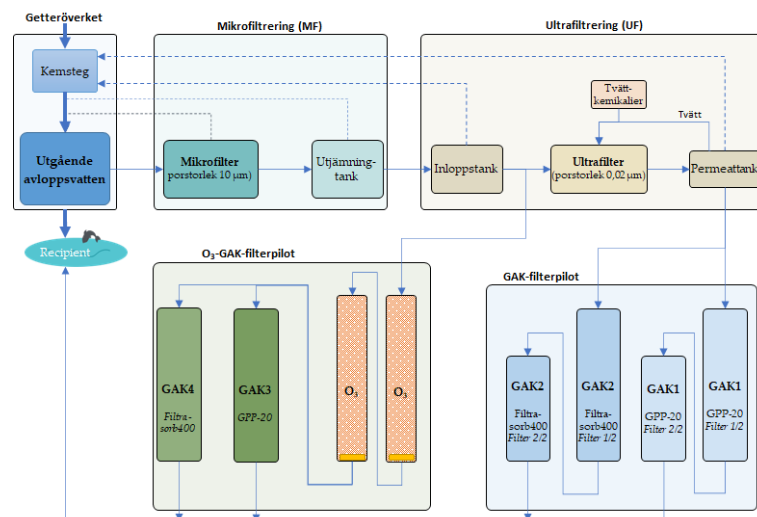


Förstudie - Mikroföroreningar vid Getteröverket i Varberg

Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



I samarbete med



Rapportnummer: C811

År: 2024

I samarbete med: Vatten & Miljö i Väst AB (VIVAB)

Författare: Christian Baresel, Moshe Habagil, Andriy Malovanyy, Fredrik Hedman, Caroline Schleich

Medel från: Naturvårdsverket (anslag 1:11, ap. 1) och Vatten & Miljö i Väst AB

Granskare: Linda Önnby

Godkännare: Mona Olsson Öberg

ISBN: 978-91-7883-561-4

Sammanfattning

Mellan 2020 och 2023 har Vivab i samarbete med IVL Svenska Miljöinstitutet genomfört en förstudie om avancerad rening vid Getteröverket i Varberg. Förstudien genomfördes med bidrag från Naturvårdsverket i två olika etapper. Den första etappen omfattade en påverkansanalys av vattenmiljön, en behovsutredning och initiering av pilottester medan den andra etappen handlade främst om en fortsättning och komplettering av pilottester samt framtagandet av beslutsunderlag. Denna rapport redovisar etapp nummer två och kompletterar redan utfört arbete från etapp ett. Den första rapporten som avser etapp ett skickades till Naturvårdsverket i slutet av 2021. Syftet med den förstudien var att utreda förutsättningarna för en fullskaleinstallation av lämplig teknik för rening av organiska mikroforeningar såsom läkemedelsrester vid Getteröverket. Målet med studien var att ge ett väl underbyggt underlag för aktuella beslutsfattare för en eventuell implementering av en fullskaleanläggning inom befintligt verksamhetsområde.

För att uppnå ovan nämnda mål genomfördes kompletterande screeningar av organiska mikroforeningar i föreliggande rapport. Provtagning har genomförts över avloppsreningsverket, potentiella punktkällor uppströms och i mottagande ytvatten som utgör Getteröverkets recipient. De tidigare startade långtidsförsöken från etapp 1 fortsatte under etapp 2. Försöken har utvärderat teknikkombinationen ultrafiltrering och granulerat aktiv kol (UF-GAK) och inkluderade även kompletterande pilottester med teknikkombinationen ozonering efterföljt av GAK (O₃-GAK).

Resultaten för den genomförda och kompletterande kartläggningen av i) mikroforeningar över Getteröverket, ii) bidragande källor till inkommande avloppsvatten och iii) olika recipientpunkter, visade tydligt att Getteröverket är den dominerande transportvägen för läkemedelsrester till mottagande recipient inklusive Inre Farehammarsviken, som är ett känsligt och skyddat naturområde. För andra mikroforeningar såsom PFAS (per- och polyfluorerade alkylsubstanser) och fenoler, finns även andra källor än Getteröverket. Vid undersökningar av lakvattnet från Bösarps deponi, konstaterades att det endast bidrar med en mindre del av den totala PFAS-belastningen till Getteröverket.

De genomförda pilottesterna med de olika teknikkombinationerna UF-GAK och O₃-GAK visade att en mycket bra reduktion av läkemedelsrester och andra organiska mikroforeningar kunde åstadkommas. Långtidsförsöken som pågick i ca 30 månader visade också att reduktionen kan åstadkommas med en signifikant mindre kolförbrukning i UF-GAK-lösningen jämfört med en traditionell design av kolfilter. Principförslaget som inkluderar dimensionering och tekniskt utförande för UF-GAK visar hur en fullskaleimplementering kan utföras. Projektgruppen valde att fokusera på teknikkombinationen UF-GAK i principförslaget, eftersom

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

denna tekniklösning utvärderades under en längre tid och utifrån flera aspekter. En annan anledning till ett ökat fokus för kombinationen UF-GAK, var att den även ger ökade möjligheter för en återanvändning av vatten. För alternativet med O₃-GAK gjordes endast en förenklad bedömning av resursbehovet. Utifrån den genomförda kostnadsbedömningen skulle en implementering av avancerad rening med UF-GAK vid Getteröverket generera en specifik reningskostnad på ca 2,3 kr/m³.

Utöver analyser av olika organiska mikroföroreningar för pilotprocesserna genomfördes det även ett antal olika aktiviteter såsom aktivitetstester av vattenprover över olika reningssteg, flödescytometri, karakterisering av den mikrobiella sammansättningen i GAK-filter, antibiotikaresistens med mera, vilket återfinns i rapporten.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Förkortningar	6
1 Inledning	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte och mål	7
2 Metod	8
2.1 Kartläggning av mikroföroreningar	8
2.1.1 Ämnen som ingår för analys	10
2.1.2 Effektbaserad analys och andra kompletterande analyser	11
2.2 Kompletterande behovsbedömning	12
2.3 Pilottester	13
2.3.1 Pilottester med teknikkombinationen UF-GAK	14
2.3.2 Pilottester med teknikkombinationen Ozon och GAK	15
2.4 Beslutsunderlag för implementering	16
3 Resultat och diskussion	17
3.1 Mikroföroreningar och reningsbehov	17
3.1.1 Mikroföroreningar vid Getteröverket	17
3.1.2 Mottagande och uppströms recipienter/lakvatten	22
3.1.3 Bedömning av recipientpåverkan och reningsbehov	25
3.1.4 Bedömning av bidragande källor	29
3.2 Pilotförsök med kombinationen UF-GAK	31
3.2.1 Rening av läkemedelsrester	31
3.2.2 Rening av PFAS	38
3.2.3 Rening av hormoner och östrogena effekter (YES)	43
3.2.4 Rening av andra föroreningar	44
3.2.5 Resultat från aktivitetstester	45
3.2.6 Flödescytometri (FCM)	45
3.2.7 Biofilmkaraktisering	48
3.2.8 Utvärdering av antibiotikaresistens	49
3.2.9 Prioriterade kemiska parametrar	51
3.3 Pilotförsök med teknikkombinationen O ₃ -GAK	52
3.3.1 Initiala dos-respons tester	52
3.3.2 Långtidstester	56
3.4 Jämförelse av pilotförsöken	71
3.5 Beslutsunderlag för implementering	73
3.5.1 Dimensionerande förutsättningar	73
3.5.2 Bedömda kolkapacitet/livslängd	75
3.5.3 Förslag till processlösning och -utformning	76
3.5.4 Tekniskt utförande	77
3.5.5 Processbyggnad för avancerad rening	82
3.5.6 Investerings- och driftkostnader	84
3.5.7 Miljöpåverkan och arbetsmiljö	86
3.5.8 Framtida utvecklingspotential	87
3.5.9 Alternativ implementering av O ₃ -GAK	90
4 Slutsats och rekommendationer	92
5 Referensförteckning	94
6 Bilagor	97
6.1 Ritningar principförslag	
6.2 Analysresultat mikroföroreningar	
6.3 Resultat från aktivitetstester	
6.4 Rapport biofilmkaraktisering	
6.5 Rapport för antibiotikaresistens	

Förkortningar

ARV	Avloppsreningsverk
BOD	Biochemical oxygen demand
CEB	Chemically enhanced backwash
COD	Chemical oxygen demand
DDD	Definierad DygnsDos, genomsnittliga dygnsdosen för en vuxen
DOC	Dissolved organic carbon, löst organiskt kol
EBCT	Empty bed contact time, kontakttid
EC	Environmental Concentration, uppmätt halt
FCM	Flödescytometri
FoU 21	Avloppsslambaserat aktiv kol som producerats från Getteröverkets avvattnat slam
FTU	Formazin Turbidity Unit, en måttenhet på turbiditet
GAK	Granulerat aktivt kol
GPP 20	Ett reaktiverat GAK från Chemviron
HNA	High nucleic acid (stor mängd DNA)
HVMFS	Havs- och vattenmyndighetens författningssamling
IBC	Intermediate bulk container
ICC	Intact cell count, totalantalet intakta bakterier
LNA	Low nucleic acid (liten mängd DNA)
LOD	Level of detection, detektionsgräns
LOEC	Lowest observed effect concentration
LOQ	Level of quantification, kvantifieringsgräns
MBR	Membranbioreaktor
MF	Mikrofiltrering
MKN	Miljökvalitetsnorm
NO ₂ -N	Nitritkväve
NO ₃ -N	Nitratkväve
NOEC	No observed effect concentration, halten utan observerad effekt
ORP	Oxidation reduction potential
Pe	Personekvivalent, 70 g BOD/pe,d
PNEC	Predicted no effect concentration, effekthalt
PO ₄ -P	Ortofosfat
PP	Provpunkt
SP	Stickprov
SS	Suspended solids, suspenderade ämnen
TCC	Total cell count, totalt cellantal
TF	Trumfilter
TMP	Trans membrane pressure, transmembrantryck
TOC	Total organic carbon, totalt organisk kol
Total-P	Total fosfor
UF	Ultrafilter
UF-GAK	Teknikkombination av ultrafilter och filter med granulerat aktivt kol
UVA, UVabs	Ultra-violet absorbance, här avses UV-absorbans vid 254 nm
VIVAB	Vatten & Miljö i Väst AB
VLP	Virusliknande partiklar
VP	Veckoprover
WWTP	Wastewater treatment plant
YES	Yeast estrogen screen, östrogen effekttest

1 Inledning

I juni 2022 beviljades VIVAB bidrag från Naturvårdsverket (NV-22-001768) enligt förordningen (2018:495) för rening av avloppsvatten från läkemedelsrester. Projektet bygger på en fortsättning och komplettering av en tidigare förstudie inklusive pilottester med BB och VV vid Getteröverket som redovisats av Baresel et al. (2021). Mycket av den allmänna bakgrunden avseende behovet för läkemedelsrening, beskrivning av Getteröverket, erfarenheter från pilottester som Vivab och IVL Svenska Miljöinstitutet (IVL) körde vid Ullared ARV, m.m. kommer därför inte att beskrivas i föreliggande rapport, utan återfinns i tidigare nämnd rapportering.

1.1 Bakgrund

Utifrån den redan genomförda förstudien från 2021, kunde det konstateras att det finns ett stort behov för läkemedelsrening vid Getteröverket för att skydda den känsliga recipienten, Inre Farehammarsviken.

Höga reduktionsgrader av de vanligaste förekommande organiska mikroföroreningarna (fortsättningsvis mikroföroreningar) kunde påvisas från pilotförsöken som genomfördes under 2021. Försöken som utfördes på reningsverket utvärderade olika teknikkombinationer med mikrofiltrering (MF), ultrafiltrering (UF) och filtrering genom granulerat aktivt kol (GAK) utfört i en två-stegskombination. Under försöksperioden noterades det inget avtagande av läkemedelsreduktionen, vilket begränsade möjligheterna för en fullständig utvärdering av försöken och jämförelse mellan teknikerna. Dessa resultat gjorde det även svårt att ta fram av underlag för en eventuell framtida fullskaleimplementering. Utifrån resultaten från arbetet under 2021 bedömdes det som nödvändigt att fortsätta pilottesterna vid Getteröverket innan ett avgörande implementeringsbeslut om ett fjärde reningssteg kan bli aktuellt.

Fortsättningen av projektet planerade dessutom att komplettera de redan igångsatta pilotförsöken med ytterligare teknikkombinationer för att kunna få fram utökad kunskap och underlag för jämförelser med de redan undersökta teknikkombinationerna.

1.2 Syfte och mål

Huvudsyftet med detta förstudieprojekt är att tillhandahålla rekommendationer och ett väl underbyggt underlag som inkluderar bland annat reningsmål, dimensionering och kostnadsberäkningar för investeringsbeslut gällande införandet av en avancerad rening vid Getteröverket. Detta inkluderar ett koncept- och principskissförslag för implementering och integrering av en fullskaleanläggning inom befintlig verksamhet.

I den tidigare utförda förstudien under åren 2020 och 2021 framkom att recipienten Inre Farehammarsviken är känslig och i ett dåligt skick. Det framkom att recipienten utsätts för omfattande risker för negativ påverkan på djurlivet, vilket kan förväntas försämrats ytterligare med ett kontinuerligt tillflöde av framför allt läkemedelsrester via avloppsvattnet från Getteröverket. Mot bakgrund av detta har Vivab:s styrelse tagit fram ett inriktningsbeslut som syftar till en implementering av läkemedelsrening vid Getteröverket på längre sikt. Målet är att utformningen baseras på resultat och rekommendationer från förstudien.

Den övergripande målsättningen med projektet är att minimera oönskade negativa effekter på recipienten, Inre Farehammarsviken, genom att behandla utgående avloppsvatten från Getteröverket avseende organiska mikroförroreningar. Vivab:s ambition är att det renade utgående avloppsvattnet till recipient ska uppvisa en signifikant lägre halt av organiska mikroförroreningarna i förhållande till obehandlat vatten och relativt de dominerade substanserna i recipienten.

De kompletterande pilottesterna var även tänkta att generera processdata baserade på faktiska långtidstester av framför allt teknikkombinationerna UF-GAK och O₃-GAK, som saknas eller endast finns i begränsad omfattning i Sverige idag. Det förutspås därför att resultaten kommer att vara till nytta även för andra avloppsreningsverk i Sverige.

2 Metod

Förstudien genomfördes under juli 2022 till oktober 2023 i samarbete mellan VIVAB och IVL. Projektet byggde delvis på att fortsätta med de pilottester som redan var i gång och kompletterades även med andra delaktiviteter. Dessa delaktiviteter omfattade:

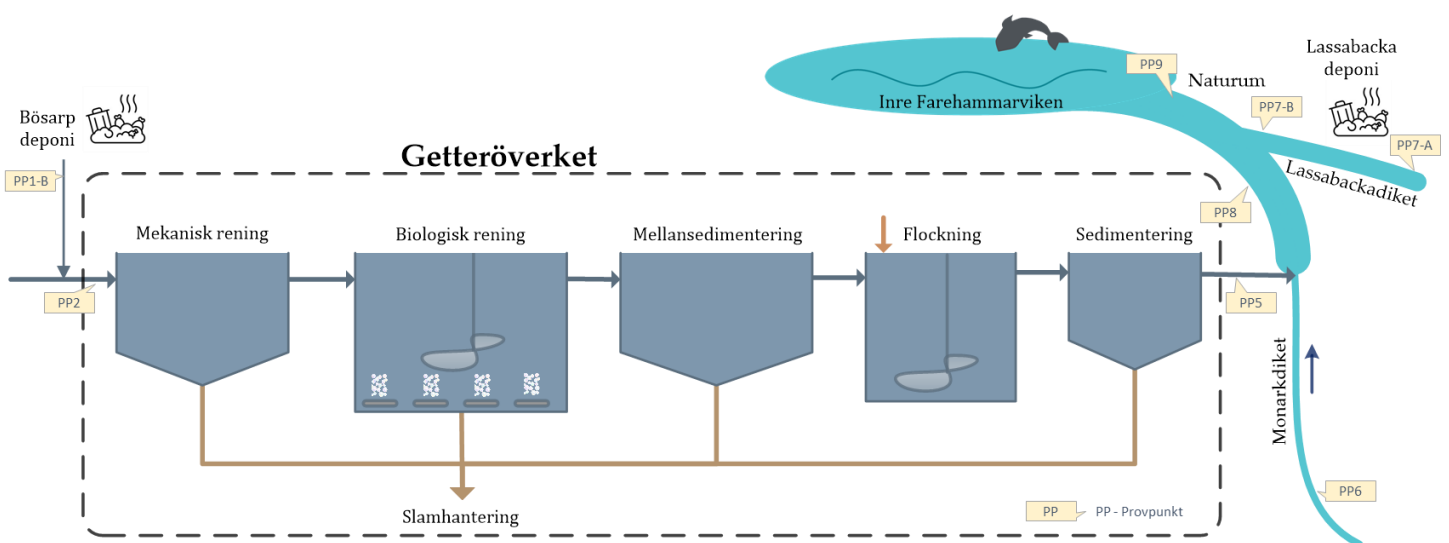
1. Kompletterande kartering av mikroförroreningar över Getteröverket, andra bidragande källor och recipienten.
2. Fortsätta och kompletterande pilotstudier med olika teknikkombinationer såsom UF-GAK och O₃-GAK.
3. Ett koncept- och principskissförslag för implementering och integrering av en fullskaleanläggning inom befintliga marktytor.

2.1 Kartläggning av mikroförroreningar

En kartläggning av mikroförroreningar fortsattes från tidigare projekt, men anpassades något för att få en generell överblick av källfordelning och belastningsnivåer i mottagande recipient, samt för att inkludera påverkan och effekten från alla undersökta pilotprocesser. Förutom kemiska analyser av mikroförroreningar utökades analyserna med effektbaserade analyser.

Kartläggningen inkluderade följande provpunkter, vilka även visas i Figur 1 och Figur 2:

- Inkommande och utgående avloppsvatten från Getteröverket ARV (PP2 och PP5), för att vidare undersöka belastningssituationen in till reningsverket, beräkna reduktion med befintlig reningsprocess och avancerade reningsmetoder samt för att undersöka Getteröverkets belastning på recipienten.
- Lakvatten från Bösarpdeponin (PP1-B) som leds till inkommande avloppsvatten till Getteröverket och kan vara en potentiell punktkälla för PFAS in till reningsverket.
- Uppströms och nedströms i recipienten. Provtagning sker uppströms i Monarkdiket (PP6) och Lassabackadiket, vid två provpunkter innan och efter Lassabackadeponin (PP7-A och PP7-B). Nedströms i recipienten tas det prover direkt efter inblandning av renat utgående avloppsvatten från Getteröverket med dagvatten från Monarkdiket (PP8). Den andra punkten ligger vid Naturum (PP9), efter att Getteröverkets utgående renade vatten har blandats med dagvatten från Monarkdiket och Lassabackadiket.
- Provpunkter för pilotanläggningarna av den avancerade reningen visas i detalj i Figur 2 och innefattar provtagning både innan och efter respektive reningssteg (mer detaljer i avsnitt 2.3)



Figur 1. Relevanta provpunkter vid Getteröverket samt upp- och nedströms recipient.

Tidigare provpunkter vid sjukhuset (PP1), Inre Farehammarviken (PP10 – PP12), samt mellan olika reningssteg (PP3 och PP4) togs bort för denna förstudie, då den

insamlade kunskapen från tidigare provtagningar bedömdes som tillräcklig. För vidare läsning avseende resultaten hänvisas till Baresel et al. (2021).

Proverna över pilotanläggningen togs som tidsproportionella veckoprover för sju åtföljande dagar, där varje dygnsprov togs som ett tidsproportionellt blandningsprov med en provvolym på ca 70 ml var trettionde minut. Avseende ozonbehandlingen, togs det ut prover för att spegla dos-responsförsöken över detta reningssteg. Veckoproverna skickades i slutet av varje provperiod till IVL i Stockholm för analys. Prover över Getteröverket, i lakvatten och i recipienten (stickprover) togs under det aktuella projektet vid två kampanjer under v16 och v27 2023.

2.1.1 Ämnen som ingår för analys

De mikroförroreningar som ingick för analys i olika prover listas i Tabell 1 och omfattar läkemedelsrester, fenoler, PFAS11, hormoner och östrogens effekter (YES). Samtliga dessa analyser utfördes på IVL:s laboratorium i Stockholm och analysmetoder beskrivs i Baresel et al. (2021). Senare tillkom även ytterligare effekttester (se 2.1.2) som dock inte utfördes under hela projektperioden och som därför tas upp separat i rapporten.

Tabell 1. Analyserade organiska mikroförroreningar.

Hormoner		Östrogena effekter	
Östron (E1)		YES (ng E2 _{ekv} /l)	
Östradiol (E2)		Fenoler	
Etinylöstradiol (EE2)		Bisfenol A	
Läkemedelsrester (*antibiotika)		Nonylfenol	Oktylfenol
Atenolol	Metotrexat	PFAS11	
Karbamazepin	Metoprolol	PFBA	PFDA
Ciprofloxacin*	Naproxen	PFPeA	PFBS
Citalopram	Oxazepam	PFHxA	PFHxS
Klaritromycin*	Paracetamol	PFHpA	PFOS
Diklofenak	Propranolol	PFOA	6:2 FTS
Erytromycin*	Sertralin	PFNA	∑PFAS11
Flukonazol	Sulfametoxazol*	Tillägg avlopps- och EQS-direktivet*	
Furosemid	Tramadol	Azitromycin	
Ibuprofen	Trimethoprim*	Amisulprid	Irbersartan
Ketokonazol	Venlafaxin	Benzotriazol	Kandersartan
Losartan	Zolpidem	Hydroklortiazid	4&6Methylbenzotriazol

* Läkemedel som tas upp i förslag för ändring av avlopps- och EQS-direktiv och som inte analyserats tidigare (EU Commission 2022a, b)

Förslaget till det nya avloppsdirektivet som publicerades under hösten 2022 (EU Commission 2022a) inkluderar 12 indikatorsubstanser varav sex substanser redan ingår i nuvarande analyspaket. Dessa är karbamazepin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, metoprolol och venlafaxin (Tabell 1). Resterande sex substanser består av ∑6&4-metylbenzotriazol, amisulprid, benzotriazol, candersartan, hydrochlorthiazid och irbersartan. Amisulprid är inte ett registrerat läkemedel i Sverige, men kan användas vid tillstånd (licens) från Läkemedelsverket och

därmed ändå förekommer i avloppsvatten. Efter att analysmetoden anpassats för att även kunna kvantifiera dessa substanser, har analys av dessa ämnen inkluderats i den avslutande provtagningsomgången.

2.1.2 Effektbaserad analys och andra kompletterande analyser

Olika effektbaserade analyser utfördes dessutom av ett externt laboratorium, BioCell Analytica, vid några provtagningsstillfällen. Dessa effektbaserade analyser lags till under ett senare projektskede och redovisas därför även i resultatdelen separat från analyserna i föregående avsnitt. Metoderna för dessa cellbaserade analyser beskrivs i Biocell Analytica (2021) och resultat för analysen visas i sin helhet i Bilaga 6.3. En beskrivning av de end-points (enheter) som ingick för analys följer nedan:

- AhR-aktivitet (arylhydrokarbon-receptorn, även kallad dioxin-receptorn); Effekten av AhR-aktivering kallas ofta metabolisk aktivering eftersom metaboliserande enzym induceras vid aktivering av Ah-receptorn. Ah-receptorn har flertal fysiologiska funktioner och många dioxinlika föreningar aktiverar Ah-receptorn som till exempel halogenerade organiska miljöföroreningar, polycykliska aromatiska kolväten (PAH:er), vissa pesticider och läkemedel.
- Oxidativ stress (Aktivering av Nrf2); Oxidativ stress beror på att reaktiva syreradikaler bildats i överskott. Toxiska effekter från oxidativ stress inkluderar bl.a. inflammatoriska effekter och cancer. Flertal toxiska ämnen, till exempel organiska miljögifter, pesticider, naturliga ämnen och desinfektionsbiprodukter (DBPs) kan orsaka oxidativ stress.
- Östrogen (ER-aktivitet) och androgen (AR-aktivitet) aktivitet: ER-receptorn kan både aktiveras och blockeras av hormonstörande ämnen. För testerna som ingått i denna förstudie mäts en aktivering av ER. På samma sätt har även en mätning av en aktivering av AR-receptorn ingått. Östrogener och androgener har ett flertal viktiga fysiologiska funktioner för reproduktionen, hjärt-kärl-, immun-, muskulära- och nervsystem. Ämnen som efterliknar eller blockerar könshormoner klassas som hormonstörande ämnen vilket inkluderar bland annat naturliga könshormoner, p-piller, fytoöstrogener, läkemedel för bröst- och prostatacancer och vissa industrikemikalier såsom ftalater. Utöver att ämnen kan verka aktiverande (agonistisk aktivitet), kan de också verka blockerande (antagonistisk aktivitet). Det senare mäts genom testet där anti AR-aktivitet kvantifieras.

Eftersom VIVAB redan har kunskap och instrumentering för en mer utökad analys av bakterieinnehåll i vattnet med flödescytometri och analys för virusliknande

partiklar (VLP) användes dessa i projektet som en del av driftuppföljning och för en utvärdering av pilottesterna.

Under den avslutande fasen för pilotkörningen har även biofilmen på GAK karakteriserats för den mikrobiella sammansättningen med hjälp av sekvensering i kombination med taxonomisk klassificering mot MiDAS databasen. Karakteriseringen utfördes av DNASense i Aalborg, Danmark. Analyserna genomfördes på samlingsprover från tre olika nivåer i varje GAK-kolonn från båda pilotanläggningarna och i vatten före och efter ozonering, samt före och efter GAK-filtren. Resultaten från denna analys återfinns i Bilaga 6.4.

Behandlat vatten har även kvantifierats med avseende på antibiotikaresistenta gener vid samma tillfälle och resultaten och metodbeskrivning visas i Bilaga 6.5. Även dessa analyser genomfördes av DNASense i Aalborg. Antibiotikaresistenta gener (AGR) analyserades endast vid ett tillfälle för att få indikation på piloternas förmåga att minska en eventuell spridning av antibiotikaresistens. Beslutet om att undersöka antibiotikaresistens gjordes mot bakgrund av att Getteröverket tar emot spillvatten från sjukhuset i Varberg. Vattnet från sjukhuset innehåller höga halter av antibiotika och bakterier (Baresel et al., 2021), vilket kan innebära en ökad risk för uppkomst av resistens i ledningsnätet. Eventuell uppkommen resistens skulle i detta fall behöva hanteras vid Getteröverkets reningssteg.

För att undersöka vattnets kemiska status efter behandling i pilotanläggningarna genomfördes kompletterande analyser vid de sista två provtagningarna i vatten efter pilotprocessen för samtliga prioriterade ämnen enligt HVMFS 2013:19 på relevanta kemiska parametrar. Analyserna genomfördes av SGS.

2.2 Kompletterande behovsbedömning

I projektet gjordes även en komplettering av tidigare recipientbedömning och därmed en uppdatering av huruvida det finns ett behov för avancerad rening vid Getteröverket. Detta gjordes för utgående avloppsvatten och i recipient på flera olika sätt enligt följande:

- Utifrån gränsvärden för klassning av kemisk status i vattenförekomster och genom jämförelse av analyserade halter i recipient av särskilt förorenande ämnen i enlighet med Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter (2019:25) om klassificering och miljö kvalitetsnormer avseende ytvatten. De ämnen som ingick för denna bedömning var ciprofloxacin, diklofenak, östradiol och etinylöstradiol.
- Utifrån beräknade riskkvoter av analyserade läkemedel i utgående vatten med hänsyn till recipientens utspädningsförmåga. Beräknade riskkvoter baserades på beräknad koncentration och den koncentration som bedöms vara ofarlig för vattenlevande djur och växter (= PNEC). I de fall där det saknas tillräckligt med toxiska tester för att säkerhetsställa en ofarlig koncentration, ingår även en

säkerhetsfaktor i beräkningen, vilken tar hänsyn till osäkerheten i de ekotoxikologiska studier som föreligger i litteraturen. En mer utförlig beskrivning av hur halterna och riskkvoterna har beräknats visas i rapporten från först etappen (Baresel et al., 2021).

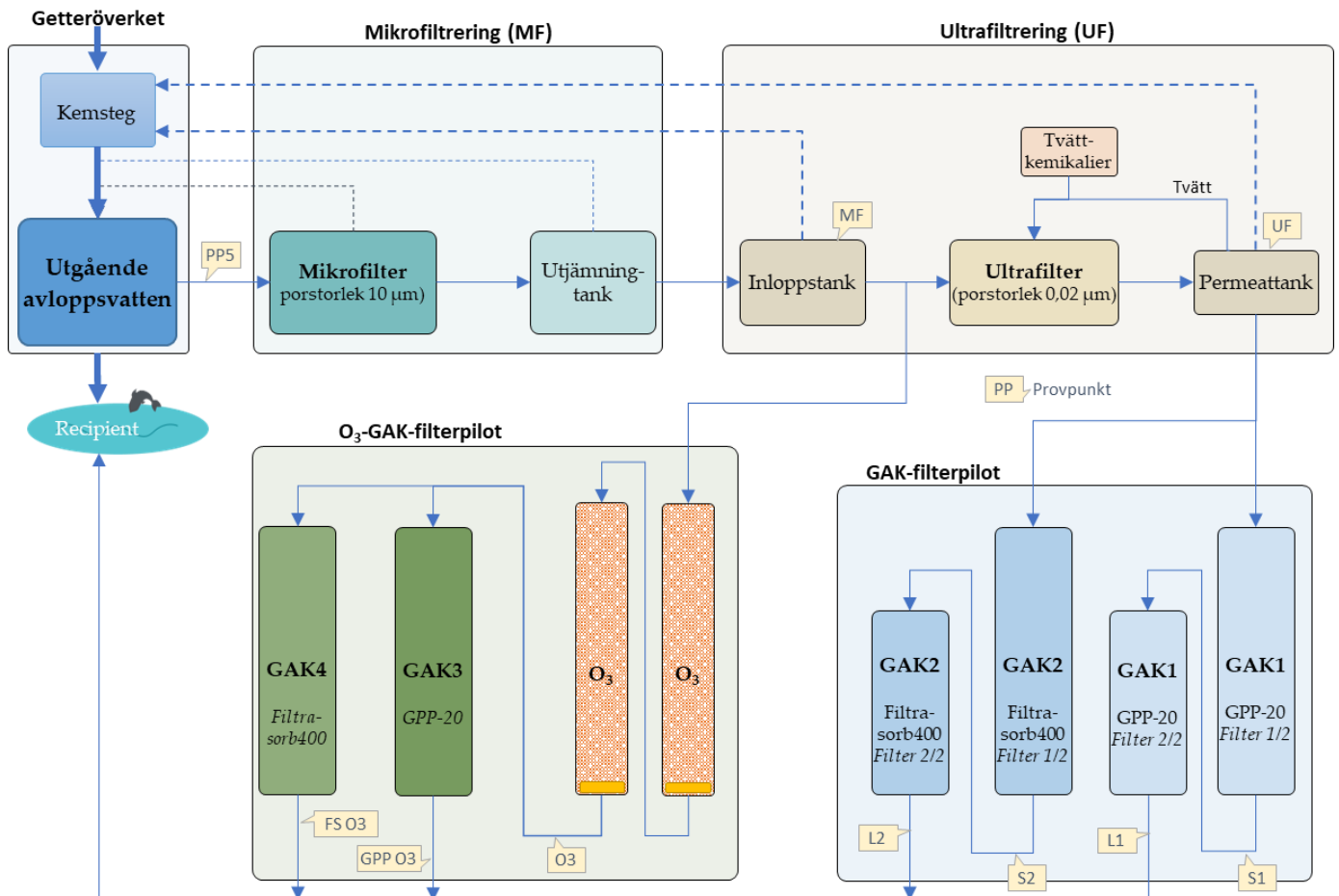
- Utifrån förslaget till ändring av direktiv för prioriterade ämnen (EQS-direktivet) som lagts fram under hösten 2022 (EU Commission 2022b).
- Utifrån förslaget till reviderat avloppsdirektiv med krav för läkemedelsrening som lagts fram under hösten 2022 (EU Commission 2022a).
- Utifrån utförda effekttester inklusive aktivering av östrogenreceptorn (ER); aktivering av androgenreceptor (AR); blockering av androgenreceptor (anti-AR); aktivering av arylhydrokarbonreceptorn (AhR); oxidativ stress (Nrf2-aktivering) samt analyser av cytotoxicitet/akut toxicitet.

2.3 Pilottester

För utvärdering och verifiering av potentiella tekniker har faktiska pilotförsök genomförts vid Getteröverket. Pilotstudierna genomfördes med två olika teknikkombinationer för att jämföra dessa och för att få ett bättre underlag för framtida beslut om avancerad rening vid Getteröverket. Den övergripande ambitionen är att pilotresultaten ska utgöra underlag till en framtida fullskaleanläggning för avancerad rening som kan införas vid Getteröverket, där den teknikkombination som visar sig mest fördelaktig kommer att bli aktuell för framtida implementering.

Teknikkombinationerna som testades visas i Figur 2 och inkluderade en pilotlinje med mikrofiltrering (MF), ultrafiltrering (UF) och två avslutande tvåstegsfilter med granulerat aktivt kol (GAK). Den andra pilotlinjen bestod av mikrofiltrering (MF), ozonering (O₃) och två avslutande enkla filter med granulerat aktivt kol (GAK). I båda pilotlinjerna kördes GAK-filtrering med två olika GAK-material för jämförelse, vilka var uppförda i parallella linjer. Initialt testades även ett GAK-material av biogent ursprung och ett slambaserat GAK tillverkat av slam från Getteröverket. Information om GAK-material beskrivs mer ingående i (Baresel et al., 2021).

Pilottesterna utvärderades med hjälp av ett antal provtagningar och analyser beroende på utförda processförändringar och valda driftstrategier. Relevanta provtagningspunkter indikeras i Figur 2.



Figur 2. Flödesschema över pilotanläggningarna vid Getteröverket samt provpunkter i piloten.

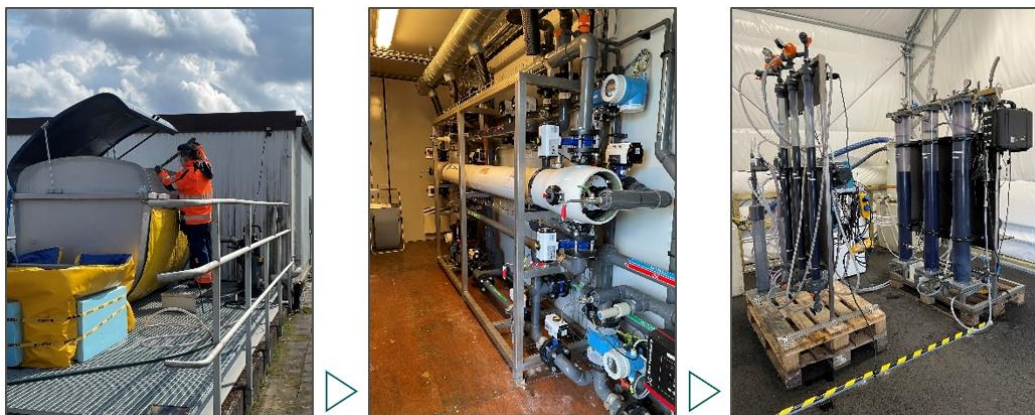
2.3.1 Pilottester med teknikkombinationen UF-GAK

Pilottförsöken med kombinationen av UF och GAK (UF-GAK) men en förbehandling med hjälp av mikrofiltrering (MF) visas i Figur 3 och är en direkt fortsättning av tidigare pilottester som påbörjades i februari 2021 och som omfattade en långtidsstudie med kontinuerliga pilottester över 2,5 års tid och där ca 55 000 bäddvolymmer vatten behandlades i varje filterlinje (vilket motsvarar > 110 000 BV per filter). En utförlig beskrivning av de olika pilotkomponenterna finns i Baresel et al. (2021) och återges inte här, då samma uppsättning och driftförhållanden har tillämpats under hela försöksperioden. De två GAK-sorter som undersökningen fokuserade på i två parallella tvåstegsfilter inkluderade Filtrasorb 400 (jungfruligt GAK, vidare betecknat som FS400) och GPP 20 (regenererat GAK, vidare betecknat som GPP20). Samtliga försök i UF-GAK piloten har genomförts med två kolfilter i linje. Avseende bäddvolymmer (BV) avses här BV när två GAK-filter betecknas som en enhet om inget annat anges.

Pilottförsöken startades under januari 2021 initialt med ytterligare en GAK-pilotlinje med två GAK-filter med Organosorb 10, ett aktivt kol med något större

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

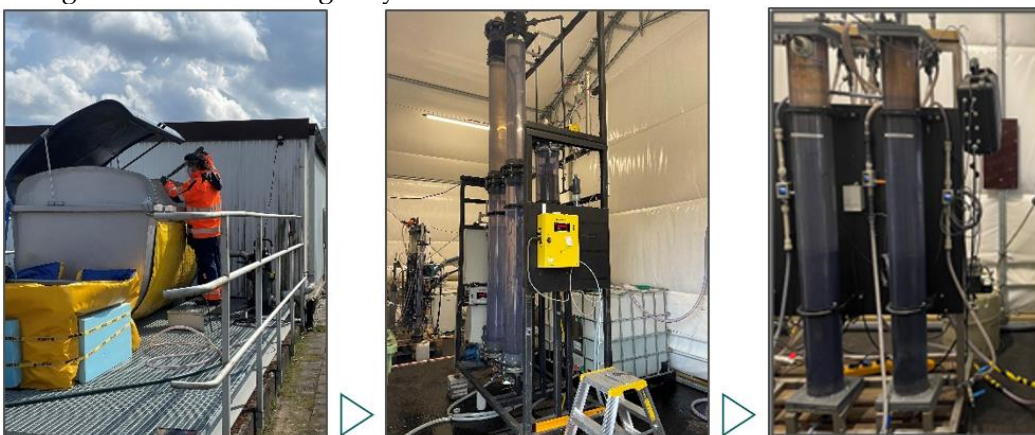
partiklar som producerats från kokosnötskal och som ligger i samma prisklass, eller något över FS400 (från Desotec Activated Carbon). Efter 21 driftveckor, vid ca 8 500 BV (byttes Organosorb 10 ut mot ett egenproducerat aktivt kol från Getteröverkets avvattnade och pyrolyserade slam, FoU21. Pilotförsöken med FoU21 pågick sedan till att ca 13 500 BV för hela filterlinjen (27 000 BV per filter) hade behandlats, vilket innebär att inte alla resultat kunde inkluderas i den förra projektrapporten (Baresel et al., 2021).



Figur 3. Pilotanläggning med teknikkombinationen MF, UF-GAK.

2.3.2 Pilottester med teknikkombinationen Ozon och GAK

Parallellt med pilotförsöken med UF-GAK etablerades även en pilotanläggning för ozonoxidation från Wedeco efterföljt av en GAK-filterpilot från IVL (Figur 4). Även denna pilot föregicks av samma förbehandling med hjälp av mikrofiltrering (MF). Ozongeneratoren (Modular 8HC) hade en kapacitet på upp till 8 g O₃/h som fördes till två bubbelkolonner på totalt 220 l. För att uppnå en önskad kontakttid mellan 15 – 20 minuter kunde även vattenflödet justeras, utöver att ozongeneratoren kunde ställas in. Piloten var utrustad med en egen syrgasgenerator, fotometrisk online-mätning av ozon i producerat ozonflöde samt i off-gasflödet, destruktör för att bryta ner restozon i off-gas, och varningssystem med automatisk avstängning av ozongeneratoren vid läckage i systemet.



Figur 4. Pilotanläggning med teknikkombinationen MF, O₃-GAK.

Pilotförsök med ozonbehandling kunde först påbörjas under oktober 2022 och startade med dos-responstester, utan GAK-filter påkopplade, för att definiera den korrekta ozondosen för långtidsförsöken. Samma GAK-typer, GPP 20 och Filtrasorb 400, som i andra piloten användes även i dessa pilottester. GAK-filtren kördes med en kontakttid på ca 10 min.

2.4 Beslutsunderlag för implementering

Valet av den mest lämpliga tekniken för den avancerade reningen vid Getteröverket är beroende på faktorer som recipientens behov och reningsmål. För närvarande är ozonoxidation och adsorption med aktivt kol de mest förekommande teknikerna för ändamålet. Det är också dessa tekniker som har undersökts i pilotprocesserna inom projektet.

För principförslaget valdes att fokusera på teknikkombinationen UF-GAK som framtida avancerad reningsprocess för Getteröverket. Detta gjordes med tanke på resultaten från pilotförsöken som presenteras i avsnitt 3 och bedömningen om att det behövs en hög reduktion av flera mikroforeningar utifrån recipientbedömningen. Eftersom pilottester med UF-GAK kördes under en avsevärt länge tidsperiod fanns dessutom mest kunskapsunderlag för att utforma ett beslutsunderlag för denna teknikkombination.

Investeringskostnaden för den avancerade reningstekniken har beräknats genom kostnadsuppskattningar från andra projekt och genom dialog med teknikleverantörer och konsulter från byggbranschen.

3 Resultat och diskussion

I detta avsnitt presenteras och diskuteras resultaten från de olika aktiviteter som genomfördes i projektet och som beskrevs i kapitel 2. Analysresultaten i sin helhet inklusive annan relevant detaljinformation återfinns i bilagan.

Tabell 2 visar resultatet för halter i inkommande och utgående avloppsvatten, som provtogs vid två tillfällen, respektive beräknad reningseffekt av de vanligaste kemiska parametrarna för avloppsreningsverk. Värdena indikerar att en effektiv rening av föroreningarna uppnåddes vid båda mättillfällena. Vid samtliga mättillfällen behandlades allt flöde till reningsverket i det biologiska reningssteget.

Tabell 2. Analysresultat för vanliga parametrar för de två provtagningar vid Getteröverket.

Parameter	v17 2023			v28 2023		
	IN	UT	Rening	IN	UT	Rening
Susp mg/l	280	4,1	98,5 %	460	5,3	98,8 %
Tot-P mg/l	6,6	0,19	97,1 %	6,7	0,47	93,0 %
BOD ₇ mg/l	220	3,0	98,6 %	260	6	97,7 %
Tot-N mg/l	44	7,0	84,1 %	49	15	66,7 %
NH ₄ -N mg/l	26	0,78	97 %	28	0,65	98 %
TOC mg/l	110	9,0	91,8 %	150	12	92 %
Flöde m ³ /d	18 900		-	13 500		-

3.1 Mikroföroreningar och reningsbehov

Följande avsnitt redovisar analysresultaten för de olika analyserade mikroföroreningarna vid de olika provtagningstillfällena vid Getteröverket, i uppströms och nedströms recipienter samt i lakvatten från Bösarp deponi. Baserat på dessa analysresultat görs en uppdatering av behovsanalysen för avancerad rening och bedömning av bidragande källor.

3.1.1 Mikroföroreningar vid Getteröverket

3.1.1.1 Hormoner och läkemedel

Tabell 3 visar analysresultaten för analyserade hormoner och läkemedelsrester i inkommande och utgående avloppsvatten vid de två genomförda provomgångarna inkl. medelvärde och medelreduktionsgrad. Halter under detektionsgränsen anges i rött med den faktiska detektionsgränsen (LOD), medan resultat under kvantifieringsgräns anges som halva kvantifieringsgränsen (LOQ/2). Faktiska halter kan således vara lägre och reduktionsgraden högre än vad som redovisas i tabellen.

En väldigt bra reningseffektivitet för de kvantifierbara hormonerna östron (E1) och östradiol (E2) kunde påvisas vid provtillfället och utgående halter låg under LOD eller LOQ. Etinylöstradiol (EE2) kunde inte detekteras i något av proverna.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Data för analyserade läkemedel vid de två provtagningarna visar att reningseffektiviteten varierar kraftigt. Endast för ibuprofen, naproxen och paracetamol uppnås en väldigt hög reduktion på >80 %. Bortsett från losartan, sertralin, sulfamethoxazol och trimethoprim, låg beräknat medel för reningseffektiviteten under 40 %, och för flera substanser kunde en negativ reduktion konstateras. Ciprofloxacin, erytromycin, ketokonazol och metotrexat kunde inte detekteras eller kvantifieras vid något av de två provtagningstillfällena, varken i inkommande eller utgående avloppsvatten vid Getteröverket.

Det bör noteras att de två provomgångarna genomfördes under april respektive juli 2023, och medelvärden kan således endast återge en indikation baserat på dessa få provomgångar. Jämfört med tidigare tre provtagningar, v.37 2020, v.15 2021 och v.29 2021 (Baresel et al., 2021), låg de aktuella mikroföroreningarna i liknande haltområden och reningseffektivitet som vid provtagningen för denna rapport.

Tabell 3. Halter av hormoner och läkemedelsrester i inkommande och utgående avloppsvatten.

Substans (ng/l)	v17 2023		v28 2023		Medel		Reduktion
	IN PP2	UT PP5	IN PP2	UT PP5	IN PP2	UT PP5	
Hormoner							
Östron (E1)	180,1	0,7	87,5	1,25	87,5	0,98	>99 %
Östradiol (E2)	24,1	0,7	3,8	0,7	3,8	0,7	>82 %
Etinylöstradiol (EE2)	1	0,7	1	0,7	1	0,7	-
Läkemedelsrester (*antibiotika)							
Atenolol	440	280	630	360	535	320	40 %
Karbamazepin	210	330	440	600	325	465	-43 %
Ciprofloxacin*	30	18,0	18,5	18,5	24,25	18,25	-
Citalopram	150	180	140	220	145	200	-38 %
Klaritromycin*	21	14	37	32	29	23	21 %
Diklofenak	810	750	1 200	1 000	1 005	875	13 %
Erytromycin*	4	4	3	4,5	3,55	4,3	-
Fluconazol	190	140	190	210	190	175	8 %
Furosemid	1 400	1 200	1 300	3 200	1 350	2 200	-63 %
Ibuprofen	6 200^	110	7 500^	230	6 850	170	98 %
Ketokonazol	14	14	---	---	14	14	-
Losartan	4 300^	3 000	7 000^	2 600	5 650	2 800	50 %
Metotrexat	12	12	16	16	14	14	-
Metoprolol	1 100	1 200	1 900	1 900	1 500	1 550	-3 %
Naproxen	22 000^	330	34 000^	500	28 000	415	99 %
Oxazepam	250	240	450	410	350	325	7 %
Paracetamol	37 000^	880	44 000^	120	40 500	500	99 %
Propranolol	84	130	130	230	107	180	-68 %
Sertralin	82	58	220	110	151	84	44 %
Sulfametoxazol*	490	70	910	220	700	145	79 %
Tramadol	280	400	330	380	305	390	-28 %
Trimethoprim*	130	99	220	96	175	97,5	44 %
Venlafaxin	550	630	890	1100	720	865	-20 %
Zolpidem	10	5	10	7	9,95	6,15	38 %
XX - < LOD (Level of Detection), XX - < LOQ/2 (Level of Quantification)					Reningsgrad		≥80 %
^ Risk för ökad osäkerhet vid kvantifiering							40-80 %
--- Ämnet kan inte utvärderas pga. störning i analysen							≤40 %

Tabell 4 visar halter för de tillkommande läkemedel enligt förslaget till det nya avloppsdirektivet, som baseras på indikatorsubstanser som används för avancerad rening i Schweiz. Dessa läkemedel inkluderades endast vid några analystillfällen under projektperioden. Som framgår från tabellen så kunde amisulprid inte detekteras i avloppsvattnet, vilket inte är förvånande då det sannolikt förekommer en låg konsumtion av detta ämne i Sverige eftersom det inte är ett registrerat läkemedel i Sverige. Alla andra av dessa läkemedel kunde kvantifieras, och som tabellen indikerar renas dessa substanser inte alls, eller endast måttligt, bort i dagens reningsprocess. Det senare är förväntat eftersom dessa ämnen ska ingå som en utvärdering av ett infört avancerat reningssteg på reningsverk i framtiden, enligt förslaget för det nya avloppsdirektivet.

Tabell 4. Halter av de läkemedel som enligt förslaget till nya avloppsdirektivet ska ingå som driftsparametrar av den avancerade reningen (indikatorsubstanser).

Substans (ng/l)	v17 2023		v28 2023		Medel		Reduktion
	IN PP2	UT PP5	IN PP2	UT PP5	IN PP2	UT PP5	
Σ6&4-metylbenzotriazol	680	380		350	680	365	46%
Amisulprid	0,4	0,4		1	0,4	0,7	
Azitromycin	66	35		370	66	202,5	-207%
Benzotriazol	170	210		340	170	275	-62%
Candersartan	1 200	750		1 100	1 200	925	23%
Hydrochlorthiazid	3 400	2 100		2 000	3 400	2 050	40%
Irbersartan	1 000	600		750	1 000	675	33%
XX - < LOD (Level of Detection)						Reningsgrad	≥80 %
XX - < LOQ/2 (Level of Quantification)							40-80 %
--- Ämnet kan inte utvärderas pga. störning i analysen							≤40 %

3.1.1.2 Fenoler, PFAS och östrogen effekt

Tabell 5 visar analysresultaten för fenoler, PFAS och östrogen effekt (YES) i inkommande och utgående avloppsvatten för de två provtillfällena. På ett övergripande plan kan det observeras att halter och reduktionsgrader stämmer bra överens med tidigare studier vid Getteröverket (Baresel et al., 2021). Utgående halter för Bisfenol A ligger dock något lägre än tidigare och oktylfenol kunde inte detekteras alls vid de aktuella provtagningarna. Även nonylfenol uppvisar en bra reduktion i den här kartläggningen, till skillnad från en kraftig negativ reduktion vid förra kartläggningen under 2020/2021.

De flesta PFAS samt ΣPFAS11 och summan PFOA-ekvivalenter baserat på PFAS11 (ΣPFOA_{ekvPFAS11}) uppvisar också en måttlig eller negativ reduktion över Getteröverket.

Östrogena effekter uttryckt som östrogenekvivalenter (E_{2ekv}/l) reduceras väldigt effektivt (Tabell 5), vilket är i paritet med den förra studien (Baresel et al., 2021).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Tabell 5. Halter för fenoler, PFAS och östrogen effekt i inkommande och utgående avloppsvatten.

Substans (ng/l)	v17 2023		v28 2023		Medel		Reduktion
	IN PP2	UT PP5	IN PP2	UT PP5	IN PP2	UT PP5	
Fenoler							
Bisfenol A	360	110	320	48	340	79	77 %
Nonylfenol	6,5	2	73	2	39,75	2	95 %
Oktylfenol	3	2	2	2	2,5	2	-
PFAS							
PFBA*	0,13	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	13 %
PFPeA*	2,5	1,58	0,87	1,69	1,7	1,6	3 %
PFHxA	2,01	3	1,08	1,53	1,5	2,3	-47 %
PFHpA	1,82	2,34	1,39	1,19	1,6	1,8	-10 %
PFOA	3,25	3,39	2,06	2,78	2,7	3,1	-16 %
PFNA	0,58	0,51	0,36	0,78	0,5	0,6	-37 %
PFDA	0,28	0,47	3,91	1,2	2,1	0,8	60 %
PFBS	3,38	1,23	1,01	0,05	2,2	0,6	71 %
PFHxS	1,15	1,02	0,28	1	0,7	1,0	-41 %
PFOS	11,44	4,94	3,46	3,58	7,5	4,3	43 %
6:2 FTS	0,82	0,6	0,83	0,54	0,8	0,6	31 %
Σ PFAS11	27,36	19,18	15,35	14,44	21,35	16,81	21 %
Σ PFOA _{ekv} PFAS11	35,60	23,54	40,86	27,41	38,23	25,47	33 %
Östrogena effekter (ng E2_{ekv}/l)							
YES	18	0,1	1,9	0,01	10,0	0,1	99 %
XX - < LOD (Level of Detection)					Reningsgrad		≥80 %
XX - < LOQ/2 (Level of Quantification)							40-80 %
*Analyterna har detekterats med enbart en produktion i MS/MS.							≤40 %

De mest förekommande förklaringarna till en negativt observerad reduktion, d.v.s. där lägre koncentrationer uppmätts för inkommande avloppsvatten än utgående avloppsvatten, är att substanserna utsöndras som konjugat (till exempel glukuronidkonjugat). En annan förklaring är att den väldigt komplexa kemiska miljön i inkommande avloppsvatten gör att signalerna undertrycks vid analysen varvid ett lägre värde än det verkliga erhålls. Detta har undersökts bland annat av IVL inom tidigare SystemLäk-projektet (Magnér et al., 2017). Resultatet visade att undertryckning av signalen i masspektrometern hade den största påverkan.

3.1.1.3 Aktivitetstester

Aktivitetstesterna visade vid båda tillfällena som analyser gjordes i inkommande avloppsvatten höga aktiviteter från 106 till 212 ng E2_{ekv}/l (Tabell 6). Aktiviteten minskade dock över reningsprocessen med >98 % ned till 0,44 - 3,5 ng E2_{ekv}/l i utgående avloppsvatten (Tabell 6). Kvantifierad östrogen aktivitet i dessa analyser visar alltså med högre halter v28 än v17 2023 motsatt trend än vad YES analyser visar i Tabell 5. Dessutom ligger de rapporterade halter i inkommande vatten avsevärt högre än vad någon av de genomförda YES-analysen visar (se Bilaga 6.3). Reningsgraden över den befintliga processen ligger dock på samma nivå för båda analysmetoderna. Vid jämförelse med kemiska analyser av de hormoner och fenoler som är några av de ämnen som ger utslag för östrogen aktivitet (Tabell 3 och Tabell 5), visar dessa att YES-utslaget visade med högre halter v17 än vid v28 samma trend men att utslaget var något underskattat vid första provtagningen, medan det vid den andra provtagningen stämde bättre överens med vad kemisk

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

analys indikerade. ER-utslaget låg vid båda analysomgångar avsevärt högre än vad som kunde förklaras med kemiska analyser. Dessutom visades ER-utslaget en högre effekt under v28 än vid v17 medan kemiska analyser visar motsatt trend. Det bör påpekas att det är många fler föroreningar i avloppsvatten som ger upphov till östrogen aktivitet än de som ingått för kemisk analys i denna undersökning.

Tabell 6. Resultat från aktivitetstester i inkommande och utgående avloppsvatten.

Provpunkt	v17 2023	v28 2023
ER-aktivitet (pg E2 _{ekv} /l)		
IN (PP2)	106 000	212 000
UT (PP5)	437	3 490
Detektionsgräns (LOD)	13,0	15,5
AR-aktivitet (ng DHT _{ekv} /l)		
IN (PP2)	57,3	417
UT (PP5)	<LOD	<LOD
Detektionsgräns (LOD)	0,10	0,25
Anti-AR (ng OHF _{ekv} /l)		
IN (PP2)	87,6	198
UT (PP5)	<LOD	<LOD
Detektionsgräns (LOD)	40,9	37,3
AhR-aktivitet (ng TCDD _{ekv} /l)		
IN (PP2)	43,20	2,78
UT (PP5)	0,26	0,18
Detektionsgräns (LOD)	0,053	0,016
Nrf2-aktivitet (µg tBHQ _{ekv} /l)		
IN (PP2)	59,5	218
UT (PP5)	<LOD	9,6
Detektionsgräns (LOD)	5,7	3,5

Androgen aktivitet (AR) uppmättes i det inkommande avloppsvattnet till Getteröverket vid båda provtagningstillfällena, men inte i det utgående renade vattnet (Tabell 6). Låga utgående, eller brist på androgenicitet i utgående avloppsvatten har diskuterats och observerats i studier tidigare (Holm och Önnby, 2022; Stalter et al., 2011).

AhR-aktiviteten uppmättes i inkommande vatten med en avsevärt högre halt v17 2023 jämfört med v28 2023. Även i utgående avloppsvatten kunde en AhR-aktivitet konstateras, om än i relativt lägre halter (Tabell 6). Reningsgraden för AhR-aktiviteten över den befintliga reningsprocessen vid Getteröverket låg på >93,7 %.

