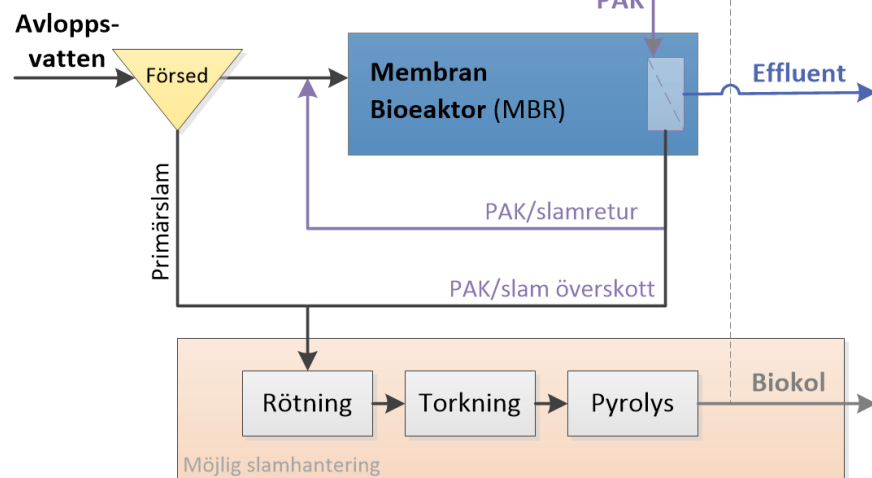




Oktober 2022



## Pulveriserat aktivt kol i kombination med MembranBioReaktor (PAK-MBR)

Etablering och tester med en pilotanläggning vid Hammarby Sjöstadsvverk

Christian Baresel, Mayumi Narongin-Fujikawa, Ted Lundwall, Jesper Karlsson, Niclas Bornold, Sara Söhr (Syvab)



I samarbete med: Sydvästra Stockholmsregionens VA-verksaktiebolag - SYVAB

**Författare:** Christian Baresel, Mayumi Narongin-Fujikawa, Ted Lundwall, Jesper Karlsson, Niclas Bornold, Sara Söhr (Syvab)

**Medel från:** Naturvårdsverket och Syvab

**Fotograf:** Christian Baresel

**Rapportnummer** B

**ISBN** [Klicka här för att ange ISBN nr](#)

**Upplaga** Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© **IVL Svenska Miljöinstitutet 2022**

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // [www.ivl.se](http://www.ivl.se)

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

## Förord

Syvab och IVL Svenska Miljöinstitutet har sedan 2013 genomfört ett flertal projekt som syftar till att bedöma risker vid utsläpp av mikroföroreningar till recipient, samt i pilotskala praktiskt studera olika tekniker för rening av läkemedelsrester i avloppsvatten. Några av försöken genomfördes vid Himmerfjärdsverket och några vid IVL/KTHs- FoU-anläggning Hammarby Sjöstadverk.

De redovisade aktiviteterna i denna rapport är del av denna långsiktiga FoU-samarbetet mellan Syvab och IVL, som syftar till att bidra till en VA-verksamhet som tillgodoser samhällets krav på en resurseffektiv hantering av avloppsvatten och slam, med minsta möjliga miljöpåverkan. Samarbetet avser i första hand Syvabs eget reningsverk Himmerfjärdsverket som för nuvarande byggs om till en MembranBioReaktor (MBR)-process. Men en möjlig applicering och spridning av resultaten eftersträvas så att även andra VA-aktörer kan få stöd i sitt arbete mot en mer hållbar hantering av avloppsvatten och slam.

Det aktuella projektet kom till stånd delvis tack vare just Syvab som en drivande aktör inom VA-Sverige. Författarna tackar alla Syvabs medarbetare som direkt eller indirekt har varit involverat i detta genom alla år.

# Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	5
<b>1 Inledning .....</b>	<b>6</b>
1.1 Bakgrund .....	6
1.2 Syfte.....	7
1.3 Begränsningar.....	7
<b>2 Genomförande.....</b>	<b>8</b>
2.1 Teknikkombinationen PAK-MBR .....	8
2.2 Etablering av pilotanläggningen .....	9
2.2.1 Processutformning .....	9
2.2.2 Driftstrategier .....	12
2.2.3 PAK-dosering.....	13
2.2.4 Styrsystem, instrumentering och datahantering .....	14
2.3 Provtagning och analyser .....	15
2.3.1 Standard parametrar .....	15
2.3.2 Profilerings .....	16
2.3.3 Mikroföroreningar .....	16
<b>3 Resultat och diskussion.....</b>	<b>18</b>
3.1 Etablering och intrimning av MBR-pilotanläggningen.....	18
3.2 Drifterfarenheter .....	19
3.3 Reningseffektivitet i MBR-piloten .....	21
3.3.1 Standardparameter.....	21
3.3.2 Profilerings .....	23
3.3.3 Membranprestandan .....	23
3.4 Slamproduktion och -egenskaper.....	24
3.5 Rening av mikroföroreningar .....	26
3.5.1 Läkemedelsrester.....	26
3.5.2 PFAS .....	30
3.5.3 Hormonstörande effekter (YES).....	32
3.5.4 Andra mikroföroreningar .....	33
3.6 Andra effekter med PAK-dosering.....	34
3.7 Resursförbrukning och kostnadsbetraktningar .....	35
<b>4 Slutsatser och rekommendationer .....</b>	<b>37</b>
<b>5 Referenser.....</b>	<b>38</b>

# Sammanfattning

Under 2020 - 2022 har Syvab med hjälp av medel från Naturvårdsverket och i samverkan med IVL Svenska Miljöinstitutet för etablering av en pilotanläggning för att testa teknikkombinationen av pulveriserat aktivt kol och MembranBioReaktor, d.v.s. PAK-MBR med avseende för rening av mikroföroreningar. Tekniken har tidigare seglat upp som en potentiell avancerad reningsteknik framför allt för rening av läkemedelsrester från avloppsvatten men brist på kunskap och erfarenheter om tekniken har varit det störst hindret för att betrakta tekniken som ett alternativ vid svenska avloppsreningsverk med MBR-tekniken.

Etableringen av PAK-MBR pilotanläggningen vid Hammarby Sjöstadsverk kunde trots stora utmaningar och förseningar framför allt orsakat av coronapandemi avslutas under 2021. Bestående av två identiska MBR-pilotlinjer varav den ena användas för att dosera olika PAK-doser till membrantanken kunde reningseffekten för olika mikroföroreningar undersökas. Förutom att en mycket effektiv borttagning av studerade läkemedelsrester med >80 % redan vid PAK-doser på ca 15 mg/L kunde åstadkommas så kunde även hormonstörande effekter avlägsnas vid de flesta undersökta PAK-doser. Även PFOS kunde rensas bort mycket effektivt med >98 % av PAK-MBR teknikkombinationen. PFOS kunde dock även rensas bort mycket effektivt i referenslinjen utan PAK-tillsats. För andra PFAS har reningseffekten inte varit lika tydligt även om PAK-MBR pilotlinjen visade en något bättre reningseffekt än MBR pilotlinjen utan PAK-tillsats.

En initial bedömning av miljöpåverkan och kostnader jämför framför allt PAK-MBR med den andra teknikkombinationen MBR-GAK som för närvarande testas i pilotskala av Syvab och IVL och som det 2019 togs fram ett principförslag av Ramboll. Resursförbrukningen och kostnader bedöms generellt vara avsevärt mindre då inga extra processolymer behövs och endast en PAK lagring och dosering krävs. Från pilottesterna framgår dessutom att en mindre eller jämförbart mängd aktivt kol som i MBR-GAK alternativet skulle behövas. PAK-MBR tillåter jämfört med andra tekniker en belastningsstyrd resursförbrukning och öppnar för framtida biobaserade aktiva kol som t.ex. biokol tillverkat från avloppsslam och andra substrat som initialt redan testats av Syvab och IVL. En positiv effekt av PAK på slamavvattningen och rötning som kan ge ytterligare resursbesparingar.

Sammanfattningsvis framstår teknikkombinationen PAK-MBR som den mest resurseffektiva avancerade reningsteknik för avloppsreningsverk med en MBR-reningsprocess. Förutom att investeringskostnader kan hållas på en låg nivå och en inläsning i en omfattande infrastruktur som vid eventuella framtida krav inte ger en tillräcklig reningseffekt, uppnår PAK-MBR teknikkombinationen en mycket bred reningseffekt för många olika mikroföroreningar. Det inkluderar utöver läkemedelsrester även en mycket effektiv och delvis komplett rening av hormonstörande effekter, mikroplaster, PFOS, bakterier inklusive antibiotikaresistenta bakterier. Utöver dessa mikroföroreningar har MBR-tekniken visat kunna åstadkomma den mest effektiva reningen av vanliga föroreningar som närsalter, partiklar och biologiskt nedbrytbart material.

Potentiella nackdelar med tekniken som överföring av mikroföroreningar till slammet behöver inte nödvändigtvis utgöra ett hinder för teknikimplementering utan med tanke på att en ökad ackumulering av många mikroföroreningar i slammet kan framtida slamhantering åstadkomma en avsevärd reduktion av dessa och därmed utfasning från en återrecirkulering av dessa föroreningar till samhället och miljön. Flera kompletterande tester med PAK-MBR tekniken rekommenderas för att utforska potentialen av tekniken, synergier med MBR-processen, samt för att upptäcka eventuella andra bieffekter som ännu inte har identifierats.

# 1 Inledning

I juni 2020 beviljades Syvab (Sydvästra stockholmsregionens va-verksaktiebolag) 4 046 625 kr i bidrag från Naturvårdsverket (NV-02932-20) inom anslag 1:11, ap. 1 (utgiftsområde 20) för en förstudie med huvudsakligt syfte att utreda förutsättningar för en fullskalig installation av teknik för rening av läkemedelsrester från avloppsvatten.

Projektet genomfördes av Syvab i samarbete med IVL Svenska Miljöinstitutet vid Hammarby Sjöstadsverk. Projekttiden varade från september 2010 till 31:e oktober 2022 efter att en ansökan om förlängning med flera månader p.g.a. coronapandemin under 2020-2021 godkändes.

Denna rapport utgör leveransen till Naturvårdsverket och sammanställer resultaten som kunnat samlas in från projektet. Underlag för Naturvårdsverkets uppföljning av projektet med avseende på projektets genomförande, ekonomi och kommunikationsplan redovisas i en separat bilaga.

## 1.1 Bakgrund

Ombyggnation av Himmerfjärdsverket pågår. Avloppsreningsverket kommer att byggas om till ett modernt reningsverk med en MembranBioReaktor (MBR) process. Hela ombyggnationen förväntas vara klar år 2026 och resulterar i att reningsverket får en hög reningskapacitet avseende organiskt material och näringsämnen. Att därtill lägga ett reningssteg för rening av läkemedel och andra mikroföroreningar ser Syvab som ett nästa steg. I Syvabs ägardirektiv är det inskrivet att Syvab, när den nya processanläggningen är i drift, ska arbeta för att även kunna hantera läkemedelsrening. Detta för att ytterligare förbättra möjligheterna för goda miljöförhållanden i Himmerfjärden och Östersjön i stort.

Under december 2018 till november 2019 genomförde Syvab en förstudie för läkemedelsrening på Himmerfjärdsverket, till stor del finansierad av Naturvårdsverket (Syvab, 2019). Avsikten med förstudien var att ta fram ett beslutsunderlag där nyttan med och kostnaderna för läkemedelsrening beskrivs. Projektet genomfördes av Syvab i samarbete med Ramboll, IVL Svenska Miljöinstitutet och Stockholms universitet (ACES och DEEP).

Karteringen av läkemedelsrester och olika riskbedömningar som gjordes i förstudien (Baresel och Malovanyy, 2019; Syvab 2019) tydde på att en extra rening för läkemedelsrester vid Himmerfjärdsverket kan vara motiverad. I en teknikutredning tittades på ett antal tekniker översiktligt med avseende på bland annat teknikmognad, ekonomi, reningseffektivitet, logistik, miljöpåverkan samt kompatibilitet med det framtida Himmerfjärdsverket. Utredningen kom fram till att gå vidare med ett principförslag för filtrering av utgående vatten från den framtida MBR-anläggningen med granulerat aktivt kol (GAK). Beslutet togs mycket baserat på att GAK-filtertekniken är en beprövad teknik och till trots för nackdelarna med en stor förbrukning av GAK, vilket medför både miljöpåverkan, logistik och hög driftkostnad.

Även teknikkombinationen pulveriserat aktivt kol i MBR (PAK-MBR) utreddes. Tekniken PAK-MBR bedömdes ha en stor fördel i att investeringskostnaden blir låg eftersom MBR redan finns samt att möjlighet finns att behandla maximalt flöde genom den biologiska reningen. Påverkan på kväverening och membran var dock inte säkerställd, även om de förväntades vara positiv. Den stora nackdel bedömdes dock vara en negativ påverkan på bioslammet, både mängd och kvalitet, då andelen oorganiskt material ökar. PAK-MBR tekniken bedömdes som en icke väl beprövad teknik där för- och nackdelar behöver utredas och testas mer i pilottester. Dessutom förväntas att tekniken kommer ha en stor förbrukning av kol.

Nuvarande pilotprojekt baseras på slutsatsen i förstudien att PAK-MBR kan ha fler fördelar än de andra undersökta tekniker för rening av mikroföröreningar men att det finns inga praktiska erfarenheter eller kunskap om tekniken i Sverige som kunde ligga till grund för en eventuell fullskaleimplementering. De många fördelar och få nackdelar som PAK-MBR tekniken verkar ha räcker inte till för att tekniken godtas av VA-organisationer som relevant teknik så länge dessa inte har bekräftats genom faktiska försök. Resultaten och erfarenheterna skulle i ett senare skede kunna implementeras i Syvabs större pilot beroende på var slamfrågan landar i den nya lagstiftningen. Resultaten kommer också att vara till nytta för övriga reningsverk med MBR.

## 1.2 Syfte

I samarbete med IVL Svenska Miljöinstitutet är syftet med projektet är att etablera och använda en mindre pilotanläggning med två parallella linjer på vardera 100 PE vid Hammarby Sjöstadverket med processen PAK-MBR för jämförande tester. Vår bedömning i dagsläget är att PAK i kombination med MBR kan reducera investerings- och driftkostnader för läkemedelsrening avsevärt. Målet med piloten är att ge grundläggande kunskaper om avskiljningskapacitet av läkemedelsrester, påverkan på membranens funktion, resursförbrukning och andra processrelaterade frågor. Resultaten och erfarenheterna skulle i ett senare skede kunna implementeras i Syvabs större pilot beroende på var slamfrågan landar i den nya lagstiftningen. Resultaten kommer också att vara till nytta för övriga reningsverk med MBR.

Testkörning i pilotanläggningen skulle ge svar på bland annat reningseffektiviteten, drift- och processerfarenheter med PAK-MBR, påverkan på övrig rening och membranen samt förbättrade underlag för kostnadsbedömning av investering, drift och underhåll. Erfarenheterna från pilottesterna skulle också ge ovärderlig kunskap som skulle kunna förkorta en framtida implementering med flera år. Resultaten från testerna i pilotanläggningen var också tänkt att fungera vägledande för andra reningsverk med MBR-tekniken.

## 1.3 Begränsningar

Pilotanläggningen som projekt avsåg att etablera baseras på en befintlig pilotanläggningen vilket medför att vissa begränsningar i utförandet av pilotanläggning redan fanns från början. Här kan t.ex. reaktorvolym, bräddnivåer, elektrisk utrustning och styrsystemet nämnas. De två MBR-linjer har således inte byggts som en kopia av Himmerfjärdsverkets stegbeskickningslösning utan som traditionell aktivslamprocess med nitratrecirkulation. För att utforska den generella reningseffekten med avseende för läkemedelsrester och andra mikroföröreningar samt driftrelaterade aspekter bedömdes dock denna tekniks lösning vara tillfredsställande. Dessutom kunde kostnader för pilotbygget minska avsevärt då en befintlig pilot som tidigare byggdes för många miljoner kronor kunde utnyttjas och byggas om.

Projektet fick hantera flera tekniska utmaningar som projektgruppen inte har kunnat räkna med vid projektinitering då dessa utmaningar upptog relaterat till coronapandemin. Till dessa utmaningar räknas t.ex. förseningar, utfall av underleverantörer, leveransproblem för kritiska komponenter för styrning av piloten. Dessa har i olika grad påverkat utförandefasen av projektet då vissa moment fick genomföras med anpassat styrning, försenade testperioder m.fl. Projektgruppen bedömer dock att den övergripande utvärderingen av PAK-MBR konceptet kunde säkerställas till trots för dessa utmaningar som i vissa fall förde till begränsningar i omfattningen av vissa tester.

## 2 Genomförande

Genomförandet av projektet betog framför allt i etableringen av själva pilotanläggningen med två parallella MBR-linjer för jämförande tester. Dessutom utfördes en del tester med olika PAK-doser i en av linjerna för bedömning av reningseffektivitet för att avlägsna mikroföroreningar. I detta avsnitt beskrivs kort själva PAK-MBR konceptet och uppförandet av pilotanläggningen. Även driften av MBR-piloterna och metodiken för att utvärdera den avancerade reningen beskrivs.

