Examensarbete inom Kemiteknik

Grundnivå, 15 hp

Utvärdering av avvattningsegenskaper hos slam från dricksvattenproduktion

Jämförelse mellan befintlig och framtida process

HAMMNA EJAZ

EXAMENSARBETE

Högskoleingenjörsexamen
Kemiteknik

Titel:	Utvärdering av avvattningsegenskaper hos slam från dricksvattenproduktion- Jämförelse mellan befintlig och framtida process
Engelsk titel:	Assessment of sludge dewatering characteristics from drinking water production- Comparison between existing and future process
Sökord:	Flockning, mikrofilter, sedimentering, turbiditet, slam
Arbetsplats:	Norrvatten
Handledare på arbetsplatsen:	Mattis Mellander
Handledare på KTH:	Elisabet Brännvall
Student:	Hammna Ejaz
Datum:	2025-11-20
Examinator:	Elisabet Brännvall

TRITA – XXX-XXX 20XX:XX
Stockholm, Sverige 2024

www.kth.se

Sammanfattning

Rent dricksvatten är en grundförutsättning för hälsa och samhällsutveckling. Därav finns ett ständigt behov av effektiva och välfungerande system för vattenrening. Norrvatten är ett kommunalförbund som förser 14 medlemskommuner i Stockholmsregionen med dricksvatten. Norrvatten planerar att bygga ett nytt vattenverk där reningsprocessen skiljer sig från den befintliga. Båda typerna av reningsprocesser avskiljer alger och humusämnen från vattnet och genererar härigenom en restprodukt i form av slam. I det nya verket bildas slammet i stället genom fällning på membran, där uppkoncentrering av slammet sedan sker i ett separat steg med mikrofilter. I befintligt verk uppstår slammet huvudsakligen genom kemisk fällning och sedimentation. I Görvälnverkets slamavvattningsanläggning tillsätts polymer varefter slamströmmen uppkoncentreras med lamellförtjockare och därefter avvattnas med centrifuger. Eftersom befintlig slamavvattningsutrustning planeras att återanvändas för slammet från det nya verket undersöktes i detta examensarbete hur slam från mikrofilter (MF-slam) beter sig jämfört med slam från det befintliga verket.

Målen med examensarbetet är att bedöma hur befintlig avvattningsanläggning kommer fungera då det nya vattenverket ansluts, samt vilka anpassningar som kan behöva göras i avvattningsanläggningen eller det nya verket för att uppnå fullgod funktion kopplat till slamhanteringen.

Lösningsmetoder för examensarbetet omfattar litteraturstudie och praktiska försök med analyser baserade på utvärdering av slammens egenskaper vid fällning, flockning, sedimentation och avvattning. Bägarförsök genomfördes med polymer och polyaluminiumklorid (PACl) som flockningsmedel. Resultaten visar att slam från befintligt verk bildar större och mer sedimenterbara flockar än MF-slam, vilket stöds av dess lägre turbiditet i klarfasen samt dess högre torrhalt i filtrerad slam, detta tyder på bättre avvattningsegenskaper. Försök med PACl gav kompaktare slam men begränsad turbiditetssänkning i klarfasen efter sedimentering, troligen på grund av låg alkalinitet i vattnet. Flockstyrkeanalyser indikerade att polymerer förbättrar flockarnas stabilitet vid pumpning. Utan polymer förekom en liten ökning på turbiditeten på flockarna efter pumpning, vilket tyder på att flockarna sönderföll i en liten utsträckning. Flockstyrkan för slam från det befintliga verket är högre än för MF-slammet eftersom dess lägre turbiditet i klarfasen. Flockarna i slammet från befintliga verket är mer motståndskraftiga mot mekanisk påverkan och bibehåller sin struktur vid pumpning till skillnad från flockarna i MF-slammet. Befintliga centrifuger kan fortsatt användas vid hantering av MF-slam på grund av den goda flockstyrkan som bevisas av den låga skillnaden i turbiditet på flockarna före och efter pumpning. MF-slam utan polymer sönderföll i liten utsträckning efter pumpning. Vid polymertillsats ökade flockarnas mekaniska hållfasthet och därmed kan MF-slammet, trots sin mindre partikelstorlek centrifugeras effektivt om polymerdoseringen anpassas. Vid användning av befintliga centrifuger kommer sämre avvattning ske på grund av slammets lägre torrhalt.

Slutsatsen är att befintlig slamavvattningsprocess inte fungerar tillfredställande för MF-slam eftersom den höga turbiditeten i klarfasen och låga torrhalten i MF-slammet. Åtgärder behövs för att säkerställa effektiv och hållbar drift i det nya verket. MF-slam kräver ändringar som till exempel reducering av flödet för att öka partiklarnas sjunktid alternativt justering av dos/polymerval för att uppnå god flockning. I framtiden behövs tester utföras med andra polymerer i labbskala innan nya verket ansluts till slamavvattningsanläggningen. Användning av befintliga centrifuger är godtagbart på grund av god flockstyrka.

Abstract

Clean drinking water is an essential requirement for health and social progress. Thus, there is a constant need for effective and well-functioning system for water treatment. Norrvatten is a municipal association which provides 14 municipalities in the Stockholm region with drinking water. Norrvatten is planning to build a new water plant where the cleaning process differs with the existing one. Both types of cleaning processes differ algae and humic substances from the water and generate thereby a by-product in the form of sludge. In the new water plant the sludge is made by precipitating by membrane instead, where the sludge is upconcentrated afterwards in a separate step with microfilter. In Görvälnverket the sludge dewatering equipment polymer is added whereafter the sludge flow is upconcentrated with lamella separators and thereafter dewatered with centrifuges. Since the existing sludge dewatering equipment is planned to be reused for the sludge from the new plant, this thesis inspects how sludge from microfilter (MF-sludge) behaves compared to sludge from the existing plant.

The goal with the thesis is to assess how existing dewatering facility will function when the new plant connects, and which adjustments that will be needed in the dewatering facility or the new plant to reach fully function related to the sludge treatment.

Solution methods for the thesis consist of literature study and practical experiments with analyses based on inspection of sludge's characteristics during precipitation, floccing, sedimentation and dewatering. Jar tests were conducted with polymer and polyaluminiumchloride (PACl) as flocculant. The results show that sludge from existing plant forms larger and more sedimenting prone flocs than MF-sludge, which is supported by its lower turbidity in the clear phase and its lower dry substance content in filtrated sludge, this indicates better dewatering characteristics. Experiment with PACl bestowed more compact sludge but limited turbidity decrease in the clear phase after sedimentation, likely due to low alkalinity in the water. Floc strength analyzations indicated that polymer improves the floc's stability during pumping. Without polymer there was a small increase in turbidity of the flocs after pumping, which points to the floc's fragmentation to a small extent. The floc strength for sludge from the existing plant is higher than for the MF-sludge because of its lower turbidity in the clear phase. The flocs in the sludge from the existing plant are more resilient against mechanical influence and keep their structure while pumping compared to the flocs in MF-sludge. Existing centrifuges can continuously be used for management of MF-sludge because of its good floc strength which is proven by the low difference in the turbidity in the flocs before and after pumping. MF-sludge without polymer fragmented to a small extent after pumping. In case of adding polymer the flocs mechanical strength increased, thereby the MF-sludge although its smaller particle size, can be centrifuged efficiently if the polymer dosage can be adjusted. In using the existing centrifuges worse dewatering will occur because of the sludge's lower dry substance content.

In conclusion, the existing sludge dewatering process does not work sufficient enough for MF-sludge because of the high turbidity in the clear phase and high dry substance content in the MF-sludge. Actions are needed to assure an effective and sustainable drift in the new plant. MF-sludge needs changes such as examples reduction of the flow to increase the particles sinking time or adjustments of dosage/polymer choice to reach a good level of floccing. In the future tests need to be conducted with other polymers in laboratory scale before the new plant is connected to the sludge dewatering facility. Usage of existing centrifuges is acceptable because of high floc strength.

Innehåll

1 Inledning 1
2 Teori 2
2.1 Föroreningar i råvatten 2
2.2 Reningsprocess av dricksvatten 2
2.2.1 Befintligt verk- dagensreningsprocess 2
2.2.2 Framtida verk- framtida reningsprocess 3
2.3 Slamavvattning 3
2.3.1 Flockstyrka 4
2.3.2 Turbiditet 5
2.3.3 Centrifugering 5
3 Metod 6
3.1 Provtagning 6
3.2 Fällning 7
3.3 Flockning 8
3.4 Analyser 8
3.4.1 Bestämning av TS-halt 8
3.4.2 Analys av slammets sedimenterbarhet 9
3.4.3 Filtrering av klarfas och flockulerat slam 10
3.4.4 Flockstyrka 10
4 Resultat 11
4.1 Slammets sedimenterbarhet 11
4.2 Analys av sedimenterat slam 14
4.3 Test på flockstyrka 15
5 Diskussion 17
5.1 Effekt av polymerdosering 17
5.2 Jämförelse mellan polymer och PACl 18
5.3 Flockstyrka vid pumpning 18
5.4 Felkällor 19
5.4.1 Metodutveckling 19
6 Slutsats 21
7 Referenser 22

1 Inledning

Rent dricksvatten är en grundläggande förutsättning för liv, en källa för god hälsa och en gemensam resurs för hela mänskligheten. Därav finns ett ständigt behov av effektiva och välfungerande system för vattenrening. Föroreningar i råvatten såsom organiskt material och mikroorganismer måste effektivt avlägsnas för att säkerställa vattenkvalitet och hälsa hos konsumenter. Vattenreningsprocessen generar däremot också restprodukt i form av slam, vars hantering är viktigt för såväl ekonomi som miljö. En viktig aspekt för hållbar utveckling inom vattenrening är slamavvattningen, där målet är att minska slammets vatteninnehåll vilket underlättar vidare transport, behandling och potentiell återanvändning, till exempel som biobränsle eller gödningsmedel.