Oxidativ stress (Nrf2-aktivering) kan aktiveras av flera kemikalier och kan anses vara en endpoint som är en av de mer hälsorelevanta parametrarna att inkludera för vattenkvalité tillsammans med hormonmedierad aktivitet såsom östrogenicitet (Escher et al., 2014). I det inkommande avloppsvattnet uppmättes oxidativ stress och i ett av två prov på utgående vatten (Tabell 6). Effekten minskade vid detta tillfälle med >95 % över Getteröverket. I Holm och Önnby (2022) påvisas oxidativ stress även i utgående vatten över den befintliga processen och uppmätta halter har motsvarat ett grovt intervall från 20 till 80 µg tBHQ_{ekv}/l (Holm och Önnby, 2022), vilket är något högre än vad som påvisas här för två mätningar.

3.1.2 Mottagande och uppströms recipienter/lakvatten

3.1.2.1 *Hormoner och läkemedel*

Tabell 7 visar halterna av hormoner och läkemedelsrester i olika recipienter uppströms reningsverket (PP6, Monarkdiket) och nedströms reningsverket (PP8), samt när recipienten mynnar ut i Inre Farehammarsviken (PP9, Naturum). Dessutom visas halter i Lassabackadiket (PP7-A och PP7-B) som förgrenas med Monarkdiket och som dränerar ett område som inkluderar både industriområden väster om järnvägen samt en deponi (Lassabacka AFA) väster om viken. Även analyserade lakvattenhalter från Bösarps deponi (PP1-B) visas. För en översikt av de inkluderade provpunkterna hänvisas läsaren till Figur 1.

Hormonhalterna ligger under detektions- eller kvantifieringsgräns i alla provtagningspunkter förutom för östron för några tillfällen och för etinylöstradiol vid ett tillfälle. För läkemedel kan det observeras att flest substanser kan kvantifieras i PP9 (Naturum) och de två provtagningspunkterna uppströms och nedströms Getteröverkets utsläppspunkt, PP6 respektive PP8. Att halter uppströms utsläppspunkten är förhöjda beror troligtvis på ett lågt flöde i Monarkdiket generellt, och vid provtagningen. Detta betyder att utgående avloppsvatten troligtvis påverkar denna provtagningspunkt. Inga höga halter läkemedel kunde observeras i lakvattnet från Bösarps deponi (PP1-B) eller från industriområdet (PP7-A) och nedströms Lassabakadeponin (PP7-B).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Tabell 7. Halter för hormoner och läkemedelsrester i olika ytvatten och lakvatten.

Substans (ng/l)	v17 2023						v28 2023					
	PP1-B	PP6	PP8	PP7-A	PP7-B	PP9	PP1-B	PP6	PP8	PP7-A	PP7-B	PP9
Hormoner												
Östron (E1)	0,7	15	8	1	0,7	6,9	0,7	13,7	1,25	1,25	4,4	1,25
Östradiol (E2)	0,7	1,25	1,25	1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Etinylöstradiol (EE2)	5,9	0,7	0,7	1	1,25	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Läkemedelsrester (*antibiotika)												
Atenolol	3,2	50	220	3,2	3,2	210	2,5	100	290	1	1	270
Karbamazepin	54	5,4	250	1,4	2,3	260	98	45	530	2	3,5	490
Ciprofloxacin*	---	---	---	---	---	---	11	11	18,5	11	11	78
Citalopram	2	18	150	2	2	140	1	14	160	1	1	140
Klaritromycin *	1,6	27	22,0	1,6	1,6	18	1	54	27	1	1	27
Diklofenak	5,5	30	650	3	3	690	4	120	860	4	7	760
Erytromycin*	4	4	4	4	4	4	3	3	4,5	3	3	4,5
Fluconazol	3	3	97	3	3	130	3	27	150	3	3	160
Furosemid	2	44,0	950	2	2	1100	2	130	1900	2	2	1600
Ibuprofen	260	1000	330	100	110	270	99	1300	260	630	430	310
Ketokonazol	14	14	14	14	14	14	---	---	---	---	---	---
Losartan	4	200	2700	4	4	2600	4	320	2000	6	6	1800
Metotrexat	12	12	12	12	12	12	58	16	16	16	16	16
Metoprolol	1	77	990	1	1	1000	12	170	1700	14	13	1400
Naproxen	9	790	470	9	9	530	9	2600 [^]	500	52	9	470
Oxazepam	4,5	7,5	220	4,5	4,5	200	1	18	420	1	1	360
Paracetamol	200	3600 [^]	860	57	12,5	110	5	980	42	100	9	62
Propranolol	1	6,4	120	1	1	110	2	7	190	2	2	160
Sertralin	6	10	39	6	6	45	2	22	35	2	2	52
Sulfametoxazol*	2	1,8	76	2	2	80	6	49	180	6	6	140
Tramadol	1,0	22	230	1,0	1,0	240	1,5	65	220	1,5	5	270
Trimethoprim*	1,5	2,5	89	2,5	2,5	89	1,5	37	83	1	1	75
Venlafaxin	1	57	520	1	1	590	2	140	920	2	8	920
Zolpidem	1	1	5	1	1	5	1	1	4	1	1	4

XX - < LOD (Level of Detection)
 XX - < LOQ/2 (Level of Quantification)
 ^ Risk för ökad osäkerhet vid kvantifiering
 --- Ämnet kan inte utvärderas pga. störning i analysen, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst.

3.1.2.2 Fenoler, PFAS och östrogen effekt

Tabell 8 visar analysresultaten för fenoler, PFAS och östrogen effekt i samma provpunkter som ovan och för de två provtillfällena. Det kan noteras att halter för Bisfenol A framstår som höga vid Getteröverkets utlopp (PP8) och nedströms Lassabakadeponin (PP7-B). Vid första provtagning konstaterades de högsta halterna av bisfenol A vid Naturum (PP9), vilket tyder på andra bidragande källor. Vid första provtagningen kunde dessutom mycket höga halter av oktylfenol observeras uppströms och nedströms utsläppspunkten (Tabell 8).

Halter för PFAS ligger som förväntat på en högre nivå i lakvattnet från Bösarp deponi jämfört med de andra provtagningspunkterna. Höga PFAS-halter kunde dock även observeras vid provpunkten för industriområdet (PP7-A) och Lassabakadeponin (PP7-B). Även Getteröverket verkar bidra med relativt höga PFAS-halter, men redan uppströms reningsverket mäts höga PFAS-halter (se även 3.1.4).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Östrogena effekter kunde uppmätas endast uppströms och nedströms Getteröverket utsläppspunkten och vid första provtagningen i lakvattnet från Bösarp deponi samt vid andra provtagningen vid Naturum.

Tabell 8. Halter för fenoler, PFAS och östrogen effekt i olika ytvatten och lakvatten.

Substans (ng/l)	v17 2023						v28 2023					
	PP1-B	PP6	PP8	PP7-A	PP7-B	PP9	PP1-B	PP6	PP8	PP7-A	PP7-B	PP9
Fenoler												
Bisfenol A	1,0	190	330,0	49,0	190,0	500,0	1	1100	170	90	140	63
Nonylfenol	6,5	4	4	2	2	26	19	2	2	2	2	2
Oktylfenol	3	8600	6200	2	2	1	2	2	2	2	2	2
PFAS												
PFBA*	31,4	2,34	0,94	3,62	5,59	0,1	48,99	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
PFPeA*	35,9	0,56	1,46	5,98	4,52	2,06	35,12	1,47	1,28	3,555	0,07	1,9
PFHxA	73,1	1,82	2,86	6,72	6,28	3,21	108,31	0,77	1,65	1,245	0,56	1,23
PFHpA	37,7	1,18	1,55	2,62	2,63	2,07	29,29	0,95	1,49	1,125	1,8	1,61
PFOA	129,1	1,67	3,2	3,97	4,94	3,65	150,82	2,3	3,04	2,86	3,48	2,87
PFNA	2,6	0,67	0,4	0,37	0,42	0,38	2,9	0,96	0,55	0,435	0,43	0,56
PFDA	0,99	0,55	0,15	0,1	0,26	0,36	10,27	4,3	2,18	2,81	3,9	3,8
PFBS	11,14	0,34	1,33	1,38	1,17	1,12	16,37	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
PFHxS	15,53	0,95	1,1	10,93	9,75	1,73	18,88	0,5	0,9	5,065	3,4	0,67
PFOs	38,94	2,16	3,83	17,3	21,97	4,53	70,32	2,12	2,33	6,995	9,25	3,94
6:2 FTS	5,17	0,12	0,38	1,21	1,19	0,53	5,35	0,14	0,39	0,4	0,3	0,55
∑PFAS11	381,6	12,36	17,2	54,2	58,72	19,74	496,6	13,66	13,96	24,64	23,34	17,28
∑PFOA_{ekv}PFAS11	271,4	17,86	17,47	51,28	62,56	21,21	423,1	47,08	29,81	44,60	56,54	44,24
Östrogena effekter (ng E2_{ekv}/l)												
YES	1,6	0,5	1,4	0,1	0,1	1,2	0,01	0,9	0,6	0,01	0,01	0,01
XX - < LOD (Level of Detection)												
XX - < LOQ/2 (Level of Quantification)												
*Analyterna som detekterats med enbart en produktion i MS/MS.												

3.1.2.3 Aktivitetstester

Resultat för aktivitetstesterna visas i Bilaga 6.3 och avseende ER-aktiviteten i lakvattnet från Bösarp (PP1-B) visade de att aktiviteten i lakvattnet var med 0,22 – 0,44 ng E2_{ekv}/l mycket lägre än i det inkommande och utgående vattnet till Getteröverket (Tabell 6). Detta skiljer sig från YES-tester som vid provtagning v17 visade att Bösarps lakvatten hade högst effekt av alla analyserade prover och motsvarade på 1,6 ng/l (PP1-B, Tabell 8). Bland recipientproverna så var ER-aktiviteten högst uppströms i Monarkdiket (PP6) vid båda provtagningstillfällena. Även här visar resultaten en något annorlunda bild jämfört med YES-testerna (Tabell 8). Utöver denna diskrepans uppvisade dessutom vissa provpunkter, såsom PP6, extremt låga flöden vid provtagningstillfället och resultaten kan därför ha påverkats av stillastående vatten.

De observerade skillnaderna mellan resultaten från YES och ER kan inte utredas närmare i föreliggande rapport med så få genomförda analyser. Det kan dock konstateras att känsligheten skiljer sig åt och en förklaring kan som bland annat vara att YES-testet, tillskillnad från ER, inte särskiljer på agonister (aktivitetshöjande) och antagonister (motverkande) och att testerna utgår från jäst- respektive däggdjursceller.

Androgen aktivitet uppmättes inte i lakvattnet från Bösarp deponi, eller i något av recipientproverna, med undantag för uppströms Monark (PP6) i april 2023.

AhR-aktivitet uppmättes i lakvattnet från Bösarp deponi samt i alla recipientprover. I recipientproverna var AhR-aktiviteterna högst i april 2023 i samtliga prov.

Oxidativ stress (Nrf2-aktivering) uppmättes i recipientprovet nedströms utsläppspunkten (PP8) och i provpunkten från industriområdet (PP7-A) vid andra provtagningen, och vid naturum (PP9) vid första provtagningen. Ingen oxidativ stress kunde observeras i lakvattnet från Bösarp deponi.

Effektbaserade analyser i lakvatten från andra studier har varit svårt att identifiera och någon vidare jämförelse med ovanstående resultat är därför svår att göra.

3.1.3 Bedömning av recipientpåverkan och reningsbehov

Kompletterande bedömningar för negativ påverkan av mottagande recipienter presenteras nedan. Denna bedömning utgör en grund för bedömningen av behovet för avancerad rening vid Getteröverket och för de olika applicerade metoderna beskrivna i avsnitt 2.4.

3.1.3.1 Utifrån gränsvärden och bedömningsgrunder

Utifrån befintliga gränsvärden och bedömningsgrunder i enighet med Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter (2019:25) om klassificering och miljökvalitetsnormer avseende ytvatten (Tabell 9) överskrids halter för diklofenak enligt Tabell 7 tydligt nedströms Getteröverket utsläppspunkt (PP8) och vid Naturum (PP9). Även för oktylfenol överskrids gränsvärdet för årsmedel i PP6 och PP8 vid första provtagningen (Tabell 8). Gränsvärdet för PFOS överskrids signifikant i samtliga recipientprover (Tabell 8). För hormoner är en bedömning inte möjligt p.g.a. att analyserade halter ligger under detektionsgränsen (LOD). Det bör påpekas att gällande gränsvärde är högre än detektionsgränsen.

Avseende gränsvärden för god kemisk status enligt ändringsförslaget av ämnesdirektivet för prioriterade ämnen (Tabell 9), så överskrids halter för östron, diklofenak och ibuprofen i flera recipientpunkter (jämför Tabell 7 med Tabell 9). För bisfenol A överskrids gränsvärden i samtliga ytvattenprover med råge. Även för nonylfenol och oktylfenol ligger uppmätta halter i vissa punkter högre än de förslagna gränsvärdena. Det nya gränsvärdet för summan av PFOA-ekvivalenter överskrids delvis med en faktor 10 och mer, och trots att summan i Tabell 8 endast baseras på 11 analyserade PFAS och inte 24 som det är avsett enligt regelverket där PFAS₂₄ ska ingå som $\sum \text{PFOA}_{\text{ekv}}(\text{PFAS}_{24})$.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Både befintliga och föreslagna gränsvärden och bedömningsgrunder indikerar alltså ett tydligt åtgärdsbehov för att förbättra vattenförekomstens status. Avseende läkemedel och hormoner, men även fenoler, kan Getteröverket tydligt pekats ut som den huvudsakliga källan till förekomst av dessa ämnen i recipienten, vilket motiverar för åtgärder vid anläggningen. Även för PFAS indikerar analysresultaten att Getteröverket utgör en betydande transportväg till vattenmiljön, vilket också motiverar tekniska åtgärder vid anläggningen.

Tabell 9. Befintliga gränsvärden och bedömningsgrunder för god kemisk och ekologisk status visas till vänster i tabellen. Gränsvärden för god kemisk status enligt ändringsförslaget av ämnesdirektivet för prioriterade ämnen visas till höger.

Ämne (ng/l)	HVMFS 2019:25		Nya direktivförslaget	
	Årsmedel/Maximal halt		Årsmedel/Maximal halt	
	Kustvatten	Inlandsvatten	Kustvatten	Inlandsvatten
Hormoner				
Östron (E1)			0,018/-	0,36/-
Östradiol (E2)	0,08/-	0,4/-	0,009/-	0,18/-
Etinylöstradiol (EE2)	0,007/-	0,035/-	0,0016/-	0,017/-
Läkemedel				
Azitromycin			1,9/18	19/180
Karbamazepin			250/160 000	2 500/1 600 000
Ciprofloxacin	-/100	-/100		
Klaritromycin			13/13	130/130
Diklofenak	10/-	100/-	4/25 000	40/250 000
Erytromycin			50/100	500/1 000
Ibuprofen			22/-	220/-
Fenoler				
BPA Bisfenol A	110/-	1 600/2 700	0,034/-	0,034/130 000
NP Nonylfenol	300/2 000	300/2 000	1,8/170	37/2 100
OP Oktylfenol	10/-	100/-	10/-	100/-
PFAS				
∑PFAS-11	-/90	-/90		
∑PFOA _{ekv} (PFAS24)			4,4/-	4,4/-
PFOS	0,13/7 200	0,65/36 000		

3.1.3.2 Utifrån beräknade riskkvoter

Tabell 10 visar nolleffekt-koncentrationer (PNEC), relaterade osäkerhetsfaktorer, medelhalter i utgående avloppsvatten från Getteröverket utan utspädning och i nedströms recipientpunkter (PP8 och PP9). För alla dessa provtagningspunkter har även riskkvoter för de analyserade läkemedlen beräknats. Läkemedlen flukonazol, ketokonazol, losartan, metotrexat, tramadol, venlafaxin och zolpidem fanns inte med i tidigare utredningar där PNEC och säkerhetsfaktorer har tagits fram. För flukonazol, losartan, tramadol och venlafaxin har därför data från CWPharma-projektet använts med antagandet att dessa representerar aktuella värden. För ketokonazol, metotrexat och zolpidem har inga effekthalter och säkerhetsfaktorer kunnat tas fram. För citalopram används både den bedömda effekthalten från Ågerstrand (2019) och, enligt kompletterande studier, från Hoyer et al. (2022). För hormoner har ingen riskkvot beräknats när medelvärdet baseras endast på analyser rapporterade under detektionsgränsen.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Data i tabellen visar att riskkvoterna i utgående avloppsvatten och i de två provtagningspunkterna nedströms i primärrecipienten (PP8 och PP9) ger samma bild. Detta förklaras med den relativt låga utspädningen i recipienten innan vattnet når Inre Farehammarsviken.

Baserat på de två provtagningar som gjorts i projektet bedöms det för sju av de undersökta läkemedlen (atenolol, flukonazol, ibuprofen, naproxen, paracetamol och tramadol) inte föreligga någon risk för negativ påverkan i recipienterna med dagens halter i utgående avloppsvatten från Getteröverket när utspädning exkluderas, eller för observerade halter direkt i recipient. För ytterligare nio substanser finns det endast en måttlig risk. Halter för citalopram, diklofenak, furosemid, oxazepam och sertralin indikerar däremot en hög risk för miljöpåverkan i nästan samtliga provtagningspunkter. Avseende östron kan en negativ effekt inte uteslutas i recipientpunkterna eftersom detta ämne rapporteras under detektionsgränsen. Högst riskkvot observerades för citalopram, oberoende av vilket PNEC-värde som används, och för oxazepam. För citalopram framgår det dessutom att observerade halter i recipienterna ligger nära, eller över LOEC (akuttoxicitet), på 150 ng/l. Detta betyder att citalopram återfinns i halter som förväntas ge en akuttoxicitet på vattenlevande organismer.

Utifrån beräknade riskkvoter i utgående avloppsvatten och i recipientprover bedöms att ett tydligt åtgärdsbehov vid Getteröverket föreligger för att minska riskerna för negativ påverkan från utsläpp av läkemedelsrester.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Tabell 10. Sammanställning av effektkoncentrationer (PNEC), osäkerhetsfaktorer, medelhalter samt riskkvoter i utgående avloppsvatten från Getteröverket, utan utspädning, och i nedströms recipientpunkter (- ingen risk, - mätlig risk, - hög risk för negativ påverkan).

Substans	PNEC ng/l	Säkerhets- faktor -	Medel PP5		Medel PP8		Medel PP9	
			EC ng/l	RK -	EC ng/l	RK -	EC ng/l	RK -
Hormoner								
Östron (E1)	0,08	100	0,98	-	1,25	15,6	1,25	15,6
Östradiol (E2)	0,04	10	0,7	-	0,975	-	0,7	-
Etinylöstradiol (EE2)	0,016	2×10	0,7	-	0,7	-	0,7	-
Läkemedelsrester (*antibiotika)								
Atenolol	32 000	100	320	0,01	255	0,01	240	0,01
Karbamazepin	2500	10	465	0,19	390	0,16	375	0,15
Ciprofloxacin*	64	50	18,25	-	18,5	-	78	1,22
Citalopram	0,075 7,5*	2×1000 2×10	200	2667 27	155	2067 20,7	140	1867 18,7
Klaritromycin*	40	50	23	0,58	24,5	0,61	22,5	0,56
Diklofenak	50	2×10	875	17,50	755	15,10	725	14,50
Erytromycin*	20	1000	4,3	0,22	4,3	0,22	4,3	0,22
Fluconazol	15 000 [#]	SSD	175	0,01	123,5	0,01	145	0,01
Furosemid	156	1000	2200	14,10	1425	9,13	1350	8,65
Ibuprofen	102 000	10	170	0	295	0	290	0
Ketokonazol			14	-	14	-	14	-
Losartan	7 800 [#]	100 [#]	2800	0,36	2350	0,30	2200	0,28
Metotrexat			14	-	14	-	14	-
Metoprolol	2590	1000	1550	0,60	1345	0,52	1200	0,46
Naproxen	15 000	10	415	0,03	485	0,03	500	0,03
Oxazepam	10	2×50	325	32,50	320	32,00	280	28,00
Paracetamol	46 000	10	500	0,01	451	0,01	86	0
Propranolol	228	10	180	0,79	155	0,68	135	0,59
Sertralin	9,4	50	84	8,94	37	3,94	48,5	5,16
Sulfametoxazol*	118	50	145	1,23	128	1,08	110	0,93
Tramadol	170 000 [#]	1000 [#]	390	0	225	0	255	0
Trimethoprim*	500	50	97,5	0,20	86	0,17	82	0,16
Venlafaxin	3220 [#]	1000 [#]	865	0,27	720	0,22	755	0,23
Zolpidem			6,15	-	4,45	-	4,85	-
* Enligt en ny studie (Hoyer et al. 2022)				<0,1		<0,1		<0,1
# - data från CWPharma				0,1-1		0,1-1		0,1-1
SSD = species sensitivity distribution, ingen säkerhetsfaktor				>1		>1		>1

För hormoner är det svårt att göra en bedömning då dagens begränsningar i analysmetoden dessvärre inte tillåter detektionsgränser till haltnivåer som ligger på samma haltnivåer som PNEC. Att använda effekttester kan utgöra ett bra alternativ. För denna rapport har det genomförts flest analyser med det östrogena effekttestet YES, och det kommer därför att utgöra grunden för riskbedömningen av östrogen effekt i föreliggande studie. Under 2021 har IVL tagit fram förslag till effekthalter för både akut och kronisk toxicitet i recipienter baserat på uppmätt YES-halt. Tabell 11 visar dessa halter tillsammans med medelhalter för inkommande och utgående avloppsvatten vid Getteröverket och i primärrecipienten (PP8) och Naturum (PP9). Som tidigare diskuterat så minskar den östrogena effekten kraftig över reningsverket och utgående medelhalt ligger under den bedömda nolleffektkoncentrationer (PNEC). Medelhalter i recipientproverna ligger dock över LOEC (akuttoxicitet).

Tabell 11. Effekt- och medelhalter i utgående vatten från Getteröverket (utan utspädning) samt i nedströms recipienter.

	Effekthalter		Medelhalter			
	LOEC	PNEC	PP2 ARV IN	PP5 ARV UT	PP8 Monarkdiket	PP9 Naturum
YES (ng E _{2ekv} /l)	1,4	0,3	10	0,1	1,0	0,9

3.1.3.3 Utifrån förslaget till reviderat avloppsdirektiv

Förslaget till reviderat avloppsdirektiv som lagts fram under hösten 2022 (EU Commission 2022a) inkluderar krav för läkemedelsrening vid avloppsreningsverk större än 100 000 pe (alt. 150 000 pe), och mindre anläggningar om det visas att ARV bidrar till negativ påverkan av recipienten. Med nuvarande storlek av Getteröverket, som är dimensionerat för ca 80 000 pe, är det däremot troligt att anläggningen vid framtida utbyggnader kommer att passera 100 000 pe och därmed eventuellt behöva införa en avancerad rening om avloppsdirektivet blir gällande enligt förslaget. Även utifrån recipientpåverkan framstår det som troligt att en avancerad rening kommer att behövas vid Getteröverket, även om anläggningen inte uppfyller storlekskriteriet.

Den kompletta listan för indikatorsubstanser som föreslås i avloppsdirektivet inkluderar amisulprid, karbamazepin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, hydrochlorothiazid, metoprolol och venlafaxin som kategori 1-substanser och benzotriazol, kandesartan, irbesartan och 4&6-methylbenzotriazol som kategori 2-substanser. Av dessa är det endast 4&6-methylbenzotriazol som enligt Tabell 3 och Tabell 4 renas bort med mer än 40 % i dagens reningsprocess. Alla andra substanser uppvisar antingen en svag reduktionen eller t.o.m. en negativ reduktion. Oavsett vilka indikatorsubstanser (minst 4 från kategori 1 och minst två från kategori 2) som tas i beaktande, kommer det att krävas en kompletterande avancerad rening vid Getteröverket för att uppfylla kravet på en medelreduktion för dessa substanser över anläggningen med 80 %.

3.1.3.4 Utifrån aktivitetstesterna

Utifrån utförda aktivitetstesterna på östrogenreceptorn (ER-aktivitet) kan aktiviteten i recipient jämföras mot ett effektbaserat riktvärde (EBT, effect-based trigger value) för ER-aktivitet i ytvatten på 0,4 ng E_{2ekv}/l som utvärderades och föreslogs i en nyligen genomförd studie (Kase et al., 2018), som överskreds i samtliga prov utom vid provpunkten PP7-A för provtagningen i april 2023.

3.1.4 Bedömning av bidragande källor

Utifrån uppmätta läkemedelshalter i recipientprover och lakvattnet från Bösarp deponi (Tabell 7) kan det konstateras att ett bidrag till läkemedelsbelastning på vattenmiljön inte finns. Att halter uppströms utsläppspunkten (PP6) är höga beror på det väldig låga flöde i Monarkdiket som innebär att utgående avloppsvatten utgör den dominerande påverkan till denna provpunkt, något som diskuterats tidigare. Även om dessa höga halter skulle härstamma från källor uppströms, så skulle bidraget i form av massflödet bli väldig lite ändå p.g.a. det låga befintliga flödet i diket. Det är således Getteröverket som bedöms som den enskilt största

källan till observerade läkemedelsrester i det vatten som passerar Naturum (PP9) ut till Inre Farehamnsviken. Ett liknande resonemang gäller generellt även för hormoner, även om dessa inte kunde rapporteras över detektionsgränsen i någon större utsträckning. Undantag gäller för etinylöstradiol som detekterades i Bösarps lakvatten och som ingick som en enda provpunkt i hela förstudien, och östron som detekterades i provpunkten från Lassabackadiket (PP7-B) vid ett tillfälle. Detta eftersom vattenflödet i PP7-B vid provtagningstillfället var väldigt lågt, och att det totala massbidraget således inte skulle bli signifikant.

För fenoler verkar lakvattnet från Bösarp inte heller bidra mycket till belastningen vid Getteröverket (Tabell 8). Det kan dock observeras att för de provpunkter som bedömts är det framför allt dräneringsvatten från industriområdet öster om järnvägen (PP7-A) och lakvatten från Lassabackadeponin (PP7-B), som uppvisar förhöjda halter av bisfenol A. På grund av ett väldigt lågt flöde vid dessa provpunkter kan det inte uteslutas att utgående vatten från Getteröverket, som också innehåller höga halter av bisfenol A, kan ha påverkat dessa provpunkter. Det observerades dock vid första provtagningen en mycket högre halt av bisfenol A vid Naturum, jämfört med halter för mätpunkterna vid utsläppspunkten (ange här vilka). Detta kan antyda att det finns en annan okänd bidragande källa för bisfenol A mellan utsläppspunkten och Naturum.

Avseende PFAS-halter så visar Tabell 8 de absolut högsta halterna för dessa ämnen i lakvattnet från Bösarp deponi (PP1-B), följt av provpunkterna kring industriområdet (PP7-A) och Lassabackadeponin (PP7-B). Även vid Naturum (PP9) kan höga PFAS-halter konstateras, vilket antyder att det även för PFAS finns ytterligare bidragande källor som till exempel dräneringsvatten från områden mellan Getteröverkets utsläppspunkt och Naturum.

Tabell 12 visar ett försök till kvantifiering av Bösarps lakvatten på PFAS-ämnen relativt belastningen in till Getteröverket. Det bör noteras att underlaget är begränsat till få mätpunkter, det är bland annat utsläpp av PFAS-ämnen från deponin som är begränsande (samtliga analysresultat finns i Bilaga 6.2). Det blir ändå tydligt att när massflöden beaktas så motsvarar dessa mindre än 5 % av det totala PFAS-bidraget till Getteröverket trots att PFAS-halterna i lakvattnet är mycket högre. Detta resultat illustrerar att en stor del av PFAS-belastningen kommer från andra källor och att en rening av PFAS vid Getteröverket kan vara motiverat. De mycket höga halterna i lakvatten från Bösarp deponi indikerar också att det sannolikt finns ett behov av en separat PFAS-rening vid deponin också.

Tabell 12. Bösarps bidrag till PFAS-belastningen relativt den totala belastningen vid Getteröverket.

	Flöde m ³ /v	PFOS g/vecka	PFAS11 g/vecka	∑PFOA _{ekv} PFAS11 g/vecka
Getteröverket IN	144 480	1,65	3,95	5,14
Bösarp deponi	533	0,02	0,20	0,14
Andel Bösarp/Getteröverket	0,37 %	1,26 %	5,14 %	2,81 %

3.2 Pilotförsök med kombinationen UF-GAK

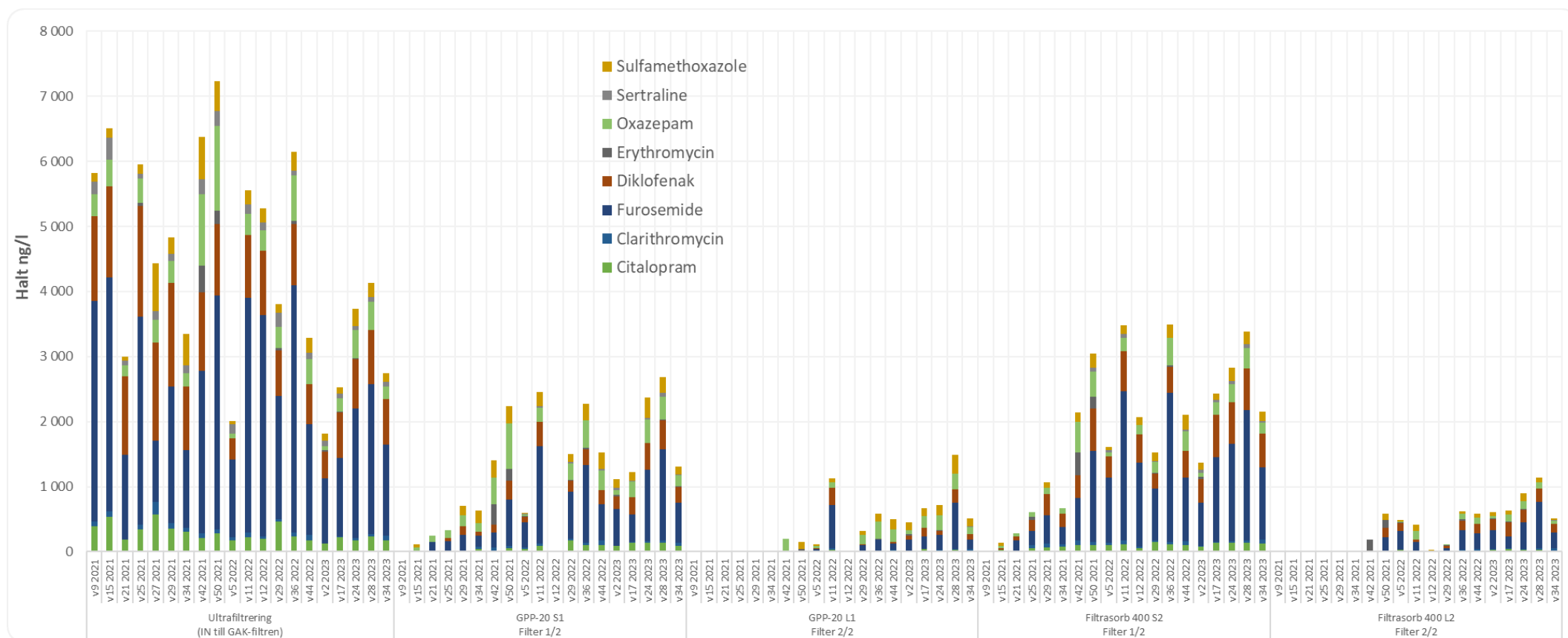
Nedan visas resultaten från pilotförsöken med teknikkombinationen ultrafiltrering och 2-steps aktivkolfilter mer olika adsorbenter.

3.2.1 Rening av läkemedelsrester

Figur 5 visar utgående halter för de mest prioriterade läkemedel efter UF och efter de olika GAK-filtren. S1 och L1 avser första respektive andra filtret i filterlinjen med reaktiverat GAK av typ GPP20. S2 och L2 avser första respektive andra filtret i filterlinjen med jungfrulig GAK av typ Filtrasorb 400. Variationer förekom både i vattnet in till GAK och ut efter GAK-filtren. Variationerna av halterna av respektive ämne in till piloten under de olika provtagningar observeras också för övriga provpunkter genom piloten, d.v.s. en högre halt i inkommande vatten, observeras också som en något högre halt ut från det första GAK-filtret när dessa halter jämförs med hur trenden ser ut för en provtagning som skett för en lägre halt in till piloten. Efter andra GAK-filtret i varje serie är planar dock variationerna ut, vilket beror på det andra GAK-filtret avskiljer ämnet till en hög grad. En tydlig ökning av halter efter GAK-filtren över tid kan observeras till exempel för furosemid, medan halter för andra läkemedel inte visar samma tydliga ökande trend. Avseende furosemid representerar det ett ämne som adsorberas något sämre av GAK relativt de andra ämnena i Figur 5. Att det förekommer en högre halt kan eventuellt förklaras med att furosemid har desorberat från GAK-filtret. De lägre halterna som uppträder efter de olika GAK-filtren vid sista provtagningen (v34, 2023) jämfört med vid näst sista provtagningen, kan förklaras med att det då förekommit lägre halter in till GAK-filtren. Dock kan det observeras att inkommande halter under denna provomgång låg i samma storleksordning som vid provtagningen v17, 2023. Båda halterna efter respektive GAK-filter låg däremot på en lägre nivå v34 jämfört med för v17 2023. Detta trots att ca 7 000 – 10 000 extra bäddvolym avloppsvatten har behandlats i de olika filtren v34 jämfört med v17 2023.

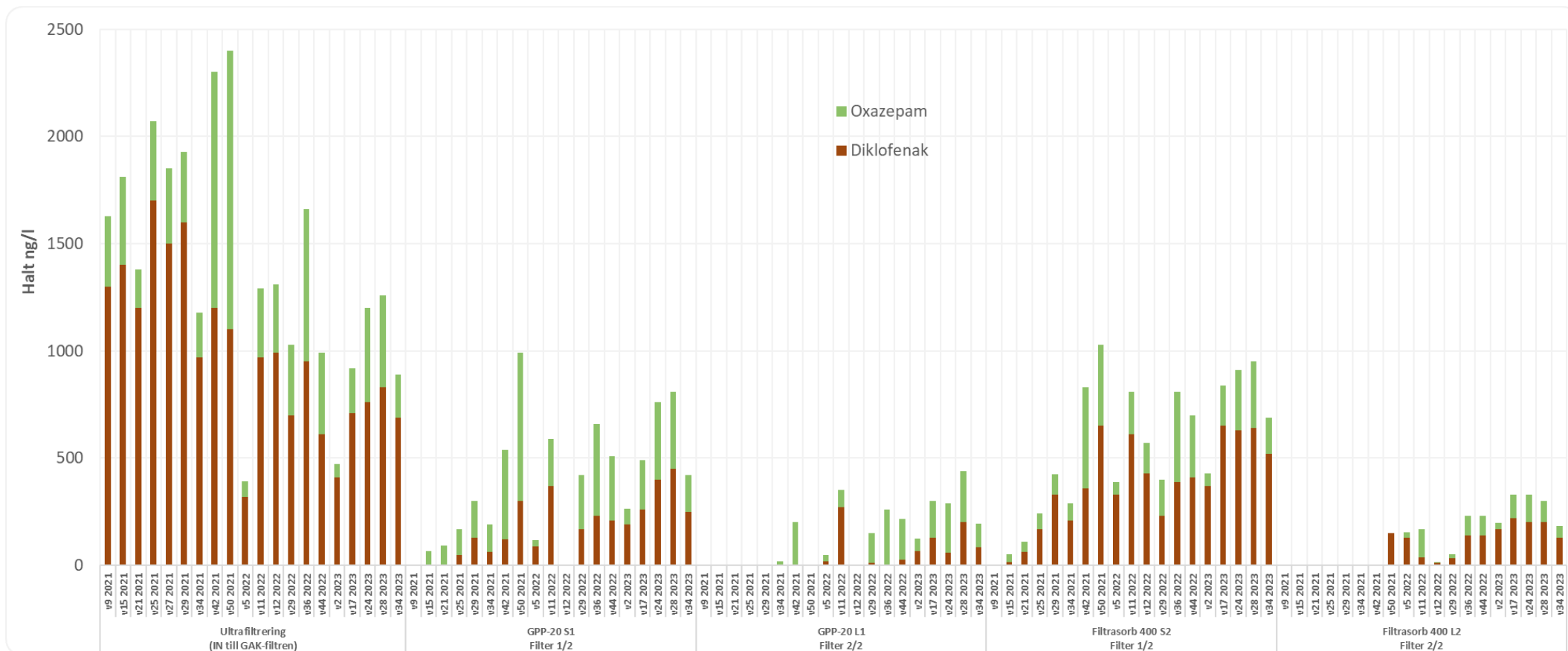
Figur 6 visar motsvarande figurer för endast diklofenak och oxazepam som har identifierats som två styrande substanser för den avancerade reningen eftersom dessa substanser utgör en risk för recipienten vid jämförelse med beräknade riskkvoter (Tabell 10). Dessa två ämnen utgör exempel på några ämnen av flera som är svåra att avlägsna i den avancerade reningen med GAK-filter. Det framgår från figuren att utgående halter efter andra GAK-filtret verkar ha stabiliserats i båda pilotlinjerna trots att det förekom höga halter av dessa substanser in till pilotprocessen. Samma stabilisering observeras också efter första GAK-filtret för de fyra näst sista provtagningarna. Även här kan lägre halter vid sista provtagning (v34 2023) observeras.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



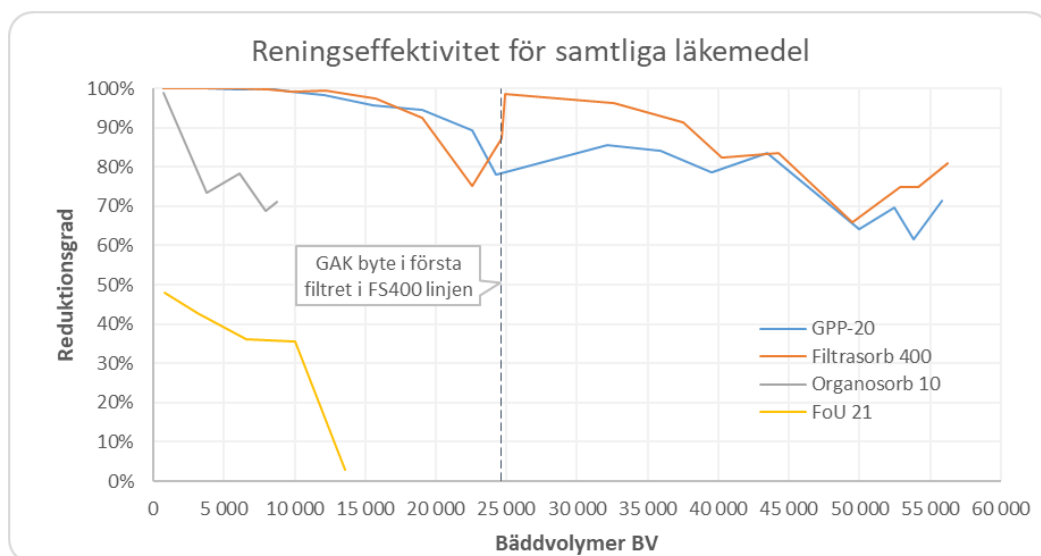
Figur 5. Halter av läkemedel efter UF och efter undersökta GAK-filter (två stycken i serie) vid olika provtagningar.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 6. Halter av oxazepam och diklofenak efter UF och efter undersökta GAK-filtren (två stycken i serie) vid olika provtagningar.

Figur 7 visar motsvarande reningseffektivitet för samtliga analyserade läkemedel för de samtliga undersökta GAK-typer. För samtliga undersökta läkemedel ligger både GPP20 och FS400 på samma reningsgrad på ca 65 – 70 % vid >50 000 behandlade bäddvolymerna för hela filterlinjen. Vid sista provtagningen v34, 2023, låg reduktionsgraden i medel över >70 % för båda pilotlinjerna med GAK och när 24 läkemedel ingick (se Tabell 1). Mot bakgrund av detta bör det poängteras att denna reduktion framför allt avser de 16 svårnedbrytbara läkemedel¹ som inte tas bort i dagens reningsprocess vid Getteröverket. För pilotlinjen med FS400 kan en tydlig ökning av reduktionsgraden observeras efter byte av filtermaterialet i första GAK-filtret, och byte av filterföljd, vilket är markerat i Figur 7. Reningseffekten minskar dock snabbare än för pilotlinjen med GPP20, för att sedan hamna på samma nivå redan efter ca 15 000 behandlade BV för hela filterlinjen efter filterbytet. Även om den aktuella reningseffektiviteten vid de senaste provtagningarna låg under ett tänkbart reningsmål på 80 % reduktion, så ligger den genomsnittliga reduktionen över hela driftperioden avsevärt högre än 80 % för både GPP-20 och Filtrasorb 400. Medelreduktionen kan anses som relevant om flera GAK-filter drivs parallellt i en fullskalanläggning och en sämre reduktion per tidsenhet i ett filterpar därmed kan kompenseras genom en bättre reduktion per tidsenhet i ett annat filterpar. Detta förutsätter dock olika tidpunkter för driftstart av de parallella filterparen.



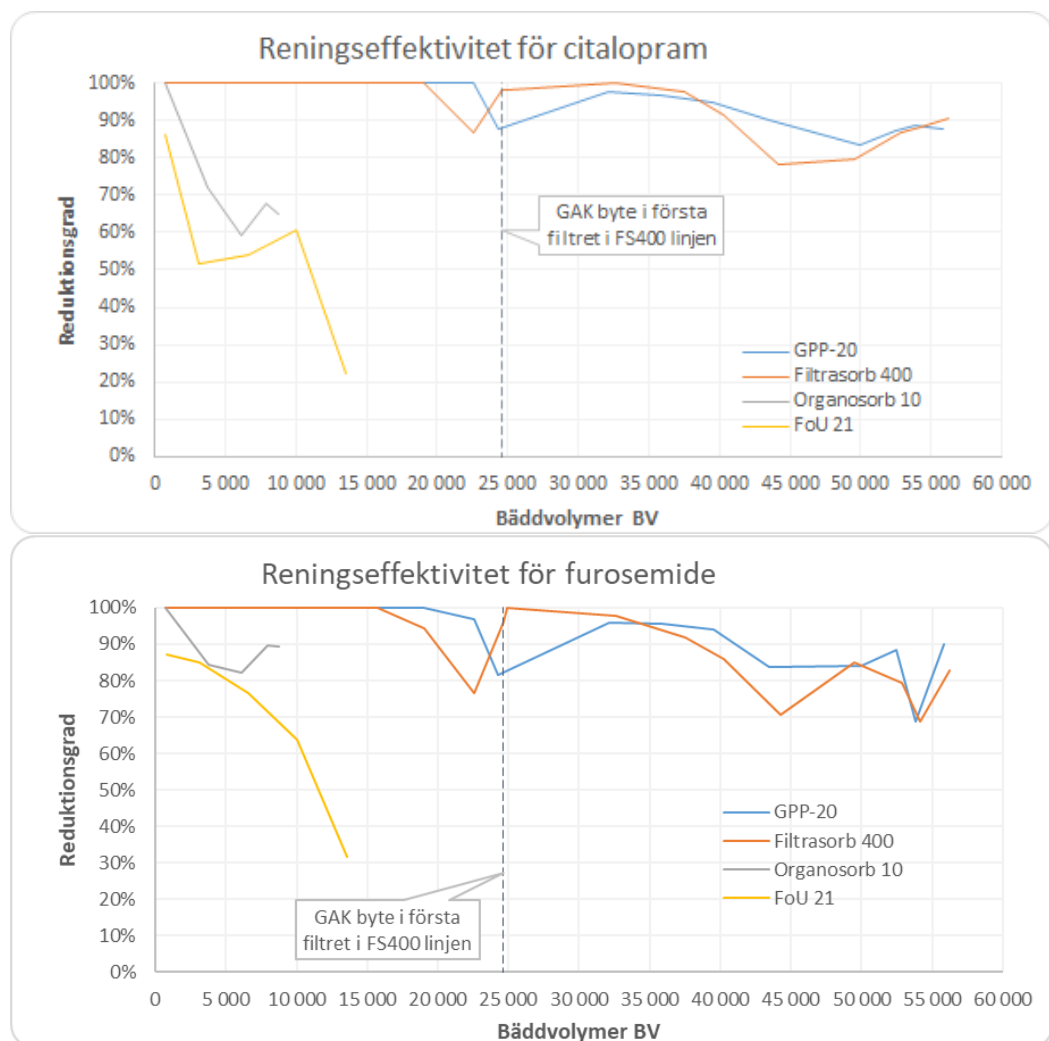
Figur 7. Reningseffektivitet för samtliga analyserade läkemedel för de olika GAK-typer.

¹ Svårnedbrytbara läkemedelssubstanter inkluderar atenolol, karbamazepin, ciprofloxacin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, flukonazol, furosemid, losartan, metoprolol, oxazepam, propranolol, sulfamethoxazol, tramadol, trimethoprim och venlafaxin.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

För de två andra testade GAK-typerna, Organosorb 10 och FoU 21, visar figuren att reningseffekten avtar redan efter ett lågt antal behandlade bäddvolymter och för det slambaserade kolet uppnås aldrig en reningseffekt över 50 %.

För de i påverkansanalysen utpekade två fokussubstanserna citalopram och furosemid är reningseffekten med ca 80 - 90 % vid senaste provtagningar något bättre än reduktionen för summan av samtliga läkemedelsrester som visas i Figur 8. Både FS400 och GPP20 indikerar liknande reningseffekter trots att det skedde ett byte av filtermaterial i första FS400-filtret efter 25 000 BV för hela filterserien (vilket motsvarar 50 000 BV i filtret som kolet bytes i). För Organosorb 10 och FoU 21 minskar den initialt höga reningseffekten snabbt. Organosorb 10 visade dock en reningseffekt på >80 % för citalopram tills det att filtret togs ur drift vid ca 8000 behandlade BV.

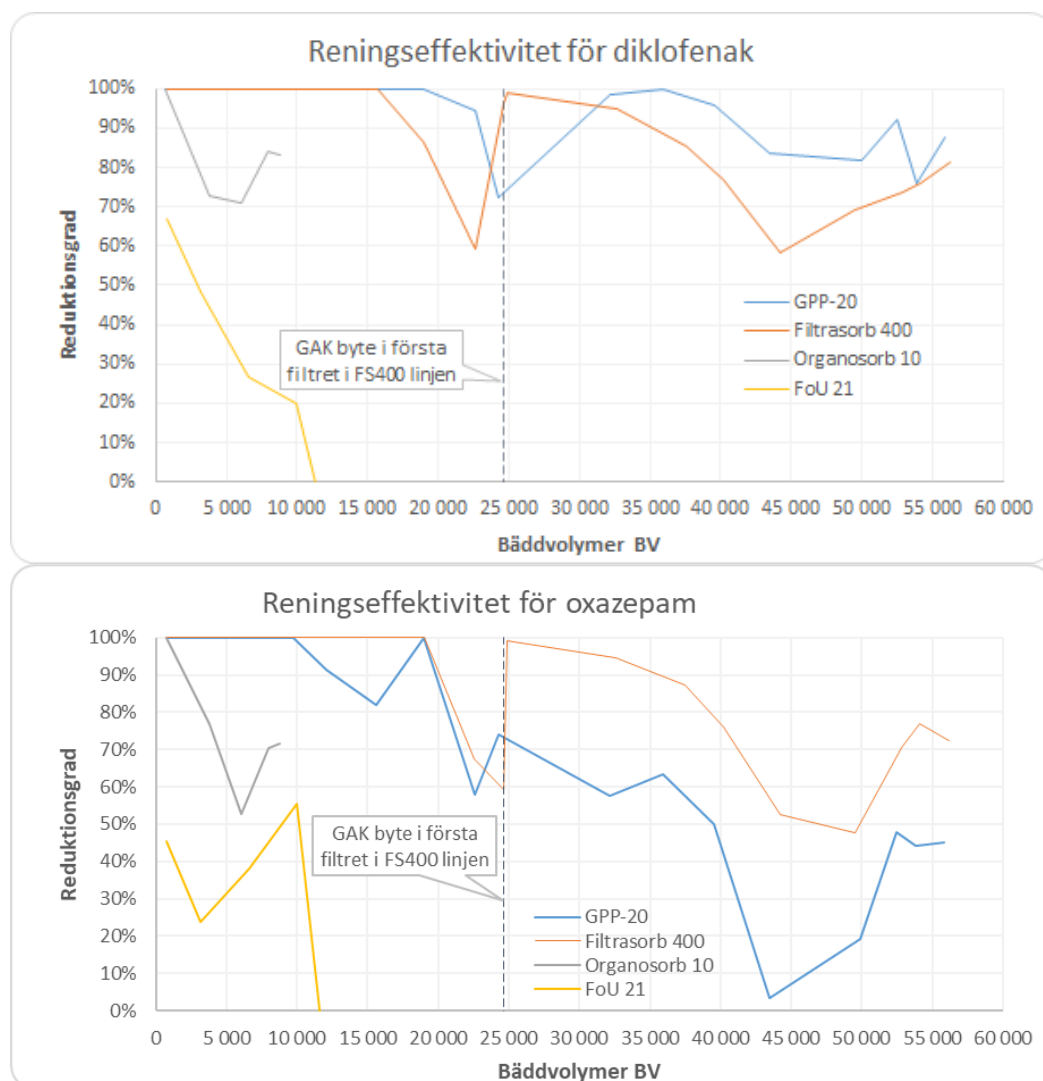


Figur 8. Renings effektivitet för Citalopram (övre figur) och furosemid (undre figur).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

För sertralin är reningseffekten i linjerna med FS400 och GPP20 fortfarande >90 % (figuren visas inte). Även Organosorb 10 hade en reningseffekt på närmare 100 % för sertralin fram tills det att filtret stänges av. För FoU 21 minskade reningseffekten snabbt från 100 % till 20 % när filtret stänges av vid ca 13 000 behandlade bäddvolymmer.

Även för diklofenak indikerar Figur 9 en reningsnivå som fortfarande ligger på >70 % för GPP20 och FS400. Trots filterbyte i F400-linjen vid ca 25 000 BV, låg reningseffektiviteten för det mesta under reningseffektiviteten i GPP20-filtret. För oxazepam är reningseffekten tvärtom och här presterar alltså FS400 bättre. För GPP20 finns en måttlig reningseffekt kvar vid sista provtagningen medan det efter GAK-byte i Filtrasorb-linjen ligger på >70 % (Figur 9). Detta illustrerar hur viktig själva definition av reningsmålet och fokussubstanser är för bedömningen av behovet för filterbyte.

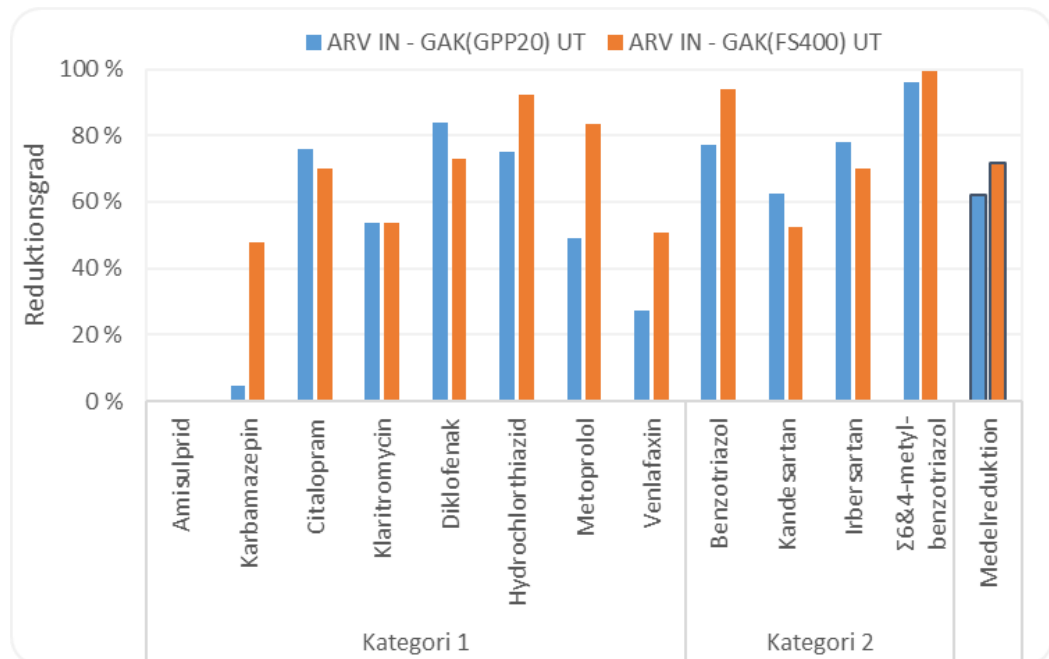


Figur 9. Renings effektivitet för diklofenak (övre figur) och oxazepam (undre figur).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

För Organosorb 10 minskar den initialt höga reningseffekten snabbt för diklofenak och ännu snabbare för oxazepam. FoU 21 hade endast en måttlig reningseffekt för diklofenak som dessutom vid 10 000 BV hade fallit ned till 0 %. För oxazepam är reningseffekten i FoU 21-filtret mer oklart, men reningsgraden översteg aldrig 55 % (Figur 9).

Figur 10 visar reningseffektiviteten från inkommande till Getteröverket till utgående efter de två GAK-filterlinjerna för samtliga substanser i kategori 1 (K1; amisulprid, karbamazepin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, hydrochlorothiazid, metoprolol och venlafaxin) och kategori 2 (K2; benzotriazol, kandesartan, irbesartan och 4&6-methylbenzotriazol), enligt förslag för det reviderade avloppsdirektivet. Enligt förslaget krävs en medelreduktion på $\geq 80\%$ baserat på en reduktion av minst 4 substanser från K1 och 2 från K2. Det bör noteras att många av dessa substanser endast kunde analyseras i samtliga dessa provpunkter vid sista stora provtagningskampanj och reningseffekten återspeglar således statusen efter att mer än 50 000 BV per filterlinje (som är ca 250 % av traditionell GAK-filterdesign) har behandlats i båda GAK-linjerna.



Figur 10. Reningseffektivitet för analyserade ämnen från Kategori 1 och 2 enligt förslag för reviderat avloppsdirektiv.

Som figuren visar så varierar reduktionen för de olika substanserna och för respektive GAK-typ. Amisulprid är inte tillgängligt som läkemedel i Sverige och återfinns därför inte i avloppsvattnet. Medelreduktion för samtliga substanser ligger på 62 och 72 % för GPP-20 respektive FS400-pilotlinjen, vilket indikerar ett något bättre reningseffekt för GAK-linjen där ett filterbyte har genomförts. Väljs endast citalopram, diklofenak, hydrochlorothiazid och metoprolol som K1-substanser och benzotriazol och 4&6-methylbenzotriazol som K2-substanser enligt

direktivförslaget så ökar medelreduktion till 76 och 85 % för GPP20- respektive FS400-pilotlinjen. En så bra medelreduktion efter 50 000 BV kan anses som mycket bra, både med tanke på att det förekommer en delvis kraftig negativ reduktion av flera av dessa läkemedel i huvudreningen, och att reduktion före den aktuella provtagningen kan antas vara avsevärt högre. Reningskrav enligt direktivförslaget bedöms således kunna uppfyllas med den testade pilotuppsättningen. Ett kolbyte skulle dessutom ännu inte behövas i GPP20-pilotlinjen även om reduktionsgraden vid sista provtagningen låg under 80 % eftersom flera parallella GAK-filterpar som befinner sig i olika driftsfaser skulle köras i en fullskaleanläggning. En lägre reningseffekt i ett av filterpaaren skulle därmed kompenseras genom en bättre reningseffekt i ett annat filterpar som behandlat ett mindre antal bäddvolymer.

3.2.2 Rening av PFAS

Figur 11 visar halter för PFOS och PFOA över pilotlinjerna och efter respektive GAK-filter. Övergripande indikerar resultaten att PFOS-halten under v36, 2023, avvek extremt från övriga halter som mättes under testperioden. Att detta observerades för båda pilotlinjerna indikerar en kraftigt avvikande PFOS-halt i inkommande avloppsvatten till piloten. Eftersom prover från lakvatten eller inkommande avloppsvatten till Getteröverket saknas för denna omgång, kunde en konkret orsak till dessa förhöjda halter inte identifieras. Som jämförelse så ligger gränsvärde för PFOS i inlandsvatten enligt HVMFS 2019:25 på 0,65 ng/l.

