

Syvab, i samarbete med IVL Svenska Miljöinstitutet och Ramboll

Förstudie läkemedelsrening Syvab

Uppförandet av en pilotanläggning med granulerat aktivt kol i kombination med Membran BioReaktor (MBR-GAK)

Heidi Lemström, Ross Roberts, Johanna Grim, Christian Baresel, Andriy Malovanyy

Februari 2021

Vi Värnar
Vårt
Vatten

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 2(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

Innehållsförteckning

1.	Inledning	4
1.1	Bakgrund.....	4
1.2	Syfte.....	5
1.3	Planerad fortsättning av projektet.....	5
2.	Genomförande.....	6
2.1	Etablering av pilotanläggningen	6
2.1.1	Membran BioReaktor - MBR	6
2.1.2	Aktivkolfilter (GAK)	8
2.1.3	Instrumentering och datahantering	9
2.2	Driftscenarier för GAK-filtren.....	11
2.2.1	Flerfilterdrift.....	11
2.2.2	Backspolningsstrategi.....	12
2.2.3	Belastningstester	13
2.2.4	Realtidsövervakning och styrning	13
2.3	Provtagning och analyser	13
2.3.1	Standard parametrar.....	14
2.3.2	Läkemedelsrester	14
2.3.3	PFAS	16
2.3.4	Bakterier.....	16
3.	Resultat.....	16
3.1	Uppstart och intrimning av MBR-pilotanläggningen.....	16
3.2	Uppstart och intrimning av GAK-piloten	18
3.3	Reningseffektivitet i MBR-piloten	19
3.4	Rening av mikroföroreningar	23
3.4.1	Hormoner.....	24
3.4.2	Läkemedelsrester	24
3.4.3	PFAS	27
3.4.4	Bakterier.....	29
3.5	Rening av andra föroreningar i GAK-piloten.....	29
3.6	Utvärdering av driftstrategier GAK.....	30
3.6.1	Flerfilterdrift.....	30

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 3(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

3.6.2	Backspolningsstrategi.....	31
3.6.3	Belastningstester	33
3.6.4	Realtidsövervakning och -styrning.....	34
4.	Diskussion.....	38
5.	Slutsatser	39
6.	Referenser.....	40
7.	Bilaga.....	41

Postadress

Himmerfjärdsverket
147 92 Grödinge

Säte

Botkyrka

Org.nr.

556050-5728

Telefon

08 410 776 00

Telefax

08 530 270 08

E-post

info@syvab.se

Internet

www.syvab.se

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 4(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

1. Inledning

I juni 2019 beviljades Syvab (Sydvästra stockholmsregionens va-verksaktiebolag) 10 784 124 kr i bidrag från Naturvårdsverket (NV-03803-19) 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 Ramboll och IVL Svenska Miljöinstitutet. Projekttiden varade från september 2019 till 28:e februari 2021 efter att en ansökan om förlängning med fyra månader p.g.a. Corona-pandemin under 2020 godkändes.

Denna rapport utgör leveransen till Naturvårdsverket och sammanställer resultaten som hittills kunnat samlas in från projektet. Eftersom projektet fortfarande pågår kommer en komplett rapportering ske när projektet har avslutats. En fortsättning och slutförande av försöken är planerat eftersom resultaten ska utgöra beslutsunderlag till Syvabs styrelse för en fullskaleinstallation.

Underlag för Naturvårdsverkets uppföljning av projektet med avseende på projektets genomförande, ekonomi och kommunikationsplan redovisas i en separat Bilaga till rapporten.

1.1 Bakgrund

Ombyggnation av Himmerfjärdsverket pågår. Det kommer att byggas om till ett modernt reningsverk med en MBR-process, d.v.s. MembranBioReaktor. Bygget påbörjades under januari 2020 och första linjen förväntas vara färdigställd vid årsskiftet 2023/2024. 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 Malovany, 2019; Syvab 2019) tydde på att en extra rening för läkemedelsrester vid Himmerfjärdsverket kan vara motiverad. I en teknikutredning utreddes ett antal tekniker översiktligt med avseende på bland annat teknikmognad, ekonomi (i grova drag), reningseffektivitet, logistik, miljöpåverkan samt kompatibilitet med det framtida Himmerfjärdsverket. Utredningen kom fram till att gå vidare med ett

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 5(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

principförslag för filtrering av utgående vatten från den framtida MBR-anläggningen med granulerat aktivt kol (GAK). Beslut togs även att utforma anläggningen med filter i två steg, eftersom detta bedöms öka livslängden på det aktiva kolet, och därmed reducera driftskostnaderna så mycket att det uppväger en ökad investeringskostnad.

Nuvarande pilotprojekt baseras på detta principförslag vilket möjliggör att bekräfta och vid behov förbättra designen enligt principförslaget inför en eventuell fullskaleimplementering.

1.2 Syfte

Syftet med projektet var att anlägga en större pilotanläggning som dimensionerades för en belastning motsvarande 700 pe på Himmerfjärdsverket med processkombinationen MBR-GAK. Detta för att genomföra pilotstudier på Himmerfjärdsverket skulle kunna ge unika erfarenheter för en framtida implementering av läkemedelsrening på Syvab och vid andra reningsverk.

Testkörning i pilotanläggningen skulle ge svar på bland annat reningseffektiviteten, drift- och processerfarenheter med GAK, livslängd hos det aktiva kolet samt förbättrade underlag för kostnadsbedömning av investering, drift och underhåll. I detta ingår verifiering/justering av dimensioneringsunderlag från principförslaget och behov av backspolning. 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 Planerad fortsättning av projektet

Tester med teknikkombinationer som inkluderar aktivkolfilter (GAK) behöver köras till ett tydligt genombrott av föroreningshalter kan uppmätas. Detta för att kunna ge en tydlig bild av kostnaderna för investering och drift av GAK-filtren. Kombinationen av MBR-tekniken med efterföljande GAK-filter har inte testats tidigare i pilotskala och med den karaktär på avloppsvattnet som föreligger vid Himmerfjärdsverket. Redan vid ansökan om finansiellt stöd från Naturvårdsverket har projektgruppen därför bekräftat att försöken kommer fortsätta även efter avslut av Naturvårdsverkets projektperiod, tills tydliga resultat som tillåter en komplett utvärdering och bedömning har uppnåtts. När denna tidpunkt nås är ännu svårt att utröna. Framtida resultat kommer utvärderas och publiceras i en publik rapport.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 6(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

2. Genomförande

2.1 Etablering av pilotanläggningen

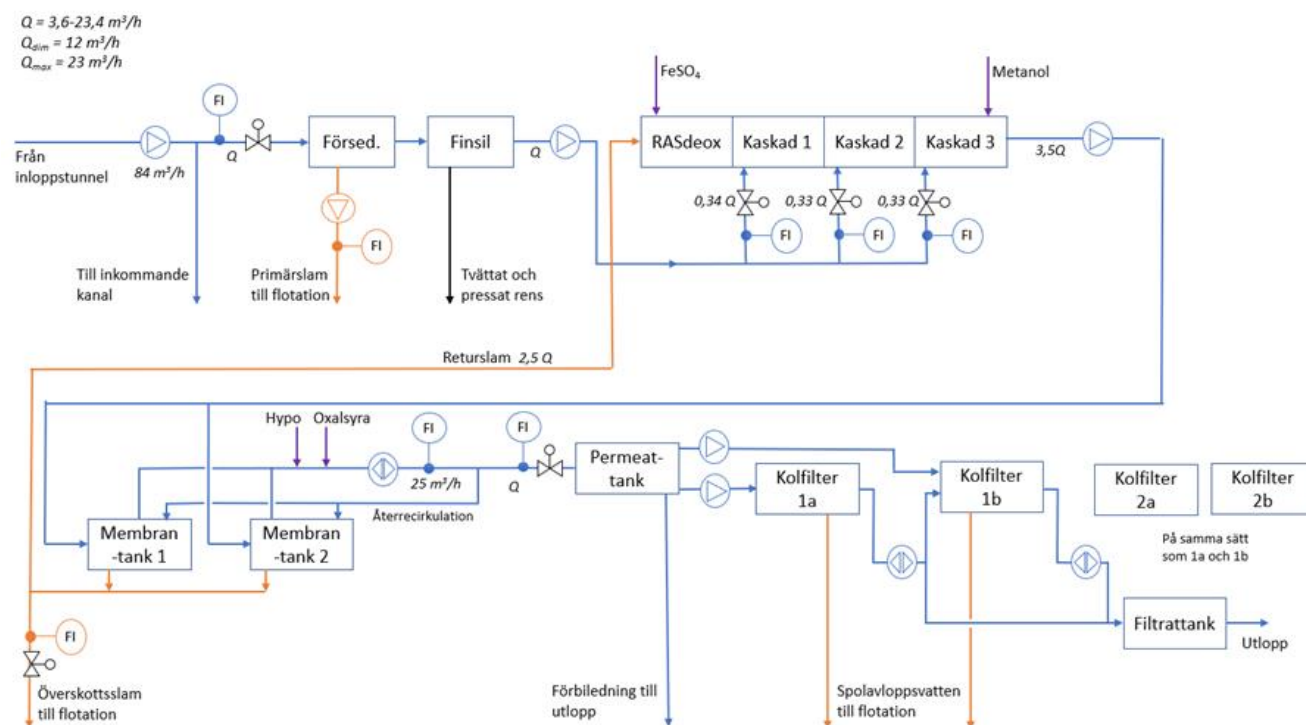
Nedan ges en förenklad genomgång av pilotanläggningens olika komponenter och dess funktion. En utförlig funktionsbeskrivning av pilotanläggningen och dess funktion har tagits fram.

2.1.1 Membran BioReaktor - MBR

MBR-delen i piloten är en miniatyr av den framtida MBR-processen på Himmerfjärdsverket med kaskadkvävering, och motsvarar 0,18 % av den framtida bassängvolymen. Den har dimensionerats för ett medelflöde på 12 m³/h ($Q_{\min} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ och $Q_{\max} = 23,4 \text{ m}^3/\text{h}$). I huvudsak baseras design och byggnation av MBR-piloten på redan befintliga systemhandlingar för Syvabs kommande ombyggnation av Himmerfjärdsverket.

En skillnad mot fullskalanläggningen är att pilotanläggningen matas med vatten som tas från Himmerfjärdsverkets inkommande tunnel efter grovgaller men före hålplåtssilen, och därmed saknar grovrening. Detta görs eftersom fällningskemikalier idag tillsätts i grovreningen, och så kommer inte fallet vara i den framtida anläggningen. Då blir doserpunkten istället i pumpstationen för returslammet. En annan skillnad är att renat rejektivatten inte tillförs i piloten. Rejektivatten (renat eller orenat) kan dock tillföras manuellt om sådana scenarier ska testas framöver.

Ett förenklat flödesschema för pilotanläggningen visas i Figur 1.



Figur 1 Övergripande blockschema för pilotanläggningen.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 7(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

Inkommande avloppsvatten pumpas från inkommande tunnel med önskat flöde (fast flöde eller proportionellt mot det inkommande flödet) till försedimenteringen. Vattnet rinner med självfall genom försedimenteringen som följs av en kanalsil med 2 mm hålblåt. Primärslam tas ut från försedimenteringen och rens från silen tvättas och pressas innan destruktion.

Efter silen pumpas vattnet till bireaktorns tre kaskader där de olika zonerna avskiljs med mellanväggar. Fördelningen av inkommande avloppsvatten till respektive kaskad styrs efter inställbar fördelningsfaktor (20-40 %, normalt 33 %) med reglerventiler och flödesmätare till respektive kaskad. Samtliga kaskader inrymmer en anoxzon, vars syfte är fördenitrifikation. Efter anoxzonen finns i varje kaskad en flexibel anox/ox-zon utrustad med både finblåsig bottenluftarsystem och omrörare för att kunna variera mellan fördenitrifikation (anox) och nitrifikation (ox). Syftet med de flexibla zonerna är att kunna variera kapaciteten för nitrifikation efter behov. Efter de flexibla zonerna finns i varje kaskad en oxzon med finblåsig bottenluftarsystem för nitrifikation. Kaskad 3 inrymmer dessutom en deoxzon och efterföljande anoxzon. Syftet med anoxzonen är efterdenitrifikation med dosering av extern kolkälla (för närvarande metanol). I deoxzonen ska nitrifikation och endogen respiration förbruka syret i det aktiva slammet innan det når anoxzonen. Detta görs för att undvika/minska förbrukningen av metanol.

Från bireaktorn pumpas vattnet till de två membrantankarna som är utrustade med Suez ZeeWeeds 500D LEAP, hollow fiber-membran. Med en nominell porstorlek på 0,04 µm utgör membranen en effektiv ultrafiltrering (UF). Ett membranfilter har tillräcklig kapacitet för behandling av hela inloppsflödet. Piloten har byggts med två membrantankar så att det biologiska steget kan matas med avloppsvatten kontinuerligt utan att behöva stoppas under tiden membrantanken rengörs. Permeat sugts ut ur slammet genom membranfibrerna med hjälp av permeatpumpar. Membranen luftas kontinuerligt för att undvika igensättning. Varje membrantank har kapacitet för Q_{max} , så en är alltid i drift och en står i standby eller tvättas. Drift av membranerna sker i följande faser:

1. Filtrering, ca. 11 min
2. Vila (relaxation, inget uttag men fortsatt luftning), ca. 45 s
3. Backspolning (backpulsing), ca. 30 s efter varje tredje vila

När membranheten inte är i drift är den antingen i standbyläge, underhållsrengöring (maintenance cleaning, MC), eller återhämtningsrengöring (recovery cleaning, RC). Syftet med MC är att förlänga intervallen mellan de mer intensiva återhämtningsrengöringarna. MC utförs i membrantankarna i närvaro av aktivt slam. Denna kemiska rengöringen av membranerna består i att kemikalierna citronsyra (som kommer ersättas med oxalsyra framöver) eller natriumhypoklorit pumpas med hjälp av doseringspumpar baklänges genom membranerna. MC bedöms behövas ca 2 gånger per vecka med natriumhypoklorit och varje till varannan vecka med citronsyra. 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

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 8(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

aktivt slam från membrantanken. RC bedöms behövas 2 gånger per år. Tank för lagring av både citronsyra och natriumhypoklorit är en del av piloten.

Permeat sugs genom membranen med reversibla pumpar som även används för backspolning. Under vanlig filtrering är pumpflödet konstant 25,4 m³/h vilket motsvarar ett flux på 21,4 l/h×m² för membranytan på 1 189 m². Uttag av permeat till permeattanken styrs med reglerventil för att hålla nivån i bioreaktorn. Återstående permeat återcirkuleras till membrantankarna. Membranfiltrering körs således på ett konstant flöde på 25,4 m³/h även om uttaget blir mycket lägre. Detta för att upprätthålla jämförbarheten med projektet i fullskala som kommer att ha samma flux på 21,4 l/h×m² men fler membran. Natriumhypoklorit och citronsyra tillsätts vid backspolning på backspolnings/permeatledningen.

Returslam leds med självfall från membrantankarna till en omrörd s.k. returslamdeoxzon. Returslamflödet beräknas från börvärde för inkommande flöde multiplicerat med returslamkvoten R (2,5). Uttag av överskottsslam styrs med reglerventil mot inställt börvärde för inkommande flöde.

Järnsulfat doseras till returslamdeoxen, styrt på inkommande flöde eller utgående fosfathalt. Metanol doseras till efterdenitrifikationen i kaskad 3, antingen med fast flöde eller styrt på utgående nitrathalt. Metanoldosering kan vid behov även ske i andra zoner (t.ex. i första anoxzonen i kaskad 3).

2.1.2 Aktivkolfilter (GAK)

GAK-filteranläggningen implementerades efter membranfiltreringssteget så att det partikelfria UF-permeatet behandlas i denna. Processen bygger på principförslaget som togs fram i förstudieprojektet (Syvab 2019) kombinerat med erfarenheter från långtidstester av GAK-biofilter efter MBR-piloten vid Hammarby Sjöstadswerk. Det aktiva kolet som används är av typ Chemviron Filtrasorb 400 i samtliga filter.