Norrvatten är ett kommunalförbund som förser 14 medlemskommuner i Stockholmsregionen med dricksvatten. Norrvatten planerar att bygga ett nytt vattenverk intill det befintliga vid Görvälnverket för att möta den ökade efterfrågan på dricksvatten i regionen. En pilotanläggning finns på plats i Görvälnverket och motsvarar det nya verkets reningssteg. I pilotanläggningen ingår ultrafilter (UF) och mikrofilter (MF), där råvatten behandlas först genom UF, backspolvatten från UF leds vidare till MF, vilket i sin tur genererar slam. Pilotanläggningen möjliggör utvärdering av nya processen i mindre skala innan implementering.

Det slam som genereras från MF skiljer sig potentiellt från slammet som produceras i den befintliga processen. Slammet från befintlig process kommer från sedimentationsbassänger och flotation. De två typerna av slam undersöks och jämförs eftersom befintlig slamavvattningsutrustning, bestående av lamellförtjockare och centrifug, planeras att användas även för det nya slammet.

Syftet med detta examensarbete är att undersöka och utvärdera slammet från mikrofilter i den nya vattenverksprocessen samt jämföra dess egenskaper med slammet från den befintliga processen. Examensarbetet fokuserar på slammets beteende vid pumpning, flockning, sedimentation och avvattning. Genom att identifiera skillnader mellan de två slamtyperna ska arbetet bedöma om befintlig avvattningsutrustning är lämplig eller om förändringar krävs för att säkerställa en effektiv och hållbar slamhantering. Om behovet av anpassningar identifieras tidigt skapas bättre förutsättningar att kunna planera och vidta lämpliga åtgärder, vilket är såväl ekonomiskt som ekologiskt fördelaktigt.

Målen med examensarbetet är att bedöma:

- Hur befintlig avvattningsanläggning kommer fungera då det nya vattenverket ansluts.
- Vilka anpassningar som kan behöva göras i avvattningsanläggningen eller det nya verket för att uppnå fullgod funktion kopplat till slamhanteringen.

För att uppnå dessa mål kommer praktiska försök att utföras för att identifiera skillnader mellan slam från befintligt respektive det planerade nya vattenverket. Försöken går ut på att se hur slammet beter sig vid pumpning med excenterskruvpump, flockning med fällnings-kemikalier, polymer eller poly-aluminiumklorid, PACl. Dessutom kommer sedimentering och avvattning genom centrifugering att undersökas.

Avgränsningar i examensarbetet innebär att säsongsvariationer inte beaktas och att fullskaliga försök inte genomförs.

2 Teori

Relevant teori för examensarbete består av föroreningar i råvattnet, reningsprocessen och slamavvattningsprocessen.

2.1 Föroreningar i råvatten

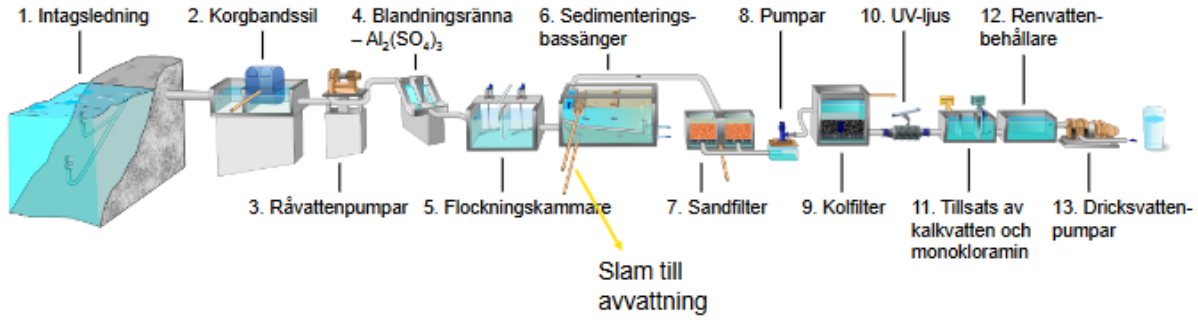
Norrvatten använder Mälaren som råvattentäkt för dricksvattenproduktion. Eftersom Mälaren innehåller flera olika föroreningar som utgör en risk för vattenkvaliteten, krävs anpassade reningsmetoder. Vattnet innehåller naturligt organiskt material samt humusämnen [1], dessa avlägsnas genom kemisk fällning. Halten organiskt material har ökat i Mälaren, detta motiverar undersökning av hur fällningsprocessen kan förbättras för att säkerställa en effektiv reduktion av humusämnen.

2.2 Reningsprocess av dricksvatten

Föroreningarna i råvatten renas i Görvälnverket enligt det befintliga verkets reningsprocess och den framtida verkets reningsprocess.

2.2.1 Befintligt verk- dagensreningsprocess

I norrvatten renas råvatten i det befintliga verket genom flera steg: korgbandsil, blandningsränna med tillsatts av flockningskemikalie (polymer), flockningskammare, sedimenteringsbassäng, sandfilter, kolfilter, UV-ljus samt tillsatts av kalkvatten och monokloramin [2], se Figur 1 [3].



Figur 1. Flödesschema för det befintliga verkets reningsprocess [3].

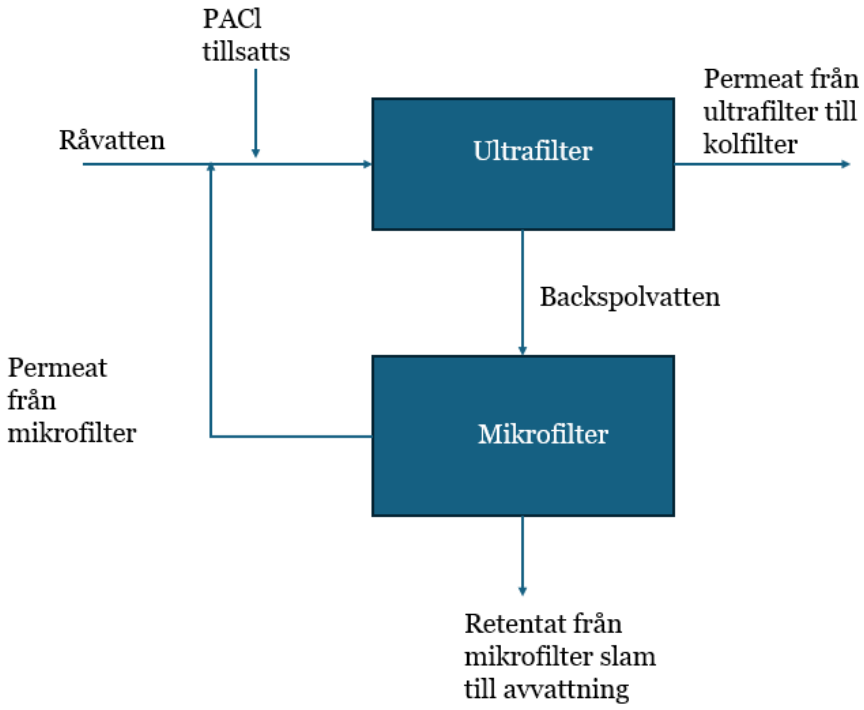
Först tas råvatten upp från två varierande intagsdjup beroende på årstid och vattnets kvalitet. Sedan förs vattnet igenom en korgbandsil för att avlägsna till exempel fisk och alger. Vattnet pumpas därefter till en blandningsränna där tillsatts av aluminiumsulfat utförs. Efter kemikalietillsatts krävs det en flockningskammare med omrörning så aluminiumsulfatet bildar flockar. En liten mängd natriumsilikat tillsätts för att öka flockarnas storlek.

Flockarna behandlas i sedimenteringsbassänger där de sjunker till botten genom sedimentering, avlägsnas via flotation med en skrapa eller samlas från en pulsator. Efter sedimentering behandlas vattnet vidare med sandfilter och resterande flockar avlägsnas. Det klara vattnet pumpas till kolfilter för att hantera lukt- och smakstörande ämnen. Kolfiltret består av 2,5 meter tjocka biofilter av granulerat kol. Därefter desinficeras vattnet med UV-ljus i UV-reaktorer. För att justera pH-värdet tillsätts kalkvatten, vilket gör vattnet svagt basiskt och därmed minskar risken för korrosion i ledningsnätet. Slutligen tillsätts monokloramin för att förhindra bakterietillväxt i ledningsnätet. Därav fås rent dricksvatten.

