligger vid Motala ström som är råvattentäkt. Vattenverket svarar för huvuddelen av dricksvattenförsörjningen till Norrköping, med en dygnsproduktion på i medeltal ca 35 000 m³/dygn. Processen är baserad på kemisk fällning med sedimentering i bassänger med fyra våningar utan slamskrapor. Fällningskemikalie är aluminiumsulfat. Sedimenteringsbassängerna töms var 6-10 dag, och vattnet med slam leds då till en nybyggd rektangulär uppsamlingsbassäng, där slammet får sedimentera. I bassängen finns en slamskrapa, typ zickertskrapa, som skrapar slammet till en slamficka varifrån slammet pumpas i befintligt ledningsnät till avloppsreningsverket. Klarfasen i den nya uppsamlingsbassängen dekanteras och leds ut till Motala ström. Innan den nya uppsamlingsbassängen togs i drift (våren 2021), spolades slammet ut i Motala ström. Eftersom slammet nyligen börjat överledas till avloppsreningsverket, så kommer en studie och uppföljning av driften vid avloppsreningsverket att genomföras det kommande året.

7.5.2 Planer

Beroende på resultatet av försöksdrift med överledning av vattenverksslam till avloppsreningsverket, så kommer inriktning att väljas därefter. Om det blir aktuellt med avvattning och separat hantering av vattenverksslammet så kommer nya försök att utföras. En möjlighet som diskuterats är att lokalisera en slamavvattningsanläggning på annan plats, eftersom utrymmet är begränsat på vattenverket och för att minimera transporter till/från vattenverket.

7.6 Kungälv kommun

Nedanstående är baserat på intervjusamtal (Holmes, 2021).

7.6.1 Nuvarande hantering

Kungälv vattenverk är baserat på fällning på ultrafilter. Fällningskemikalie är polyaluminiumklorid, (Ekoflock 90), och doseringen är ca 1,7 mg/l Al³⁺. Retentatet från ultrafilter (steg 1) leds till spolavlopps-bassäng 1 och sedan till ultrafilter i ett andra steg (steg 2). Permeatet från det andra steget leds till inlopp och retentatet leds till spolavlopps-bassäng 2 och pumpas sedan till en lamellförtjockare. Klarfas från lamellförtjockare leds till recipient (Göta älv) och slammet samlas i en slambassäng innan

det pumpas till centrifug för avvattning. Slammet från lamellförtjockare har en TS-halt på <0,5% utan tillsats av polymer och ca 1% med dosering av polymer (3-4 kg /ton TS). En övergång till drift med dosering av polymer har skett under senare tid.

Avvattning i centrifug ger en TS-halt i slammet på ca 21% och polymerförbrukningen är ca 30 kg/ton TS. (katjonisk polymer). Rejektet leds till spolavlopps bassäng 2, dvs före lamellförtjockare. Det avvattnade slammet pumpas med en torrslampump av typ excenterskruvpump till en torrslamsilo med glidram för utmatning i botten. På tryckledning efter torrslampump sker tillsats av tryckluft.

När ingen polymer doserades före lamellförtjockare och slammet höll en TS-halt på 0,2 - 0,3%, så var centrifugen i drift kontinuerligt. Efter det att polymer börjat doseras före lamellförtjockning med högre TS-halt i det förtjockade slammet som följd, så är centrifugen i drift delar av dygnet som avsett.

Centrifugen spolas noggrant efter varje körning, vilket tar ca 30-60 minuter. Några ventiler har bytts till skjutspjällventiler och systemet har kompletterats med fler spolpunkter för spolning av rörledningar. Med noggrann spolning efter körningar så fungerar slamavvattningen i centrifugen bra.

Anläggningen för slamavvattning finns på vattenverket och hanteringen av slamanläggning sköts av vattenverkets personal.