Från permeattanken pumpas vattnet till kolfiltren. Det finns fyra identiska filter som antingen kan köras parallellt var för sig (singeldrift) eller som två linjer med två filter i serie. Den senare processutformningen testas inom projektet. Flödet till filtren kan styras proportionerligt mot inkommande flöde, sättas som fast flöde eller definieras valfritt i styrsystemet (Figur 1). Principförslaget bygger på en genomsnittlig kontakttid per filter (empty bed contact time, EBCT) på 12,5 min. alltså 25 min per filterpar. Höjden för filterbädden är dimensionerat till 2 m vilket ger en ytbelastning på 10 m/h vid Q_{dim}.

Efter varje filter sitter en pump som kan användas för att pumpa utgående vatten till nästa filter i serien. Alternativt kan utgående vatten direkt pumpas till bufferttank efter varje GAK-filter vid singeldrift av filtren. Samma pump kan även användas för backspolning. Vid pumpning till utlopp eller till det andra filtret i serien, styrs pumpen på tryck efter filtret. Vid backspolning styrs pumpen på flöde och inställbar tid.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 9(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	----------------	----------------------------

Backspolning av GAK-filtren initieras antingen efter att en viss vattenvolym har passerat genom filtret (summeras från flödesmätare), med överreglering på vattennivån i GAK-filtren. Backspolning kan även initieras manuellt. Vid backspolning rengörs filtren genom att de spolas med tryckluft och med vatten från bufferttanken.

I och med pumpuppställningen är det möjligt att byta ordning på filtren, det vill säga att det andra filtret i seriedriften kan vid valt tillfälle bli det första filtret som permeatet möter. Att kunna byta ordning på filtren är viktigt då endast en filtermassa i taget byts ut. Detta innebär att det smutsigaste vattnet når det smutsigaste filtret först och det renare filtret därmed exponeras för ett renare vatten.

Utgående vatten från GAK-filtren pumpas till en bufferttank som används för att säkerställa tillräcklig volym för backspolning. Från bufferttanken leds behandlat avloppsvatten till utloppet.



Figur 2 MBR-GAK pilotanläggningen med membrantankar till vänster och de fyra GAK-filtren till höger.

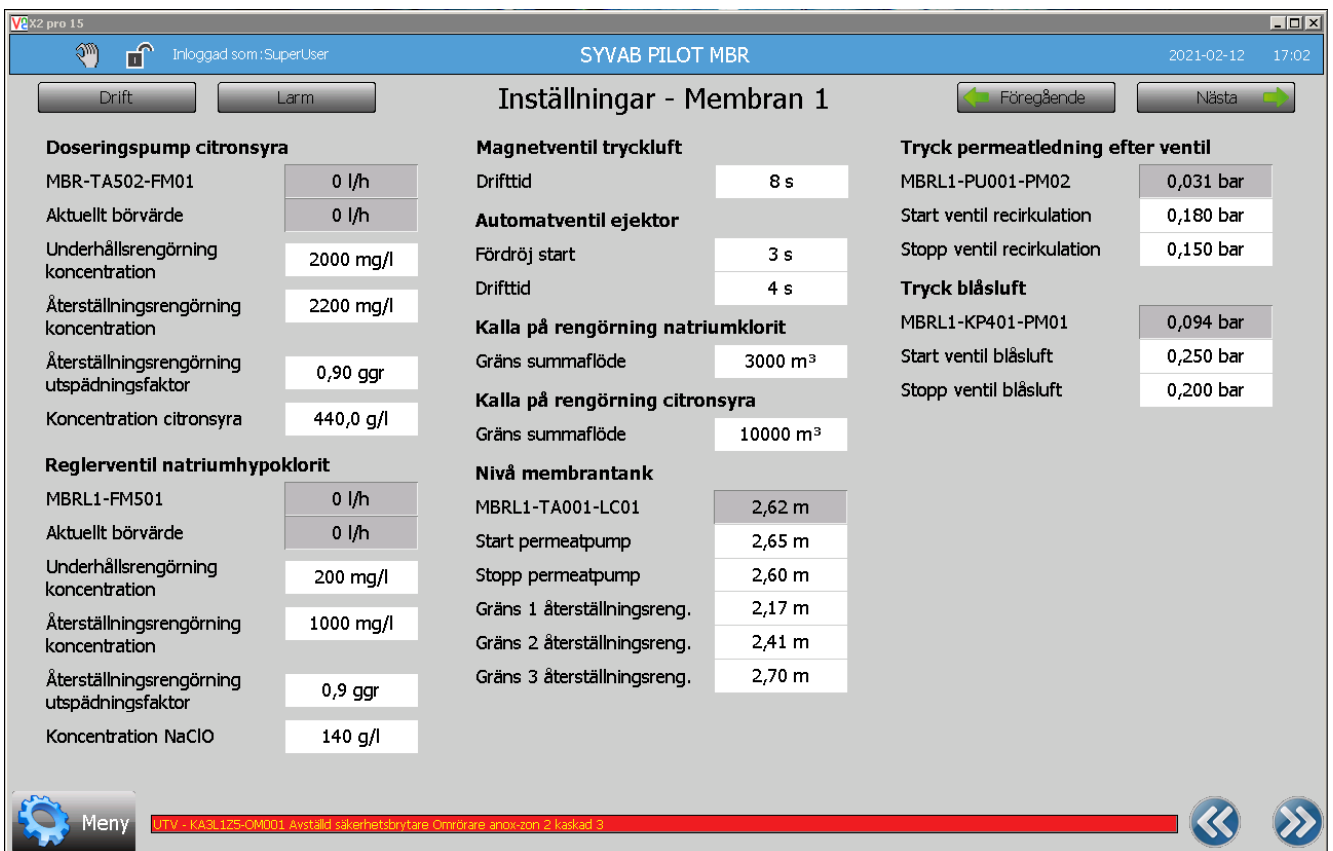
2.1.3 Instrumentering och datahantering

Pilotanläggningen är utrustad med ett flertal instrument för reglering och styrning av processen. Figur 1 indikerar de viktigaste delarna som inkluderar flödesmätare och reglerventiler.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 10(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Pilotanläggningen är även utrustad med ett antal online mätinstrument för kontinuerlig processövervakning. Vid kanalsilen finns t.ex. givare för ammonium, pH och temperatur, för uppföljning av anläggningens funktion. Flexzonerna i bioreaktorn är utrustade med syregivare. Oxzonerna är utrustade med både syregivare för styrning av luftning, samt SS-givare, ammoniumgivare och nitratgivare. Varje membrantank är utrustad med nivågivare, SS-givare och pH-givare. Returslamdeoxen är utrustad med syregivare. Permeattanken är utrustad med nivågivare, nivåvakt samt givare för ammonium, nitrat, fosfat, turbiditet, pH, samt temperatur.

Drift- och processuppföljning av pilotanläggningen sker via Scada-systemet Citect där man både har bilder på alla objekt med aktuella värden från givare samt trenduppföljning. I Citect har man även en dagboksfunktion där man enkelt kan lägga till händelser, observationer och ändringar m.m. för att logga historik. Drift- och processjusteringar samt ändring av larmgränser görs dock via panelen (se Figur 3 och Figur 4).



Inställningar - Membran 1

Doseringspump citronsyra

MBR-TA502-FM01	0 l/h
Aktuellt börvärde	0 l/h
Underhållsrengöring koncentration	2000 mg/l
Återställningsrengöring koncentration	2200 mg/l
Återställningsrengöring utspädningsfaktor	0,90 ggr
Koncentration citronsyra	440,0 g/l

Reglerventil natriumhypoklorit

MBRL1-FM501	0 l/h
Aktuellt börvärde	0 l/h
Underhållsrengöring koncentration	200 mg/l
Återställningsrengöring koncentration	1000 mg/l
Återställningsrengöring utspädningsfaktor	0,9 ggr
Koncentration NaClO	140 g/l

Magnetventil tryckluft

Drifttid	8 s
----------	-----

Automatventil ejektor

Fördröj start	3 s
Drifttid	4 s

Kalla på rengöring natriumklorit

Gräns summaflöde	3000 m ³
------------------	---------------------

Kalla på rengöring citronsyra

Gräns summaflöde	10000 m ³
------------------	----------------------

Nivå membrantank

MBRL1-TA001-LC01	2,62 m
Start permeatpump	2,65 m
Stopp permeatpump	2,60 m
Gräns 1 återställningsreng.	2,17 m
Gräns 2 återställningsreng.	2,41 m
Gräns 3 återställningsreng.	2,70 m

Tryck permeatledning efter ventil

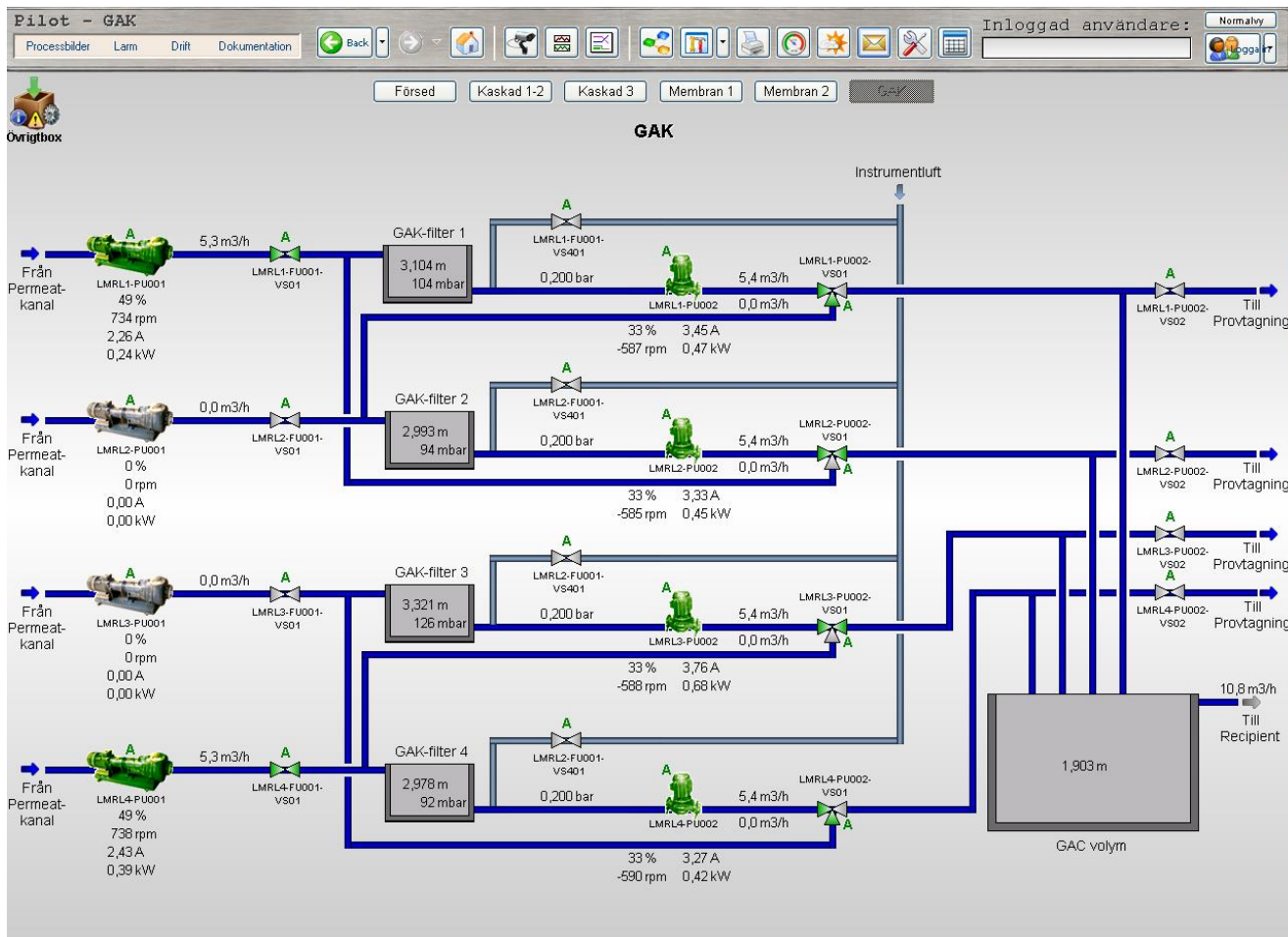
MBRL1-PU001-PM02	0,031 bar
Start ventil recirkulation	0,180 bar
Stopp ventil recirkulation	0,150 bar

Tryck blåsluft

MBRL1-KP401-PM01	0,094 bar
Start ventil blåsluft	0,250 bar
Stopp ventil blåsluft	0,200 bar

Meny UTV - KA3L125-OM001 Avställd säkerhetsbrytare Omörare anox-zon 2 kaskad 3

Figur 3 En skärmdump på några membraninställningar i panelen.



Figur 4 En skärmdump på övervakningen av GAK-filtren i Scada-systemet Citect.

2.2 Driftscenarier för GAK-filtren

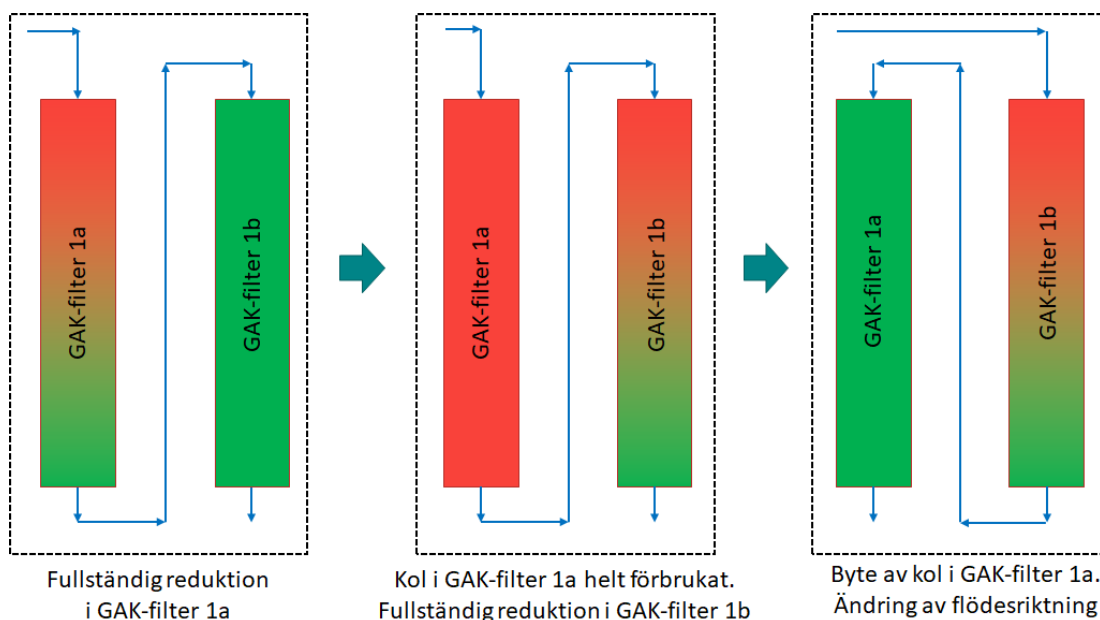
I GAK-pilotanläggningen testas olika driftsätt för att ta fram underlag för den mest resurseffektiva driften i fullskala som ger en bra design, bra reningseffekt, maximal livslängd av det aktiva kolet och minimalt underhållsarbete (backspolning).

2.2.1 Flerfilterdrift

Baserat på tidigare pilottester vid både Himmerfjärdsverket och FoU-anläggningen Hammarby Sjöstadsverket har drift med två parallella filterlinjer med vardera två filter i serie valts som huvuddriftscenario för utvärderingen. En stor osäkerhet i kostnadsbilden för en framtida fullskaleinstallation är kostnaden för aktivt kol som utgör den största driftkostnadsposten. Vad gäller livslängden på det aktiva kolet, som mäts i hur många behandlade bäddvolym vatten (empty bed volumes, EBV eller BV) som kan uppnås innan kolbyte, finns det mycket begränsat med underlag för tvåstegsfilter, speciellt vid rening av MBR-behandlat vatten. Därför har denna fråga prioriterats att undersökas i pilotanläggningen.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 12(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Kolbyte sker när kolet i ett filterpar når genombrott, d.v.s. då man ser en kraftig ökning av läkemedelssubstanser i utgående vatten från det andra filtret i filterparet. Då byts kolet i det första filtret i filterparet. Efter påfyllnad av nytt kol vänds ordningen på filtren, så att filtret med det nya kolet hamnar sist i filterparet (Figur 5).