### 2.1 Teknikkombinationen PAK-MBR

Att läkemedelsrening kommer införas på flera svenska reningsverk kan idag anses som ett naturligt steg i anpassningen av reningsverk till dagens utmaningar och målet att åstadkomma ett hållbart samhälle. Implementering av en avancerad rening kommer dock i sig innebära en viss miljöpåverkan då det behövs resurser för både installation och drift av extra reningstekniker. En viktig målsättning för projektgruppen är därför att ta fram kunskap om tekniker som kan ge en rening av läkemedelsrester och andra mikroföroreningar till lägst möjlig miljöpåverkan. Detta tror vi kan åstadkommas genom en teknikintegrering som ger flera positiva synergieffekter. Den alternativa metoden för rening med aktivt kol som Syvab tillsammans med IVL har tro på är dosering av pulveriserat aktivt kol (PAK) i MBR-processen (PAK-MBR). Enligt en första bedömning av tekniken som Syvab och IVL gjorde i HaV-projektet SystemLäk (Baresel et al., 2017a) så kan denna teknikkombination innebära en del fördelar:

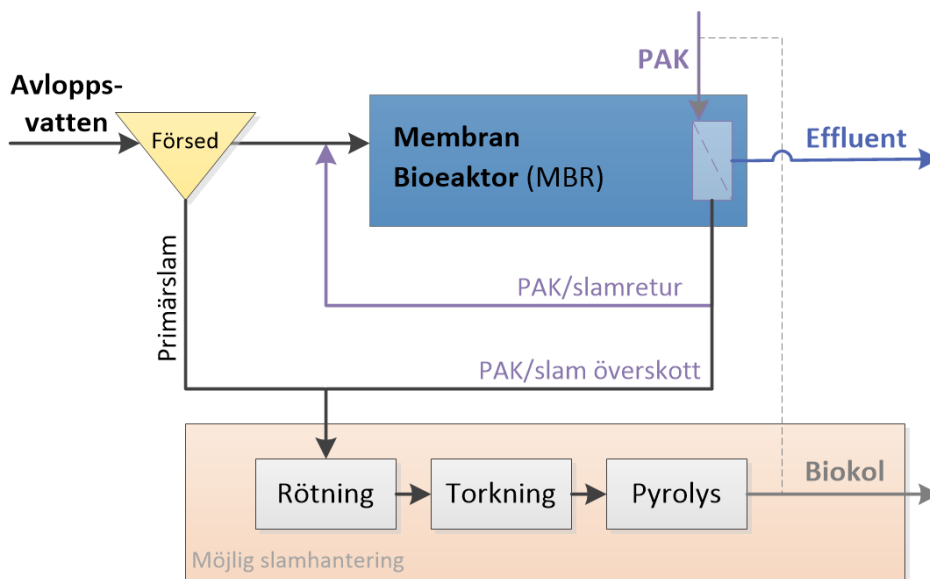
- Inget extra reningssteg behöver byggas vilket minskar resursförbrukningen och kostnader
- Förutom läkemedelsrester skulle även andra föroreningar kunna avlägsnas simultant som t.ex. PFAS/PFOS, tungmetaller, m.m.
- Energi- och kemikalieförbrukningen för rengöringen av membranen i MBRen bedöms kunna minska genom den renande verkan av PAK på membranen
- Flera olika aktivkolprodukter inklusive biokol tillverkat från organiska restprodukter via skulle kunna användas framöver då inte samma stabilitet av kolet behövs som vid andra aktivkoltillämpningar (t.ex. GAK-filer). Detta skulle ge ytterligare resursbesparingar och minskat miljöpåverkan.
- Slamegenskaper kan förbättras avsevärt med tanke på t.ex. avvattningsförmågan och rötning vilket ger ytterligare resursbesparingar.
- PAK-MBR teknikkombinationen skulle ge en extrem kompakt och komplett reningslösning för reningsverk med begränsade expansionsmöjligheter.
- Teknikkombinationen skulle ge en vattenkvalitet som direkt är lämpat för flera vattenåteranvändningsmöjligheter vilket skulle ge bättre förutsättningar för cirkulära vattensystem som dagens samhälle strävar efter.
- Att kombinera borttagning av antibiotika och bakterier i samma processteg och utan risk för återkontaminering av det renade vattnet kan jämfört med andra avancerade lösningar även innebära en stor fördel med tanke på risken för spridning av antibiotikaresistens via bakterier (ARB) och gener (ARG).
- En komplettering av MBR-tekniken med en integrerad avancerad rening för mikroföroreningar skulle kunna föra till att flera VA-organisationer som utreder framtida tekniker för sina anläggningar att välja MBR-tekniken.

Alla dessa aspekter skulle ge en förväntad bättre resurseffektivitet och ett mindre investeringsbehov samt driftkostnader.



En aspekt med PAK-MBR tekniken som skulle kunna lyftas fram som nackdel är att tekniken överför mikroföroreningar till slammet så att en slamspridning bör undvikas för att inte sprida miljögifter. Med tanke på att reningsverk redan idag överför nästan 100 % av mikroplaster och stora delar av andra mikroföroreningar inkl. tungmetaller till avloppsslam, kan dock PAK-MBR tekniken inte heller framställas som extra negativt angående denna aspekt. Det råder dessutom stor osäkerhet om vad som ska gälla för slammet i framtiden. Oavsett vad slamutredningen kommer resultera i så kommer samhället inte kunna acceptera en återföring av föroreningar till miljön via slamspridning i framtiden och alternativa slambehandlingsmetoder behöver tas fram.

Figur 1 visar ett systemförslag för PAK-MBR inklusive en slamhantering som skulle överföra flera näringsämnen till det producerade biokolet och samtidigt minska föroreningar i slutprodukten som därmed kunde användas som gödsel. Genom pyrolys förstörs organiska mikroföroreningar som läkemedelsrester. Dessutom destrueras PFAS och vissa tungmetaller, bl.a. Kadmium, avskiljs till askan och kan därmed plockas ur kretsloppet. En pyrolys av torkat slam skulle dessutom ge en produkt som agera som kolkälla och som därmed kan generera intäkter från koldioxidskatt. Biokol har även positiva egenskaper för marken, t.ex. att hålla fuktigheten. Eventuellt kan biokol även helt eller delvis ersätta kommersiell PAK i PAK-MBR systemet.



Figur 1. Schematisk layout av en möjlig implementering av PAK-MBR teknikkombinationen.

## 2.2 Etablering av pilotanläggningen

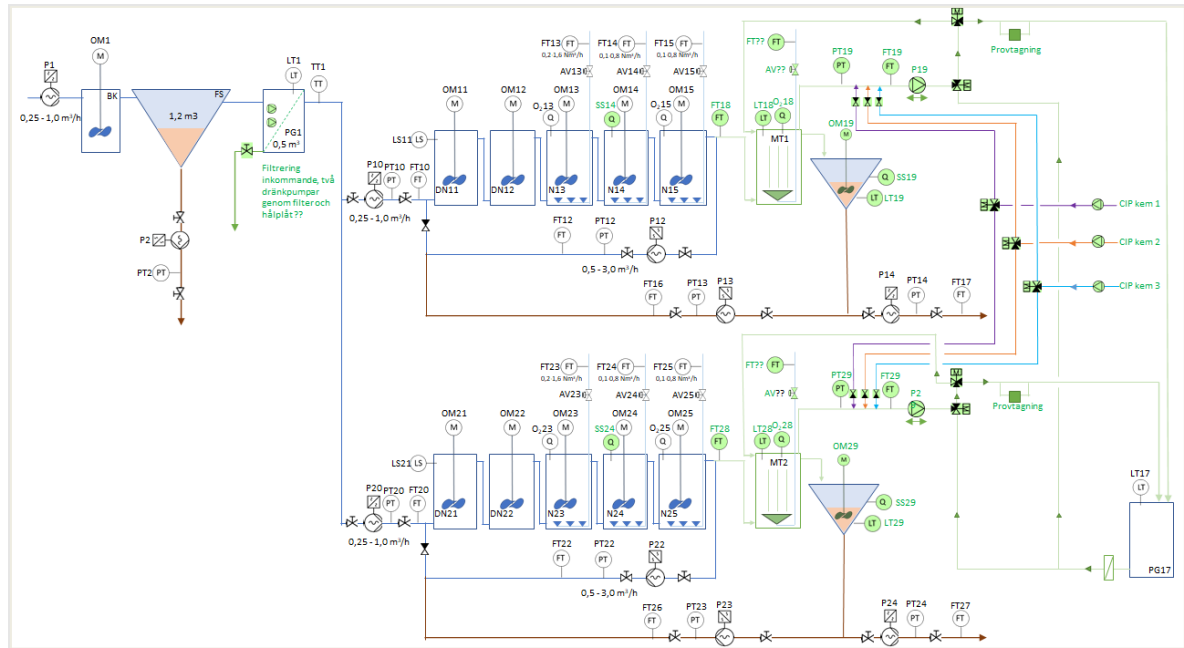
En befintlig pilotanläggning som byggdes inom ett tidigare forskningsprojekt med en konventionell aktivslamprocess i två parallella linjer uppgraderades till två parallella MBR-piloter. En av linjerna utrustas med möjlighet att dosera PAK till membrantanken. Nedan ges en förenklad genomgång av pilotanläggningens olika komponenter och dess funktion. En detaljerad funktionsbeskrivning har tagits fram inom projektet.

### 2.2.1 Processutformning

MBR-delen i piloten är en miniatyr av en konventionell aktivslamprocess som uppgraderat till en MBR-process genom ersättning av eftersedimentering med en ultrafiltrering. Piloten byggdes ursprungligen för utvärdering av temperaturpåverkan på kvävereningen inom LIFE-projektet ITEST - Increased Technology and Efficiency in Sewage Treatment (Fortkamp et al., 2013).

Båda pilot-linjerna delar en gemensam primärrening med fällning och försedimentering. Efter en mikrosil (2 mm) delas flödet upp i lika delar till de båda linjer. Biostegen utgörs av för- och efterdenitrifikation följt av membrantanken. All utrustning i piloten är kopplat till ett egenutvecklat styrsystem i Cactus. De kemikalier som använts är PIX 111 som fällningskemikalier för fosforrening samt natriumhypoklorit och citronsyra för rengöring av membranen. Inget rejektivatten har tillförts i piloten. Rejektivatten (renat eller orenat) kan dock tillföras manuellt om sådana scenarier ska testas framöver.

Ett förenklat flödesschema för pilotanläggningen visas i Figur 2.



Figur 2. Övergripande blockschema för pilotanläggningen.

Inkommande avloppsvatten pumpas från inkommande fördelningstank med önskat flöde (fast flöde eller dynamiskt mot det inkommande flödet till Henriksdal) till försedimenteringen. Vattnet rinner med självfall genom försedimenteringen som följs av en egenkonstruerad mikrosil med 2 mm hålsilplåt. Primärslam från försedimenteringen och rens från silen återförs till avloppet som tillsammans med andra avloppsfraktioner från testanläggningen hamnar i inkommande avloppsvatten till Henriksdal avloppsreningsverk.

Efter silen pumpas vattnet till bioreaktorerna i de två separata MBR-linjer med lika stor flödesandel (50 %). Varje biolinje består av två anox-reaktorer, vars syfte är fördenitrifikation. Efter anoxzonen följer två ox-zoner utrustad med finblåsig bottenluftarsystem. Den sista bioreaktor har också bottenluftarsystem men kan valfri används som anox/ox-zon. Samtliga bioreaktorer är utrustade med omrörare. Användning av separata reaktorvolym har byggtkniska fördelar men innebär också att volymen på anox- och oxzoner inte är lika flexibel som i en stor reaktorvolym med flexibla zonindelningar.



Figur 3. Vy över kemikaliestationen och de överdäckade förbehandlings och slamtankarna. I bakgrunden linje B (referenslinje) och permeattank i förgrunden.

Från sista bioreaktorn pumpas bioslammet till de respektive membrantankarna som är utrustade med Suez ZeeWeeds 500D LEAP, hollow fiber-membran. Med en nominell porstorlek på  $0,04 \mu\text{m}$  utgör membranerna en effektiv ultrafiltrering (UF). Varje pilotlinje har endast en membrankassett ( $2,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 0,34 \text{ m}$ ) bestående av tre membranmoduler vardera (Figur 4). Permeat sugas ut ur membrantankarna genom membranfibrerna med hjälp av permeatpumpar.



Figur 4. Membrantankarna under installation och membrankassett med tre membranmoduler.

Det biologiska steget kan matas med avloppsvatten kontinuerligt utan att behöva stoppas under en vanlig membrancykel. Drift av membranen sker i följande faser:

1. Filtrering, 10 min (600 s)
2. Vila (relaxation, inget uttag men fortsatt luftning), ca. 60 s

Membranen luftas kontinuerligt för att undvika igensättning. Eftersom samma membranmoduler som i fullskala används, har varje membrantank en högre kapacitet än vad som krävs. För att möjliggöra drift vid ett konstant flux utrustades piloten med permeatrecirkulation vilket innebär att flödet genom membranen varit högre än inflödet men detta kompenseras genom att en delström av permeatet recirkulerades till membrantanken. Luftförbrukningen för membranrengöring i piloten blir i och med detta högre än vad luftförbrukningen i en fullskaleanläggning skulle bli eftersom kassetterna måste luftas hela tiden medan i en fullskaleanläggning luftas endast kassetter som är i drift. Denna parameter har dock bedömts inte utgöra en skillnad för projektet då den endast påverkar energiförbrukningen i piloten.

## 2.2.2 Driftstrategier

Medelvärden för flöde och belastning under projektperioden redovisas i Tabell 1.

**Tabell 1. Processdata för pilotanläggning.**

Parameter	Enhet	Värde per linje
Medelflöde, $Q_{in}$ (fast flöde)	m <sup>3</sup> /h	0,5
Nitratrecirkulationsflöde	m <sup>3</sup> /h	1
Nitratrecirkulationsflöde	× $Q_{in}$	2
Returslamflöde	m <sup>3</sup> /h	1
Returslamflöde	× $Q_{in}$	2
Total COD (TCOD) in	mg/L	419
Löst COD (SCOD) in	mg/L	165
SS-halt in	mg/L	150 (80 - 250)
N-tot in	mg/L	51,6
P-tot in	mg/L	4-6
SS i biologin	mg/L	7700
SS i membrantank	mg/L	11800
Total slamålder	d	10*
Nettoflux medel (vid medeltemp)	L/m <sup>2</sup> ,h	15
Permeatrecirkulation	m <sup>3</sup> /h	0,48
Permeatflöde	m <sup>3</sup> /h	1,5

\* uppskattat p.g.a. manuell WAS uttag och bräddningar av skum/flytslam

Permeat suges genom membranen med reversibla pumpar som även används för rengöring av membran med backpulsar. Under vanlig filtrering är pumpflödet konstant 1,5 m<sup>3</sup>/h vilket motsvarar ett flux på 15 L/m<sup>2</sup>,h för membranytan på 103,2 m<sup>2</sup>. Uttag av permeat till permeattanken styrs med reglerventil för omväxlande permeatuttag och återrecirkulering att hålla nivån ett visst flux över membranen. Membranfiltrering körs således på ett konstant flöde på 1,5 m<sup>3</sup>/h även om uttaget blir mycket lägre. Detta för att upprätthålla jämförbarheten med anläggningar i fullskala.

Membranenheten är inte i drift vid underhållsrengöring (maintenance cleaning, MC), eller återhämtningsrengöring (recovery cleaning, RC). Syftet med MC är att förlänga intervallen mellan de mer intensiva återhämtningsrengöringarna. Underhållsrengöring består i att kemikalierna citronsyra eller natriumhypoklorit pumpas med hjälp av doseringspumpar baklänges genom membranen. Tank för lagring av både citronsyra och natriumhypoklorit är en del av piloten. MC

görs ca 2 gånger per vecka med natriumhypoklorit för att ta bort organisk fouling och varje till varannan vecka med citronsyra för oorganisk fouling. RC utförs på liknande sätt som MC men med högre kemikaliekoncentrationer och längre kontakttid. En stor skillnad är dock att RC sker efter tömning av aktivt slam från membrantanken. Enligt tillverkaren bedöms RC behövas 2 gånger per år. Ingen RC har dock behövts under projektperioden.

MC sekvensen startar när en viss produktionsvolym för permeat har uppnåtts. För MC med natriumhypoklorit ligger denna volym på 173 m<sup>3</sup> och för MC med citronsyra på 345 m<sup>3</sup>. Med det flödet som piloten kördes med innebär det ca 2 ggr per vecka för en MC med natriumhypoklorit och varannan vecka för en MC med citronsyra. MC-frekvenser styrs alltså enligt flödesintervall och inte tidsintervall vilket betyder att permeabiliteten aldrig försämrades.

### 2.2.3 PAK-dosering

PAK-doseringen i piloten sker förenklat från en PAK-blandningstank med hjälp av en doserpump (Figur 2). I blandningstanken blandas den önskade PAK-slurryn till med vatten, vanligtvis med 10-12,5 g/L PAK. I uppstartsfasen testades olika blandningsförhållanden och omrörningsbehovet för att hålla PAK i dispersion. Ett flertal pumptester med olika PAK-blandningar genomfördes för att säkerställa att de använda doseringspumpar levererar de önskade PAK-doser. Även andra förhållanden testades bl.a. slangmaterial, slangdiameter, olika modeller doseringspumpar, nivåskillnader från pumpen till doseringspunkter, och olika pumpflöde för att undvika att PAK pulver separeras och sedimenterar i slangen. Doseringspumpen som användes i piloten placerades vid inflöde till membrantanken och dosering av PAK skedde vid inflödet i botten av membrantanken för en optimal inblandning genom vattenfördelning och det tillsatta membranluftflödet.