2.2.2 Framtida verk- framtida reningsprocess

Reningsprocessen för framtida verket inkluderar stegen ultramembranfiltrering och mikrofiltrering. Både UF och MF tillhör gruppen tryckdrivna membranprocesser [4]. Dessa fungerar genom att vattnet pressas genom ett semipermeabelt membran, där endast partiklar mindre än membranets porer kan passera. Större partiklar kvarhålls. Den koncentrerade lösningen som stannar kvar kallas retentat, och den utspädda som passerar genom membranet kallas permeat. Skillnaden mellan ultrafilter och mikrofilter är molekylstorleken på de avskilda ämnena. För ultrafilter är molekyldiametern 0,001–0,1 mikrometer, medan mikrofilter har en molekyldiameter på 0,2–10 mikrometer [4].

Processen inleds med att råvattnet reagerat med PACl passerar genom ett ultrafilter (UF). Det vatten som används för att rengöra ultrafiltret, det så kallade backspolningsvattnet, leds vidare till ett mikrofilter (MF). Mikrofiltret används för att uppkoncentrera slamströmmen eftersom befintlig slamavvattningsanläggning inte kan hantera så stora flöden som ultrafiltrets backspolning genererar. Permeatet från mikrofiltret återförs till ultrafiltret, medan permeatet från ultrafiltret går vidare till kolfilter. Flödesschema för pilotanläggningen som illustrerar steg i reningsprocessen i framtida verket visas i Figur 2

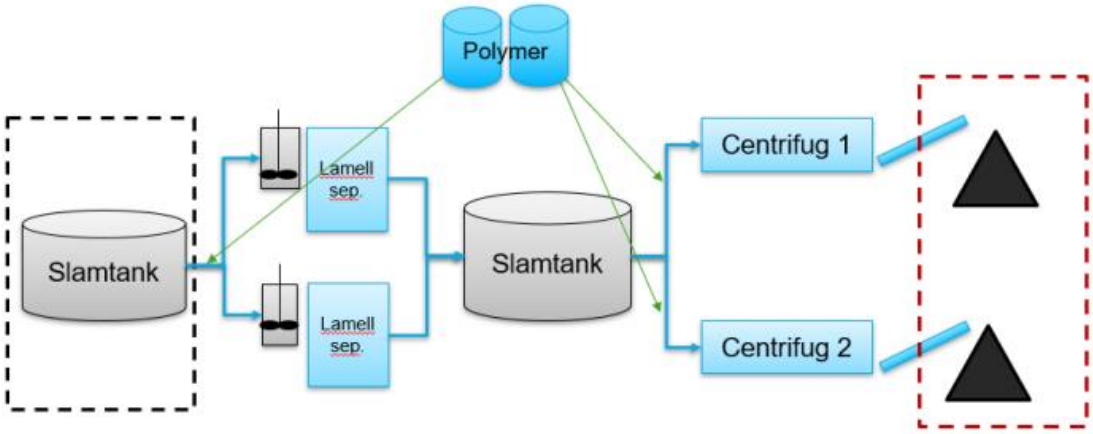


Figur 2. Flödesschema för pilotanläggningen [3].

2.3 Slamavvattning

Slam från reningsstegen sedimentationsbassäng förs till avvattningsanläggning. I dagsläget behandlas avvattning av slam vid Görvälnverket i flera steg: uppsamling i tank, polymertillsatts, lamellförtjockare och centrifuger. Polymertillsatts utförs med katjonisk polyakrylamid (PAM) Superfloc C-490-serien. Det inkommande slammet från sedimenteringsbassäng och flotation samlas i en slamtank, varifrån det fördelas till två parallella flöden med lamellförtjockare. Innan slammet når lamellförtjockarna sker en initial dosering av polymer. Därefter leds det förtjockade slammet vidare till en sekundär slamtank, följt av ytterligare polymertillsats innan det slutligen separeras i två centrifuger för vidare hantering.

Figur 3 visar en schematisk översikt av avvattningsprocessen vid Görvälnverket. I det nya vattenverket kommer även slam från mikrofilter att genomgå avvattningsprocessen som visas i Figur 3.



Figur 3. Aktuell flödesschema för avvattningsprocess vid Görvälnverket [3].

Den första doseringen av polymer sker före lamellförtjockarna. I slutet av processen, inför centrifugering, tillförs ytterligare polymer för att förbättra avvattningen. Den sammanlagda polymerdoseringen uppgår till cirka 2 g polymer/kg TS (torrsubstans).

2.3.1 Flockstyrka

Bedömning av flockarna i slam från befintligt verk och nytt verk som skapas av tillsatts med polymer är essentiellt för att förstå hur processen påverkar flockarna. Flockstyrka definieras som flockars förmåga att motstå mekaniska krafter utan att brytas ned [5]. Flockarnas styrka beror på flera faktorer, inklusive flockarnas storlek, struktur samt bindningstyper. Flockbildning är en dynamisk process där två konkurrerande mekanismer sker samtidigt: sammanslagning och sönderfall [5]. Sammanslagning av kolloidala partiklar sker genom neutralisering av ytladdning och genom att bindningskrafter drar partiklarna till varandra. Sönderfall uppstår när mekanisk påverkan bryter sönder flockar. Vid en given skjuvhastighet som beror av omrörning och viskositet etableras en jämvikt mellan de två mekanismerna, där flockarna når en fast storlek. Denna jämviktsstorlek är starkt beroende av flockarnas intermolekylära bindningar. Flockstorlek kan därför användas som en indirekt indikator på flockstyrka [5]. Större flockar tenderar att vara mer ömtåliga, medan mindre flockar ofta uppvisar högre mekanisk hållfasthet. Valet av flockuleringsmedel, som typ och dos av polymer eller metallbaserade fällningskemikalier, påverkar både initial flockbildning och flockstyrka [5]. Flockuleringsmedel fungerar genom två steg, få kolloidala partiklar att kollidera via neutralisering av deras ytladdning så att de inte längre repellerar varandra samt att partiklar fastnar vid kollision. Överdosering av flockuleringsmedel leder till övermättnad och restabilisering av partiklar, det vill säga partiklarna blir positivt laddade och återigen repellerar varandra. En bra flock bör vara tillräckligt stor för att sedimentera eller filtreras effektivt men samtidigt tillräckligt stark för att klara mekanisk påverkan från exempelvis pumpning eller omrörning.

Bedömning av flockstyrka kan göras genom olika metoder, till exempel genom mätning av flockstorlek före och efter att flockar utsätts för skjuvning samt genom bildanalys där förändringar i struktur och partikelaggregat analyseras visuellt. I enlighet med [5] är en sådan visuell och kvantitativ bedömning ett giltigt tillvägagångssätt för att utvärdera flockarnas hållfasthet och sönderfallstendenser. I vatten- och avloppsbranschen saknas allmänt vedertagna standardmetoder för att bedöma flockstyrka, därav utfördes metodutveckling i examensarbetet.

2.3.2 Turbiditet

Sedimenteringsförmågan på flockarna undersöks genom till exempel mätning av turbiditet under sedimentation. Turbiditet mäts i enheter av NTU (Nephelometric Turbidity Units) eller FTU (Formazin Nephelometric Units) och är ett mått på hur mycket ljus som sprids av partiklar i en vätska. Det är en indikator på partikelkoncentration i klarfasen [6]. Turbiditet är en metod som är känslig för närvaro av små, oönskade partiklar som annars är svåra att upptäcka visuellt [7]. Låga turbiditetsvärden tyder på effektiv sedimentation. Hög turbiditet innebär hög partikelhalt, vilket signalerar sämre flockning och sedimentation. Genom att plotta turbiditet mot tid kan den fördelaktiga polymerdosen identifieras (lägsta turbiditet värde) och sedimentationshastigheten kan erhållas från lutningen på kurvan.

2.3.3 Centrifugering

Efter flockning och sedimentering används ofta centrifugering som ett mekaniskt steg för att minska vattenmängden i slam. En centrifug fungerar genom att ett roterande kärl eller trumma snurrar med hög hastighet, vilket skapar en centrifugalkraft som är starkare än gravitationen [8]. I praktiken innebär detta att flockarna, som annars skulle sedimentera långsamt under gravitation, snabbt pressas ut mot centrifugens yttervägg. Enligt tidigare studie [9] kräver centrifugering flockar med hög mekanisk hållfasthet för att de ska kunna bibehålla sin struktur vid de höga skjuvkrafter som uppstår i centrifugen. Svaga flockar kan brytas ned under centrifugeringsprocessen. Detta leder till att mycket av det partikulära materialet inte avskiljs, utan medföljer rejektvattnet. Vatteninnehållet i det avvattnade fasta materialet blir därmed betydligt högre och avvattningen blir försämrad. Valet av polymer (typ och dos) har därför dubbel betydelse, dels för att bilda flockar med god sedimenteringsförmåga, dels för att säkerställa flockstruktur som klarar centrifugalkrafterna utan att brytas sönder. Större flockar ger snabbare sedimentering [7].

3 Metod

Praktiska försök genomfördes med hjälp av bägarförsök på två typer av slam: slam från mikrofilter (MF-slam) vilket tillhör den framtida processen samt slam från det befintliga vattenverket. Totalt genomfördes tre bägarförsök: ett med slam från befintligt verk med tillsatt polymer, samt två bägarförsök med MF-slam där polymer respektive polyaluminiumklorid (PACl) tillsattes. Första doseringen av polymer i Görvälnverket sker före lamellförtjockarna och ligger på 0,85 g polymer/kg TS. Denna dosering har fungerat som en utgångspunkt i de bägartester som redovisas i senare kapitel, 3.2 Fällning. Syftet har varit att efterlikna verkliga driftsförhållanden och därigenom uppnå representativa resultat.
Analys av flockstyrka utfördes för fyra olika slamprover, före samt efter pumpning på flockad och oflockad MF-slam respektive slam från befintliga verket.