Figur 5 Principen för drift av två kolonner i serie (s.k. "lead-lag" drift).

2.2.2 Backspolningsstrategi

Enligt principförslaget ska samtliga filter backspolas två gånger per vecka i 15 min. En regelbunden backspolning rekommenderas även av flera leverantörer och internbelastningen av förbrukat spolvatten har uppskattats till 5-15% av inkommande flöde, baserat på andra studier (Syvab 2019). Även om en regelbunden backspolning kan förhindra igensättning av filtren så resulterar driftsättet i en lägre återvinningsgrad (mindre vatten som kan renas i GAK-filtren) och högre resursförbrukning. Kombinationen med MBR-teknik leder dock till att ett partikelfritt vatten med låga halter av lättnedbrytbart material och närsalter filtreras. Detta minskar risken för igensättningar av GAK-filtren vilket orsakas av partiklar eller biologiskt tillväxt. Således borde MBR-behandling leda till ett mindre behov av backspolning. Därför har man redan i principförslaget minskat internbelastningen av förbrukat spolvatten först till 5 och sedan till 2,5 %.

Det kan även finnas andra fördelar med att minimera backspolning om tryckfallet över filtren tillåter det. I filterpiloten testas därför 2 olika scenarier. Filterpar 1 backspolas enligt principförslaget, d.v.s. 2 ggr per vecka eller när tryckfallet över filtret överstiger 160 mbar. Båda filtren backspolas samtidigt men efter varandra enligt principförslaget. Backspolning av det andra filterparet gjordes första månaden enligt samma strategi. Sedan görs backspolning endast när vattennivån i filtret når till 20 cm under bräddledningen och då spolas enbart det filter i serien som kräver backspolning.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 13(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

2.2.3 Belastningstester

Den designparameter som enligt principförslaget bedöms ha störst påverkan på investeringskostnaden är ytbelastningen (som även påverkar kontakttiden EBCT). Denna har direkt påverkan på erforderlig filteryta, vilket påverkar hela anläggningens storlek. Syftet med pilotförsöken är att säkerställa att dimensionering/design enligt principförslaget med en bäddhöjd i filtren på 2 m kommer att fungera och eventuellt optimera denna, men också att få mer data om driftkostnad/förbrukning av material och kemikalier. En fråga som är viktig att studera i piloten är hur hög hydraulisk belastning GAK-filtren klarar av och hur det förändras över tid beroende på de två backspolningsstrategierna som implementerats i de två GAK-linjerna (se 2.2.2).

Enligt förstudien har GAK-filtren dimensionerats för en maximal ytbelastning på 10 m/h, vilket innebär ett flöde på 5,4 m³/h per filter. I fullskala kommer inkommande flöde enligt principförslaget variera så att den hydrauliska belastningen på filtren fluktuerar mellan 6-10 m/h. Den maximala ytbelastningen som ett GAK-filter kan hantera varierar mellan 4 och 12,5 m/h enligt tidigare studier (Syvab, 2019). Med hjälp av upprepade belastningstester vill projektgruppen undersöka (i) vilken maximal hydraulisk belastning filtren klarar och (ii) hur tryckfallet över ett GAK-filter förändras över tid beroende på backspolningsstrategi.

Belastningstesterna gjordes därför med på filterparen med regelbundna intervall. Flödet ändrades då till att generera olika ytbelastningar (4, 6, 8, 10, 12, 14 och 16 m/h) och när en stabil vattennivå uppnåtts noterades denna tillsammans med tryckfallet och nästa ytbelastning ställdes in. Ifall vattenytan nådde bräddnivån stoppades försöken i aktuellt filterpar.

Tryckfallstesterna planerades att genomföras regelbundet en viss tid efter backspolning (t.ex. ca 24 h efter senaste backspolning). På grund av andra mer prioriterade arbetsuppgifter relaterade till uppstart och intrimning samt problemlösning kunde dock färre belastningstester genomföras än initialt planerat, hittills tre gånger med 1-2 månaders intervall.

2.2.4 Realtidsövervakning och styrning

För eventuella styrningsmöjligheter har både UVA och DOC undersökts som indikator för reningseffektiviteten i GAK-filteranläggningen.

2.3 Provtagning och analyser

Provtagning utfördes i följande punkter

- MBR IN: Efter silen
- MBR UT: Efter MBR i permeattanken
- Efter respektive GAK-filter (GAK 1a, GAK 1b, GAK 2a och GAK 2b). MBR-GAK (L1) respektive MBR-GAK (L2) används för att beteckna utgående efter respektive linje
- På ledning för förbrukat spolvatten från GAK-filtren

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 14(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Veckosamlingsprover tas ut med hjälp av stationära provtagare vid provpunkterna MBR IN och MBR UT. Samlingsprover efter varje GAK-filter tas ut via automatventiler och blandas till veckoprover. Portabla provtagare eller manuell provtagning används för insamling av samlings- respektive stickprov från t.ex. förbrukat spolvatten.

2.3.1 Standard parametrar

Ut från GAK-filtren analyseras veckoprover för UVA och DOC vid Himmerfjärdsverkets egna laboratorium. För provpunkterna MBR IN och MBR UT analyseras dygnsprover för biokemisk syreförbrukning under 7 dygn BOD₇ (Biochemical Oxygen Demand) och kemisk syreförbrukningen COD (Chemical Oxygen Demand) av Synlab. Följande analyser har utförts på Syvabs egna laboratorium:

- Kväve- och fosforfraktioner (ammoniumkväve NH₄-N, nitratkväve NO₃-N, totalkväve Tot-N, fosfatfosfor PO₄-P, totalfosfor Tot-P),
- Totalt organiskt kol (TOC),
- Turbiditet,
- Alkalinitet,
- Suspenderat material (SS),
- Glödrest (GR) och
- pH

För att kontrollera onlinegivare och kvalitén på slammet i MBR-delen tas även följande stickprover för att analysera ”time to filter” (TTF; standardiserat test för att bestämma den tid som krävs för att filtrera 100 ml filtrat), TOC, kväve- och fosforfraktioner, SS, GR, slamvolymindex (SVI), mikroskopering, pH, temperatur, turbiditet och sieve-test.

Dessutom har analyser för totaljärn, kalcium, Totalt Kjeldahl-kväve (TKN), fett, olja och föroreningar (FOG), och mineralolja analyserats några gånger för karakteriseringen av avloppsvattnet och eventuell påverkan på membrandriften.

2.3.2 Läkemedelsrester

Läkemedelsanalyserna utfördes av IVL och de analyserade ämnena redovisas i Tabell 1. Dessa ämnen inkluderar hormoner samt av Naturvårdsverket rekommenderade substanser (NV-panel). Även ranitidine analyserades som i förstudien identifierades som en av substanserna som eventuellt kan påverka recipienten Himmerfjärden negativt.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 15(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Tabell 1 Analyserade läkemedelsrester och deras verkan.

Substans	Verkan
Hormoner	
Östron (E1)	Hormon
Östradiol (E2)	Hormon
Etinylöstradiol (EE2)	Hormon
Naturvårdverket panel	
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
Andra	
Ranitidine	Mot magsår

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.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 16(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

2.3.3 PFAS

Vattenproverna har 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.

2.3.4 Bakterier

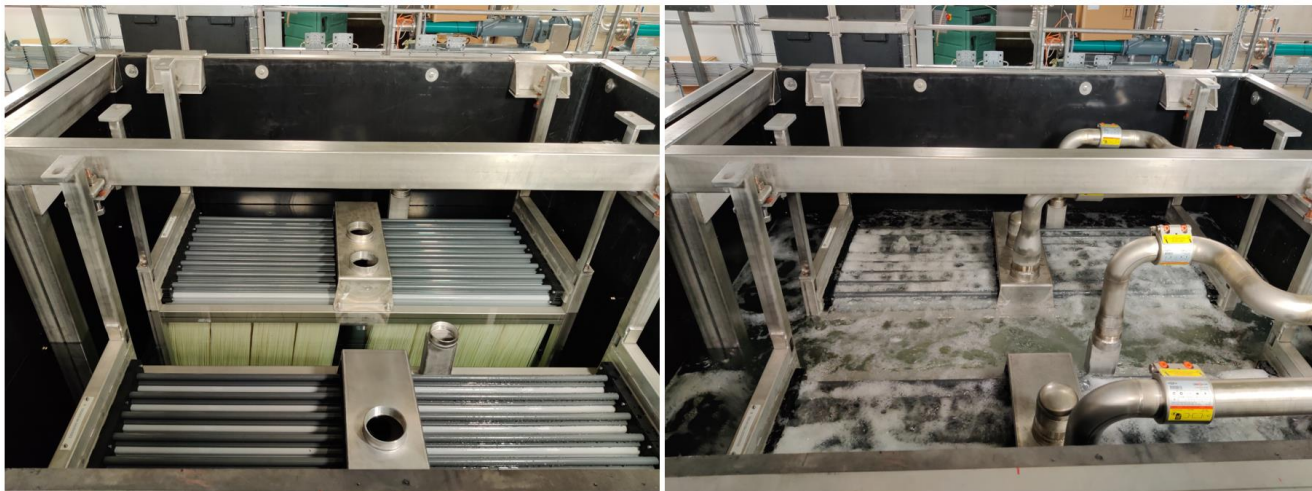
Koliforma bakterier och Escherichia Coli analyserades enligt SS EN-ISO 9308-2:2014, odlingsbara mikroorganismer enligt SS-EN ISO 6222:1999. Bakterierna mäts som antal kolonibildande enheter (colony forming units, cfu) eller sannolika enheter framräknade från en spädningsserie (most probable number, mpn) per volymenhet. Bakterieanalyserna genomfördes av Eurofins.

3. Resultat

3.1 Uppstart och intrimning av MBR-pilotanläggningen

MBR-pilotanläggningen startades upp under augusti 2020. 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 instrument, pumpbyte och felsökning i kommunikation mellan objekt. Efter att de två första membrankassetterna installerades i membrantank 1 testades samtliga funktioner inkl. styrningen med dricksvatten (Figur 6). Under installationen närvarade även membranleverantörens (SUEZ) ombud för att guida och hjälpa till samt säkerställa att membranerna inte var skadade efter transporten. Installationen av membrankassetterna i membrantank 2 gjordes vid ett senare tillfälle efter idrifttagning av GAK-filtren. Under tiden då endast en membrantank var driftsatt pausades inflödet till piloten automatiskt när membranerna behövde tvättas, vilket inträffade ca 2 gånger per vecka under 1,5 h. Detta bedömdes av projektgruppen inte påverka reningsprocessen väsentligt och driftsättet orsakade inte heller några uppenbara problem tack vare den automatiska styrningen av piloten.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 17(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



Figur 6 Idrifttagning av membrantank 1 som testkörs i dricksvatten.

För en snabbare uppstart av den biologiska processen ympades slam från Himmerfjärdsverkets returamluftning till kaskaderna. Ympningen fick tillfälligt avbrytas efter att stabilitetsproblem med väggarna som skiljer de olika zonerna från varandra upptäcktes. Efter att mellanväggarna förstärkts gjordes ett nytt ympningsförsök som även detta fick avbrytas då ympslammet hade extremt högt slamvolymindex (SVI). Detta berodde på att röret som utnyttjades till ympning av slam innehöll gammalt slam. Efter att MBR-piloten hade tömts gjordes ett tredje ympningsförsök som lyckades.

Ympning av piloten med slam från nuvarande process vid Himmerfjärdsverket gjordes i samband med intermittent inpumpning av inkommande avloppsvatten till pilotanläggningen under arbetstid i ca 3 dagar. Efter slamympningen var det planerat att piloten skulle förses kontinuerligt med inkommande avloppsvatten. På grund av en kraftig bildning av skum/flytslam i samtliga zoner i piloten (Figur 7) ändrades dock denna driftstrategi. Först vecka 37 bestämde projektgruppen att köra piloten med ett kontinuerligt inflöde. Till en början misstänktes den kraftiga skumbildningen kunna ha sin förklaring i näringsbrist under uppstartsfasen men problemet kvarstod även efter att en fullständig nitrifikation var etablerad. Mikroskopering av slammet visade emellanåt högre halter än i befintlig biologi av i stort sett samma filament som återfinns i den befintliga aktivslamprocessen vid Himmerfjärdsverket. Flytslammet innehöll mycket filamentbildande bakterier. Förutom att ett flytslamtäckte i alla zoner i samtliga kaskader kan vara en arbetsmiljöutmaning så försvårar det framförallt vid provtagning och stör funktionen av bl.a. nivågivare. Även om flytslammet i de luftade oxzonerna var tunnare än i andra zoner då luftbubblorna till viss del slog sönder flytslammet, så uppstod problem då lager av skum ibland ”bubblade över” till andra zoner. I de icke-luftade anoxzonerna bildades ett tjockt flytslamtäckte även vid regelbunden spolning. Följdproblemet med spolningen i anoxzonen är att flytslammet temporärt blandas med resten av slamvattnet för att sedan stiga till ytan igen. En kraftigare skumansamling i piloten jämfört med dagens aktivslamprocess kan delvis förklaras av att skiljeväggarna i piloten som delar in aktivslambassängen i zoner förhindrar skummet att följa med vattenflödet genom processen, samt att lytslamuttag saknas. En

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 18(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

lösning på flytslamsproblematiken utreds för närvarande både i piloten och för det framtida Himmerfjärdsverket. Bland annat kommer ytomrörare testas i piloten inom kort. I det framtida Himmerfjärdsverket kommer zonindelning och uttag av vatten till membrantankar utformas så att eventuellt bildat skum följer med vattenflödet.



Figur 7 Flytslam i kaskaderna.

3.2 Upstart och intrimning av GAK-piloten

Under vecka 40, efter att MBR-piloten hade trimmats in och utgående permeat uppnådde de satta kvalitetskraven samt efter att programmeringen av GAK-piloten i stort sett färdigställdes, startades den kontinuerliga driften av GAK-piloten. GAK-filtren hade fyllts med kol med hjälp av en ejektorpump. En genomsnittlig bäddhöjd på 1,9 m uppnåddes i samtliga filter. Eftersom detta är 10 cm mindre än vad principförslaget utgår ifrån minskar även kontakttiden (EBCT) med >1 min per filter vid bibehållen ytbelastning. Vid uppstart av GAK-piloten gick mycket tid åt till felsökning av t.ex. pumparna som stannade nästan dagligen. Efter att pumparna hade ”slitits in” samt andra problem i piloten hade åtgärdats kunde GAK-piloten sättas i kontinuerlig drift.

GAK-piloten körs med två filter i serie och de två linjerna (GAK L1 och GAK L2) har olika backspolningsstrategier (se 2.2.2). Den första linjen består av GAK-filter 1a och 1b, andra linjen av GAK-filter 2a och 2b. Efter knappt en månad i kontinuerlig drift fastnade GAK-filter 2a i en backspolningsloop och spola flera gånger under en helg. Vid detta tillfälle var kolbädden mycket hårt packad då den senaste backspolningen hade genomförts 11 dygn tidigare. Denna backspolningsloop medförde att hälften av filtermaterialet spolades ut med det förbrukade spolvattnet. Orsaken till haveriet berodde på att en kolkaka lyfts upp med luftbubblor under en backspolning samtidigt som nivåvakten var inaktiverad som hade kunnat larma då nivån steg över bräddavloppet. Händelsen ledde till en genomgång och justering i

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 19(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

programmeringen för backspolning. Projektgruppen bestämde att ersätta kolet i filter 2a med nytt kol. Kolet i GAK-filter 2b bedömdes vara tillräckligt rent och driftsättet av GAK L2 ändrades därför så att filter 2b sattes som första filter i serien och filter 2a med det nya kolet valdes som andra filter.