Den optimala PAK-dosering som projektet kom fram till och som användes under testperioden var 10 - 12,5 g PAK/L med ett pumpflöde som justerades mellan 0,5 - 1,2 L/h. En högre PAK koncentration i slurryn och lägre pumpflöde visade sig orsaka bl.a. att PAK sedimenterar i slangen, fastar på väggen av insidan av doseringsslangen, eller orsakar igensättning i pumphuvudet. Doseringen kontrollerades med TS analyser på PAK-slurryn och flödesmätningar på droppsidan 3-5 ggr/vecka. Pumpen och slangarna spolades rent vid avvikande flöde.

Som aktivt kol köptes in två olika PAK efter avstämning med leverantören och Universitetet i Aachen som genomförde tester med PAK vid avloppsreningsverk Nordkanal i Tyskland. Chemviron rekommenderade PULSORB WP260 eftersom mer klassiska pulver riskerar en ojämn agglomeration på hålfibermembran som kan påverka adsorptionskinetiken negativt. Denna PAK-typ har dock inte testats tillsammans med SUEZ membranerna som installerades i piloten. Vid Nordkanal använde man PAK MACarrier E (handelsnamn CSC activated carbon pharmA-Clean) från Carbon Service & Consulting GmbH & Co. KG och samma membrantyp som i våran pilot. Projektgruppen bestämde därför att köra pilottesterna med PAK MACarrier E. En utvärdering med andra PAK planeras framöver och ligger utanför det aktuella projektet.

Tabell 2 visar de testade PAK-doser i piloten och respektive testperiod. Varje dos var tänkt att köras under minst 4 slamåldrar. På grund av tidsbrist orsakat av tidigare förseningar med etablering av pilotanläggningen kördes dock endast 3 slamåldrar per dos.

Tabell 2. PAK-doser som undersöktes i projektet.

PAK-dos	Doseringsperiod
0 mg/L	februari 2022 – 9 mars 2022
10 mg/L	9 mars - 28 april 2022
5 mg/L	28 april - 13 juni 2022
25 mg/L	13 juni - 11 juli 2022
15 mg/L	11 juli - 12 augusti 2022

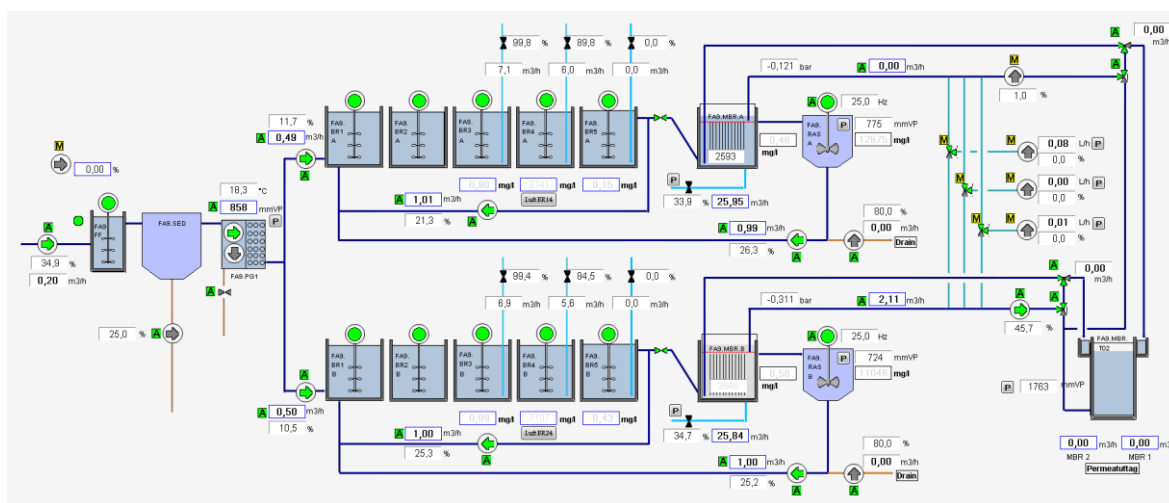
## 2.2.4 Styrsystem, instrumentering och datahantering

Pilotanläggningen är utrustad med ett flertal instrument för reglering och styrning av processen.

Figur 2 indikerar de viktigaste delarna som inkluderar flödesmätare och reglerventiler.

Pilotanläggningen är även utrustad med ett antal online mätinstrument för kontinuerlig processövervakning. I bioreaktorer finns t.ex. SS-givare, DO-givare och temperatur, för uppföljning av anläggningens funktion. Varje membrantank är utrustad med nivågivare och DO-givare. Returslamdeoxen är utrustad med nivågivare samt susp-givare. Permeattanken är utrustad med nivågivare.

Drift- och processuppföljning av pilotanläggningen sker via Scada-systemet UniView som visar alla objekt med aktuella värden från givare samt trenduppföljning (Figur 5). I försöksanläggningen användes ett styrsystem bestående av en PLC av fabrikat ABB AC800M och ett SCADA av fabrikat (version 9.01). Styrsystemet är ett standardsystem som finns på flera avloppsreningsverk i Sverige. All utrustning kopplat till piloten styrdes via styrsystemet, med undantag för pumpning av PAK och PIX som styrdes manuellt framför allt p.g.a. en säkrare drift av enskilda komponenter.



Figur 5. En skärmdump på övervakningen av MBR-pilotanläggningen i Cactus UniView.

## 2.3 Provtagning och analyser

Provtagning i vatten för mikroföroreningar och standardparametrar för driftuppföljning och utvärdering utfördes i följande punkter:

- MBR IN: gemensam punkt för båda linjer efter mikrosilen (som i MBR-GAK piloten vid Himmerfjärdsverket),
- MBR-A UT: permeat för PAK-MBR pilotlinjen vid provtagningsfack i permeattanken
- MBR-B UT: permeat för MBR referenspilotlinjen vid provtagningsfack i permeattanken

Standardparametrar för driftuppföljning och utvärdering analyserades dessutom i följande provpunkter (slamprover):

- Membrantank: MT-A & MT-B för TTF analyser,
- Bioreaktor i linje A (PAK-MBR): BR11, BR12, BR13, BR14, BR15,
- Bioreaktor i linje B (referenslinje): BR21, BR22, BR23, BR24, BR25,
- Bioreaktor 4 i båda linjer vid SS givare: BR14 & BR24,
- Ras/deox i båda linjer vid WAS-pump: för överskottsslam (placering botten av tanken), eller för TSS analyser vid SS givare (provtagning direkt i tanken)
- Filtrat från slammet för kemiska analyser, filtreringen skedde direkt efter provtagningen vid tankarna.

De flesta prov för analys av mikroföroreningar togs som dygnsprov. Prover för driftuppföljning och styrning togs även som stickprov.

### 2.3.1 Standard parametrar

Följande analyser har utförts på Hammarby Sjöstadverkets eget laboratorium:

- Kvävefraktioner: ammoniumkväve NH<sub>4</sub>-N, nitratkväve NO<sub>3</sub>-N, totalkväve Tot-N,
- Fosforfraktioner: fosfatfosfor PO<sub>4</sub>-P, totalfosfor Tot-P,
- Turbiditet (utgick dock då halter visade genomgående för låga halter),
- Färg,
- Totals suspenderat material (TSS),
- Kemisk syreförbrukning COD och löslig kemisk syreförbrukning (sCOD),
- Totaljärn (TFe), och
- TS på överskottsslam.

För att kontrollera onlinegivare och kvalitén på slammet i MBR-delen togs även stickprover för att analysera "time to filter" (TTF; standardiserat test för att bestämma den tid som krävs för att filtrera 100 mL filtrat), COD, kväve- och fosforfraktioner, SS, slamvolymindex (SVI), mikroskopering, turbiditet och sieve-test.

Analys för fett, olja och föroreningar (FOG), samt mineralolja har inte analyserats eftersom en karakterisering av dessa redan gjordes i pH2040 pilotprojekt som använder samma inkommande avloppsvatten och som visade ingen påverkan på membrandriften.

## 2.3.2 Profilering

Inför byta av PAK-dosering genomfördes en profilering över båda pilotlinjerna som inkluderade provtagning i IN, förfällning, försedimentering, mikrosil, BioReaktor 1-5, MBR-tank, RAS/Deox och permeat. Provtagningen vid profileringen följer flödet och under hänsynstagandet av uppehållstiden i respektive processvolym. Parameter som analyserades i de olika punkter omfattade TSS, kväve (NH<sub>4</sub>-N och NO<sub>3</sub>-N) och fosfor (PO<sub>4</sub>-P). Profileringen gjordes för att undersöka om en påverkan av PAK-tillsats kunde observeras.

## 2.3.3 Mikroföroreningar

*Läkemedelsanalyserna* utfördes av IVL och de analyserade ämnena redovisas i Tabell 3. Dessa ämnen inkluderar av Naturvårdsverket rekommenderade substanser (NV-panel). Läkemedels- och antibiotikarester i avloppsvatten analyserades med LC-MS/MS enligt en metod beskriven av Gros et al. (2006) med två avvikelser. Den första avvikelsen är tillsats av 200 mg EtylenDiamintetraAcetic (EDTA) till vattenprovet för att bryta eventuella interaktioner mellan analyterna och förekomsten av metalljoner i provet. Den andra metodavvikelsen var att elueringen av substanserna från filterbädden utfördes med aceton.

Tabell 3. Analyserade läkemedelsrester och deras verkan.

Substans	Verkan
Atenolol	Blodtryckssänkande
Carbamazepine	Lugnande
Ciprofloxacin	Antibiotika
Citalopram	Antidepressiv
Clarithromycin	Antibiotika
Diklofenak	Inflammationshämmande
Erythromycin	Inflammationshämmande
Fluconazole	Antifungal
Furosemide	Diuretika
Ibuprofen	Inflammationshämmande
Ketoconazole	Antifungal
Losartan	Blodtryckssänkande
Metotrexat	Cytostatika
Metoprolol	Blodtryckssänkande
Naproxen	Inflammationshämmande
Oxazepam	Lugnande
Paracetamol	Inflammationshämmande
Propranolol	Blodtryckssänkande
Sertraline	Antidepressiv
Sulfamethoxazole	Antibiotika
Tramadol	Smärtstillande
Trimethoprim	Antibiotika
Venlafaxine	Antidepressiv
Zolpidem	Lugnande

Även analyser för *PFAS (poly- och perfluorerade alkylsubstanser)* har genomförts, specifikt analyspaketet PFAS11. För detta har vattenproverna extraherats med SPE kolonner (oasis, WAX) och analys har skett med HPLC/MS-MS på IVLs laboratorium i Stockholm. MPFAC-MxA, M2-6:2PAP, M2-8:2PAP, M2-6:2diPAP och M2-8:2diPAP har använts som internstandarder för kvantifiering.



Test av *östrogena effekter* (YES = yeast estrogen screen) utfördes med en modifierad jästcellstam, som innehåller en human östrogenreceptor kopplad till en reporter-gen. Om östrogen-liknande substanser binder till östrogenreceptorn, produceras ett enzym som omvandlar en tillsatt färgindikator i testet. Effekttesterna utför på extrakt från de aktuella proverna. En volym av 500 µl av varje prov upprenas m.h.a .SPE-kolonner. Därefter delades extraktet, indunstas nästan till torrhet och förvarades i frys fram till teststarten. På varje 96-håls mikrotiterplatta appliceras blankprov med tillväxtmedium, en positiv kontrollserie av 17β-östradiol, en negativ kontrollserie av ultrarent avjonat vatten (Milli-Q, Millipore), samt spädningsserier av provextrakten. I varje serie testades 12 olika koncentrationer och varje upplägg på platta utfördes i triplikat. Efter tre dagar avlästes färgomslag vid 540 nm (Multiskan FC, Thermo Scientific). EC50 (effektkoncentration vid 50 % av den maximala effekten) beräknades både för den positiva kontrollen och vattenprover. Genom omräkning och relatering till positiva kontrollen kan slutlig effekt av varje prov presenteras som östradiol-ekvivalenter (dvs. ng 17β-östradiol per l prov). Ett högre värde innebär starkare östrogena effekter. För detaljer hänvisas till Svenson et al. (2000), Svenson och Allard (2002) samt Svenson et al. (2009) för beräkningsdetaljer.

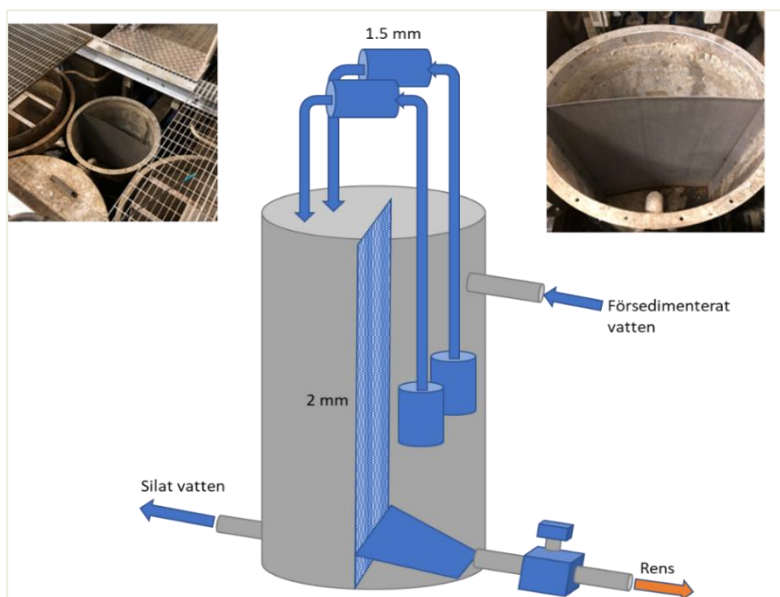
Även utgående halter av andra mikroföroreningar påverkas av en MBR-process men har inte varit fokus i det aktuella projektet. Flera föroreningar har dock analyserats i tidigare tester i MBR-pilotlinjen vid Hammarby Sjöstadsvverk med samma avloppsvatten och driftkonfiguration, dock utan PAK tillsats. Resultat från dessa delvis redan publicerade mätningar redovisas även här om relevant för helhetsbedömningen av teknikalternativet.

## 3 Resultat och diskussion

### 3.1 Etablering och intrimning av MBR-pilotanläggningen

Eftersom en befintlig aktivslampilot för biologisk rening i två parallella linjer anpassades till MBR-processen behövde piloten "endast" kompletteras med membranfiltreringsdelar inklusive kringutrustning. Befintliga eftersedimenteringstankar anpassades för att kunna nyttjas som RAS/Deox-processvolym. På många sätt liknar denna ombyggnad en anpassning av existerande avloppsreningsverk med konventionell aktivslamprocess (CAS) till MBR-processen, om även med specifika förutsättningar. På grund av utformningen av den existerade piloten har det rent utrymmesmässigt varit en utmaning att placera kemikaliedosering, permeathantering och själva membrantankarna. Eftersom det dessutom saknades bra lyftmöjligheter för att installera membranerna så valdes en praktisk lösning med membrantankar med öppningsbara sidor (Figur 4).

Baserat på membrantillverkarens krav att partiklar större än 2 mm behöver avlägsnas före membranerna designades en 2 mm hålsilplåt som avdelare i fördelningstanken för det försedimenterade vattnet (Figur 6). Dessutom installerades en dränkbar pump i det osilade facket som pumpade ett stort flöde via ett patronfilter med något mindre silhål för att åstadkomma ett konstant backspolningsflöde för att undvika en igensättning av silen. Renset tömdes via en tidsstyrd ventil. En nivågivare som var monterad i utloppsroret visade sig dock leda till en ackumulering av rens och därför fick tömningen för det mesta hanteras manuellt.



Figur 6. Modifiering av fördelningstank för att avskilja större partiklar.

Befintliga eftersedimenteringstankar gjordes om till Ras/Deox-tankar genom att montera omrörare för att hålla slammet i suspension och nivågivare för att kontrollera returslamsflödet. Och för att möjliggöra självfallet till membrantankarna konstruerades ett nytt större utlopp från sista bioreaktorn (BR15 respektive BR25) vilket fick nivån i linjen att höjas något från den ursprungliga. När överdäckningen av de nya RAS/Deox tankar var klar kunde delen för kemdosering, permeathantering och PAK-dosering installeras. Ombyggnation utfördes under rådande

coronapandemi vilket medförde att entreprenörer hade stundtals reseförbud och material- och utrustningsleveranser försenades delvis kraftigt.

Parallellt med ombyggnaden av själva piloten så byttes även det befintliga äldre styrsystemet ut och uppgraderades och integrerades i det befintliga övergripande styrsystemet för pilotverksamheten vid Hammarby Sjöstadverket. En automationsfirma anlätades för att genomföra byte av styrsystemsdelar och installera de tillägg som utökningen av MBR-process innebar. Tyvärr fick samarbetet avslutas mycket på grund av omständigheter som coronapandemin orsakat. En ny entreprenör fick ta vid och delvis börja om vilket tyvärr kostade ännu mer förseningar i färdigställandet av piloten än själva stopp p.g.a. coronapandemin redan hade givit upphov till. Det visade sig även att vissa vitala styrkomponenter behövde bytas ut vilket p.g.a. materialbrist som uppstod i spåren av coronapandemin tog ytterligare dyrbar tid.

MBR-pilotanläggningen startades upp under september 2021. Under uppstart av MBR-piloten uppstod en del oförutsedda problem som krävde anpassningar i form av bland annat programmeringsjusteringar, fysiska justeringar (exempelvis bortmontering och installation av backventiler), ersättande av defekta och fellevererade instrument, pumpbyte och felsökning i kommunikation mellan objekt. Efter att membrankassetterna installerats i membrantankarna gjordes bubbeltest med dricksvatten för att säkerställa att membranerna var intakta och att styrningen fungerar som planerat. Efter lyckat genomförande gjordes ett renvattentest för att kompensera alla beräkningar avseende TMP och permeabilitet mot pilotanläggningens faktiska tryckförluster.