Slamtransporter från vattenverket sker med tre containrar per transport, på lastbil med släp. Slammet deponeras på en deponi nära Vänersborg/Trollhättan som heter Heljestorp. Kostnaden för deponering är 550 kr/ton och till detta kommer kostnader för transporter (ca 6000 kr per transport), vilket totalt ger storleksordningen 750 kr/ton.

7.6.2 Planer

Försöken med polymerdosering före lamellförtjockare ska fortsätta med optimering.

Det finns planer på att studera eventuella alternativ för avsättning av slammet. Vad händer om 5-10 år? Finns det alternativ?

7.7 Norge

Nedanstående är baserat på intervjusamtal (Eikebrokk, 2022).

7.7.1 Nuvarande hantering

Koagulering och flockning med Aluminium (Al) eller Järn (Fe) är mycket vanligt i Norge. Nästan alla stora vattenverk använder koagulering. Bedömningsmässigt är mer än 50% av producerat dricksvatten behandlat genom koagulering.

Det finns ett undantag bland de större vattenverken och det är ett vattenverk i Stavanger som använder en processlösning med ozon + alkaliska filter + biofilter + UV, och med klor som reserv för desinfektion. Biofiltren är uppbyggda av "Filtralite" och granulerat aktivt kol.

Det finns 105 (år 2020) mindre vattenverk som använder membranfiltrering (nanofilter) som vattenbehandling.

Både Al och Fe används som koagulanter. Det finns en trend mot användning av järnbaserade kemikalier och då framförallt järnkloridsulfat.

En processlösning vid vattenverk som blivit vanlig och som får ökad användning är dosering av järnkloridsulfat för koagulering vid lågt pH, efterföljt av filtrering genom tremediafilter (Filtralite, sand, kalciumkarbonat), dvs kombinerat snabbfilter och alkaliskt filter. Bäckhöjd är typiskt 3 - 3,5 m. Det finns ca 50-60 vattenverk med denna processlösning.

Alkaliska filter släpper partiklar (rest av alkaliskt filtermaterial) vid backspolning som hamnar i spolavloppsvattnet och sedan normalt i vattenverksslammet.

Vattenverksslam från vattenverk behandlas vanligtvis genom gravitationsförtjockning.

Det finns några vattenverk med avvattning av vattenverksslam och de använder centrifug för avvattning.

I Oslo-området avsätts slammet till ett företag som använder vattenverksslammet för tillverkning av jordprodukter och för strukturförbättring av jord.

Flera vattenverk leder vattenverksslam till recipient eller till avloppsreningsverk.

I Norge är förtjockat vattenverksslam definierat som "processutsläpp", och kan ledas direkt till recipient om förhållanden tillåter det.

Avvattnat vattenverksslam ska som produkt klassificeras enligt "Gjødselvereforskriften" från Mattilsynet (motsvarande Livsmedelsverket). Produkter klassificeras i fyra olika klasser, 0, I, II och III, beroende på hur väl de uppfyller kvalitetskrav såsom innehåll av tungmetaller och hygienisk kvalitet. De flesta vattenverksslam i Norge uppfyller de högsta kraven (klass 0), och för de som hamnat i klass I så beror detta på att gränsvärden för någon eller några av tre metaller, nickel, zink och kadmium överstigits. Mattilsynet för register på godkända produkter som innehåller vattenverksslam. Det finns sex godkända produkter med vattenverksslam och dessa är alla jordprodukter.

Vattenverksslam baserat på järn har inte fått användning på biogasanläggningar i Norge.

7.7.2 Genomförda och pågående försök och studier

Det finns knappt några rapporter kring försök med behandling av vattenverksslam i Norge.

Det pågår ett projekt "SLAMiNOR" med ca 10-12 intressenter, som studerar slammängder, sammansättning och alternativ för användning av vattenverksslam.

Det har utförts försök i labskala hos en producent "Leca Norge AS" som tillverkar Leca-produkter och bränner lera. De finns intresse för att använda vattenverksslam, i första hand järnbaserade, för produktion av vissa produkter.