Figur 12 visar summan av samtliga analyserade PFAS (Σ PFAS11) och summan uttryckt som PFOA-ekvivalenter baserat på de elva PFAS som ingår i PFAS11 (Σ PFOA_{ekv(PFAS11)}) och som utgör största delen av de föreslagna PFAS24 i nya EQS-direktivet (EU Commission 2022b). Avseende PFAS24 föreslås ett gränsvärde (MKN) på Σ PFOA_{ekv(PFAS24)} på 4,4 ng/l för inlandsvatten, vilket Inre Farehammarsviken klassas som. Det kan observeras att summan PFOA-ekvivalenter kan vara högre än summan PFAS11, och att prover från v36 sticker ut även här.

Halttrender för både PFOS, PFOA, Σ PFAS11 och Σ PFOA_{ekv(PFAS11)} efter GAK-filtren följer inkommande halttrender analyserat efter ultrafiltreringen (Figur 11 och Figur 12). Endast initialt under det första halva året (v9 – v34, 2021) kan en kontinuerlig ökning av PFAS-halterna observeras, här redovisat som PFOS och PFOA (Figur 11) respektive Σ PFAS11 och Σ PFOA_{ekv(PFAS11)} (Figur 12) observeras. Efter v34, 2021 varierar halterna i högre grad och i samma omfattning som inkommande halter. Detta kan troligtvis vara en indikation på att den initiala sorptionskapaciteten av filtren för olika PFAS-ämnen har förbrukats efter denna tid som motsvarar ca sex månader i drift.

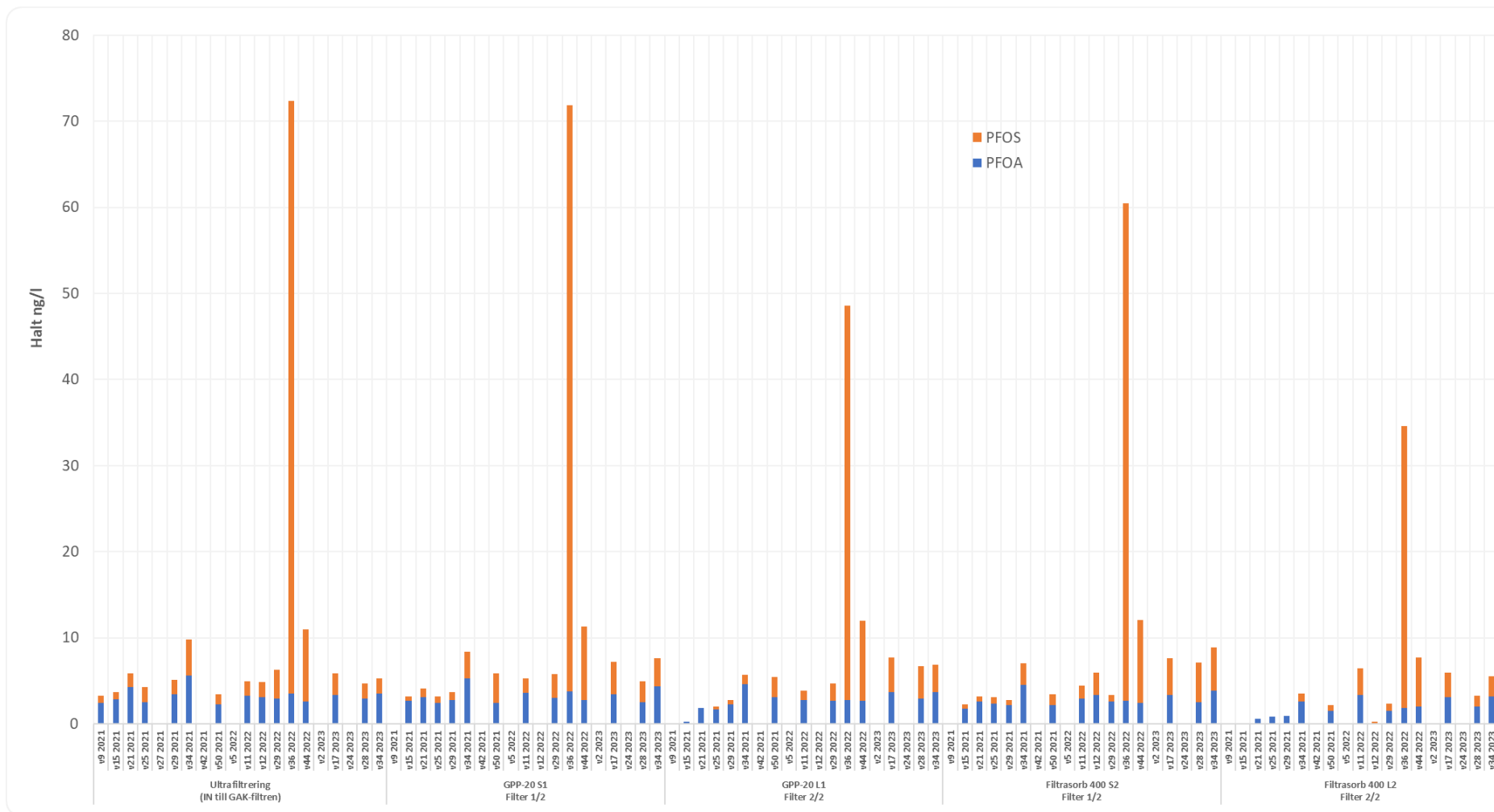
Utvärderas de två GAK-pilotlinjerna avseende reningseffektiviteten för PFAS kan det observeras att PFOS renas bort mest jämfört med PFOA och Σ PFAS11. Det kan också observeras att en generell bättre reningseffekt uppnås för FS400 än för GPP20, åtminstone upp till 20 000 behandlade BV (Figur 13). Denna bedömning

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

kvarstår även om provtagningen v50, 2021 exkluderas för GPP20, då den avviker avsevärt från trenden i övrigt. Efter 20 000 BV för FS400 och 15 000 BV för GPP20 kan även en negativ reduktion för olika PFAS över GAK-pilotlinjen konstateras (Figur 13). Rent praktiskt innebär det att tidigare adsorberade PFAS-ämnen desorberar (släpper) från GAK-filtret. För GPP20 sker detta dock inte förrän vid ca 40 000 behandlade BV för hela pilotlinjen (alltså ca 80 000 BV per filter) och om provtagningen v50, 2021 inte tas med i beaktandet. För GPP20 sker det en kraftig negativ reduktion för PFOS efter 40 000 BV. Detta resultat är viktigt för en framtida implementering och drift av GAK-filter och antyder att PFOS har släppt från filterytan. Detta innebär i så fall att nyttan med tidigare PFOS-reduktion i filtret kan omintetgöras om denna negativa reduktion kvarstår över tid.

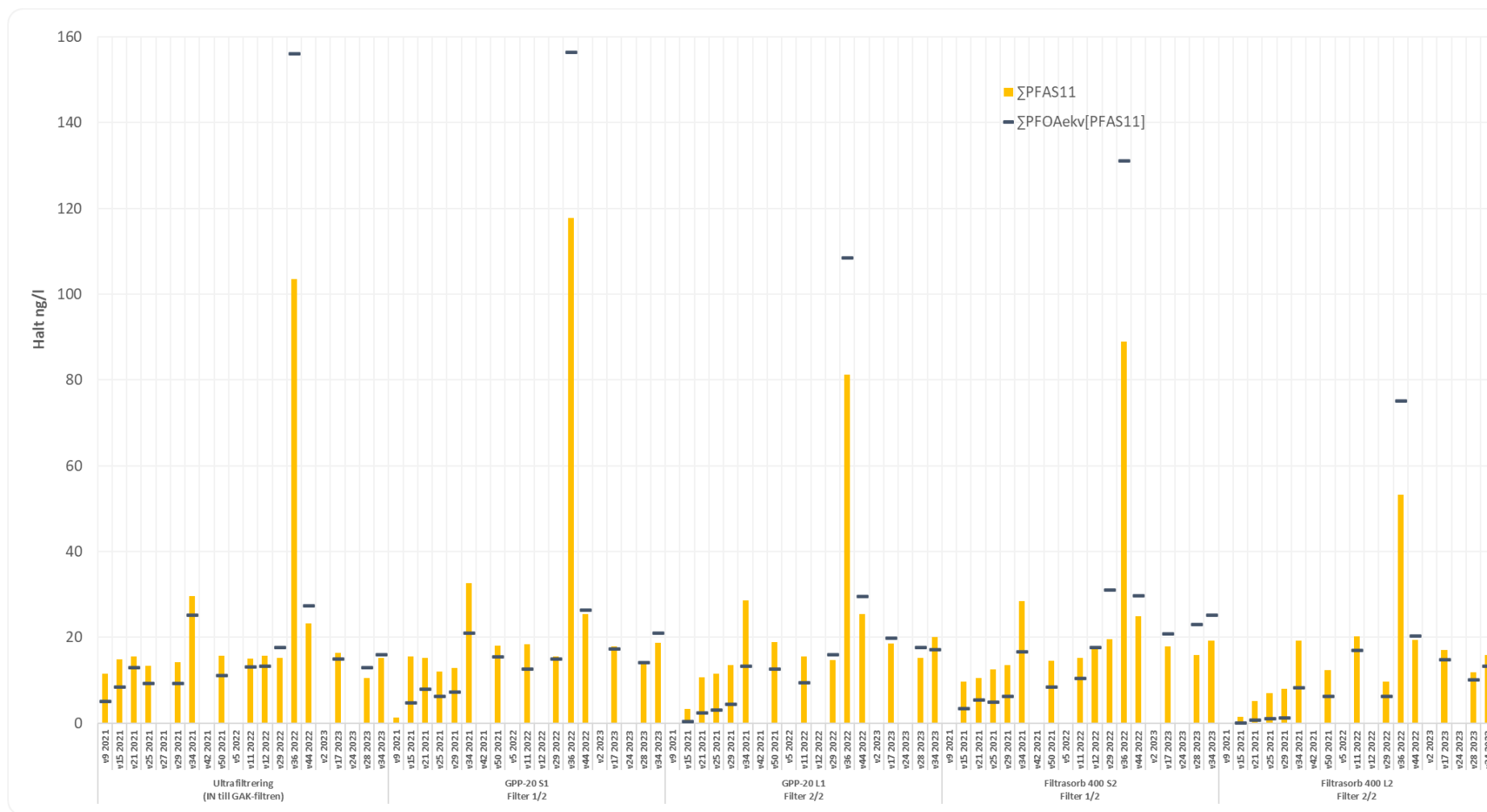
Som förväntat återställs reningseffekten för hela FS400-pilotlinjen vid byte av filtermaterialet i första filtret. Reningseffekten avtar dock på samma sätt som vid uppstart av GAK-piloten, d.v.s. direkt efter filterbytet. Detta kan förklaras med att det andra filtret i serien placeras som det första filtret efter filterbytet. Detta filter hade därmed redan behandlat ca 50 000 BV vid filterbytet. Reningskapaciteten för PFAS har således delvis redan förbrukats för detta filter.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



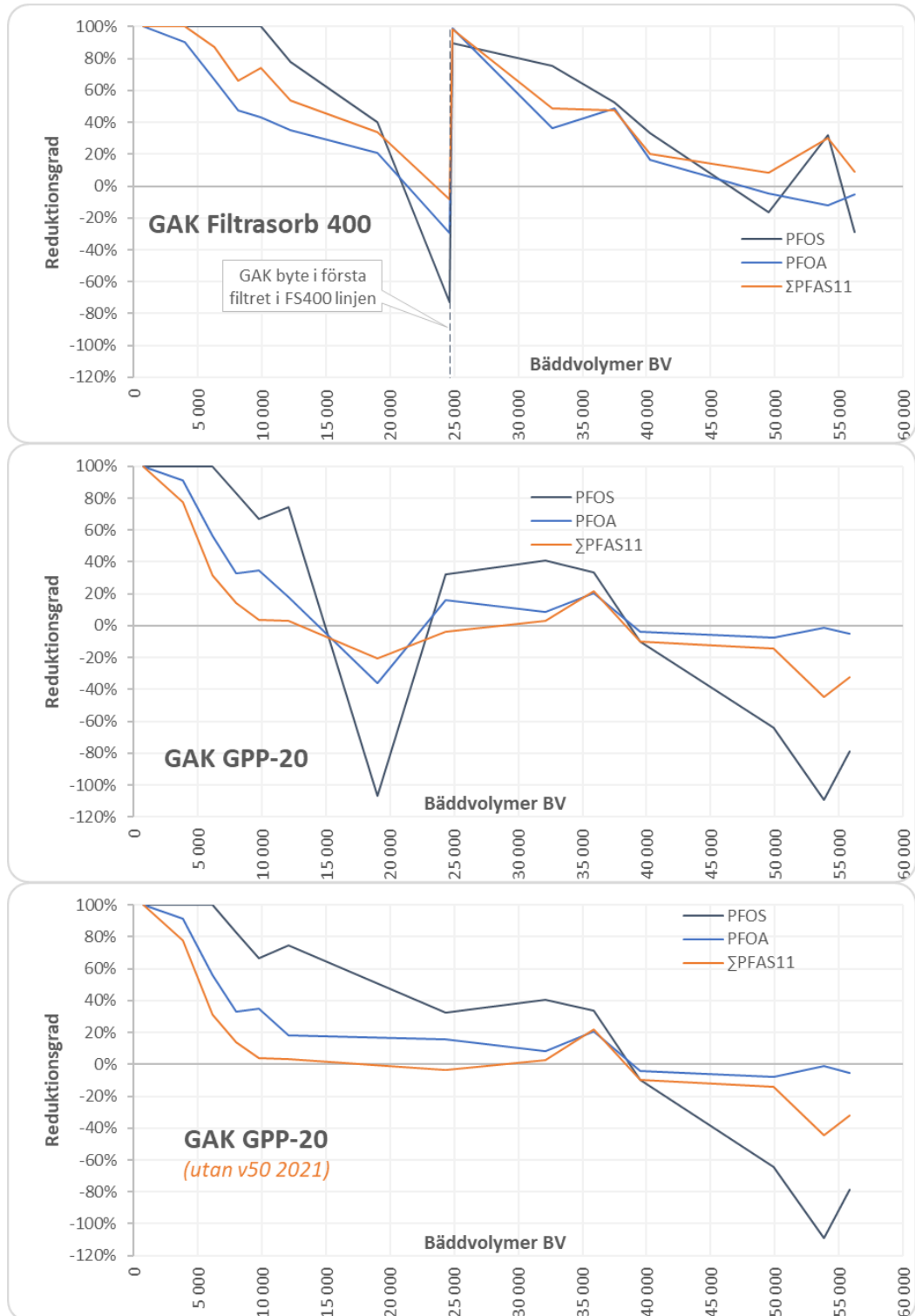
Figur 11. Halter av PFOS och PFOA före och efter de olika kolfilter vid olika provtagningar.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



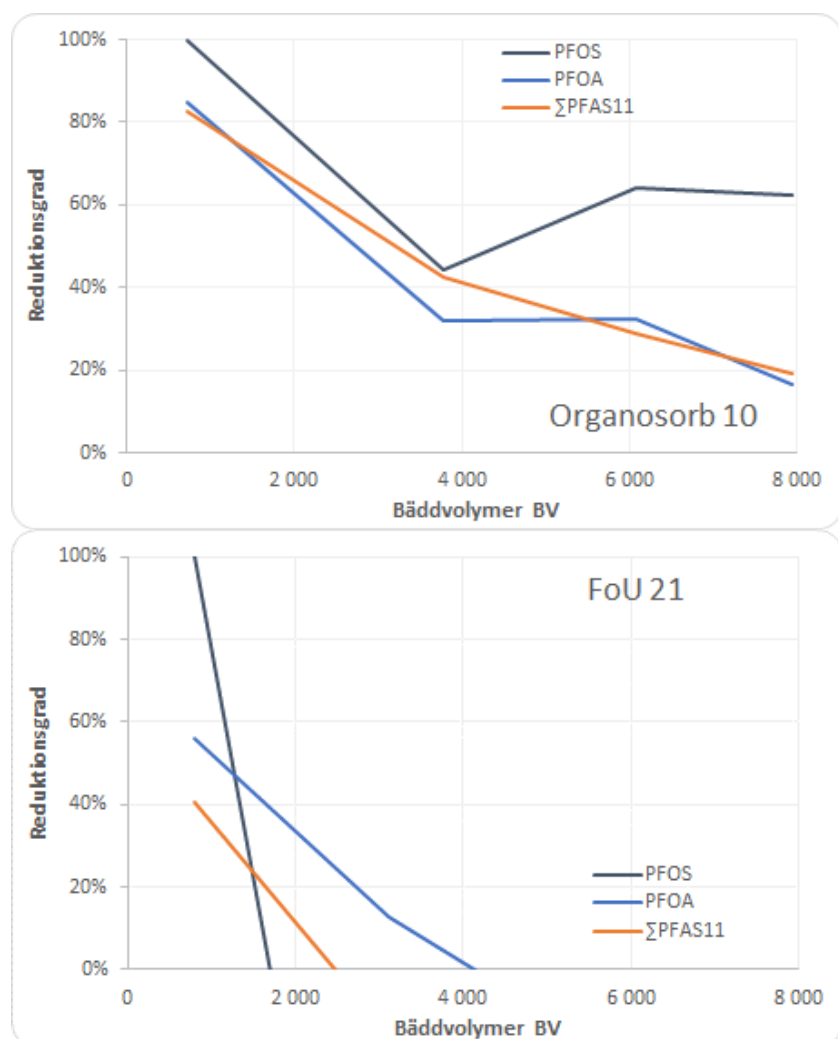
Figur 12. Halter av ΣPFAS11 och ΣPFOA-ekvivalenter för de analyserades PFAS före och efter de olika kolfilter vid olika provtagningar.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 13. Reningseffekt över hela filterlinjen för PFAS11, PFOS och PFOA för FS400 och GPP-20 med och utan v50 prov.

Figur 14 visar motsvarande reningsgrad för Σ PFAS11, PFOS och PFOA för Organosorb 10 och FoU 21 pilotlinjerna. Det kan observeras att Organosorb 10 renar bort Σ PFAS11, PFOS och PFOA under hela driftperioden fram till avslut av testerna. Det slambaserade GAK-materialet åstadkommer däremot endast en liten reduktion av samtliga undersökta PFAS-ämnen, vilket visas som kraftigt minskade halter ned till en kraftigt negativ reduktion fram till slutet av testperioden.



Figur 14. Reningseffekt för PFAS11, PFOS och PFOA för Organosorb 10 och FoU 21 pilotlinjer.

3.2.3 Rening av hormoner och östrogena effekter (YES)

Samtliga hormoner som analyserades renades bort till under detektionsgränsen redan i den befintliga processen vid Getteröverket (se Tabell 3). Endast östron (E1) och östradiol (E2) kunde kvantifieras i inkommande avloppsvatten.

De östrogena effekterna (YES) som tydlig kunde kvantifieras i inkommande avloppsvatten till Getteröverket renades effektivt bort till under kvantifieringsgränsen redan i Getteröverkets reningsprocess (Tabell 5).

3.2.4 Rening av andra föroreningar

Analyserna av totalkväve, nitrat, ammonium, fosfat och totalfosfor gjordes regelbundet för att undersöka teknikkombinationens belastning och eventuell reningseffekt på dessa parametrar. Analysresultaten redovisas inte i rapporten men nedan ges en kort redovisning och diskussion av resultaten. TOC, UVabs 254, turbiditet och färg mättes vart 5:e minut med hjälp av en online sensor (I:SCAN).

Analyserade halter för totalkväve, nitrat och ammonium låg på jämförbara nivåer i de olika provpunkter (IN-UF-GAK1/2-GAK2/2) under hela försöksperioden, med små undantag som kan relateras till noggrannheten i analysmetoden. Haltvariationer mellan olika provtagningstillfällen kunde direkt relateras till variationer i inkommande halter till pilotanläggningarna.

Fosforanalyserna visade att samtliga fosforfraktioner reducerades i UF-pilotanläggningen och därefter kunde inga halter kvantifieras i de efterföljande GAK-filtren.

TOC-reduktionen som kunde observeras i första och även efter andra GAK-filtret, minskade successivt för båda GAK-materialen med ökande antal BV. Medan TOC-reduktionen i början på försöksperioden (BV <10 000) låg över 1,0 mg/l för samtliga prover, så var reduktionen svår att se vid ett högre antal BV.

Efter filtermaterialbyte i första filtret av GAK-filterlinjen FS400 kunde igen kunde en bättre reduktion i denna GAK-linje observeras, något som var förväntat sett till ett omättat GAK-filter exponerades för avloppsvattnet. Att TOC-reduktionen avstannar relativt snabbt gör att parametern inte ansågs lämplig som uppföljningsparameter för mättnadsgraden av GAK-filtren för mikroforeningar.

I likhet med TOC-reduktionen minskade reduktionerna på UV-abs vid 254 nm med ökande BV. Till skillnad från TOC, var den nedåtgående reduktionstrend för UV-abs dock mindre utpräglad. Efter ca 20 000 BV låg reduktionen över båda filterlinjer på låga nivåer (under 2,0) för att sedan fortsätta neråt till noll. Därmed bedömdes UV-abs vid 254 nm inte heller kunna användas som uppföljningsparametrar för mättnadsgraden av GAK-filtren för mikroforeningar.

Uppföljning av färgreduktionen (färg vid 455 nm) i GAK-kolonnerna visade på hög reduktionsspridning mellan provtillfällena med ostabil och svårtolkad trend redan vid låga BV (<10 000). Efter ca 10 000 BV kunde t.o.m. negativa reduktioner observeras vid flertal provtillfällen. Därmed kunde inte parametern användas som uppföljningsparameter.

3.2.5 Resultat från aktivitetstester

Östrogen aktivitet (ER) uppmättes i samtliga inkommande prov till UF-anläggningen som bestod av utgående renat avloppsvatten från Getteröverket som filterats genom ett mikrofilter på 10 µm innan UF. Reningsgraden över ultramembranfiltrering varierade från -44 till 50 %. Enligt ER-aktivitetstesterna har det därefter skett en mycket varierande reduktion från -300 till 91 % över det första GAK-filtret i serie. Efter det andra filtersteget rapporterades en positiv reningseffekt. Att en negativ reduktion av den östrogena effekten sker över ultrafiltreringen eller GAK-filtren är svårt att förklara. Det bör noteras att motsvarande YES-tester inte kunde kvantifiera någon östrogen effekt i någon provpunkt i piloten, även om kvantifieringsgränsen låg på 0,02 ng E2_{ekv}/l, alltså lägre än de halter som ER-aktivitetstesten rapporterat.

Androgen aktivitet (AR) uppmättes endast i låga halter vid provtagningen 23/03/2023. Halterna i samtliga provpunkter låg i jämförbara haltområden och någon utvärdering av en eventuell reningseffekt ges därför inte.

Halter och reningseffektiviteten för AhR-aktivitet och oxidativ stress (Nrf2-aktivitet) är också svårtolkat, då halter och reningseffekt varierar mellan en kraftig negativ och positiv reduktion både för samma provpunkt och provtagningstillfällen. Variationer mellan positiv och negativ reduktion och då det inte finns någon bedömningsgrund att förhålla sig till reningsresultaten svåra att diskutera i en praktisk kontext. Holm och Önnby (2022) rapporterade tidigare en bra reduktion av dessa end-points och över GAK-filtrering. Dessa resultat var dock baserade på två provtagningar, vilket gör att långtgående slutsatser blir svåra att dra från den studien.

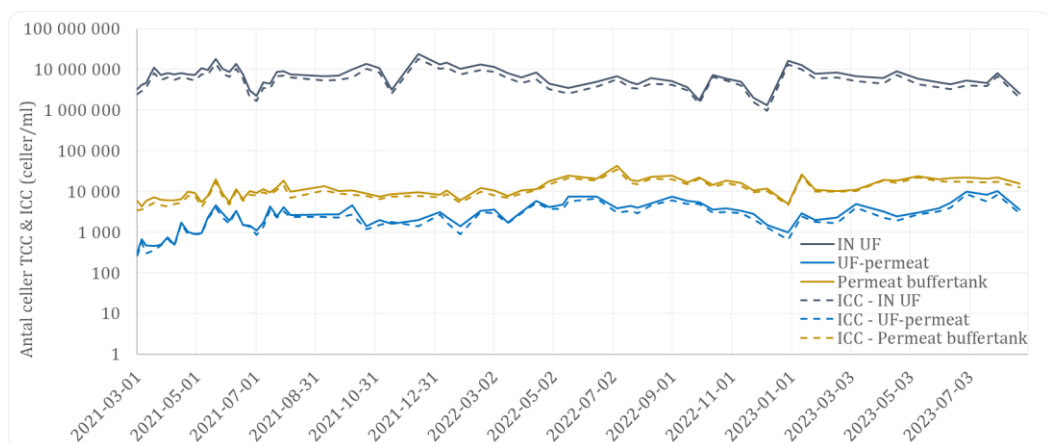
Samtliga resultat för alla aktivitetstester visas i bilagan.

3.2.6 Flödescytometri (FCM)

Flödescytometri används för att mäta totalt antal bakterier men det finns även möjlighet att identifiera olika bakterier genom infärgning (t.ex. totalantalet intakta bakterier (ICC - intact cell count) och totalt cellantal (TCC - total cell count)). Analysmetoden kan ge mer information om bakterier och kan ske mycket snabbare än vanliga metoder för kvantifiering av bakterier som baseras på odlingsplattor. Flödescytometrin visar att UF-anläggningen uppnådde en kraftig reduktion av totalantalet celler (TCC) från runt 7 800 000 ± 3 310 000 celler/ml i matarvattnet till runt 1 900 ± 1 300 celler/ml i permeatet (Figur 15). Detta motsvarar en log 4 reduktion över UF-steget. Mätningen av matarvattnet krävde en fem gånger utspädning av proverna med destillerat vatten innan analysen p.g.a. de stora bakteriehalter som ligger över mätgränsen för instrumentet (5 × 10⁶ celler/ml). Detta och möjliga bildningar av bakterieflockar tros förklara de stora mätvariationerna. Det noterades även en bakteriell tillväxt i form av biofilm på väggar och slangar, mellan provtagningsspunkten för permeatet och

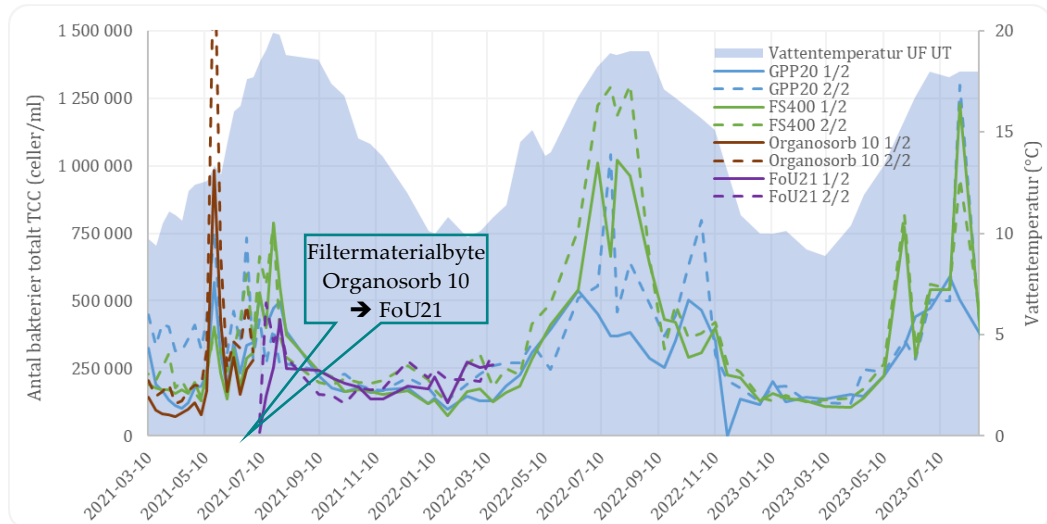
FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

bufferttanken. Denna tank visade ett TCC på $9\,204 \pm 3\,700$ celler/ml, vilket innebär mycket högre bakteriehalter än direkt efter UF-steget. Trenderna i bufferttanken följer trenderna i permeatet med en ökning under sommaren som kan kopplas till en ökad vattentemperatur. Dessutom syns en konstant ökning av TCC i permeatet och bufferttanken under hela mätperioden som kan förklaras med mikrobiologisk tillväxt i ledningarna.



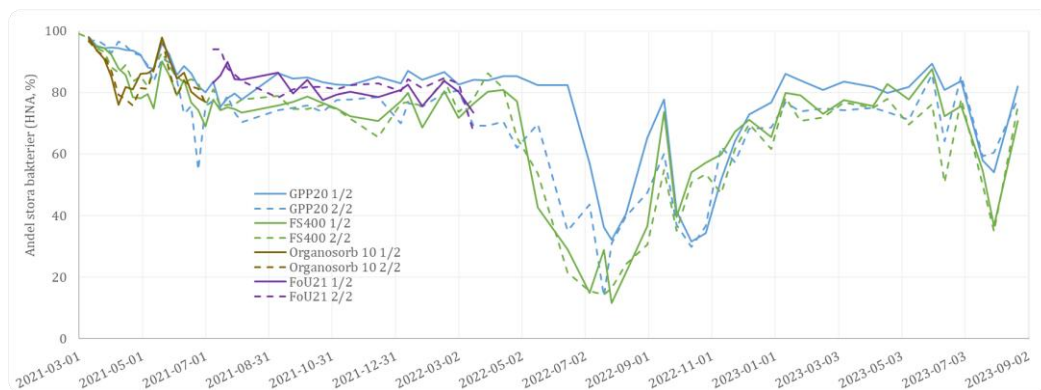
Figur 15. Utveckling av TCC och ICC för matarvatten till UF, UF-permeat och i bufferttanken (OBS: log-skala).

Undersökningen av GAK-filtren visade liknande resultat avseende bakterier för de olika pilotlinjerna med GPP20, FS400 och Organosorb 10. De första veckorna låg TCC i alla tre filterlinjer stabilt på samma nivå med värden på ca $135\,000 \pm 40\,000$ celler/ml för första filtret i serien och $240\,000 \pm 95\,000$ celler/ml för det andra filtersteg (Figur 16). Under sommarperioden 2021 noterades en ökning av TCC i alla linjer som kan kopplas till den ökade vattentemperaturen. Dessa trender syntes också under sommaren 2022 och sommaren 2023. I början av juli 2021 byttes filtermaterialet i den tredje linjen Organosorb 10 ut mot det slambaserade kolet FoU21. Nivåerna för TCC i kolumnerna var väldigt låga direkt efter bytet, för att sedan öka kraftigt och därefter stabiliseras på liknande nivåer som de andra två GAK-filtren. Ökningar av TCC som observerades i samtliga linjer kunde tydligt sammankopplas med vattentemperaturen som konstaterades ha en mycket större påverkan på bakterieantalet än antal bäddvolymer. Det observeras också att filter 2 i båda GAK-linjerna har högre utgående halter relativt filter 1, vilket är en effekt av att detta filter följer efter det första och att bakteriehalter därmed passerar båda filter (Figur 16).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten


Figur 16. Utveckling av TCC över de olika GAK-filtren i varje filterlinje över tid samt vattentemperaturen in till GAK-filterlinjerna.

I början av undersökningsperioden förekom, med runt $97 \pm 1\%$, främst stora bakterier med hög DNA-halt i vattnet (high nucleic acid bacteria = HNA). Över tid började andelen HNA-bakterier sjunka i alla GAK-filtrer (Figur 17). Även om minskningen förekom i alla filterlinjer så konstaterades stora skillnader mellan olika linjer med andelen HNA bakterier. Linje 1 (GPP20) med $94 \% \pm 1 \%$, Linje 2 (FS400) med $87 \% \pm 1\%$ och Linje 3 (Organosorb 10) med $78 \% \pm 1\%$ minskning efter drygt två månader drift. Värdena började stabiliseras under sommaren på en nivå mellan 70 – 84 % HNA-bakterier. Ökningen av HNA-bakterier i maj 2021 kan kopplas till den förändrade matarvattenkvaliteten den 20:e maj 2021. Uppgången av andel HNA-bakterier i linje 3 i juli berodde på utbytet av kolet i filterlinjen. Under sommaren 2022 syntes en plötslig nedgång av andel HNA-bakterier till mellan 11 – 30 % HNA. Sedan började värdena öka igen till 55 – 73 % HNA i september 2022, för att sedan minska en gång till, till 30 – 54 % HNA i oktober 2022. Sedan dess ökade värdena till 71 – 83 % HNA i slutet av januari 2023. Samma trender, men om än något svagare, visades under sommaren 2023. Orsaken är oklar eftersom andelen HNA från permeatet var stabilt under hela försöksperioden.



Figur 17. Utveckling av %HNA bakterier över de olika GAK-filtren under projektperioden. GAK steg ett och två. (GL1ut & GS1ut = GPP20), GL2ut & GL2ut = FS400, GL2ut_2 = FS400 efter GAK byte, GL3ut & GS3ut = Organosorb 10 och GS3ut_2 & GL3ut_2 = FoU21)

3.2.7 Biofilmkaraktisering

Biofilmkaraktisering genomfördes för att undersöka om en biofilm etablerats i filtermaterialen till de olika GAK-filtren och i så fall vilka bakteriekulturer som ger en biologisk nedbrytning av olika föroreningar. Eftersom GAK-filtren inte var utrustade med provpunkter för provtagning av filtermaterial i olika nivåer som skulle möjliggöra undersökningar inom filtret under långtidstesterna, genomfördes biofilmkaraktiseringen endast vid slutet av försöksperioden. Den mikrobiella sammansättningen i biofilmen från filtermaterialet och i vattenfasen in respektive ut från de olika pilotstegen visas nedan i Figur 18. Notera att inga prover för inkommande avloppsvatten till Getteröverket och efter respektive första GAK-filter i varje linje inkluderades i utvärderingen. Hela analysrapporten från DNASense återfinns i Bilaga 6.4.

Resultaten visar att det bildades biofilm i samtliga GAK-filtren. En del skillnader mellan de mikrobiella samhällen som bildades i filtren i jämförelsen med de mikrobiella samhällen som fanns i vattenfasen kunde också observeras. Det syns dessutom mindre skillnader av de mikrobiella samhällen mellan de första och andra filterstegen i UF-GAK piloten, med de största skillnaderna mot andra filter kan ses för första GAK-filtret med FS400. Detta kan troligen relateras till det genomförda filtermaterialbytet i filterlinjen. De dominerande samhällen i det andra FS400-steget är *Nitrospira* och *Byrobacter* medan det i de övriga GAK-filtren syns en tydlig dominans av *Bradyrhizobium* och *Byrobacter*.

Acinetobacter som tydligt dominerar de inkommande vatten till piloten observeras inte alls i biofilmen eller i utgående vatten från GAK-filterlinjerna, vilket kan anses som oväntat.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

	UF IN	UF UT	GPP20	FS400	GPP20 1/2 kol	GPP20 2/2 kol	FS400 1/2 kol	FS400 2/2 kol
Acinetobacter-	37.4	14	0.5	0	0	0	0	0
Bradyrhizobium-	0	5.4	1.2	0.6	11.3	6.9	9.8	3
Bryobacter-	0	0.9	2.7	2.6	14.9	12.2	15.3	7.1
JGI_0001001-H03-	0	0	3.7	1.7	5.8	4.8	4.5	4
Reyranelia-	0	2.2	5.2	1.2	3.1	2.3	3.3	4.6
Nitrospira-	0	4.5	1.5	4.1	2.6	2.6	2.1	4
Polaromonas-	5	0.9	0	0	0.8	0.2	0.1	0
Hyphomicrobium-	0	1.3	0.8	1.2	2.7	3.2	3.9	2
Nitrosospira-	0	0	2.1	1.3	2.1	1.8	2.5	7.9
Rhodofera-	0.7	1.8	0.4	1.4	0.2	0.1	0.5	0.3
Afiplia-	0	0.4	0.4	0.4	1.6	0.8	3.1	0.5
Schlesneria-	0	0.4	3.5	1.2	2	1.3	2.9	4.3
Acidovorax-	4.5	0.6	2	0.5	0	0	0.1	0
C39-	4.1	0.3	0.4	0	0	0	0	0
Sulfuritalea-	0	1.1	7.5	3.5	0.7	0.3	0.4	0.5

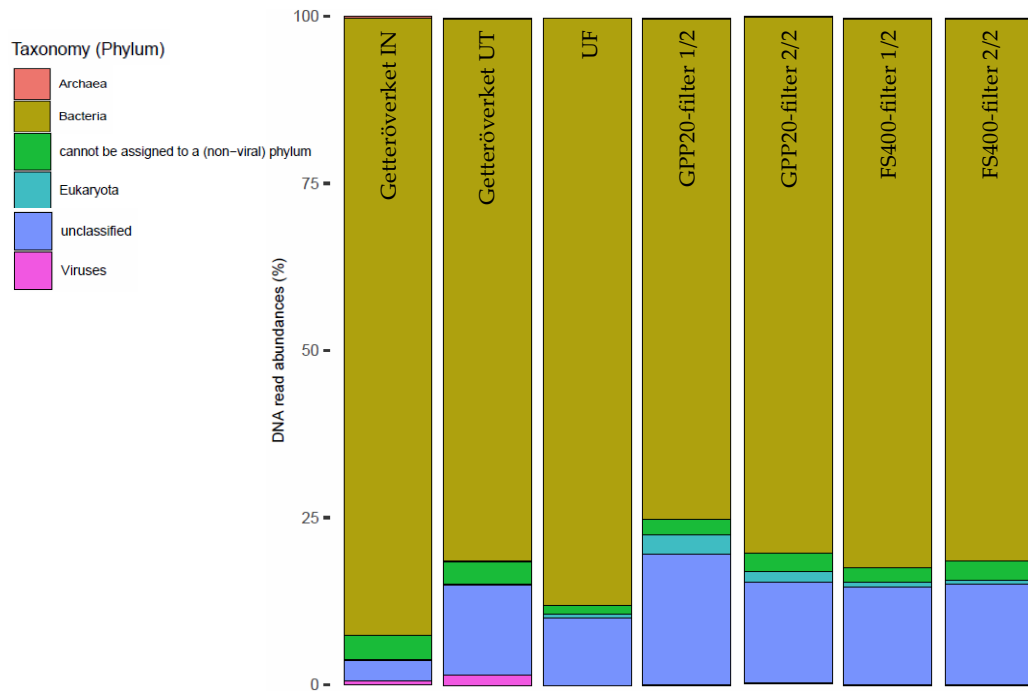
Figur 18. Mikrobiella karakterisering (de 15 mest förekommande klasser) i olika provpunkter samt från extraherade prover från filtermaterialet (UF – Ultrafiltrering).

3.2.8 Utvärdering av antibiotikaresistens

Denna undersökning initierades av Vivab för att få en indikation avseende förekomst av antibiotikaresistens i olika vattenprover och omfattar endast ett provtagningstillfälle. En bedömning av analysresultaten av lämpliga experter har inte gjorts ännu och nedan ges endast en initial beskrivning av Projektgruppens bedömning av resultaten. Hela analysrapporten från DNASense återfinns i Bilaga 6.5.

Figur 19 visar den övergripande taxonomifördelningen för de olika proverna över Getteröverket och UF-GAK piloten. Det kan observeras att bakterier dominerar i samtliga prover, medan virus som finns i inkommande och utgående avloppsvatten i Getteröverket tas bort i ultrafiltreringen. De kunde inte heller detekteras i vattnet efter de efterföljande GAK-filtren.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 19. Övergripande taxonomi för de olika proverna (modifierat från analysrapport för korrekt beteckning).

Figur 20 visar halterna av antibiotikaresistenta gener (AGR) i jämförelse med andra gener som kvantifierats i de olika provtagningspunkterna över Getteröverket och UF-GAK-piloten. Antibiotikaresistenta gener utgör en mycket låg andel av samtliga analyserade gener in till Getteröverket (som högst 0,0102 %) som är ännu lägre i utgående avloppsvatten. Efter ultrafiltrering finns i princip inga antibiotikaresistenta gener kvar (endast en AGR kunde detekteras i mycket låga halter, Figur 20). En viss ökat förekomst jämfört med efter UF-steget indikeras dock för GAK-filtrerlinjen med FS400, men endast i en mycket liten omfattning och endast för enstaka AGR (halter >0 i Figur 20). Dessa resultat tyder på att teknikkombinationen UF-GAK ger en ytterligare minskning av låga AGR-halter i utgående avloppsvatten från Getteröverket. Detta betyder även en minskad tillförsel av antibiotikaresistenta gener till vattenmiljön.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 20. Halter av antibiotikaresistenta gener (AGR, baserat på Comprehensive Antibiotic Resistance Database) i förhållande till resterande identifierade gener (Provpunkter: ARV – Getteröverket IN, UF – Ultrafiltrering).

3.2.9 Prioriterade kemiska parametrar

Den utvidgade analysen av prioriterade ämnen för utvärdering av kemisk ytvattenstatus omfattade både prioriterade ämnen och prioriterade farliga ämnen enligt HVMFS 2019:25. Rapporterade halter för proverna efter båda GAK-filterlinjerna visade lägre halter än bedömningsgrunden/gränsvärdet för 42 av 49. Utav de sju substanser som denna slutsats inte kunde dras, var sex av dessa rapporterade under rapporteringsgränsen. Denna är dessutom högre än gränsvärdet. Det sista ämnet som kvarstår var PFOS, där gränsvärdet överskreds med en faktor mellan 2 och 3 efter 50 000 behandlade BV med GAK-filtren.

3.3 Pilotförsök med teknikkombinationen O₃-GAK

3.3.1 Initiala dos-respons tester

De initiala testerna med ozon inkluderade flera aktiviteter som redovisas nedan.

3.3.1.1 Renvattentester

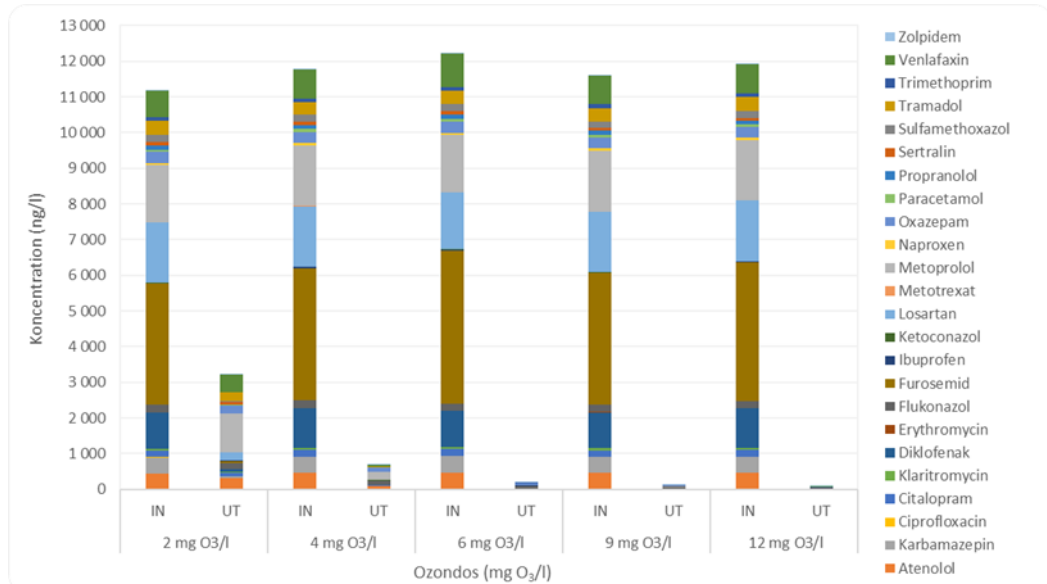
Med erfarenheter från tidigare försök med en ozonpilot som levererades av en annan teknikleverantör (Habagil et al., 2020) genomfördes initiala tester i piloten med dricksvatten för att verifiera specifikationer för ozonproduktion, kontakttider och inblandningseffektiviteten. Halter för nitrat, nitrit, UVA samt beräknade och uppmätta ozonhalter i ozonerat vatten och i processluften utvärderas för de ozondoser som planerades användas i dos-responsförsöken. Dessa tester stämde väl överens med förväntade och uppmätta ozonhalter.

3.3.1.2 Reduktion av läkemedelsrester

Under v43-44, 2022, genomfördes dos-responstester med endast ozonpiloten för att undersöka reningseffektiviteten av ozoneringssteget med avseende på läkemedelsrester för Getteröverkets vattenmatris. Försöken användes också för att bekräfta vald ozondos för långtidstesterna. Ozondoser som ansågs som relevanta att undersöka var 2, 4, 6, 9 och 12 mg O₃/l (motsvarande 0,28 – 1,7 g O₃/g DOC vid DOC på 7 mg/l under dos-responsförsöken). Mellan varje dosändring kördes piloten vid minst tre kontakttider innan en ny provtagning påbörjades. Provtagningen skedde nedströms över piloten med hänsyn till kontakttider för de mest representativa proverna.

För dos-responstesterna analyserades endast läkemedelsrester enligt Tabell 1. Figur 21 visar analysresultat för samtliga läkemedlen, inklusive LOD och LOQ/2-halter, för de fem testade ozondoserna. Från figuren kan det observeras att sammansättningen av avloppsvatten som användes för dos-responstesterna, d.v.s. mikrofiltrerat utgående avloppsvatten från Getteröverket, inte ändrades under försöken. Av de 24 undersökta läkemedel var det metoprolol, losartan, furosemid och diklofenak som förekom med de högsta ingående koncentrationerna i testvattnet. En kraftig minskning av läkemedelshalter kan observeras från figuren redan vid dos 4 mg O₃/l (0,57 g O₃/g DOC). Liknande reduktioner kunde även observeras vid samma dos under långtidförsöken (se 3.3.2).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

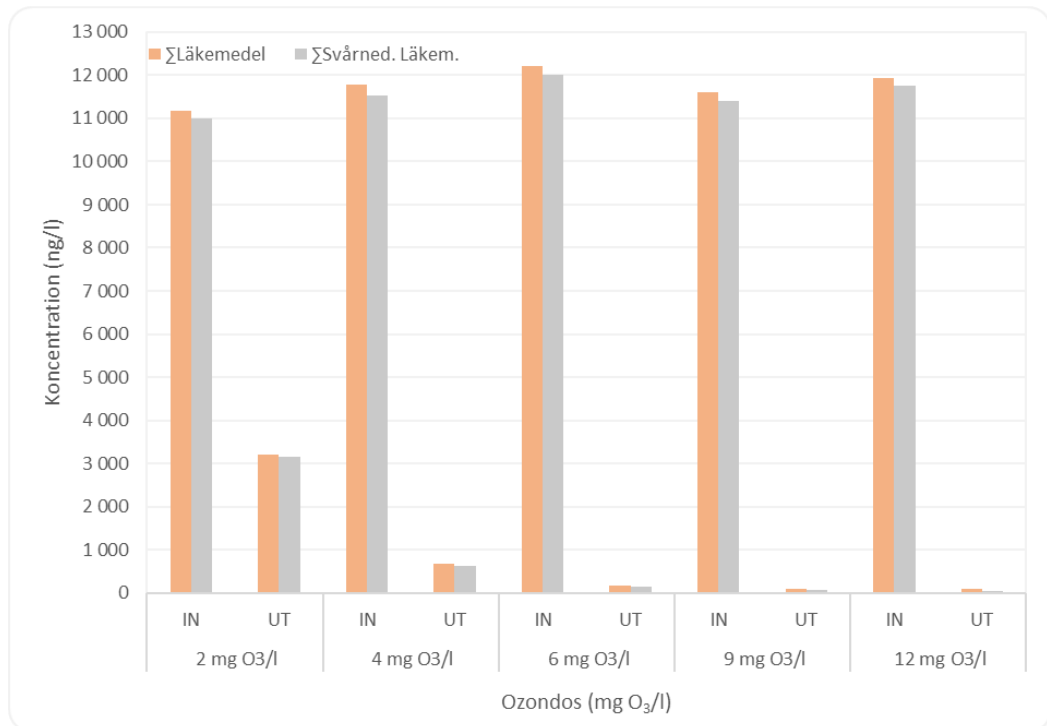


Figur 21. Halter av läkemedel IN och UT vid de olika testade ozondoser (vid DOC på 7 mg/l).

Figur 22 visar endast summan av samtliga 24 läkemedel och summan av endast de 16 svårnedbrytbara läkemedeln². Det framgår att båda summorna ligger på samma nivå eftersom de lättnedbrytbara läkemedlen redan avskilts i reningsverket och därför endast bidrar med en väldigt liten andel. Summan av samtliga läkemedel kan därmed användas som en bra indikator vid uppföljning över den avancerade reningen.

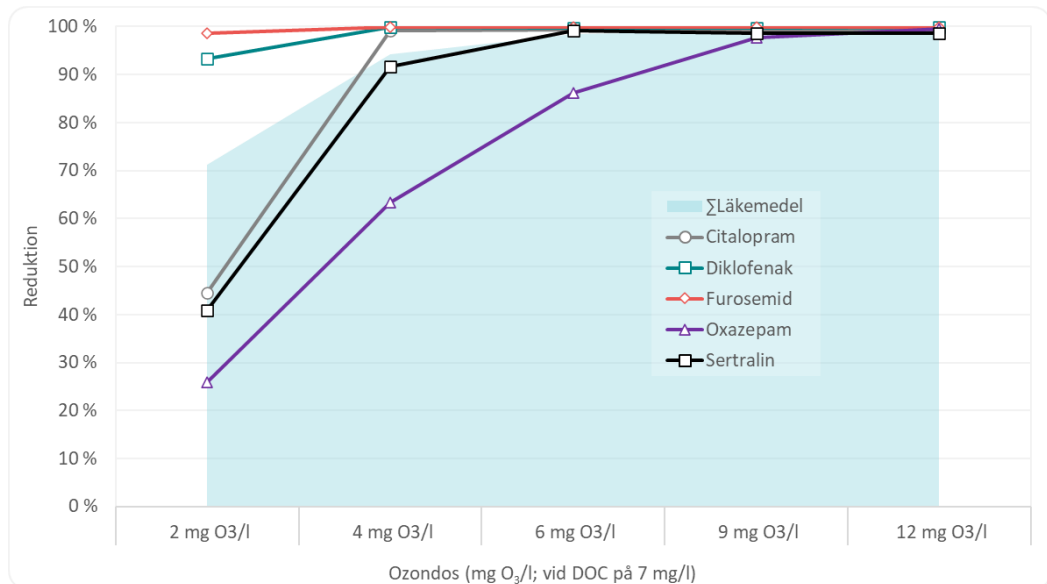
² Svårnedbrytbara läkemedel inkluderar atenolol, karbamazepin, ciprofloxacin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, flukonazol, furosemid, losartan, metoprolol, oxazepam, propranolol, sulfamethoxazol, tramadol, trimethoprim och venlafaxin

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 22. Summan av samtliga analyserade läkemedlen och endast svårnedbrytbara läkemedlen.

Figur 23 visar reningseffekten vid olika ozondoser för de i förstudien utpekade läkemedlen med högst risk till negativ recipientpåverkan, vilka definierades i den första förstudien och dessa var citalopram, diklofenak, furosemid, oxazepam och sertralin (Baresel et al., 2021). Medan furosemid renas bort redan vid lägsta ozondosen krävs som förväntat en högre ozondos på 6 mg/l (0,86 mg O₃/mg DOC) för att reducera oxazepam med minst 80 %. Vid en ozondos på 9 mg/l (1,3 mg O₃/mg DOC) renas bort samtliga läkemedlen med >98 %.



Figur 23. Reduktion av prioriterade läkemedel vid olika ozondoser.

3.3.1.3 Risk för bromatbildning

Enligt erfarenheter bör inte ozonering införas om bromidhalten i vattnet är högre än 0,4 mg/l på grund av risker med bromatbildning (Stapf et al., 2017) som bildas när bromid oxideras till bromat. Bromat är toxiskt och har ett gränsvärde i dricksvatten på 10 µg/l (SLVFS 2001:30). Detta gränsvärde gäller dock för dricksvatten och inte för renat avloppsvatten. Ett gränsvärde för utsläpp av renat vatten på 50 µg/l har däremot föreslagits tidigare baserat på negativa bromateffekter (Soltermann et al., 2016). Analyserade bromidhalter vid dos-responstesterna visade stabila bromidhalter på 0,3 mg/l i det inkommande testvattnet, alltså lägre än den maximala rekommenderade halten, men inte avsevärt lägre. Analyserade bromathalter i det inkommande testvattnet låg alltid under rapporteringsgränsen på 0,003 mg/l och utgör således inget bidrag.

Utgående bromathalter efter ozoneringen låg i samma storleksordning som inkommande bromathalter för ozondoser 2 till 6 mg O₃/l och någon signifikant bromatbildning kunde således inte fastställas. Vid en ozondos 9 mg O₃/l uppmättes en bromathalt i det ozonerade vattnet på 0,031 mg/l (31 µg/l) som ökade till 0,041 mg/l vid en ozondos på 12 mg O₃/l. Detta indikerade att det finns en tydlig risk för bromatbildning som kan överstiga rekommenderade halter. Det bör även noteras att ozonpilotens uppsättning med en fördelad ozondosering på två inblandningspunkter medför att bromatbildningen stävs och leder därmed till en minskad risk för bromatbildning.

3.3.1.4 Eventuella styrningsparameter

Under dos-responstesterna kördes även analyser on-site för att undersöka om det fanns ett samband mellan reduktionen av DOC, TOC, nitrit, färg eller UVA över

ozonpiloten och olika ozondoser. Detta för att identifiera eventuella styrningsmöjligheter för en framtida implementering. Medan det inte fanns något samband i reduktion av DOC, TOC och nitrit för olika ozondoser kunde observeras, så visade både UVA och färg en linjär ökning med ökad ozondos. För UVA ökade reduktion från 24 % vid 2 mg O₃/l till 64 % vid 12 mg O₃/l, för färg från 52 % vid 2 mg O₃/l till 93 % vid 12 mg O₃/l.

Tabell 13: Dos-responstest på ozondoseringen med succesiv doseringsökning av ozon från 2 till 12 O₃ mg/l.

Ozon-dos mg/l	Innan ozonsteget					Efter ozonsteget						
	Nitrit mg/l	UVA 254 nm	Färg 455 nm	Bromid mg/l	Bromat mg/l	Nitrit mg/l	UVA 254 nm	Färg 455 nm	Bromid mg/l	Bromat mg/l	Restozon (gas) mg/l	Restozon (l) mg/l
2	0,029	0,796	29	0,293	<0,003	0	0,606	14	0,303	<0,003	0,1	0,039
4	0,027	0,764	29	0,294	<0,003	0	0,398	10	0,325	0,004	0,2	0,054
6	0,03	0,788	29	0,31	<0,003	0	0,316	6	0,292	<0,003	0,6	0,069
9	0,041	0,868	39	0,306	<0,003	0	0,327	7	0,29	0,031	1,2	0,282
12	0,027	0,959	41	0,298	<0,003	0	0,341	3	0,268	0,041	2,1	0,427

3.3.1.5 Beslut för långtidstester

Utifrån dos-responstester valdes en ozondos på 4 mg O₃/l (motsvarande 0,57 mg O₃/g DOC vid DOC på 7 mg/l) för långtidstesterna.

Ozondosen i piloten styrdes mot flöde och inte DOC-halt och anges därför som mg O₃/l. Det bör noteras att DOC-halten på 7 mg/l under dos-responsförsöken är lägre än medelhalten på 10 mg DOC/l, som är den normala koncentrationen för utgående vatten vid Getteröverket. Detta innebär att ozondosen på 4 mg O₃/l motsvarar en lägre dos på 0,4 mg O₃/g DOC vid DOC 10 mg/l under långtidförsöken. Detta behöver även beaktas vid jämförelse av långtids- och dos-responstesterna.