För en snabbare uppstart av den biologiska processen ympades slam från Henriksdals första MBR-fullskalelinje som togs i drift under sommaren 2021. Ympning av piloten med slam från fullskaleprocessen gjordes vid avstängd inpumpning av inkommande avloppsvatten till pilotanläggningen under arbetstid i ca 2 dagar. Efter slamympningen var det planerat att piloten skulle förses kontinuerligt med inkommande avloppsvatten. En kraftig bildning av skum/flytslam i samtliga bioreaktorer i piloten gjorde dock att en lite försiktig och stegvis ökande belastning av pilotlinjerna fick tillämpas. Ytterligare två mindre ympningar genomfördes för att uppnå en stabil drift och för att undvika översvämningar och slamflykt vid skumbildningen vid ympningen.

Under vecka 50 (2021), efter att MBR-piloterna hade trimmats in och utgående permeat uppnådde de satta kvalitetskraven samt efter att programmeringen av piloten i stort sett färdigställts, startades den kontinuerliga driften av de två MBR linjer, A (PAK-MBR) och B (referenslinjen). PAK-slurryn förberedes och inmatning till membrantanken installerades.

Under intrimningen av pilotlinjen upptäcktes även att luftningskapaciteten trots initiala positiva renvattentester inte räckte till. Flödeskapaciteten utökades då genom att de befintliga rördiameter expanderades.

## 3.2 Drifterfarenheter

Generellt kan driftsättning, intrimning och kontinuerlig körning av en pilotlinje beskrivas som en väldigt stor utmaning av alla som har varit involverat i detta. Att göra detta för två i utgångspunkten identiska piloter samtidigt kan beskrivas som en enda större utmaning. Även om en förutsättning är att samma komponenter används i båda linjer så har det visat sig vara en stor utmaning att hålla samma förutsättningar för båda linjer. Enstaka pumpar och instrument kan bete sig olika i de två linjer till trots för samma tillverkare och modell. Dessutom medförde störningar av susp-givarna i PAK-MBR pilotlinjen p.g.a. PAK att inte samma automatiska styrning kunde appliceras i båda pilotlinjer.

Några andra erfarenheter som påverkat pilotdriften generellt inkluderar:

- I pilotanläggningen användes PIX (järnklorid) som fällningskemikalie vilket är svårare att hantera än Hepta (järnsulfta) som användes i andra MBR-piloter vid Hammarby Sjöstadswerk. Medan Hepta enkelt kan spädas ut för att justera flöden och därmed järndosen är PIX korrosivt och inte spädbart vilket medförde problem med användning av olika doserpumpar. Mycket tid fick läggas på att testa olika strategier för doserpumpdrift och beredning av doserlösningen.
- Ventilöppningen i luftningssystemet för bioreaktorerna styrdes av online syregivare men ventilerna hade en för grov respons som medförde att det faktiska luftflödet vid <60 % ventilöppning fastställdes till 0 m<sup>3</sup>/h luftflöde och ett alldeles för stort luftflöde observerades vid en ventilöppning >60 %. Dessutom slutade flera luftningsventiler att fungera och fick delvis bypassas och luftflödet manuellt justeras genom strypning av luftslangen. Själva utformningen av luftningssystemet kunde dock orsaka en ojämn luftflödesfördelning mellan de två pilotlinjerna. När linje A luftade fullt minskade luftflödet i linje B, och vice versa. Avsevärt längre leveranstider i kombination med felleveranser medförde mycket extraarbete för övervakning och justering av luftningen i båda pilotlinjer.
- SS-analyser i RAS-volymen indikerade en otillräcklig omblandning eftersom SS-halter blev olika i olika delar av tanken. Trots stora topmonterade omrörare kunde en otillräcklig omblandning även i de oluftade bioreaktorerna konstateras. I dessa tankar bildades under vissa perioder tjocka slamlager på ytan som skapade problem med flugor samt vid provtagningen.
- Vid underhållsrengöring av membranen (MC) bakpulsas permeaten och med den begränsade RAS-volymen i piloten orsakades översvämningar med viss tapp av suspens. Detta justerades efter de första erfarenheter genom att komplettera MC-rutinen med extra steg där nivån i RAS-tanken sänktes med motsvarande volym.

Med avseende för PAK-relaterades drifterfarenheter så kan följande saker nämnas:

- Tillsats av PAK och specifikt vid ändring av PAK-dosen inträffade störningar av suspensivare i PAK-MBR linjen. Onlinevärden visade då ett högre värde än den faktiska halten och en kalibrering av givarna upplevdes som väldigt svårt.
- Tillberedningen av PAK-lösningen kräver bra metoder för att undvika dammbildning då PAK-damm la sig överallt ifall det tilläts uppstå. I piloten löstes därför alltid hela innehållet av de 1 kg PAK-säckar i vattnet. För en bra arbetsmiljö krävdes ändå partikelgasmask under dessa arbetsmoment.
- För att säkerställa rätt PAK-dos fick mycket tid till kontrollmätning och uppföljning reserveras i pilotdriften. Även omrörning i PAK-tanken behövde övervakas och köras kontinuerlig med relativt högt varvtal för att undvika PAK-sedimentering. Trots detta samlades PAK på tankens botten och tanken tömdes och rengjordes inför varje dosbyte.
- Vissa problem med igensättning av pumphuvudet upplevdes som medförde tidskrävande rengöring. Även ett ökat slitage på pumphuvuden och mer frekvent byte av delar konstaterades.
- Det framstod som omöjligt att bestämma PAK-halten i slammet då ingen bra metod ännu har utvecklats och TS-analyser inte visade på någon skillnad.

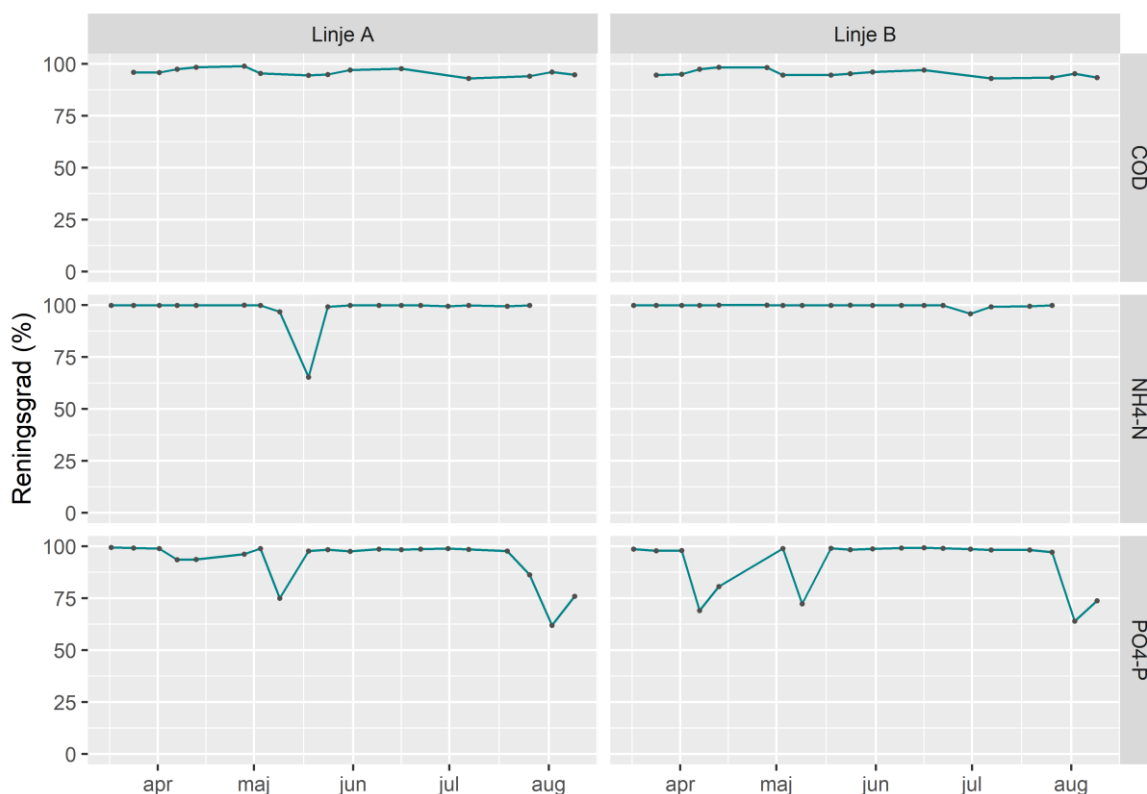
### 3.3 Reningseffektivitet i MBR-piloten

För själva pilotanläggningen hade inga specifika utsläppskrav definierats mer än att en stabil rening av de vanliga föroreningsparameter skulle uppnås samt att en jämförbar drift i båda MBR-linjer skulle åstadkommas. Med tanke på byggtekniska begränsningar och beskrivna problem med brist på vitala styrkomponenter har projektgruppen därför gjort en bedömning på veckobasis innan PAK-doseringen startades i den ena linje. Ingen optimering av reningprocessen har således genomfört inom projektet utan fokus har varit på jämförelse med avseende för rening av mikroföroreningar mellan PAK-MBR och referenslinjen.

#### 3.3.1 Standardparameter

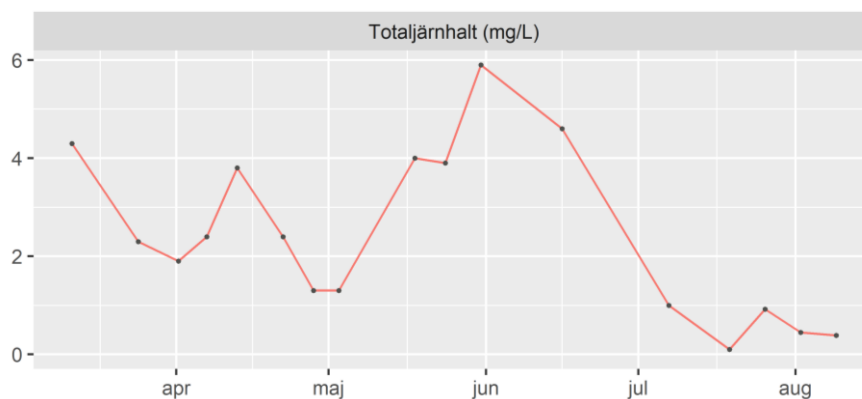
I Figur 7 visas reningen för COD, ammonium och fosfat över både PAK-MBR (Linje A) och referenslinjen (Linje B) för perioden mars-augusti 2021 (där försöken med PAK-dosering pågick) baserat på dygnsprover. Efter den initiala intrimningen har en stabil rening med >90 % för COD, >98 % NH<sub>4</sub>-N och >98 % PO<sub>4</sub>-P uppnåtts. Även om möjligheten fanns så har ingen kolkälla-dosering till efterdenitrifikation tillämpats i testperioden. Nitrathalter i effluent från båda linjer låg med medelhalter på 3,2 mg/L (PAK-MBR) respektive 4,1 mg/L (referenslinjen) ändå på en låg nivå.

För kvävereningen noterades några problem orsakat av utmaningar med luftningen som beskrivits i föregående avsnitt. Under perioden där problem inte kunde åtgärdas på flera dagar var luftflöde mindre än vad som behövdes för en effektiv rening påverkades även dygnsproverna enligt Figur 7. Dessa problem medförde framför allt en periodvis sämre rening i PAK-MBR pilotlinjen.



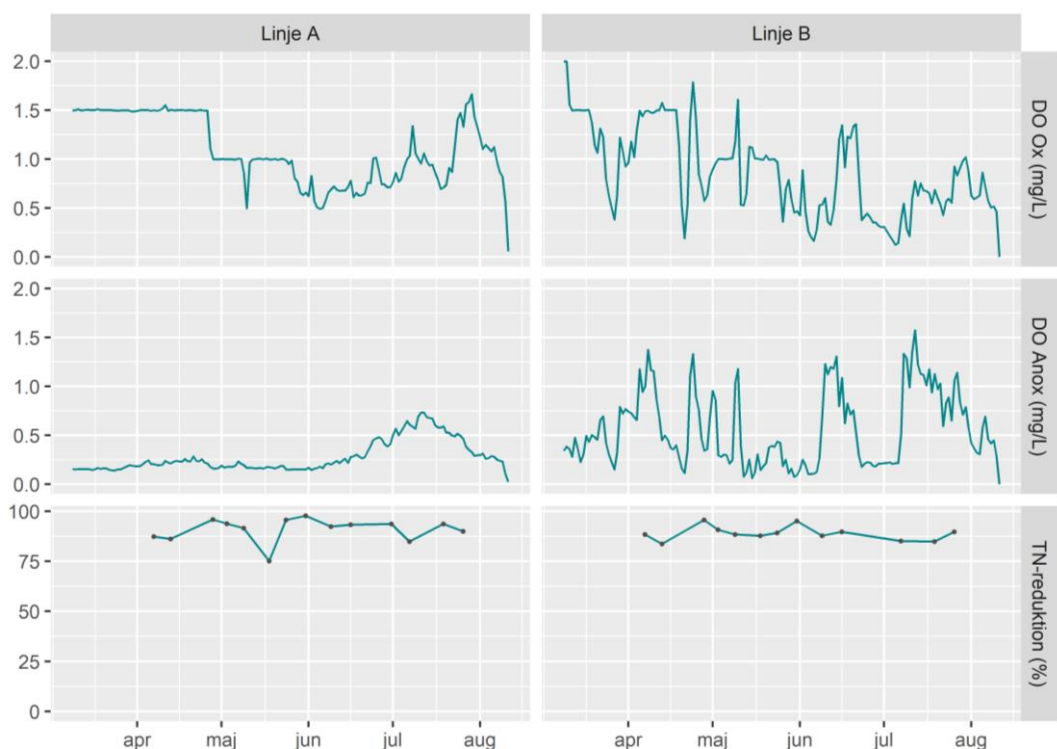
Figur 7. Reningegrad för COD, NH<sub>4</sub>-N och PO<sub>4</sub>-P i PAK-MBR (Linje A) och referenslinjen (Linje B).

Fosforhalten på utgående vatten var med en medelhalt på 0,23 - 0,29 mg/L låg trots att järndoseringen med i medel på 3,1 g/m<sup>3</sup> har varit lägre än målvärdet på 5 g/m<sup>3</sup>. Mindre reningsgrad vid några analyser i maj och i augusti skylles problem med doseringspumpen som gav en lägre järndos än vad som skulle ha tillsats enligt styrningen samt att omröraren i blandningstanken slutade fungera de sista två testveckorna. Detta kan även ses i järnhalten efter mikrosilen som visas i Figur 8 och som visar lägre halter när även fosforreduktionen varit lägre. Detta påverkade dock båda pilotlinjer och driften har därför varit jämförbart.



Figur 8. Totaljärnhalt efter mikrosilen.

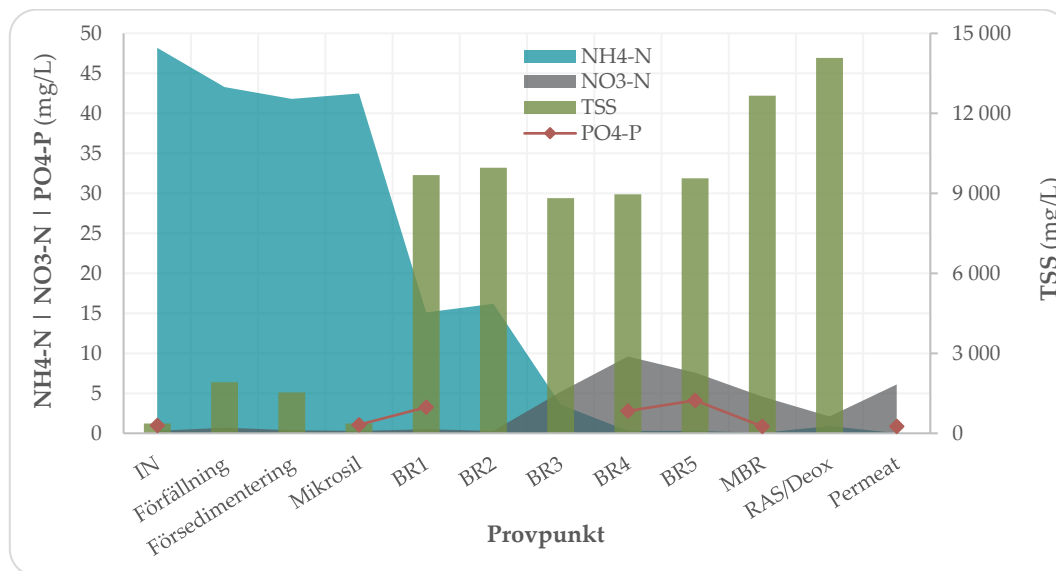
Figur 9 visar syrehalter för respektive pilotlinje för luftade och oluftade zoner och illustrerar de utmaningar som fanns med styrning av luftningen. Del på grund av en mindre flexibel styrning av luftflödet till de olika bioreaktorer men även på grund av de fasta processvolymen som inte tillät en flexibel justering av olika zoner, varierades syrehalten kraftigt och löst syre från ox-zonerna flyttades delvis över till anox-zoner. Trots dessa problem har dock kvävereningen generellt fungerat bra med en reduktion av TN på ca 85 %.



Figur 9. Syrehalter i de två pilotlinjer för luftade och oluftade zoner, TN-reduktion.