Tyvärr förlorade även GAK-filter 1a en mindre mängd kol efter två och en halv månads drift pga. en för kort tidsfördröjning efter en backspolning. Eftersom endast en mindre mängd filtermaterial tappades bestämde projektgruppen att tillsätta motsvarande mängd nytt kol och fortsätta driften av GAK L1 som planerat. Även efter denna händelse kompletterades programmeringen bl.a. med extra förreglingar för att undvika liknande händelser.

Fyllning av filter 2a och påfyllning av filter 1a gjordes manuellt genom att hålla ut GAK från säckar till filtren fyllda med vatten till en nivå något under bräddavloppet. Efter påfyllning backspolades filtret under 30 minuter för att få bort fint damm/partiklar. Denna lösning tog tid men fungerade någorlunda bra ur arbetsmiljösynpunkt. I fullskaleanläggningen kommer dock filtren fyllas med ejektorpump för att undvika problem med dammbildning.

Optimering av backspolningen pågår fortfarande inom utvärderingen av olika backspolningsstrategier (se 2.2.2). Exempelvis testas olika backspolflöden för att åstadkomma en bra fluidisering av kolbädden vid backspolning. Även en anpassning av styrningen bl.a. för backspolsekvensen pågår kontinuerligt baserat på erfarenheter som samlas in under driften. Hittills har ett antal designförbättringar identifierats i konstruktionen av filtren och dess rördragning. Exempelvis kan en ventilplacering i inloppsroret hindra att vatten med kol kommer in i roret under backspolning eller under påfyllning av kol i filtren. Även placeringen av trycklufttillförsel har justerats för mer effektiv backspolning. Avluftning på provtagningsrören för att undvika undertryck i ledningen är en annan förbättring som kommer att göras inom kort. Undertryck genereras i provtagningsroret för andra filtret i båda linjerna troligtvis under backspolning.

I samband med citronsyratvätt i någon av membrantankarna har ett högt differentialtryck kunnat ses i de första GAK-filtren i serierna. Orsaken till detta är att permeatvattnet från membranen får tillfälligt förhöjda halter av fosfatfosfor och turbiditet när membranen som genomgått citronsyratvätt åter tas i driftläge. I framtida Himmerfjärdsverket ska oxalsyra istället för citronsyra användas för membrantvätt och därför kommer citronsyrans att bytas ut till oxalsyra i pilotanläggningen inom en snar framtid. Påverkan på GAK-filtren från kemtvätt av membranen kommer då att utredas vidare.

3.3 Reningseffektivitet i MBR-piloten

De nya utsläppskraven som gäller efter att ombyggnationen av Himmerfjärdsverket är klar ses i Tabell 2. Dessa reningskrav ska pilotanläggningen uppnå med marginal för att bekräfta designen av det framtida verket.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 20(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Tabell 2 De nya utsläppskraven som kommer gälla när Himmerfjärdsverket är fullt utbyggt.

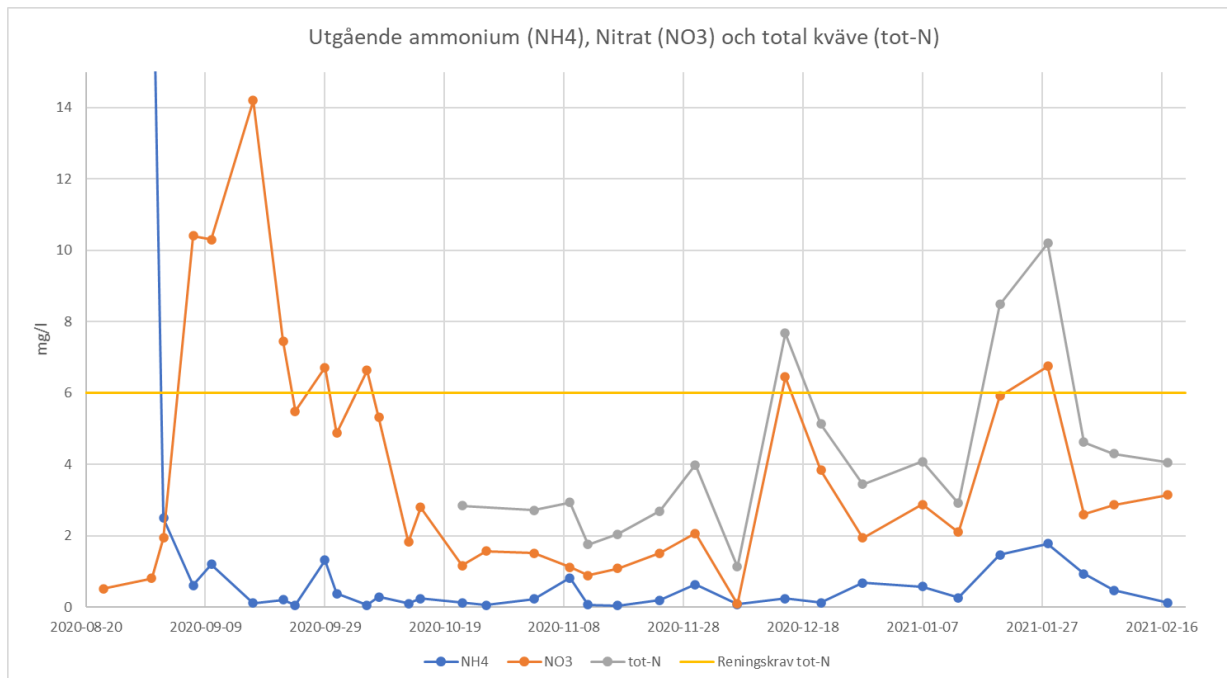
Utsläppskrav	Nytt tillstånd
BOD ₇	5 mg/l
Tot-N	6 mg/l
Tot-P	0,2 mg/l

I Figur 8 - Figur 10 visas analysresultat från dygnsprov på utgående vatten från MBR-piloten. I början pumpades inkommande avloppsvatten till piloten endast under arbetstid p.g.a. mycket problem med skumbildning vilket behövde övervakas. Efter att piloten fick ett kontinuerligt konstant inflöde gick ammoniumhalterna ner till önskvärda nivåer inom ett par dagar. Slamhalten i RAS-deoxen var då endast 4 600 mg/l. När metanol och järnsulfat började doseras reducerades även nitrat- och fosfathalterna i MBR-permeatet till låga halter inom ett par dagar. En optimering av dessa doseringar med avseende på mängd och doserpunkter pågår dock fortsatt.

Efter den initiala intrimningen har reningskraven till stor del uppnåtts och biologin anpassat sig snabbt. Dock behöver efterdenitrifikationen vidare intrimning då det varit utmanande att hålla nitrathalten nere när metanol endast doserats till den sista anoxzonen. I Figur 8 ses två kvävetoppar som överstiger reningskravet efter uppstart (2020-12-21 och 2021-01-25). Den första berodde på att slangen i metanoldumpen byttes ut p.g.a. läckage genom pumpen. När detta var åtgärdat höjdes metanoldosen stegvis tills nitrathalterna åter var nere på godkända nivåer. Orsaken till den andra toppen i figuren var att doseringen av metanol ändrades från två doseringspunkter (första och sista anoxzon i kaskad 3) till endast en doseringspunkt (sista anoxzonen). När metanol återigen doserades till båda anoxzonerna gick utgående nitrathalt ner. Den preliminära planen för det framtida Himmerfjärdsverket har varit att metanoldosering endast ska ske i den sista anoxzonen. Med hjälp av piloten har denna utformning utretts med bl.a. efterdenitrifikationsförsök för att kontrollera denitrifikationshastigheten. Fler sådana försök kommer göras framöver. Utvärdering av det första försöket visade att hastigheten var lägre än förväntad, men att det troligtvis finns en effektiv biologisk fosforreningsprocess. En noggrann optimering av metanoldoseringen har hittills inte varit möjlig p.g.a. elektronikfel i flödesmätaren vilket åtgärdas för närvarande. Därmed har utvärderingen av efterdenitrifikationen baserats på uppskattat flöde utifrån metanoldumpens pumpkurva som bekräftats visuellt av rotametern. Upprepade försök på lokalisering av doseringspunkt kommer göras när en fungerande flödesmätare sitter på plats.

De låga utgående ammoniumhalterna i Figur 8 tyder på en tillräcklig marginal för nitrifikation vid medelflöde. Vid ett senare tillfälle kommer även högflödestester att göras. Även tester för styrning av flexzonerna görs för närvarande för att undvika onödig luftning vid låga halter av ammonium och för att öka volymen för fördenitrifikation vid dessa tillfällen.

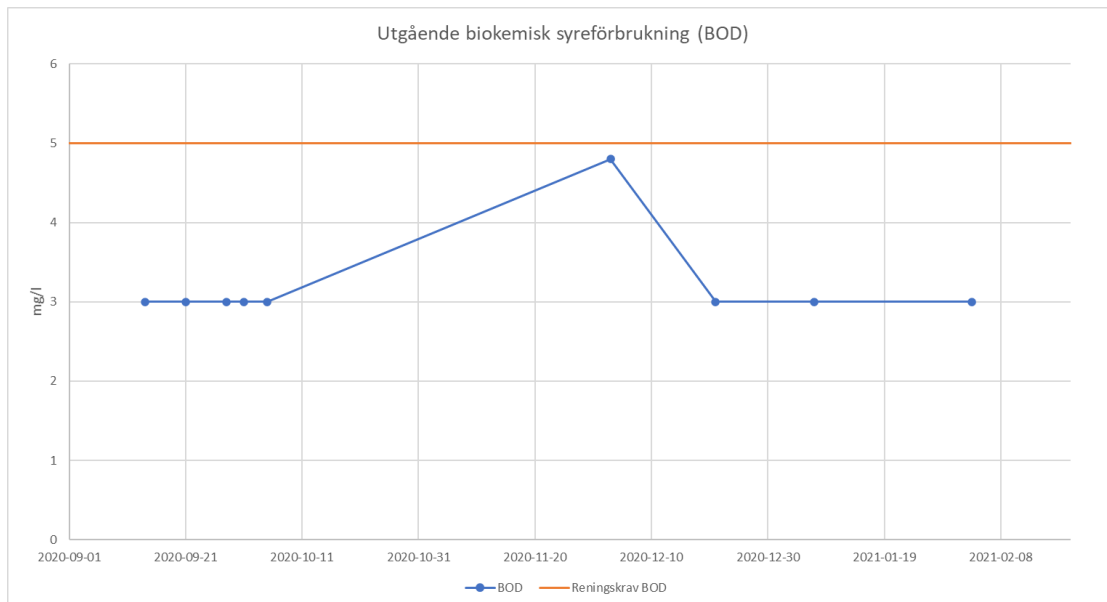
Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 21(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



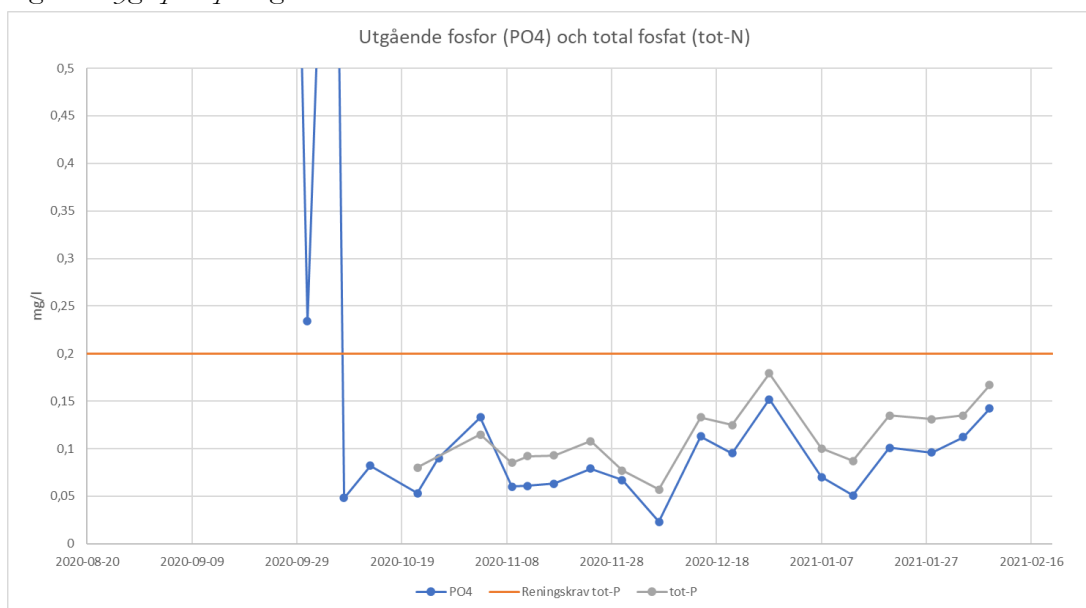
Figur 8 Dygnsprov på utgående NH₄-N, NO₃-N och tot-N.

Reningskraven för BOD₇ och tot-P har också kunnat uppnås med god marginal vid medelflöde efter uppstartsperioden (Figur 9 och Figur 10). BOD₇ har oftast varit under 3 mg/l, vilket är detektionsgränsen för analysen. Fosfathalterna gick ner i början på oktober då järnsulfat började doseras. Järnsulfatdoseringen styrs på utgående fosfathalt vilket fungerar bra.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 22(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



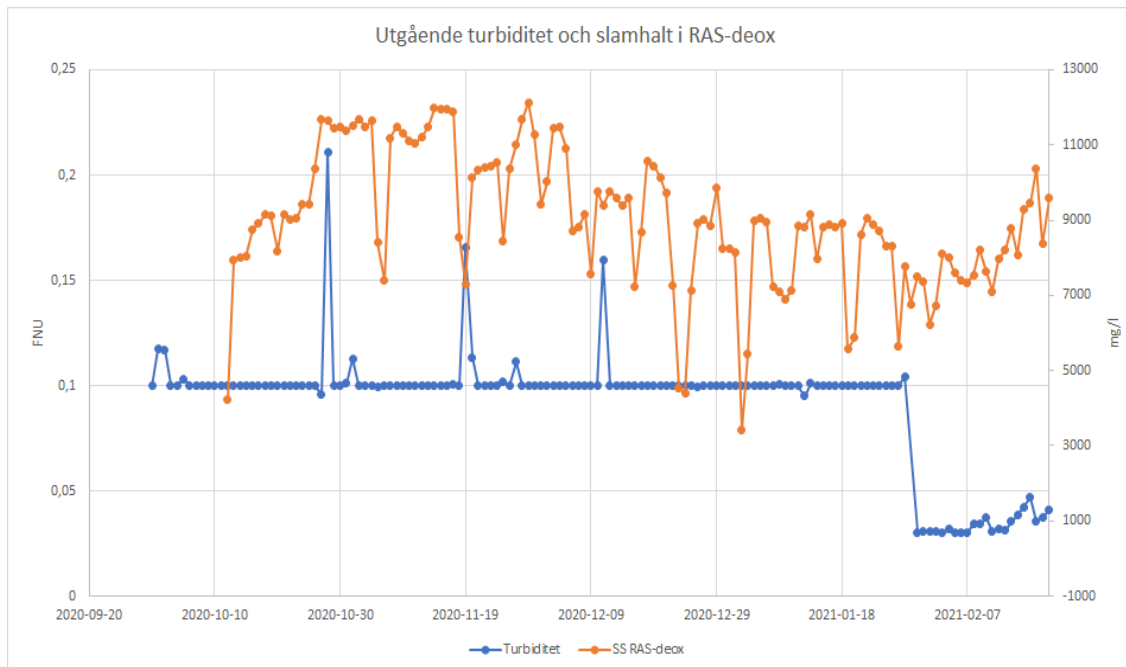
Figur 9 Dygnsprov på utgående BOD₇.



Figur 10 Dygnsprov på utgående PO₄ och tot-P.

De låga halterna för turbiditet i Figur 11 innebär att vattnet som passerat membranfiltret är partikelfritt även med en hög slamhalt i kaskaderna. I grafen ses några högre toppar på turbiditeten och orsaken till dessa är kemikalietvätt av membranen med citronsyra. Fosfatanalysatorn på permeatvattnet detekterar också toppar för fosfat vid dessa tidpunkter, men det kan man inte se i dygnsprovsanalyserna som visas i Figur 10. Förändringen i turbiditet i slutet på januari 2021 orsakades av en kalibrering av givaren för att kunna mäta ännu lägre halter.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 23(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



Figur 11 Onlinemätning på turbiditet i utgående vatten (vänster y-axel) och slamhalt i RAS-deox (höger y-axel).