3.1 Provtagning

Slamprover från det befintliga verket uppsamlades via ett uttag placerad före lamellförtjockarna i befintlig slamavvattningsanläggning. MF-slamprover uppsamlades från ett uttag placerad efter mikrofilter i pilotanläggingen, provtagning utfördes efter att piloten hade varit i drift under en hel dag. Slamprov av MF-slam och slam från befintliga verket samlades var för sig inför varje bägarförsök i en dunk, se Figur 4 som visar ett exempel på dunken, och omskakades manuellt i 10 sekunder för att säkerställa homogen fördelning av partiklar innan slammet behandlades för fällning.

Figur 4. Uppsamlat prov.

3.2 Fällning

Försök genomfördes både med polymer och med PACl som fällningskemikalier. Fällning utfördes för bägarförsök och för analys av flockstyrka. För bägarförsöken fördelades 800 ml homogeniserad slam från dunken till varje bägare. Varje bägare sammankopplades med utrustningen Flockulator 250, se Figur 6.

Figur 6. Uppställning av bägarförsöket under fällning och flockning.

Vid bägarförsök med MF-slam tillsattes polymer med milliliterpipett i volymen 2; 2,5; 3,8; 5,1 och 5,8 ml, med stigande dosering från bägare 1–5.

Vid bägarförsök med slam från befintliga verket och polymer upprepades fällningen med volymen 1,4; 1,7; 2,6; 3,6 och 4 ml.

Vid bägarförsök med MF-slam och PACl upprepades fällning med volymen PACl 40, 50, 60, 80, 90 ml, PACl tillsattes med mikroliterpipett. Försöket med PACl utfördes för att undersöka om ytterligare tillsats av PACl kan skapa bättre flockar för att underlätta MF-filtreringen.

Den uppmätta TS-halten användes för att beräkna polymer- och kemikaliedoser enligt ekvation 1.

$$P_{Dos}[\frac{g\ polymer}{kg\ TS}] = \frac{V_p \cdot \rho_p \cdot C_p}{V_s \cdot \rho_s \cdot C_s} \qquad (1)$$

P_{Dos}= polymerdos [g polymer/kg TS]

V_p= volym polymer [l]

ρ_p= densitet polymer [g polymer/l]

C_p= koncentration polymer [-]

V_s= volym slam [l]

ρ_s= densitet slam [kg slam/l]

C_s= TS-halt i slam [kg TS/kg slam]

Vid analys av flockstyrka utfördes fällning på liknande sätt men volymen polymer som tillsattes varje bägare var 5,8 ml polymer och fällning utfördes på totalt 11,2 liter.

3.3 Flockning

Efter tillsats av fällningskemikalie fick slammet flockulera enligt ett blandningsförfarande bestående av 1 minut snabb omrörning vid 200 rpm följt av 15 minuter långsam omrörning vid 30 rpm.

Vid analys av flockstyrka genomfördes flockning på liknande vis men med endast 1 minut snabb omrörning vid 200 rpm. Innehållet från varje bägare samlades därefter i en dunk.

3.4 Analyser

Torrhalt bestämdes på slam från befintligt verk och MF-slam. De behandlade slamproverna analyserades med avseende på torrhalt, turbiditet för kvalitet av klarfas, filtrering och flockstyrka.

3.4.1 Bestämning av TS-halt

Torrsubstanshalten (TS-halt) i slammet bestämdes genom att 5 g slam från uppsamlingsdunken vägdes och analyserades med en HE53 Moisture Analyzer, se Figur 5.

Figur 5. Utrustning för mätning av TS-halt.

3.4.2 Analys av slammets sedimenterbarhet

Kvalitet av klarfas bestämdes genom mätning av turbiditeten. Efter omrörning lyftes omrörarna försiktigt. En slang fixerades i varje bägare med intaget placerat 200 ml under vätskeytan. Från varje bägare togs prover ur klarfasen vid 0, 5, 10, 20 och 30 minuter sedimenteringstid. Klarfasprover på 25 ml togs med en spruta kopplad till slangen, se Figur 7.

Figur 7. Uppställning vid provtagning av klarfasprover.

Sprutan byttes mellan varje provtagning för att undvika kontaminering. Proverna från sprutan överfördes till 50 ml falkonrör, se Figur 8.

Figur 8. Uppställning av behandling av klarfasprover.

Proverna i falkonrör förvarades i kylskåp fram tills analys som utfördes med analysinstrumentet ”Turb 750 IR” på Norrvattens laboratorium.

3.4.3 Filtrering av klarfas och flockulerat slam

Efter sedimentering filtrerades innehållet i varje bägare för att bestämma mängden kvarvarande massa. Filtreringen utfördes med ett kaffefilter, som fästes ovanpå en bägare med tejp, se Figur 9. Filtreringen pågick under 5 minuter. Filterkakan vägdes och massan antecknades.

Figur 9. Uppställning för filtrering av klarfas och flockulerat slam.

3.4.4 Flockstyrka

Slamprover av 12 liter från både mikrofiltret och det befintliga verket pumpades genom en excenterskruvpump, se Figur 10. Även 11,2 liter av flockad slam från mikrofilter och det befintliga verket pumpades genom samma uppställning.

Figur 10. Uppställning av pumpen inkluderande fastmonterad inmatingsbehållare och hink för uppsamling av utmatning.

Prover togs både före samt efter pumpning och samlades i separata plastflaskor. Flockstyrka analyserades med turbiditetsmätning på själva slammet och mikroskopering. Bilder på flockstrukturen av utspridda flockar dokumenterades med en digital kamera genom okularet.

4 Resultat

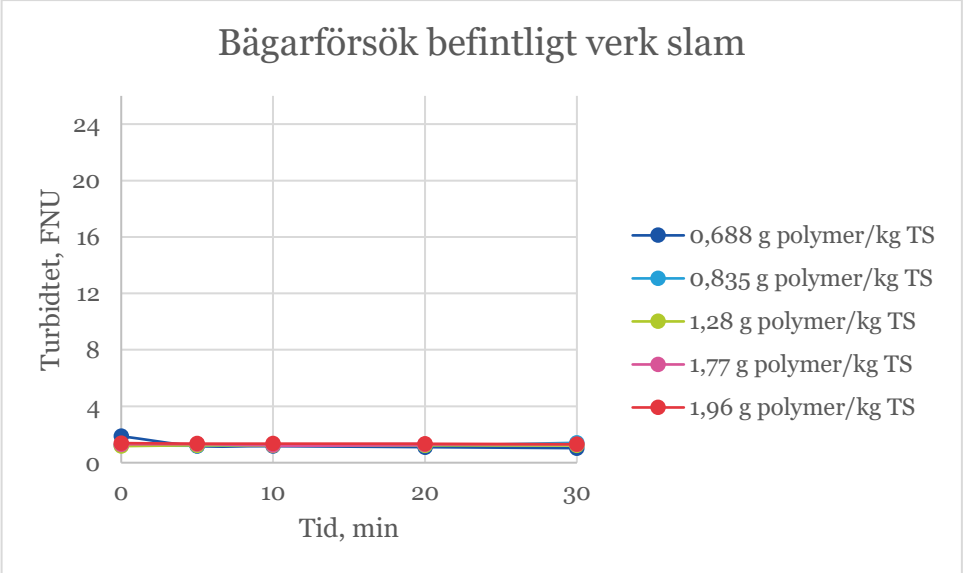
Resultat visas i form av bilder samt turbiditetskurvor och stapeldiagram. TS-halt analysen visade att slam från det befintliga verket erhöll en TS-halt på 0,28%. MF-slammet erhöll en högre halt 0,4% samt 0,88% beroende på provtillfälle.

4.1 Slammets sedimenterbarhet

Figur 11 visar slam från befintliga verket efter 30 minuters sedimentering efter polymer tillsattes i olika doser.

Figur 11. Bägarförsök med slam från befintligt verk med TS-halt 0,28% samt polymerdoser från vänster till höger: 0,688; 0,835; 1,28; 1,77; 1,96 g polymer/kg TS.

Turbiditet i klarfasen för respektive dos över tid presenteras i Figur 12.