### 3.3.2 Profilering

Figur 10 visar ett exempel för referenslinjen på resultat från en utförd profilering. På grund av svårigheter med dataunderlaget och utvärderingen redovisas dock inte profileringsresultaten i denna rapport. En återkommande utmaning vid profileringen har varit begränsningar i luftningssystemet generellt och under vissa perioder specifikt. Generellt kunde inga avsevärda skillnader vid de olika profileringar observeras som kunde tillskrivas en eventuell PAK-påverkan.



Figur 10. Exempel på resultat från en utförd profilering, här i referenslinjen.

Vid profileringen observerades dock fosfatsläpp i båda linjer i sista bioreaktorn (BR15 respektive BR25). Med en låg järndosering och låga fosfathalter i utgående permeat i båda linjer tyder allt på en biologisk fosforering (Bio-P). Inga Bio-P labbtester har dock utförts som kunde bekräfta detta.

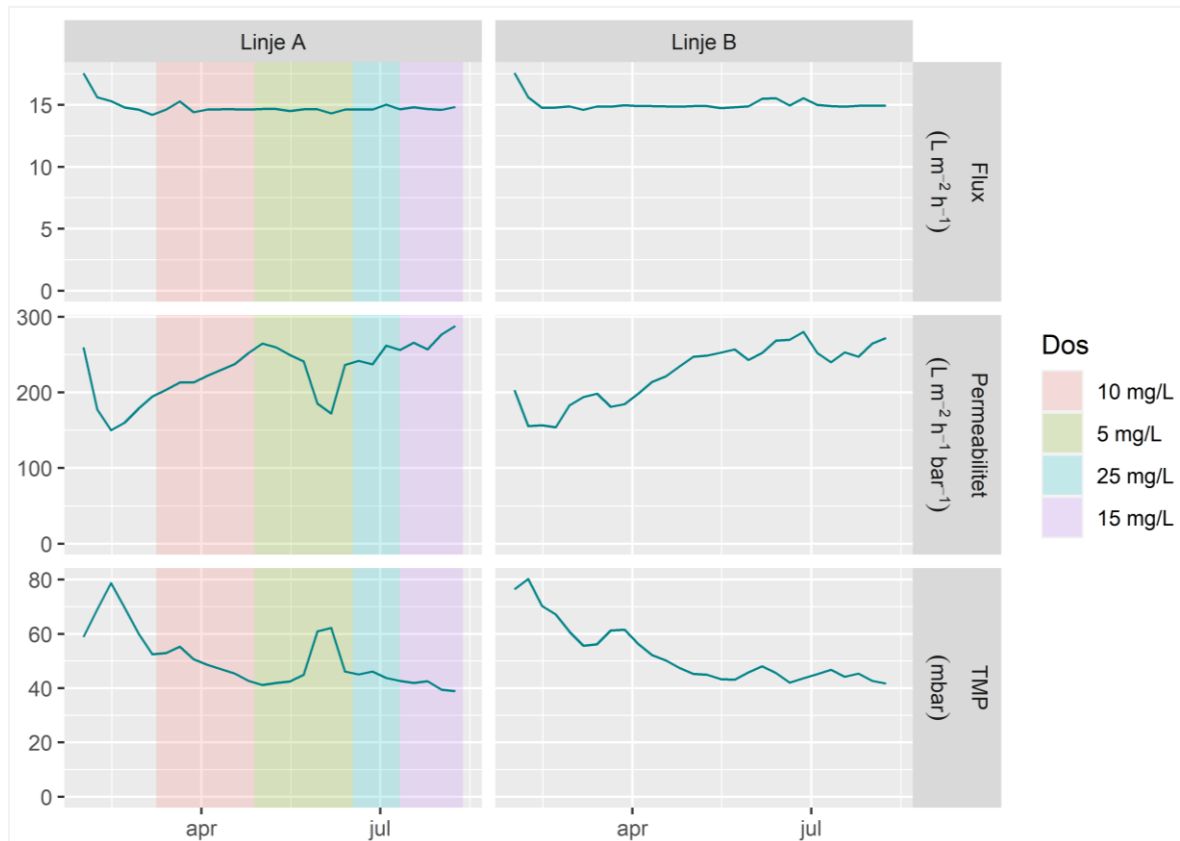
### 3.3.3 Membranprestandan

Membranen i båda pilotlinjer har utvärderats med hjälp av ett antal olika parametrar som inkluderar flux som definierar flödet per membranyta ( $L/(m^2, h)$ ) och är ett mått på hur hårt membranen belastas. Dessutom utvärderades transmembrantryckskillnad (TMP i mbar) som beskriver skillnaden i tryck före och efter membran och som kan jämföras med filtermotstånd om TMP tillåts variera. TMP är den drivande kraften för transport genom membranet. Slutligen kan permeabiliteten, alltså flux per TMP ( $L/(m^2, h, bar)$ ), användas som ett mått på hur bra ett visst flux tas ut genom membranen. Permeabiliteten försämras gradvis med tiden beroende på fouling av membran. Permeabiliteten påverkas även av vattentemperaturen och brukar därför ofta anges som temperaturkompenserat. I utvärderingen användes den temperaturkompenserade permeabilitet, normaliserad mot temperatur 20 °C.

Figur 11 visar flux, permeabilitet och TMP för både PAK-MBR (Linje A) och referenslinjen (Linje B). För PAK-MBR pilotlinjen indikeras dessutom de olika perioder med de testade PAK-doser. Eftersom pilotlinjerna styrdes via permeatuttag har fluxen i båda linjer legat på samma stabila nivå. För permeabiliteten kan en ökande permeabilitet och minskade TMP över tid observeras i båda pilotlinjer. Detta kan framför allt förklaras med en stadig ökande temperatur av avloppsvattnet från ca 16 grader i februari till ca 24 grader i augusti. För PAK-MBR pilotlinjen kan en kortare trendavvikelse mot slutet av PAK-dos 5 mg/L perioden observeras. Detta orsakades av tekniska problem framför allt i luftningssystemet som minskade membranluftningen under en period

kraftig. Men även problem med uttag av överskostslam orsakade en högre slamhalt i linjen under kortare perioder som i sin tur påverkade permeabiliteten. Denna testperiod förlängdes därför också tills membranprestandan har bedömts var tillbaka på förväntade nivåer.

Även om en viss positiv effekt av högre PAK-doser på trenden i membranpermeabiliteten skulle kunna läsas ut ur Figur 11 jämfört med motsvarande perioder i referenslinjen där permeabiliteten ökar mindre snabbt eller t.o.m. sjunker, så skulle det behövas längre testperioder med fokus på membranpåverkan vid olika PAK-doser för att fastställa eventuella effekter.

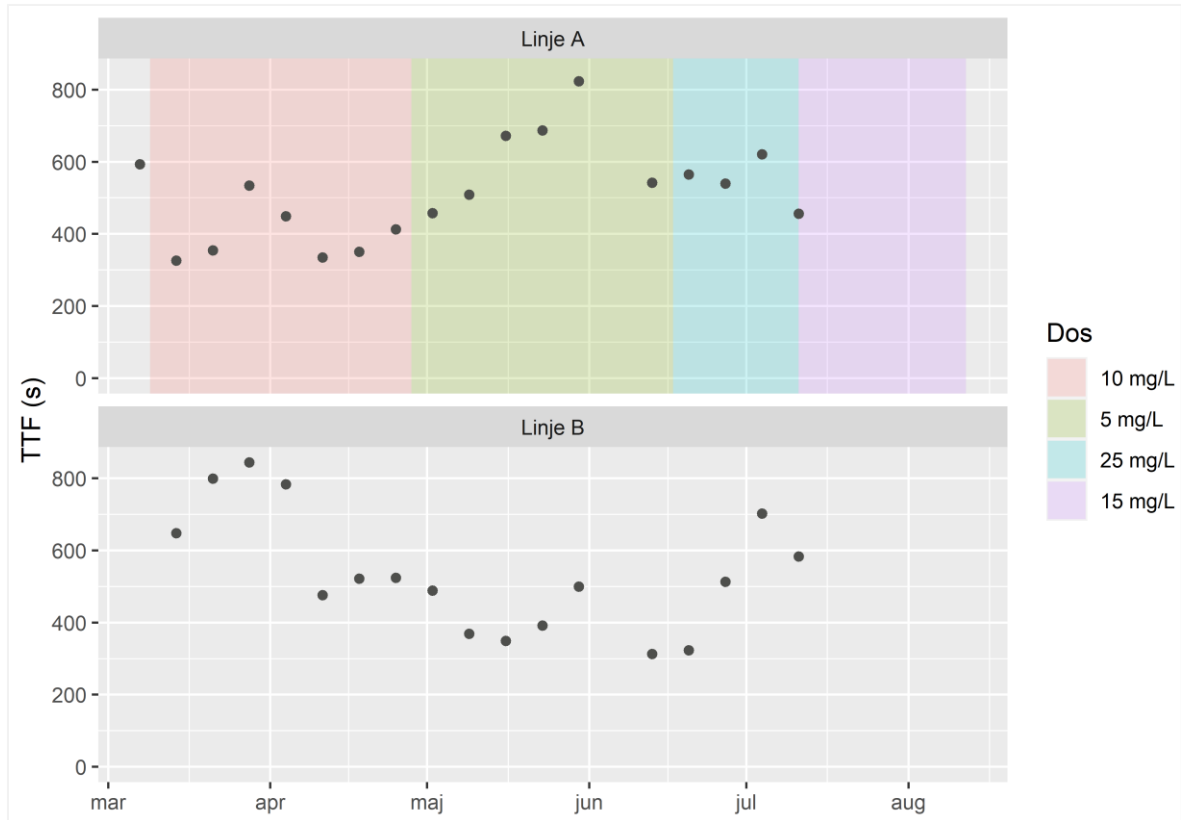


Figur 11. Flux, permeabilitet och TMP för båda pilotlinjer.

### 3.4 Slamproduktion och -egenskaper

Figur 12 visar resultat för "time to filter" (TTF) för både PAK-MBR (Linje A) och referenslinjen (Linje B). För PAK-MBR pilotlinjen indikeras dessutom de olika perioder med de testade PAK-doser. TTF anger tiden som krävs för att filtrera 100 mL filtrat och bedöms som den mest effektiva metoden för att bedöma filtrerbarheten av slam, både vad gäller dess förmåga att fastställa variationer i slamkvalitet och i reproducerbarhet (Alkmim et al., 2015). Samma studie som jämförde olika tester har även visat att filtrerbarhet är direkt relaterad till membranets nedsmutsningspotential och kan användas som ett verktyg för att övervaka och kontrollera nedsmutsningsprocessen i MBR.

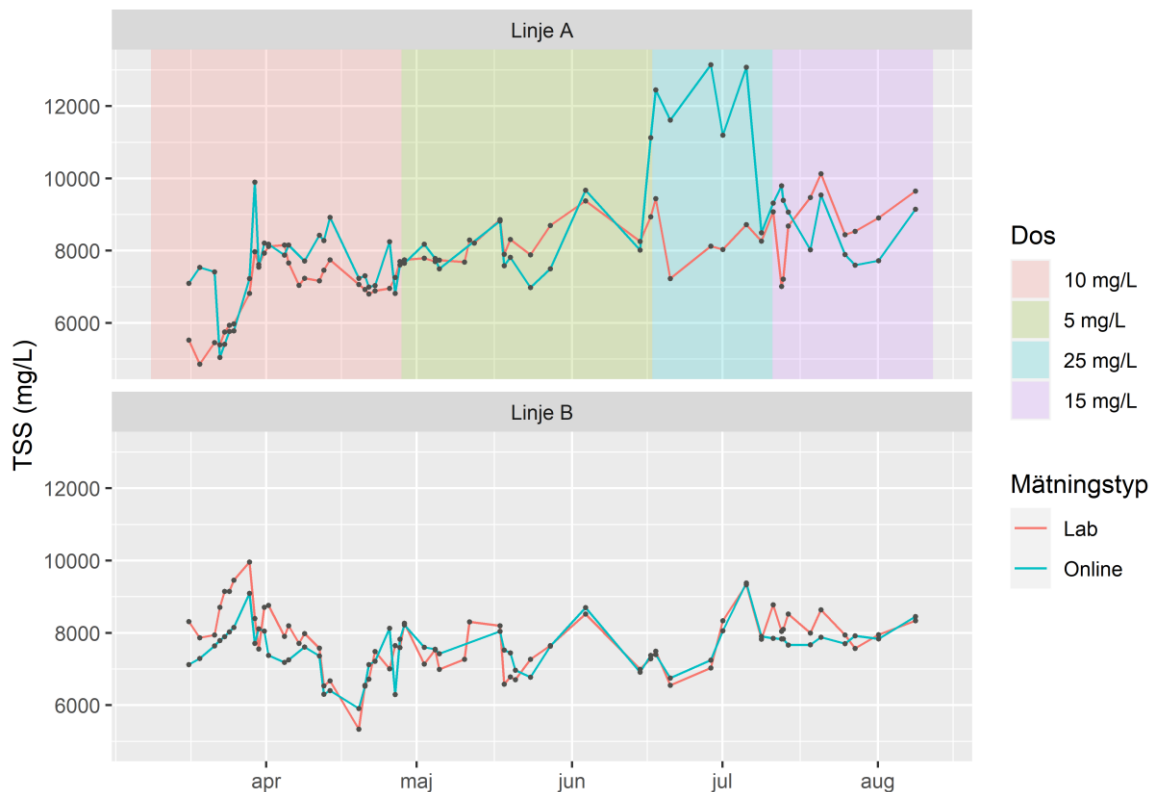




Figur 12. TTF (time to filter) för båda pilotlinjer.

TTF som visas i Figur 12 mättes med slam ur membrantankarna och visar varierande resultat för båda pilotlinjer. Medan TTF för referenslinjen i början ligger avsevärt högre så observerades sedan lägre TTF under april till juli i referenslinjen utan tydlig förklaring. En bedömning av effekten av PAK-tillsats bedömer projektgruppen som svårt och en längre testperiod med fokus på filtrerbarhet vid olika PAK-doser rekommenderas. En utmaning i pilotanläggningen som kan ha påverkat TTF-testerna är att det finns jämfört med fullskala stora recirkulationsflöde av permeat och permeatuttag och recirkulationsflödet växlas med korta intervaller (40s respektive 160s) vilket gör en representativ provtagning för TTF-tester svårt.

Figur 13 visar TSS för både PAK-MBR (Linje A) och referenslinjen (Linje B) i bioreaktor BR14 respektive BR24. För PAK-MBR pilotlinjen indikeras dessutom de olika perioder med de testade PAK-doser. Det kan tydlig observeras att det genomsnittliga målvärdet för TSS på 7500 - 8000 mg/L i båda linjer varierade delvis kraftigt. Detta berodde både på översvämningar p.g.a. kraftig skum och flytslambildning som orkade tapp av bioslam, periodvisa problem med slamuttagspumpar och luftningen, samt pilotanläggningens fasta uppdelning av processvolymen. Från figuren kan även problem med online givarna p.g.a. PAK-tillsats observeras som innan det konstaterades kunde leda till ett högre automatiskt uttag av bioslam än vad som i verkligheten skulle vara motiverat för att bibehåll en viss slamhalet i pilotlinjen.



Figur 13. TTS i båda pilotlinjer med PAK-dos indikerat för PAK-MBR (Linje A).

## 3.5 Rening av mikroföroreningar

I detta avsnitt redovisas en sammanställning av analysresultaten för mikroföroreningar, främst läkemedelsrester och PFAS, samt tillhörande reningseffekter i de två pilotlinjer.

### 3.5.1 Läkemedelsrester

Tabell 4 visar analyserade läkemedelshalter i inkommande avloppsvatten och ut från respektive MBR-pilotlinje vid de olika undersökta PAK-doser och tillhörande omgångar. För referenslinjen återger samtliga omgångar halter över linjen utan tillsats av PAK. För PAK-MBR linjen gjordes vid varje dos två provtagningar, en några få timmar efter dosbyte och en efter en drift på minst 3 slamåldrar innan byte till nästa dos. För PAK-dos 5 mg/L genomfördes ytterligare en provtagning 4 dagar efter dosbyte på grund av misstänkta driftstörningar.

Observerade halter och haltvariationer i orenat avloppsvatten motsvarar halter som observerats i andra avloppsvatten men generellt något lägre än i inkommande vatten vid Himmerfjärdsverket och MBR-piloten vid Himmerfjärdsverket (Baresel et al., 2019, 2022). Reningseffekten över processen utan avancerad rening ligger dock på samma nivå som i MBR-processen vid Himmerfjärdsverket (Baresel et al., 2022). Det framgår från tabellen att vissa läkemedel som Furosemide, Ibuprofen, Naproxen och Paracetamol förekommer i mycket högre halter än andra analyserade läkemedel och dominerar därmed även summan av alla läkemedelshalter i inkommande avloppsvatten. Som konstaterad i många studier och illustrerat i tabellen så renas av dessa substanser Ibuprofen, Naproxen och Paracetamol mycket effektivt redan i dagens reningsprocess. Även Ketoconazole kan avlägsnas mycket effektivt i dagens avloppsreningsverk. Andra läkemedel som Erythromycin, Methotrexat, Sertraline och Zolpidem kan inte eller endast i låga halter detekteras eller kvantifieras. För att inte dessa enstaka substanser ska ge en missvisande

bild av reduktionen över reningsprocessen inkluderar tabellen även summan av endast de läkemedel som är svårnedbrytbara och som vanligtvis kan kvantifieras. Denna summa ( $\Sigma$  Svårnedbrytbara\*) bestående av 16 av totalt 24 analyserade substanser utgör ca 1/5 del av totalsumman.