7.8 Internationellt övrigt

Ett projekt vid KTH i samarbete med Norrvatten år 2019 (Fredlund, o.a., 2019) utförde arbete för att kartlägga hur vattenverksslam hanteras i andra länder. Undersökningen gav viss information om hur vattenverksslam hanteras. Informationen är ofullständig men ger ändå en indikation på hantering i andra länder.

7.8.1 Finland

Fällningsslam från ytvattenverk skickas generellt till avloppsreningsverk.

7.8.2 Kanada

Ottawa Vattenverksslam leds till avloppsreningsverk

Toronto 2 vattenverk med avvattning i centrifuger och därefter deponering.

1 vattenverk som skickar till avloppsreningsverk

Vancouver Vattenverksslam används i cementtillverkning (1,5% inblandning)

7.8.3 USA

En rapport från EPA från 2011 (EPA, 2011) anger att bland 2151 vattenverk i USA, behandlas restprodukter från vattenverk med mekanisk avvattning på 9% av vattenverken. På 66% av vattenverken finns utjämning eller förtjockning i laguner, bassänger eller liknande. Övriga vattenverk har ingen behandling.

7.8.4 Nya Zeeland

I många fall avvattning i centrifug eller filterpress och generellt deponeras vattenverksslammet.

7.8.5 Australien

Sydney Slamlaguner och deponi.

Adelaide Avvattning i centrifug och filterpress och deponering respektive slamlaguner och deponering.

Brisbane Avvattning i centrifug och silbandspress och deponering respektive slamlaguner och deponering.

En studie från Australien (GHD, 2015) anger att vattenverksslam går till deponi (7 av 16 vattenverk), till avloppsreningsverk (1 av 16 vattenverk) och resterande lagras i anslutning till vattenverk eller sprider på mark.

7.8.6 Schweiz

Biel Vattenverksslam leds till avloppsreningsverk.

Lausanne Vattenverksslam leds till avloppsreningsverk.

7.8.7 Japan

En sammanställning från 2011 anger att ca 21% av producerat vattenverksslam i Japan deponeras och att ca 54% används för inarbetning i jord och jordtillverkning samt inblandning vid tillverkning av cement och keramik.

8 Fällningskemikalie och kvittblivning

Både fällningskemikalier baserade på järn och fällningskemikalier baserade på aluminium ger, i vattenbehandlingsprocessen vid ett ytvattenverk, ett slam som består av metallhydroxider och naturliga organiska ämnen.

Det absolut vanligaste är användning av fällningskemikalie baserat på aluminium och det är också den typ av vattenverksslam som det finns mest publicerat kring.

En sammanställning av tänkbara användningsområden och möjligheter för kvittblivning visas i Tabell 2 nedan.

Tabell 2. Sammanställning av möjligheter för kvittblivning och användning av vattenverksslam.

Användning/kvittblivning	Vattenverksslam (Al)	Vattenverksslam (Fe)
Biogasanläggningar	-	Ja
Tegelstenstillverkning	Ej Sverige	*
Fosforbindning i mark	Ja	Ja**
Fosforbindning i bottnar	Oprövat	Oprövat**
Cementproduktion	Ja	***
Inarbetning jordbruk	Försiktighet	Försiktighet
Anläggningsjord	Ja	Ja
Deponering	Ja	Ja

*Oklart

**Fosfor bundet med järn kan släppa vid syrefri miljö.

***Järn ingår i cement och det innebär att det eventuellt kan vara tillämpligt att använda järnbaserat vattenverksslam i cementtillverkning, men detta är oklart.