3.4 Rening av mikroföroreningar

Reningseffektiviteten av mikroföroreningar i ett GAK-filter är direkt relaterad till kolets kapacitet som avtar med ökande mängd vatten som har passerat filtren, uttryckt i antalet behandlade bäddvolym (BV). Antalet bäddvolym beräknas från vattenflödet genom varje filter (från flödesmätning) och den tomma filtervolymen. Denna beräknas med hjälp av filterarean på 0,53 m² och bäddhöjden i alla 4 filter på 1,9 m. Tabell 3 visar antal BV vid de olika provtagningarna som hittills gjorts i projektet. BV för två filter i serie är lika stora eftersom samma vattenmängd går genom båda filtren. Behandlade bäddvolym för en hel filterlinje är därmed 50 % av BV för ett filter i serien. På grund av tekniska problem i GAK L2 stod filtren i denna linje still ett antal dagar och BV är därmed lägre vid respektive provtagning än för GAK L1. GAK 2a kördes dessutom som första filter till 1760 BV (880 BV för hela linjen) men driften ändrades sedan så att GAK 2a sattes som andra filtret i linjen GAK L2. Detta på grund av problem vid en backspolning som gjorde att kolet i GAK 1b tappades och fick ersättas med nytt kol (se 3.2). Projektgruppen bestämde då att ändra filterdriften. Detta och andra driftproblem som beskrivs ovan kan såklart även ha påverkat kapaciteten i filterpiloten som ännu är svårt att bedöma. Samtidigt bedömer dock projektgruppen att liknande problem kan inträffa vid fullskaledrift och att pilotresultaten därför ändå kommer vara representativa.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 24(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Tabell 3 Behandlade bäddvolymmer vid hittills genomförda provtagningar.

Provtagning	Bäddvolymmer					
	GAK 1a	GAK 1b	GAK (L1)	GAK 2a	GAK 2b	GAK (L2)
v41 2020	0	0	0	0	0	0
v43 2020	2114	2114	1057	1760	1760	880
v48 2020	5740	5740	2870	2130	2130	1065
v53 2020	9250	9250	4625	5360	5360	2680
v5 2021	13100	13100	6550	8790	8790	4395

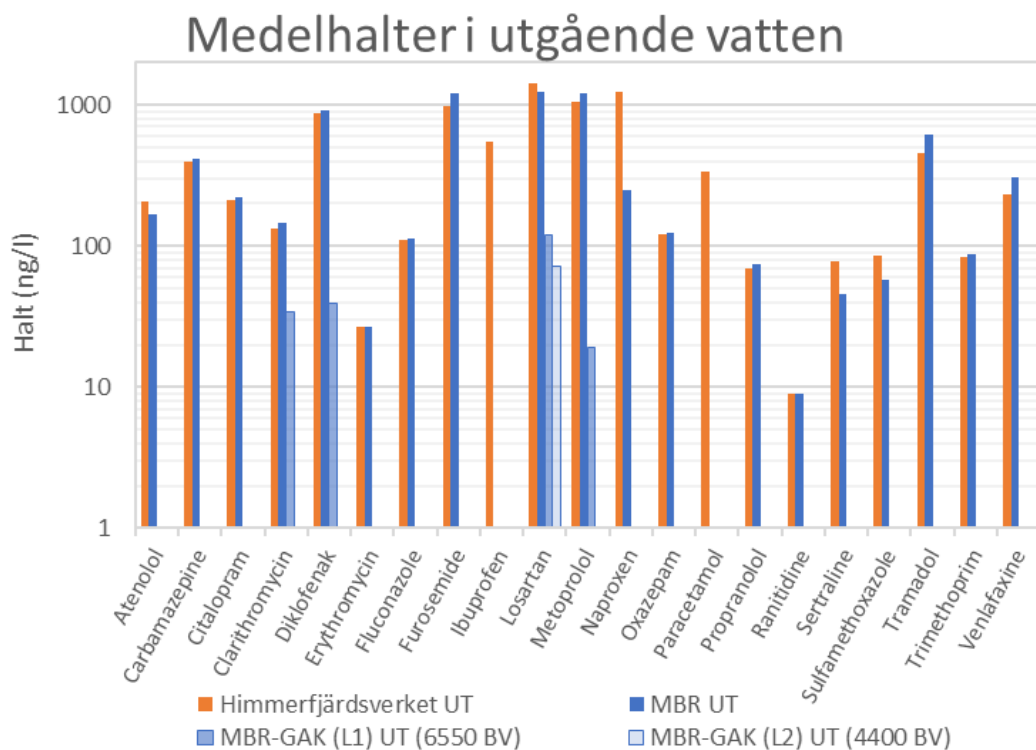
3.4.1 Hormoner

Halter för hormoner har förutom för östradiol (200 ng/l) i inkommande avloppsvatten legat under detektionsgränsen i samtliga prover, både i pilotanläggningen (MBR och efter GAK) samt i nuvarande reningprocess vid Himmerfjärdsverket.

3.4.2 Läkemedelsrester

Figur 12 visar medelhalter baserat på de fyra provomgångarna som hittills har analyserats för de läkemedel som kunde kvantifieras i minst ett prov över MBR-GAK piloten. Samtliga analysresultat redovisas i Tabell 7 i bilagan. Som framgår från Figur 12 så är skillnaden i reningseffektivitet med avseende på läkemedelssubstanser mellan den befintliga aktivslamprocessen vid Himmerfjärdsverket och MBR-processen generellt låg. Det är först i GAK-filtren som läkemedlen tas bort. I figuren indikeras att endast 4 substanser kunde kvantifieras efter GAK-filterpar 1 (MBR-GAK L1). Alla andra substanser låg under detektionsgränsen (LOD). Det kan också observeras att endast losarten återfanns i kvantifierbara halter efter MBR-GAK L2. Att MBR-GAK L2 har en bättre reningseffektivitet än L1 kan förklaras med att ett avsevärt lägre antal bäddvolymmer har behandlats i L2 jämfört med L1.

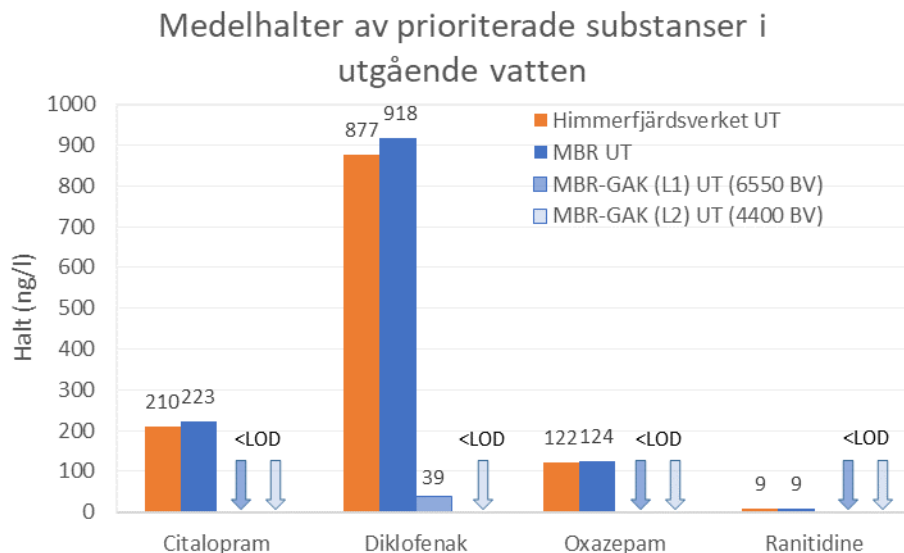
Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 25(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



Figur 12 Läkemedelsrester i MBR-permeat, efter båda GAK-filterlinjerna, och i utgående vatten från Himmerfjärdsverkets befintliga process. Endast kvantifierbara substanser visas. Efter GAK-filterlinjerna återfinns endast några få substanser över detektionsgränsen (LOD).

De läkemedelssubstanser som i första förstudien (Baresel och Malovanyy, 2019; Syvab, 2019) identifierades med högst risk för negativ recipientpåverkan visas i Figur 13 för samma provpunkter. Som figuren indikerar så avskiljs samtliga av de prioriterade substanserna till under detektionsgränsen i GAK-pilotanläggningen förutom i GAK L1 där en viss halt diklofenak kan detekteras. Jämfört med halter på 250 ng/l i utgående vatten som observerades under förstudien (2018-2019) framstår halterna för ranitidin som mycket lägre i nuvarande prover. Detta kan troligtvis förklaras med att samtliga läkemedel som innehåller ranitidin har dragits tillbaka under 2019 på grund av risk för förorening med en nitrosamin, NDMA (janusinfo.se).

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 26(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

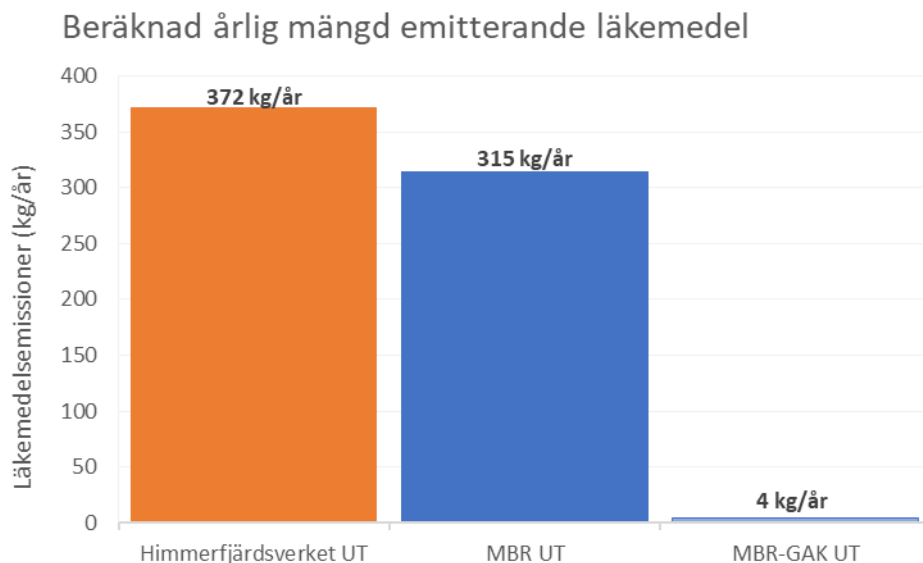


Figur 13 Halter efter GAK-linjerna L1 och L2 för de prioriterade läkemedlen som identifierades under förstudien.

Den årliga emission av totalmängden läkemedelsrester har beräknats med uppmätta medelhalter från samtliga genomförda provtagningar och medelflödet vid Himmerfjärdsverket. Denna mängd presenteras i Figur 14. Himmerfjärdsverkets nuvarande process är inte byggd för reduktion av läkemedelsrester och totalt släpps ca 370 kg/år ut. Detta är i paritet med tidigare bedömningar på ca 400 kg/år som gjordes i den första förstudien (Baresel och Malovanyy, 2019). Enligt figuren så skulle MBR-processen kunna minska emissionen med ca 60 kg/år. Detta beror till stor del på att ibuprofen och naproxen avlägsnas effektivt i MBR-processen medan nuvarande process vid Himmerfjärdsverket inte påverkar dessa substanser avsevärt. Just ibuprofen och naproxen, som är vanliga receptfria icke-steroida antiinflammatoriska läkemedel (NSAID), förekommer bland de substanser med högst koncentration i inkommande avloppsvatten, vilket stämmer väl överens med tidigare undersökningar av avloppsvatten (Allard et al., 2017). Att ibuprofen och naproxen renas bort något bättre i MBR-processen har även visats vid Hammarby Sjöstadsverk och på Henriksdal ARV (Närhi et al., 2021). Detta är väntat då dessa substanser framförallt tas upp av slammet och således reduceras i en större utsträckning i MBR-processen eftersom denna är bättre på att avskilja slam än en konventionell aktivslamprocess med sedimentering. Generellt bör det dock inte räknas med att MBR-processen ger en förbättrad avskiljning av läkemedelsrester, vilket också kan ses i Figur 12.

Baserat på dagens medelflöde och de få substanser som hittills har detekteras i utgående vatten från GAK-piloten skulle den årliga totalemissionen av läkemedelsrester minskas med ca 99 % till 4 kg/år om pilotprocessen implementerades i fullskala (Figur 14). Det bör dock kommas ihåg att piloten hittills endast har behandlat <6000 BV i varje GAK-linje, vilket är långt under den förväntade livslängden för det aktiva kolet.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 27(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

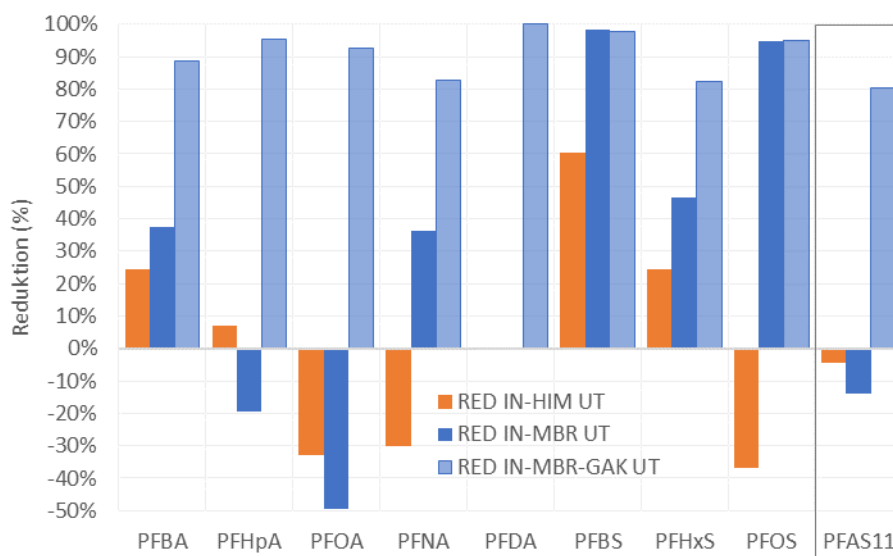


Figur 14 Beräknade årliga totalmängder läkemedelsrester baserat på analysresultaten och ett antaget medelflöde för Syvab på 5000 m³/h.

3.4.3 PFAS

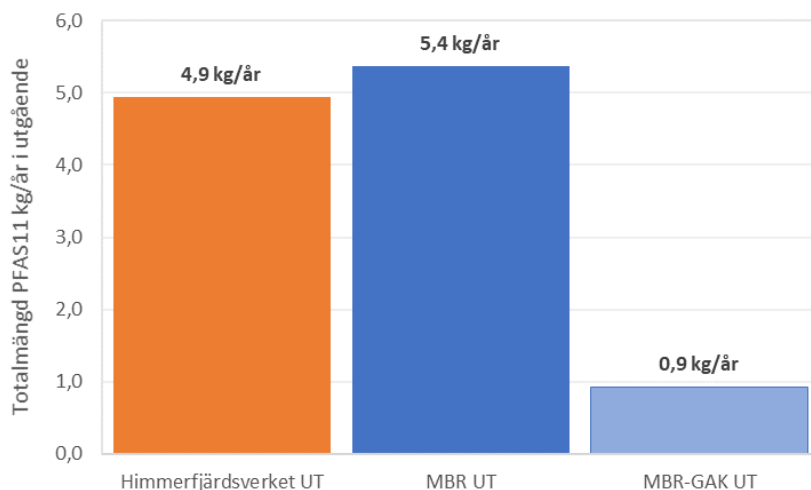
Figur 15 visar reduktionen av olika PFAS-ämnen samt summan av PFAS11 vid provtagningen v48 över både MBR och MBR-GAK L1, samt över Himmerfjärdsverket som jämförelse. Samtliga analysresultat redovisas i Tabell 8 och Tabell 9 i bilagan. Även om det finns skillnader mellan MBR-processen och nuvarande process vid Himmerfjärdsverket så finns ingen tydlig trend som indikerar att någon av dessa processer skulle ta bort PFAS bättre eller sämre. Reningseffekten i GAK-piloten ligger på >80 % för PFAS11. PFOS renas effektivt bort redan i MBR-piloten till halter strax över detektionsgränsen och en ytterligare reduktion i GAK-piloten är därför svår att följa upp. Att en så kraftig reduktion sker i MBR-processen är positivt men något oväntat. Fler prover kommer analyseras då nuvarande reduktion endast har bekräftats i två provomgångar. PFBA och PFHxA uppvisar en kraftig negativ reduktion på flera hundra procent och har därför inte tagits med i figuren eftersom skillnader i reningseffektiviteten för övriga PFAS annars inte skulle kunna tydliggöras.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 28(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



Figur 15 Reduktion av PFAS över MBR-piloten, MBR-GAK-piloten (GAK-filter 1b efter 5750 BV) och nuvarande Himmerfjärdsverket.