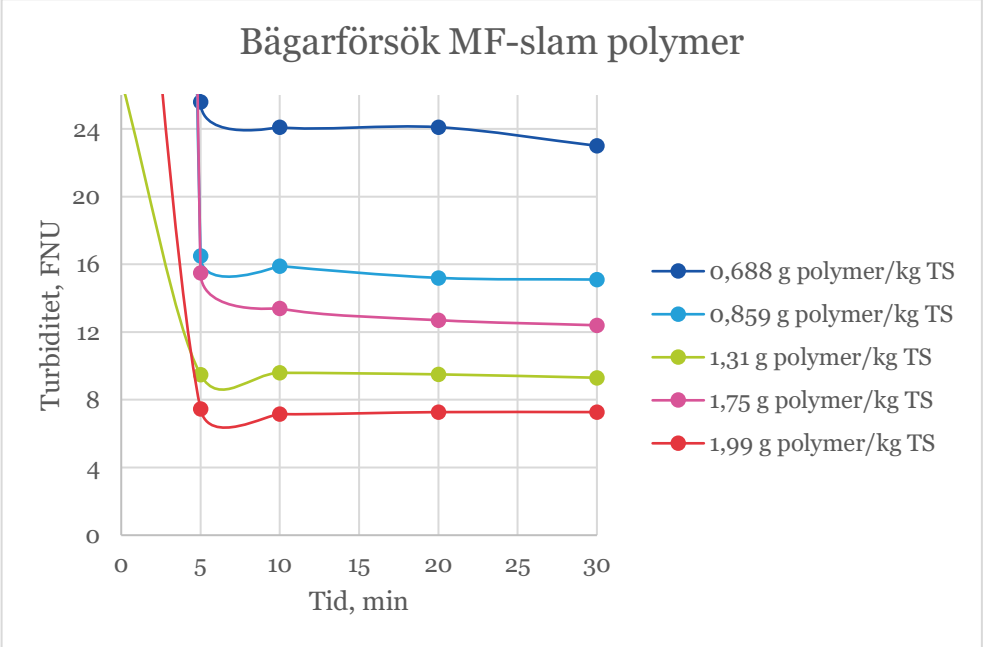


Figur 12. Turbiditet i klarfasen över tid för olika polymerdoser till slam från befintligt verk.

Figur 13 visar slam från MF efter cirka 30 minuters sedimentering efter att polymer tillsattes i olika doser.

Figur 13. Bägarförsök med MF-slam med TS-halt 0,4% samt polymerdoser från vänster till höger: 0,688; 0,859; 1,31; 1,75; 1,99 g polymer/kg TS.

Turbiditet i klarfasen för MF-slam med polymertillsatts visas i Figur 14.

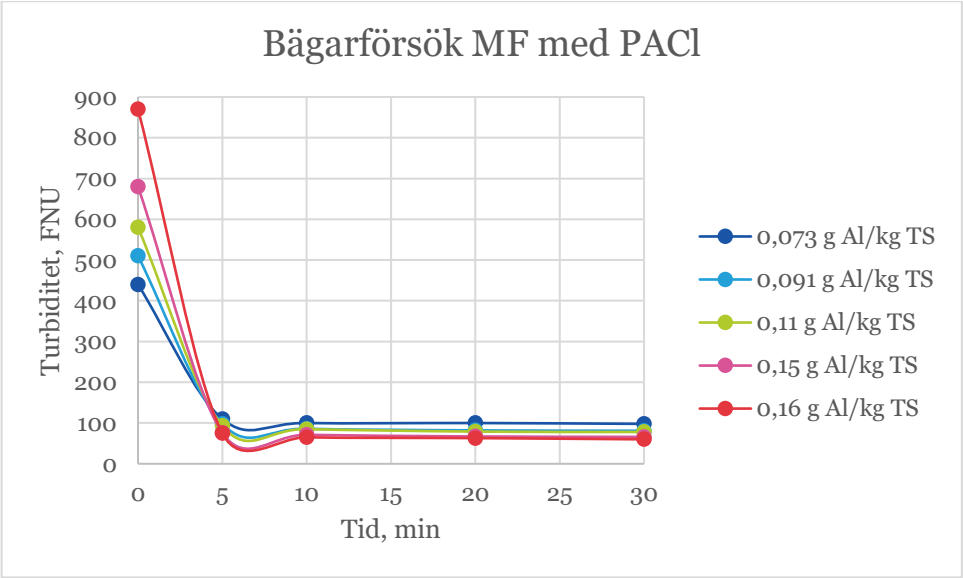


Figur 14. Turbiditet över tid för olika polymerdoser till MF-slam. Mätvärdena för 0 minuter sedimenteringstid överskrider Figurens skala. De initiala mätvärdena var 651 FNU; 429 FNU; 26,9 FNU; 559 FNU och 52,3 FNU för ökande dosering.

I Figur 15 visas bägarförsöket där PACl användes som fällningskemikalie vid MF-slam.

Figur 15. Bägarförsök med TS-halt 0,88% samt MF-slam efter cirka 30 minuters sedimentering med PACl-doser 0,073; 0,091; 0,11; 0,15; 0,16 g Al/kg TS.

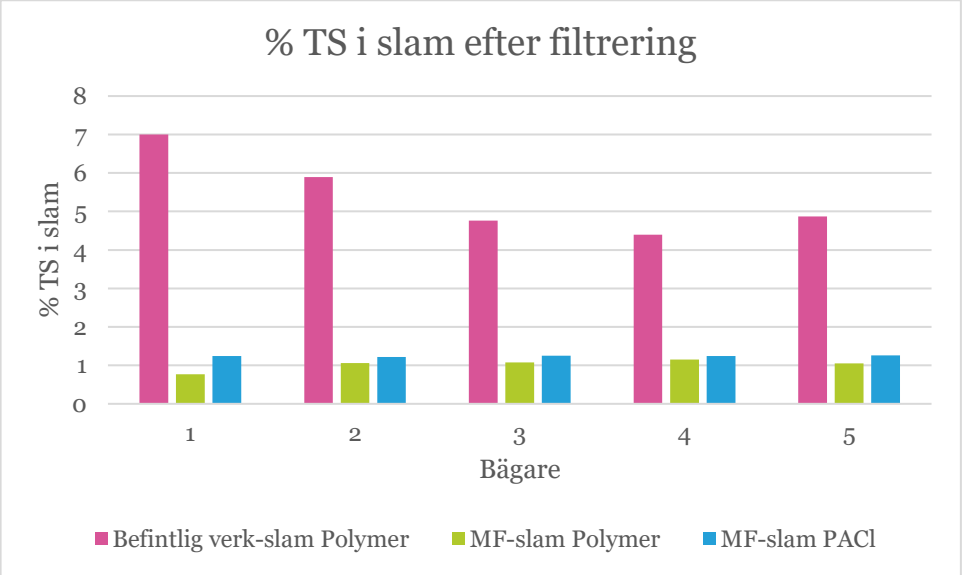
Turbiditet i klarfasen för MF-slam med PACl-tillsatts visas i Figur 16.



Figur 16. Turbiditet i klarfasen över tid för olika PACl-doser till MF-slam.

4.2 Analys av sedimenterat slam

Figur 17 visar TS-halt i % i sedimenterat slam från de olika bägarförsöken. TS-halt i % beräknades med uppvägd massa av filtrerad klarfas och flockulerat slam, se tidigare kapitel 3.4.3 Filtrering av klarfas och flockulerat slam.



Figur 17. TS-halt i % i sedimenterat slam efter tre bägarförsök: slam från befintliga verket med polymer, MF-slam med polymer samt MF-slam med PACl. Varje försök omfattade fem bägare med ökande polymer- eller PACl-doser. För exakta doser, se Tabell 1.

Tabell 1 omfattar de polymer- och PACl-doser som användes i bägarförsöken och tillsattes ökande i bägare 1–5.

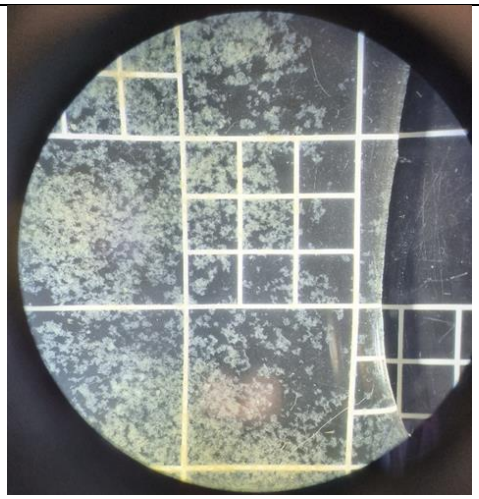
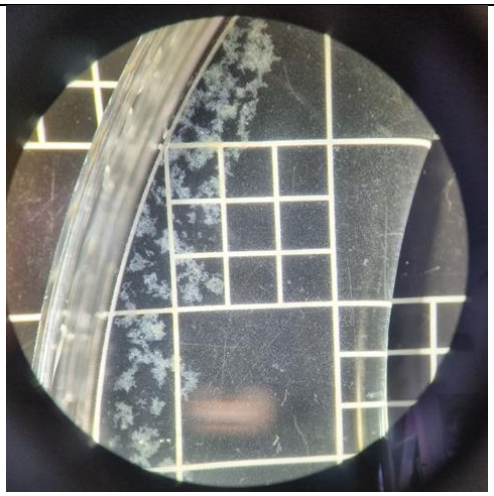
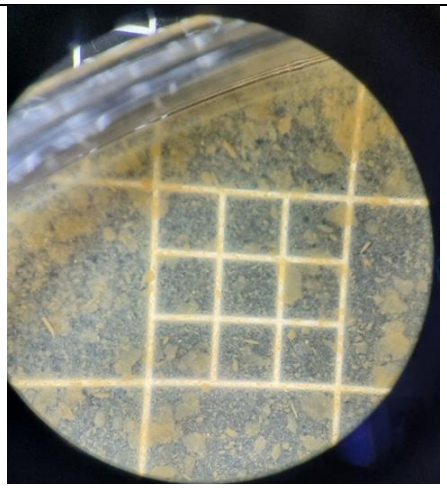
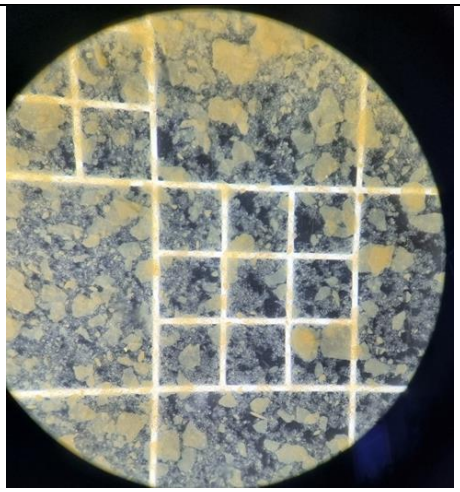
Tabell 1. Exakta polymerdoser som användes i varje bägarförsök.