9 Referenser

- Agyin-Birikorang, Sampson, o.a. 2007.** Long-Term Phosphorus Immobilization by a Drinking Water Treatment Residual. *J. Environ. Qual.* 2007, Vol. 36.
- Ahmad, T, Ahmad, K och Alam, M. 2016.** Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. *Journal of Cleaner Production.* 2016, Vol. 124.
- Andersen, Sofia. 2006.** *Optimering av polymeranvändning vid slamavvattning på Norsborgs vattenverk.* u.o. : Göteborgs universitet, 2006.
- Berglund, Rune. 1992.** *Projektrapport FOAtox 1123.* u.o. : FOA, 1992.
- Bernt Ericsson, Hugo Karlsson. 1983.** *Rapport över försöksdrift med kammarfilterpress och membranfilterpress.* Stockholm : VBB, 1983.
- Blomberg, Johanna. 1999.** *Inarbetning av vattenverksslam i åkerjord - tillverkning av anläggningsjord.* Stockholm : Stockholm Vatten, 1999.
- Bugbee, Gregory J och Frink, Charles R. 1985.** *Alum Sludge as a Soil Amendment: Effects on Soil Properties and Plant Growth.* New Haven : The Connecticut Agricultural Experiment Station, 1985.
- Calmerman, Torun. 1993.** *Avvattning av vattenverksslam med dekantercentrifug vid Tingstäde vattenverk 7-20 September 1993.* 1993.
- Carolina Bergström, Felicia Burkrans, Linnea Lundqvist, Anna Nordin. 2020.** *Torkning av slam från dricksvattenproduktion.* Stockholm : KTH, 2020.
- Chen, HuXing, Ma, Xianwei och Dai, HengJie. 2010.** Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. *Cement & Concrete Composites.* 2010, Vol. 32.
- Colebring, Patrik. 2022.** *Segevik.* den 27 Januari 2022.
- Eikebrokk, Bjørnar. 2022.** den 10 Mars 2022.
- Eklund, Robert. 1998.** *Centrifugering av vattenverksslam.* u.o. : Stockholm Vatten AB, rapport nr 22, 1998.
- Engblom, Kajsa. 2021.** Göteborg : Intervju, den 22 Oktober 2021.
- EPA. 2011.** *Drinking Water Treatment Plant Residuals Management Technical Report.* u.o. : United States Environmental Protection Agency, 2011.
- Forsberg, Håkan. 2021.** Västerås : Intervju, den 01 November 2021.
- Fredlund, Victor, o.a. 2019.** *Hållbar hantering av vattenverksslam - en global kartläggning.* Stockholm : KTH, 2019.
- Geertsema, Wesley S, o.a. 1994.** Long-term effects of sludge application to land. *Journal AWWA.* 1994, Vol. 86, 11.
- GHD. 2015.** *100S-42 Alum Sludge Reuse Investigation Working Technical Report.* u.o. : Smart Water Fund, 2015.
- Heindl, Albert. 2016.** *Test report.* u.o. : Huber, 2016.
- **2017.** *Test report.* 2017.
- Holmes, Andrew. 2021.** Kungälv : Intervju, den 20 December 2021.
- Hugg, Frida. 2021.** Stockholm : Intervju, den 20 Oktober 2021.
- **2019.** *Avvattning av vattenverksmull.* Stockholm : KTH, 2019.
- Huser, Brian J och Köhler, Stephan J. 2014.** *Granskning av åtgärdsförslag för att minska internbelastningen av fosfor i Växjösjöarna.* Uppsala : Sveriges lantbruksuniversitet, Rapport 2014:7, 2014.
- Jonasson, Birgitta. 1995.** Användning av vattenverksslam i växtproduktion - ett miljövänligt alternativ? *VATTEN.* 1995, Vol. 51.
- **1995.** *Förstudie till fältförsök med vattenverksslam på bevuxen mark.* Uppsala : Sveriges Lantbruksuniversitet, 1995.
- **1995.** *Undersökning av vattenverksslams användbarhet på bevuxenmark - slutrapport.* Uppsala : Sveriges Lantbruksuniversitet, 1995.