**Tabell 4. Analyserade läkemedelshalter i inkommande och ut från respektive MBR-pilotlinje vid olika undersökta PAK-doser.**

Substans	PAK-dos: 0 mg/L			PAK-dos: 5 mg/L									PAK-dos: 10 mg/L					
	Omgång 1			Omgång 2			Omgång 3			Omgång 4			Omgång 5			Omgång 6		
	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR
Atenolol*	190	89	100	69	48	76	110	42	77	190	80	56	280	33	99	230	30	72
Carbamazepine*	160	250	270	33,5	100	310	98	120	290	160	250	270	220	33,5	290	220	68	320
Ciprofloxacin*	120	66	110	1400	5	40	95	7,5	29	120	17	21	180	7,5	66	210	5	55
Citalopram*	67	150	170	140	7	200	48	7	190	67	38	140	100	7	170	84	7	180
Clarithromycin*	50	57	65	78	7,5	76	41	17	68	50	30	57	97	8	65	81	8	64
Diclofenac*	600	640	680	220	450	770	370	410	620	600	860	570	850	240	730	780	280	690
Erythromycin	5	12	5	5	5	24	5	13	45	5	13	14	5	3	5	13	3	40
Fluconazole*	260	290	290	130	230	360	160	200	290	260	440	280	350	130	310	290	150	320
Furosemide*	1100	700	830	580	530	510	590	450	330	1100	850	280	2000	370	800	1200	310	540
Ibuprofen	9500	8,4	8,4	4000	8,4	8,4	4300	8,4	8,4	9500	8,4	8,4	9000	8,4	8,4	9000	8,4	8,4
Ketoconazole	220	4	4	950	4	4	160	4	4	220	4	4	54	4	7	170	4	4
Losartan*	1400	210	380	930	160	170	810	200	130	1400	390	190	2000	180	250	1700	120	160
Methotrexat	9	5	5	5	5	5	5	5	5	9	5	5	9	5	5	9	5	5
Metoprolol*	830	820	930	330	110	800	490	130	700	830	320	560	1100	68	930	960	58	780
Naproxen	3000	6	6	1500	6	6	1800	6	6	3000	6	6	4600	6	6	3700	10	6
Oxazepam*	400	210	220	190	83	240	230	83	220	400	170	200	660	39	240	420	75	240
Paracetamol	12000	5	5	4600	7,5	5	5900	5	5	12000	7,5	5	14000	5	5	12000	8	5
Propranolol*	46	67	80	44	3	85	25	3	78	46	4,15	63	26	3	91	62	3	81
Sertraline	4	6	6	4	4	12	4	4	6	4	4	13	4	4	17	4	4	6
Sulfamethoxazole*	400	210	260	180	60	200	260	69	180	400	190	180	450	65	260	450	48	190
Tramadol*	100	250	300	27	150	300	27	130	340	100	290	220	180	59	280	95	64	300
Trimethoprim*	130	130	140	72	6,9	43	80	11	54	130	27	30	180	7	100	140	3	43
Venlafaxine*	250	370	400	120	93	450	160	110	420	250	300	370	360	51	430	320	33	440
Zolpidem	3,35	3,35	3,35	2	2	3,35	3,35	2	3,35	3,35	2	3,35	8	2	7	3,35	2	3,35
$\Sigma$ Alla	30844	4559	5268	15610	2085	4698	15771	2037	4099	30844	4306	3546	36713	1338	5171	32141	1305	4553
$\Sigma$ Svårnedbrytbara*	6103	4509	5225	4543	2043	4630	3594	1989	4016	6103	4256	3487	9033	1300	5111	7242	1261	4475

Substans	PAK-dos: 15 mg/L						PAK-dos: 25 mg/L					
	Omgång 7			Omgång 8			Omgång 9			Omgång 10		
	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR
Atenolol*	170	18	57	240	21	48	180	5,5	58	200	5,5	62
Carbamazepine*	130	33,5	280	170	33,5	310	190	20	300	190	20	310
Ciprofloxacin*	260	5	35	300	5	79	230	5	46	270	5	42
Citalopram*	47	4	180	74	7	180	86	4	160	67	4	180
Clarithromycin*	32	5	42	93	5	58	74	5	61	92	5	76
Diclofenac*	460	130	510	660	160	630	750	56	620	570	46	580
Erythromycin	5	3	5	5	3	12	16	3	26	5	3	19
Fluconazole*	180	110	190	310	150	320	330	49	370	220	45	250
Furosemide*	680	110	180	1000	140	230	1400	65	440	1000	65	220
Ibuprofen	6700	8,4	8,4	9800	8,4	8,4	14000	8,4	8,4	9100	8,4	8,4
Ketoconazole	190	4	4	210	4	4	500	4	6,5	290	4	4
Losartan*	1300	83	150	2000	94	200	1600	37	270	1800	28	150
Methotrexat	5	5	5	5	5	5	9	5	5	5	5	5
Metoprolol*	590	30	390	920	40	470	1000	7,5	610	870	7,5	460
Naproxen	1900	6	6	3600	6	6	4000	21	6	3200	10	6

Oxazepam*	260	19	190	390	28	230	420	8,5	230	350	8,5	190
Paracetamol	12000	5	5	15000	21	5	15000	7,5	32	12000	5	5
Propranolol*	49	3	35	72	3	36	54	3	58	53	3	49
Sertraline	67	4	6	47	4	15	4	4	6	4	4	13
Sulfamethoxazole*	300	32	160	420	53	160	520	11,5	190	560	11,5	200
Tramadol*	72	63	390	27	60	290	84	16	260	71	16	310
Trimethoprim*	74	2,5	9,7	100	2,5	8,7	160	2	21	140	2	17
Venlafaxine*	210	35	330	180	34	400	320	11	400	280	9,6	390
Zolpidem	3,35	2	3,35	3,35	2	3,35	3,35	2	3,35	3,35	2	3,35
Σ Alla	25684	720	3171	35626	889	3708	40930	360	4187	31340	322	3550
Σ Svårnedbrytbara*	4814	682	3129	6956	836	3650	7398	305	4094	6733	280	3486

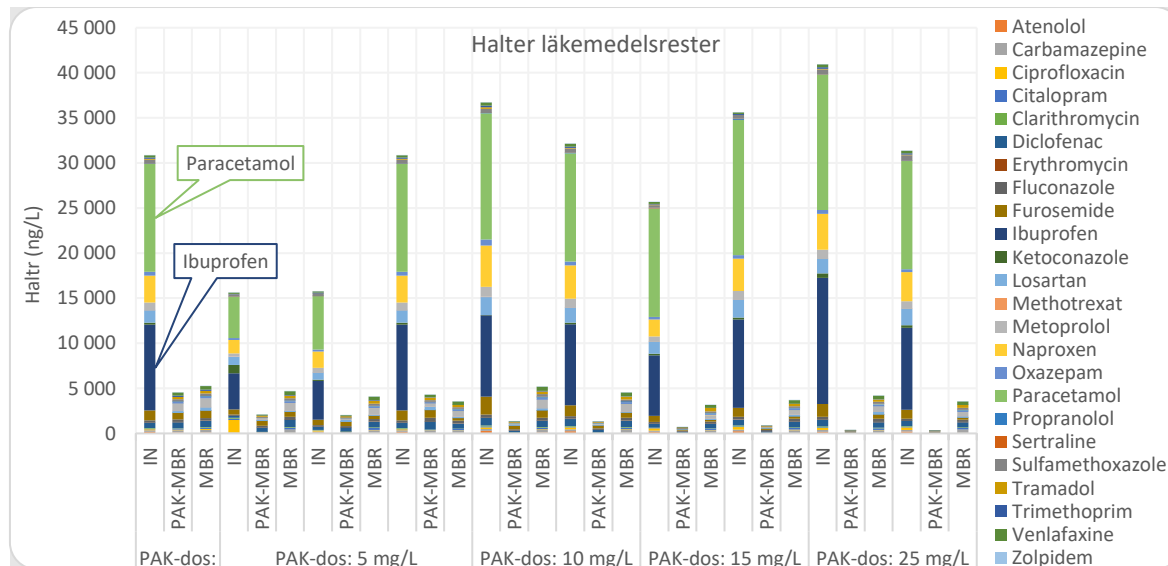
\* Svårnedbrytbara läkemedelsrester som ingår i Σ Svårnedbrytbara\*

XX - < LOD (Level of Detection)

XX - < LOQ/2 (Level of Quantification)

■ - Risk för ökad osäkerhet vid kvantifiering då halten överstiger kalibreringskurvans högsta punkt.

Figur 14 visar läkemedelshalter från Tabell 4 och illustrerar minskningen av dessa över reningsprocessen med och utan PAK-tillsats. Figuren illustrerar variationerna av olika läkemedel och totalmängden i inkommande avloppsvatten mellan provomgångar. Generellt minskat totalhalten av de analyserade läkemedel från ca 30 000 ng/L till <5000 ng/L redan i MBR-pilotlinjen utan PAK-tillsats. Substanserna Paracetamol och Ibuprofen indikeras extra för att lyfta fram att dessa två substanser tillsammans utgör störst delen av totalmängden läkemedelsrester i inkommande orenat avloppsvatten. Dessa två läkemedel renas dessutom redan effektivt bort i dagen reningsprocess utan behov för en avancerad rening. Detta illustrerar att summan av samtliga läkemedelsrester inte framstår som en bra indikator för utvärdering av olika reningsprocesser. Att använda sig av summan för svårnedbrytbara och kvantifierbara läkemedel framstår som en kompletterande indikator.

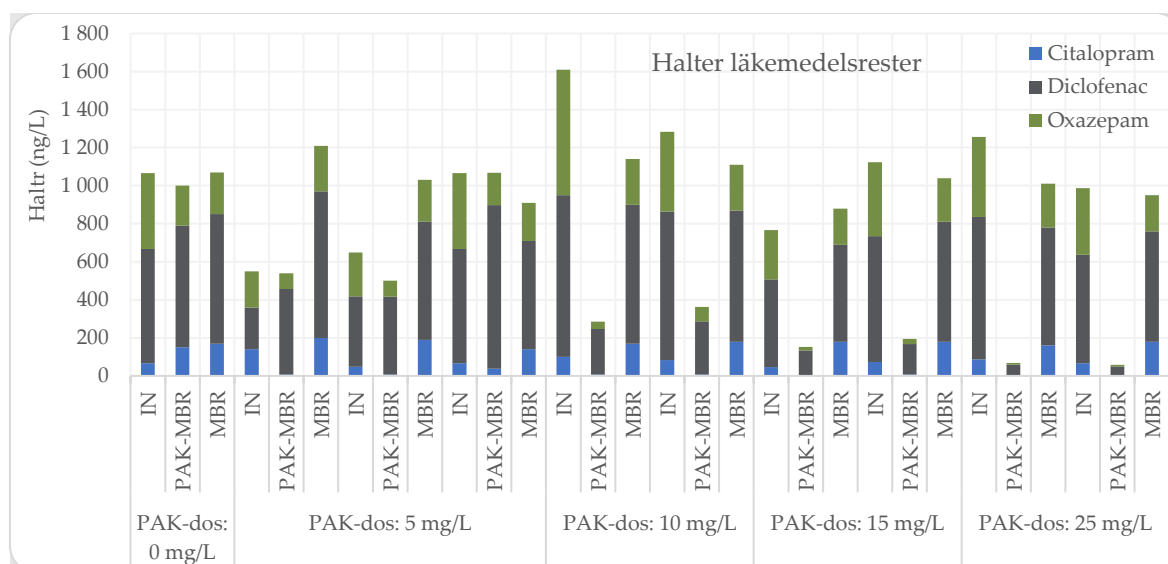


Figur 14. Halter och totalsumman av alla analyserade läkemedel för de olika undersökta proverna.

Från Figur 14 ovan kan det även läsas ut att en ändring i PAK-dosen ger en direkt effekt i reningseffektiviteten. Detta eftersom skillnader mellan reningseffekten direkt efter dosbyte och effekt av samma dos efter flera slamåldrar framstår som minimalt. Detta kan förklaras med att PAK-dosering sker i membrantanken och att adsorption av läkemedelsrester till PAKen bedöms som den primära mekanismen. Detta öppnar för en flexibel dosering av PAK som följer belastningsvariationer och som kan ge en stabil reningseffekt som är oberoende av

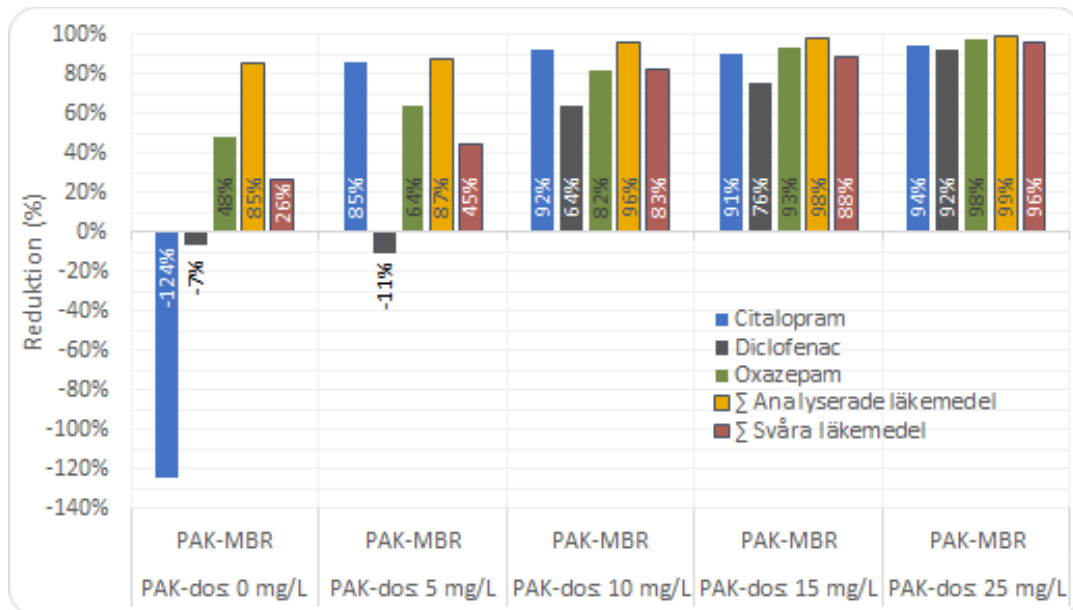
belastningsvariationer. Detta förutsatt att en lämplig styrning av PAK-dosering kan implementeras t.ex. via en online DOC-mätning inför PAK-doseringspunkten. Denna aspekt har dock inte ingått i nuvarande projektomfattning men kommer utredas vidare i framtida tester.

Figur 15 visar halter av endast de läkemedelsrester som i förstudien vid Himmerfjärdsverket pekades ut som mest prioriterade för en eventuell avancerad rening (Baresel et al., 2019). Det framgår tydligt från figuren att dessa substanser inte är lika lätt att rena bort i reningsprocessen utan avancerat rening.



Figur 15. Halter av de prioriterade läkemedelsrester för de olika undersökta proverna.

I Figur 16 visas reduktion av de prioriterade läkemedelsrester för Himmerfjärdsverket samt reduktionen av summan av samtliga analyserade läkemedelsrester och summan av endast de svårnedbrytbara och kvantifierbara läkemedlen för de olika undersökta scenarierna. Igen illustreras att summan av samtliga analyserade läkemedelsrester inte är ett lämpligt mått för att jämföra olika tekniker då reduktion även utan PAK-tillsats redan uppgår till 85 %. För de prioriterade läkemedelssubstanser och summan av endast de svårnedbrytbara och kvantifierbara läkemedlen kan en tydlig trend med ökande reningseffekt med ökande PAK-dos läsas ut. Med en PAK-dos på 25 mg/L uppnås en mycket effektiv reduktion på >90 % för samtliga redovisade läkemedelskategorier. Summan av samtliga analyserade läkemedelsrester och summan av endast de svårnedbrytbara och kvantifierbara läkemedlen renad bort med >99 % respektive >96 %. För Citalopram som uppvisar en kraftig negativ reduktion på 124 % i pilotlinjen utan PAK-tillsats uppnås redan vid den lägsta PAK-dosen på 5 mg/L en reduktion på 85 %.



Figur 16. Sammanställning av reduktion av prioriterade läkemedel och summan av samtliga samt summan av endast de svårnedbrytbar och kvantifierbara läkemedel vid de lika testade PAK-doser.

### 3.5.2 PFAS

Tabell 5 visar analyserade PFAS11 samt  $\Sigma$ PFAS11 i inkommande avloppsvatten och ut från respektive MBR-pilotlinje vid de olika undersökta PAK-doser och tillhörande omgångar som för läkemedel (Tabell 4). Även här visar halter för referenslinjen resultat utan tillsats av PAK.

Observerade halter och haltvariationer i orenat avloppsvatten motsvarar halter som observerats i andra avloppsvatten. Halten på 86 ng/L 6:2 FTS i inkommande avloppsvatten vid omgång 4 sticker ut men bekräftades i en omanalys av provet. Vad som orsakat den mycket högre halten i enat detta prov kunde inte fastställas. I andra provomgången kunde 6:2 FTS inte kvantifieras p.g.a. störningar vid analysen. Även en upprepning av analysen kunde inte ge en utvärdering p.g.a. störning i analysen.

Tabell 5. Analyserade PFAS11 och  $\Sigma$ PFAS11 i inkommande och ut från respektive MBR-pilotlinje vid olika undersökta PAK-doser.