Bägare	Slam från befintliga verket med polymer, g polymer/kg TS	MF-slam med polymer, g polymer/kg TS	MF-slam med PACl, g Al/kg TS
1	0,688	0,688	0,073
2	0,835	0,859	0,091
3	1,28	1,31	0,11
4	1,77	1,75	0,15
5	1,96	1,99	0,16

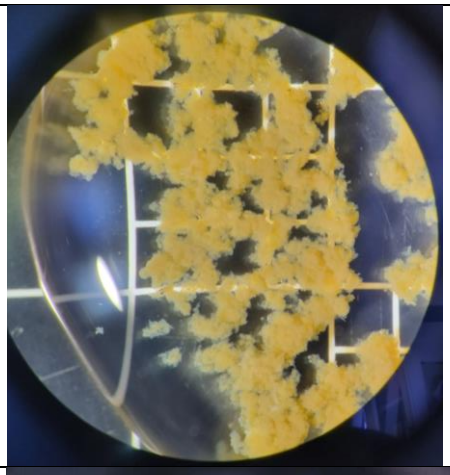
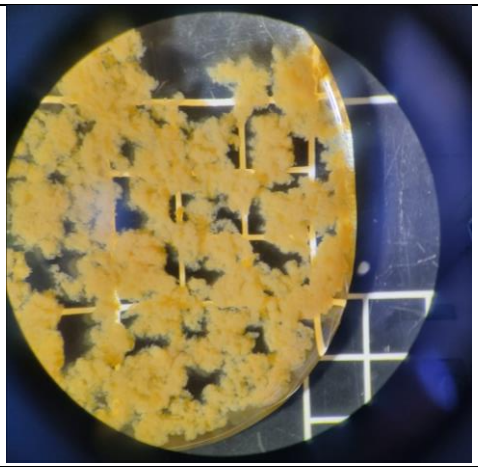
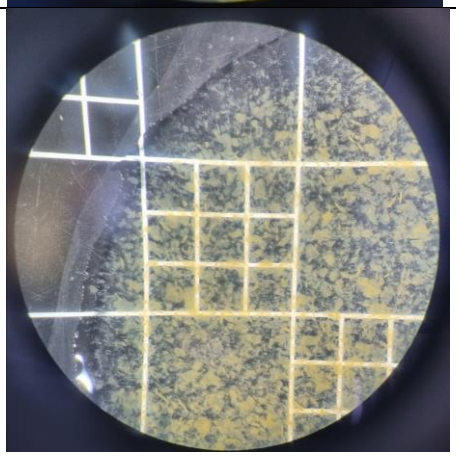
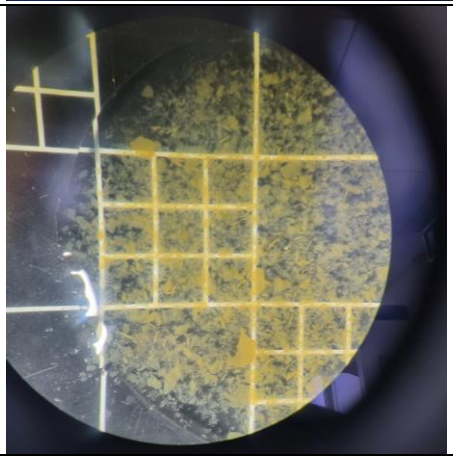
4.3 Test på flockstyrka

Tabell 2 och 3 visar sammanställning av utspridda flockar före och efter pumpning för två olika slamtyper. Flockar som visas i Tabell 2 och 3 behandlades med pumpning, se tidigare kapitel 3.4.4 Flockstyrka.

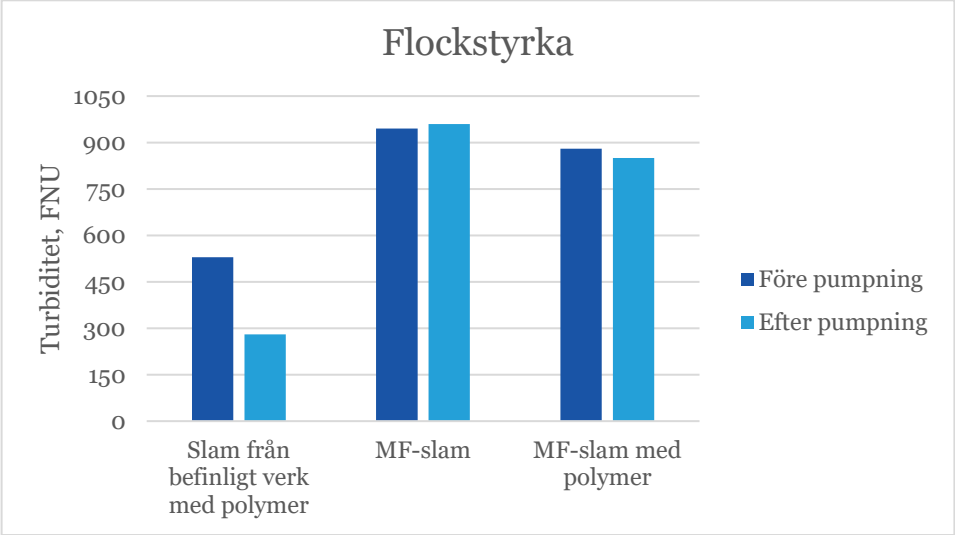
Tabell 2. Flockar från slam från befintliga verket och MF-slam före och efter pumpning utan polymertillsats.

Typ av slam	Före pumpning	Efter pumpning
Slam från befintligt verk		
MF-slam		

Tabell 3. Flockar från slam från befintliga verket med tillsatts av polymer och MF-slam med tillsatts av polymer före och efter pumpning.

Typ av slam	Före	Efter
Slam från befintligt verk med polymer		
MF-slam med polymer		

Turbiditetvärden före och efter pumpning på de olika sorterna av slam, se Figur 18.



Figur 18. Turbiditet före och efter pumpning för slam från befintligt verk med polymertillsatts samt MF-slam med och utan polymertillsatts.

5 Diskussion

En tydlig skillnad i sedimenteringsbeteende och flockningskaraktär kunde observeras mellan slammet från det befintliga verket och det från mikrofiltreringssteget (MF-slam). Slam från det befintliga verket bildade generellt större och mer fluffiga flockar vid fällning med polymer, se Figur 11. Detta återspeglades även i lägre turbiditet i klarfasen, se Figur 12, till skillnad från MF-slam med polymertillsats, se Figur 14. Detta indikerar att flockarna från det befintliga verkets slam har bättre sedimenteringsförmåga. Jarvis et al. [5] har visat att större flockar ofta sedimenterar effektivare.

MF-slammet uppvisade däremot tätare flockar än slam från befintligt verk, se Figur 11, 13 och 15. Dessutom gav MF-slammet lägre TS-halt i % i filtrerad klarfas och flockulerad slam vid fällning med polymer än vid fällning med PACl, se Figur 17. Detta kan tyda på en mer kompakt flockstruktur. Det kan bero på en annorlunda partikelstorleksfördelning eller kemisk sammansättning i slammet från mikrofiltreringen. Dessa faktorer påverkar flockningsbeteendet och därmed avvattningsegenskaperna, vilket även stöds av tidigare studier [5] [9]. Den kemiska sammansättningen är olika i MF-slam och slam från befintliga verket på grund av olika fällningskemikalier. För MF-slam är storleken på partiklarna mindre och därmed svårare att fälla, detta stöds av Tabell 2.

Figur 17 visar den torrhalten i slam efter filtrering för de tre olika försöken. I Figur 17 framgår det att slammet från det befintliga verket med polymertillsats erhöll högst torrhalt, 4–7% jämfört med MF-slam, både med polymer och PACl som erhöll 0–1,5%. Detta indikerar att slam från befintligt verk har bättre avvattningsegenskaper. Flockarna var större och behöll sin struktur under filtreringen. Slammet från befintligt verk är lättare att avvattna genom filtrering. Det flockulerade och sedimenterade MF-slammet hade mindre flockar, vilket skapade en tätare filterkaka på kaffefiltret där vattnet har svårare att ta sig igenom än vid filtrering genom den mer grovkorniga filterkaka som bildades av slammet från befintliga verket. Det observerades att slam från det befintliga verket avvattnades betydligt snabbare genom filtreringen i kaffefiltret. Detta stöds av Figur 17 där en tydligt lägre vattenhalt i slammet från befintligt verk än MF-slammet förekommer.