3.3.2 Långtidstester

Långtidstester med teknikkombinationen ozon och aktivt kol (O₃-GAK) startades den 01/11/2022, direkt efter att dos-responstesterna hade avslutats. Ozondosen valdes till 4 mg O₃/l under hela driftsperioden. DOC-halten i vattnet låg i medel på 10 mg/l under långtidstesterna som varade i 10 månader. Men eftersom DOC-halten alltså kan ha varierat men ozondosen alltid varit konstant mot vattenflödet, anges ozondosen i resultatredovisningen som en även som mg O₃/l.

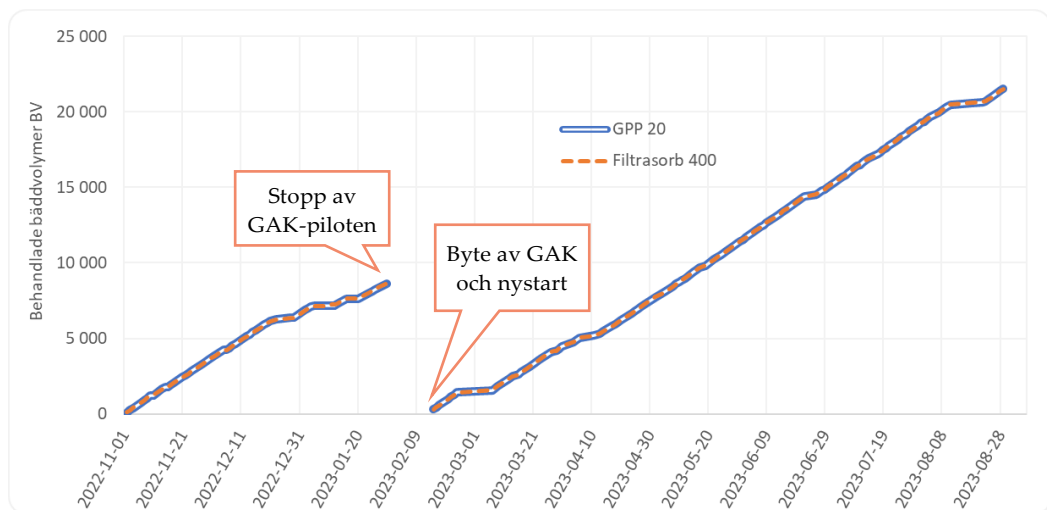
Kontakttiden (EBCT) i de två parallella aktivkolfiltren som matades med ozonbehandlat vatten från ozonpiloten sattes till 10 min. Både drift av pumpningen och nivån av filtermaterialet i filtren justerades och kontrollerades så att detta även blev den faktiska kontakttiden i båda filtren under hela försöksperioden.

3.3.2.1 Driftproblem

Efter ca 12 driftveckor, d.v.s. i början av februari 2023, byttes kolet i båda GAK-filtren ut. Detta berodde på tekniska problem i mikrofiltreringen som ledde till att ofiltrerat vatten kom in i O₃-GAK piloten och orsakade igensättningar i båda GAK-

filtren. Trots flera backspolningar kunde detta inte åtgärdas. I samband med kolbyte justerades även filterbädden och flödet, för att kunna ge större expansionsmöjligheter vid backspolning. Ett extra patronfilter installerades i inkommande vatten till piloten som extra skydd vid driftproblem i mikrofiltreringen.

Figur 24 visar behandlade bäddvolymen för båda GAK-filter under långtidsförsöken. På grund av den låga EBCT kunde mer än 20 000 BV behandlas inom de 8 månader som försöken pågick, trots tvungen omstart av GAK-filtren.



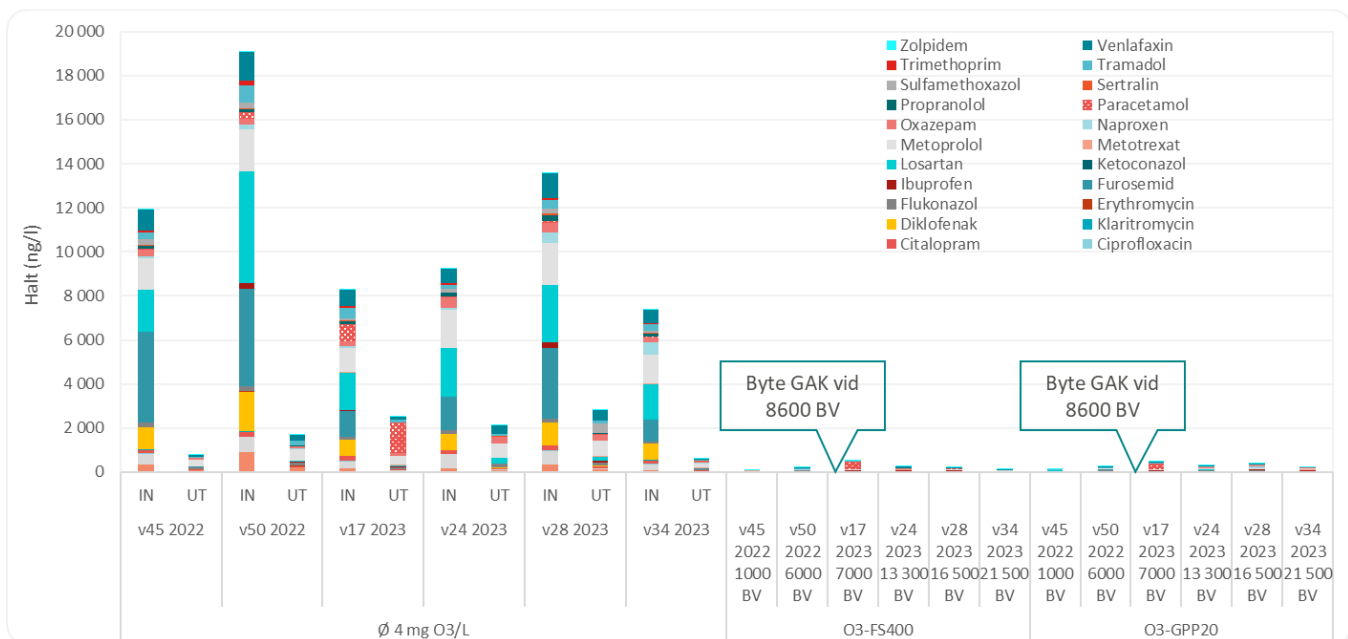
Figur 24. Antal behandlade bäddvolymen (BV) i de två GAK-filter efter ozoneringen.

Eftersom igensättningen av GAK-filtren krävdes det en backspolning flera gånger om dagen under en period i januari 2023. Det genomfördes även tester med att köra GAK-filtren som fluidiserade bäddar genom uppströmsdrift istället. Efter flera dagar med denna driftform fick försöken stoppas, då en stabil drift med den befintliga pilotutformningen aldrig kunde åstadkommas och filtermaterialet spolades ut flera gånger.

3.3.2.2 Rening av läkemedelsrester

Figur 25 visar analyserade läkemedelshalter över de två pilotlinjerna O₃-GPP20 och O₃-FS400 för samtliga provtagningstillfällen. Det bör noteras att även halter under detektionsgräns (LOD) och halva halten av kvantifieringsgränsen (LOQ/2) visas i figuren. Även om inkommande halter varierade något mellan de olika provtagningstillfällen var fördelningen av olika läkemedelssubstanser jämförbara. Även minskningen av läkemedel över ozoneringen varierade. Vid v17, 2023 kunde en negativ reduktion bland annat för paracetamol observeras, vilket påverkade stapeln för denna provtagning. Den varierande reduktion över ozoneringen kan kopplas till varierande DOC-halter. Med en DOC-halt på till exempel ca 8,5 mg/l

vid v50 2022 och 11,5 mg/l v17, 2023 har den effektiva ozondosen varit 0,47 respektive 0,35 mg O₃/mg DOC, vilket speglar en variation på ca 20 % längre under v17, 2023 jämfört med v50, 2022. Detta kan förklara en sämre observerad reduktion av läkemedelsresterna för denna period.

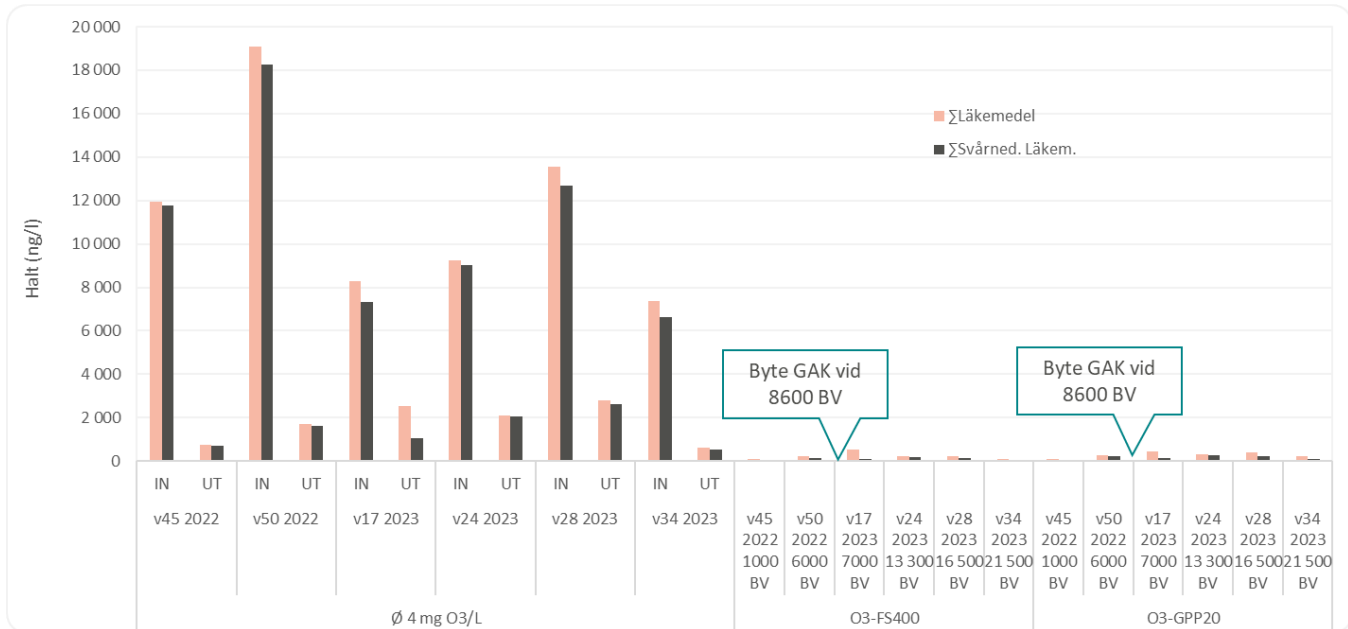


Figur 25. Halter av läkemedel över ozonering och tillkopplade GAK-filtter.

Efter båda GAK-filtterna kan endast några få läkemedel kvantifieras och ingen väsentlig skillnad kan ses mellan de två olika GAK-typerna (Figur 25). I provtagningen v17 2023, alltså efter GAK-bytet, var antal behandlade bäddvolymer i filtret redan något högre än vid provtagningen v50, 2022. Den något sämre reduktionen av läkemedel som inte avskildes över ozonsteget, kan dock även bero på att paracetamol även kvantifierades i något högre halter efter båda GAK-filtren. Denna observation gäller dock endast för paracetamol och för samtliga provpunkter vid provtagningen v17 2023 och kan eventuellt bero på att det förekom en störning av analysen för denna substans.

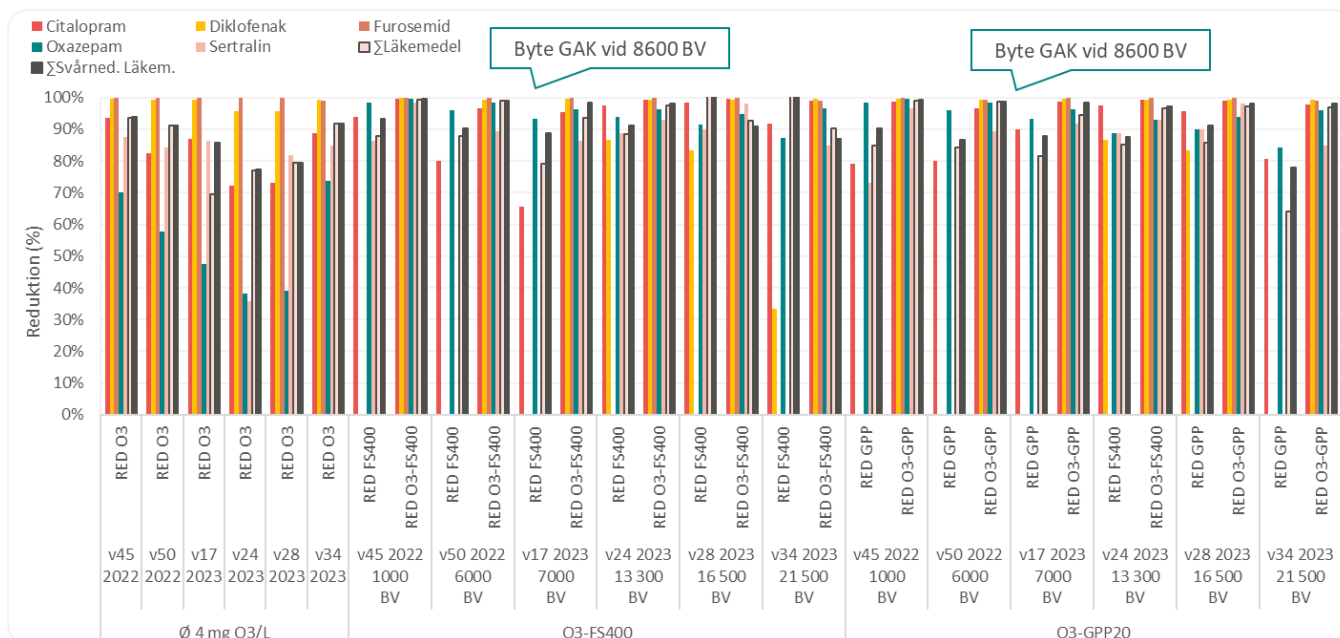
Figur 26 visar motsvarande figur som Figur 25 men här redovisas summahalt av samtliga 24 läkemedel och summan av endast de 16 svårnedbrytbara läkemedel över tid. Eftersom paracetamol normalt inte räknas till de svårnedbrytbara läkemedlen, avviker resultaten för summan av endast de 16 svårnedbrytbara läkemedel från totalsumman vid provtagning v17 2023.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 26. Summan av samtliga analyserade läkemedlen och endast svårnedbrytbara läkemedlen.

I Figur 27 visas motsvarande reningseffekt över ozoneringen, över GPP20 respektive FS400, och kombinationen av ozonering och GAK-filtrer för samtliga provtagningstillfällen. Som figuren illustrerar så finns det läkemedel som inte helt avskiljs över ozonsteget, såsom oxazepam, som effektivt adsorberas och reduceras i de efterföljande GAK-filtren. Reningseffekten för teknikkombinationen O₃-GAK ligger över 90 % över hela försöksperioden för de presenterade parametrarna i Figur 27. Vid sista provtagning hade båda GAK-filtren behandlat ca 21 500 BV.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten


Figur 27. Reningseffekt för samtliga analyserade läkemedel efter ozonbehandling vid 4 mg O₃/l (RED O3), över respektive efterföljande GAK-filter GPP20 (RED GPP20) och FS400 (RED FS400), och teknikkombinationen (RED O3-GPP20 resp. RED O3-FS400).

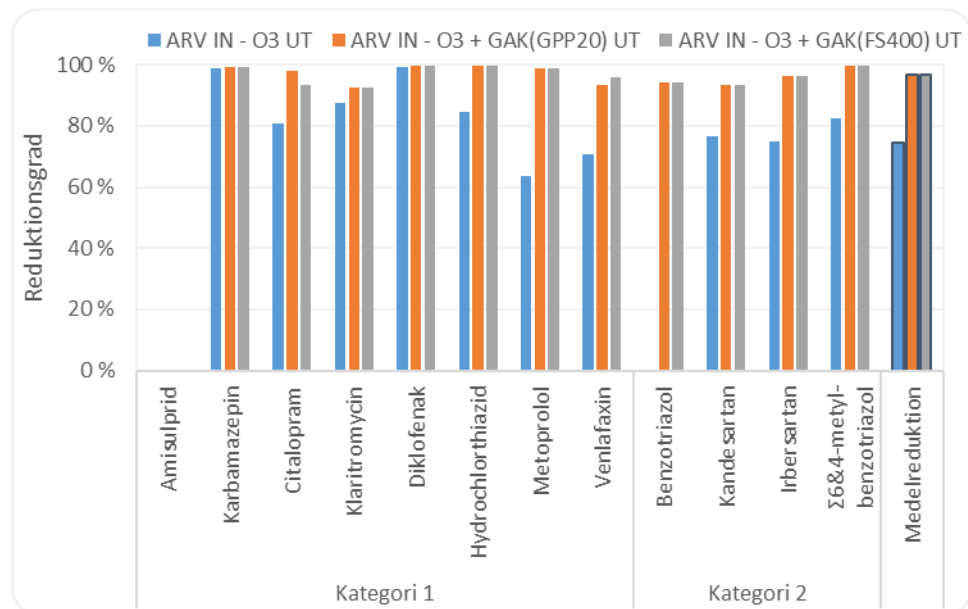
Figur 28 visar reningseffektiviteten från inkommande till Getteröverket till utgående efter ozoneringen och utgående från de två GAK-filter. Resultaten speglar respektive reduktion vid en ozondos på 4 mg O₃/l för samtliga substanser i kategori 1 (K1; amisulprid, karbamazepin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, hydrochlorothiazid, metoprolol och venlafaxin) och kategori 2 (K2; benzotriazol, kandesartan, irbesartan och 4&6-methylbenzotriazol), enligt förslag för det nya reviderade avloppsdirektivet. Enligt förslaget föreslås att driften av det avancerade reningssteget ska upprätthålla en medelreduktion $\geq 80\%$ baserat på reduktion av minst 4 substanser från K1 och 2 från K2. Figuren visar resultat för provtagningen v17 2023 när ca 7000 BV hade renats i respektive GAK-filter (efter filterbyte).

Det observerades en varierad reduktion för olika substanser framför allt över ozoneringen och det är förväntat att ämnen från K1 ska vara enklare att avskilja relativt ämnen från K2, vilket också delvis speglas i resultaten i Figur 28. Metoprolol och venlafaxin motsvarar dock ämnen som kan avskiljas med mer än 90 % förutsatt att dosen är runt 1,0 mg ozon/mg DOC, en lägre dos resulterar därmed i att dessa ämnen avskiljs till en lägre grad. Däremot kan det observeras att benzotriazol inte reduceras med ozon alls vid denna ozondos. Benzotriazol är ett svårtoxiskt ämne och kräver vanligtvis också en högre ozondos för att uppnå en hög reduktion men som det framgår från figuren kunde ingen reduktion alls konstateras.

Eftersom endast ca 7000 BV har behandlats vid provtagningen är reningseffekten för samtliga substanser i de två GAK-filtren mycket hög. Amisulprid detekterades inte, vilket har kommenterats tidigare i de andra försöken också. Medelreduktion

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

för samtliga substanser ligger på 75 %, 97 % och 97 % för ozonering, O3-GPP20 respektive O3-FS400-pilotlinjen. Enligt direktivförslaget ska medelreduktionen däremot endast inkludera 4 ämnen från K1 och två från K2, vilket innebär att reningsgraden kan se olika ut beroende på val. Sammanfattning för dessa resultat är dock att reningskravet för samtliga substanser kan uppfyllas vid dessa bäddvolymmer. Däremot behövs en längre utvärdering fram till dess att filtret blir mättat för att den faktiska resursförbrukningen ska kunna bedömas tillfredsställande avseende detta reningsmål över tid.



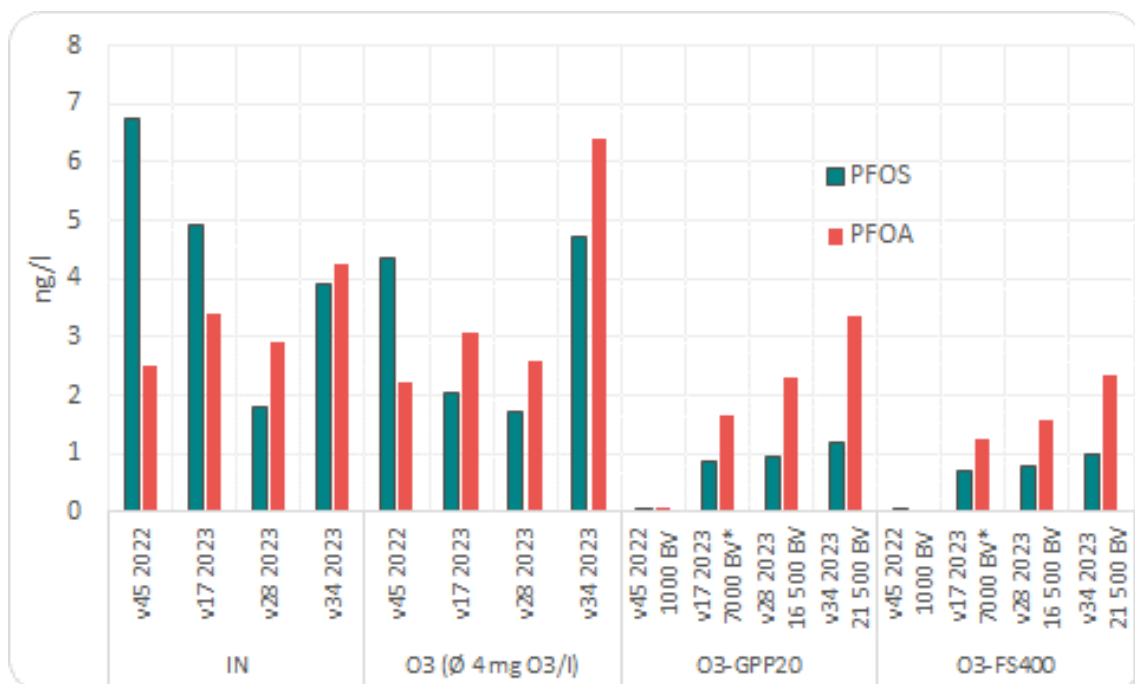
Figur 28. Reningseffektivitet för respektive analyserat ämne från Kategori 1 och 2 enligt förslaget för det nya reviderade avloppsdirektivet.

3.3.2.3 Rening av PFAS

Figur 29 visar halter för PFOS och PFOA före och efter ozonsteget, och efter respektive GAK-filter (analysresultat för samtliga PFAS finns i Bilaga 6.2). Även om halterna i de olika provpunkterna varierade mellan de olika provtagningstillfällena så kan ändå en reduktion av PFOS och PFOA över de olika reningsstegen med framför allt GAK observeras. Dock kan det vid sista provtagningen v34, 2023 observeras att halter för PFOS och PFOA ökar med ca 20 % respektive 50 % över ozonsteget. Samma trend observerades för flera andra PFAS vid denna provtagning där ämnet PFPA (perfluoropentansyra) med en ökning på nästan nio gånger dominerar (se Bilaga 6.3). Att ozon ska reagera med PFAS är inte förväntat, eftersom dessa ämnen saknar elektrontäta platser i molekylstrukturen som ozon alltid väljer att attackera och detta är konstaterat i en rad studier (von Sonntag och von Gunten, 2012; Vecitis et al., 2009; Yang et al., 2014) och referenser däri). Däremot kan ozon reagera med PFAS i närvaro av en katalysator, t.ex. järn, och i denna heterogena oxidationsprocess sker attacker på PFAS-strukturen som leder till ämnets reduktion (Franke et al., 2019). Detta skulle

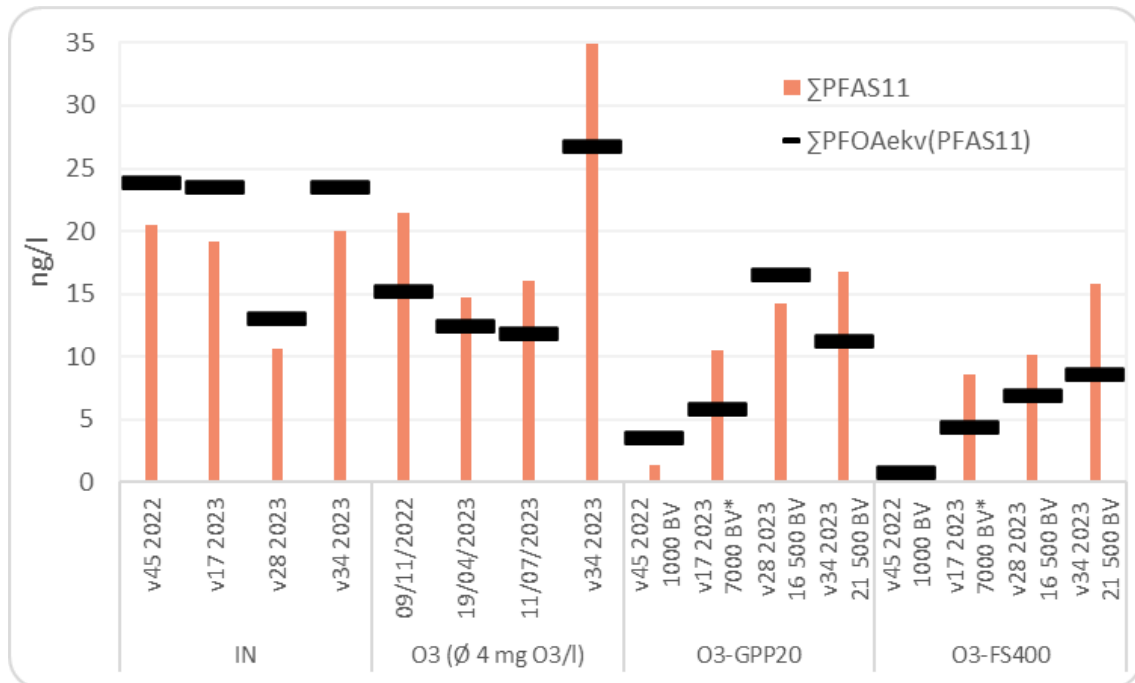
FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

kunna vara en förklaring till varför PFOS observeras minska i dessa försök. Det kan också vara så att PFAS-prekursorer, så kallade föregångsämnen, omvandlas till stabila och analyserade PFAS. Denna observation är gjord i en annan studie, men där var ozon i närvaro av järnoxid (katalysator) och persulfat. I försöken med endast ozon skedde ingen oxidation (Franke et al., 2019). Mot bakgrund av detta finns det sannolikt något i vattenmatrisen som katalyserar oxidation med ozon. Analysfel i provet med för låga rapporterade PFAS-halter innan ozonsteget skulle också kunna vara en del av förklaringen, men är mindre trolig. Analyserade PFAS-halter i andra prover kring UF-steget i den andra pilotlinjen visar dock liknande halter och ett analysfel är således mindre troligt. De över ozonsteget ökade PFAS-halter reduceras i de efterföljande GAK-filter.



Figur 29. Halter av PFOS och PFOA före och efter ozonringspiloten, samt de två efterföljande GAK-filter.

Figur 30 visar motsvarande figur för summaparametrarna Σ PFAS11 och Σ PFOA_{ekv(PFAS11)}. Från figuren kan det observeras att samtliga reningssteg, alltså även ozoneringen, har en reducerande effekt framför allt på Σ PFOA_{ekv(PFAS11)} vilket delvis beror på en bra reduktion av PFOS som har en PFOA-ekvivalent på 2. En ytterligare reduktion sker sedan i de efterföljande GAK-filtren med en tydlig minskande reduktion med ett ökat antal behandlade bäddvolymeter för både GPP20 och FS400. Detta gäller dock inte vid sista provtagningen där den redan diskuterade haltökningen av flera PFAS-ämnen över ozonsteget resulterade i ökade halter för summaparametrar Σ PFAS11 och Σ PFOA_{ekv(PFAS11)}. Eftersom inga bredspektrumanalyser ingick i projektet är det tyvärr inte möjligt att se på hur olika prekursorer eventuellt reagerar med ozon för att förklara observation med ökade PFAS-halter över ozonsteget.



Figur 30. Halter av Σ PFAS11 och Σ PFOAekv(PFAS11) före och efter ozonringspiloten, samt de två efterföljande GAK-filter.

3.3.2.4 Rening av hormoner och östrogena effekter (YES)

Samtliga hormoner som analyserades renades bort till under detektionsgränsen redan i den befintliga processen vid Getteröverket (se Tabell 3). Endast östron (E1) och östradiol (E2) kunde kvantifieras i inkommande avloppsvatten.

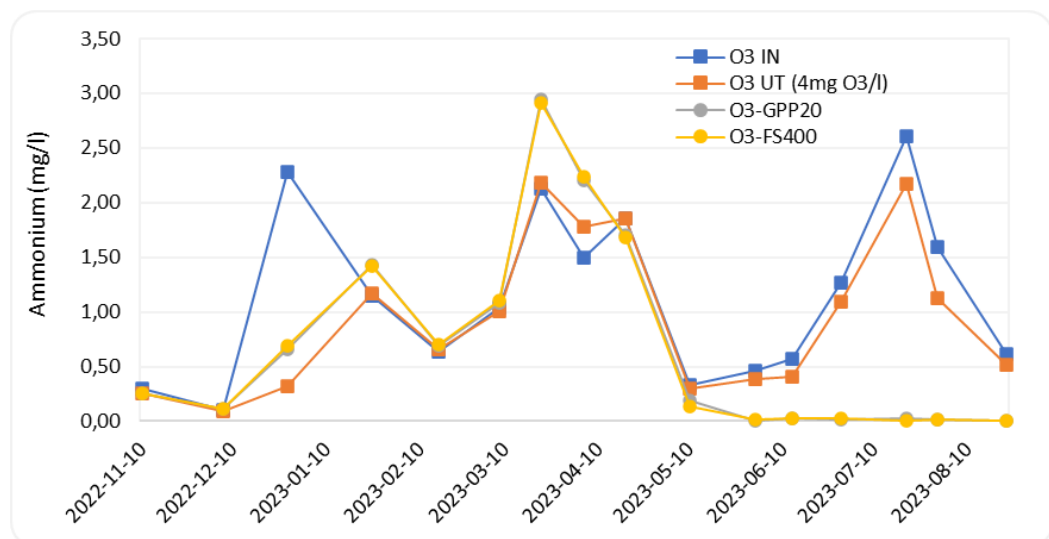
Vid provtagning v17, 2023 kunde en ökning av östron (E1) över ozoneringen observeras. Ökningen från under detektionsgräns till 2,8 ng/l är relativt liten och oväntad eftersom hormoner vanligtvis oxideras väldigt väl redan vid låga ozondoser (von Sonntag och von Gunten, 2012). Detta kunde även observeras vid sista provtagningen där inga östronhalter detekterades i inkommande vatten till ozoneringen, men väl efter ozonering, även om inga halter var kvantifieringsbara. En möjlig förklaring kan vara att någon, eller flera, former av transformationsreaktioner sker vid ozoneringen. Ozoneringen kan också tänkas ta bort en förorening i vattnet som i normalfallet trycker ned signalen för östron, d.v.s. att ozoneringen tar bort jonsuppressionseffekten. Det är också något överraskande att endast hälften av denna halt därefter renades bort i de efterföljande GAK-filterna (se Bilaga 6.2).

De östrogena effekterna (YES), som tydlig kunde kvantifieras i inkommande avloppsvatten till Getteröverket, renades mycket effektivt bort till under kvantifieringsgränsen redan i Getteröverkets reningsprocess (Tabell 5). Inga östrogena effekter kunde därefter detekteras över pilotprocessen och någon vidare utvärdering av dessa kan därför inte göras för dessa reningssteg och avseende YES.

3.3.2.5 Rening av andra föroreningar

Enligt analyserna av totalkväve, nitrat, fosfat och totalfosfor kunde ingen påverkan av dessa parametrar konstateras varken över ozoneringen eller efter de två efterföljande GAK-filtren. Dock kunde det observeras haltvariationer mellan olika provtagningar i samtliga provpunkter, vilket berodde på variationer på reningsverket.

Däremot reducerades ammonium över FS400- och GPP20-filtren från provtagningen den 2023-05-10 (vid ca 8 700 BV) till försökets slut vid 21 500 BV (se Figur 31). Däremot kunde inga tydliga ökning av nitrat observeras, något som förväntades bli detekterad eftersom det borde ske en nitrifikation i filtren. Det ozonerade vattnet är syremättat, vilket skapar förutsättningar för nitrifikation. I biofilmanalyserna kunde inga nitritoxiderande bakterier i GAK-filtren observeras, vilket kan förklara orsaken till att inga ökning av nitrat kunde observeras. Ammonium kan med tanke på sin positiva laddning också ha adsorberats till GAK. En sådan adsorption skulle däremot förväntas vara högst i början av filterdriften, med en avtagande adsorption med ökande mättnadsgraden av filtermaterialet. Liknande reduktioner av ammonium har inte observerats för GAK-filtren i teknikkombinationen UF-GAK tidigare.

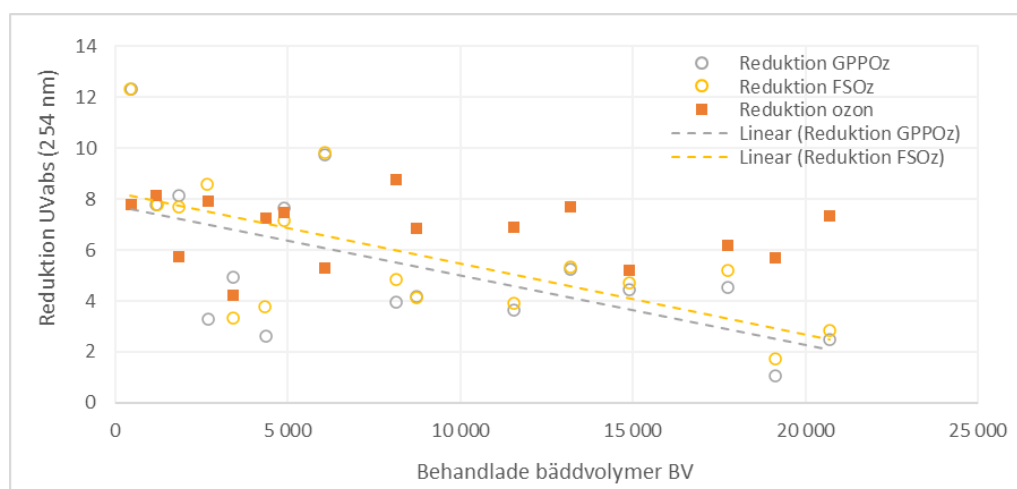


Figur 31. Ammoniumhalter över O₃-GAK piloten.

En tydlig påverkan av TOC-halter kunde som förväntat inte observeras över ozoneringen. TOC-reduktionen över de två GAK-filtren var minimal under hela testperioden och varierade mellan en haltreduktion på 0,1 och 0,5 mg/l från inkommande till utgående vatten i filtren.

Däremot kunde en tydlig reduktion av UVabs observeras över GAK-filtren i början av långtidskörningen, medan reduktionen minskade successivt oavsett filtermaterial (Figur 32). Denna observation stämmer väl överens med att

läkemedelsresterna reducerats över GAK-filtret, vilket bidrar med en minskning av absorbans vid 254 nm. De högre reduktionerna av absorbans som observerades i början av pilottesterna var i storleksordning 8 Abs (förutom vid ett tillfälle där reduktionen låg på 12 Abs för FS400) för att sedan minska till ca 2 Abs. I och med detta kan det konstateras att UV vid 254 nm, i likhet med samtliga testade parametrar, inte kan användas som indikator för behov av filterbyte.



Figur 32. Reduktion av UVA för teknikkombinationen O₃-GAK.

3.3.2.6 Resultat från aktivitetstester

Östrogen aktivitet (ER) uppmättes i samtliga analyserade prover in till ozonsteget och motsvarade samma halter som gick in till ultrafiltreringen eftersom det utgjorde samma vatten. Inkommande vatten till piloterna har därmed motsvarats av utgående renat avloppsvatten från Getteröverket som filtrerats genom ett mikrofilter på 10 µm. Reningsgraden för ER över ozonsteget varierade mellan -36 till 63 %, vilket är avsevärt lägre än förväntat och även lägre än vad som rapporterades av Holm och Önnby (2022). Resultaten från den studien var dock baserade på färre prover. GAK-filtret med FS400 minskade ER-aktiviteten i det ozonerade vattnet med ytterligare 18 till ≥98 %, men trots detta kunde en låg ER-aktivitet (0,18 – 0,32 ng E_{2ekv}/l) kvantifieras i tre av fyra prov av utgående vatten från pilotprocessen. En förklaring för dessa resultat kan inte ges baserat på de andra analyser som genomfördes. GAK-filtret med GPP20 presterade nästan identiskt med FS400-filtret, med undantag för den första provtagningen i november 2022, där ingen aktivitet kunde detekteras efter GPP20 (reningseffektivitet >98 %). Det bör noteras att motsvarade YES-tester inte kunde kvantifiera någon östrogen effekt i någon provpunkt i O₃-GAK piloten även om kvantifieringsgränsen låg på 0,02 ng E_{2ekv}/l, alltså lägre än det halter som ER-aktivitetstesten rapporterat.

Androgen aktivitet (AR) kunde inte detekteras i någon av provpunkterna över piloten.

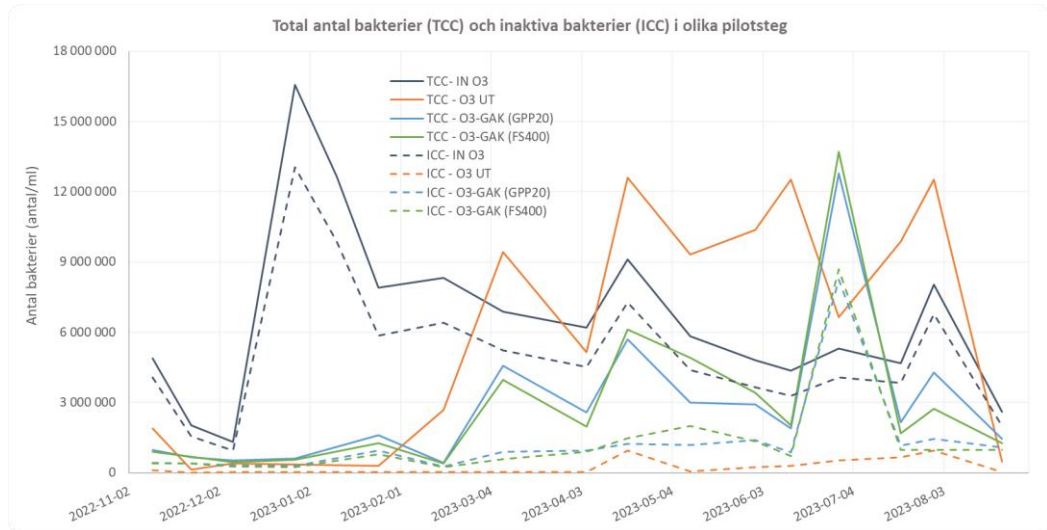
Halter och reningseffektiviteten för AhR-aktivitet och oxidativ stress (Nrf2-aktivitet) över ozoneringen är svårtolkat, då halter och reningseffekt varierar mellan en kraftig negativ och positiv reduktion. För augusti 2023 kunde bl.a. en kraftig ökning över ozoneringen observeras till halter betydligt högre än vad som uppmätts i något av proven på utgående renat avloppsvatten från Getteröverket. Oxidationsprocesser såsom ozonering och klorering kan ge upphov till transformationsprodukter som kan inducera oxidativ stress, vilket skulle ha kunnat bidra till den stora ökningen i Nrf2-aktivitet. Från analyserna observerades det dock att den inducerade aktiveringen av AhR minskade till under detektionsgränsen över GAK-filtret med FS400 (61 – 96 % reduktion), och GAK-filtret med GPP20 visade på en minskning med 56 - 93 % vid de tre första provtagningarna. Däremot observerades en ökning med 73 % över GPP20-filtret vid den fjärde provtagningen i augusti 2023.

Samtliga resultat för alla aktivitetstester visas i Bilaga 6.3.

3.3.2.7 Flödescytometri (FCM)

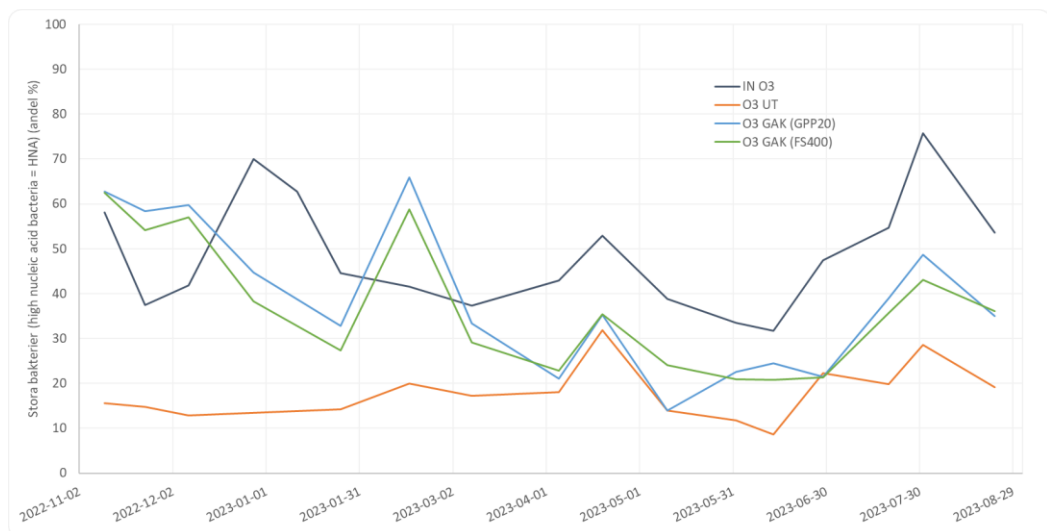
Resultaten från flödescytometrin i Figur 33 visar att problem med pilotanläggningen mellan jul och nyår 2022 ledde till höga bakteriehalter i vattnet efter mikrofiltrering in till ozonpiloten. Däremot observerades låga halter efter ozoneringen. Totalhalterna av bakterier efter ozoneringen låg efter mars 2023 över inkommande halter. För aktiva bakterier (ICC) visas att halterna var mycket låga efter ozoneringen (ca 5 % av TCC), eftersom de flesta bakterier förstörs. Dock åstadkoms endast en log 1-reduktion av aktiva bakterier, medan ingen log-reduktion uppnåddes över ozoneringen när totala antalet celler beaktas. De totala bakteriehaltererna efter GAK-filtren låg i snitt lägre än de totala bakteriehaltererna direkt efter ozonanläggningen. Halterna av de aktiva bakterierna var dock högre igen efter de två GAK-filtren (ca 47 % av TCC). Detta tyder på mikrobiologisk tillväxt i båda GAK-filtren. Båda GAK-filtren följer samma trend med en ökning av antalet bakterier under sommaren, som troligtvis beror på en ökande vattentemperatur.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 33. Utveckling av total antal och antal intakta bakterier (ICC) i O₃-GAK piloten.

Under försöksperioden minskade andelen stora bakterier med mycket DNA-halt i vattnet (high nucleic acid bacteria = HNA) efter GAK-filtren från 62 % i november 2022 till 23 ± 3 % i juni 2023 (Figur 34), en trend som också observerades i UF-GAK piloten (3.2.6).



Figur 34. Utveckling av %HNA i O₃-GAK piloten.

3.3.2.8 Biofilmskaraktisering

Biofilmkaraktisering genomfördes för att undersöka om en biofilm etablerats i filtermaterialen till de två GAK-filtren som följer ozonsteget och i så fall vilka bakteriekulturer som ger en biologisk nedbrytning av olika föroreningar. Eftersom GAK-filtren inte är utrustade med provpunkter för provtagning av filtermaterial i olika nivåer som möjliggör undersökningar under långtidstesterna, genomfördes

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

biofilmkaraktiseringen endast i samband med en avslutning av försöksperioden. Tyvärr så misslyckades biofilmanalyserna för GAK-filtret med GPP20 och endast biofilmanalysen för FS400-filtret kan visas. Den mikrobiella sammansättningen i biofilmen från filtermaterialet och i vattenfasen motsvarande inkommande och utgående från ozoneringen visas nedan i Figur 35.

	O ₃ IN	O ₃ UT	FS400	GPP20	FS400 kol
Acinetobacter-	37.4	67.7	40	35.9	0
Bradyrhizobium-	0	0	1.4	1.2	23.5
Bryobacter-	0	0	0	0	0.1
JGI_0001001-H03-	0	0	0	0	0.1
Reyranella-	0	0	0.5	0.9	0.7
Nitrospira-	0	0	0	0	0.1
Polaromonas-	5	2.8	1.9	1.5	5.7
Hyphomicrobium-	0	0	0.4	0.4	2.7
Nitrospira-	0	0	0	0	0
Rhodofera-	0.7	0	0.8	1.5	10.1
Afiplia-	0	0	0.2	0.1	9.9
Schlesneria-	0	0	0.1	0.1	0.4
Acidovorax-	4.5	1.2	3.1	1.6	2.3
C39-	4.1	0.7	4.5	4.6	0
Sulfuritalea-	0	0	0	0	0

Figur 35. Mikrobiella karakterisering (det 15 mest förekommande klasser) i olika provpunkter samt från extraherade prover från filtermaterialet.

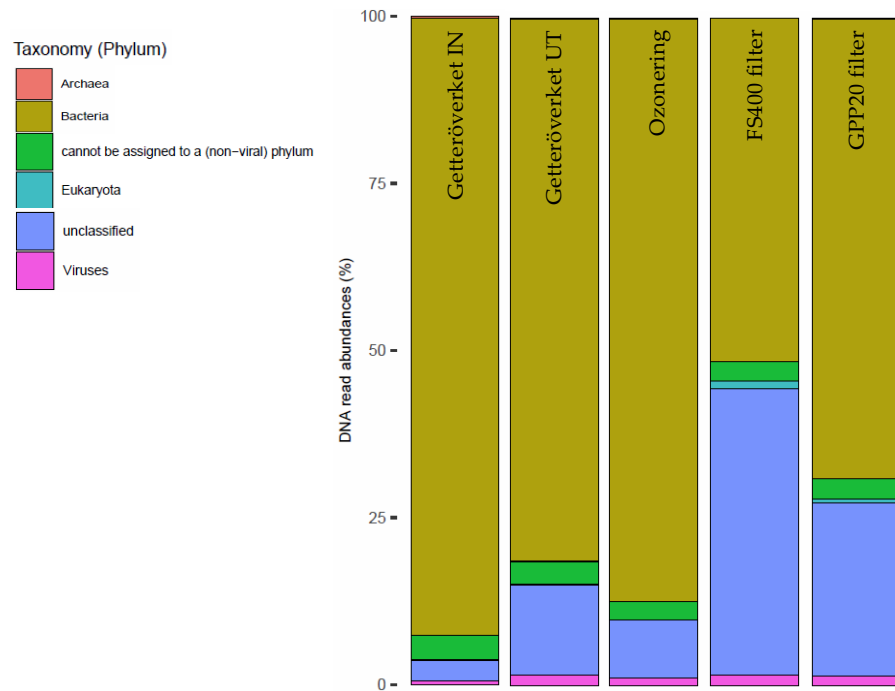
För ozoneringen visar figuren att andelen *Acinetobacter* ökar, vilket troligtvis orsakas av att andra bakterier dödas. Även om *Acinetobacter* tydligt dominerar i vattenfasen i samtliga provpunkter över piloten, observeras dessa inte alls i biofilmen från det undersökta GAK-filtret.

Hela analysrapporten från DNASense återfinns i Bilaga 6.4.

3.3.2.9 Utvärdering för antibiotikaresistens

Figur 36 visar den övergripande taxonomifördelningen för de olika proverna över Getteröverket och O₃-GAK piloten. Prover togs endast vid ett tillfälle och ozondosen låg som under hela långtidsförsöken på 4 mg O₃/l. Ingen DOC-analys gjordes vid provtagningen men den genomsnittliga DOC-halten i avloppsvatten in till ozonsteget låg på ca 10 mg/l. Bakterier dominerar i samtliga prover men även virus återfinns i samtliga prover. Ozoneringen minskar virusandelen endast marginellt och någon ytterligare minskning observeras inte över GAK-filtren.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 36. Övergripande taxonomi för de olika prover (modifierat från analysrapport för korrekt beteckning).

Figur 37 visar halterna av antibiotikaresistenta gener (AGR) i jämförelse med resterande gener som kvantifierats i de olika provtagningspunkterna över Getteröverket och O₃-GAK-piloten. Tyvärr kunde inte GAK-filtret med FS400 utvärderas p.g.a. för låga halter gener som därmed inte kunde kvantifieras. Antibiotikaresistenta gener utgör en mycket låg andel av samtliga analyserade gener in till Getteröverket (som högst 0,0102 %), som är ännu lägre i utgående avloppsvatten. Ozoneringen ökar andelen antibiotikaresistenta gener, vilket troligtvis beror på att andra bakterier dödas. Detta innebär att ozon vid denna dosering inte är tillräckligt för en komplett desinfektion. Resultaten här indikerar att betingelserna för antibiotikaresistenta bakterier troligtvis har förbättrats. Det kan dock observeras att det efterföljande GAK-filtret motverkar detta då bakteriehalten sjunker över filtret. Eftersom det förekom för låga halter av gener i vattnet efter GAK-filtret med FS400, resulterade detta i att FS400-filtret inte kunde utvärderas. Resultaten kan dock tolkas som att även detta filter motverkade den ökade selektionen av antibiotikaresistenta bakterier eftersom generna i det ozonerade vattnet hade reducerats till under kvantifieringsgränsen i FS400-filtret.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 37. Halter av antibiotikaresistenta gener (ARG, baserat på Comprehensive Antibiotic Resistance Database) i förhållande till resterande identifierade gener (ARV – Getteröverket).

Hela analysrapporten från DNASense återfinns i Bilaga 6.5.

3.3.2.10 Prioriterade kemiska parametrar

Den utvidgade analysen av prioriterade ämnen för utvärdering av kemisk ytvattenstatus omfattade både prioriterade ämnen och prioriterade farliga ämnen enligt HVMFS 2019:25. Rapporterade halter för proverna efter GPP20 respektive FS400 låg för 42 av det 49 analyserade substanser lägre än bedömningsgrunden/gränsvärdet. Utav de sex substanser som denna slutsats inte kunde dras, var sex av dessa rapporterade under rapporteringsgränsen. Denna är dessutom högre än gränsvärdet. Endast för PFOS överskreds gränsvärdet

marginellt efter FS400-filtret, medan den låg på 0,47 ng/l i vattnet efter GPP20-filtret efter 21 500 behandlade bäddvolymmer.

3.4 Jämförelse av pilotförsöken

Att jämföra de två pilotförsöken är väldigt svårt eftersom båda pilotlinjerna inkluderar kolfilter där en drift över en längre tid behövs för att kunna göra en relevant bedömning av reningseffektiviteten. UF-GAK-piloten driftsattes ca 18 månader innan O₃-GAK-piloten startades upp. Dessutom fick kolfiltren i O₃-GAK-piloten ersättas med nya efter ca 8 600 behandlade bäddvolymmer (se 3.3.2.1). Drifttekniskt är just denna händelse en indikation på att förbehandlingen utgör en viktig del i drift- och reningseffektiviteten för den avancerade reningen. O₃-GAK-kombinationen med en föregående mikrofiltrering är mer sårbar för driftstörningar i den föregående mikrofiltrering. Att driva GAK-filter i serie, i form av 2-steps-filter som följer en ultrafiltrering, såsom i piloten med UF-GAK, resulterade i en mycket stabil och en mindre komplex vattenmatris, som också ledde till mindre igensättning i filtren. Även för O₃-GAK kan så klart en UF som förbehandling tänkas, men i så fall motsvarar kombinationen tre separata avancerade reningstekniker, vilket ökar komplexiteten och resursbehovet.

En jämförelse av reningseffektiviteten med avseende för läkemedel och PFAS är svårt att göra p.g.a. att de respektive pilotprocess kunde driftas under olika lång tid. Båda teknikkombinationerna visade att de i princip uppnår samma reningseffekt med avseende för läkemedelsrester i avloppsvatten och för hormoner och fenoler. Detta eftersom både bytesintervall av filtermaterialet och ozondosen kunde anpassas efter olika reningskrav. Att ozoneringen i O₃-GAK piloten mot förväntan inte visade någon reningseffekt på avloppsdirektivsämnet benzotriazol och i vissa fall en ökning av vissa hormoner över ozonsteget är svårt att förklara. Dock bör det beaktas att en närmare utvärdering av dessa resultat inte var möjligt p.g.a. att pilotförsöken fick avslutas.

Att aktivkol ingår i båda teknikkombinationerna innebär att en bred rening av många olika mikroföroreningar kan åstadkommas. Om det finns en ambition om att även minska halterna av PFAS-ämnen i så lång utsträckning som möjligt, är kombinationen med UF-GAK den mest lämpliga teknislösningen på sikt av de två undersökta teknikkombinationer. En del av resurseffektiviteten inkluderar att kolets kapacitet kan utnyttjas bättre p.g.a. en bättre förbehandling och en 2-stepsdrift. Detta gäller oberoende om en hög PFAS-rening ska åstadkommas. Om PFAS-rening ska ingå kräver det att bytesintervallerna för GAK-filtren sker mer frekvent jämfört med när reningsmålet endast avser avskiljning av läkemedelsrester.

Både UF och O₃ fungerar som en förbehandling till GAK-filter för att öka utnyttjandegraden av adsorptionskapaciteten i det aktiva kolet maximalt. Avseende ozon behöver detta dock förtydligas något. Genom ozonbehandling

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

oxideras en stor andel av det löst organiska materialet i vattnet, vilket kan innebära att GAK-filtret belastas med mindre löst organiskt material när det efterföljer ozoneringen och resulterar i att adsorptionen av de icke-oxiderade läkemedelsresterna ökar. Det finns också en chans att vissa transformationsprodukter (läkemedelsrester som reagerat med ozon) blir mer polära och hydrofila efter ozonbehandlingen, vilket innebär att de lättare passerar GAK-filtret utan att adsorberas (Betzhold et al., 2022). Slutligen så finns det de ämnen som oxiderar sämre, såsom oxazepam, sertralin eller irbesartan som därmed adsorberar och avskiljs i det efterföljande GAK-filtret. Samma påstående stämmer för några av de PFAS-ämnena som innehåller en längre kolkedja. UF är endast storleksberoende och innebär kortfattat att större störande partiklar kan avskiljas innan vattnet når GAK-filtret.

Biofilmkaraktiseringen indikerade att det finns en etablerad biofilm i GAK-filtren i båda teknikkombinationerna. Biofilmen kan ge en biologisk nedbrytning av föroreningar i filtren, även om omfattningen inte kan kvantifieras i detta projekt. I teknikkombinationen O₃-GAK kan GAK-filtren dessutom uppfylla den viktiga uppgiften att ta bort nedbrytnings- och biprodukter som kan uppstå vid ozoneringen, något som däremot inte undersöktes i detalj för detta projekt.

Vid utökade krav på det reade vattnet i form av återanvändning för internt eller externt bruk, utgör ultrafiltreringen i UF-GAK-kombinationen en stor skillnad. Denna kombination ger ett partikelfritt och i princip desinficerat vatten, som redan innan filtrering genom GAK-filtren kan återanvändas för olika ändamål som kräver dessa egenskaper för återbruk och där innehåll av föroreningar kan anses vara okej.

Den initiala utvärdering för mikrofloran indikerade också att ozondosen som användes under långtidstesterna i teknikkombinationen O₃-GAK inte kunde åstadkomma en desinfektion av vattnet. Analys av antibiotikaresistenta gener visade att även om andelen resistenta gener generellt låg på en låg nivå, så indikerades det att ozonbehandlingen kan ge en framselektering av antibiotikaresistenta bakterier. Det bör dock beaktas att omfattningen av ingående prover är begränsade för en ordentlig utvärdering. De efterföljande GAK-filtren kunde dock minska denna ökade dominans av antibiotikaresistenta bakterier. Med teknikkombinationen UF-GAK kunde både virus och antibiotikaresistenta gener/bakterier avskiljas utifrån de förutsättningar och de relativt få provtagningar som genomfördes inom projektet.