Den årliga emissionen av totalmängden PFAS11 baserat på analyserade halter för provtagningsveckan 48 och medelflödet vid Himmerfjärdsverket skulle ge skattade mängder enligt Figur 16. Himmerfjärdsverket nuvarande process släpper ut ca 4,9 kg PFAS11/år. Enligt beräkningen så skulle MBR-processen öka detta något till 5,4 kg/år, vilket beror på att en något högre negativ reduktion kunde konstateras i analyserna (Figur 15). Den årliga totalemissionen av PFAS11 skulle minska med >80 % till 0,9 kg/år vid införande av avancerad rening med kolfilter (Figur 16). Även här bör det dock påpekas att piloten vid aktuell provtagning endast har behandlat ett relativt lågt antal bäddvolymmer. Fler analysresultat har tyvärr inte varit klara vid skrivande av denna rapport.



Figur 16 Beräknade årliga totalmängder PFAS11 baserat på analysresultaten och ett antaget medelflöde för Syvab på 5000 m³/h.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 29(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

3.4.4 Bakterier

Antalet bakterier i utgående vatten är betydligt högre från dagens process på Himmerfjärdsverket än i utgående vatten från MBR-piloten (Tabell 4), vilket är förväntat med tanke på membranens små porer. Undersökningar har visat att antal bakterier kan relateras till mängden antibiotikaresistenta bakterier, som förekommer i allt renat avloppsvatten. En tidigare undersökning av antibiotikaresistenta bakterier visade att risken för resistenta bakterier i utgående avloppsvatten efter MBR-processen är minimal om också totalantalet bakterier är väldigt lågt (Allard och Wahlberg, 2017). Antalet odlingsbara mikroorganismer bedöms vara lite högre än förväntat efter membranreningen. Eftersom antal koliforma bakterier dock samtidigt är väldigt låg kan t.ex. påväxt i ledningar efter membranerna vara en förklaring.

Tabell 4 Bakterier i utgående avloppsvatten (cfu - kolonibildande enheter, faktiskt antal; MPN - Most Probable Number, framräknad från spädningsserie).

	Himmerfjärdsverket UT	MBR UT
Odlingsbara mikro-organismer 22°C cfu/ml	> 5000	> 5000
Escherichia coli MPN/100 ml	> 2400	< 1
Koliforma bakterier 35°C MPN/100 ml	> 2400	2

3.5 Rening av andra föroreningar i GAK-piloten

Även om GAK-piloten är avsedd för att rena bort mikroföroreningar så kommer även andra föroreningar att påverkas av det extra filtersteget. Tabell 5 visar medelhalter för reningsgrader för ammonium, nitrat och fosfat under hela driftperioden fram till v5 2021. I båda GAK-linjerna ses ett ganska överensstämmande mönster med en extra polering av MBR-permeatet gällande närsalter. Första filtret i serien tar bort ytterligare ca 30 % och andra filtret ca 45 % av kvarvarande ammonium i vattnet. Totalt sker alltså en extra rening i GAK-piloten på >60 % för ammonium. För nitrat sker först en negativ reduktion vilket betyder att nitrat bildas i första filtret då ammonium ombildas till nitrat i det syrerika MBR-vattnet. I andra filtret sker sedan en marginell eller ingen reduktion av nitrat. Detta betyder att nitrathalten ökar något över GAK-piloten. För fosfat sker en reduktion över hela GAK-piloten med ca 20-30 %. Medan första filtret minskar fosfathalten avsevärt med >35 % så sker en negativ reduktion i andra filtret.

Tabell 5 Medelreningsgrader för närsalter över de olika GAK filtren och samlat för de två GAK-linjerna.

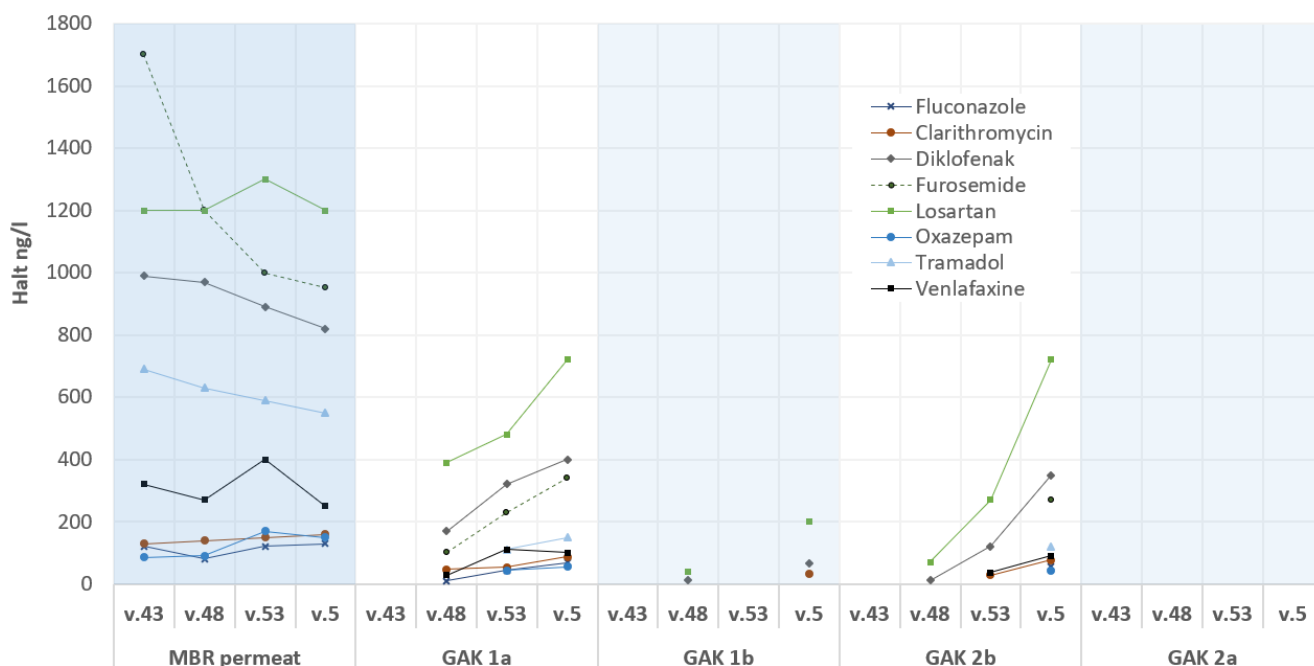
	GAK 1a	GAK 1b	GAK (L1)	GAK 2b	GAK 2a	GAK (L2)
Ammonium NH ₄ -N	27 %	48 %	62 %	33 %	46 %	61 %
Nitrat NH ₃ -N	-27 %	16 %	-6 %	-15 %	1 %	-26 %
Fosfat PO ₄ -P	38 %	-26 %	22 %	37 %	-8 %	33 %

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 30(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

3.6 Utvärdering av driftstrategier GAK

3.6.1 Flerfilterdrift

Figur 17 visar halter för några läkemedelssubstanser som kunde kvantifieras efter något av de första filtren i varje filterpar, d.v.s. efter GAK 1a eller GAK 2b. Figuren visar att halterna för några av de 28 analyserade läkemedelssubstanserna gradvis ökar i utgående vatten från de första GAK-filtren i varje filterpar. För clarithromycin, diklofenak och losartan kunde dessutom kvantifierbara om än låga halter mätas efter GAK 1b. Hur mycket ”genombrottet” av dessa substanser kan ha påverkats av en kortare kontakttid (EBCT) jämfört med principförslaget kommer utredas mer i projektet. I utgående vatten från GAK L2 kunde ännu inga läkemedelsrester detekteras. Att några läkemedel börjar ”bryta genom” de första filtren är ett tecken på att kolets kapacitet naturligt avtar. På grund av de varierande egenskaperna hos de olika läkemedlen varierar tidpunkten när läkemedlen kan detekteras efter GAK-filtren. Att inga halter detekteras efter GAK L2 kan förklaras med den kortare drifttid som denna GAK-linje uppnådde p.g.a. tidigare beskrivna uppstartsproblem.



Figur 17 Analyserade läkemedelshalter för substanser med kvantifierbara halter i MBR-permeat och efter de fyra GAK-filtren vid de olika provtagningarna.

Eftersom det i nuläget inte finns några utsläppsvillkor för läkemedelssubstanser är även måldefinitionen något oklart. Som diskuterats i förstudien (Baresel och Malovanyy, 2019; Syvab, 2019) påverkar måldefinitionen även resursförbrukningen och drift av GAK-filtren. Kolet i filter GAK 1a respektive GAK 2b byts ut först när halterna i utgående vatten från hela GAK-linjen överstiger ett definierat mål. Detta mål kan vara knutet till samtliga eller enstaka substanshalter, totalmängden av läkemedel som medel över en tidsperiod, samt relaterat till olika referenshalter som t.ex. inkommande halter till reningsverket.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 31(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Eftersom inget komplett genombrott över något av filterparen kunnat observeras är en bedömning och utvärdering av flerfilterdriften och dess påverkan på kostnaderna tyvärr ännu inte möjlig. Filterpiloten kommer dock köras tills ett tydligt genombrott har observerats och byte av kol i samtliga filter har gjorts. Med dessa resultat tillgängliga kan sedan en utvärdering av eventuella fördelar med flerfilterdrift kvantifieras samt påverkan av olika backspolningsstrategier och belastningar undersökas.

3.6.2 Backspolningsstrategi

Backspolningen av GAK L1 har som nämnts tidigare körts enligt principförslaget vilket innebär att båda filter backspolas efter att 420 m³ vatten har behandlats. I normaldrift betyder detta att backspolning sker två gånger per vecka i 15 min med start av GAK 1a följt av GAK 1b. Backspolning av filterparet GAK L2 gjordes endast när vattennivån i filtret nådde en nivå på 20 cm under bräddledningen. För denna filterserie backspolas enbart det filter som kräver backspolning, alltså vanligtvis det första filtret i serien.

Tabell 6 visar information om backspolning av båda GAK-linjerna för den tidsperiod som ingår i utvärderingen i denna rapport, dvs till v5 2021. Under intrimningen av pilotlinjen genomfördes flera tester med backspolning och vissa icke-planlagda backspolningar inträffade. Bland annat hamnade filter GAK 1a i en backspolningsloop under ca 11 timmar vilket resulterade i 37 backspolningar efter varandra. Antalet backspolningar och mängden backspolvatten kan således vara behäftat med viss osäkerhet.

Som tidigare nämnt orsakades backspolningsloopen av en för kort fördröjningstid efter en backspolningssekvensen. Efter backspolningen var vattennivån i filtret fortfarande hög under en kortare tid och det triggade igång ytterligare en backspolning. Problemet löstes genom att förregla starten av en backspolning till att ske tidigast 24 h efter föregående backspolning. Om backspolningssekvensen är rätt utformad borde dock inte 37 backspolningar i rad leda till en förlust av GAK. Backspolningssekvensen var inställd på spolning under 15 min med ett spolvattenflöde på 15 m³/h och tillförsel av luft, följt av spolning med endast vatten med samma flöde. Det visade sig att spolning med vatten och luft leder till så hög turbulens i övre delen av kolonnen att en del GAK följer med spolvattnet, speciellt om vattennivån i filtret är hög.

Efter flera övervakade backspolningar och experimentering på plats har följande backspolningsstrategi valts för GAK L2:

1. Sänka vattennivån i filter till ca 50 cm ovanför kolnivån.
2. Öppna luftventil (4 bar) under 3 s tre gånger med en paus på 1 min mellan öppningarna
3. Backspolning med vatten - långsam ökning av flödet från 5-15 m³/h under 5 min.
4. Backspolning med vatten med 15 m³/h under 10 min

Den nya backspolningsstrategin visade sig effektivt kunna bryta upp kolkakan som formas i övre delen av filtret och samtidigt undvika förlust av kol. När backspolning med vatten startar med lågt flöde är det fortfarande mycket luft i filtret som kommer ut och som skapar turbulensen. Eftersom vattennivån är låg

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 32(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

innebär det dock ingen förlust av kol. När vattennivån når bräddnivån finns nästan ingen luft kvar i kolbädden.

Det har märkts att det nästan inte alls formas någon kolkaka i kolbädden i linje GAK L1 mellan de frekventa backspolningarna. För att undvika kolförluster har även filtren i denna linje börjat spolas med endast vatten (dvs. ingen luft används).

Även om GAK L1 har varit i drift en längre tid och antalet backspolningar därför naturligt nog är högre än för GAK L2 så visar Tabell 6 ändå på skillnader som de två olika backspolningsstrategierna medför. För GAK L1 kan ett backspolvattenbehov på 1,7 % av totalflödet genom GAK-linjen konstateras, vilket är nära de 2,5 % som beräknats enligt principförslaget. Detta betyder att för varje kubikmeter renat vatten returneras ca 17 liter till reningsprocessen och behöver behandlas. Backspolningsstrategin för GAK L2 innebär att endast 0,7 % av det behandlade vatten behöver användas för backspolning, vilket är mindre än hälften jämfört med behovet i linje L1. Mindre backspolning betyder också en viss energibesparing samt att filtret kan uppnå ett högre antal drifttimmar då det inte behöver ställas av lika frekvent för backspolning. Eventuella andra effekter som de olika strategierna för backspolning medför kommer kunna utvärderas först i ett senare. Det är tänkbart att en mindre frekvent backspolning har en positiv påverkan på kolonverkan i filtren samt etablering och kapacitet av en biologisk nedbrytning av läkemedelsrester i filtermaterialet. Å andra sidan kan en mindre frekvent backspolning även skapa negativa effekter pga. igensättningar och kakkbildning.

Tabell 6 Backspolningar i båda GAK-filtrelinjerna fram till sista provtagningsveckan v5 2021.

	GAK 1a	GAK 1b	GAK (L1)	GAK 2b	GAK 2a	GAK (L2)
Behandlade bäddvolymer	13100	13100	6550	8790	8790	4395
Antal backspolningar	38	42	80	10	8*	18
Mängd backspolvatten m ³	107	112	219	31	31	62
Andel backspolflöde	0,8 %	0,8 %	1,7 %	0,4 %	0,4%	0,7 %
* - filtret har initial varit först i serien men efter en omstart med nytt kol sattes 2a sist i serien och har sedan dess inte behöver backspolas						

Resultaten i Tabell 6 avser hela försöksperioden, dvs. både den inledande fasen när backspolning av båda linjerna gjordes enligt samma strategi och fasen när backspolning endast gjordes vid behov för linje GAK L2. Efter att kolet bytts i filter GAK 2b och försöken återstartades behövde backspolning av filter GAK 2b endast göras tre gånger med ca 2 veckors intervall. GAK 2a behövde inte backspolas alls under ca 1,5 månad. Under denna period genomfördes 24 backspolningar i GAK L1 och endast 4 stycken i GAK L2.