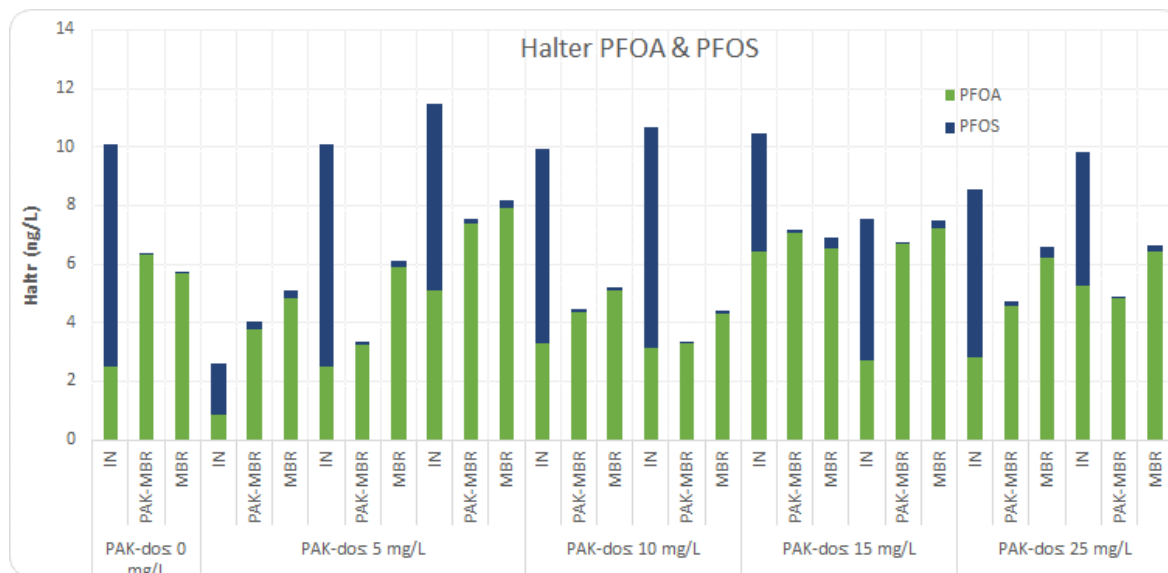
PFAS	PAK-dos: 0 mg/L			PAK-dos: 5 mg/L								PAK-dos: 10 mg/L						
	Omgång 1			Omgång 2			Omgång 3			Omgång 4			Omgång 5			Omgång 6		
	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR
PFBA	8,15	3,65	3,58	1,92	4,41	5,02	8,15	4,40	5,32	22,27	2,05	2,96	39,00	0,90	2,82	11,17	2,89	1,71
PFPeA	1,12	7,19	6,49	0,61	6,79	5,82	1,12	5,90	6,36	1,95	8,70	7,97	2,88	5,77	5,39	2,39	5,75	5,78
PFHxA	10,83	5,56	5,17	0,68	4,11	4,49	10,83	4,89	5,77	5,21	5,59	6,05	5,27	4,23	5,22	7,545	4,53	5,22
PFHpA	0,52	2,24	2,22	0,41	1,71	1,85	0,52	1,55	1,94	0,95	2,35	2,46	0,65	1,54	1,41	0,8	1,26	1,58
PFOA	2,50	6,30	5,67	0,86	3,76	4,85	2,50	3,22	5,89	5,10	7,37	7,90	3,31	4,38	5,08	3,13	3,30	4,28
PFNA	0,54	0,24	0,26	0,09	0,12	0,25	0,54	0,10	0,26	0,53	0,23	0,48	0,36	0,22	0,31	0,43	0,11	0,21
PFDA	0,26	0,05	0,05	0,15	0,06	0,08	0,26	0,05	0,05	0,42	0,05	0,05	0,05	0,09	0,07	0,14	0,05	0,05
PFBS	0,47	2,16	1,96	0,05	3,00	2,19	0,47	1,68	1,97	0,42	3,19	3,06	0,62	1,81	1,94	0,315	1,53	1,43
PFHxS	1,42	1,13	1,04	0,95	1,10	1,75	1,42	0,62	1,68	1,54	1,22	1,77	1,70	0,98	1,34	1,68	0,73	1,15
PFOS	7,58	0,10	0,09	1,75	0,29	0,26	7,58	0,11	0,22	6,36	0,19	0,27	6,60	0,10	0,11	7,55	0,05	0,12
6:2 FTS	0,92	0,14	0,11	n.d.	NA	0,09	0,92	0,34	0,06	86,59	0,06	0,15	1,20	0,06	1,32	1,52	0,15	0,21
$\Sigma$ PFAS11	34,31	28,76	26,64	7,47	25,35	26,65	34,31	22,86	29,52	131,34	31,00	33,12	61,64	20,08	25,01	36,67	20,35	21,74

PFAS	PAK-dos: 15 mg/L						PAK-dos: 25 mg/L					
	Omgång 7			Omgång 8			Omgång 9			Omgång 10		
	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR
PFBA	5,76	6,33	6,01	12,05	4,19	4,63	18,06	3,86	4,71	15,04	4,67	5,32
PFPeA	0,05	11,71	10,68	0,05	10,46	10,21	0,05	11,81	8,82	0,05	10,99	10,70
PFHxA	1,00	7,60	6,90	3,15	4,62	4,73	3,04	4,82	5,46	2,78	6,06	5,92
PFHpA	2,68	4,05	4,25	0,77	2,42	2,56	1,16	2,13	1,77	2,12	3,18	2,91
PFOA	6,41	7,05	6,54	2,73	6,67	7,21	2,83	4,57	6,19	5,28	4,83	6,41
PFNA	2,45	0,31	0,51	0,62	0,55	0,94	0,48	0,11	0,25	1,67	0,19	0,35
PFDA	2,38	0,05	0,05	0,34	0,06	0,09	0,15	0,07	0,05	1,17	0,05	0,05
PFBS	1,07	1,67	1,68	0,93	3,13	4,41	0,27	2,94	2,55	0,32	3,07	3,94
PFHxS	2,24	1,22	1,75	2,18	0,98	1,99	2,17	1,13	2,00	2,67	1,06	2,11
PFOS	4,05	0,10	0,36	4,79	0,09	0,30	5,71	0,14	0,40	4,56	0,07	0,22
6:2 FTS	5,45	0,05	0,38	1,82	0,05	0,66	4,98	2,68	0,06	3,23	0,05	0,46
$\Sigma$ PFAS11	33,54	40,14	39,11	29,43	33,22	37,73	38,90	34,26	32,26	38,89	34,22	38,39

XX - < LOD (Level of Detection)

n.d. ämnet kunde inte kvantifieras p.g.a. störningar i analysen

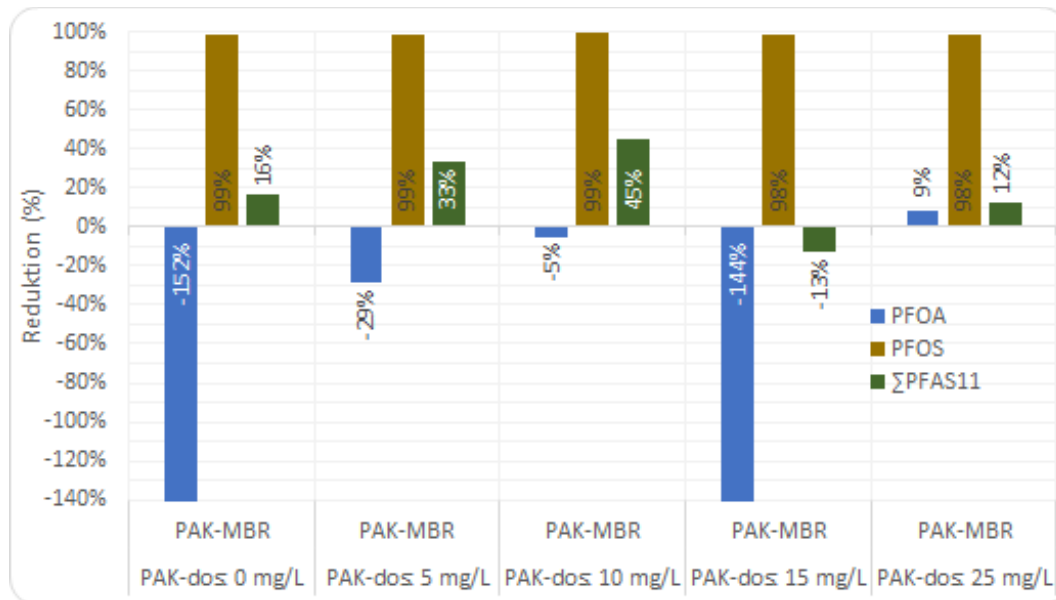
Figur 17 visar halter för PFOA och PFOS från Tabell 5 och illustrerar minskningen av PFOS över båda MBR-linjer. En kraftig PFOS-minskning observeras alltså även i referenslinjen utan PAK-tillsats även om PFOS-minskning i PAK-MBR linjen är ännu kraftigare. För PFOA kan en mer ojämn haltutveckling och inga tydliga trender konstateras. I de flesta scenarion ökar PFOA-halten över reningssteget i både PAK-MBR och referenslinjen. Detta kan även observeras för andra PFAS och  $\Sigma$ PFAS11. Ingen samband med olika PAK-doser framstår men haltökningen från inkommande avloppsvatten till MBR-effluent ligger i samtliga scenarion förutom omgång 7 på en lägre nivå i pilotlinjen med PAK-dosering jämfört med referenslinjen. Att PFOA och andra ämnen inom PFAS11-gruppen uppvisar en negativ reduktion (alltså haltökning) över reningsprocessen har konstaterats vid flera svenska avloppsreningsverk (Baresel et al., 2022b). Att olika PFAS bildas från prekursor i avloppsreningsverk är ett känt fenomen.



Figur 17. Halter av de PFOA och PFOS för de olika undersökta proverna.

I Figur 18 visas reduktion av PFOA, PFOS och  $\Sigma$ PFAS11 för de olika undersökta scenarierna. PFOS renas bort med >98 % redan utan tillsats av PAK. Som Figur 17 visar kan en PAK-dosering dock ge en ännu högre PFOS-reduktion jämfört med referenslinjen. En trend med ökande PAK-tillsats kan

dock inte läsas ut, mycket p.g.a. de redan höga avskiljningsgraderna. Även om en hög PFOS-rening delvis förväntades eftersom samma goda reningseffekt observeras i MBR-piloten vid Himmerfjärdsverket (Baresel et al., 2022a), så är en rening på >98 % under hela testperioden långt över förväntan och med marginal den högsta PFAS-reduktion över en reningsprocess som rapporterat vid svenska avloppsreningsverk (Baresel et al., 2022b).



Figur 18. Sammanställning av reduktion av PFOA, PFOS och ΣPFAS11 vid de lika testade PAK-doser.

För PFOA och ΣPFAS11 (samt för andra PFAS som inte visas i figuren) varierar reningsgraden och ingen samband mellan PAK-dos och reningseffekt verkar finnas. Från Tabell 5 kan det dock utläsas att PAK-MBR linjen i 7 av 8 undersökta scenarion med PAK-dosering har lägre halter av PFOA ut än referenslinjen. Detta pekar på en viss effekt av PAK-tillsats. Likande trender kan utläsas för andra PFAS.

### 3.5.3 Hormonstörande effekter (YES)

YES-test är en kvantitativ bestämning av östrogen aktivitet och visar den totala östrogena aktiviteten i avloppsvattnet och mäts som Östradiolekvivalenter per liter (ng E2-eq/L eller ng EEQ/L). Följande ämne kan ge utslag:

- Naturliga steroidhormoner, östrogener
- Syntetiska hormoner, läkemedel, p-piller
- Industrikemikalier, bisfenol A, alkylfenoler
- Fytoöstrogener, ämnen ur växtriket

Högst påverkan har Östradiol (1 ng EEQ/L) och Etinylöstradiol (1,2 ng EEQ/L). Även fenoler Bisfenol A ( $1 \times 10^{-5}$  ng EEQ/L), Nonylfenol ( $5,7 \times 10^{-4}$  ng EEQ/L) och Oktylfenol ( $1 \times 10^{-5}$  ng EEQ/L) har en viss men avsevärt mindre effekt på YES-testen.

Tabell 6 visar YES-halter för inkommande avloppsvatten samt MBR-effluent för de två pilotlinjer vid tre olika testperioder där 5 mg/L, 15 mg/L respektive 25 mg/L PAK tillsattes pilotlinje A (PAK-MBR). Från tabellen kan det ses att den östrogena effekten varierar i inkommande avloppsvatten över tid men att effekten reduceras väldigt effektivt i båda pilotlinjer (lägsta reduktion på 92 % utan PAK-dosering). Tabellen visar vidare att en dosering av PAK minskar YES-halten ytterligare



och endast vid testperioden med 15 mg/L PAK kunde en YES-halt i utgående avloppsvatten från PAK-MBR linjen kvantifieras.

**Tabell 6. Analyserade YES i inkommande och ut från respektive MBR-pilotlinje vid olika undersökta PAK-doser.**

Östrogena effekter	PAK-dos								
	5 mg/L			15 mg/L			25 mg/L		
	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR	IN	PAK-MBR	MBR
YES (ng/L EEQ)	92	0,1	2,2	110	1,3	3,1	87	0,1	5,5

Halten i utgående renat avloppsvatten är med 2,2 - 5,5 EEQ ng/L fortfarande hög. Under 2021 har IVL tagit fram ett förslag på effekthalter för både akut och kronisk toxicitet baserat på vetenskapliga studier. För akut toxicitet bör en halt på 1,4 ng/L EEQ inte överskridas. För kronisk toxicitet är 0,3 ng/L EEQ. Tabell 6 visar att YES-halten i utgående avloppsvatten ligger på en mycket högre nivå än både bedömda akut och kroniska effekthalter för toxicitet. Vid en dosering av PAK överskrids den bedömda effekthalten för akut toxicitet vid ingen av mätillfällena och YES-halten ligger under den bedömda effekthalten för kronisk toxicitet vid två av tre tillfällen.

### 3.5.4 Andra mikroföroreningar

**Bakterier** analyserades inte inom projektet men har tidigare analyserats i pH2040 piloten som har samma inkommande avloppsvatten och MBR-konfiguration och -typ som i denna pilot (Andersson et al., 2021). Analyser gjorde då enligt SS EN-ISO 9308-2:2014, odlingsbara mikroorganismer enligt SS-EN ISO 6222:1999. Bakterierna mäts som antal kolonibildande enheter (colony forming units, cfu) per volymenhet. Bakterieanalyserna genomfördes av Eurofins och visade följande resultat:

- *Koliforma bakterier*: <10 cfu/100 mL (under detektionsgräns)
- *Odlingsbara mikroorganismer* (vid 22 °C): 920 cfu/100 mL
- *E-coli* (*Escherichia coli*): <10 cfu/100 mL (under detektionsgräns)

Motsvarande halter i renat avloppsvatten från konventionell aktivslamprocess ligger på signifikant högre nivåer som t.ex. >75 000 cfu/100 mL Koliforma bakterier (Allard och Wahlberg, 2017).

Undersökningen av **antibiotikaresistenta bakterier** som gjordes av Allard och Wahlberg (2017) visade att det fanns resistenta bakterier i alla undersökta utgående avloppsvatten utom efter MBR-processen där totalantalet bakterier generellt var väldigt lågt.

**Mikroplaster** analyserades inte i den aktuella piloten. Med en nominell porstorlek på 0,04 µm kan dock en komplett avskiljning av mikroplaster med den vanliga definitionen av 0,1 µm - 5 mm antas. Detta bekräftades även i mätningar inom pH2040 pilotprojektet som har samma inkommande avloppsvatten och MBR-konfiguration och -typ som i denna pilot enligt (Allard och Wahlberg, 2017; Närhi et al., 2021).

Analyser av **hormoner** Östron (E1), Östradiol (E2), Etinylöstradiol (EE2) har ännu inte kunnat genomföras. Dock genomfördes analys av hormoner i MBR-piloten vid Hammarby Sjöstadsvärk vid flera tillfällen av Allard och Wahlberg (2017) och Närhi et al. (2021) visade höga halter Östron och i några fall kvantifierbara halter Östradiol i inkommande avloppsvatten. Etinylöstradiol kunde inte detekteras i någon av de analyserade proverna i inkommande avloppsvatten. I utgående avloppsvatten (MBR-effluent) återfanns endast Östron och Östradiol i enstaka prover i koncentrationer över kvantifieringsgränsen. På grund av de få prover med kvantifierbara halter

rapporterades endast en reduktionsgrad för Östron med >94 %. Det bör noteras att framför allt Östradiol (E2) och Etinylöstradiol (EE2) bidrar med störst effekt i YES-testen och en analys av hormoner i utgående avloppsvatten kan ge klarhet om ursprunget av den delvis högre YES-halt i MBR-effluent (Tabell 6).

*Fenolerna* (bl.a. Bisfenol A, Nonylfenol och Oktylfenol) har tidigare analyserats i MBR-piloten vid Hammarby Sjöstadsvverk av Allard och Wahlberg (2017). Endast Bisfenol A och Nonylfenol kunde detekteras i MBR-effluent men även fr dessa fenoler var reningsgrad över MBR-processen på 97 % respektive 94 %. Även fenoler bidrar till viss del till en östrogen effekt (YES-test).

### 3.6 Andra effekter med PAK-dosering

Under pilottesterna har flera andra effekter av PAK-doseringen på reningen kunnat observeras som dock samtidigt inte kvantifierades genom faktiska analyser. Detta dels då dessa effekter inte infattades av förstudien och els på grund av att utvärderingen av dessa effekter fortfarande pågår.