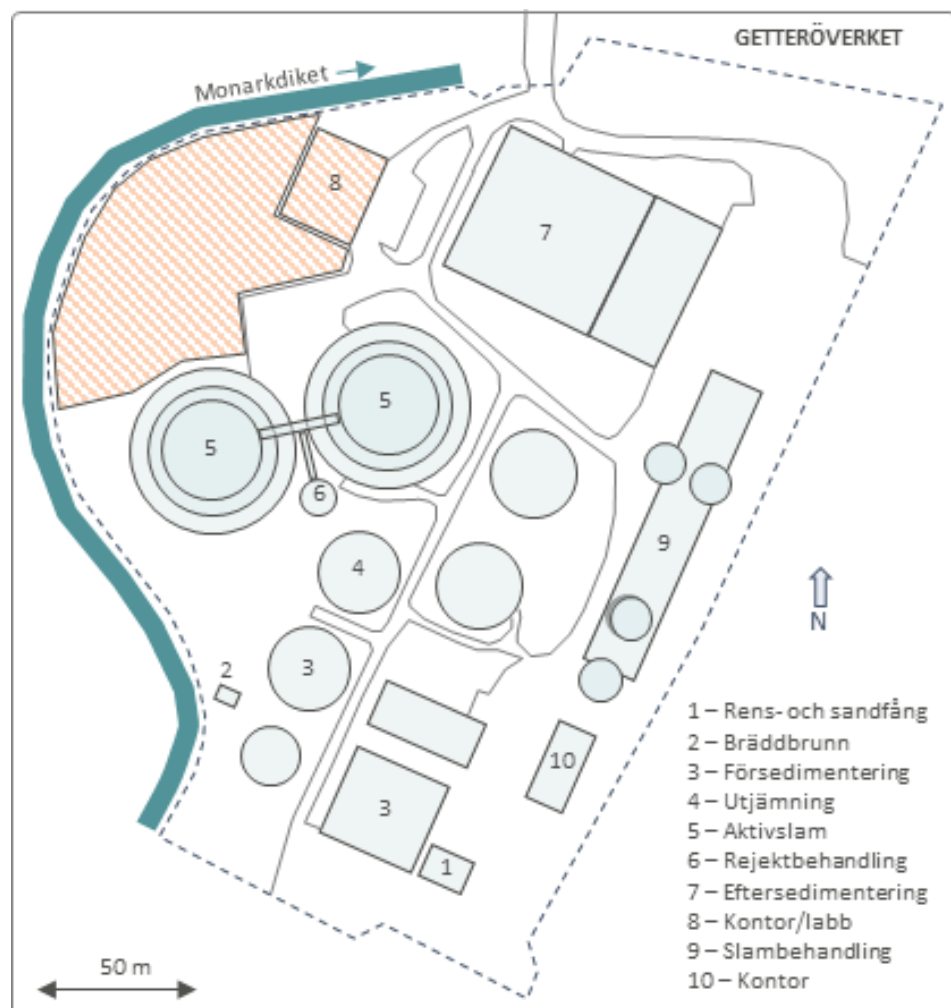
Även de få analysresultat av de kompletterande aktivitetstesterna som kunde brukas för en jämförelse indikerar en viss fördel med UF-GAK teknikkombinationen eftersom aktiviteten togs bort mest effektivt i GAK-filtren.

3.5 Beslutsunderlag för implementering

3.5.1 Dimensionerande förutsättningar

Avloppsvattenflödet vid Getteröverket som ligger till grund för framtagandet av beslutsunderlag bestämdes till $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$, eftersom det är detta maxflöde som kan hanteras i dagens pumpstation till inloppet och som därmed motsvarar vad som behandlas maximalt i den biologiska processen. Flödet motsvarar ca 92 % av alla timflöden till Getteröverket under ett år. Att dimensionera för ett maximalt flöde valdes p.g.a. de mycket känsliga recipienten Inre Farehamnsviken och Getteröverkets bidrag till recipientens totalbelastning. Medelflödet till Getteröverket ligger på ca hälften ($Q_{\text{medel}} = 780 \text{ m}^3/\text{h}$) och används för beräkningar av resursförbrukningen i driften.

En tänkbar framtida placering av en avancerad rening utgörs av nuvarande personal-/analysbyggnad och intilliggande fria markområden (Figur 38).



Figur 38. Områden för en tänkbar placering av en framtida avancerad rening vid Getteröverket.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Fokus för principförslaget är kombinationen av MF, UF och 2-steps GAK-filter, teknikkombinationen betecknad som UF-GAK. Detta beslut baseras på de långtidstester som genomfördes i pilotskala vid Getteröverket (se 3.2). Till detta kommer de mycket goda reningsresultat och driftstabiliteten som tekniklösningen har uppvisat under de knappa tre år som pilottesterna omfattade. Även möjligheten till en återanvändning av det producerade vattnet har diskuterats som en möjlighet vid Getteröverket och den valda tekniklösningen bedöms ge en robust lösning för detta ändamål.

Alternativet med kombinationen av ozon och kolfilter, O₃-GAK, och en tänkbar framtida komplettering av UF-GAK teknikkombinationen med ozon som förbehandling diskuteras i avsnitt 3.5.8.

Vid framtagandet och beskrivningen av processdesign, processutrustning, kostnader och miljöpåverkan har flera teknikleverantörer såsom Xylem, Wedeco, Linde, Pentair, Sulzer, Chemvicon, AirLiquide och anläggningskonsulter inom Sweco involverats. För kostnadsberäkningar har bl.a. uppgifter från teknikleverantörer och Sweco använts.

Poster som det beräknats investeringskostnader för inkluderar:

- **Bygg- & anläggningsarbeten**
Samtliga betongarbeten, lyftanordningar, trappor, räcken, gallerdurk m.m. Markarbeten ingår endast i begränsat omfattning eftersom befintlig byggmark används. En eventuell pålning och rivning av existerande byggnad ingår inte, inte heller en specifik anpassningen för integreringen i Vision Getteröverket (t.ex. landskapsintegrering).
- **VVS**
Samtliga arbeten med rörgalleri inklusive installation av ventiler och annan infrastruktur. Dessutom ventilation.
- **Maskin**
Samtliga maskinella utrustningar såsom pumpar, kompressorer och annan utrustning som krävs för de olika teknikalternativen. Inkluderar även travers.
- **El och automation**
Beräknad som andel av maskin och inkluderar framdragning och inkoppling av el från befintligt ställverk. Inkluderar dock inte en eventuell uppgradering av ställverket.
- **Oförutsett**
Beräknas som del av summan av investeringskostnaden för att ta höjd för oförutsedda kostnader.
- **Byggherrekostnader**
Inkluderar projektledning, projekteringsledning, projektering, upphandling, byggledning, kontroll, uppföljning av garantier, besiktningar, igångkörning, drift- och skötselinstruktioner, slutdokumentation och CE-märkning.

Avskrivningskostnader för investeringar har beräknats med en ränta på 3 % och med hänsyn till avskrivningstider och med en livslängd på 15 till 50 år för olika poster.

3.5.2 Bedömda kolkapacitet/livslängd

Pilottesterna för både UF-GAK och O₃-GAK fick dessvärre avslutas innan de planerade filterbyten kunde utföras och kolfiltret var uttjänt. Även om det i pilotlinjen med UF-FS400 kunde göras ett byte i första GAK-filtret så har ett filterbyte för det andra filtret inte genomförts ännu. Utifrån detta har den totala kapaciteten för GAK-filtrering i både UF-GAK och O₃-GAK inte kunna läggas till grund i principförslaget.

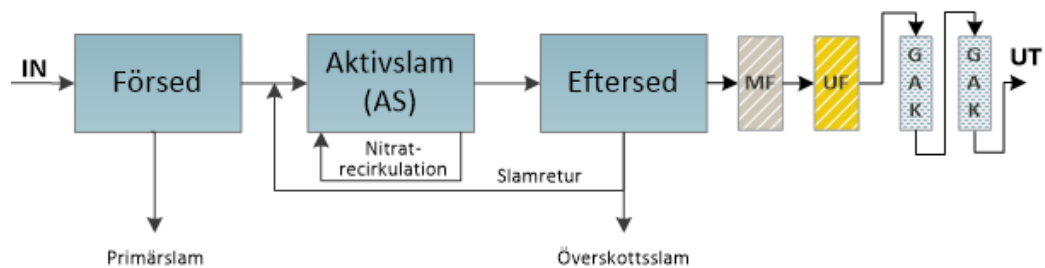
Utifrån de genomförda testerna kan dock en bedömning göras av den minsta kapaciteten och därmed den förväntade livslängden för olika reningsmål. För O₃-GAK har det vid avslut behandlats ca 16 500 BV utan att någon avtagande reningseffekt för de undersökta läkemedelsresterna kunde observeras. Vid flera parallella filter i en fullskaleimplementering och ett reningskrav som utformas som en medelreduktion på 80 % för svärnedbrytbara läkemedel över hela anläggningen, eller endast den avancerade reningen, så bedömer Projektgruppen att minst 40 000 BV ska kunna behandlas innan ett filterbyte krävs för kombinationen med O₃-GAK. I händelse av att även en PFAS-rening ska ingå i reningsmålet med minst 50 % eller högre med O₃-GAK, så visar pilotförsöken att ett filterbyte skulle krävas redan efter 5 000 – 7 000 BV, alltså en signifikant kortare livslängd av GAK-filtren (Baresel et al., 2022b).

För teknikkombinationen UF-GAK indikeras att 100 000 BV skulle kunna uppnås innan ett komplett filterbyte behöver genomföras och vid drift av flera parallella filter i en fullskaleimplementering. Detta gäller vid ett reningskrav som utformas som en medelreduktion på 80 % för svärnedbrytbara läkemedel över hela anläggningen, eller endast den avancerade reningen. Antalet BV baserat på den kvarvarande kapaciteten i det andra filtret i serie, som vid ett filterbyte kan nyttjas igen när det placeras först i serien. Bytet av filterordningen innebär ett förändrat jämviktsförhållande då inkommande föroreningshalter blir högre när det redan använda filtret placeras som första filtret. Detta kommer också att innebära att filtrets kapacitet kan utnyttjas optimalt. Om även PFAS ska avskiljas med minst 50 % eller mer, så visar pilotförsöken att första filtret skulle behöva bytas ut vid samma antal behandlade bäddvolymmer som filtret i O₃-GAK teknikkombinationen, d.v.s. vid 5000 – 10 000 BV. Eftersom det andra filtret i serien dock inte byts vid samma tillfälle utan bibehålls och placeras först i filterserien med högre inkommande PFAS-halter till filtret på grund av ändrade jämviktsförhållanden, kommer flera bäddvolymmer totalt kunna behandlas med samma mängd aktivt kol i UF-GAK uppsättningen jämfört med O₃-GAK-kombinationen.

Det bör noteras att vid ett högt reningsmål för PFAS-ämnen i form av PFOS, eller ännu mer utmanande såsom $\sum \text{PFAS}_{24\text{PFOAekv}}$, kan det eventuellt vara aktuellt att utvärdera andra material för aktivt kol för den avancerade reningen.

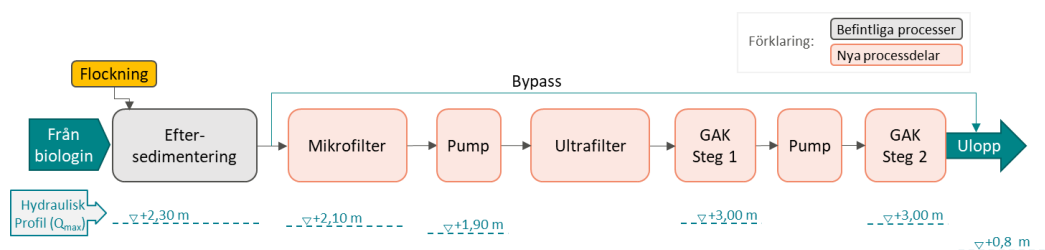
3.5.3 Förslag till processlösning och -utformning

Figur 39 visar den föreslagna processlösningen som baseras på pilottesterna vid Getteröverket från föregående avsnitt. Utgående avloppsvatten från Getteröverket förfiltreras med hjälp av ett mikrofilter för att sedan passera en ultrafiltrering innan vattnet till slut behandlas i 2-stegs GAK-filtret. MF och UF-stegen bidrar till att minska belastningen på GAK-filtren med andra föroreningar än de mikroföroreningar som den avancerade reningen avser att avlägsna.



Figur 39. Föreslagen processutformning och -placering av den avancerade reningen vid Getteröverket.

Figur 38 visar med markerade ytor var och hur en framtida avancerade rening kan planeras. Det finns inga tydliga plats specifika begränsningar i form av t.ex. begränsade tillgängliga ytor. Inga befintliga processvolymer är i nuläget planerade, däremot föreslås att en befintlig byggnad inom anläggningens område ersätts med den avancerade reningen. Figur 40 visar den föreslagna processplaceringen av en eventuell GAK-filtrering vid Getteröverket där vattennivån i de olika processtegen också är inkluderade vid $Q_{\max} = 1\ 500\ \text{m}^3/\text{h}$ för den avancerade reningen.



Figur 40. Föreslagen processmässig placering av en framtida MF-UF-GAK-filtrering inklusive vattennivån i olika processdelar.

Vattnets väg kan beskrivas enligt följande. Från den befintliga eftersedimenteringen leds vattnet via självfall till bassängerna med mikrofiltren (MF) installerade. Efter MF-steget pumpas vatten genom trycksatta UF-membran som samtidigt skapar en högre vattennivå för att vattnet sedan kan ledas via självfall till första GAK-filtret. Filtratet från första GAK-filtret pumpas därefter till andra steget i GAK-filtreringen och återförs efteråt via självfall till befintligt utlopp.

3.5.4 Tekniskt utförande

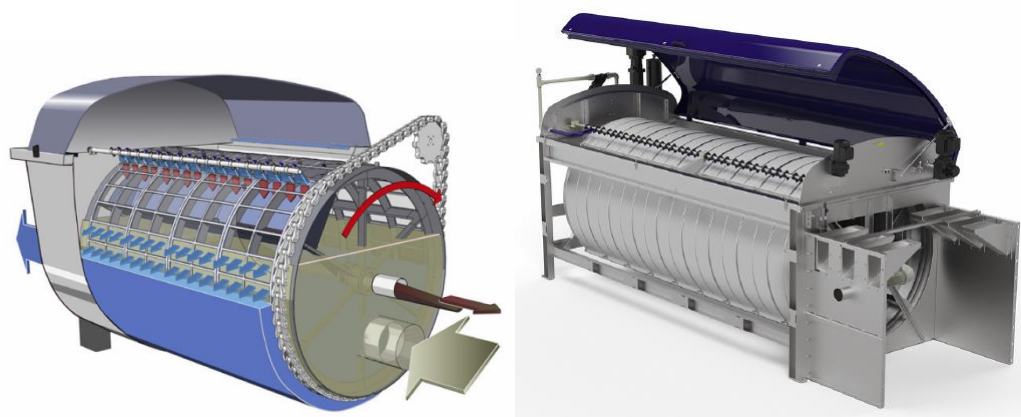
I efterföljande avsnitt ges en teknisk beskrivning av de olika processtegen som används i principförslaget.

3.5.4.1 Mikrofiltrering (MF)

Mikrofiltreringsteget kan utformas antingen med fristående maskin i rostfri tank eller med nersänkta maskiner placerade i betongbassänger. Vardera lösningen har sina för- och nackdelar, nedsänkta filter kan göras större, vilket kan vara ekonomiskt fördelaktigt samtidigt som det behövs extra betongarbeten för installation. Nedan väljs utförandet med nedsänkta bassänger för vidare genomgång.

Med 10 µm filterduk och en maximal ytbelastning på <10 m/h kan utformningen bestå av en liknande utrustning som används i pilotförsöken. Med de dimensionerande förutsättningarna som finns för den avancerade reningen föreslås t.ex. 8 st DynaDrum (typ CDD2050) med en total och effektiv filteryta på 20 respektive 13 m² vardera (Figur 41). Varje maskin placeras i en bassäng på 2,5 × 6 m. Varje filter kan hantera ett flöde på ca 200 m³/h och mängden backspolvatten bedöms till ca 7 – 8 m³/h (ca 4 %) vid intermitterent backspolning. Backspolvatten tas från tanken och ingen separat spolvattenvolym behövs. Partiklar samlas upp och transporteras ut och kan återföras till kemfällning inför eftersedimenteringen. Under pilotförsöken har mängden partiklar som avskildes varit väldigt låg och en återföring till slambehandlingen bedöms därför inte behövas.

Vid medelflöde $Q_{medel} = 780 \text{ m}^3/\text{h}$ är endast hälften av trumfiltren i drift och samtliga maskiner behövs endast vid $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$. Detta ger också en bra redundans då underhålls- och servicearbeten kan läggas till lågflödesperioder.



Figur 41. Exempel på trumfilter (Nordic Water DynaDrum typ CDD2050) för mikrofiltrering.

3.5.4.2 Ultrafiltrering (UF)

Matningen till ultrafiltreringen sker i anslutning till mikrofiltreringen med pumpar från uppsamlingsbassängen i anslutning till MF-steget.

För UF-steget har samma typ inside-out UF-membran som i pilotprojekt antagits. Designen kan t.ex. baseras på Pentair XF64-moduler (X-FLOW XIGA 64) med en nominell porstorlek på 0,02 μm och en aktiv membranyta på 64 m² per modul. För att klara det dimensionerande flödet på $Q_{\text{max}} = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$ och med hänsyn till viss redundans på 30 moduler förslås en fyra XIGA typ 212 ställningar som kan hålla 96 XF64-moduler var (totalt 384 moduler; Figur 42). Även andra moduler som t.ex. XF75 kan tänkas om en högre kapacitet eller mindre fotavtryck efterfrågas.



Figur 42. UF-steget med Pentair XF64-moduler (illustrationsbild, Pentair).

Installationen av UF-steget inkluderar även 4 pumpar, 2 pumpar för backspolning, 2 blåsmaskiner och 2 CIP-pumpar för membranrengöring, samt utrustning för kemikalielagring och el/styr. Även för kringutrustning finns en redundans med minst två enheter per funktion. Elbehovet för ultrafiltrering uppgår enligt leverantörens uppgifter till ca 0,03 – 0,05 kWh/m³ och för membranrengöring används natriumhypoklorit (bas) och citronsyra (syra).

Permeat från ultrafiltreringen samlas i permeattanken som försörjer den efterföljande GAK-filterlinjen. Även backspolningsvatten tas från tanken. Permeat i tanken kan även nyttjas för olika andra behov som inte kräver en rening för andra mikroföroreningar som åstadkoms i det efterföljande GAK-filtreringen.

3.5.4.3 Aktivkolfilter (GAK)

GAK-filter dimensioneras framför allt med tanke på den hydrauliska belastningen och kontakttiden (den så kallade EBCT – Empty Bed Contact Time) som

bestämmer reaktorvolymen och hur frekvent kolet behöver bytas och ersättas med nytt eller regenererat kol. En konventionell design av GAK-filter brukar anta 20 000 BV (20 000 BV motsvarar en dos på ca 25 g GAK/m³) innan filterbyte. En långtgående förbehandling av avloppsvatten innan det filtreras genom GAK-filtret kan avsevärt öka utnyttjandegraden av filtermaterialet, vilket ökar antal BV som kan behandlas innan kolbyte (se t.ex. Baresel et al., 2017, 2021, 2022a; Edefell et al., 2019). Förbehandlingen för den planerade avancerade reningen vid Getteröverket består av en mikro- och ultrafiltrering och genererar såldes ett partikelfritt vatten för behandling i kolfiltren.

Utifrån pilotförsöken och IVL:s samlade kunskap inom området och de dimensionerande förutsättningar för den avancerade reningen som finns, väljs ett filterupplägg med tre 2-stegfilter med en filterbädd på 1,8 m och en kontakttid i varje filter på ca 10 min för Q_{medel} . Två av filterparen används vid Q_{medel} vilket betyder en filteryta på 40 m² per filter (4 × 10 m). Det tredje filterparet används både som generell redundans, vid stop i filterdrift i ett av filtren p.g.a. kolbyte, och vid behov för att öka reningseffektiviteten under vissa perioder utifall definierade reningsmål kräver detta. Reningseffekten kan ökas genom att aktivera det tredje filterparet även vid flöde som inte överstiger medelflödet, vilket ger en längre EBCT och därmed en potentiellt ökad reningseffekt. Service- och underhållsarbete för övriga delar läggs till perioder med lågflöde. Även tiden för ett kolbyte kan vid behov anpassas till perioder med lägre flöde för att garantera att allt vatten kan behandlas i den avancerade reningen.

Vid maxflödet minskar kontakttiden till ca 8,6 min i varje filter. Ytbelastningen vid medelflödet och två filterpar ligger på <8 m/h per filter och vid maxflödet och tre filterpar på 12,5 m/h.

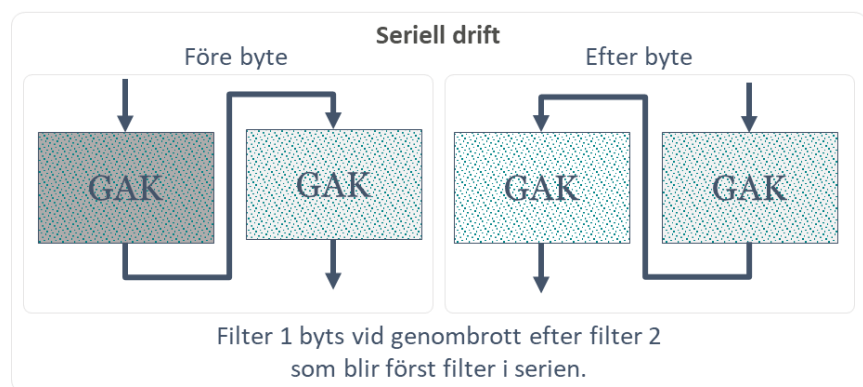
För flödet mellan de två filtren i ett filterpar installeras en pump för att säkerställa en stabil drift. Varje filterpar kan dock även driftas med endast självfall, dock kräver det en något annorlunda utformning av GAK-filtren med bl.a. högre fribord³ över filtermaterialet.

Hur många bäddvolymeter (BV) som kan behandla innan kolet behöver bytas ut har undersökts i pilotförsöken vid Getteröverket (se 3.5.2). Även med hänsyn till olika möjliga reningskravformuleringar har dessa tester visat att ett kolbyte i första filtret kan behövas först efter 100 000 behandlade BV i detta filter. En vanlig dimensionering av GAK-filter baserat på leverantörsrekommendationer utgår från 20 000 BV för enstegsfilter. Det bör noteras att detta inte gäller om PFOS-rening ska ingå och avskiljas med specifika reningsmål utöver den avskiljning som visades

³ Höjd över vattennivån

genom pilotförsöken. I det fall olika PFAS-ämnen ska avskiljas med minst 80 %, kan ett kolbyte krävas redan efter 5 000 – 10 000 BV som pilotförsöken indikerar.

Vid tvåstegs-filtrering som föreslås här, sker filterbyte endast i första filtret för att sedan byta placering av de två filterna så att det nya kolet kommer sist (se Figur 43).



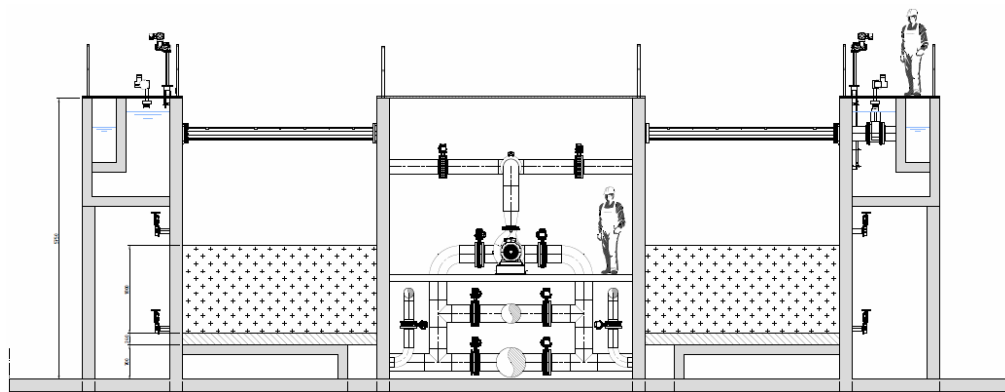
Figur 43. Schematisk bild över de två vanligaste flerfilterssystemen.

Backspolningsbehovet av filtren bedöms som låga och baseras på erfarenhet från pilotförsöken, och IVL:s erfarenheter från andra pilotförsök och kan relateras till den partikelfria vattenmatris som behandlas i GAK-filtren. Innehållet av organiska föreningar, såsom organiskt material och läkemedel, kommer att leda till en biofilmtillväxt som till slut sätter igen filtret. Även filterbäddjup och ytbelastning påverkar backspolningsbehovet p.g.a. kompaktering av filterbädden. I pilotförsöken användes det dock andra ytbelastningar och filterbäddjup. Backspolning bedöms behövas en gång per vecka i ca 30 min med en kombination av tryckluft och vattenspolning. Backspolning av olika filter sker vid olika tidpunkter och kan med fördel läggas till lågflödesperioder. Backspolning ska ske med både luft och vatten. Beroende på hur snabbt en nivåsenkning i filtren kan uppnås, tar backspolning av ett filter mindre än en timme. Backspolshastigheten med vatten föreslås här sättas till 20 – 30 m/h. Då endast ett filter backspolas åt gången kan samma utrustning användas för samtliga filter. För redundans rekommenderas två redundanta installationer för leverans av tryckluft och backspolvatten. Spolvattenpumpar placeras i utloppskanalen efter filterbassängen. Uppsamlad backspolvatten leds via ledningar till inloppskanalen till mikrofilter utan behov för extra pumpning.

Figur 44 visar en schematisk layout av GAK-filterpar med ett serviceutrymme i mitten som innehåller rörgalleri för filtrerat vatten, backspolvatten och tryckluft, samt pumpar. Tömning av filtermaterialet sker på utsidan av filtren direkt mot tankbil. Fyllning sker via fyllningsledningar från toppen av filtret. Maskinutrustning (blåsmaskin, backspolpumpar, ejektorpumpar) el och styr m.m.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

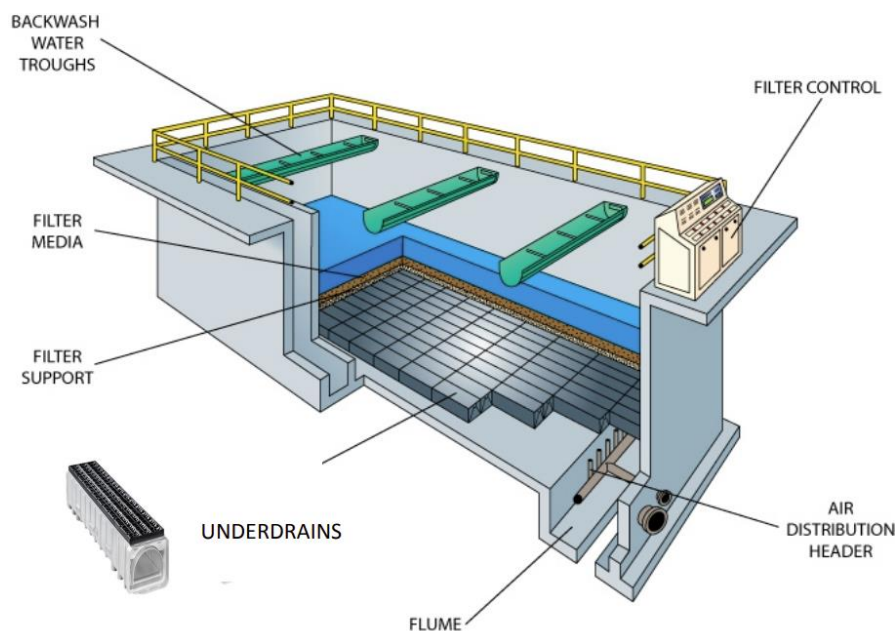
placeras i separata utrymmen bredvid GAK-filtren. Flera ritningar och detaljer finns i bilagan.



Figur 44. Schematisk ritning av utformning av 2-stegs GAK-filtren.

Beroende på vilket GAK-material som rekommenderas av leverantören kan filterbotten utformas på olika sätt. Vid ett GAK med en storlek som inkluderar partiklar $<0,6$ mm rekommenderas ofta ett multimediafilter, alltså ett lager av grus på ca 30 cm på filterbotten för att undvika att GAK passerar filtret. Om dräneringsbotten används i stället för dysor, så kan även ett extra "mediahållare" användas som supplement på dräneringsbotten. Båda lösningarna fungerar bra, men behöver tas hänsyn till i dimensioneringen eftersom placering (nivån) av GAK-tömningen påverkas, och även den totala filterbäddhöjden påverkas. I den föreslagna designen räknas det med en dräneringsbotten inklusive mediahållare (Figur 45).

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 45. Schematisk uppbyggnad av GAK-filter med både dräneringsbotten inklusive mediahållare (Leopold® Type XA™ Underdrain) och stödmaterial.

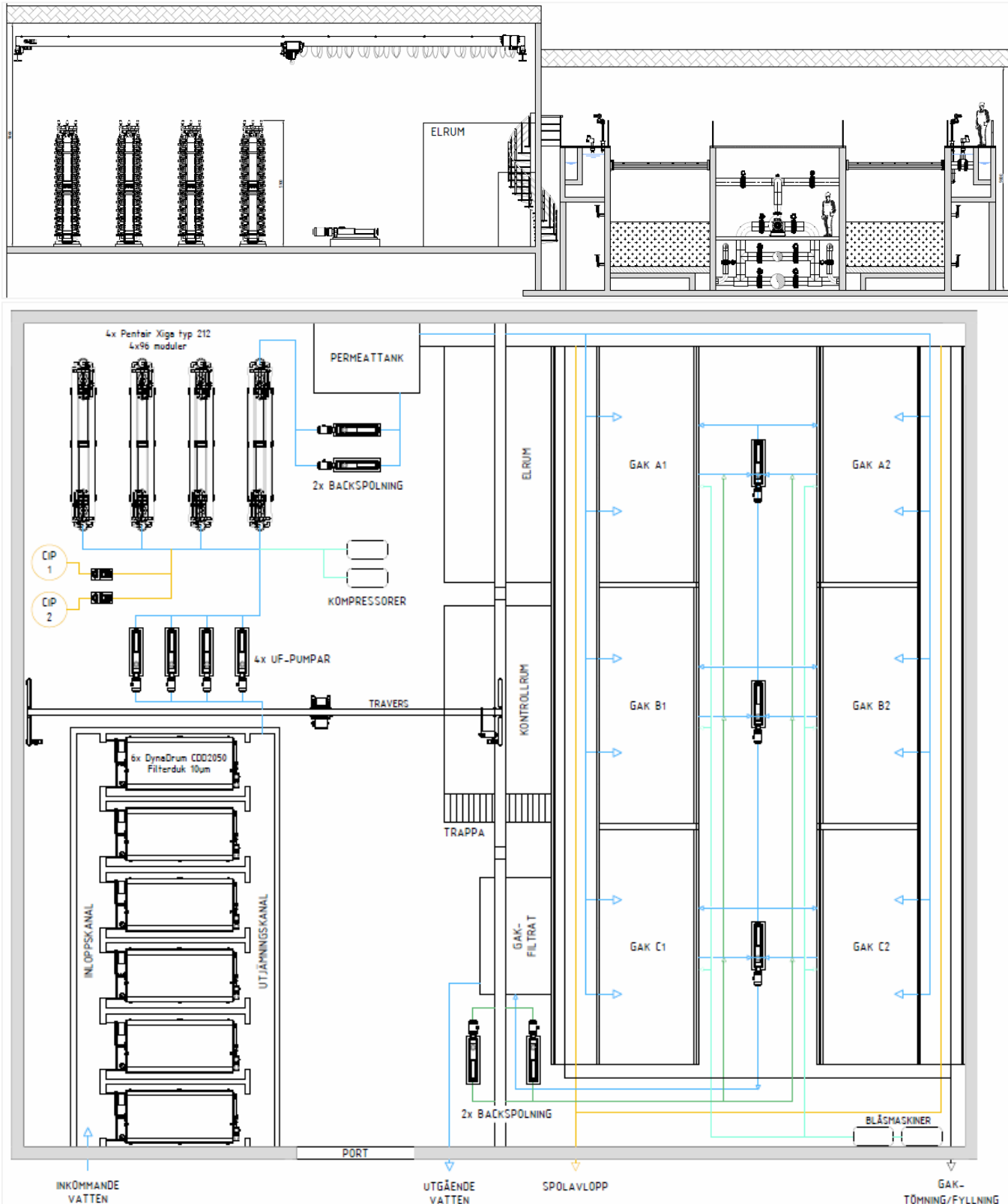
Tömning av förbrukat GAK sker via öppningar i varje filtercell strax över filterbotten som ansluts till en ejektorpump som drivs med vatten från inloppskanalen till den avancerade reningen. Erfarenheter från andra GAK-anläggningar visar att en viss manuell insats kan behövas för tömning av GAK-rester. Tömning och hämtning kan ske direkt med tankbil och även leverans av nytt/reaktiverat kol sker via tankbil direkt till filtren med hjälp av ejektorpumpar.

3.5.5 Processbyggnad för avancerad rening

Figur 46 visar hur den föreslagna processlösning bestående av mikrofiltrering, ultrafiltrering och 2-stegs aktivkolfilter kan placeras i en ny processhall som är på samma yta som byggnaden som ska ersättas (se Figur 38). Den nya processbyggnaden föreslås delas in i två ihopkopplade sektioner för att underlätta drift och underhåll, men även för att underlätta vattnets väg genom de olika processdelarna. Vänstra delen av processhallen utrustas med en travers och industriport för enklare hantering av membranmoduler och all maskinutrustning. De tre GAK-filterparen placeras delvis under markytan i den andra sektionen av processbyggnaden. Samtliga installationer, elrum, kontrollrum och lagringsutrymmen som krävs finns tillgänglig i samma processbyggnad. GAK-filtren är tillgängliga från samtliga sidor, rörgalleriet i mitten och via trappor.

Sektionsindelningen med olika nivåer av byggnaden och utrymmen delvis under markytan kan även tänkas gynna integreringen i Vision Getteröverket.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



Figur 46. Principritning för processbyggnaden för avancerad rening (plan och sektion, se även bilagan).

3.5.6 Investerings- och driftkostnader

Tabell 14 visar en sammanställning av de framtagna kostnadsposterna uppdelade på investeringskostnader för principförslaget med den tekniska utformningen som beskrivs ovan. Det bör noteras att vissa antaganden och kostnadsposter som beskrivs i 3.5.1 ingår i denna kostnadsberäkning. Det framtagna principförslaget har dessutom inte tagit hänsyn till platsspecifika optimerade lösningar även om hänsyn har tagits till de övergripande förutsättningarna på plats.

Som kostnadsberäkningen visar dominerar installationskostnaderna av en ny processhall (ca 50 Mkr). Den avancerade filtreringen med MF och UF står för de största kostnaderna. Driftkostnaden domineras av elförbrukning framför allt för den avancerade membranfiltreringen och förbrukning av aktivt kol. I tabellen anges ett årlig GAK-behov baserat på pilotstudien som visar att 100 000 BV kan uppnås, men även behovet vid tillämpning av traditionell design med 20 000 BV anges i parentes. Exemplet visar att driftkostnaden kan påverkas avsevärt genom en optimering av GAK-förbrukningen. Totalt uppgår årskostnader till ca 15,6 Mkr enligt tabellen, vilket innebär en specifik reningskostnad för den avancerade reningen på ca 2,30 kr/m³, baserat på medelflödet.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
 Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Tabell 14. Kostnadsposter för UF-GAK teknikkombinationen.

Kostnadspost	Kostnad		Kommentar
	Total	per år	
Investeringskostnader – omräknat beroende på livslängd			
Bygg- & anläggningsarbeten	60,96 Mkr	2,37 Mkr/år	- markarbeten, ledningsschakt - processbyggnad, travers, trappor, etc. - trumfilterceller, filtrattankar, kanaler - GAK-filterceller - antagen livslängd 50 år
VVS	12,25 Mkr	0,62 Mkr/år	- 25 % av maskin - antagen livslängd 30 år
Maskin	55,90 Mkr	4,68 Mkr/år	- mikrofilter och ultrafilter - pumpar, kompressorer - maskin, filterbotten till GAK-filter - antagen livslängd 15 år
El och automation	19,56 Mkr	1,64 Mkr/år	- 35 % av maskin - antagen livslängd 15 år
Oförutsett	29,85 Mkr	1,16 Mkr/år	- ca 20 % av bygg, VVS, maskin, el/automation
Byggherrekostnader	30,44 Mkr	1,18 Mkr/år	- 17 % av kostnadsposter ovan
Summa investeringskostnader:		ca 11,65 Mkr/år	
<i>Annuitet (A) för årliga avskrivningar är beräknats med en ränta på 3 %</i>			
Kostnadspost	Behov	Kostnad	Kommentar
Driftkostnader (per driftår)			
Elförbrukning	1 700 MWh/år	2,07 Mkr/år	- drift MF och UF inkl. backspolning - drift GAK inkl. backspolning, pumpning - 1,22 kr/kWh
Filtermaterial (GAK)*	34 t/år (170,8 t/år)	0,43 Mkr/år (2,14 Mkr/år)	- Extern produktion/reaktivering - 100 % reaktiverat GAK, 11 kr/kg - 1,5 kr/kg transport - Byte vid 100 000 BV (20 000 BV)
Tvättkemikalier UF	4 t/år 4 t/år	0,03 Mkr/år	- NaOCl (7,2 %): 3000 kr/t - Citronsyra (12 %): 3600 kr/t
Driftpersonal	1650 tim/år	1,1 Mkr/år	- främst GAK-byte, övervakning/kontroll - 675 kr/tim
Drift & underhåll		0,25 Mkr/år	- satt till 2 % av investeringskostnad
Summa driftkostnader:		ca 3,88 (5,60) Mkr/år	
Total årskostnad:		15,55 (17,25) Mkr/år	
Specifik reningskostnad:		2,28 (2,52) kr/m³	

* siffror i parentes motsvarar värden för traditionell design med 20 000 BV

Med en rörlig avgift för taxan för vatten och avlopp i Varberg kommun på ca 26,25 kr/m³ skulle det innebära en ökning på ca 9 % av dagens avgift. Att den specifika reningskostnaden hamnar på en över 2 kr/m³ beror delvis på att den avancerade reningen dimensionerats för maxflödet $Q_{max} = 1\,500\text{ m}^3/\text{h}$ som kan hanteras i dagens biologiska process. Detta görs framför allt med tanke på den mycket känsliga och påverkade recipienten. Den avancerade reningen är alltså dimensionerad för en kapacitet som är nästan dubbelt så hög som medelflödet till Getteröverket ($Q_{medel} = 780\text{ m}^3/\text{h}$), vilket påverkar investeringskostnaderna avsevärt. Eftersom det är just investeringskostnaderna i form av avskrivningar som dominerar de årliga kostnaderna, står dessa kostnader också för ca 75 % av den specifika kostnaden.

Det bör noteras att om en avancerad rening krävs utifrån kraven enligt förslaget till nya avloppsdirektivet, så eftersträvar direktivet också en full kostnadstäckning enligt det utvidgade producentansvaret. Om detta producentansvar endast ska omfatta läkemedelsrester eller även andra mikroforenningar är dock ännu oklart.

Implementeringen av den avancerade tekniska lösningen med både avancerad membranfiltrering och GAK-filter skulle motivera att eftersträva en delvis kostnadstäckning via återanvändning av det producerade vattnet för olika ändamål. Ett lägre pris än för dricksvatten till användaren skulle kunna skapa en win-win situation som ger lägre kostnader till kunder och samtidigt en delvis kostnadstäckning för den extra reningen.

Att den avancerade reningen baserat på den föreslagna teknikkombinationen UF-GAK även kommer att kunna ta bort olika PFAS-ämnen bör också beaktas i samhällsekonomiska vinster, även om dessa är svårt att kvantifiera. I studien av Malovanyy et al. (2023) visas dock ett exempel för en samhällsekonomisk analys av PFAS-rening som med en mycket förenklad modell beräknade de samhällsekonomiska kostnader för PFAS-emissioner till miljön till 5,4 – 82 tkr/g PFOS_{ekv} baserat på resultat från lakvattenrening. Dessa siffror är såklart osäkra eftersom det finns utmaningar framför allt p.g.a. att kunskapsläget ännu är begränsat och att det finns många osäkerheter bl.a. kring toxicitet av olika PFAS-ämnen och bedömningen av miljörisker vid utsläpp av PFAS. Med detta sagt blir det svårt att värdera de oklara riskerna i monetära termer. Samma gäller för utsläpp av läkemedelsrester och fenoler i övrigt. Med utgående medelhalt för PFOS på 4,3 ng/l i outspätt utgående avloppsvatten (Tabell 5) och medelflödet på 780 m³/h så släpps årligen ca 30 g PFOS till recipienten via utgående avloppsvatten från Getteröverket. Enligt skattningen ovan skulle följaktligen en borttagning av ca 50 % av PFOS, ge en samhällsekonomisk vinst på ca 80 tkr – 1,23 Mkr årligen. Att minst 50 % av PFOS kan tas bort bedöms som ett rimligt antagande för långtidsdrift av GAK-filter utifrån de genomförda pilottesterna. Exemplet visar att även den samhällsekonomiska vinsten vid implementeringen av tekniklösningen UF-GAK skulle innebära en delvis ”kostnadstäckning” för teknikimplementeringen. Det bör beaktas att andra samhällsekonomiska vinster p.g.a. borttagning av andra PFAS-ämnen än PFOS, läkemedelsrester och fenoler inte är inkluderade i denna kostnadsuppskattning.

3.5.7 Miljöpåverkan och arbetsmiljö

Resursförbrukningen, och därmed miljöpåverkan av den avancerade reningen med teknikkombinationen UF-GAK, är framför allt relaterade till UF-driften och GAK-behovet. Vid produktion av GAK krävs stora resurser i form av både utgångsmaterial och energi (naturgas). Kommersiell GAK-produktion och regenerering sker utanför Sverige vilket, innebär att det används fossila bränslen i större uträkning för energiproduktion, vilket resulterar i större miljöpåverkan jämfört med om svensk energimix används. Energiförbrukningen leder också till

en annan typ av miljöpåverkan än klimatpåverkan, såsom eutrofiering och försurning. Att tillverkning och regenereringen sker utanför Sverige innebär också att transport av ny och förbrukad GAK behöver ske, vilket ger en miljöpåverkan. Jämfört med den övriga miljöpåverkan står dock transportererna för endast en mindre del av den totala miljöpåverkan. Att principförslaget utgår från att reaktiverat GAK ska användas innebär att miljöpåverkan från GAK-användningen kan reduceras från ca 7 t CO_{2ekv}/ton till ca 2 t CO_{2ekv}/ton.

Att inte använda fossila material för produktion av GAK utan i stället förnyelsebara material såsom kokosnötskal eller slamkol vore idealiskt och skulle utgöra ett alternativ som kan minska miljöpåverkan ytterligare. Däremot är framför allt reningskapaciteten av dessa GAK begränsande, vilket beror på att porositeten för dessa material skiljer sig från andra fossila koltyper. I dessa är porositeten alldeles för tät, vilket försvårar en avskiljning av målsubstanser i ett vatten som också innehåller löst organiskt material. En del ämnen adsorberar inte ens till ytan i porerna på grund av porstorleken. Denna vedertagna kunskap kunde också illustreras praktiskt i piloten (se pilotresultaten i 3.2).

Energibehovet vid drift av GAK-filtrer är låg och energi krävs endast vid lyft av vatten och för backspolning. Dock finns en klimatpåverkan på grund av en ökad energianvändning för den avancerade membranfiltreringen. Svensk elmix har dock med 90,4 kg CO_{2ekv}/MWh (Svenskt Vatten, Klimatberäkningsverktyg för VA-anläggningar, version 2 juni 2023) en relativt låg miljöpåverkan som kan minskas ännu mer om endast förnyelsebar el används för den avancerade reningen. Tillverkningen av membran och kemikalier för rengöringen har också en miljöpåverkan som måste beaktas. Användningen av vanliga kemikalier som natriumhypoklorit och citronsyra i syfte att rengöra membranerna, orsakar också en miljöpåverkan som jämfört med andra poster kan anses försumbar.

Byggfasen kommer generera en miljöpåverkan p.g.a. resurser som behövs för betongarbeten, etablering av processhallen, maskinutrustning och byggtransport. Jämfört med miljöpåverkan från driftfasen brukar dock påverkan från byggfasen och relaterad resursförbrukning utgöra en avsevärt mindre del av totala miljöpåverkan.

Inga särskilda arbetsmiljöaspekter behöver beaktas vid arbete med GAK-filtrer förutom vid hanteringen av filtermaterial vid filterbyte. Hantering av tvättkemikalier och trycksatt system i samband med UF-anläggningen kräver hänsyn för en säker hantering.

3.5.8 Framtida utvecklingspotential

Utöver det beskrivna principförslaget finns även flera utvecklings- och optimeringsmöjligheter för att öka kapaciteten av den avancerade reningen eller för att minska resursförbrukningen och därmed kostnader och miljöpåverkan av

den avancerade reningen. Dels pågår en kontinuerlig teknikutveckling och nya tätare membran utvecklas kontinuerligt för att minska t.ex. energibehovet. Nedan listas några mer övergripande utvecklingsmöjligheter för det presenterade teknikförslaget.

3.5.8.1 Lokal/regional regenerering

En lokal eller regional reaktivering av förbrukat GAK t.ex. i samverkan med andra avloppsreningsverk i regionen rekommenderas på sikt. Kretslopp och Vattens anläggning för reaktivering på Alelyckan kan stå som möjlig samarbetspartner eller som en referensanläggning, något som även Gryaab har använt för en initial bedömning för en kolreaktivering på Ryaverket (Ernst et al., 2020).

3.5.8.2 Slambaserat GAK

Vivab har i förstudien även inkluderat tester med ett aktivt kol som baserades på Getteröverkets slam och som betecknades FoU 21 i ovan beskrivna pilottester. Även om försöken visade att kolet inte uppnår samma reningseffektivitet och livslängd som den kommersiella fossila GAK (FS400 och GPP20), så visar resultaten ändå på potentialen för slamkol, men det kvarstår utveckling och eventuellt andra applikationsområden än rening av avloppsvatten. Pilottesterna visade att slamkolet inte kunde rena bort PFAS från avloppsvatten och om en PFAS rening ska åstadkommas kan således filterlösningen aldrig enbart bygga på slamkol. Medan tidigare försök att använda aktivt kol producerat från reningsverkslam i filter har kämpat med den fysiska stabiliteten av slamkol (Baresel et al., 2017), var detta inte något som observerades i denna pilotstudie. Genom att utforska slamkol som en potentiell alternativ adsorbent för vattenrening, kan det öppna upp för ännu mer betydande kostnadsbesparingar och miljövänligare alternativ i den avancerade reningsprocessen. Att GAK-filtren i UF-GAK kombinationen "skyddas" av UF-stegets kan vara en viktig förutsättning för tillämpning av ett slamkol av mindre kvalitet i GAK-filtren. Forskning och teknologisk utveckling inom området biokol kan potentiellt leda till betydande förbättringar både ur ett ekonomisk och ett miljömässigt perspektiv. Eventuella framtida krav på slamhantering och cirkularitet kan göra slamkolalternativet ännu mer intressant att utforska vidare.

3.5.8.3 Komplettering med ozon

Även en komplettering av UF-GAK teknikkombination med ozonbehandling kan vara en tänkbar framtida komplettering till den presenterade teknislösningen. Eftersom detta skulle medföra ytterligare ett reningssteg med ökad komplexitet, kostnader och miljöpåverkan, är detta endast relevant vid behov av en ökad reningsgrad, eller andra omständigheter såsom kostnadsutveckling av aktivt kol. IVL:s erfarenheter med kombinationen ozon och GAK sträcker sig tillbaka till omfattande jämförande pilottester med bl.a. O₃-GAK och O₃-sandfilter (Baresel et al., 2015). Införande av ozonering med låg dos före ett GAK-filter har visat att kolfiltrets livslängd kan förlängas. Huruvida detta är en ekonomisk investering beror dock på lokala förhållande p.g.a. höga investeringskostnader i en

teknikkombination. Även miljöpåverkan av en kombination är oklar och beror på livslängden av kolet.

Utöver en tänkbar implementering av en "traditionell" ozonering kan även en teknisk lösning utan behov för extra utrymmen för en kontaktreaktor tänkas. I motsats till den traditionella ansatsen att tillsätta en ozon-luft-blandning som kräver både en överförings- och reaktionsvolym, så möjliggör den alternativa lösningen att ett gasfritt vattenflöde övermättat med ozon (<300 mg O₃/l) produceras, som sedan blandas med avloppsvatten till ett homogent gasfritt flöde som inte avger ozon till processluften. Den tekniska lösningen som t.ex. tillhandahålls av Air Liquide kallas Ozone Strong Water (OSW) och separerar de olika stegen för ozonöverföring till vattenfasen, inblandning och reaktion. Detta gör att kontakttiden kan minskas och en kontakttank med restozonbehandling faller bort. Vid Getteröverket kunde t.ex. befintliga processvolymerna efter eftersedimenteringen, som inte nyttjas, användas för inblandningen. I den ovan beskrivna tekniska lösningen leds vatten från dessa processvolymerna till den nya processbyggnaden för den avancerade reningen.

Tekniken med OSW bedöms även kunna ge en effektivare ozoninblandning som de jämförande testerna med traditionell ozonbehandling med tallriksluftare vid ARV Duisburg-Vierlinden har indikerat. Där observerades det lägre ozonbehov på ca 20 %, vilket berodde på att en effektivare inblandning jämnas ut av ozonförluster i OSW-reaktorn. Att syret, som inte omvandlas till ozon, är trycksatt för denna teknik, öppnar även upp för en användning i luftningsbassänger, vilket kan ge en ytterligare resursoptimering.

3.5.8.4 Användning av begagnade membran

Möjligheten att använda begagnade UF-membran från MBR-processer, som i framtiden kommer finnas i ett stort antal, bör också undersökas. Det bedöms att ett membranbyte vanligtvis inte sker p.g.a. att själva membranens livslängd är uppnått utan p.g.a. andra skäl såsom utmattningsav andra dealar (Andersson et al., 2023). En återanvändning efter en kvalitetssäkring och eventuella kompletterande åtgärder, skulle inte bara minska investeringskostnaden dramatiskt, utan även minska miljöpåverkan från UF-installationen. Pilottester rekommenderas för att undersöka detta alternativ. Vanliga UF-membran som används, eller kommer användas i Henriksdal, Himmerfjärdsverket och Margretelund ARV, samt eventuellt Nya Sjölanda, inkluderar Veolias ZeeWeed 500D (0,04 µm, outside-in filtration). Även nästa generation 500EV (Evolve), som har tätare placering av membrantrådarna och fler moduler per kassett, kan bli aktuella. Modulerna har ökat membranytan så att ett 50 % högre flöde kan renas utan att öka fluxet. Även om 500-serien har större porstorlek så bedöms dessa vara mer än tillräckligt för den tilltänkta UF-GAK applikationen (som dock behöver utredas).

I principförslaget ovan för den avancerade reningen vid framtidens Getteröverket användes trycksatt membran och den tekniska lösningen skulle således behöver anpassas till nedsänkta membrankassetter i bassänger. Detta skulle även påverka utformningen av den nya processbyggnaden för den avancerade reningen.

3.5.8.5 Tekniskt vatten

När vattnet som behandlats i den avancerade reningen återförs till gamla klorering (som finns kvar efter dagen eftersedimentering) kan dessa volymer användas för pumpning av vattnet till olika användningsområden både inom Getteröverket och utanför. Här avses mest användning som tekniskt vatten t.ex. för kommunal användning såsom spolning av gator, bevattning, spolvatten inom Getteröverket, men även för att täcka industriella behov. Om tekniskt vatten ska ersätta dricksvatten, där en dricksvattenkvalitet inte behövs, skulle det ge en bättre lokal cirkulär vattenhantering och skapa förutsättningar för en eventuell partiell kostnadstäckning av den avancerade reningen.

Processutrymmen vid gamla klorering skulle även kunna nyttjas för en komplettering med en UV-behandling av det vattnet som ska återanvändas, ifall detta skulle krävas eller skapa acceptans för en utökad återanvändning.

3.5.9 Alternativ implementering av O₃-GAK

Även om ingen detaljerad utredning av O₃-GAK har genomförts avseende en implementering vid Getteröverket och inom projektet, så ges nedan en förenklad bedömning av en sådan tänkbar fullskaleimplementering baserat på IVL:s samlade erfarenheter och på de genomförda pilottesterna här nedan.

En tänkbar fullskaleanläggning med ozonbehandling kan potentiellt ersätta UF-steget, medan de andra processdelarna enligt implementeringsförslaget för UF-GAK kvarstår. Med en medeldos på 4 g O₃/m³ (ca 0,4 mg O₃/mg DOC), och en kontakttid på 20 min, såsom pilottesterna genomfördes, skulle en kontakttank på 260 m³ behövas. Om kontakttanken kan placeras i den förslagna nya processbyggnaden kan ett vattendjup på 6 m ge ett ytbehov på 43 m². Kontakttanken skulle således kunna placeras i byggnaden på samma plats som UF-steget (och därmed ersätta detta) och resterande yta är sedan tillräcklig för placeringen av ozongeneratoren, ozondestruktorn, kylning och tillhörande övrig utrustning. Då vattendjupet i reaktorn kan uppgå till minst 6 m kan ozonet induceras både via injektorer och tallriksluftare i kontaktreaktorn. Om ozonet produceras från flytande syre (LOX - Liquid Oxygen) kan LOX-tankar placeras utanför den nya processbyggnaden för en enkel leverans och hantering. Vid produktion av syre på plats med hjälp av pressure swing adsorption (PSA), kan även denna placeras intill den nya processbyggnaden.

Den föregående mikrofiltreringen skulle utformas på samma sätt som beskriven i 3.5.4.1 och visas i Figur 46. Även GAK-filteranläggningen skulle dimensioneras på

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

samma sätt som beskriven i 3.5.4.3, dock vid 10 minuter EBCT som i pilottesterna och med endast 50 % av filterstorleken, alltså tre filterceller i stället för sex. Utifrån ett optimalt resursutnyttjande av filtermaterialets kapacitet, skulle det dock vara fördelaktigt att köra filtren som 2-stegsfilter även i en eventuell teknislösning med O₃-GAK. I så fall skulle filteranläggningen dimensioneras på samma sätt som beskrivet i 3.5.4.3.

I en förenklade kostnadsberäkning kan det antas samma kostnad för den nya processbyggnaden och mikrofilteranläggningen och samma kostnad för GAK-filteranläggningen och en skattad kostnad för ozonanläggningen inkl. utrustning för introduktion av ozonet i vattnet, kontaktreaktor och annat tillhörande utrustning på ca 12 Mkr. Detta skulle ge en totalinvesteringskostnad på ca 180 Mkr och årliga avskrivningar på ca 8,6 Mkr vid en ränta på 3 %. Driftkostnader drivs fortfarande framför allt av kolförbrukningen som enligt pilottesterna antas ligga högre än för UF-GAK lösningen. Dessutom tillkommer el för ozonproduktion och flytande syre. Med den antagna medeldosen för ozoneringen och prognostiserade 40 000 behandlade bäddvolymmer innan ett filterbyte krävs. Med samma priser för reaktiverat GAK och el som i kostnadsberäkningen för UF-GAK och aktuella priser för LOX kan en årlig driftkostnad skattas till ca 7,3 Mkr. De sammanlagda årliga kostnader för O₃-GAK alternativet skulle således uppgå till ca 16 Mkr/år och den specifika reningskostnaden hamnar på ca 2,30 kr/m³.

Att kostnader hamnar i samma storleksordning som för teknikkombinationen UF-GAK kan delvis förklaras med att GAK-behovet i UF-GAK-alternativet beräknas ligga på en avsevärt lägre nivå än för O₃-GAK-alternativet. Dessutom uppstår samma höga investeringskostnader för mikrofiltreringen, GAK-filter och processbyggnaden som i UF-GAK alternativet. Det bör dock beaktas att kostnadsberäkningen för O₃-GAK alternativet är kraftig förenklat och kan endast ge en indikation snarare än ett beslutsunderlag. Kolkonsumtionen, som är stor drivande kostnad, är också baserat på ett grovt antagande jämfört med hur konsumtionen kan antas vara för UF-GAK. Detta framför allt då pilottester med O₃-GAK inte kunde köras lika länge som pilottester med UF-GAK lösningen.