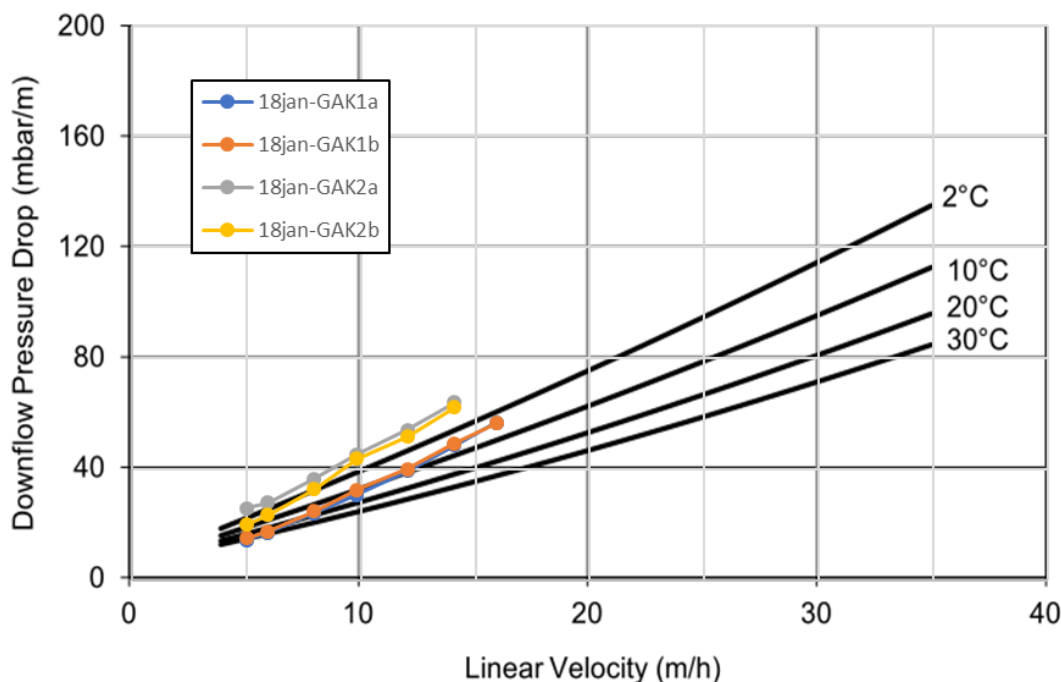
För båda filterparen behövdes flera backspolningar för att hitta rätt inställningar som ger en bra bäddexpansion (ca 30 %) och som heller inte orsakar urspolning av GAK-partiklar. Som tidigare nämnts har just problem med backspolningen orsakat att kol spolades ut och vissa pilotdelar fick startas om.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 33(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

Backspolningsstrategin för GAK L2 krävde dessutom en mer noggrann anpassning initialt för att hitta en bra sekvens av både luftpulser och vattenflöde för att upphäva kakkbildningen i filtren.

3.6.3 Belastningstester

Totalt har hittills 3 belastningstester genomförts. På grund av driftstopp i filterpar 2 (GAK L2) genomfördes det första testet i oktober 2020 endast på filterpar 1 (GAK L1). Tryckfallet i de fyra GAK-filtren var generellt jämförbara vid samma hydrauliska belastning och stämde överens med det tryckfall som kolleverantören angett i produktdatabladet (Figur 18). Observera att den underliggande bilden i Figur 18 avser tryckfall i färskt backspolat GAK. Det är dock viktigare att observera vilket tryckfall som uppstår efter en längre tids drift på ett par månader med fler backspolningar. Vattentemperaturen i det senast genomförda försöket var ca 14 °C som visas i Figur 18.

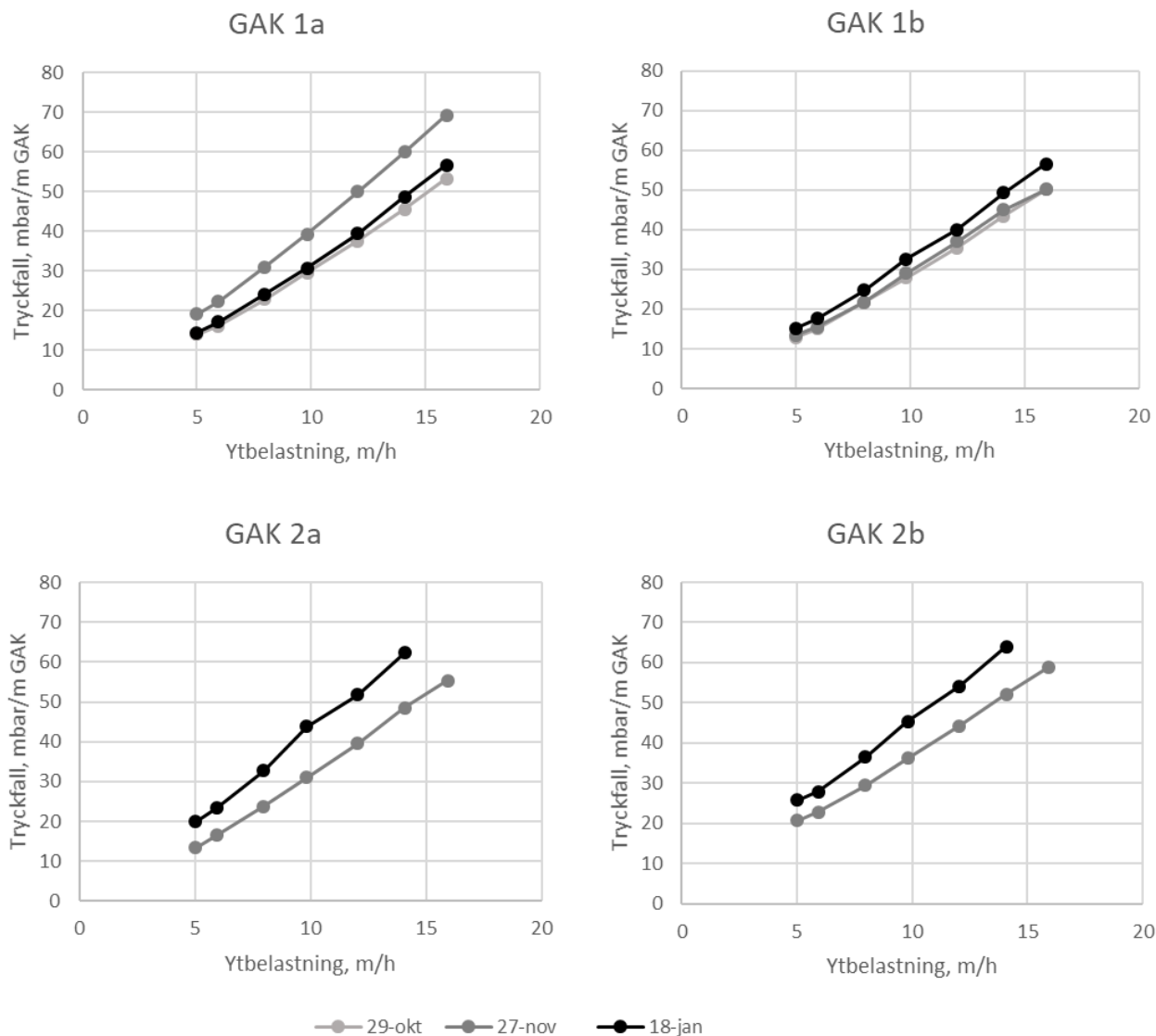


Figur 18 Tryckfall i de fyra GAK-filtren efter behandling av 7 000 – 11 000 BV jämfört med tryckfall i färskt backspolat GAK enligt produktdatablad (svarta linjer).

Som förväntat var tryckfallet högre i de filter som är placerade först i respektive serie (GAK 1a och GAK 2b) jämfört med de som ligger sist i serien. Det observerades ingen större ökning av tryckfallet över tid (Figur 19). Även om tryckfallet vid testet den 18:e januari var något större jämfört med testet den 27:e november är det ännu oklart om detta är en trend eller bara en slumpmässig variation. Det kan heller inte ses någon signifikant skillnad mellan tryckfallen i GAK L1 och GAK L2, även om ett något större tryckfall kan skönjas i GAK L2. Alla tester med GAK 1a är gjorda efter 0,3-1 dygn efter en backspolning; tester med GAK 1b efter 2,9-3,8 dygn, GAK 2a efter 15 dygn och 67 dygn, och GAK 2b ca 7 dygn efter backspolning. På grund av denna variation är det svårt att säga om det något större tryckfallet i GAK L2 är

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 34(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

ett resultat från mindre frekvent backspolning eller en konsekvens av olika tid mellan backspolning och belastningstest.



Figur 19 Utveckling av tryckfallen i de fyra GAK-filtren över tid.

Belastningstesten visade att det kan vara möjligt att belasta GAK-filter mer än vad föreslogs i principförslaget. Dessa tester visar dock endast kapaciteten vid kortvarig belastning och det återstår att utreda hur tryckfallet och backspolningsfrekvensen påverkas av en högre ytbelastning under längre tid.

3.6.4 Realtidsövervakning och -styrning

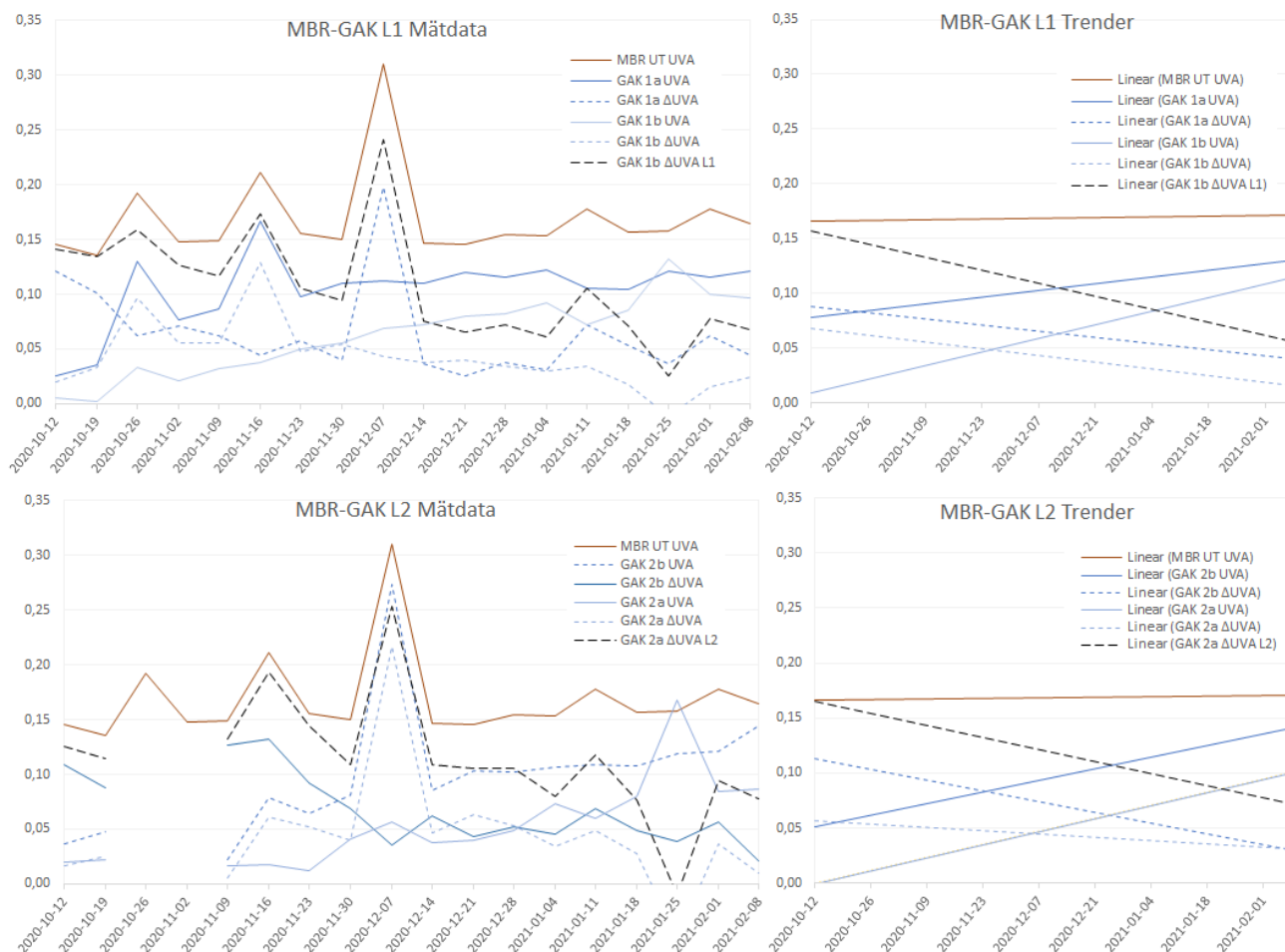
Utvärderingen av övervaknings- och styrningsmöjligheter med hjälp av UVA eller DOC visar att ändringar av dessa över tid verkar kunna fångas upp, dock finns det även utmaningar. UVA-analys på endast veckoprover ger en begränsad dynamisk bild av variationer och trender. Som Figur 20 visar kan enstaka analyser avvika väldigt kraftigt. GAK 2a förlorade kol den 25 oktober och linjen stod stilla till den 25 nov

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 35(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

då GAK-filterpar 2 började köras i omvänd följd 2b-2a. Den höga toppen v50 berodde på citronsyratvätt, som orsakade hög turbiditet och fosfathalt i permeatvattnet. Vecka 4 sågs också en hög topp, vilket kan bero på att provtagningsventilerna justerades den veckan då de slutade ta prov. Dessutom behövde två stycken provtagningsventiler bytas ut vid olika tidpunkter. Alla dessa inkörningsproblem har påverkat proverna. En kontinuerlig onlinemätning skulle kunna minska problemet då upplösningen av mätdata blir avsevärt högre och trender kan ses trots enstaka avvikande felmätningar eller störningar i processen.

Trenderna i Figur 20 visar att UVA i MBR-permeat är någorlunda konstant men att en tydlig stigande trend i UVA efter varje filter kan observeras. Ökningen av UVA ser ut att ske snabbare (brantare kurva) i det första filtret jämfört med det andra filtret i varje GAK-linje. Detta innebär också att ΔUVA över första filtret i varje filterpar minskar snabbare än ΔUVA över det andra filtret. För GAK L2 kan det ses en större skillnad mellan ΔUVA -GAK 2a och ΔUVA -GAK 2b vilket troligtvis kan förklaras med de beskrivna störningarna och ändring i driftsätt för dessa två filter. ΔUVA för varje komplett filterlinje visar också en tydlig trend. Både UVA och ΔUVA ser ut att kunna användas för övervakning av reningseffektiviteten, både för varje enskilt filter och hela GAK-piloten. Trenderna i figuren kan även jämföras med ökande halter av vissa läkemedel i utgående vatten från de olika filtren (Figur 17). Eftersom ett genombrott i samtliga filter ännu inte har inträffat är det dock ännu inte möjligt att bedöma om även ett genombrott kan identifieras med hjälp av UVA-mätningar.