En tydlig positiv effekt av PAK-doseringen var den *minskade skum och flytslambildning* i pilotlinjen med PAK-dosering jämfört med referenslinjen. Likande observationer har rapporterats från fullskaletester med PAK-tillsats för skumbekämpning vid Nordkanal ARV i Tyskland. Förklaringen är att PAK adsorberar extracellulära polymera substanser (EPS) och förbättrar slammets flockegenskaper genom att skapa ett stabilt skelett (Du et al., 2020).

Även en tydlig skillnad i *färg* på de två MBR-effluent har observerats vid provtagningar. Utgående avloppsvatten från PAK-MBR linjen uppvisade, som Tabell 7 indikerar, mindre missfärgning med ökande PAK-dos än utgående avloppsvatten från referenslinjen. Användningen av aktivt kol för att ta bort missfärgningar från t.ex. brunns- eller dricksvatten är vanligt.

Tabell 7. Resultat för färganalyser i båda pilotlinjer baserat på dygnsprover.

PAK-dos	Linje A (PAK-MBR)	Linje B (referenslinje)
0 mg/L	1,8	1,8
5 mg/L	1,1	1,4
10 mg/L	1,5	2,1
15 mg/L	.*	.*
25 mg/L	0,4	1,5

\* analys saknas

De förväntade *bättre slamegenskaper* i bioslam från PAK-MBR linjen ska fastställas genom kompletterande analyser och tester. Från driften av pilotlinjerna verkar som om tillsats av PAK kan förbättra slammets sedimenterbarhet och avvattningsförmågan. En orsak till detta är även här en förändring i extracellulära polymera substanser (EPS) vid tillsats av PAK. EPS består av högmolekylära proteiner och kolhydrater (polysackarider). De utsöndras från cellen under normal bakteriell tillväxt och metabolism. Funktionen hos EPS-matrisen innefattar aggregering av bakterieceller i flockar och biofilmer, bildande av en skyddande barriär runt bakterierna, kvarhållande av vatten och vidhäftning till ytor. Tillsatsen av PAK ökar troligtvis förhållandet mellan protein och kolhydrater i avloppsvatten. Detta innebär sedan en förbättrad sedimenterbarhet och avvattning av slam på grund av proteins hydrofoba natur.

Även en eventuell *ökad biogasproduktion* vid rötning av bioslam som innehåller tillsats PAK undersöks för närvarande med hjälp av två uppsättningar AMPTS II från Bioprocess Control med bioslam från olika testperioder med och utan PAK-tillsats. Att slam som innehåller PAK kan ge en

ökade metanproduktion kan förklaras med att PAK i rötkammaren effektivt hindrar ackumuleringen av hämmande ämnen som propionsyra och ammoniak (Pan et al., 2020).

### 3.7 Resursförbrukning och kostnadsbetraktningar

I förstudieprojektet vid Syvab Himmerfjärdsverket (Syvab 2019) kom projektgruppen fram till att gå vidare med ett principförslag för teknikalternativet MBR-GAK baserat på att GAK-filtertechniken är en beprövad teknik. Nackdelarna med en stor förbrukning av GAK, vilket medför både miljöpåverkan, logistik och hög driftkostnad, samt extra processvolym och GAK-hantering lyftes dock fram. Baserat på principförslaget som togs fram i förstudieprojektet (Syvab 2019), resultaten från pilotförsöken med PAK-MBR i detta projekt, och pågående pilotförsök med MBR-GAK tekniken vid Himmerfjärdsverket (Baresel et al., 2022a) kan en första bedömning och jämförelse av resursförbrukning och kostnader vid en fullskaleimplementering göras.

De designparametrar som ligger till grund för principförslaget och som påverkar reningskostnaden är framför allt behovet av aktivt kol. För MBR-GAK uttrycks genom antal behandlade bäddvolym (BV) innan GAK behöver bytas ut. För PAK-MBR finns själva PAK-dosen som parameter. Enligt uppdaterade priser från leverantören av aktivt kol både som PAK och GAK som används i respektive pilotförsöken ligger priser med ca 35 kr/kg på samma nivå.

För MBR-GAK beräknades i principförslaget att ca 20 000 BV kan behandlas i ett filter innan filtermaterialet behöver bytas ut. Detta motsvarar en GAK-förbrukning på ca 30 mg/L. Inget specifikt reningsmål har definierats för en eventuell avancerad rening vid Himmerfjärdsverket. För de 20 000 BV som antas i principförslaget ligger dock indirekt en genomsnittlig reningseffekt på 80 % av de prioriterade läkemedelssubstanser genom flera parallella linjer i drift. Från Figur 16 kan en PAK-dos på 15-20 mg/L antas ge en rening på minst 80 % inte bara för de prioriterade läkemedelssubstanser men även alla andra läkemedelssubstanser. Driftkostnaden för kolförbrukningen skulle därmed beräknas till ca 60,7 Mkr för GAK-MBR och 30 - 40,5 Mkr för PAK-MBR alternativet. Det bör noteras att resultaten från de pågående pilottester vid Himmerfjärdsverket visar att ett minst dubbelt så många bäddvolym än principförslaget har räknats med kan behandlas i den utformningen av MBR-GAK som föreslagits av IVL (Baresel et al., 2022a). Det skulle leda till likande kostnader för MBR-GAK med avseende för aktivt kol som för PAK-MBR. I båda fallen kan regenererat aktivt kol användas som skulle reducera kostnaderna ytterligare. Dock kan det aktiva kolet i PAK-MBR alternativet inte regenereras. Driftkostnader för hantering av kol vid kolbyte kan antas hamna på samma nivå för båda alternativen.

Båda tekniklösningar kräver dessutom installationer för kolhantering och för MBR-GAK alternativet även själva filterinstallation. Själva investeringskostnaden för etablering av GAK-filter som klarar ett dimensionerande flöde på 6600 m<sup>3</sup>/h vid Himmerfjärdsverket beräknade Ramboll till ca 430 Mkr (Syvab 2019). För PAK-MBR alternativet krävs i princip endast en lagring av PAK inför dosering och en doserutrustning. De vanligaste tekniska lösningar för PAK-hantering inkluderar silo-lastbil, Big-Bag, container eller säckar. Med ett dagligt PAK-behov vid samma designflöde som i principförslaget på ca 3200 kg behövs alltså ca 6 m<sup>3</sup> silovolym per dag. Vid samma utformning som kemikaliedosering i många högflödesreningsanläggningar med hjälp av Big-Bag ligger investeringskostnaden på en signifikant lägre nivå än de 430 Mkr som krävs för MBR-GAK alternativet. Enligt en preliminär kostnadsberäkning av leverantören skulle installationen för doserutrustningen av relevanta PAK-mängder vid en fullskaleimplementering vid Himmerfjärdsverket kosta ca 1 Mkr totalt. Det kan också noteras att MBR-GAK alternativet behöver räkna med en viss redundans i utformningen (två extra filter enligt principförslaget) som ger en ökad investering. Även i PAK-MBR alternativet behövs redundanta system dock gör den

avsevärt lägre investeringskostnader att även den extra redundans endast ger en mindre extra kostnad.

Det bör betonas att ovanstående beräkningsexempel kan endast ge en grov indikation då de båda pilotprojekt med MBR-GAK och PAK-MBR ännu inte är färdig utredda, olika avloppsvattenmatriser ligger till grund och andra sekundära kostnadsaspekter inte har inkluderat i betraktningen.

Investerings- och driftkostnader för själva slamhantering i PAK-MBR alternativet räknas inte med då en anpassad slamhantering är själva förutsättning för implementering av PAK-MBR tekniken. Tillsats av PAK kan däremot både leda till minskade kostnader i slamavvattningen på grund av förbättrade slamegenskaper och ge en ökad biogasproduktion enligt första indikationer från projektet.

Andra viktiga aspekter i jämförelse mellan de två teknikalternativen MBR-GAK och PAK-MBR inkluderar:

- En möjlig framtida tillverkning av *biokol* för användning PAK-MBR alternativet enligt Figur 1 som också kan ge en destruktion av olika mikroföroreningar som PFAS, läkemedel och mikroplaster. Biokol kan i princip även användas i MBR-GAK alternativ som tidigare försök har visat (Baresel et al., 2017b). Dessa tester visade dock också att den mindre fysikaliska stabiliteten i biokol kan vara en utmaning i filterbäddar, speciellt med tanke på att mer frekventa backspolningar av filter med biokol kan krävas jämfört med kommersiella GAK-filter.
- En *dynamisk styrning* av reningseffekten kan endast åstadkommas med PAK-MBR alternativet eftersom PAK-dosen enkelt kan anpassas efter aktuell belastning och önskat reningseffekt.
- En *utökning av reningskapaciteten* p.g.a. eventuella framtida belastningsändringar eller krav kan enklast åstadkommas i PAK-MBR alternativet då i princip endast en ökat PAK-dosering behöver säkerställas. I MBR-GAK alternativet kan det krävas en utökning av filterkapaciteten om belastningen av filtren inte kan ökas p.g.a. begräsningar i ytbelastning. En kortare kontakttid och därmed ökat bytesintervall av GAK skulle därmed inte kunna kompensera för en högre belastning. I utformningen med 2-stegsfilter som testas vid Himmerfjärdsverket skulle dock varje filterpar kopplas ifrån varandra och filtret köras som 1-stegsfilter vilket skulle kunna öka kapaciteten men även den relativa förbrukningen av GAK då kontakttiden reduceras.
- Vid platsbrist kan PAK-MBR alternativet var fördelaktigt då endast *mindre extra volymer* för PAK-lagring och -dosering behövs. För övrigt används samma procesvolymer som redan finns tillgängligt.
- Positiva bieffekter som en extra rening och *positiv effekt* på skumbildning även om dessa aspekter inte studerades i detalj i pilotprojektet. Även en positiv effekt på slamegenskaper i form av bättre avvattningsförmågan som kan reduceras resursförbrukningen, ökat biogasproduktion, samt förbättrade biokolegenskaper relevant vid markanvändning ifall biokol produceras via pyrolysis.

## 4 Slutsatser och rekommendationer

Projektet visar hur etableringen av PAK-MBR pilotanläggningen vid Hammarby Sjöstadswerk kunde avslutas under 2021 trots stora utmaningar och förseningar framför allt orsakat av coronapandemi. Bestående av två identiska MBR-pilotlinjer varav den ena användas för att dosera olika PAK-doser till membrantanken kunde reningseffekten för olika mikroföroreningar undersökas. Förutom att en mycket effektiv borttagning av studerade läkemedelsrester med >80 % redan vid PAK-doser på ca 15 mg/L kunde åstadkommas så kunde även hormonstörande effekter avlägsnas vid de flesta undersökta PAK-doser. Även PFOS kunde renas bort mycket effektivt med >98 % av PAK-MBR teknikkombinationen. PFOS kunde dock även rensas bort mycket effektivt i referenslinjen utan PAK-tillsats. För andra PFAS har reningseffekten inte varit lika tydligt även om PAK-MBR pilotlinjen visade en något bättre reningseffekt än MBR pilotlinjen utan PAK-tillsats.

En initial bedömning av teknikkombinationen med avseende för miljöpåverkan och kostnader och jämfört med teknikkombinationen MBR-GAK som för närvarande testas tyder på en avsevärt mindre resursförbrukningen och kostnader framför allt för etablering av den tekniska lösningen. Pilottesterna visade dessutom att en mindre eller jämförbart mängd aktivt kol som i MBR-GAK alternativet skulle behövas samtidigt som PAK-MBR kan ge en avsevärt större flexibilitet med tanke på belastningsvariationer och framtida krav.

Baserat på de resultat som projektet har tagit fram framstår teknikkombinationen PAK-MBR som den mest resurseffektiva avancerade reningsteknik för avloppsreningsverk med en MBR-reningsprocess. Förutom att investeringskostnader kan hållas på en låg nivå och en inlåsning i en omfattande infrastruktur som vid eventuella framtida krav inte ger en tillräcklig reningseffekt, uppnår PAK-MBR teknikkombinationen en mycket bred reningseffekt för många olika mikroföroreningar. Genom projektet anser projektgruppen dessutom att teknologins mognadsgrad som kan uttryckas som teknikmognadsnivåer (Technology Readiness Level - TRL). TRL finns i 9 nivåer med den lägsta 1 när en teknikens grundläggande principer har identifierats och högsta nivån 9 när tekniken använt framgångsrik i verkliga förhållanden. En lyft till nivå 7 som beskriver att tekniken har testats och utvärderat i realistisk miljö kan anses uppnåddes baserat på projektresultaten.

För en fullskaleimplementering av PAK-MBR tekniken rekommenderas kompletterande tester för att utreda hela potentialen tekniken ger, synergier med MBR-processen samt eventuella sekundära effekter som ännu inte kartlagts. Även långtidstester med dynamisk belastning rekommenderas för att undersöka teknikkombinationen förmågan att klar av säsongsvariationer av olika parameter samt för att bekräfta driftstabiliteten. Tester kan genomföras både i pilotskala och fullskala men en jämförbar referensprocess rekommenderas. Inför en framtida implementering rekommenderas vidare att även slamhanteringen tas med i utvärderingen. Detta då det kan finnas möjligheter att öka en utökat och hållbar cirkularitet t.ex. genom nyttjande av biokol tillverkat från avloppsslam och andra substrat och en simultan destruktion av mikroföroreningar.

## 5 Referenser

- Allard, A.-S., Wahlberg, C. 2017. Förekomst och reduktion av fokusämnen i fyra reningsverk. Delrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2279.
- Alkmim, A.R., da Costa, P.R., Amaral, M.C.S., Neta, L.S.F., Ricci, B.C., Oliveira, S.M.A.C., Cerqueira, A.C., Santiago, V.M.J. 2015. The application of filterability as a parameter to evaluate the biological sludge quality in an MBR treating refinery effluent. *Desalination and Water Treatment* 53, 1440–1449.
- Andersson, S.L., Westling, K., Andersson, S., Karlsson, J., Narongin, M., Carranza Munzos, A., Persson, G. 2021. Long term trials with membrane bioreactor for enhanced wastewater treatment coupled with compact sludge treatment - pilot Henriksdal 2040, results from 2019. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2409.
- Baresel, C., Andersson, S.L., Yang, J.-J., Bornold, N., Malovanyy, A., Rahmberg, M., Lindblom, E., Karlsson, L. 2022a. Resultat från FoU-samarbete Syvab-IVL - Årsredovisning för 2020 - 2021. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2444.
- Baresel, C., Karlsson, L., Malovanyy, A., Thorsén, G., Goicoechea Feldtmann, M., Holmquist, H., Winkens Pütz, K., Dalahmeh, S., Ahrens, L. 2022b. PFAS – hur kan svenska avloppsreningsverk möta utmaningen? Kunskapssammanställning och vägledning för VA-aktörer kring PFAS. SVU-rapport 2022-7. Stockholm, Svenskt Vatten.
- Baresel, C., Malovanyy, A., Walve, J., Kårelid, V. 2019. Förstudie för införande av läkemedelsrening vid Himmerfjärdsverket – Provtagning, analys och bedömning av reningsbehov. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport U6194.
- Baresel, C., Malovanyy, A. 2019. Införande av läkemedelsrening vid Himmerfjärdsverket - Sammanställning av tidigare undersökningar vid Himmerfjärdsverket. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2239.
- Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Söhr, S. 2017a. Handbok för rening av mikroföroreningar vid avloppsreningsverk - Planering och installation av reningstekniker för läkemedelsrester och andra mikroföroreningar. Slutrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2288.
- Baresel, C., Ek, M., Harding, M., Magnér, J., Allard, A.-S., Karlsson, J. 2017b. Kompletterande tester för en resurseffektiv avancerad rening av avloppsvatten. Delrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2287.
- Du, X., Shi, Y., Jegatheesan, V. & Ul Haq, I. 2020. A Review on the Mechanism, Impacts and Control Methods of Membrane Fouling in MBR System. *Membranes* 10:24.
- Fortkamp, U., Junestedt, C., Baresel, C., Westling, K., Ek, M. 2013. Increased total efficiency in sewage treatment ITEST - Evaluation report. IVL Swedish Environmental Research Institute, report B2149.
- Närhi, K., Westling, K., Andersson, S., Baresel, C., Wahlberg, C. 2021. Mikroföroreningar i avloppsreningsverk med membranteknik - Jämförelse med konventionellt reningsverk och bedömning av recipientpåverkan. Svenskt Vatten, Rapport Nr 2021-2.

Pan, C., Fu, X., Lu, W., Ye, R., Guo, H., Wang, H., Chusov, A. 2020. Effects of conductive carbon materials on dry anaerobic digestion of sewage sludge: Process and mechanism. *Journal of Hazardous Materials* 384, 121339.

Svenson, A., Allard, A: S., Viktor, T., Örn, S., Parkkonen, J., Förlin, L., Norrgren, L. 2000. Östrogena effekter av kommunala och industriella avloppsvatten i Sverige. IVL-publ. B 1352.

Svenson, A., Allard, Ä-S. 2002. Östrogena och androgena effekter i lakvatten och kommunalt avloppsvatten i Fornby reningsverk, Siljansnäs, Leksands kommun. IVL-publ B 1483:1-9.

Svenson, A., Sjöholm, S., Allard, A.S., Kaj, L. 2009. Antiestrogenicity and estrogenicity in leachates from solid waste deposits. *Environ Toxicol* 126(3): 233-239.

Syvaab 2019. Förstudie läkemedelsrening Syvaab - Huvudrapport. Dokument 613T1356758-025.

syvab 