Att årliga kostnader hamnar på en relativ hög nivå för båda alternativen beror som tidigare diskuterat framför allt på att den avancerade reningen dimensionerats för ett maxflöde. Att den specifika reningskostnaden ligger på >2kr/m³ beror också på att kostnader beräknas under hänsynstagandet av det faktiska medelflödet och inte maxflödet som den avancerade reningen dimensionerats för.

4 Slutsats och rekommendationer

Den övergripande målsättningen av projektet är att minimera oönskade negativa effekter på vattenmiljön vid Getteröverket, den Inre Farehammarsviken. De negativa miljöeffekterna beror på utsläpp av behandlat avloppsvatten från Getteröverket. Mot bakgrund av detta har projektet kompletterat tidigare kartläggningar av olika mikroföroreningar vid Getteröverket och i närliggande och relevanta recipientpunkter. Projektet har även fortsatt tidigare startade pilotförsök med en teknikkombination av ultrafiltrering och aktivt kol (UF-GAK) och genomfört kompletterande pilottester med teknikkombinationen ozon och aktivt kol (O₃-GAK). De kompletterande pilottesterna med UF-GAK har utgjort underlag för ett initialt förslag till fullskaleimplementering av en avancerad rening vid Getteröverket.

Baserat på de presenterade resultaten och tillhörande diskussioner har projektet kommit fram till följande huvudslutsatser och rekommendationer:

- Den kompletterande kartläggningen av mikroföroreningar fastslår ännu en gång att Getteröverket är den dominerande transportvägen för läkemedelsrester till Monarkdiket och Inre Farehammarsviken.
- För andra mikroföroreningar såsom PFAS-ämnen och fenoler som återfanns i recipienten, finns även andra uppströms källor mellan Getteröverkets utsläppspunkt och Naturum, varav en del antas vara Lassabackadeponin och industriområdet öster om järnvägen.
- Lakvattnet från Bösarp deponi bidrar med höga PFAS-halter till inkommande avloppsvatten och därmed belastningen vid Getteröverket. PFAS-flödet utgör dock en låg andel relativt det totala PFAS-flödet vid Getteröverket och har beräknats till att omfatta mindre än 5%.
- Ursprunget till de höga inkommande halterna av bisfenol A bör utredas vidare eftersom det också kan leda till höga halter i utgående renat vatten, trots att detta ämne förväntas renas till viss del över anläggningen. Föreslagna bedömningsgrunder för bisfenol A har identifierats som en sannolikt stor framtida utmaning. Uppströmsåtgärder bör därför implementeras om möjligt. Analyser uppströms Getteröverket visade att lakvattnet från Bösarp deponi inte är en bidragande källa, medan sjukhusavloppet hade tydligt förhöjda halter av bisfenol A halter utifrån den första förstudien. Även i andra recipientprovpunkter vid industriområdet och Lassabackadiket kunde kraftigt förhöjda halter av bisfenol A konstateras.
- Den uppdaterade påverkansbedömningen av de ytvattenförekomster som tagit hänsyn till både befintliga och föreslagna framtida gränsvärden visar på ett tydligt åtgärdsbehov för att förbättra vattenförekomsten status t.ex. med

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

avseende för diklofenak och PFOS men även andra organiska mikroföroreningar.

- Genomförda pilottester med teknikkombinationen UF-GAK har visat att en kraftig reduktion av läkemedelsrester och andra mikroföroreningar i utgående avloppsvatten kan åstadkommas vid Getteröverket. Långtidsförsöken har även visat att den valda processdesignen kan åstadkomma denna effektiva reduktion med en signifikant mindre resursförbrukning av framför allt GAK-material, relativt traditionell design med GAK-filter.
- Pilotförsöken har dessutom visat att teknikkombinationen UF-GAK kan avlägsna virus och åstadkomma en log 4 reduktion av bakterier som finns i utgående renat avloppsvattnet från Getteröverket. De få analyser som gjordes indikerade att även antibiotikaresistensen i avloppsvattnet kunde tas bort med UF-GAK lösningen.
- Pilotförsöken visade att en stabil drift kan åstadkommas med UF-GAK och att det finns möjligheter att påverka både den totala miljöpåverkan och kostnader för den avancerade reningen.
- Kompletterande pilottester med teknikkombinationen O₃-GAK har visat att en bra reduktion av läkemedelsrester kan åstadkommas redan vid relativ låga ozondoser i denna teknikkombination. Dock har dessa tester inte kunnat köras under lika lång tid som UF-GAK försöken och en långtidsutvärdering med bedömning av resursförbrukningen har därför inte varit möjligt i samma uträkning som för UF-GAK försöken.
- Principförslaget som togs fram inom projekt visar på en möjlig fullskaleimplementeringen av UF-GAK vid Getteröverket inklusive tekniska lösningar.
- Kostnadsbedömningen av en avancerad rening vid Getteröverket med UF-GAK tyder på en extra kostnad på ca 2,3 kr/m³.
- Även en grov kostnadsberäkning för en möjlig fullskaleimplementering av O₃-GAK vid Getteröverket indikerar en extra kostnad på ca 2,3 kr/m³. Även om ozonbehandling generellt sett är billigare i investeringen än UF, så bedöms kostnader för GAK-filtersteget vara högre då inte samma livslängd av det aktiva kolet som i UF-GAK lösningen bedöms kunna uppnås.

En användning av det renade vattnet efter den avancerade reningen och en bedömning av samhällsekonomiska vinster p.g.a. den PFOS-rening som åstadkoms diskuteras i samband med kostnadsberäkningen.

För en framtida fullskaleimplementering anges även flera möjliga optimerings- och utvecklingsaktiviteter som kan minska både kostnader och miljöpåverkan som uppstår genom implementering av den avancerade reningen.

5 Referensförteckning

Andersson S. L., Andersson S., Baresel C. 2023. [MBR-tekniken – utmaningar och möjligheter för svenska avloppsreningsverk. Praktiska erfarenheter och framtidsutsikter baserat på nio år av pilotverksamhet och en fullskaleimplementering.](#) SVU-rapport 2023-8. IVL-rapport B2468. Stockholm: Svenskt Vatten.

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 B2444.

Baresel, C., Karlsson, L., Malovanyy, A., Thorsén, G., Goicoechea Feldtmann, M., Holmquist, H., Dalahmeh, S., Ahrens, L., Winkens Pütz, K. 2022b. PFAS – hur kan svenska avloppsreningsverk möta utmaningen? - Kunskapssammanställning och vägledning för VA-aktörer kring PFAS. Svenskt Vatten, SVU-rapport 2022-7, IVL Svenska Miljöinstitutet B2447.

Baresel, C., Malovanyy, A., Karlsson, L., Bornold, N., Habagil, M., Keucken, A. 2021. [Förstudie – Läkemedelsrening vid Getteröverket i Varberg – Utredning om behov och möjligheter för en utökad rening av avloppsvatten från mikroföroreningar.](#) IVL Svenska Miljöinstitutet och Vatten & Miljö i Väst AB, rapport U6531.

Baresel, C., Ek, M., Harding, M., Magnér, J., Allard, A.-S., Karlsson, J. 2017. [Kompletterande tester för en resurseffektiv avancerad rening av avloppsvatten.](#) Delrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2287.

Baresel, C., Dahlgren, L., Nikolic, A., de Kerchove, A., Almemark, M., Ek, M., Harding, M., Ottosson, E., Karlsson, J., Yang, J. 2015. [Reuse of treated wastewater for nonpotable use \(ReUse\) – Final Report.](#) IVL Swedish Environmental Research Institute, report B2219.

Betsholtz, A., Juárez, R., Svahn, O., Davidsson, Å., Cimbritz, M., Falås, P. 2022. Ozonation of ¹⁴C-labeled micropollutants – mineralization of labelled moieties and adsorption of transformation products to activated carbon. Water Research 221, 118738. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118738>

BioCell Analytica 2021. Kemiska föroreningar i avloppsvatten – nya innovativa analysmetoder. Biocell Analytica White Paper.

Ernst, G., Tumlin, S., Neth, M 2020. D1909 Läkemedelsrening - Förstudie av alternativ för läkemedelsrening på Ryaverket. Gryaab.

FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Escher, B.I., Allinson, M., Altenburger, R., Bain, P.A., Balaguer, P., Busch, W., Crago, J., Denslow, N.D., Dopp, E., Hilscherova, K., Humpage, A.R., Kumar, A., Grimaldi, M., Jayasinghe, B.S., Jarosova, B., Jia, A., Makarov, S., Maruya, K.A., Medvedev, A., Mehinto, A.C., Mendez, J.E., Poulsen, A., Prochazka, E., Richard, J., Schifferli, A., Schlenk, D., Scholz, S., Shiraiishi, F., Snyder, S., Su, G., Tang, J.Y.M., Burg, B. van der, Linden, S.C. van der, Werner, I., Westerheide, S.D., Wong, C.K.C., Yang, M., Yeung, B.H.Y., Zhang, X., Leusch, F.D.L. 2014. Benchmarking Organic Micropollutants in Wastewater, Recycled Water and Drinking Water with In Vitro Bioassays. Environ. Sci. Technol. 48, 1940–1956. <https://doi.org/10.1021/es403899t>

EU Commission 2022a. Proposal for a revised Urban Wastewater Treatment Directive. Publication date 26 October 2022.

https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-amending-water-directives_en

EU Commission 2022b. Proposal for a directive amending the water framework directive, the groundwater directive and the environmental quality standards directive. Publication date 26 October 2022.

https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-amending-water-directives_en

Franke, V., Schäfers, M.D., Joos Lindberg, J., Ahrens, L. 2019. Removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from tap water using heterogeneously catalyzed ozonation. Environmental Science: Water Research & Technology 5(11): p. 1887-1896.

Jarošová, B., Bláha, L., Giesy, J.P., Hilscherová, K. 2014. What level of estrogenic activity determined by in vitro assays in municipal waste waters can be considered as safe? Environment International 64, 98–109.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.009>

Habagil, M., Petersén, A., Gunnarsson, A., Svedberg, S., Keucken, A., Baresel, C., Malovanyy, A. 2020. [Läkemedelsrening vid Ullared reningsverk - Utredning om behov och möjligheter för utökad rening av avloppsvatten från mikroföroreningar](#). Vatten & Miljö i Väst AB (VIVAB), IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport C468.

Hoyer, K., Höglind, L., Sjölin, A., Cimbritz, M., Falås, P., Juárez Cámara, R., Svahn, O., Kragh Andersen, J., Berg Olesen, C. 2022. Kvartär rening vid Sjölunda ARV - Ozonering vid höga bromidhalter och regenerering av aktivt kol.

Kase, R., Javurkova, B., Simon, E., Swart, K., Buchinger, S., Könemann, S., Escher, B.I., Carere, M., Dulio, V., Ait-Aissa, S., Hollert, H., Valsecchi, S., Polesello, S., Behnisch, P., Di Paolo, C., Olbrich, D., Sychrova, E., Gundlach, M., Schlichting, R., Leborgne, L., Clara, M., Scheffknecht, C., Marneffe, Y., Chalon, C., Tusil, P., Soldan,

P., Von Danwitz, B., Schwaiger, J., Palao, A.M., Bersani, F., Perceval, O., Kienle, C., Vermeirssen, E., Hilscherova, K., Reifferscheid, G., Werner, I. 2018. Screening and risk management solutions for steroidal estrogens in surface and wastewater. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 102, 343–358.

<https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.02.013>

Magnér, J., Fång, J., Sandberg, J., Örtlund, L. 2017. [Utveckling av analysmetoder inklusive detektionsgränser. Delrapport SystemLäk projekt.](#) IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2286.

Malovanyy, A., Hedman, F., Travar, I., Bivall, E. 2023. [Rening av PFAS-förorenat lakvatten med jonbytesprocessen: pilotförsök med regenerering.](#) Avfall Sverige rapport 2023:09.

Soltermann, F., Abegglen, C., Götz, C., von Gunten, U. 2016. Bromide sources and loads in Swiss surface waters and their relevance for bromate formation during wastewater ozonation. *Environmental Science and Technology* 50:9525-9834.

Stalter, D., A. Magdeburg, M. Wagner, Oehlmann, J. 2011. Ozonation and activated carbon treatment of sewage effluents: removal of endocrine activity and cytotoxicity. *Water Res*, 2011. 45(3): p. 1015-24.

Stapf, M., Schumann, P., Völker, J., Miehe, U. 2017. Studie über Effekte und Nebeneffekte bei der Behandlung von kommunalem Abwasser mit Ozon. 10.13140/RG.2.2.10585.42083.

von Sonntag, C., von Gunten, U., 2012. *Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment: From Basic Principles to Applications.* IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780400839>

Vecitis, C. D., Park, H., Cheng, J., Mader, B. T., Hoffmann, M. R. 2009. Treatment technologies for aqueous perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA), *Front. Environ. Sci. Eng. China*, 3, 129–151.

Yang, X., Huang, J., Zhang, K., Yu, G., Deng, S., Wang, B. 2014. Stability of 6:2 fluorotelomer sulfonate in advanced oxidation processes: degradation kinetics and pathway. *Environ Sci Pollut Res Int* 21, 4634–4642. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2389-z>.

Ågerstrand, M. 2019. Derivation of PNECs for 39 pharmaceutical substances. Department of Environmental Science and Analytical Chemistry (ACES), Stockholm University, ACES report 36.

6 Bilagor

- 6.1 Ritningar principförslag
- 6.2 Analysresultat mikroforeningar
- 6.3 Resultat från aktivitetstester
- 6.4 Rapport biofilmkaraktisering
- 6.5 Rapport för antibiotikaresistens

**STOCKHOLM**

Box 21060, 100 31 Stockholm

GÖTEBORG

Box 53021, 400 14 Göteborg

MALMÖ

Nordenskiöldsgatan 24
211 19 Malmö

KRISTINEBERG

**(Center för marin forskning
och innovation)**

Kristineberg 566
451 78 Fiskebäckskil

SKELLEFTEÅ

Kanalgatan 59
931 32 Skellefteå

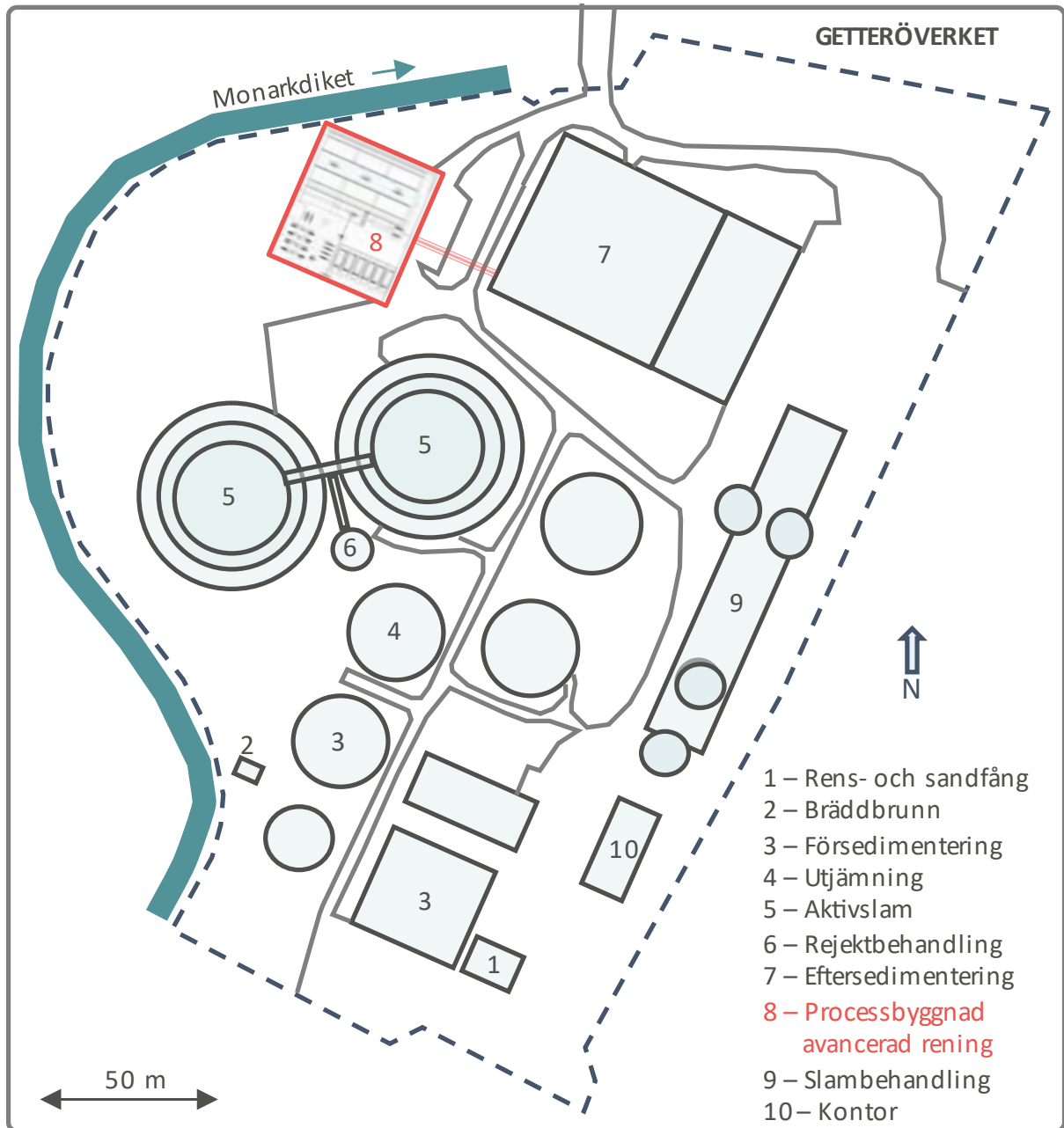
BEIJING, CHINA

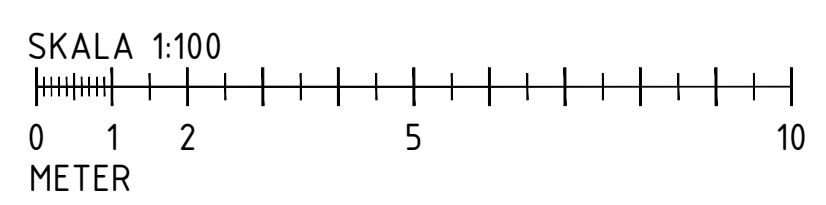
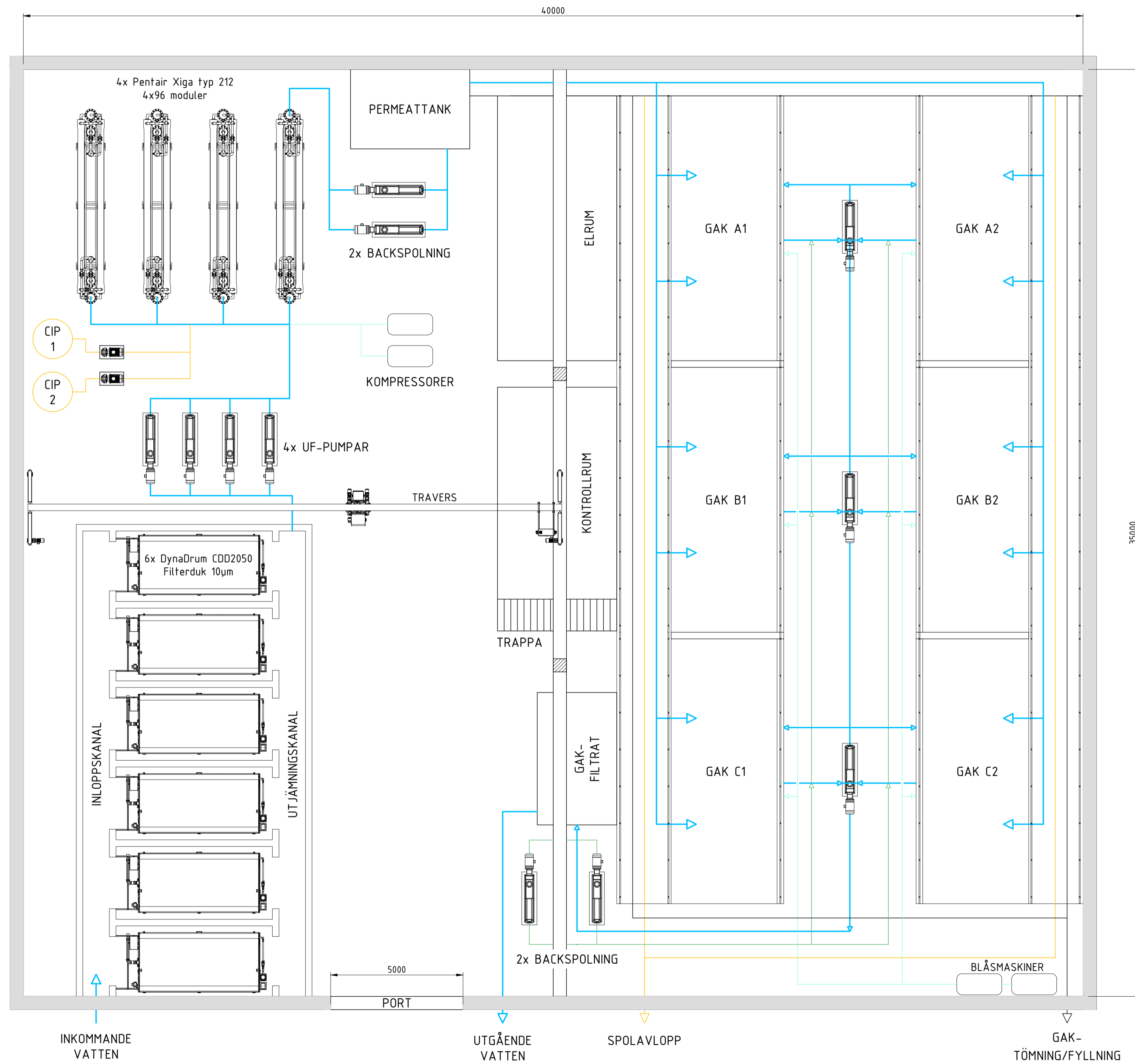
Room 612A
InterChina Commercial Building No.33
Dengshikou Dajie
Dongcheng District
Beijing 100006
China

© IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET AB | Tel: 010-788 65 00 | www.ivl.se

Bilaga 6.1 Ritningar principförslag

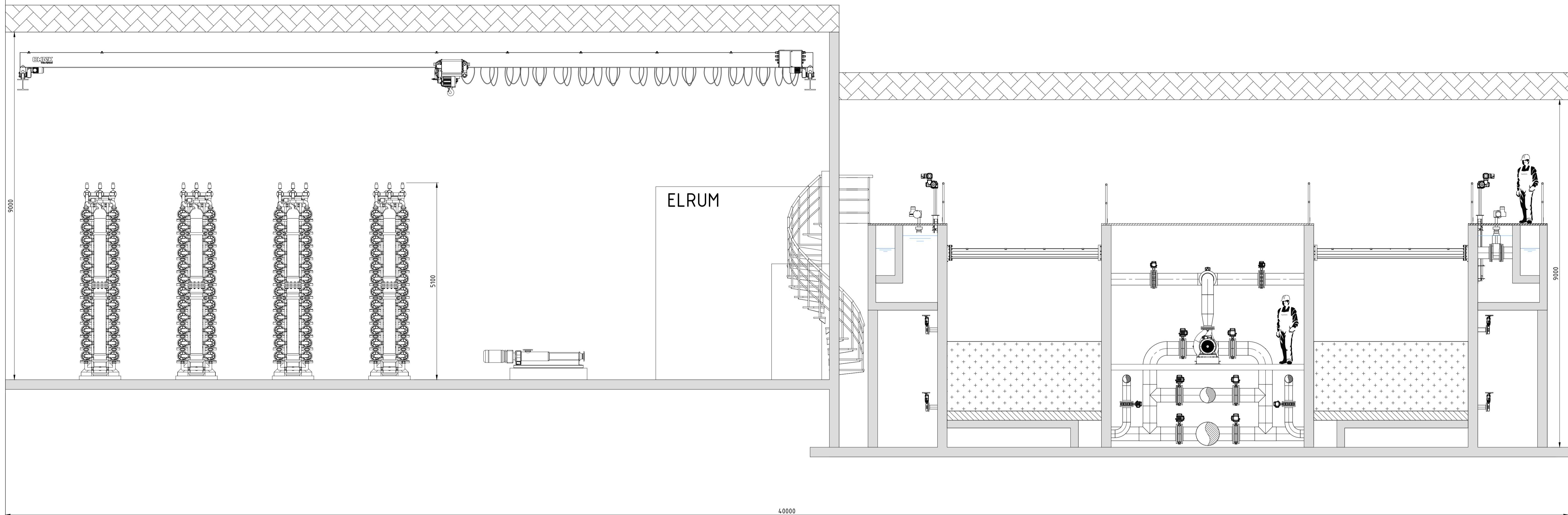
Figur 1. Områdeskarta med processbyggnaden för den avancerade reningen.





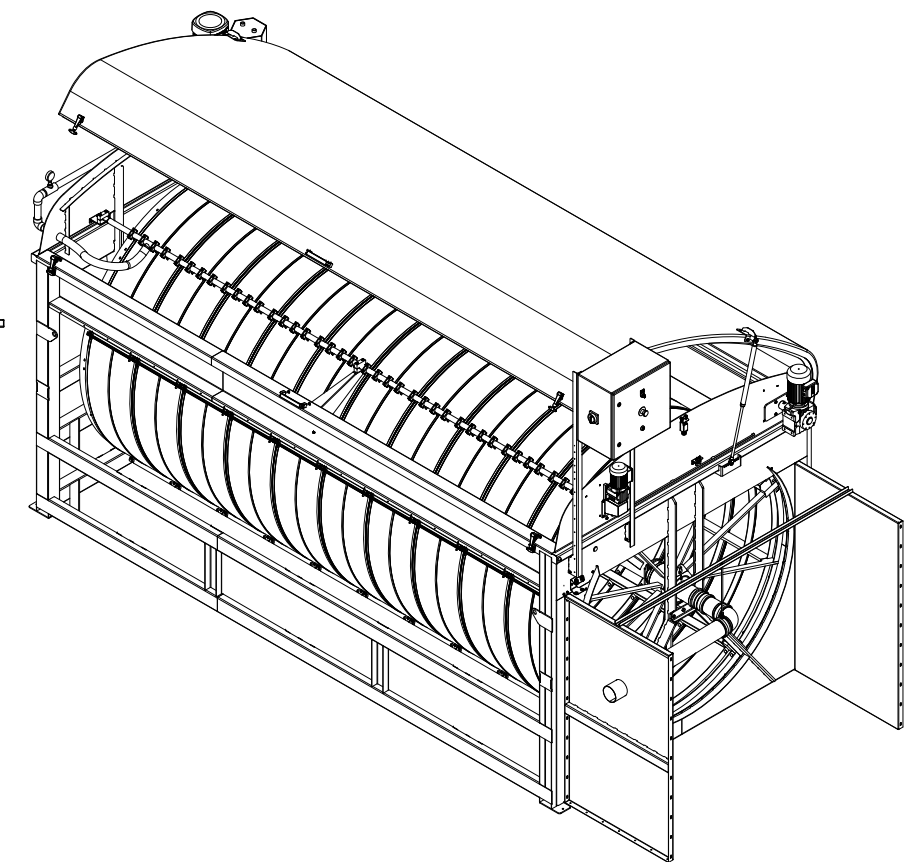
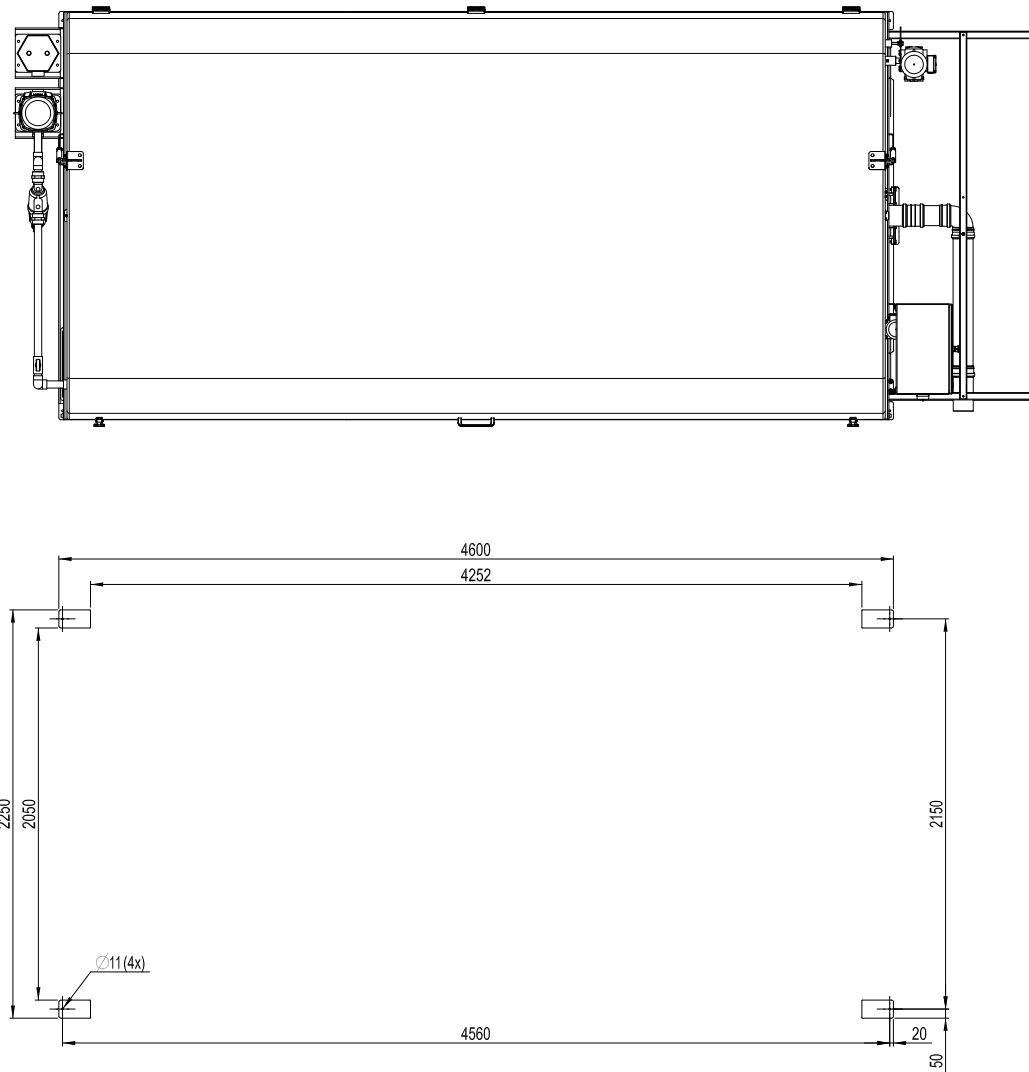
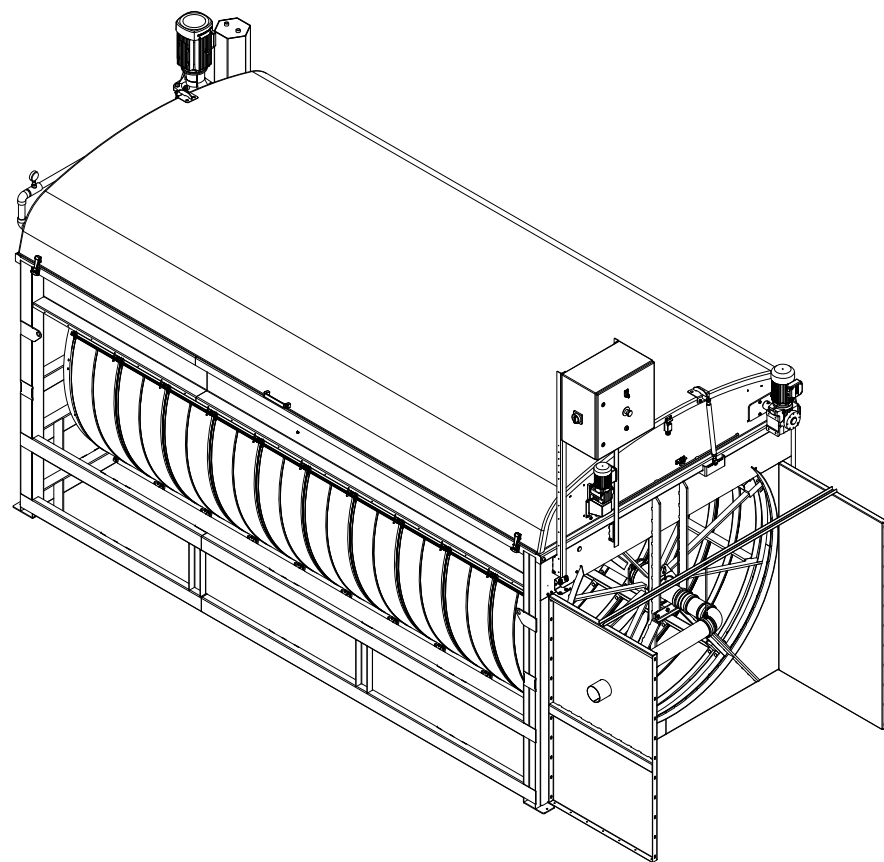
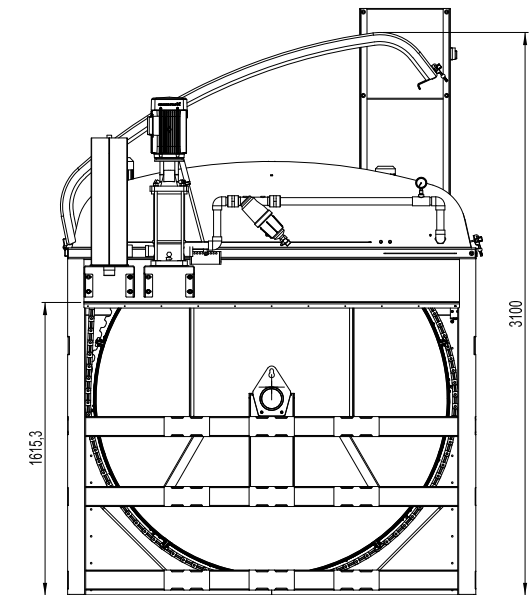
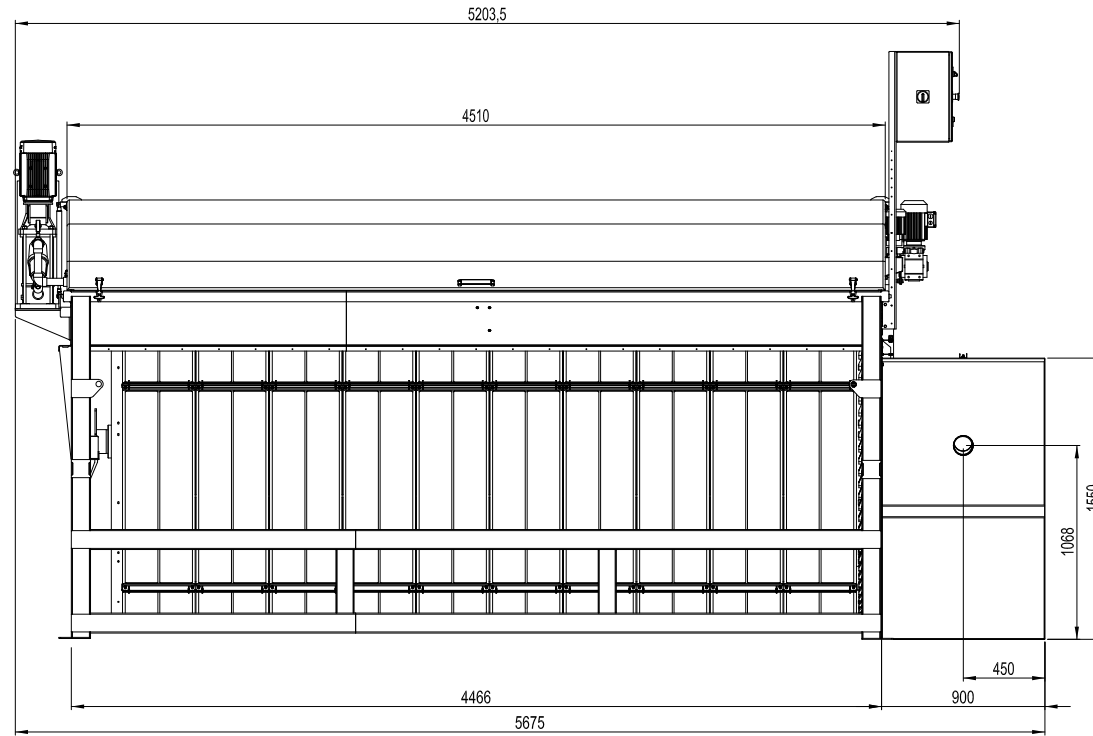
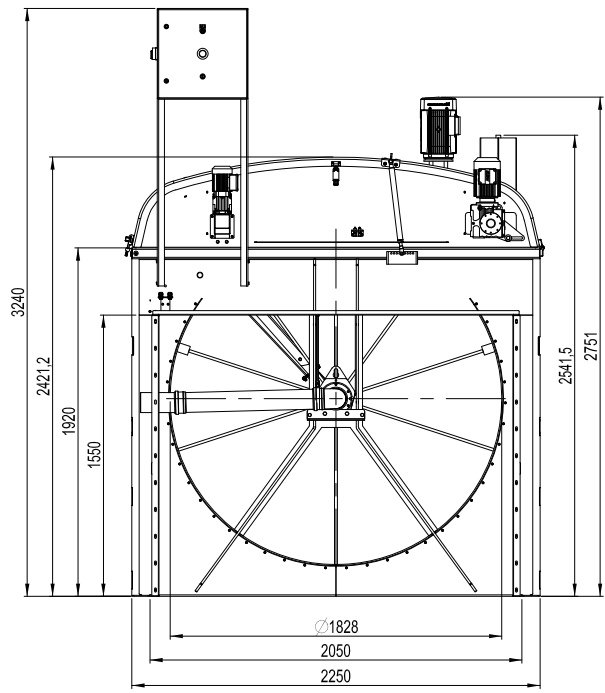
REV	DATUM	SIEN	BESKRIVNING
IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET			
INGENJÖRSFIRMAN RÖRKRAFT			
KONSTRUKTÖR	-	GRANSKAT	-
GRANSKAT	-	UPPDRAGSLEDARE	-
ARBETSNUMMER	3012301	DATUM	2023-09-27
FORMAT	A1	SKALA	1:100
RELATIONSHANDLING	PRINCIPRITNING		
ARBETSPLAN	GETTERÖVERKET		
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-		
GRANSKNINGSHANDLING	PLAN		
REVISIONSNUMMER	3012301-02-K1-2	BLAD	REV
		-	-

RELATIONSHANDLING	3012301	2023-09-27	A1	1:100
ARBETSPLAN	PRINCIPRITNING			
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	GETTERÖVERKET			
GRANSKNINGSHANDLING	-			
REVISIONSNUMMER	3012301-02-K1-2	BLAD	REV	
		-	-	



REV	DATUM	SIGN	BESKRIVNING
IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET			
KONSTRUKTÖR		GRANSKAT	
-		-	
GÖDKRANT		ÖFFERANSLEDARE	
-		-	
ARBETSOMRÅD	DATUM	FORMAT	SKALA
3012301	2023-09-29	A1	1:50
RELATIONSHANDLING	PRINCIPRITNING		
ARBETSRIKTNING	GETTERÖVERKET		
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-		
GRANSKNINGSHANDLING	SEKTION		
PRELIMINÄR HANDLING	BLAD	REV	
3012301-02-K2-2	-	-	

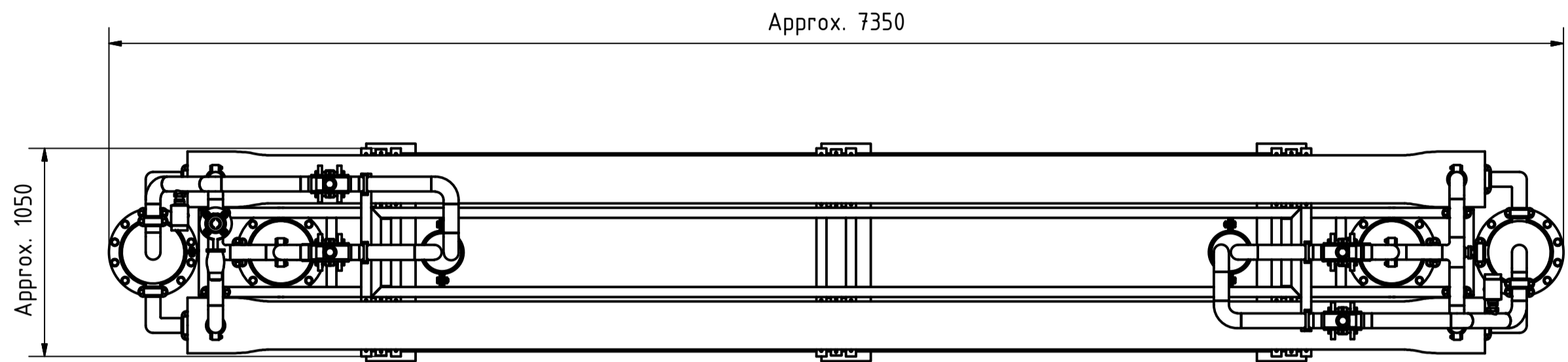
Rev.	Revision / Change	Date	Sign.
3	First Release	2018-05-15	EB



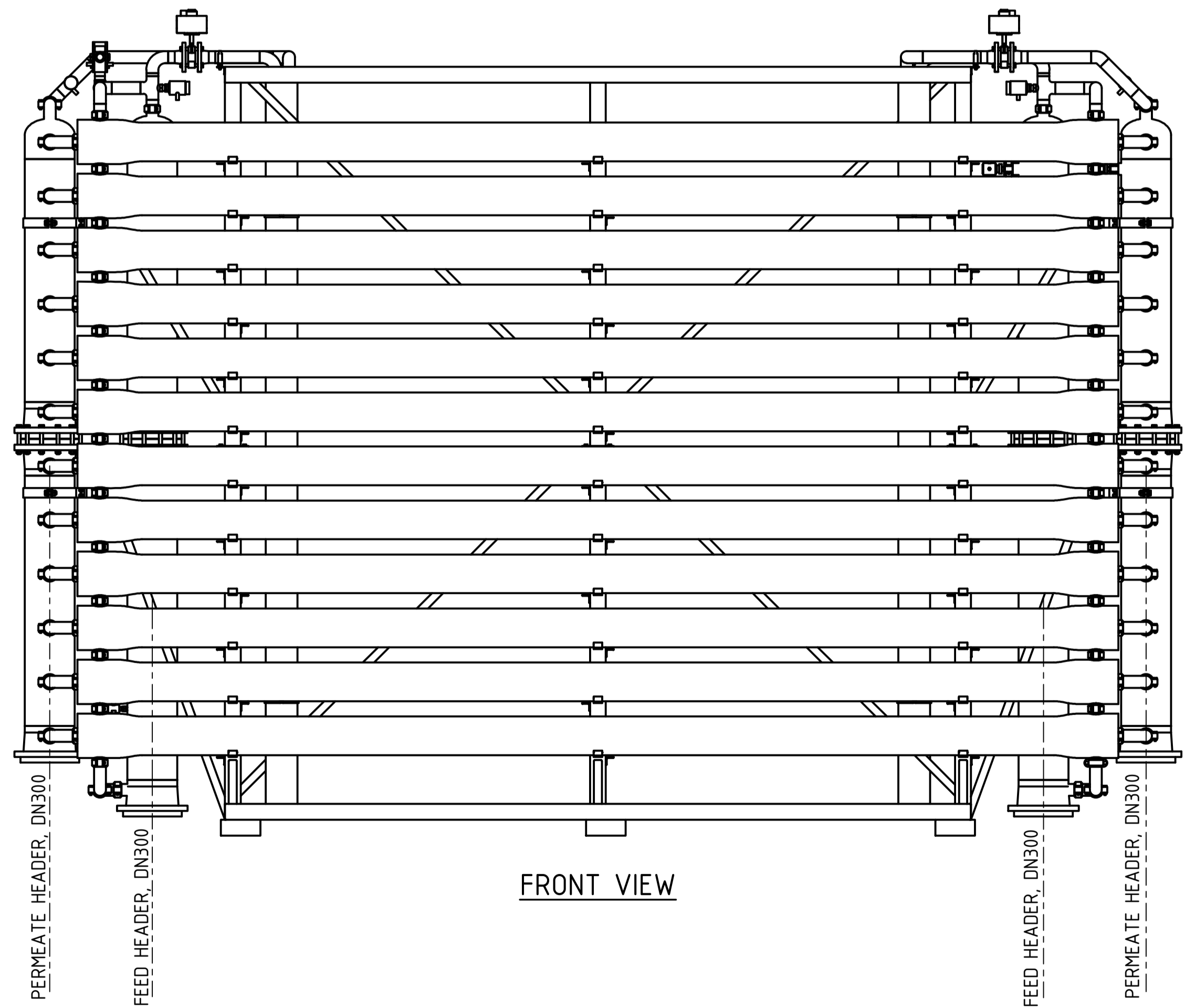
NORDIC WATER	DynaDrum 20 Dimensional Drawing	Drawn	Designed
		NR	FBE
Project	CDD 2050-BBA	Date	Scale
		2018-05-15	1 : 20
Customer	Drawing number	Production Group	
		Assembly	
	DD77022	Module	
		Dimensional Drawing	
		Revision	Sheet
		3	1 / 1

Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications acc. to SS-ISO 2768-1-mK. Other measures acc. to digital shape model. All welding according to ISO 5817:2007. Chamfer all sharp edges.

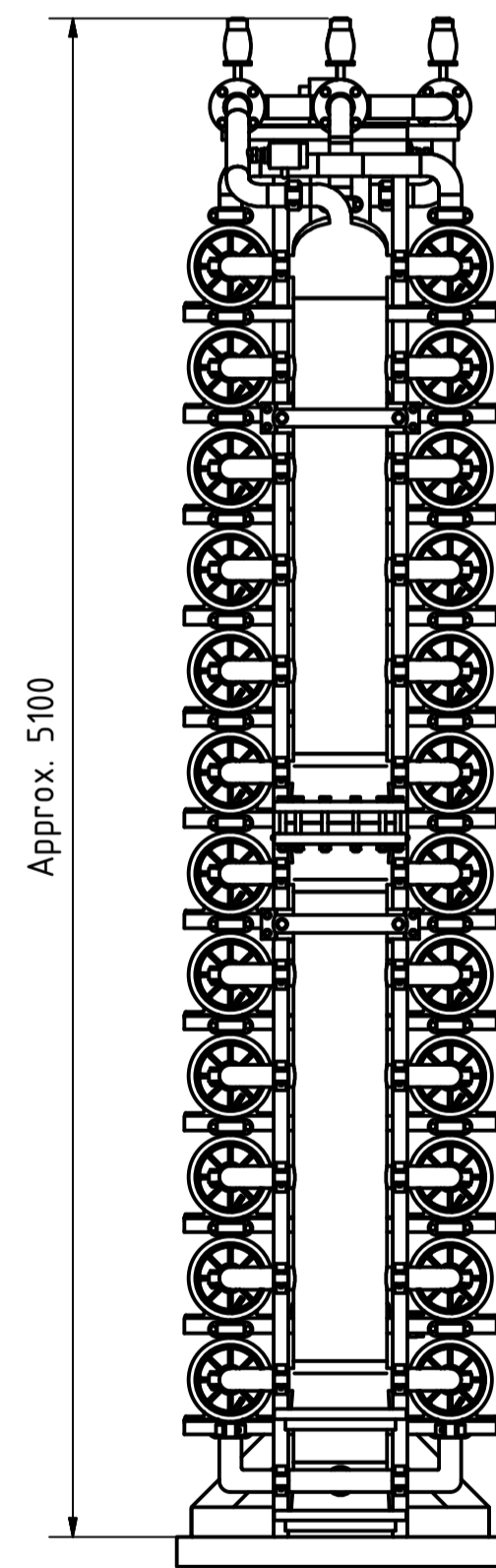
This design and drawing is the property of Nordic Water Products AB. Sweden and protected under international copyright law. The design and drawing is developed solely for use in a project where Nordic Water Products AB supplies the equipment. It shall not be copied, altered or used for any other purpose than this. Any misuse will be prosecuted.



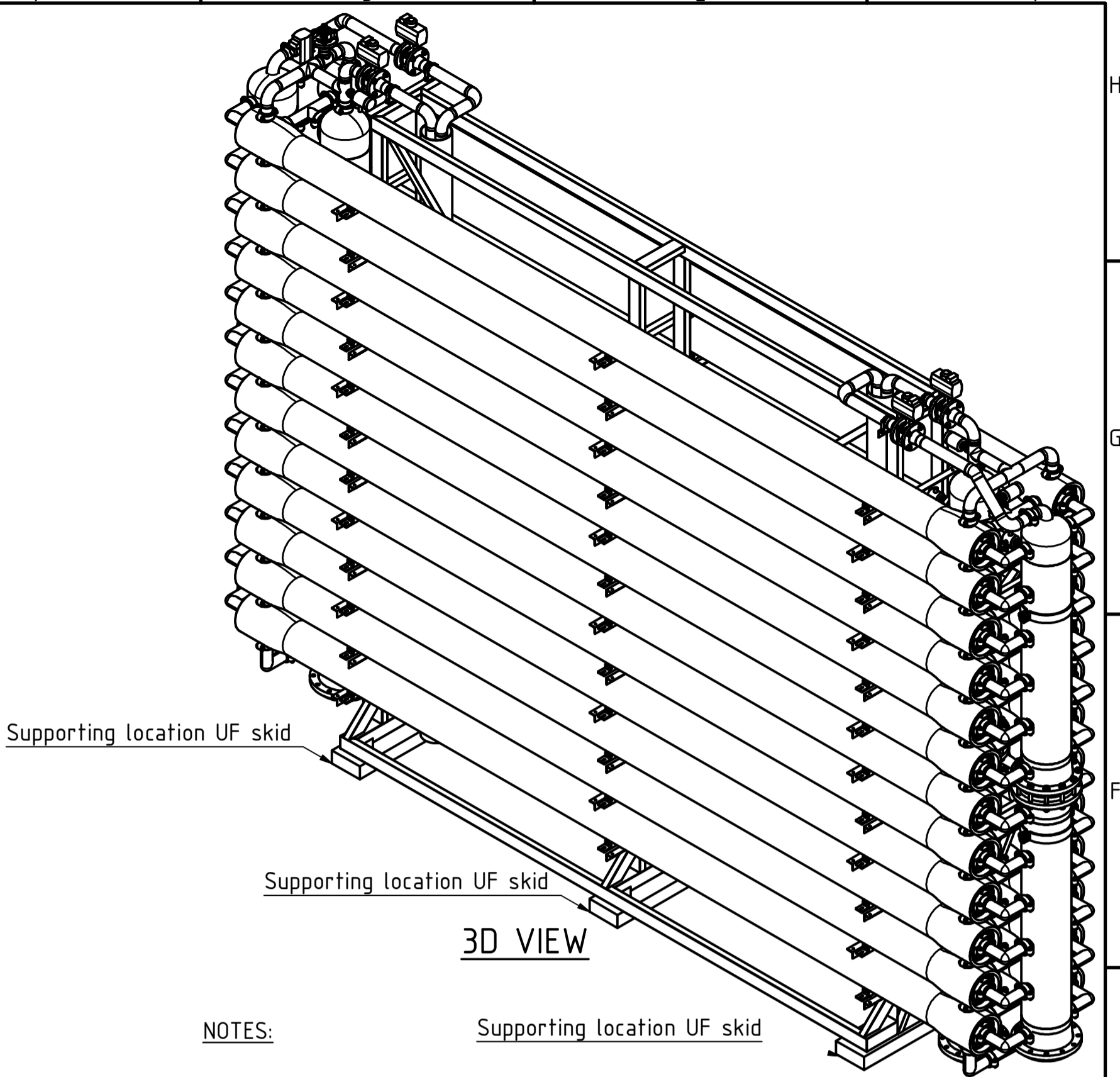
TOP VIEW



FRONT VIEW



SIDE VIEW



3D VIEW

FOR INFORMATION ONLY

NOTES:

Supporting:

- Dimensions of supporting are for indication only.

Connections:

- Flanged according DIN2501 PN 10.
- Connections to UF skid must be without tension or stress.
- Connected piping must have independent support and not be supported on the UF Skid.
- Drain outlet must be free draining before entering sewer.

Water hammer/Surge:

- Water hammer is not allowed in the UF skid.
- Surge / negative pressures during both static and dynamic skid operation is not allowed.

Temperatures during operation:

- Ambient temperature : 0 - 40°C (NON-FREEZING)
- Temperature feed and backwash water : 0 - 40°C (NON-FREEZING)

Pressures:

- Maximum working pressure in installation : 8 bar(g) (@40°C)
- Pressure Air Integrity Test : 1 bar(g)
- Maximum pressure air on field panel : 8 bar(g)
- Maximum test pressure : 9 bar(g)

Materials:

- Membrane skid piping : PE-100 / GRP
- Frame : Coated Steel / Stainless Steel (optional)

Air Quality:

- Air quality for airflow integrity test to be at least ISO-8573 -1, class 1/3/1 (oil/water/particles).
- Air to local field panel must be at least ISO-8573-1, class 2/3/2 (oil/water/particles).