5.1 Effekt av polymerdosering

Resultaten från turbiditetskurvorna i Figur 12, 14 och 16 visar att turbiditeten minskade med ökande polymerdosering upp till en viss gräns, varefter en ökning eller utplaning observerades. Den fördelaktiga dosen identifierades som den polymermängd där turbiditeten i klarfasen nådde sitt minimum. För slam från det befintliga verket inträffade detta vid en lägre dos jämfört med MF-slammet, se Figur 12, 14 och 16. Denna skillnad kan indikera att partiklarnas ytladdning och struktur varierar mellan de två slamsorterna, vilket påverkar polymerens flockulerande effekt [5] [7]. Högre ytladdning innebär mer repulsion vilket leder till sämre flockbildning samt kräver mer polymer. Båda försöken med MF-slam visar att den högsta dosen resulterade i lägst turbiditet från och med fem minuters sedimenteringstid, se Figur 14 och 16. Däremot ger försöket med slam från befintliga verket minst turbiditet med lägsta dosen, se Figur 12, vilket kan betyda att dosen är tillräcklig. I försöket med slam från befintliga verket med polymertillsats ökar turbiditeten vid slutet av sedimentationstiden när doseringen var 0,835 g polymer/kg TS. Trots högre dos (1,96 g polymer/kg TS) visade dosen 0,688 g polymer/kg TS lägre turbiditet. Detta kan tyda på överdosering där destabilisering av flockar sker [10]. Detta tyder på att koagulanten inte längre binder partiklarna effektivt. Koaguleringsmedlet fyller inte längre partikelytorna – i stället bildas ett överskott av positiva joner i lösningen. Kolloidala partiklar kan återfå en positiv nettoladdning (i stället för att neutraliseras), vilket leder till repulsion mellan likaladdade partiklar.

Polymer- och PACl-doseringen påverkar inte torrhalten då det inte förekommer högre TS-halt i % vid högre dosering, se Figur 18.

I Figur 11 syns bildning av flytslam vid de två lägre doseringarna, 0,688 och 0,835 g polymer/kg TS. Anledningen till det oförväntade flytslammet förklaras i senare kapitel, 5.4 Felkällor. Bildning av flytslam betonar att polymerdosen påverkar i vilken grad slammet flyter eller sjunker och därmed dess sedimentationsegenskaper. Slam som sjunker snabbt har goda sedimentationsegenskaper. Förekomsten av flytslam vid lägre doseringar innebär att anpassningar kan implementeras under reningsprocessen för att hantera denna typ av slam annorlunda än sedimenterat slam. Detta stämmer överens med slutsatsen i Anders Enkels rapport [11], där låga doser av PAX (polyaluminiumklorid) gav upphov till flytslam och en DAF-process (Dissolved Air Flotation) behövs för att avskilja flytslam och sedimenterat slam.

5.2 Jämförelse mellan polymer och PACl

När PACl användes som flockningsmedel till MF-slammet erhölls ett mer kompakt sedimenterat slam, se Figur 15. Turbiditeten i klarfasen minskade snabbt under de första fem minuterna, för att sedan plana ut, se Figur 16. Polymertillsats till slam från befintligt verk resulterade i fluffigare flockar, se Figur 11, jämfört med bägarförsök med MF-slam, se Figur 13 och 15. I Figur 15 syns det att fällning med aluminium ger tätare flockar som sedimenterar långsammare men stabilare. Enligt [12] kan alkalinitet påverka koagulationens effektivitet vid användning av PACl. Låg alkalinitet som uppstår vid spädning av PACl kan försämra koaguleringseffekten. Det kan därav vara en möjlig orsak till högre turbiditet i klarfasen vid användning av PACl.

Turbiditeten i klarfasen vid sedimentering av slam från befintligt verk var mycket låg, se Figur 12. Det tyder på bra flockning mellan partiklarna. Detta ger klart vatten med få partiklar kvar [13]. Hög turbiditet i klarfasen som förekommer vid bägarförsök med MF-slam, se Figur 14 och 16, indikerar att flockarna är små. Därmed stannar fler partiklar kvar i vattnet och grumligheten ökar. Det kan bero på att flockarna inte är tillräckligt stabila för att sedimentera [13].

5.3 Flockstyrka vid pumpning

Flockstyrkeanalyser visade att turbiditeten i slamproverna minskade efter pumpning för slam från det befintliga verket med tillsatts av polymer, från 530 FNU till 280 FNU, se Figur 18. Denna minskning indikerar att pumpningen kan ha bidragit till att ytterligare aggregera partiklarna. Detta resulterar i större och stabilare flockar som lättare sedimenterar och därmed ger lägre turbiditet i det behandlade vattnet. Polymerens närvaro stärker flockarna och gör dem mer motståndskraftiga mot den mekaniska påverkan från pumpen, vilket kan förklara den positiva effekten på turbiditeten.

Polymerens stabiliserande effekt bekräftades också i MF-slammet, där en liten minskning av turbiditet observerades efter pumpning, 880 FNU till 850 FNU, se Figur 18. Detta visar att polymeren bidrar till ökad mekanisk hållfasthet, även om effekten var mindre tydlig än i det befintliga slammet. Turbiditetvariationen kan förklaras av att vid ideala förhållanden är flockarna så pass starka att de fångar upp både stora och små partiklar, vilket resulterar i låg turbiditet. Om flockarna är för porösa eller instabila, ökar turbiditeten eftersom fler partiklar stannar kvar i vattnet [13].

För MF-slam utan polymer ökade däremot turbiditeten något efter pumpning, 945 FNU till 960 FNU, se Figur 18. Detta betyder att flockarna var lite svagare och sönderföll under påverkan av pumpens skjuvkrafter [9]. Polymerernas närvaro verkar dock motverka den negativa effekten av pumpningen, vilket leder till en svagt förbättrad eller oförändrad flockstruktur och därmed en marginell minskning av turbiditeten. Resultaten visar att polymeranvändning generellt gör flockarna mer motståndskraftiga mot den mekaniska påverkan från pumpning, vilket leder till lägre turbiditet. Utan polymer riskerar pumpningen att bryta sönder flockarna, vilket ökar mängden partiklar i vätskefasen och därmed höjer turbiditeten.

Trots att MF-slammet med sin lägre torrhalt generellt bildar mindre och tätare flockar visade turbiditetvariationen på flockarna före och efter pumpning att flockarna har en viss mekanisk hållfasthet. Den lilla ökningen i turbiditet på flockarna efter pumpning för MF-slam utan polymertillsats visar att flockarna inte sönderföll i någon större utsträckning, vilket indikerar att de klarar mekanisk påverkan till en viss del. För MF-slam med polymertillsats uppkom en minskning i turbiditeten på flockarna efter pumpning, vilket tyder på att flockarnas mekaniska hållfasthet ökar och kan centrifugeras. Pumpningen fungerar som en approximation av de mekaniska krafterna som flockarna kommer att utsättas för i framtiden vid exempelvis centrifugering. Den låga skillnaden i turbiditeten på flockarna före och efter pumpning visar därmed att flockarna är relativt stabila och kan klara av att utsättas för mekanisk påverkan under centrifugering utan någon större sönderfall. Polymertillsats gav en tydlig förbättrad flockstyrka och därmed kan MF-slammet trots dess mindre partikelstorlek centrifugeras effektivt om polymerdoseringen anpassas. Befintliga centrifuger kan fortsatt användas vid hantering av MF-slam tack vare flockarnas goda flockstyrka, men sämre avvattning kommer att ske på grund av dess lägre torrhalt.

Tabell 2 och Tabell 3 illustrerar utseendet på flockarna före och efter pumpning. För slam från det befintliga verket syns tydligt att flockarna behåller sin struktur bättre än MF-slammet, särskilt utan polymer, där MF-slammet visade tecken på sönderfall efter pumpning, vilket även betonas av ökningen i turbiditet, se Figur 18. Detta belyser vikten av polymer för att förstärka flockarna och göra dem mer motståndskraftiga mot mekanisk påverkan. Flockstyrkan för slam från det befintliga verket är högre än för MF-slammet eftersom dess lägre turbiditet i klarfasen, se Figur 18. Flockarna i slammet från befintliga verket är mer motståndskraftiga mot mekanisk påverkan och bibehåller sin struktur vid pumpning till skillnad från flockarna i MF-slammet.

5.4 Felkällor

Ett potentiellt felmoment uppstod vid provtagning av klarfas där samma slang användes för flera upptag av prover från samma bägare, se Figur 7. Även om endast mycket små volymer (mikroliter) kunde överföras, finns det en risk för kontaminering. Vidare noterades bildning av flytslam i bägare med låga doser av polymer, se Figur 11, möjligen på grund av det varma rummet och oxidation av organiskt material i slammet. Dessa parametrar kan påverkat turbiditetsmätningarna.