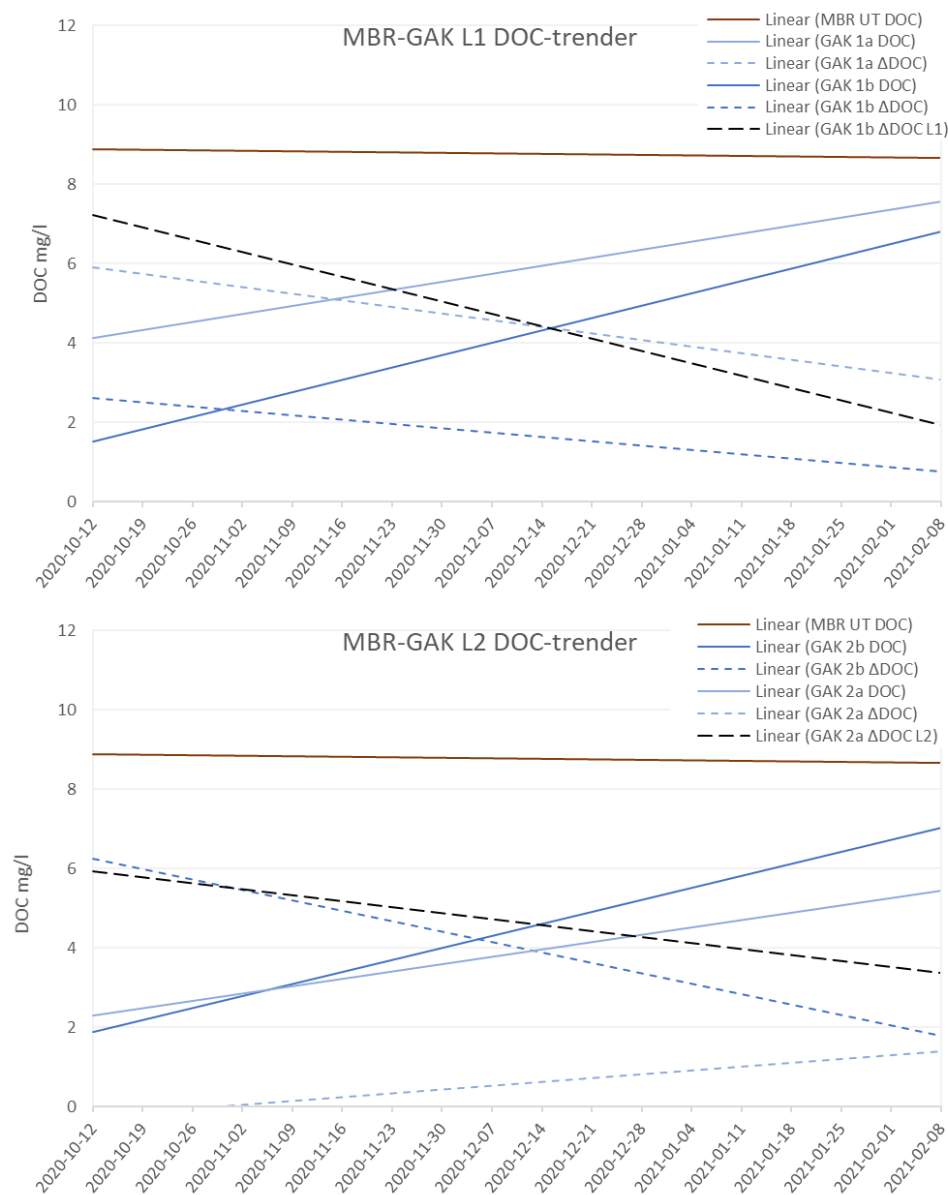
Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 36(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



Figur 20 UVA-analys i MBR-permeatet och samtliga GAK-filter (Notera att GAK 2b är första filtret i serien).

DOC-analys har hittills gjorts mindre frekvent och i Figur 21 visas endast trender för de olika provpunkterna. Även här kan det konstateras att halten i MBR-permeat är ganska stabil medan halter efter varje GAK-filter ökar kontinuerligt med tiden. Δ DOC över varje filter minskar med tiden som följd av detta vilket även gäller för varje komplett filterlinje. Endast filter GAK 1a avviker från denna trend vilket även här kan förklaras med de beskrivna störningarna och ändringarna av driftsättet för denna filterlinje. Både DOC och Δ DOC ska utvärderas vidare för en eventuell övervakning av reningseffektiviteten, både för varje individuellt filter och för hela GAK-piloten. Trenderna i figuren kan även jämföras med ökande halter av vissa läkemedel i utgående vatten från de olika filtren (Figur 17). Eftersom ett genombrott i samtliga filter ännu inte har inträffat är det dock ännu inte möjligt att bedöma om även ett genombrott kan kunna identifieras med hjälp av DOC-mätningar.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 37(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------



Figur 21 DOC-analyser i MBR-permeatet och efter samtliga GAK-filtret (Notera att GAK 2b är första filtret i serien).

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 38(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

4. Diskussion

Även om idrifttagningen och intrimningen av MBR-GAK piloten har bjudit på flera utmaningar har pilotprojekt redan kunnat bidra med värdefull praktisk kunskap om lämplig utformning, samt om styrning och drift av både MBR- och GAK-processen. En del designparametrar kunde bekräftas medan andra fortfarande behöver en noggrannare utvärdering i pilotanläggningen. Speciellt under uppstart och intrimning av en reningsprocess men även i vanlig drift kan det ske driftstörningar som kan påverka både online-mätningar och prover som samlas in. Vissa av dessa data är viktiga för en direkt återkoppling för driften av processen medan andra i större utsträckning utgör basen för att identifiera mer långsiktiga trender. Flera störningar i MBR-GAK piloten har beskrivits och lärdomar dragits av dessa, bl.a. genom anpassningar och förbättringar i den tekniska utformningen och styrningen av piloten. De data som samlats in hittills behöver dock användas med en viss försiktighet då dessa på grund av den hittills relativt korta driftperioden kan ha påverkats i större utsträckning av enstaka störningar. Denna eventuella påverkan kommer minska ju längre piloten körs och ju mer data som samlas in. För vissa parametrar som t.ex. DOC och UVA skulle en kontinuerlig online-mätning ge en högre upplösning av mätdata och säkrare trender. Trender skulle då även påverkas mindre av enstaka avvikande felmätningar eller störningar i processen.

Under 2020 genomfördes även ett examensarbete med fokus på tekniker för regenerering av aktivt kol. KTH-studenten Chinmay Mishra genomförde en litteraturstudie och sammanställde samt utvärderade olika befintliga tekniker. Arbetet hade också som syfte att identifiera den metod som skulle ha störst potential att implementeras vid Himmerfjärdsverket för en framtida on-site regenerering.

I arbetet har olika regenereringsmetoder beskrivits avseende funktionsprincip, teknikmognad, kostnad, för- och nackdelar, och fallstudier. Metoderna utvärderades sedan och jämfördes med ett poäng- och viktningssystem. Dessutom gjordes en grov kostnadsberäkning för implementering vid Himmerfjärdsverket av den teknik som ansågs lämpligast som jämfördes med kostnaderna för en extern regenerering.

Sammanställningen och bedömningen pekade på att kemisk regenerering var mest lämplig (gav högst poäng), följt av regenerering med mikrovågsugn och regenerering med våt oxidation. Vid tillämpning av kemisk regenerering vid Himmerfjärdsverket bedömde examensarbetet att GAK-regenerering on-site kunde vara både billigare och mer miljömässigt än extern regenerering.

Hela examensarbetet är tillgängligt på KTHs DIVA-portal (Mishra, C., 2020).

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 39(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

5. Slutsatser

Huvudmålet med projektet: att anlägga en pilotanläggning vid Himmerfjärdsverket med processkombinationen MembranBioReaktor och granulerat aktivt kol (MBR-GAK), har kunnat uppnås. Pilotstudier för att samla erfarenheter för en eventuell framtida implementering av läkemedelsrening på Syvab och vid andra reningsverk har också kunnat köras igång. Piloten kunde visa att Nya Krav Himmerfjärdsverket (NKH) kan uppnås med MBR-tekniken, att fullskaledesignen/principförslaget för framtida läkemedelsrening kan behöva anpassas, samt att en effektiv reduktion av läkemedelsrester, PFAS och andra föroreningar kan åstadkommas. Det har funnits utmaningar, främst under 2020, som påverkat installation, idrifttagning, och intrimning av piloten. Utvärderingen som sammanställts i denna rapport har varit begränsad till att endast omfatta knappt fyra månader och antalet provtagningar och analyser som ingår är därför få. Projektet kommer dock att fortsätta även efter avslutat projektstöd från Naturvårdsverket, och fler resultat kommer att rapporteras framöver.

Under uppstart och intrimning av MBR-GAK pilotanläggningen har värdefull information samlats in, t.ex. angående teknisk utformning, driftsätt och styrning. Även praktiska driftsätt avseende bl.a. backspolning av GAK-filter vid olika backspolningsstrategier har kunnat tas fram. Detta kommer att hjälpa Syvab och andra anläggningar vid en eventuell fullskaleimplementering, t.ex. genom att uppdatera och anpassa principförslaget.

De resultat som hittills kunnat tas fram visar en bra reningseffekt i GAK-piloten avseende läkemedelsrester och PFAS. Mot slutet av den initiala testperioden kunde även kvantifierbara halter av några få substanser observeras efter GAK-piloten vilket tyder på en avtagande kapacitet. Det är dock ännu för tidigt att kunna göra en relevant bedömning av när kolet behöver bytas i de första filtren och därmed en helhetsbedömning över processutformningen med t.ex. kostnadsberäkningar.

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 40(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

6. Referenser

Allard, A.-S., Wahlberg, C. 2017. Förekomst och reduktion av fokusämnen i fyra reningsverk. Delrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2279.

Baresel, C., Malovanyy, A. 2019. Förstudie för införande av läkemedelsrening vid Himmerfjärdsverket – Provtagning, analys och bedömning av reningsbehov. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport U6194.

Gros, M., Petrović, M. and Barceló, D. (2006) 'Development of a multi-residue analytical methodology based on liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) for screening and trace level determination of pharmaceuticals in surface and wastewaters', *Talanta*, 70(4), pp. 678–690. doi: 10.1016/j.talanta.2006.05.024.

Mishra, C. 2020. On-site Regeneration of Granular Activated Carbon - A literature study, comparison and assessment of different regeneration methods to find potential on-site regeneration method in Sweden. Kungl tekniska högskolan, KTH, Degree Project in Environmental Engineering, 30 Credits.

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.

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

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 41(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

7. Bilaga

Tabell 7 Analyserade läkemedelsrester

Substans ng/l	HIM UT			MBR IN			MBR UT				GAK 1a				GAK 1b				GAK 2a			GAK 2b			
	v.48	v.53	v.5	v.43	v.48	v.53	v.5	v.43	v.48	v.53	v.5	v.43	v.48	v.53	v.5	v.43	v.48	v.53	v.5	v.48	v.53	v.5	v.48	v.53	v.5
E1 - Estrone	3			29	12			3	3			2	2			2	2			2			2		
E2 - Estradiol	6			2	200			2	6			2	2			2	2			2			2		
EE2 - Ethinylestradiol	3			2	4			2	3			2	2			2	2			2			2		
Atenolol	230	130	260	310	410	320	390	160	160	170	180	5,2	5,2	10	10	5,2	5,2	3	3	5,2	3	3	5,2	3	10
Carbamazepine	530	240	420	500	390	300	450	490	410	390	370	26	26	35	71	26	26	21	21	26	21	21	26	21	35
Ciprofloxacin	11	30	20	27,5	190	170	320	11	11	20	20	11	11	20	20	11	11	20	20	11	20	20	11	20	20
Citalopram	190	190	250	170	120	180	240	230	230	220	210	24	24	15	15	24	24	3,4	3,4	24	3,4	3,4	24	3,4	15
Clarithromycin	150	86	160	110	140	120	180	130	140	150	160	5	47	53	87	5	5	4	34	5	1,6	4	5	28	77
Diclofenac	1100	550	980	960	1100	910	1100	990	970	890	820	7,3	170	320	400	7,3	12	8,5	66	7	4,8	8,5	12	120	350
Erythromycin	26,5	22,5	22,5	26,5	16	22,5	22,5	26,5	26,5	22,5	22,5	16	16	22,5	22,5	16	16	4	22,5	16	4	22,5	16	22,5	22,5
Fluconazole	110	82	140	120	120	120	220	120	81	120	130	6,4	10,5	43	69	6,4	6	6	10	6	6	6	6	10	56
Furosemide	1300	270	1400	1400	2800	1100	1600	1700	1200	1000	950	20	100	230	340	20	20	7,6	22,5	20	7,6	7,6	20	22,5	270
Ibuprofen	360	850	430	8900	14 000	4000	5300	24	24	10	16,5	24	24	10	16,5	24	24	10	10	24	10	10	24	10	10
Ketoconazole		70	70			310	450			33	33			33	33			33	33			33	33		33
Losartan	1400	940	1900	1200	1600	1500	1900	1200	1200	1300	1200	9,6	390	480	720	9,6	38	27	200	10	16	71	70	270	720
Metotrexat	8	10	10	8,4	8	10	10	8,4	8	10	10	8,4	8	10	10	8,4	8	10	10	8	10	10	8	10	10
Metoprolol	1100	780	1300	1200	1400	1200	1500	1300	1200	1200	1100	3	5	69	56	3	19	5,6	5,6	3	5,6	5,6	3	5,6	35
Naproxen	880	1500	1300	6600	1 0000	6900	9800	300	370	85	250	51	51	18	75	51	51	3,8	3,8	51	3,8	3,8	51	6,5	60
Oxazepam	87	110	170	80	67	170	210	86	91	170	150	12	12	43	55	12	12	3,8	3,8	12	3,8	3,8	12	6,5	43
Paracetamol	15	610	69	15	20 000	11 000	10 000	15	15	5	5	15	15	5	5	15	15	5	5	15	5	5	15	5	5
Propranolol	62	62	82	53	68	55	75	81	81	72	62	3,8	4	2	2	3,8	4	2	2	4	2	2	4	2	2
Ranitidine	9	6,5	6,5	9	9	6,5	6,5	9	9	6,5	6,5	5,4	5	1,3	1,3	5,4	5	1,3	1,3	5	1,3	1,3	5	1,3	1,3
Sertraline	36	45	110	60	36	81	110	60	36	24	54	36	36	6,3	6,3	36	36	6,3	6,3	36	6,3	6,3	36	6,3	6,3
Sulfamethoxazole	130	35	94	530	1200	150	280	82	84	34	31	7,9	37	29	42	7,9	8	4,8	10	8	4,8	10	8	10	42
Tramadol	530	230	590	440	600	230	360	690	630	590	550	24	24	110	150	24	24	17	17	24	17	17	24	57	120
Trimethoprim	88	72	90	65	100	93	120	75	76	110	85	4,8	5	4,9	4,9	4,8	5	4,9	4,9	5	4,9	4,9	5	4,9	4,9
Venlafaxine	250	180	270	200	230	230	240	320	270	400	250	5,8	28	110	100	5,8	5,8	4,8	8	5,8	4,8	4,8	5,8	37	90
Zolpidem	2,8	1,5	1,5	2,8	2,8	1,5	1	2,8	2,8	1,5	1,5	2,8	2,8	1	1	2,8	2,8	1	1	2,8	1	1	2,8	1	1

Dokumenttyp: Rapport	Dokumentnamn: Förstudie läkemedelsrening Syvab	Sida: 42(42)	Gäller från: 2021-02-28
-------------------------	---	-----------------	----------------------------

xxx – under detektionsgräns LOD
 xxx – under kvantifieringsgräns LOQ men över detektionsgräns, värdet därför satt till LOQ/2
 xxx – risk för ökad osäkerhet vid kvantifiering då halten vid analysen överstiger kalibreringskurvans högsta punkt

Tabell 8 Koncentration av PFAS i vattenprover v 43 (ng/L).

Provpunkt	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFBS	PFHxS	PFOS	6:2 FTS
MBR IN (ng/L)	6,5	4	3,7	1,6	4,6	0,3	<LOD	<LOD	0,8	2,9	2
MBR IN (omanalys)	5,5	3,5	3,9	1,6	4,3	0,2	0,3	<LOD	1,6	3,3	2,1
MBR UT (ng/L)	<LOD	3,7	7,2	2,5	4,3	<LOD	<LOD	<LOD	0,4	<LOD	0,3
GAK 1a (ng/L)	<LOD	0,8	0,4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
GAK 1b (ng/L)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
LOD (ng/L)	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06	0,1	0,15	0,1

Tabell 9 Koncentration av PFAS i vattenprover v 48 (ng/L).

Provpunkt	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFBS	PFHxS	PFOS	6:2 FTS
MBR IN (ng/L)	84,4	7,3	0,6	3,0	2,6	0,6	0,1	3,9	0,6	2,9	2,0
HIM UT (ng/L)	63,9	28,6	6,2	2,8	3,5	0,8	0,1	1,5	0,4	3,9	1,0
MBR UT (ng/L)	52,6	54,4	4,6	3,6	3,9	0,4	0,1	0,1	0,3	0,2	2,6
GAK 1a (ng/L)	8,2	2,9	3,8	2,6	2,0	0,1	0,0	0,0	0,5	0,2	8,5
GAK 1b (ng/L)	9,7	1,4	1,9	0,1	0,2	< LOD	0,0	0,1	< LOD	< LOD	7,3
GAK 2a (ng/L)	0,9	< LOD	< LOD	0,3	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	5,7
GAK 2b (ng/L)	12,9	18,3	0,9	0,6	0,4	< LOD	0,2	0,2	< LOD	< LOD	8,6
LOD (ng/L)	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06	0,1	0,15	0,1