Loads:

- Lifting weight approx. : 3400 kg
- Empty weight (full installed) approx. : 6600 kg
- Operational weight (full installed and filled with water) approx. : 12000 kg

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	D01	First Issue	28-9-2011	N.a.
	D02	Update	15-10-2011	RDE
	D03	Update	16-11-2012	RDE
	D04	Update	29-1-2014	RDE

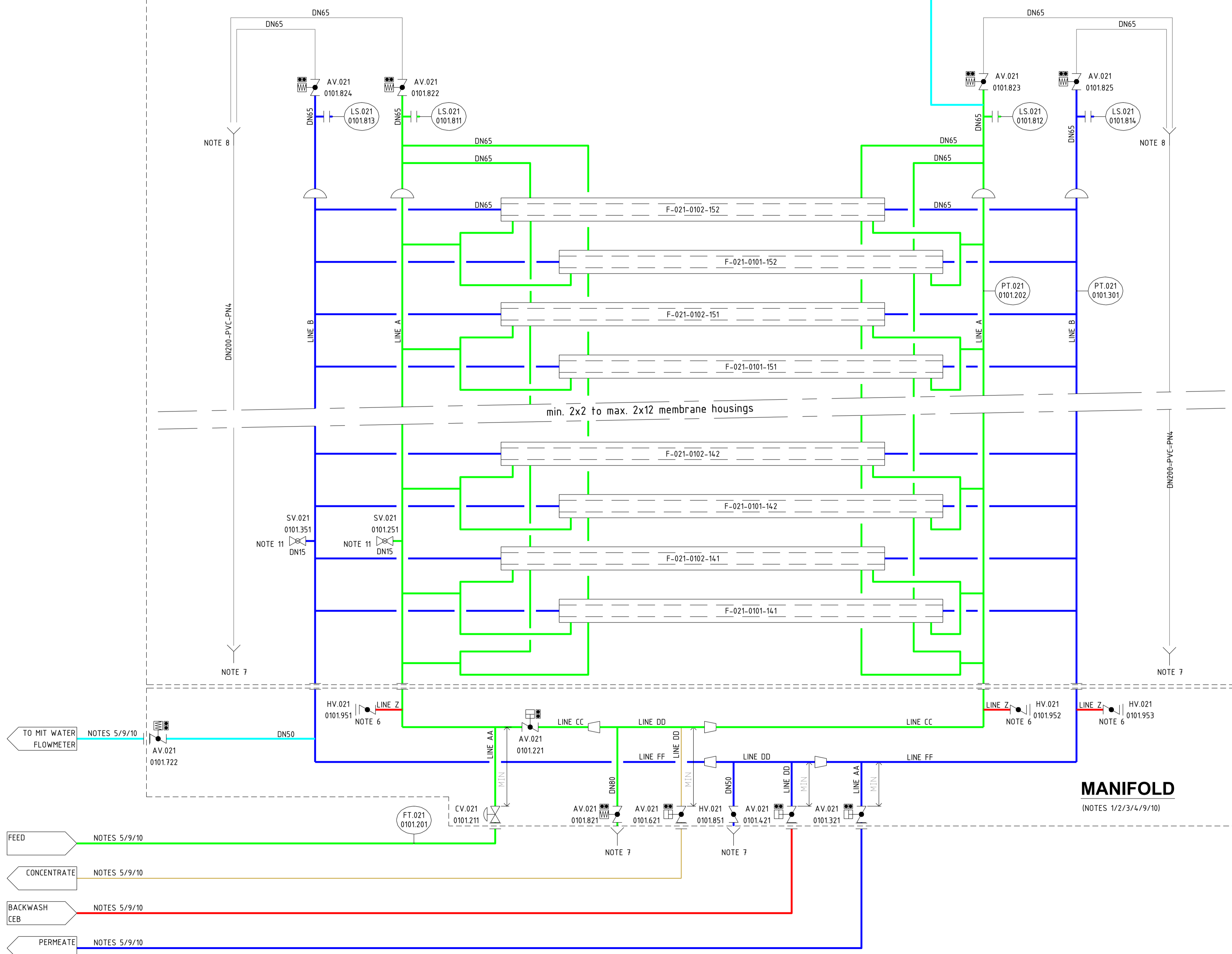
Pentair Water Process Technology BV
 Marssteden 50 - 7547 TC Enschede - The Netherlands
 P.O. Box 741 - 7500 AS Enschede - The Netherlands
 T +31 (0)53 42 87 000 - F +31 (0)53 42 87 001
 E pentairpt@pentair.com - I www.pentair.com

Client: -	Date first issue: 28-9-2011	
Project: Horizontal dead-end	Drawn by: ROV	Scale: Sheet 1 of 1
Drawing number: Horizontal dead-end 55_64-212B-2200	Checked by: FMO	Approved by: RDE
Drawing name: Skid horizontal dead-end 55_64-212B	Status: FOR INFORMATION ONLY	Date latest revision: See rev. table
	Revised by: See rev. table	Approved by: See rev. table
	Projection:	Original drawing size: A1
		Revision: D04

This drawing is the property of Pentair and the information contained herein is the proprietary property of Pentair and cannot be loaned or used without written permission. Copying, reproducing or distribution to third parties or publication is prohibited without written permission of Pentair.

COMPRESSED AIR FOR MIT (1 barg) NOTES 5/9/10

XIGA SKID
 2x2 - 2x12 Membrane Housings
 16-96 XF64 Membrane Elements
 (NOTES: 1/2/3/4/9/10)



- NOTES:**
- XIGA UNIT = XIGA SKID + MANIFOLD.
 - XIGA SKID AND MANIFOLD MATERIALS, DN-SIZES AND PRESSURE RATINGS AS PER TABLES BELOW:
 - GUIDELINES FOR LINESIZING XIGA SKID AND MANIFOLD PIPING: 3.5 - MAX. 4 M/S.
 - LINESIZING TO BE DONE BASED ON MAX. SKID SIZE AND MAX. FLOWS, TAKING POSSIBLE FUTURE EXPANSION INTO ACCOUNT.
 - REDUCERS TO BE PLACED IF CONNECTING LINE DIAMETERS ARE DIFFERENT.
 - WATERHAMMER IS NOT ALLOWED IN THE XIGA UNIT.
 - SURGE/NEGATIVE PRESSURES DURING BOTH STATIC AND DYNAMIC XIGA UNIT OPERATION IS NOT ALLOWED.
 - LINESIZING OF CONNECTING PIPING TO XIGA UNIT AND NEED FOR MANUAL XIGA UNIT ISOLATION FACILITIES TO BE DETERMINED BY THE CLIENT.
 - CIP/FLUSH CONNECTIONS (NOT USED DURING NORMAL OPERATION).
 - DRAIN PIPES TO BE FREE DRAINING.
 - FREE DRAIN POINTS FROM VENTS MUST BE ABOVE UPPER MEMBRANE HOUSINGS.
 - OPERATING CONDITIONS:
 - AMBIENT TEMPERATURE 0-40°C (NON-FREEZING).
 - TEMPERATURE FEED AND BACKWASH WATER 0-40°C (NON-FREEZING).
 - MAX. OPERATING PRESSURE IN INSTALLATION 8,0 BARG.
 - COMPRESSED AIR PRESSURE FOR MEMBRANE INTEGRITY TEST (MIT) 1,0 BARG.
 - COMPRESSED AIR QUALITY FOR MIT TO BE AT LEAST ISO 8573-1, CLASS 1/3/1 (OIL/WATER/PARTICLES).
 - ALL FLANGES ACCORDING TO DIN 2501/PN10, UNLESS STATED OTHERWISE.
 - SAMPLE VALVES FEED AND PERMEATE OPTIONALLY EQUIPPED WITH FLAMMABLE OUTLET (FOR MICROBIOLOGICAL SAMPLING).

- OPTIONAL SCOPE OF SUPPLY BY PENTAIR:**
- XIGA SKID; ALL INDICATED WITHIN DOTTED XIGA SKID BOX.
 - MANIFOLD; ALL INDICATED WITHIN DOTTED MANIFOLD BOX.
- (PENTAIR CANNOT SUPPLY ALL COMBINATIONS, PLEASE CONTACT PENTAIR FOR AVAILABLE OPTIONS).

TAG NUMBERS:	DESCRIPTION:
AV.021.0101.221	FEED BLOCK VALVE
AV.021.0101.321	PERMEATE VALVE
AV.021.0101.421	BACKWASH VALVE
AV.021.0101.621	CONCENTRATE VALVE
AV.021.0101.721	AIR SUPPLY VALVE MIT
AV.021.0101.722	DISPLACED WATERFLOW VALVE MIT
AV.021.0101.821	FEED DRAIN VALVE
AV.021.0101.822	FEED VENT VALVE LEFT
AV.021.0101.823	FEED VENT VALVE RIGHT
AV.021.0101.824	PERMEATE VENT VALVE LEFT
AV.021.0101.825	PERMEATE VENT VALVE RIGHT
CV.021.0101.211	FEED CONTROL VALVE
F.021.01XX.XXX	MEMBRANE HOUSING
FT.021.0101.201	FLOW TRANSMITTER FEED
HV.021.0101.851	PERMEATE DRAIN VALVE
HV.021.0101.951	CIP SUPPLY VALVE
HV.021.0101.952	CIP CONCENTRATE OUTLET VALVE
HV.021.0101.953	CIP PERMEATE OUTLET VALVE
LS.021.0101.811	LEVEL SWITCH FEED LEFT
LS.021.0101.812	LEVEL SWITCH FEED RIGHT
LS.021.0101.813	LEVEL SWITCH PERMEATE LEFT
LS.021.0101.814	LEVEL SWITCH PERMEATE RIGHT
PT.021.0101.202	PRESSURE TRANSMITTER FEED
PT.021.0101.301	PRESSURE TRANSMITTER PERMEATE
SV.021.0101.251	SAMPLE VALVE FEED
SV.021.0101.351	SAMPLE VALVE PERMEATE

FOR INFORMATION ONLY

S:\Water\XIGA\EDK\XIGA-2B-XF64-FUB\Engineering\Plant\3D\PID_DWG\2000.dwg

XIGA UNIT	MAX. No. HOUSINGS	MAX. No. XF64 ELEMENTS	XIGA UNIT PE100, SDR11 - FULL UNIT BW							XIGA UNIT AISI 316L, DIN 17457 / ISO - FULL UNIT BW						
			XIGA SKID LINE (DN)		MANIFOLD LINE (DN)					XIGA SKID LINE (DN)		MANIFOLD LINE (DN)				
			A	B	AA	CC	DD	FF	Z	A	B	AA	CC	DD	FF	Z
XIG 202B	2 x 2 = 4	16	125	125	125	125	200	125	50	100	100	100	100	150	100	50
XIG 203B	2 x 3 = 6	24	150	150	150	150	200	150	80	125	125	125	125	200	125	65
XIG 206B	2 x 6 = 12	48	200	200	200	200	300	200	100	200	200	200	200	250	200	100
XIG 209B	2 x 9 = 18	72	250	250	250	250	400	250	125	250	250	200	250	300	250	100
XIG 212B	2 x 12 = 24	96	300	300	300	300	450	300	150	250	250	250	250	400	250	125

PENTAIR
 Water Process Technology BV
 Marsveld 50 - 7547 TC Enschede - The Netherlands
 P.O. Box 741 - 7500 AS Enschede - The Netherlands
 T +31 (0)53 42 87 000 - F +31 (0)53 42 87 001
 E pentairpt@pentair.com - I www.pentair.com

Client :	-	Date first issue	11-07-2023
Project :	Standard XIGA Unit	Drawn by	EDKR Scale 1:1
Checked by	FMO	Approved by	HLE
Drawing number :	XIG-2B-XF64-FUB-2000	Status	For Information Only
Revised by	-	Date latest revision	-
Drawing name :	P&ID XIG202B-212B-XF64-UNIT-FUB	Approved by	-
Projection	Original drawing size	Revision	-

This drawing is the property of Pentair and the information contained herein is the proprietary property of Pentair and cannot be loaned or used without written permission. Copying, reproducing or distribution to third parties or publication is prohibited without written permission of Pentair.

A1 D01

SYMBOL LEGEND :

- Valve (general symbol)
- Angle valve
- 3-Way valve
- Gate valve
- Ball valve
- Diaphragm valve
- Butterfly valve
- Globe valve
- Needle valve
- Plug valve
- Butterfly Valve (locked)
- Globe valve
- Hose valve
- Flow valve
- Butterfly valve (drilled)
- Reducing valve
- Check valve
- Over pressure valve
- Under pressure valve
- Single acting actuator
- Double acting actuator
- Controlled actuator (Diaphragm)
- Spring operated
- Weight operated
- Floating operated
- Solenoid

- Open and Closed Signal
- Open Signal
- Closed Signal
- Coupling threadpiece
- Coupling male + nuts
- Screwed connection
- Screwed cap
- Welded cap
- Flanged connection
- Blind flange
- Restriction
- End-coupling
- Rupture disc

- Open exhaust
- Drain
- Puls absorber
- Separating Membrane
- Expansion vessel
- Syphon
- Wave compensator (hose)
- Filter
- Y-type strainer
- Separator
- Steam trap
- Replacing Pipe
- Sight glass
- Man hole
- Sprayball
- Sprayball rotating
- Insulation

LINE COLORS:

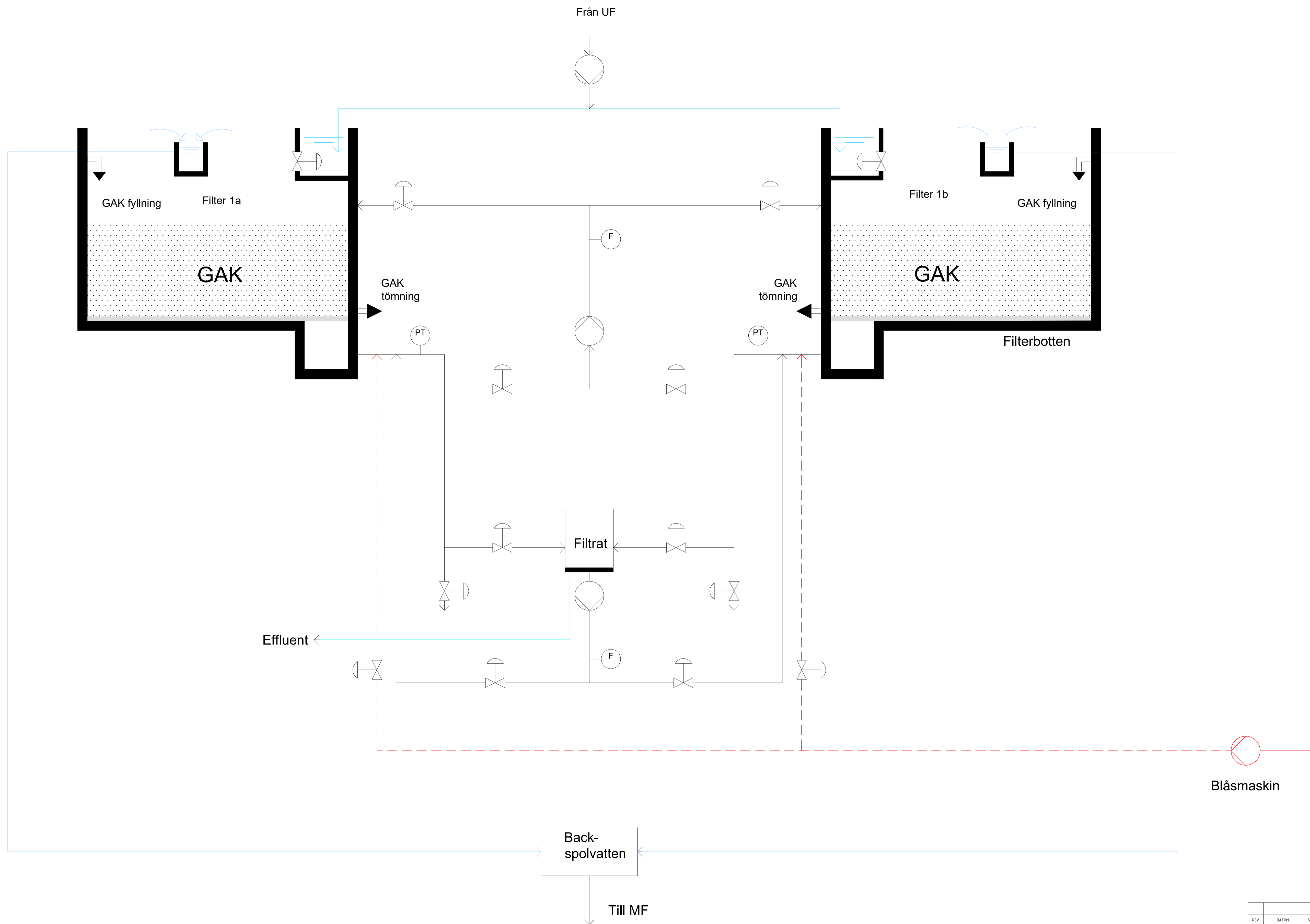
- Feed
- Permeate
- CIP / Cleaning (Backwash)
- Dosing Line (Chemicals)
- Concentrate (Bleed)
- Gasses (Aeration, Compressed Air)
- Steam / Condensate / Cooling
- Hatching (Scope of supply)
- Control / Instrument Line
- General Lines (Multi Purpose)
- Equipment, Instrumentation, Vessels & tanks

MEDIUM / DESCRIPTION :

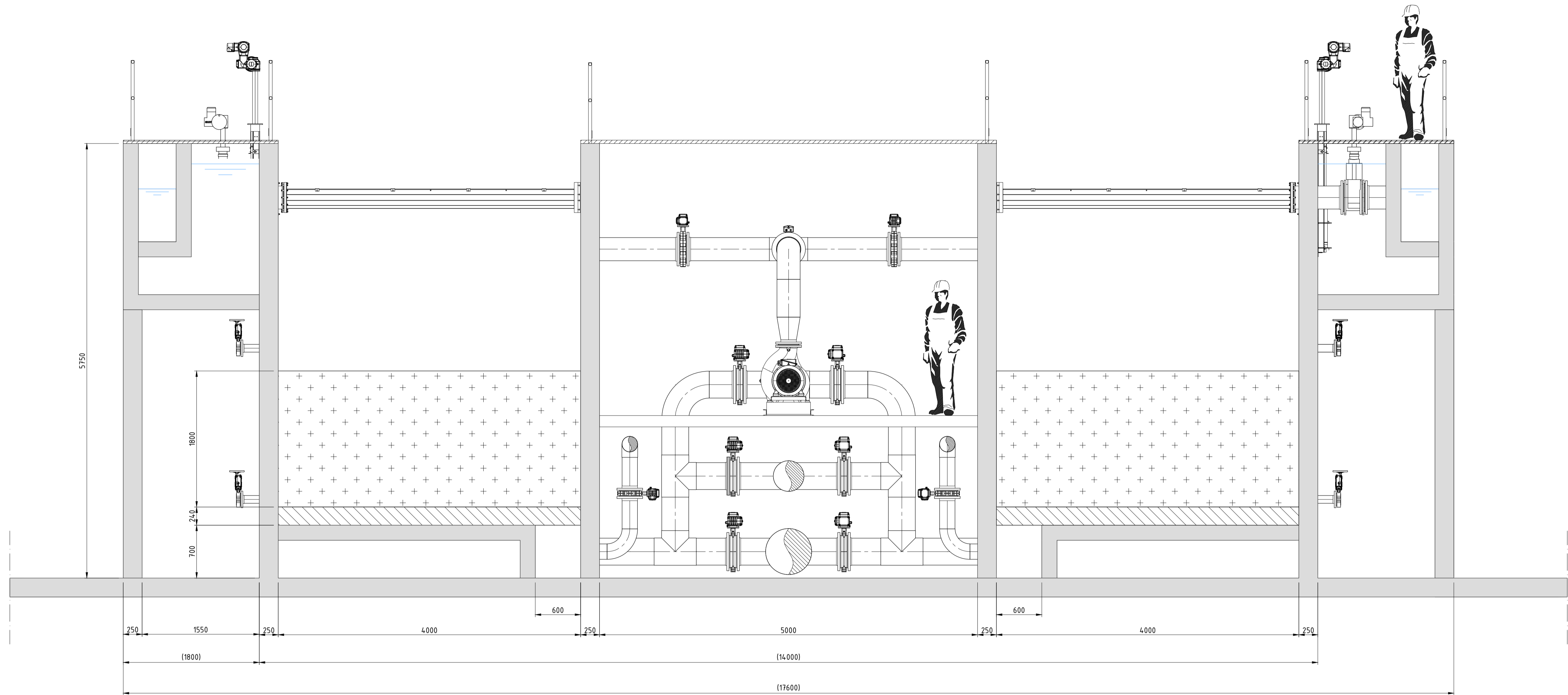
- Hand Driven pump
- Pump (general symbol)
- Pump with foundation
- Centrifugal pump
- Positive displacement pump
- Hose pump
- Membrane pump
- Submerged pump
- Pump Wagon
- Centrifugal Compressor
- Ventilator
- Ejector/Injector
- Dynamic mixer
- Static mixer
- Extruder
- Candle filter
- Separator
- Membrane filter
- Shell and Tube Heat exchanger
- Flanged tube heat exchanger
- Plate heat exchanger
- Plate heat exchanger
- Heat exchanger
- Motor
- Balance
- Bascule

FOR INFORMATION ONLY

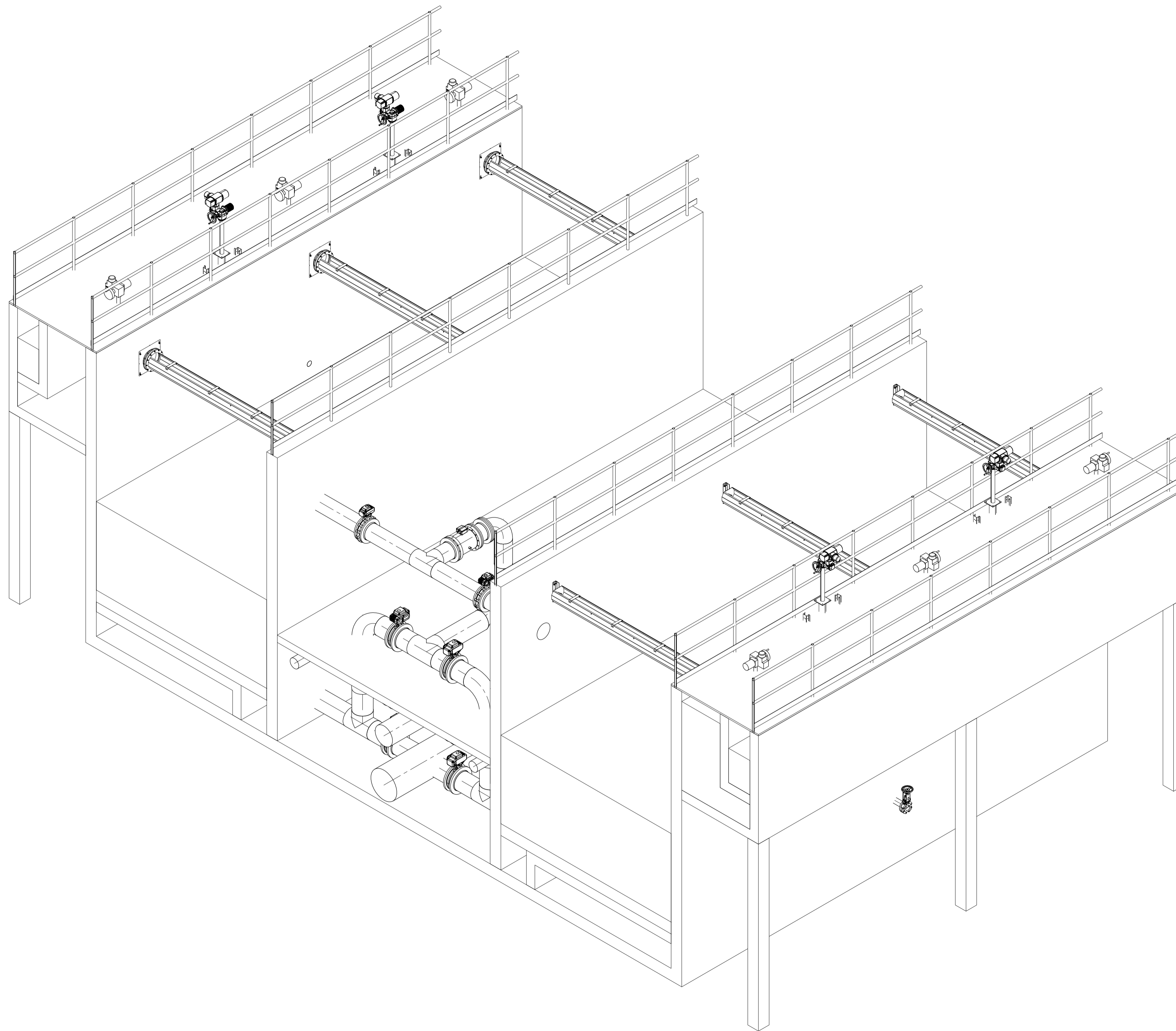
		Pentair Water Process Technology BV Marslaan 50 75c7 TC Enschede The Netherlands P.O. Box 741 7500 AS Enschede The Netherlands T +31 (0)53 42 87 000 F +31 (0)53 42 87 001 E pentairpt@pentair.com I www.pentair.com	
		Client : -	Date first issue 11-07-2023
Project : Standard XIGA Unit	Drawn by EDRR	Scale 1:1	
	Checked by FMO	Sheet 2	Of 2
	Approved by HLE		
Drawing number : XIG-2B-XF64-FUB-2000	Status For Information Only	Date latest revision -	
Drawing name : P&ID XIG202B-212B-XF64-UNIT-FUB	Revised by -	Approved by -	Revision
	Projection	Original drawing size	A1 D01
This drawing is the property of Pentair and the information contained herein is the proprietary property of Pentair and cannot be loaned or used without written permission. Copying, reproducing or distribution to third parties or publication is prohibited without written permission of Pentair.			



REV	DATUM	SIGN	BESKRIVNING
IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET			
INGENJÖRSFIRMAN RÖRKRAFT			
KONSTRUKTÖR	-	GRANSKAT	-
GODKÄNT	-	UPPDRAGSLEDARE	-
RÖRKRAFT UPPDRAGSNUMMER	3012301	DATUM	2023-09-14
		FÖRHÅT	SKALA
		A1	NTS
RELATIONSHANDLING	PRINCIPRITNING		
ARBETSRIKTNING	TVÅSTEGSFILTER K2		
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-		
GRANSKNINGSHANDLING	SCHEMA		
PRELIMINÄR HANDLING	RITNINGSNUMMER	BLAD	REV
	3012301-08-K2	-	-



REV	DATUM	SIGN	BESKRIVNING
IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET			
INGENJÖRSFIRMAN RÖRKRAFT		ivl SVENSKA MILJÖINSTITUTET	
KONSTRUKTÖR	-	GRANSKAT	-
GRÄNSKAT	-	UPPFRÅGSLIEDARE	-
PROJEKT	3012301	DATUM	2023-09-29
FORMAT	A1	SKALA	1:30
ARBETSSTADIUM	RELATIONSHANDLING	PRINCIPRITNING	
ARBETSSTADIUM	ARBETSRTNING	TVÅSTEGSFILTER K2	
ARBETSSTADIUM	FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-	
ARBETSSTADIUM	GRANSKNINGSHANDLING	SEKTION	
ARBETSSTADIUM	PRELIMINÄR HANDLING	BLAD	REV
ARBETSSTADIUM	3012301-02-K2	-	-



REV	DATUM	SIGN	BESKRIVNING
IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET			
INGENJÖRSFIRMAN RÖRKRAFT			
KONSTRUKTÖR	-	GRANSKAT	-
GÖDKRANT	-	UPPFRAGSLEDARE	-
RÖRKRAFT UPPFRAGSNUMMER	3012301	DATUM	2023-09-29
		FORMAT	A1
		SKALA	NTS
RELATIONSHANDLING			
ARBETSRTNING		PRINCIPRTNING	
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG		TVÅSTEGSFILTER K2	
GRANSKNINGSHANDLING		ISOMETRISK VY	
PRELIMINÄR HANDLING			
RTNINGSNUMMER	3012301-00-K2	BLAD	REV
		-	-

Bilaga 6.2 Analysresultat mikroföroreningar

(samtliga analysresultat inkl. första fasen i projektet presenteras)

* ämnet kan ej detekteras, halt är under detektionsgränsen (LOD S/N=3).

** ämnet kan detekteras men ej kvantifieras, halten är mellan detektionsgränsen (LOD) och kvantifieringsgränsen (LOQ S/N=10).

"---" Ämnet kan inte utvärderas pga dålig återvinning, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst av denna analyt.

"~" Ämnet kan inte utvärderas pga störning i analysen, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst av denna analyt.

^ Risk för ökad osäkerhet vid kvantifiering då halten vid analysen överstiger kalibreringskurvans högsta punkt.

N/A Analyten har ej analyserats

Hormoner

Tabell 1. Samtliga analysresultat för hormoner för pilottesterna samt utökad provtagningar.

Provnamn	Provpunkt	E1 [ng/l]	E2 [ng/l]	EE2 [ng/l]	LOD [ng/l]	LOQ [ng/l]
Provtagning v37 2020						
193354	PP1	30	12	*	2	8
193355	PP2	20	*	*	3	11
193356	PP3	25	*	*	2	8
193357	PP4	*	*	*	2	8
193358	PP5	*	*	*	1	5
193359	PP6	*	*	*	1	5
193360	PP7	*	*	*	1	5
193361	PP8	*	*	*	1	5
193362	PP9	*	*	*	1	5
Provtagning v15 2021						
224572	PP1	110	22	*	2	7
224573	PP2	58	22	*	2	8
224574	PP3	9	*	*	2	7
224575	PP4	**	*	*	2	6
224576	PP5	6	*	*	1	4
224577	PP6	5	*	*	1	4
224578	PP7	17	**	*	1	5
224579	PP8	**	*	*	1	5
224580	PP9	**	*	*	1	5
Provtagning v29 2021						
234707	PP1	100	27	*	2	5
234708	PP2	66	38	*	2	7
234709	PP3	92	25	*	2	6
234710	PP4	**	*	*	1	4
234711	PP5	**	*	*	1	4
234712	PP6	*	*	*	1	4
234713	PP7	30	*	*	1	4
234714	PP8	**	*	*	1	5
234715	PP9	**	*	*	1	4
Provtagning v17 2023						
312554	PP1-B	*	*	5,9	0,7	2,5
312555	PP2	180,1	24,1	*	1,0	3,3
312556	PP5	*	*	*	0,7	2,5
312557	PP7-A	*	*	*	1,0	3,3
312558	PP7-B	*	*	**	0,7	2,5
312559	PP6	15,0	**	*	0,7	2,5
312560	PP8	8,0	**	*	0,7	2,3
312561	PP9	6,9	*	*	0,7	2,5
312562	SIn	**	*	*	1,1	3,5
312563	Ozon Ut	2,8	*	*	0,7	2,5
312564	GPP Ozon	1,5	*	*	0,4	1,3
312565	FS Ozon	1,4	**	*	0,1	0,3
312566	S1	*	*	*	0,5	1,7
312567	S2	**	*	*	0,5	1,6
312568	L1	*	*	*	0,5	1,7
312569	L2	**	*	*	0,5	1,7

Provnamn	Provpunkt	E1 [ng/l]	E2 [ng/l]	EE2 [ng/l]	LOD [ng/l]	LOQ [ng/l]
Provtagning v28 2023						
321389	PP1-B	*	*	*	0,7	2,5
321390	PP2	87,5	3,8	*	1,0	3,2
321391	PP5	**	*	*	0,7	2,5
321392	PP7(A)	**	*	*	1	3,3
321393	PP7(B)	4,4	*	*	0,7	2,4
321394	PP6	13,7	*	*	0,7	2,5
321395	PP8	**	*	*	0,7	2,5
321396	PP9	**	*	*	0,7	2,4
Provtagning v34 2023						
327604	IN UF	*	*	*	1,3	4,2
327597	SIN	*	*	*	0,7	2,5
327598	S1	*	*	*	0,7	2,5
327599	S2	*	*	*	0,7	2,5
327602	L1	*	*	*	0,7	2,5
327603	L2	*	*	*	0,7	2,5
327605	Ozon UT	**	*	*	0,7	2,5
327601	GPP Ozon	**	*	*	0,7	2,5
327600	FS Ozon	*	*	*	0,7	2,5

YES - östrogena effekter

Tabell 2. Samtliga analysresultat för östrogena effekter för pilottesterna samt utökad provtagningar 2020 - 2023.

Provnamn	Provpunkt	YES [ng E ₂ ekv/l]			LOD [ng/l]	LOQ [ng/l]
		Medelvärdet	lägre limit	högre limit		
Provtagning v37 2020						
193355	PP2	38	36	42		0,1
193358	PP5	*				0,1
193361	PP8*	~0,1	~0,07	~0,15		0,1
Provtagning v15 2021						
224573	PP2	33	29	38		0,1
224576	PP5	0,34	0,31	0,37		0,1
224579	PP8	0,30	0,24	0,37		0,1
Provtagning v29 2021						
234708	PP2	71	60	84		0,1
234711	PP5	1,4	1,2	1,7		0,1
234714	PP8	0,37	0,3	0,45		0,1
234723	PP10	4	3,5	4,5		0,1
234724	PP11	*				0,1
234725	PP12	0,58	0,5	0,67		0,1
Provtagning v17 2023						
312554	PP1(B)	1,6	1,0	3,7		0,02
312555	PP2	18	14	23		0,02
312556	PP5	**				0,02
312557	PP7(A)	**				0,02
312558	PP7(B)	**				0,02
312559	PP6	0,5	0,4	0,7		0,02
312560	PP8	1,4	1,3	1,6		0,02
312561	PP9	1,2	0,5	2,3		0,02
312562	UF (Sin)	**				0,02
312563	O3	**				0,02
312564	GPP O3	**				0,02
312565	FS O3	**				0,02
312566	S1	**				0,02
312567	S2	**				0,02
312568	L1	**				0,02
312569	L2	**				0,02
Provtagning v28 2023						
321389	PP1(B)	**				0,02
321390	PP2	1,9	1,3	3,6		0,02
321391	PP5	**				0,02
321392	PP7(A)	**				0,02
321393	PP7(B)	**				0,02
321394	PP6	0,9	0,8	0,9		0,02
321395	PP8	0,6	0,5	0,6		0,02
321396	PP9	**				0,02
321397	UF (Sin)	**				0,02
321398	O3	**				0,02
321399	GPP O3	**				0,02
321400	FS O3	**				0,02
321401	S1	**				0,02
321402	S2	**				0,02
321403	L1	**				0,02
321404	L2	**				0,02

Fenoler

Tabell 3. Samtliga analysresultat för fenoler för pilottesterna samt utökad provtagningar.

Provnamn	Provpunkt	BPA -	NP -	OP -
		Bisfenol A	4-iso-nonylfenol	-tertiär-oktylfenol
		[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Provtagning v37 2020				
193354	PP1	622	<150*	<7*
193355	PP2	559	<150*	1317
193356	PP3	463	<150*	1183
193357	PP4	53	<100*	<7*
193358	PP5	74	<100*	<5*
193359	PP6	5182	<100*	<5*
193360	PP7	166	<100*	<5*
193361	PP8	398	<100*	65
193362	PP9	467	<100*	<5*
Provtagning v15 2021				
224572	PP1	484	<13*	<8**
224573	PP2	253	<13*	<2*
224574	PP3	271	<13*	<2*
224575	PP4	<200**	<13*	<2*
224576	PP5	<200**	<13*	<2*
224577	PP6	<200**	<13*	<2*
224578	PP7	<86	<6*	<7*
224579	PP8	<287**	<6*	<7*
224580	PP9	<86*	<6*	<7*
224587	UF	<200**	<13*	<2*
224581	S1 (GAK1 1/2)	<200**	<13*	<2*
224584	L1 (GAK1 2/2)	<86*	<6*	<7*
224582	S2 (GAK2 1/2)	<86*	<6*	<7*
224585	L2 (GAK2 2/2)	<86*	<6*	<7*
224583	S3 (GAK3 1/2)	<86*	<6*	<7*
224586	L3 (GAK3 2/2)	<200**	<13*	<2*
Provtagning v29 2021				
234707	PP1	<29*	<5*	5400
234708	PP2	250	<17**	6800
234709	PP3	<29*	72	6000
234710	PP4	180	100	91
234711	PP5	140	140	84
234712	PP6	380	<17**	55
234713	PP7	<29*	<5*	<35**
234714	PP8	<96**	<5*	<35**
234715	PP9	300	<5*	<35**
234719	UF	180	<5*	69
234716	S1 (GAK1 1/2)	<29*	<5*	90
234720	L1 (GAK1 2/2)	<29*	<5*	<10*
234717	S2 (GAK2 1/2)	<29*	<5*	81
234721	L2 (GAK2 2/2)	<29*	<5*	<35**
234718	S3 (GAK3 1/2)	<96**	<5*	43
234722	L3 (GAK3 2/2)	<29*	<5*	<10*

* ämnet kan ej detekteras, halt är under detektionsgränsen (LOD S/N=3).
 ** ämnet kan detekteras men ej kvantifieras, halten är mellan detektionsgränsen (LOD) och kvantifieringsgränsen (LOQ S/N=10).

Tabell 4. Samtliga analysresultat för fenoler för pilottesterna samt utökad provtagningar 2023.

Provnamn	Provpunkt	BPA -	NP -	OP -
		Bisfenol A	4-iso-	-tertiär-
		[ng/l]	nonylfenol	oktylfenol
		[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Provtagning v28 2023				
321389	PP1(B)	*	19	*
321390	PP2	320	73	*
321391	PP5	48	*	*
321392	PP7(A)	90	*	*
LOD		2	2	2
LOQ		6	5	6
321393	PP7(B)	140	*	*
321394	PP6	1100	*	*
321395	PP8	170	*	*
321396	PP9	63	*	*
LOD		1	2	2
LOQ		4	5	7

Läkemedel

Tabell 5. Analysresultat för läkemedel vid provtagning v37 2020.

IVL-provnr:	193354	193355	193356	193357	193358	193359	193360	193361	193362		
Provpunkt	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8	PP9	LOD	LOQ
Substans	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]
Atenolol	710	1300	1200	420	380	*	61	360	340	3	11
Karbamazepin	220	560	540	700	710	*	100	580	530	21	69
Ciprofloxacin	3300	*	**	**	*	*	*	*	*	12	67
Citalopram	700	810	720	840	1000	*	69	720	630	15	49
Klaritromycin	230	**	**	160	140	*	**	**	**	10	120
Diklofenak	360	1600	1400	1400	1400	53	230	1200	1000	6	21
Erytromycin	**	**	**	**	**	*	*	**	**	3	45
Flukonazol	520	180	160	140	140	*	23	130	110	5	18
Furosemid	45 000	6800	4900	3400	3500	*	630	3000	2800	28	85
Ibuprofen	20 000	13 000	9700	*	*	*	*	*	*	28	94
Ketokonazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Losartan	21 000	46 000	31 000	8900	9900	970	1600	8200	7300	110	380
Metotrexat	130	**	78	*	*	*	*	*	*	14	65
Metoprolol	1600	2600	2100	2000	1900	50	340	2000	1800	2	6
Naproxen	25 000	18 000	12 000	**	**	280	**	*	*	5	36
Oxazepam	810	410	360	410	420	*	58	300	280	8	28
Paracetamol	53 000^	52 000	49 000^	*	60	*	110	60	36	9	28
Propranolol	160	260	220	200	230	*	**	190	170	5	25
Sertralin	240	580	260	100	200	*	**	78	75	7	22
Sulfametoxazol	8900	1000	570	180	190	*	39	160	170	5	16
Tramadol	*	*	*	*	*	*	*	*	*	76	250
Trimethoprim	1100	120	120	54	45	*	**	46	37	4	14
Venlafaxin	1200	790	700	880	930	**	140	880	790	4	16
Zolpidem	*	*	*	**	**	*	*	*	*	5	15

Tabell 8. Läkemedel Provtagning v21 2021 pilot

IVL-provnr:	234727	234726	234728	234729	234730	234731	234732	234733		
Provpunkt	UF IN	UF	S1	S2	S3	L1	L2	L3	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	340	410	140	54	200	*	*	81	6	20
Karbamazepin	340	330	100	**	150	*	*	**	25	82
Ciprofloxacin	*	*	*	*	*	*	*	*	17	56
Citalopram	160	190	**	**	130	*	*	77	13	44
Klaritromycin	**	**	**	**	**	*	*	**	8	35
Diklofenak	1100	1200	*	61	220	*	*	350	10	33
Erytromycin	*	**	*	**	**	*	*	**	9	30
Flukonazol	140	120	68	40	83	*	*	58	9	31
Furosemid	1300	1300	150	170	800	*	*	230	8	45
Ibuprofen	550	1800	710	610	1400	61	*	750	12	39
Ketokonazol	*	*	*	*	*	*	*	*	26	85
Losartan	1600	1800	740	1000	1700	*	**	1200	10	31
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	4	15
Metoprolol	850	970	200	100	490	*	*	150	7	22
Naproxen	270	830	160	100	340	*	*	100	8	27
Oxazepam	190	180	93	50	140	*	*	85	10	32
Paracetamol	*	6500^	*	*	200	**	*	110	14	47
Propranolol	79	82	*	*	**	*	*	*	8	26
Sertralin	**	66	*	*	**	*	*	*	13	43
Sulfametoxazol	57	58	**	**	**	*	*	**	14	45
Tramadol	270	210	56	85	170	*	*	110	12	42
Trimethoprim	83	89	*	*	34	*	*	**	9	28
Venlafaxin	420	440	240	210	380	*	*	290	9	29
Zolpidem	**	*	*	*	*	*	*	*	1	5

Tabell 9. Läkemedel Provtagning v25 2021 pilot

IVL-provnr:	234735	234734	234736	234737	234738	234739	234740	234741		
Provpunkt	UF IN	UF	S1	S2	S3	L1	L2	L3	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	230	410	150	64	180	*	*	41	6	20
Karbamazepin	940	820	160	**	300	*	*	89	25	82
Ciprofloxacin	*	*	*	*	*	*	*	*	17	56
Citalopram	290	340	**	51	200	*	*	110	13	44
Klaritromycin	76	71	**	56	55	*	*	56	8	35
Diklofenak	1700	1700	47	170	230	*	*	270	10	33
Erytromycin	57	53	**	45	51	*	**	54	9	30
Flukonazol	160	150	100	48	95	**	*	68	9	31
Furosemid	2400	3200	160	210	810	*	*	330	8	45
Ibuprofen	320	450	170	160	260	*	*	160	12	39
Ketokonazol	*	*	*	*	*	*	*	*	26	85
Losartan	2600	3700^	800	1700	3000^	*	55	2500^	10	31
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	4	15
Metoprolol	1200	1600	280	140	740	*	*	190	7	22
Naproxen	55	110	*	**	39	*	*	**	8	27
Oxazepam	360	370	120	72	210	*	*	110	10	32
Paracetamol	**	220	*	**	*	*	*	*	14	47
Propranolol	120	140	*	*	38	*	*	*	8	26
Sertralin	**	76	*	*	**	*	*	*	13	43
Sulfametoxazol	120	140	**	**	59	*	*	**	14	45
Tramadol	430	450	110	130	310	*	*	220	12	42
Trimethoprim	57	70	*	*	**	*	*	*	9	28
Venlafaxin	700	770	300	280	550	**	*	440	9	29
Zolpidem	**	**	*	*	**	*	*	*	1	5

Tabell 10. Läkemedel Provtagning v27 2021 pilot, endast GAK 3 inför kolbyte

IVL-provnr:	243526	243527	243528		
Provpunkt	UF	S3	L3	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	350	150	37	1	3
Karbamazepin	580	230	76	20	66
Ciprofloxacin	*	*	*	4	14
Citalopram	570	300	200	1	4
Klaritromycin	200	180	170	6	19
Diklofenak	1500	200	250	5	18
Erytromycin	**	**	**	14	47
Flukonazol	160	110	82	6	21
Furosemid	940	380	100	2	6
Ibuprofen	300	220	160	19	65
Ketokonazol	---	---	---	---	---
Losartan	1900	1500	1200	2	7
Metotrexat	*	*	*	4	12
Metoprolol	2000	930	250	2	8
Naproxen	110	49	16	2	6
Oxazepam	350	190	99	5	17
Paracetamol	830	*	*	9	29
Propranolol	190	51	**	3	11
Sertralin	140	32	**	4	13
Sulfametoxazol	730	370	210	32	110
Tramadol	270	190	110	13	45
Trimethoprim	42	**	*	3	20
Venlafaxin	970	640	530	4	12
Zolpidem	**	**	*	2	7

Tabell 11. Läkemedel Provtagning v29 2021 pilot

IVL-provnr:	234719	234716	234717	234718	234720	234721	234722		
Provpunkt	UF	S1	S2	S3	L1	L2	L3	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	340	120	66	300	*	*	270	6	20
Karbamazepin	620	210	**	490	*	*	320	25	82
Ciprofloxacin	*	*	*	*	*	*	*	17	56
Citalopram	350	**	64	150	*	*	47	13	44
Klaritromycin	85	**	57	64	*	**	**	8	35
Diklofenak	1600	130	330	680	*	*	530	10	33
Erytromycin	**	*	**	**	*	*	*	9	30
Flukonazol	210	140	75	200	**	*	180	9	31
Furosemid	2100	260	440	1100	*	*	270	8	45
Ibuprofen	1600	640	500	1600	110	**	2200	12	39
Ketokonazol	*	*	*	*	*	*	*	26	85
Losartan	2300	930	1600	1600	*	100	800	10	31
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	4	15
Metoprolol	1800	320	150	1500	*	*	1100	7	22
Naproxen	260	41	40	150	*	*	72	8	27
Oxazepam	330	170	95	270	*	*	180	10	32
Paracetamol	360	*	**	110	*	*	**	14	47
Propranolol	160	*	*	56	*	*	**	8	26
Sertralin	110	*	*	*	*	*	*	13	43
Sulfametoxazol	250	150	76	180	*	*	120	14	45
Tramadol	510	110	160	480	*	*	350	12	42
Trimethoprim	**	*	*	**	*	*	*	9	28
Venlafaxin	920	440	360	840	**	*	780	9	29
Zolpidem	**	*	*	**	*	*	*	1	5

Tabell 12. Läkemedel provtagning v42 & v50 2021.

IVL-provnr:	253017	253018	253019	253020	253021	253022	253023	253024	253025	253026	253027	253028	253029	253030	253031	253032			
Provpunkt	S IN 211020	L1 211020	L2 211020	L3 211020	In UF 211020	S1 211020	S2 211020	S3 211020	S IN 211215	L1 211215	L2 211215	L3 211215	IN UF 211215	S1 211215	S2 211215	S3 211215	LOD	LOQ	
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	240	25	**	200	150	130	120	340	380	42	10	280	340	120	170	340	2	6	
Karbamazepin	1900	230	*	1400	2100	1200	1100	1200	1400	290	*	1300	1200	1100	680	1200	70	230	
Ciprofloxacin	*	*	*	*	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	7	24	
Citalopram	210	*	*	97	200	23	100	180	280	*	*	110	140	50	100	140	4	15	
Klaritromycin	72	*	22	66	72	42	70	61	59	*	18	50	53	36	47	57	3	11	
Diklofenak	1200	*	**	880	1400	120	360	820	1100	*	150	880	1200	300	650	960	14	47	
Erytromycin	410	**	160	400	450	310	350	340	200	45	120	180	160	180	190	200	12	40	
Flukonazol	130	**	**	88	120	110	65	120	130	**	**	88	89	83	73	110	9	64	
Furosemid	2500	*	*	590	2100	230	650	1000	3600	*	200	1300	2900	710	1400	2000	20	68	
Ibuprofen	*	*	*	*	**	*	*	*	42	*	36	77	190	**	**	36	11	33	
Ketokonazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Losartan	910	**	78	750	830	470	620	810	1400	51	270	1100	1400	780	1100	1200	11	38	
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	21	71	
Metoprolol	550	**	*	510	400	200	170	570	510	32	6	490	520	250	210	540	3	5	
Naproxen	49	**	*	39	63	21	21	30	200	21	17	210	320	68	93	170	3	9	
Oxazepam	1100	200	*	680	880	420	470	690	1300	**	*	580	510	690	380	640	65	180	
Paracetamol	**	*	*	*	**	*	*	*	590	*	*	140	470	*	**	280	23	100	
Propranolol	58	*	*	37	64	5	4	52	67	*	*	50	69	7	15	65	1	4	
Sertralin	230	*	*	54	70	*	**	110	240	*	*	120	120	**	60	160	9	30	
Sulfametoxazol	650	**	**	450	550	260	140	360	450	110	95	490	630	270	220	440	17	56	
Tramadol	370	*	*	430	390	120	260	480	450	*	**	410	480	210	280	410	20	68	
Trimethoprim	71	*	*	44	53	*	*	57	74	*	*	50	56	**	30	79	16	30	
Venlafaxin	150	27	12	180	180	110	120	250	180	93	31	250	230	170	160	230	1	3	
Zolpidem	**	*	*	*	**	*	*	**	**	*	*	*	**	*	*	*	6	22	

Tabell 15. Läkemedel Provtagning v34 2021 pilot

IVL-provnr:	238176	238177	238178	238179	238180	238181	238182	238183		
Provpunkt	UF IN	UF	S1	S2	S3	L1	L2	L3	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	210	320	180	110	300	**	*	300	5	17
Karbamazepin	320	320	190	**	330	*	*	330	29	97
Ciprofloxacin	*	*	*	*	*	*	*	*	15	49
Citalopram	220	310	38	79	220	*	*	150	9	30
Klaritromycin	41	53	35	37	49	*	**	34	4	15
Diklofenak	910	970	61	210	500	*	**	500	3	33
Erytromycin	**	**	**	**	**	*	**	**	23	80
Flukonazol	72	65	60	36	72	34	**	73	4	32
Furosemid	800	1200	170	260	430	*	*	180	4	15
Ibuprofen	*	*	*	*	*	*	*	*	20	66
Ketokonazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Losartan	680	810	440	520	650	18	37	540	4	14
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	3	8
Metoprolol	880	1200	460	280	1200	**	*	1100	3	10
Naproxen	74	77	28	24	84	*	*	48	1	3
Oxazepam	200	210	130	81	180	18	*	160	5	17
Paracetamol	**	710	*	**	200	*	*	**	6	20
Propranolol	65	110	**	**	92	*	*	56	1	10
Sertralin	32	120	**	**	47	*	*	**	2	15
Sulfametoxazol	450	490	200	**	270	*	*	410	30	92
Tramadol	430	520	130	160	430	*	*	290	16	54
Trimethoprim	43	50	*	*	34	*	*	25	8	20
Venlafaxin	400	530	290	240	500	64	**	410	8	12
Zolpidem	**	**	*	*	**	*	*	**	1	4

Tabell 16. Läkemedel provtagning v29 2022.

IVL-provnr:	278746	278744	278745	278747	278748	278749		
Provpunkt	S in 20/7-22	L1 20/7-22	L2 20/7-22	In-Up 20/7-22	S1 20/7-22	S2 20/7-22	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	340	110	**	230	200	130	2	6
Karbamazepin	470	240	**	560	410	230	19	64
Ciprofloxacin	--	--	--	--	--	--	--	--
Citalopram	460	10	**	390	170	150	1	3
Klaritromycin	39	10	10	35	28	28	2	6
Diklofenak	700	11	35	990	170	230	2	8
Erytromycin	25	9	8	32	19	17	1	3
Flukonazol	190	150	32	220	160	120	6	21
Furosemid	1900	78	44	2000	720	790	6	19
Ibuprofen	**	*	*	41	*	**	4	12
Ketokonazol	**	*	*	**	*	*	7	22
Losartan	2500^	160	180	3200^	520	1500	2	5
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	1	3
Metoprolol	1600	260	**	1300	1100	500	1	5
Naproxen	37	7	**	72	27	25	1	3
Oxazepam	330	140	18	380	250	170	3	9
Paracetamol	400	**	13	69	13	13	2	7
Propranolol	170	*	*	130	33	10	1	3
Sertralin	220	*	*	63	19	12	3	10
Sulfametoxazol	130	64	**	150	130	130	6	21
Tramadol	440	**	*	430	180	150	10	33
Trimethoprim	39	5	*	48	25	7	1	3
Venlafaxin	910	320	80	840	620	410	3	9
Zolpidem	3	*	*	4	**	**	1	3

Tabell 17. Läkemedel provtagning v36 2022.

IVL-provnr:	285777	285778	285779	285780	285781	285782	285783	285786		
Provpunkt	IN UF 14/9	Sin 14/9	S1 14/9	S2 14/9	L1 14/9	L2 14/9	PP2	PP5	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	370	410	260	250	160	17	1200	450	1	3
Karbamazepin	820	680	520	380	300	91	470	510	5	17
Ciprofloxacin	**	*	*	*	*	*	48	*	7	23
Citalopram	200	240	100	110	7	6	250	210	1	4
Klaritromycin	54	50	38	36	10	19	81	34	1	3
Diklofenak	1300	950	230	390	**	140	1200	900	8	26
Erytromycin	40	39	25	30	12	20	21	6	1	3
Flukonazol	390	290	260	210	210	94	230	250	7	24
Furosemid	3400^	3800^	1200	2300	170	310	6600^	3600^	5	15
Ibuprofen	140	**	**	*	*	*	13000^	*	12	40
Ketokonazol	**	*	*	*	*	*	200	**	8	28
Losartan	2900^	1500	330	1100	96	110	7300^	2700^	3	10
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	100	*	10	33
Metoprolol	2200	2500	1300	920	390	18	3400	2100	2	8
Naproxen	120	47	**	**	*	*	9700^	35	9	30
Oxazepam	890	710	430	420	260	91	2200	620	3	9
Paracetamol	*	300	*	6	*	**	7800^	73	2	5
Propranolol	240	230	47	22	*	*	150	200	2	5
Sertralin	31	64	**	**	*	*	78	71	4	14
Sulfametoxazol	310	290	250	200	120	31	860	150	7	25
Tramadol	310	300	140	140	**	**	350	260	9	31
Trimethoprim	68	59	25	14	5	*	210	40	1	3
Venlafaxin	1400	1200	880	790	440	230	1700	1100	3	10
Zolpidem	8	7	**	**	*	*	8	**	2	6

Tabell 19. Läkemedel provtagning pilot 09/11/2022.

IVL-provnr:	291195	291196	291197	291198	291199	291200	291201		
Provpunkt	SIn 9/11	S1 9/11	S2 9/11	L1 9/11	L2 9/11	FS O2 9/11	Gpp O2 9/11	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	350	260	230	160	32	*	*	1	3
Karbamazepin	490	450	330	280	93	*	*	10	30
Ciprofloxacin	82	24	44	10	7	*	*	2	7
Citalopram	170	100	97	9	14	**	2	1	2
Klaritromycin	90	74	63	19	32	*	*	2	7
Diklofenak	610	210	410	26	140	*	**	2	5
Erytromycin	5	6	5	**	4	*	*	1	3
Flukonazol	220	190	170	170	96	*	*	5	18
Furosemid	1700	560	980	100	240	*	*	7	23
Ibuprofen	**	29	**	**	*	*	*	9	27
Ketokonazol	**	*	*	*	*	*	*	3	10
Losartan	2100	610	1600	140	480	**	20	1	4
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	20	60
Metoprolol	1500	1100	770	350	48	*	*	2	6
Naproxen	38	34	41	*	*	*	*	7	21
Oxazepam	380	300	290	190	91	*	*	2	6
Paracetamol	63	7	4	2	6	*	2	1	2
Propranolol	140	41	33	**	*	**	**	1	3
Sertralin	100	17	27	*	*	*	2	1	2
Sulfametoxazol	230	260	230	160	62	*	*	2	5
Tramadol	190	110	110	**	31	*	*	10	30
Trimethoprim	120	55	47	7	2	*	*	1	2
Venlafaxin	640	550	530	350	250	*	*	2	7
Zolpidem	8	3	4	*	*	*	*	1	2

Tabell 20. Läkemedel provtagning v50 2022 & v2 2023.

IVL-provnr:	299741	299742	299743	299744	299745	299746	299747	299748	299749	299750		
Provpunkt	In UF 20/12-22	Gpp Oz 20/12-22	Fs Oz 20/12-22	Ut ozon 20/12-22	In UF 11/01-23	SIn 11/01-23	S1 11/01-23	S2 11/01-23	L1 11/01-23	L2 11/01-23	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	900	*	*	210	360	300	280	260	200	58	9	29
Karbamazepin	690	*	*	*	230	280	310	190	270	100	2	7
Ciprofloxacin	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	11	37
Citalopram	200	*	*	35	110	120	84	78	**	26	7	23
Klaritromycin	49	*	*	*	**	**	**	**	**	**	7	23
Diklofenak	1800	*	*	*	480	410	190	370	67	170	12	39
Erytromycin	17	*	*	*	44	28	23	30	17	17	4	14
Flukonazol	240	30	16	130	70	73	66	69	69	41	3	9
Furosemid	4400	27	*	*	1200	990	560	660	160	290	4	12
Ibuprofen	260	*	*	50	1900	350	**	350	*	*	10	35
Ketokonazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Losartan	5100	**	*	38	2100	1500	730	1300	350	860	9	29
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3	11
Metoprolol	1900	**	*	550	580	530	510	390	280	62	10	32
Naproxen	210	*	*	*	840	350	390	520	120	120	16	52
Oxazepam	260	**	**	110	70	61	73	58	59	29	3	9
Paracetamol	320	*	*	*	5700^	7000^	570	1900	*	**	6	18
Propranolol	130	*	*	*	47	50	33	23	*	*	3	10
Sertralin	38	*	*	**	65	85	40	49	*	*	4	12
Sulfametoxazol	260	*	*	**	91	110	130	110	120	60	5	16
Tramadol	750	**	**	240	200	270	250	230	65	100	17	56
Trimethoprim	230	*	*	*	140	150	84	76	16	9	2	6
Venlafaxin	1300	44	34	260	370	370	390	320	280	170	8	28
Zolpidem	10	*	*	*	**	**	**	**	*	*	2	6

Tabell 21. Läkemedel provtagning v17 2023.