5.4.1 Metodutveckling

Som tidigare nämnts finns det i dagsläget inte standardiserade metoder för bedömning av flockstyrka. Initialt var avsikten att mikroskopibilderna i Tabell 2 och 3 även skulle visa kvantitativt skillnaden på flockarna före och efter pumpning. Detta skulle utföras genom att räkna flockar på ett liknande sätt som mikrobiologiska kolonier räknas. Metoden bedömdes som olämplig eftersom flockarna var för små för att kunna kvantifieras korrekt och representativt, vilket framgår av mikroskopibilderna i Tabell 2 och 3. Det fanns en möjlighet att späda slamprovet för att få en tydligare framställning av flockarna men denna metod bedömdes som mer problematisk än lönsam. Spädning hade ytterligare påverkat slamprovet samt skulle ett representativt resultat inte ha uppnåtts.

I tidigare kapitel 3.4.3 Filtrering av klarfas och flockulerat slam beskrivs användningen av kaffefilter vid filtrering. Denna metod var lite bristfällig då filtret var för tätt för att möjliggöra effektiv filtrering. Det observerades att klarfasen i början av filtreringen passerade igenom filtret snabbt men att flödet därefter blev långsamt och att inte endast flockulerat slam blev kvar på filtret vid slutet av filtreringstiden. Detta kan möjligtvis ha skett på grund av att kaffefiltret täpptes igen. Förbättringar av metoden kan utföras genom användning av bättre filter samt öka filtreringstiden för att få fullgod filtrering.

Under den aktuella metodiken för försöken uppkom oregelbundenheter, särskilt vid upptagning av klarfasprover samt inför filtrering av sedimenterat slam. Upptagning av klarfasproverna utfördes på minuten och inte exakt på samma sekund, flera prover togs tidsmässigt mycket nära varandra. Detta medförde en utmaning eftersom flera prover behövdes tas inom kort tid. För framtida försök är det essentiellt med en labbassistens. Vid assistens under försöken kan arbetsmomenten delas upp och klarfasprover tas enklare samt blir tidfördelningen av arbetet bättre. Tiden för filtrering av sedimenterat slam påverkades av att varje bägare filtrerades separat. Detta innebar att slammet i den sista bägaren sedimenterade under längre tid än slammet som filtrerades först. Denna felkälla påverkar resultatet genom att slam i vissa bägare sedimenterar under längre tid och olika förhållanden vid filtrering förekommer. Detta kan undvikas och åtgärdas genom att filtrera bägarna vid samma tidpunkt.

Metodutvecklingen för bägarförsöken kan alternativt utföras med specifika och likadana förhållanden på slammet i varje försök, på samma sätt som i Anders Enkels rapport [11] där temperaturen termostaterat av vattenbad användes för att ge samma förhållanden och undvika termiska störningar under sedimenteringsfasen.

6 Slutsats

De praktiska försöken visar att slam från befintligt vattenverk och från mikrofilter (MF) uppvisar tydligt olika egenskaper vad gäller flockbildning, sedimentation och respons på polymerdosering. Slam från det befintliga verket genererar större, fluffigare och mer sedimenteringsdugliga flockar, vilket bekräftas av lägre turbiditet i klarfasen. Detta tyder på god avskiljningskapacitet i befintlig avvattningsutrustning.

MF-slam bildar tätare men mindre flockar med högre kvarvarande turbiditet i klarfasen, vilket kan indikera att storleken på partiklarna är mindre och svårare att fälla. Bägarförsöken visar att MF-slam kräver högre dosering för att uppnå lika låg turbiditet, likväl renare vatten. För slam från befintligt verk observerades restabilisering av slampartiklar vid överdosering, vilket försämrade flockningseffekten.

PACl-testet med MF-slam visade långsam men jämn sedimentation och kompakt flockstruktur, dock påverkades effektiviteten troligtvis negativt av låg alkalinitet i vattnet. Detta tyder på anpassningen av användning av PACl bör inte implementeras vid hantering av MF-slam.

Pumpning kan både minska och öka turbiditeten beroende på slamtyp och polymeranvändning. Polymerer förbättrar flockstyrkan och minskar risken för ökande turbiditet vid pumpning, medan slam utan polymer riskerar flockdestruktion och högre turbiditet, vilket stöds av mikroskopibilderna. Flockarna i slam från det befintliga verket behåller sin struktur bättre än flockarna i MF-slammet. I försök utan polymer sönderföll flockarna i MF-slammet till en liten utsträckning efter pumpning, detta betonades av en liten ökning i turbiditet. Polymer tillsats är avgörande för att förstärka flockarna och motverka sönderfall vid mekanisk påverkan. Flockarna i slam från det befintliga verket är mer motståndskraftiga mot mekanisk påverkan och bibehåller sin struktur vid pumpning till skillnad från flockarna i MF-slammet. Slammet från befintliga verket har högre torrhalt och är lättare att avvattna än MF-slammet. Befintliga centrifuger kan fortsatt användas vid hantering av MF-slam på grund av den goda flockstyrkan som bevisas av den låga skillnaden i turbiditet på flockarna före och efter pumpning. MF-slam utan polymer sönderföll i liten utsträckning efter pumpning. Vid polymertillsats ökade flockarnas mekaniska hållfasthet och därmed kan MF-slammet, trots sin mindre partikelstorlek, centrifugeras effektivt om polymerdoseringen anpassas. Vid användning av befintliga centrifuger kommer sämre avvattning ske på grund av slammets lägre torrhalt.

Slutligen bedöms befintlig avvattningsprocess inte fungera tillfredsställande även för MF-slam på grund av det höga turbiditetvärdet i klarfasen och låga torrhalten i filtrerad slam efter genomförda bägarförsök. Ändring som till exempel reducera flödet för att öka partiklarnas sjunktid alternativt justera dos/polymerval för att uppnå fullgod flockning. I framtiden behövs tester utföras med andra polymerer i labbskala innan nya verket ansluts till slamavvattningsanläggningen. När nya vattenverket ansluts kommer befintlig avvattningsanläggning få sämre avvattning på grund av att MF-slammet har lägre torrhalt. Däremot har slammet god flockstyrka och centrifugering kommer ändå ske tillfredsställande. De anpassningar som behövs göras i avvattningsanläggningen eller det nya verket för att uppnå fullgod funktion kopplat till slamhanteringen är till exempel sänka flödet eller undersöka polymerdos/val.

7 Referenser

1. Ejhed H. 2020–02 Mälarens framtida vattenkvalitet. [Internet]. Stockholm: Norrvatten; 2020. [citerad 2025-06-02]. Hämtad från: https://www.norrvatten.se/globalassets/dokument/forsknings--och-utvecklingsrapporter/2020/2020-02-malarens-framtida-vattenkvalitet2.pdf

2. Reningsprocessen. [Internet]. [citerad 2025-06-02]. Hämtad från: https://www.norrvatten.se/dricksvatten/dricksvattenproduktion/reningsprocessen/

3. Norrvatten. [Bild]. Stockholm: Norrvatten.

4. Persson PO. Miljöskyddsteknik: strategier & teknik för miljöskydd. Stockholm: Inst. för ingenjörspedagogik, Kungl. Tekniska högskolan; 2018.

5. Jarvis P, Jefferson B, Gregory J, Parsons SA. A review of floc strength and breakage. [Internet]. Elsevier; 2005. Water Research; 39(14):3121–37. [citerad 2025-05-24] Hämtad från: https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.022

6. Schmitt C. How Does Turbidimetry Measure Particle Size in Liquid Samples? [Internet]. Rheolution; 2023. [citerad 2025-06-03]. Hämtad från: https://rheolution.com/application-notes/measure-particle-size-in-a-liquid-sample/

7. Jekel M, Gimbel R. Water, 4. Treatment by Flocculation and Filtration. I: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, redaktör. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [Internet]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2016 [citerad 2025-06-05]. s. 1–17. Hämtad från: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.028_015.pub2

8. Alfa Laval. Alfa Laval -decanter centrifuge technology Separating solids from liquids [Internet]. Alfa Laval; 2009. [citerad 2025-06-05] Hämtad från: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/pulp-and-paper/pcd00002en.pdf

9. Mergia S. Jämförelse av två slamavvattningstekniker [Examensarbete]. [Stockholm]: KTH; 2021. [citerad 2025-06-03]. Hämtad från: https://www.norrvatten.se/globalassets/dokument/forsknings--och-utvecklingsrapporter/2022/2022-01-slamavvattningstekniker.pdf

10. Malik QH. Performance of alum and assorted coagulants in turbidity removal of muddy water. [Internet]. Springer; 2018. Appl Water Science; 8(1):40. [citerad 2025-06-04]. Hämtad från: 10.1007/s13201-018-0662-5

11. Enkel A. Slamförsök med UF- och MF-slam Norrvatten: Försöken utförda under September 2025. Stockholm: Avakon; 2025. [citerad 2025-11-17]

12. Kumar A. Removal Characteristics of Fibrous and Particulate Microplastics: A Study of the Effectiveness of Coagulation-Flocculation-Sedimentation Avlägsnande egenskaper hos fibrösa och partikel mikroplaster: En studie av effektiviteten av koagulering-flockning-sedimentering [Internet] [Examensarbete]. Uppsala: Uppsala universitet; 2022 [citerad 2025-06-05]. Hämtad från: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1687510/FULLTEXT01.pdf

13. Engström J. Effekten av organisk belastning på avskiljningsegenskaperna hos aktivt slam [Internet] [Examensarbete]. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola; 2007 [citerad 2025-06-05] Hämtad från: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/69556.pdf