- Kadir, Aeslina Binti Abdul och Rahim, Ahmad Shayuti Bin Abdul. 2014.** An Overview of Sludge Utilization into Fired Clay Brick. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Mining Engineering*. 2014, Vol. Vol 8, No 8.
- Karlholm, Ingeli. 2015.** *Avvattnings av vattenverksslam med geotextil*. u.o. : Norrköping Vatten och Avfall, 2015.
- **2015.** *Avvattnings av vattenverksslam med Volute*. u.o. : Norrköping Vatten och Avfall, 2015.
- **2016.** *Avvattnings av vattenverksslam med Volute*. u.o. : Norrköping Vatten och Avfall, 2016.
- Mellander, Mattis. 2021.** Stockholm : Intervju, den 15 Oktober 2021.
- Mizgalewicz, Margareta. 2001.** *Slam i mark- och anläggningsbyggande. Utredning: Tätskikt i deponier*. Stockholm : Stockholm Vatten, 2001.
- Nordén, Lars. 2010.** *Vattenverksslammets bidrag till föroreningshaterna i Ryaverkets slam, Gryaab rapport 2010:5*. Göteborg : Gryaab, 2010.
- Persson, Tobias, Lars, Månsson och Bohn, Irene. 2017.** *Vattenverksslam reducerar biogasens svavelväte,, Rapport 2017:344*. u.o. : Energiforsk, 2017.
- Persson, Tobias, Persson, Kenneth M och Åström, Jenny. 2021.** *Ferric oxide containing waterworks sludge reduces emissions of hydrogen sulfide in biogas plants and the needs for virgin materials*. u.o. : Preprint (www.preprint.org), 2021.
- Pettersson, Ämma. 2021.** Norrköping : Intervju, den 02 November 2021.
- Ramadan, Mohammed O, Fouad, Hanan A och Hassanain, Ahmed M. 2008.** Reuse of Water Treatment Plant Sludge in Brick Manufacturing. *Journal of Applied Sciences Research*. 2008, Vol. 4, 10.
- Rauke, Örjan. 2022.** *Econova*. den 27 Januari 2022.
- Reed, S, Bouzoun, J och Medding, W. 1986.** A rational method for sludge dewatering via freezing. *Journal WPCF*. 1986, Vol. 58, ss. 911-916.
- Schuster, Jakob och Persson, Kenneth M. 2008.** Supercritical Oxidation of Water Work Sludge from Ringsjöverket. *VATTEN*. 2008, Vol. 64.
- Shen, Cheng, Zhao, Yaqian och Liu, Ranbin. 2018.** Development of pellet-type adsorbent based on water treatment residual - Abstract. *Desalination and Water Treatment*. 2018, Vol. 112.
- Siman, Guyla och Sigrun, Dahlin. 1999.** *Vattenverksslams användbarhet inom jord- och skogsbruk*. Uppsala : Sveriges Lantbruksuniversitet, 1999.
- Thunberg, Andreas. 2010.** Slamavvattnings med Kemicond och hydrauliska kolvpressar på Käppalaverket. *VATTEN*. 2010, Vol. 66.
- **2022.** *VD*. den 1 april 2022.
- Ulén, Barbro och Etana, Ararso. Fosforläckage från odlade jordar efter tillsats av aluminiumhaltigt vattenverksslam**. u.o. : SLU.
- Ulén, Barbro. Pilotstudie av förändringar i matjorden efter tillsats av slam från Norsborgs vattenverk**. Uppsala : SLU.
- Wang, Changhui, o.a. 2022.** Drinking water treatment residue recycled to synchronously control pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons and phosphorus in sediment from aquatic ecosystems. *Journal of Hazardous Materials*. 2022, Vol. 431.
- Westrin, Ulf. 2021.** *Muntlig information*. den 06 09 2021.
- Zhao, Yaqian, o.a. 2016.** Using alum sludge for clay brick: an Irish investigation. *International Journal of Environmental Studies*. 2016, Vol. 73, 5.
- Öman, Johanna. 1998.** *Avvattnings av vattenverksslam med Lastapress - Pilotförsök vid Lovö Vattenverk hösten 1998*. u.o. : Stockholm vatten AB, 1998.