IVL-provnr:	312554	312555	312556	312557	312558	312559	312560	312561	312562	312563	312564	312565	312566	312567	312568	312569	LOD	LOQ
Provpunkt	PP1(B)	PP2	PP5	PP7(A)	PP7(B)	PP6	PP8	PP9	UF (Sin)	O3	GPP O3	FS O3	S1	S2	L1	L2		
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	*	440	280	*	*	50	220	210	180	61	**	*	200	150	140	44	3,2	11
Karbamazepin	54	210	330	*	**	5	250	260	310	**	*	*	250	210	200	110	1,4	4,5
Ciprofloxacin	~	**	*	~	~	~	~	~	*	**	*	*	*	*	*	*	18	60
Citalopram	*	150	180	*	*	18	150	140	220	29	**	10	140	140	36	45	2,0	5,8
Klaritromycin	*	21	14	*	*	27	22	18	16	**	*	*	16	13	10	10	1,6	5,3
Diklofenak	**	810	750	*	*	30	650	690	710	**	*	*	260	650	130	220	3,2	11
Erytromycin	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*	*	*	**	**	**	**	4,1	14
Flukonazol	*	190	140	*	*	*	97	130	130	79	16	12	170	120	130	84	3,0	9,0
Furosemid	*	1400	1200	*	*	44	950	1100	1200	*	*	*	420	1300	190	180	1,8	6,0
Ibuprofen	260	6200^	110	100	110	1000	330	270	*	**	*	*	*	**	**	*	12	41
Ketokonazol	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	14	47
Losartan	*	4300^	3000^	*	*	200	2700	2600	1700	65	*	**	890	1900	640	1300	3,7	12
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	12	41
Metoprolol	*	1100	1200	*	*	77	990	1000	1100	400	15	14	980	840	560	180	1,2	4,1
Naproxen	*	22000^	330	*	*	790	470	530	82	*	*	*	120	170	*	*	9,1	30
Oxazepam	*	250	240	*	*	**	220	200	210	110	**	**	230	190	170	110	4,5	15
Paracetamol	200	37000^	880	57	**	3600^	860	110	780	1400	270	340	99	140	**	**	7,5	25
Propranolol	*	84	130	*	*	6	120	110	140	*	*	8,4	65	65	5,1	**	1,1	3,5
Sertralin	*	82	58	*	*	**	39	45	69	**	*	**	23	36	*	*	5,7	19
Sulfametoxazol	*	490	70	*	*	*	76	80	89	**	*	*	130	91	120	50	1,8	6,2
Tramadol	*	280	400	*	*	22	230	240	460	110	20	17	280	250	100	100	1,0	3,4
Trimethoprim	*	130	99	**	**	**	89	89	99	*	*	*	82	59	29	12	1,5	5,0
Venlafaxin	*	550	630	*	*	57	520	590	710	160	37	23	550	570	400	270	1,0	3,0
Zolpidem	*	10	4,9	*	*	*	4,6	5,4	5,0	*	*	*	**	3,6	*	*	1,0	3,0
Σ6&4-metylbenzotriazol	N/A	680	380	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	350	120	**	**	180	110	28	**	1,8	6,1
Amisulprid	N/A	*	*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	*	**	*	**	*	*	*	*	0,4	1,3
Amoxicillin	N/A	---	---	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Azitromycin	N/A	66	35	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	32	13	*	**	14	24	**	**	2,6	8,6
Benzotriazol	N/A	170	210	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	290	170	**	**	190	140	39	**	6,0	20
Kandersartan	N/A	1200	750	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	840	280	52	80	870	800	450	570	5,5	18
Hydroklortiazid	N/A	3400	2100	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1800	520	31	14	1500	1300	850	260	0,9	3,0
Irbersartan	N/A	1000	600	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	520	250	19	38	530	480	220	300	1,4	4,7

Tabell 22. Läkemedel provtagning pilot v22 2023.

IVL-provnr:	319230	319231	319232	319233	319234	319235	319236	319237	319238		
Provpunkt	IN UF	SIn	Ut Ozon	S1	S2	L1	L2	Gpp Oz	FS Oz	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	190	210	77	160	170	98	30	11	6	1	5
Karbamazepin	630	640	33	580	370	420	150	**	*	2	7
Ciprofloxacin	**	**	*	*	*	*	*	*	*	11	37
Citalopram	140	180	39	140	140	23	24	*	*	1	5
Klaritromycin	29	26	5	25	24	11	14	**	**	1	5
Diklofenak	710	760	30	400	630	60	200	*	*	4	14
Erytromycin	**	*	*	*	*	*	*	*	*	3	9
Flukonazol	200	210	170	220	140	190	97	41	29	3	10
Furosemid	1500	2000	*	1100	1500	230	410	*	*	2	7
Ibuprofen	*	*	*	*	*	*	*	*	*	17	57
Ketokonazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Losartan	2200	1500	240	670	1400	260	760	26	23	4	12
Metotrexat	*	*	**	*	*	*	*	*	*	16	55
Metoprolol	1700	1700	640	1200	910	540	87	36	13	1	3
Naproxen	110	110	*	110	79	**	**	*	*	9	28
Oxazepam	470	440	290	360	280	230	130	33	18	1	3
Paracetamol	36	350	**	47	57	20	22	*	*	5	18
Propranolol	160	180	12	85	54	**	*	*	*	2	5
Sertralin	28	58	18	32	43	*	*	*	*	2	7
Sulfametoxazol	180	260	*	310	210	160	120	35	**	6	21
Tramadol	150	200	78	210	190	67	59	5	7	1	3
Trimethoprim	100	100	8	72	49	24	5	*	*	1	3
Venlafaxin	630	710	390	810	640	530	270	47	59	2	5
Zolpidem	4	4	*	3	3	*	*	*	*	1	2
Σ6&4-metylbenzotriazol	350	390	160	220	120	32	*	*	*	8	26
Amisulprid	*	*	*	*	*	*	**	*	*	1	3
Amoxicillin	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Azitromycin	370	520	78	410	290	72	79	*	*	10	32
Benzotriazol	340	270	120	180	100	*	*	*	*	12	40
Kandersartan	1100	1100	350	940	870	800	990	100	170	6	21
Hydroklortiazid	2000	2100^	730	1500	880	800	140	64	24	1	2
Irbersartan	750	900	370	610	610	210	300	23	47	1	3

Tabell 23. Läkemedel provtagning v28 2023.

IVL-provnr:	321389	321390	321391	321392	321393	321394	321395	321396	321397	321398	321399	321400	321401	321402	321403	321404	LOD	LOQ
Provpunkt	PP1(B)	PP2	PP5	PP7(A)	PP7(B)	PP6	PP8	PP9	UF (Sin)	O3	GPP O3	FS O3	S1	S2	L1	L2		
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	**	630	360	*	*	100	290	270	230	130	14	6	180	190	100	28	1	5
Karbamazepin	98	440	600	*	**	45	530	490	640	39	**	*	490	410	390	130	2	7
Ciprofloxacilin	*	**	**	*	*	*	**	78	**	*	*	*	*	*	*	*	11	37
Citalopram	*	140	220	*	*	14	160	140	230	59	**	*	140	140	26	27	1	5
Klaritromycin	*	37	32	*	*	54	27	27	44	9	**	**	33	34	13	21	1	5
Diklofenak	*	1200	1000	*	**	120	860	760	830	42	**	**	450	640	200	200	4	14
Erytromycin	*	*	**	*	*	*	**	**	**	*	*	*	**	*	*	*	3	9
Flukonazol	*	190	210	*	*	27	150	160	200	140	43	24	200	230	160	81	3	10
Furosemid	*	1300	3200	*	*	130	1900	1600	2300	*	*	*	1400	2000	720	720	2	7
Ibuprofen	99	7500^	230	630	430	1300	260	310	78	66	**	*	**	87	*	*	17	57
Ketokonazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Losartan	*	7000^	2600	**	**	320	2000	1800	950	200	**	**	420	1200	340	600	4	12
Metotrexat	58	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	16	55
Metoprolol	12	1900	1900	**	13	170	1700	1400	1800	700	36	17	1400	960	480	82	1	3
Naproxen	*	34000^	500	52	*	2600^	500	470	220	*	99	*	160	170	110	30	9	28
Oxazepam	*	450	410	*	*	18	420	360	430	250	25	21	360	310	240	99	1	3
Paracetamol	*	44000^	120	100	**	980	42	62	530	68	**	*	61	54	**	24	5	18
Propranolol	*	130	230	*	*	7	190	160	230	15	*	*	100	74	**	*	2	5
Sertralin	*	220	110	*	*	22	35	52	77	20	*	*	49	58	*	*	2	7
Sulfametoxazol	*	910	220	*	*	49	180	140	210	440	**	*	250	200	290	72	6	21
Tramadol	**	330	380	**	5	65	220	270	370	110	7	4	260	250	140	87	1	3
Trimethoprim	**	220	96	*	*	37	83	75	89	7	*	*	59	42	20	**	1	3
Venlafaxin	*	890	1100	*	8	140	920	920	1200	460	67	48	1100	890	810	430	2	5
Zolpidem	*	10	7	*	*	*	4	4	7	*	*	*	5	6	**	**	1	2

Tabell 24. Läkemedel provtagning pilot v34 2023.

IVL-provnr:	327604	327597	327605	327598	327599	327602	327603	327601	327600		
Provpunkt	IN UF	SIn	Ut Ozon	S1	S2	L1	L2	Gpp Oz	FS Oz	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Atenolol	320	63	52	220	280	110	46	**	*	4	13
Karbamazepin	330	290	**	270	250	190	62	*	*	1	3
Ciprofloxacin	16	17	*	**	9	**	*	*	*	3	9
Citalopram	180	160	18	95	130	22	17	4	**	1	3
Klaritromycin	71	51	5	45	61	24	35	*	**	1	3
Diklofenak	690	700	**	250	520	85	130	**	*	3	9
Erytromycin	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1	3
Flukonazol	99	83	62	89	98	99	53	25	13	1	3
Furosemid	1400	1000	**	610	1100	140	240	**	**	6	19
Ibuprofen	66	*	**	58	38	36	*	37	*	5	16
Ketokonazol	*	10	*	*	*	*	*	*	*	1	3
Losartan	830	1600	9	420	770	240	360	12	**	1	3
Metotrexat	6	48	21	24	41	24	23	39	7	1	3
Metoprolol	1300	1300	200	900	750	390	78	21	10	1	4
Naproxen	310	570	23	280	420	120	60	**	*	6	20
Oxazepam	200	220	58	170	170	110	55	9	7	1	3
Paracetamol	660	56	**	74	210	**	**	*	*	10	32
Propranolol	130	120	**	50	39	**	*	*	*	1	3
Sertralin	68	33	*	22	28	*	*	*	*	5	18
Sulfametoxazol	130	78	4	110	140	120	24	*	**	1	3
Tramadol	290	300	36	180	220	83	62	5	3	1	3
Trimethoprim	71	68	**	35	23	10	**	*	*	1	3
Venlafaxin	580	580	70	480	470	380	200	12	10	1	3
Zolpidem	6	5	*	**	4	*	*	*	*	1	3
Σ6&4-metylbenzotriazol	230	210	54	97	65	21	**	9	**	2	7
Amisulprid	**	6	*	**	3	*	*	*	*	1	3
Amoxicillin	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Azitromycin	83	220	**	80	120	25	29	*	*	1	3
Benzotriazol	250	350	75	120	56	46	*	**	23	5	15
Kandersartan	1000	1000^	230	970	870	640	540	50	37	1	3
Hydroklortiazid	1000	1500	200	520	770	480	92	*	*	5	16
Irbersartan	520	580	110	380	330	160	220	**	9	1	4

Tabell 25. Analysresultat för PFAS11 för samtliga provtagningar.

Provnamn	Provpunkt	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFBS	PFHxS	PFOS	6:2 FTS
Provtagning v37 2020												
193354	PP1	*	*	*	0,78	1,0	*	*	*	*	*	*
193355	PP2	*	*	*	0,93	2,7	*	*	*	*	4,6	*
193356	PP3	*	*	*	0,73	3,2	*	*	*	*	4,3	*
193357	PP4	*	*	1,7	1,3	4,4	*	*	*	*	2,9	*
193358	PP5	*	*	1,6	0,93	2,7	*	*	*	*	2,4	*
193359	PP6	*	*	*	1,2	3,3	*	*	*	*	9,2	*
193360	PP7	*	*	*	1,4	3,4	*	*	*	*	8,5	*
193361	PP8	*	*	2,1	1,4	3,8	*	*	*	*	1,9	*
193362	PP9	*	*	3,3	1,1	4,0	*	*	*	*	2,4	*
		<i>LOD</i>	<i>0,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>
Provtagning v8 2021												
224591	UF IN	9,56	10,54	2,88	1,25	3,47	0,279	0,251	0,556	0,991	0,872	0,546
224592	UF	1,05	2,45	1,99	0,798	2,47	*	*	0,715	0,910	0,838	0,264
224593	S1 (GAK1 1/2)	*	1,23	*	*	*	*	*	*	*	*	*
224594	S2 (GAK2 1/2)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
224595	S3 (GAK3 1/2)	*	2,14	1,60	0,210	1,20	*	*	*	*	0,246	*
224596	L1 (GAK1 2/2)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
224597	L2 (GAK2 2/2)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
224598	L3 (GAK3 2/2)	*	1,08	0,541	*	0,375	*	*	*	*	*	*
		<i>LOD</i>	<i>0,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>
Provtagning v15 2021												
224572	PP1	*	*	1,19	0,314	0,804	0,593	*	*	*	0,982	0,518
224573	PP2	*	0,214	0,705	0,421	3,12	0,386	*	*	0,377	1,67	0,642
224574	PP3	*	*	0,786	0,564	2,69	0,342	*	0,398	0,614	1,68	0,695
224575A	PP4	*	3,02	2,71	0,791	3,39	0,323	*	*	0,905	2,22	0,530
224575B	PP4	*	*	1,16	0,691	2,97	0,273	*	0,227	0,716	2,19	0,506
224576	PP5	*	0,680	3,58	0,866	3,03	0,263	*	*	1,16	2,33	0,286
224577	PP6	0,403	7,95	0,330	0,736	1,43	*	*	0,245	1,58	2,31	*
224578	PP7	4,21	6,73	5,26	2,68	7,78	*	*	1,06	8,97	14,9	1,32
224579	PP8	0,727	3,38	3,72	0,995	3,02	*	*	*	1,34	1,60	0,443
224580	PP9	1,36	1,50	2,45	1,44	3,89	0,308	*	1,62	2,17	2,87	0,671
224587	UF	1,65	3,90	3,06	0,889	2,81	0,264	*	*	1,07	0,834	0,433
224581	S1 (GAK1 1/2)	1,87	2,85	2,04	0,866	2,71	*	*	3,25	1,08	0,455	0,364
224582	S2 (GAK2 1/2)	2,12	1,99	1,30	0,475	1,72	*	*	0,929	0,300	0,552	0,265

224583A	S3 (GAK3 1/2)	1,03	1,06	2,18	0,740	2,58	0,257	0,388	1,45	0,555	1,36	0,492
224583B	S3 (GAK3 1/2)	0,968	*	2,25	0,672	2,46	0,336	*	0,838	0,712	1,03	0,627
224584	L1 (GAK1 2/2)	1,67	*	0,659	0,232	0,246	*	*	0,525	*	*	*
224585	L2 (GAK2 2/2)	*	0,439	0,483	*	*	*	*	0,531	*	*	*
224586	L3 (GAK3 2/2)	*	2,43	1,50	0,746	1,91	*	*	0,802	0,276	0,465	0,421
	LOD	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Provtagning v21 2021												
234727	UF IN	5,99	1,10	*	0,822	3,98	0,443	0,414	0,802	*	1,35	*
234726	UF	4,50	1,33	*	1,57	4,30	0,392	*	1,04	0,836	1,59	*
234728	S1 (GAK1 1/2)	4,60	1,32	1,44	1,01	3,14	*	0,227	0,932	1,12	0,941	0,408
234729	S2 (GAK2 1/2)	4,62	1,34	*	0,591	2,57	*	0,146	0,538	*	0,647	*
234730	S3 (GAK3 1/2)	4,72	1,18	*	0,770	3,37	*	*	0,745	0,628	0,907	0,490
234731	L1 (GAK1 2/2)	5,28	1,36	1,10	0,448	1,88	*	*	0,594	*	*	*
234732	L2 (GAK2 2/2)	3,58	0,794	*	*	0,561	*	*	0,263	*	*	*
234733	L3 (GAK3 2/2)	4,26	1,28	*	0,301	2,91	*	*	0,447	1,31	0,570	*
	LOD	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Provtagning v25 2021												
234735	UF IN	7,58	1,12	*	0,624	2,68	*	0,295	0,415	1,81	1,11	*
234734	UF	4,80	1,46	*	0,650	2,50	*	0,257	0,387	1,49	1,81	*
234736	S1 (GAK1 1/2)	4,13	2,09	*	0,633	2,47	*	0,162	0,621	1,19	0,751	*
234737	S2 (GAK2 1/2)	6,33	1,19	*	0,469	2,37	*	*	0,376	1,05	0,709	*
234738	S3 (GAK3 1/2)	4,83	0,703	*	0,541	2,38	*	*	0,476	0,805	0,785	*
234739	L1 (GAK1 2/2)	4,77	1,87	0,408	0,538	1,68	*	*	1,28	0,610	0,309	*
234740A	L2 (GAK2 2/2)	4,78	1,06	*	*	0,843	*	*	0,356	*	*	*
234740B	L2 (GAK2 2/2)	5,05	0,929	*	*	1,08	*	*	0,254	*	*	*
234741	L3 (GAK3 2/2)	5,21	1,46	*	0,386	2,09	*	*	0,370	0,621	0,678	*
	LOD	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Provtagning v29 2021												
234707	PP1	12,2	1,70	1,38	0,434	3,75	*	0,853	2,18	3,23	1,68	0,416
234708	PP2	4,78	0,288	*	0,852	3,35	1,14	0,181	0,587	5,09	3,25	0,778
234709	PP3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
234710	PP4	3,71	1,10	*	0,868	3,54	*	0,354	0,660	1,25	2,52	4,35
234711	PP5	5,30	1,24	*	1,15	3,74	0,273	0,654	0,19	1,97	2,31	4,13
234712	PP6	3,82	1,67	2,88	1,05	2,10	*	0,859	1,33	2,33	4,46	0,269
234713	PP7	10,4	5,62	6,33	2,39	7,22	*	*	2,29	9,64	23,2	0,441
234714	PP8	5,44	1,17	*	0,842	3,26	*	0,411	0,503	1,05	2,21	4,29
234715A	PP9	4,37	1,20	*	1,12	3,65	*	0,486	0,167	1,41	3,83	3,22
234715B	PP9	4,79	1,33	*	1,07	2,78	*	0,540	0,335	2,05	3,39	2,67
234723	PP10	6,16	2,33	*	1,45	4,86	*	0,337	0,696	2,15	4,87	3,45
234724	PP11	4,54	1,00	0,876	1,14	3,68	0,778	0,496	1,60	*	0,815	*

234725A	PP12	6,83	1,75	*	1,17	3,73	1,09	0,348	1,41	0,845	3,41	1,20
234725B	PP12	4,81	1,79	*	1,10	3,90	0,754	0,596	0,789	1,04	3,83	1,39
234719	UF	3,48	0,802	*	1,08	3,42	*	0,160	0,156	1,08	1,67	2,31
234716	S1 (GAK1 1/2)	3,46	0,673	*	1,00	2,75	*	0,160	0,301	1,34	0,949	2,24
234717	S2 (GAK2 1/2)	5,55	1,48	*	0,687	2,20	*	0,271	0,331	0,729	0,534	1,70
234718	S3 (GAK3 1/2)	3,83	1,28	*	0,952	3,17	*	0,279	0,233	1,36	0,441	3,56
234720A	L1 (GAK1 2/2)	5,46	2,52	*	0,747	2,23	*	*	0,509	0,635	0,555	0,995
234720B	L1 (GAK1 2/2)	5,38	1,84	1,22	0,689	2,23	*	*	0,260	0,706	0,570	0,713
234721	L2 (GAK2 2/2)	4,61	1,54	0,289	0,202	0,888	*	*	0,487	*	*	*
234722	L3 (GAK3 2/2)	3,38	1,26	*	0,526	1,50	*	*	0,341	0,260	*	1,18
	LOD	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Provtagningsv34 2021												
238176	UF IN	6,47	3,22	6,35	2,40	6,15	0,77	0,26	1,43	2,08	5,48	11,16
238177	UF	5,59	1,43	3,19	1,93	5,64	0,72	0,20	0,82	2,27	4,16	3,68
238178	S1 (GAK1 1/2)	7,06	1,31	3,97	1,78	5,30	0,66	0,09	0,94	1,95	3,04	6,52
238179	S2 (GAK2 1/2)	5,93	1,65	4,19	1,66	4,50	0,46	0,03	0,97	1,92	2,55	4,54
238180A	S3 (GAK3 1/2)	6,32	1,85	5,05	1,70	5,62	0,46	0,22	1,06	2,12	2,76	9,70
238180B	S3 (GAK3 1/2)	6,63	1,58	4,58	1,90	5,48	0,67	0,16	1,16	2,28	2,95	10,11
238181	L1 (GAK1 2/2)	7,49	1,75	5,15	1,60	4,61	0,44	0,02	0,95	1,31	1,06	4,27
238182	L2 (GAK2 2/2)	5,85	1,45	4,15	1,06	2,60	0,21	0,07	0,50	0,68	0,92	1,83
238183	L3 (GAK3 2/2)	5,88	2,09	5,31	1,78	4,92	0,48	0,13	0,68	1,45	1,07	10,40
	LOD	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabell 26. PFAS provtagningsv50 2021.

IVL-provnr:	253025	253026	253027	253028	253029A	253029B	253030	253031	253032		
Provpunkt	S IN	L1	L2	L3	IN UF	IN UF	S1	S2	S3	LOD	LOQ
Substans	211215	211215	211215	211215	211215	211215	211215	211215	211215	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [†]	4,50	4,38	3,19	4,22	2,63	2,28	3,59	4,28	4,05	0,10	
PFPeA [†]	2,61	1,93	2,13	2,17	2,47	2,34	2,07	1,42	3,37	0,10	
PFHxA	1,00	1,88	1,41	1,01	1,89	2,15	1,10	1,99	1,59	0,20	
PFHpA	1,30	1,98	1,43	2,21	1,20	1,16	1,05	1,00	1,15	0,07	
PFOA	2,28	3,10	1,51	3,95	2,34	2,39	2,46	2,20	3,09	0,05	
PFNA	0,50	0,28	0,22	0,58	0,41	0,28	0,53	0,27	0,46	0,05	
PFDA	*	*	*	0,10	*	*	0,10	*	*	0,06	
PFBS	0,39	0,72	0,66	0,63	0,51	0,43	0,39	0,55	0,23	0,10	
PFHxS	1,15	1,25	0,52	1,62	0,92	0,91	0,78	0,60	1,23	0,10	
PFOS	1,14	2,36	0,68	3,80	2,19	1,94	3,40	1,23	1,02	0,08	
6:2 FTS	0,82	1,04	0,71	2,83	1,95	2,58	2,52	1,05	1,60	0,06	

Tabell 27. PFAS provtagning v12 & v13 2022.

IVL-provnr:	264056	264057	264058	264059	264060	264061	264062A	264062B	264063	264064	264065		
Provpunkt	S in 23/3-22	S in 30/3-22	S1 23/3-22	S2 23/3-22	S2 30/3-22	L1 23/3-22	L2 23/3-22	L2 23/3-22	L2 30/3-22	In UF 23/3-22	In UF 30/3-22	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [‡]	2,59	2,43	3,04	2,63	2,53	3,18	3,63	3,11	*	1,41	1,73	0,08	
PFPeA [‡]	1,11	1,86	2,53	1,62	1,64	1,88	2,20	2,57	*	1,61	1,38	0,10	
PFHxA	3,08	2,33	3,38	2,84	3,02	3,61	3,88	3,13	*	3,16	2,60	0,09	
PFHpA	1,04	1,06	1,22	1,16	1,18	1,04	1,09	1,37	*	0,72	1,07	0,06	
PFOA	3,27	3,08	3,58	2,94	3,37	2,75	3,53	3,12	*	2,87	2,82	0,05	
PFNA	0,27	0,37	0,22	0,23	0,50	0,26	0,32	0,35	*	0,12	0,34	0,10	
PFDA	0,34	0,20	0,28	0,12	0,39	0,08	0,22	0,49	*	0,09	0,18	0,05	
PFBS	0,18	0,51	0,42	0,47	0,38	0,21	0,41	0,61	*	0,50	0,45	0,06	
PFHxS	1,26	1,34	1,35	1,07	1,02	0,98	1,49	0,93	*	0,95	1,06	0,07	
PFOS	1,67	1,81	1,66	1,54	2,60	1,13	3,71	2,55	0,19	1,78	1,12	0,10	
6:2 FTS	0,22	0,67	0,76	0,64	0,92	0,47	0,72	1,03	*	1,39	1,19	0,08	

Tabell 28. PFAS provtagning v29 2022.

IVL-provnr:	278746	278744	278745	278747A	278747B	278748	278749		
Provpunkt	S in (20/7-22)	L1 (20/7-22)	L2 (20/7-22)	In-Up (20/7-22)	In-Up (20/7-22)	S1 (20/7-22)	S2 (20/7-22)	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [‡]	1,74	1,21	1,54	2,24	1,69	1,51	1,38	0,08	
PFPeA [‡]	1,45	1,33	1,55	1,42	0,98	1,57	1,53	0,07	
PFHxA	1,26	2,69	1,77	2,6	2,09	1,73	2,78	0,06	
PFHpA	0,84	0,81	0,69	0,95	0,94	0,97	0,89	0,05	
PFOA	2,95	2,7	1,52	2,29	2,61	3,04	2,57	0,05	
PFNA	0,59	0,54	0,23	0,41	0,70	0,48	0,86	0,05	
PFDA	0,11	0,38	*	0,61	0,49	*	0,95	0,05	
PFBS	0,70	0,62	0,47	1,32	1,43	0,91	0,64	0,07	
PFHxS	1,6	1,43	0,81	1,01	1,04	1,17	1,13	0,05	
PFOS	3,32	1,97	0,82	4,65	4,4	2,77	6,1	0,05	
6:2 FTS	0,67	1,11	0,32	3,28	2,27	1,36	0,79	0,07	

Tabell 29. PFAS provtagning v36 2022.

IVL-provnr:	285777A	285777B	285778	285779	285780	285781	285782		
Provpunkt	IN UF 14/9	IN UF 14/9	Sin 14/9	S1 14/9	S2 14/9	L1 14/9	L2 14/9	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [‡]	0,52	0,45	0,91	1,59	1,02	1,21	0,95	0,12	0,39
PFPeA [‡]	1,37	1,01	1,7	5,28	1,43	2,71	1,12	0,1	0,32
PFHxA	3,03	3,74	4,44	6,76	4,7	4,49	3,08	0,22	0,74
PFHpA	0,75	0,91	1,18	1,11	0,96	0,99	0,59	0,07	0,22
PFOA	4,65	2,85	3,48	3,75	2,71	2,77	1,83	0,12	0,4
PFNA	0,42	0,45	0,38	0,43	0,4	0,4	0,19	0,09	0,3
PFDA	0,31	0,25	0,36	0,31	0,28	0,28	0,2	0,17	0,56
PFBS	1,7	2,34	2,99	4,59	2,47	3,3	1,9	0,09	0,29
PFHxS	8,3	9,76	13,38	15,36	10,72	12,46	7,17	0,1	0,34
PFOS	61,74	59,24	68,84	68,14	57,74	45,83	32,73	0,08	0,28
6:2 FTS	8,78	11,38	5,96	10,46	6,59	6,76	3,43	0,09	0,3

Tabell 30. PFAS provtagning v50 2022 & v2 2023.

IVL-provnr:	299732A	299732B	299733	299734	299735	299736	299737	299738	299739	299740		
Provpunkt	In UF 9/11-22	In UF 9/11-22	SIn 9/11-22	S1 9/11-22	S2 9/11-22	L1 9/11-22	L2 9/11-22	Gpp Oz 9-11/22	Fs Oz 9/11-22	Ut ozon 9/11-22	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [‡]	1,45	1,06	2,4	2,66	2,33	1,76	2,19	0,54	0,16	3,24	0,03	0,1
PFPeA [‡]	2,05	1,6	1,88	2,34	1,77	1,93	1,98	0,05	*	1,58	0,07	0,2
PFHxA	2,17	1,9	2,13	2,69	2,53	2,46	2,24	0,05	0,06	2,82	0,03	0,1
PFHpA	0,65	0,72	0,7	0,65	0,74	0,76	0,67	*	*	0,74	0,03	0,1
PFOA	2,54	2,45	2,56	2,75	2,39	2,66	2,05	0,07	0,05	2,23	0,03	0,1
PFNA	0,54	0,51	0,51	0,38	0,3	0,41	0,41	*	*	0,23	0,03	0,1
PFDA	0,16	0,16	0,18	0,17	0,49	0,37	0,21	0,42	0,04	0,04	0,03	0,1
PFBS	1,16	1,13	1,15	1,13	1,09	1,39	1,07	*	*	1,39	0,03	0,1
PFHxS	1,7	1,54	1,85	1,77	1,66	2,06	1,58	*	*	1,71	0,05	0,14
PFOS	7,12	6,36	8,44	8,55	9,71	9,28	5,65	0,05	0,06	4,35	0,03	0,1
6:2 FTS	1,9	2,18	1,4	2,36	1,98	2,41	1,38	0,06	0,05	3,13	0,03	0,1

Tabell 31. PFAS provtagning v17 2023.

IVL-provnr:	312554	312555	312556	312557	312558	312559	312560	312561	312562	312563	312564A	312564B	312565	312566	312567	312568	312569	LOD	LOQ	
Provpunkt	PP1(B)	PP2	PP5	PP7(A)	PP7(B)	PP6	PP8	PP9	UF (Sin)	O3	GPP O3	GPP O3	FS O3	S1	S2	L1	L2			
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [‡]	31,44	0,13	*	3,62	5,59	2,34	0,94	*	*	*	1,71	2,03	1,94	0,18	0,59	0,57	1,09	0,1	0,3	
PFPeA [‡]	35,9	2,5	1,58	5,98	4,52	0,56	1,46	2,06	1,32	1,37	1,57	1,43	1,11	1,55	1,2	1,5	1,87	0,05	0,15	
PFHxA	73,07	2,01	3	6,72	6,28	1,82	2,86	3,21	3,39	3,51	2,45	2,3	1,67	2,96	2,68	2,99	2,84	0,05	0,15	
PFHpA	37,7	1,82	2,34	2,62	2,63	1,18	1,55	2,07	2,01	1,61	0,76	0,76	0,62	1,86	1,54	1,75	1,6	0,04	0,12	
PFOA	129,11	3,25	3,39	3,97	4,94	1,67	3,2	3,65	3,39	3,09	1,7	1,64	1,24	3,41	3,34	3,65	3,1	0,03	0,1	
PFNA	2,57	0,58	0,51	0,37	0,42	0,67	0,4	0,38	0,41	0,32	0,14	0,16	0,07	0,4	0,43	0,45	0,33	0,03	0,1	
PFDA	0,99	0,28	0,47	0,1	0,26	0,55	0,15	0,36	0,13	0,09	*	*	0,06	0,09	0,43	0,27	0,17	0,03	0,1	
PFBS	11,14	3,38	1,23	1,38	1,17	0,34	1,33	1,12	1,76	0,88	0,57	0,58	0,57	1,91	1,35	1,52	1,5	0,03	0,1	
PFHxS	15,53	1,15	1,02	10,93	9,75	0,95	1,1	1,73	0,99	0,87	0,39	0,44	0,27	1,19	1,52	1,32	1,07	0,08	0,25	
PFOS	38,94	11,44	4,94	17,3	21,97	2,16	3,83	4,53	2,46	2,02	0,85	0,84	0,71	3,82	4,25	4,04	2,87	0,03	0,1	
6:2 FTS	5,17	0,82	0,6	1,21	1,19	0,12	0,38	0,53	0,37	0,85	0,32	0,22	0,32	0,55	0,63	0,56	0,66	0,03	0,1	

Tabell 32. PFAS provtagning v28 2023.

IVL-provnr:	321389	321390	321391	321392A	321392B	321393	321394	321395	321396	321397	321398	321399	321400	321401	321402	321403	321404	LOD	LOQ	
Provpunkt	PP1(B)	PP2	PP5	PP7(A)	PP7(A)	PP7(B)	PP6	PP8	PP9	UF (Sin)	O3	GPP O3	FS O3	S1	S2	L1	L2			
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [‡]	48,99	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4,32	2,41	1,53	0,86	0,64	0,86	1,21	0,1	0,3	
PFPeA [‡]	35,12	0,87	1,69	3,34	3,77	*	1,47	1,28	1,9	1,91	1,11	1,9	2,02	2,21	2,06	2,08	2,32	0,07	0,21	
PFHxA	108,31	1,08	1,53	1,09	1,4	0,56	0,77	1,65	1,23	1,29	3,09	3,47	2,45	2,78	2,02	2,07	2,21	0,05	0,15	
PFHpA	29,29	1,39	1,19	1	1,25	1,8	0,95	1,49	1,61	1,08	1,18	1,17	0,63	0,91	1,34	1,22	0,96	0,05	0,15	
PFOA	150,82	2,06	2,78	2,98	2,74	3,48	2,3	3,04	2,87	2,93	2,59	2,32	1,59	2,53	2,49	2,96	2,04	0,05	0,15	
PFNA	2,9	0,36	0,78	0,52	0,35	0,43	0,96	0,55	0,56	0,39	0,4	0,51	0,28	0,55	0,64	0,57	0,4	0,05	0,15	
PFDA	10,27	3,91	1,2	2,8	2,82	3,9	4,3	2,18	3,8	0,25	0,09	0,89	*	*	0,53	0,03	0,08	0,05	0,15	
PFBS	16,37	1,01	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0,05	0,15	
PFHxS	18,88	0,28	1	5,62	4,51	3,4	0,5	0,9	0,67	0,5	0,47	0,38	0,27	0,79	0,8	1,15	0,9	0,08	0,25	
PFOS	70,32	3,46	3,58	6,02	7,97	9,25	2,12	2,33	3,94	1,78	1,72	0,93	0,79	2,39	4,59	3,72	1,21	0,05	0,15	
6:2 FTS	5,35	0,83	0,54	0,37	0,43	0,3	0,14	0,39	0,55	0,3	0,98	0,21	0,45	0,54	0,68	0,58	0,46	0,05	0,15	

Tabell 33. PFAS prøvtagning v34 2023.

IVL-provnr:	327597	327604A	327604B	327605	327598	327599	327602	327603	327601	327600		
Provpunkt	SIN	IN UF	IN UF	UT OZ	S1	S2	L1	L2	GPP Ozon	FS Ozon	LOD	LOQ
Substans	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
PFBA [†]	1,16	1,42	1,46	12,9	1,23	1,47	2,41	2,02	2,82	4,14	0,1	0,3
PFPeA [‡]	1,03	2,03	1,93	0,67	1,63	1,06	1,62	1,18	1,78	1,88	0,07	0,21
PFHxA	2,57	2,81	2,94	3,09	3,53	3,25	3,94	3,39	3,13	3,01	0,05	0,15
PFHpA	1,64	1,43	1,48	1,91	1,27	1,24	1,54	1,15	1,33	1,04	0,05	0,15
PFOA	3,51	4,26	4,28	6,42	4,35	3,84	3,69	3,2	3,36	2,33	0,05	0,15
PFNA	0,47	0,93	0,85	0,71	0,66	0,78	0,36	0,4	0,36	0,25	0,05	0,15
PFDA	0,37	0,09	0,14	0,14	0,3	0,3	0,24	*	*	0,07	0,05	0,15
PFBS	0,8	0,95	0,81	1,15	0,8	0,74	0,92	0,69	1,2	0,81	0,05	0,15
PFHxS	1,38	1,46	1,34	1,92	1,3	0,99	1,62	1,33	1,16	0,85	0,08	0,25
PFOS	1,78	4,23	3,6	4,72	3,23	5,07	3,18	2,29	1,17	0,99	0,05	0,15
6:2 FTS	0,43	0,69	0,8	1,31	0,48	0,48	0,51	0,28	0,45	0,39	0,05	0,15

Bilaga 6.3 Resultat från aktivitetstester

(OBS: ordning av provresultaten är anpassat från analysrapporten för korrekt tidslinje och provpunktsbeteckning)

ER-aktivitet (pgE2-ekv./L)							
Plats	ProvID	2022-11-08	2023-01-13	2022-03-23	2023-04-25	2023-07-03	2023-08-27
Deponi	Lakvatten Bösarp deponin (PP1-A)	ea	ea	ea	220	433	ea
Getteröverket	IN (PP2)	ea	ea	ea	106000	212000	ea
	UT (PP5)	ea	ea	ea	437	3490	ea
Pilot UF-GAK	In UF	1030	3915	1513	437	3490	1030
	S in (UF ut)	1480	3145	756	397	3450	855
	S1 (GAK GPP20 1/2)	609	280	297	469	1650	572
	L1 (GAK GPP20 2/2)	<LOD	<LOD	114	<LOD	181	237
	S2 (GAK FS400 1/2)	943	3638	952	1580	2680	991
	L2 (GAK FS400 2/2)	388	<LOD	139	<LOD	324	209
Pilot O ₃ -GAK	In ozon	1030	ea	ea	437	3490	1030
	Ut ozon	386	ea	ea	374	1370	1400
	GAK (FS400)	316	ea	ea	<LOD	176	280
	GAK (GPP20)	<LOD	ea	ea	<LOD	204	260
Recipient	Monarkdiket uppströms (PP6)	ea	ea	ea	3240	5080	ea
	Monarkdiket nedströms (PP8)	ea	ea	ea	2200	2410	ea
	Industriområde (PP7-A)	ea	ea	ea	59,4	1510	ea
	Lassabackadiket (PP7-B)	ea	ea	ea	597	896	ea
	Naturum (PP9)	ea	ea	ea	2670	1220	ea
Detektionsgräns (LOD)		29,1	10,3	1,7	13,0	15,5	13,5

AR-aktivitet (ngDHT-ekv./L)							
Plats	ProvID	2022-11-08	2023-01-13	2022-03-23	2023-04-25	2023-07-03	2023-08-27
Deponi	Lakvatten Bösarp deponin (PP1-A)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
Getteröverket	IN (PP2)	ea	ea	ea	57,3	417	ea
	UT (PP5)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
Pilot UF-GAK	In UF	<LOD	<LOD	0,46	<LOD	<LOD	<LOD
	S in (UF ut)	<LOD	<LOD	0,98	<LOD	<LOD	<LOD
	S1 (GAK GPP20 1/2)	<LOD	<LOD	0,95	<LOD	<LOD	<LOD
	L1 (GAK GPP20 2/2)	<LOD	<LOD	0,86	<LOD	<LOD	<LOD
	S2 (GAK FS400 1/2)	<LOD	<LOD	0,58	<LOD	<LOD	<LOD
	L2 (GAK FS400 2/2)	<LOD	<LOD	0,90	<LOD	<LOD	<LOD
Pilot O ₃ -GAK	In ozon	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
	Ut ozon	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
	GAK (FS400)	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
	GAK (GPP20)	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
Recipient	Monarkdiket uppströms (PP6)	ea	ea	ea	0,68	<LOD	ea
	Monarkdiket nedströms (PP8)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
	Industriområde (PP7-A)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
	Lassabackadiket (PP7-B)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
	Naturum (PP9)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
Detektionsgräns (LOD)		0,02	0,22	0,10	0,10	0,25	0,33

Anti-AR (ngOHF-ekv./L)							
Plats	ProvID	2022-11-08	2023-01-13	2022-03-23	2023-04-25	2023-07-03	2023-08-27
Deponi	Lakvatten Bösarp deponin (PP1-A)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
Getteröverket	IN (PP2)	ea	ea	ea	87,6	198	ea
	UT (PP5)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
Pilot UF-GAK	In UF	<LOD	<LOD	16,0	<LOD	<LOD	80,1
	S in (UF ut)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
	S1 (GAK GPP20 1/2)	<LOD	<LOD	16,0	<LOD	<LOD	<LOD
	L1 (GAK GPP20 2/2)	<LOD	<LOD	18,0	<LOD	<LOD	<LOD
	S2 (GAK FS400 1/2)	<LOD	<LOD	18,0	<LOD	<LOD	<LOD
	L2 (GAK FS400 2/2)	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Pilot O ₃ -GAK	In ozon	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	80,1
	Ut ozon	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
	GAK (FS400)	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD

Recipient	GAK (GPP20)	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
	Monarkdiket uppströms (PP6)	ea	ea	ea	73,7	<LOD	ea
	Monarkdiket nedströms (PP8)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
	Industriområde (PP7-A)	ea	ea	ea	<LOD	59,8	ea
	Lassabackadiket (PP7-B)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
	Naturum (PP9)	ea	ea	ea	<LOD	38,1	ea
Detektionsgräns (LOD)		4,7	66,4	12,0	40,9	37,3	44,5

AhR-aktivitet (ngTCDD-ekv./L)

Plats	ProvID	2022-11-08	2023-01-13	2022-03-23	2023-04-25	2023-07-03	2023-08-27
Deponi	Lakvatten Bösarp deponin (PP1-A)	ea	ea	ea	1,51	0,19	ea
Getteröverket	IN (PP2)	ea	ea	ea	43,20	2,78	ea
	UT (PP5)	ea	ea	ea	0,26	0,18	ea
Pilot UF-GAK	In UF	0,19	0,83	6,10	0,26	0,18	0,39
	S in (UF ut)	0,25	0,84	4,60	0,88	0,07	0,46
	S1 (GAK GPP20 1/2)	0,31	0,75	4,50	0,87	0,06	0,35
	L1 (GAK GPP20 2/2)	0,02	0,58	3,90	0,27	0,04	0,09
	S2 (GAK FS400 1/2)	0,06	0,38	7,10	1,34	0,08	0,42
	L2 (GAK FS400 2/2)	0,07	1,74	3,90	0,16	0,08	0,12
Pilot O ₃ -GAK	In ozon	0,19	ea	ea	0,26	0,18	0,39
	Ut ozon	0,06	ea	ea	3,14	0,10	0,33
	GAK (FS400)	<LOD	ea	ea	0,14	0,02	0,07
	GAK (GPP20)	0,03	ea	ea	0,22	0,03	0,57
Recipient	Monarkdiket uppströms (PP6)	ea	ea	ea	6,78	0,97	ea
	Monarkdiket nedströms (PP8)	ea	ea	ea	2,72	0,13	ea
	Industriområde (PP7-A)	ea	ea	ea	9,09	0,33	ea
	Lassabackadiket (PP7-B)	ea	ea	ea	2,22	0,54	ea
	Naturum (PP9)	ea	ea	ea	2,78	0,39	ea
	Detektionsgräns (LOD)		0,022	0,123	0,400	0,053	0,016

Nrf2-aktivitet (µgtBHQ-ekv./L)

Plats	ProvID	2022-11-08	2023-01-13	2022-03-23	2023-04-25	2023-07-03	2023-08-27
Deponi	Lakvatten Bösarp deponin (PP1-A)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
Getteröverket	IN (PP2)	ea	ea	ea	59,5	218	ea
	UT (PP5)	ea	ea	ea	<LOD	9,6	ea
Pilot UF-GAK	In UF	6,2	7,7	45,6	<LOD	9,6	<LOD
	S in (UF ut)	6,1	9,6	21,6	<LOD	20,8	26,4
	S1 (GAK GPP20 1/2)	9,2	7,3	<LOD	<LOD	<LOD	12,4
	L1 (GAK GPP20 2/2)	7,1	<LOD	20,4	<LOD	<LOD	<LOD
	S2 (GAK FS400 1/2)	6,4	10,2	<LOD	<LOD	8,8	32,7
	L2 (GAK FS400 2/2)	5,8	<LOD	21,9	<LOD	7,0	<LOD
Pilot O ₃ -GAK	In ozon	6,2	ea	ea	<LOD	9,6	<LOD
	Ut ozon	<LOD	ea	ea	<LOD	11,9	80,5
	GAK (FS400)	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
	GAK (GPP20)	6,6	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD
Recipient	Monarkdiket uppströms (PP6)	ea	ea	ea	<LOD	11,3	ea
	Monarkdiket nedströms (PP8)	ea	ea	ea	14,2	6,1	ea
	Industriområde (PP7-A)	ea	ea	ea	<LOD	8,3	ea
	Lassabackadiket (PP7-B)	ea	ea	ea	<LOD	<LOD	ea
	Naturum (PP9)	ea	ea	ea	6,6	<LOD	ea
	Detektionsgräns (LOD)		4,1	5,9	10,9	5,7	3,5

Microbial community analysis

CP1234a

Vatten & Miljö i Väst AB (VIVAB)

DNASense ApS

08-08-2023, Aalborg, Denmark

Contents

1 Project scope	2
1.1 DNASense microbial community analysis	2
2 Results	3
2.1 Data availability	3
2.2 DNA extraction, library preparation and sequencing	3
2.3 Microbial community composition	5
3 Materials and methods	7
3.1 Sample DNA extraction	7
3.2 Cross-kingdom 16S/18S rRNA gene variable regions 4-8 (abeV48-A) sequencing	7
References	9

1 Project scope

This project concerns the analysis of microbial communities in effluent and granuel samples. DNASense received a total of 13 samples from Moshe Habagil at Vatten & Miljö i Väst AB (VIVAB) and these were analysed using gene amplicon sequencing targeting the archaea/bacteria/eukarya 16S/18S rRNA gene variable regions 4-8 (abeV48-A) in combination with taxonomic classification against the MiDAS 4.8.1 database.

1.1 DNASense microbial community analysis

The general microbial community analysis workflow from raw sample to the final report is outlined in figure 1. First, incoming samples are registered in the laboratory and DNA is extracted from all organisms in the sample. Afterwards, the extracted microbial community DNA is processed and sequencing libraries prepared for DNA sequencing on state-of-the-art equipment in DNASense's laboratory. DNA from each microbe in the community contains specific taxonomic marker genes (also called fingerprint genes) that can be used for organism identification and abundance estimation. Examples of marker genes are the 16S ribosomal RNA (16S rRNA) gene for bacteria and archaea, and the internal transcribed spacer (ITS) for fungi. DNA sequencing is used to count the number of marker gene copies from each microbe in a sample, and that count is in turn used as an estimate of the relative abundance of the microbe in the sample community. Around 10000 marker gene copies are DNA sequenced from each sample to provide a high resolution of the community structure. The taxonomic marker genes can be matched with a reference database for identification of the microbes in the community.

Sample preparation and DNA sequencing for the taxonomic marker genes were conducted in agreement with the latest research standards. The organism abundances - presented in the analysis - represent the count of each taxonomic marker gene in the sample. Hence these abundances are influenced by DNA extraction, gene copy number and primer biases and does not necessarily represent the absolute *in situ* organism abundances.

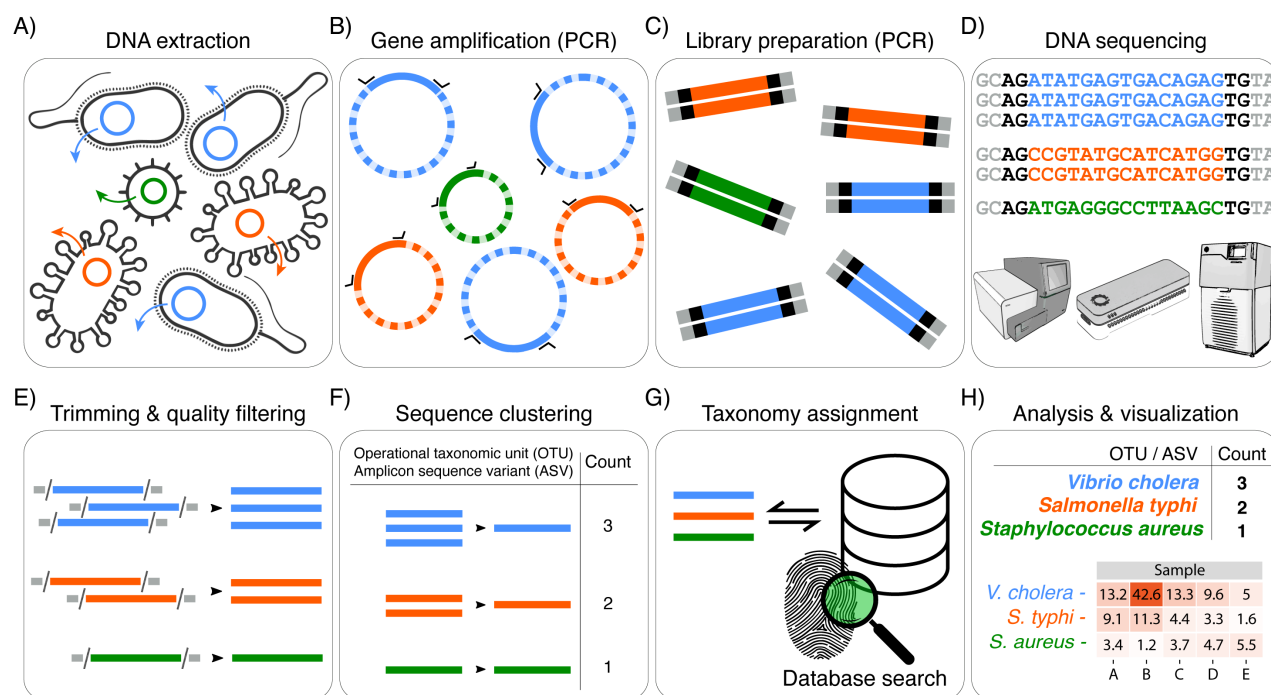


Figure 1: Overview of the general workflow from sample to microbial community profile. **A)** Total community DNA is extracted and **B)** DNA amplicons are prepared using PCR with specific primers (black) targeting e.g. the 16S rRNA gene variable regions for bacterial taxonomic marker genes. **C)** A second processing step adds sequencing adapters. **D)** Resulting amplicon libraries are DNA sequenced and then basecalled. **E)** Basecalled sequences are adapter trimmed and quality filtered. **F)** DNA reads are partitioned into clusters (either OTUs or ASVs) providing the read abundance of each cluster. **G)** Read sequence taxonomy is assigned by searching against a reference database. **H)** OTU/ASV tables correlating taxonomy and abundance are generated for further results analysis.

2 Results

2.1 Data availability

The project data is available from the dropbox folder [/CP1234a](#) with the password **hardwood08record**. The file **shiny/rawData.zip** contains the raw unprocessed sequencing data, and the folder **/figures** includes project figures in print friendly format for general use.

The file **shiny/OTUtable.txt** contains the different OTUs that were identified in all samples, their abundances and taxonomic assignment. Each OTU has a unique identifier and the DNA sequence for the specific OTU mapped to can be found in the file **shiny/OTUs.fa**. Data can also be explored, filtered and visualized in heatmaps and ordination plots, such as PCA, in the DNASense app using the link <https://dnasense.shinyapps.io/dnasense/> with the username CP1234a and the same password as above. Furthermore, summary data tables are provided in the file **summary_tables.xlsx** including a sequencing overview table, output of OTU count tables including their corresponding DNA sequence, and OTU count tables rarefied to 23307 reads; the latter for direct comparison between samples or sample groups.

2.2 DNA extraction, library preparation and sequencing

DNA extraction and sequencing library preparation was successful for 12 / 13 sample analyses (92.3 %), and yielded between 23307 and 80837 DNA reads after QC and bioinformatic processing (table 1). Failed samples were those yielding significantly less mapped DNA reads (mappedReads) than 10000; here mappedReads < 8000. Low-read samples were disregarded in all subsequent analyses. Table 1 provides an overview of the sequencing outcome, and much more extensive data details are given in the sequencing overview table in summary_tables.xlsx.

Table 1: Sequencing statistics. *seqID* is the name of the sequencing data file ID, *sampleName* is the customer-provided sample label, *rawReads* is the total number of DNA reads from sequencing, *filtReads* is the number of DNA reads after filtering for quality and length range, *mappedReads* is the final number of DNA reads mapped to reference database after filtering for mapping quality, *mappedRatio* is the ratio of mappedReads to filtReads. *OTUs* is the total number of OTUs observed in the sample, and *Shannon* is a commonly used alpha-diversity index for comparing sample diversities and essentially quantifies the number of typical OTUs observed in a given sample.

seqID	sampleName	rawReads	filtReads	mappedReads	mappedRatio	OTUs	Shannon
barcode01	GPP-O2	307552	100000	67289	0.67	1259	5.56
barcode02	L1-V	126181	90129	64306	0.71	1137	6.05
barcode03	FS-Ozon	212133	100000	63651	0.64	1145	5.26
barcode04	UT-GV	118052	84632	59248	0.70	1556	6.21
barcode05	UT-ozon	348771	100000	76365	0.76	1120	5.15
barcode06	S1h	138970	100000	78518	0.79	962	5.61
barcode07	L2-V	279430	100000	79314	0.79	1072	5.88
barcode09	S1-AC	327335	100000	77224	0.77	1006	5.80
barcode10	FS-O2-AC	59963	44625	37303	0.84	767	5.20
barcode11	L1-AC	71259	50036	35323	0.71	1119	5.89
barcode12	S2-AC	42230	29424	23307	0.79	928	5.62
barcode13	L2-AC	635993	100000	80837	0.81	1044	5.92

Sample sequencing rarefaction curves for evaluation of the obtained sequencing depth relative to sample complexity, here represented as unique OTUs (figure 2). Shown below are curves for all samples

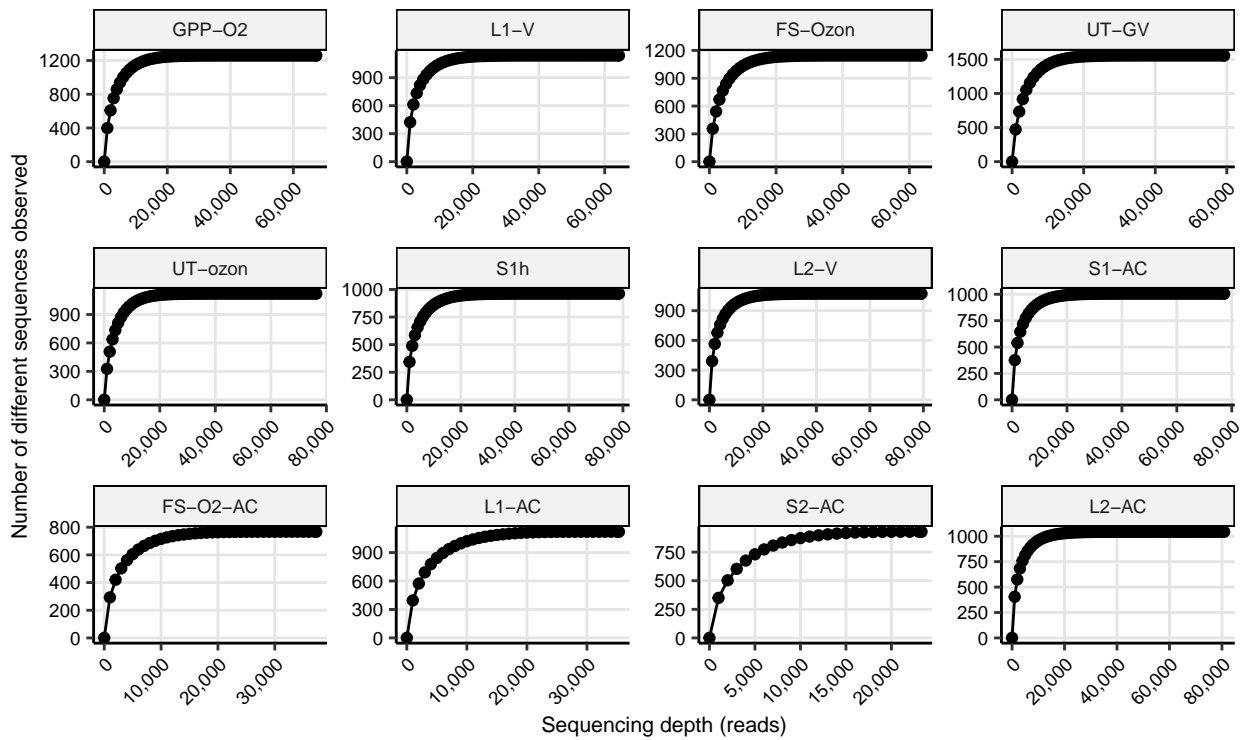


Figure 2: Rarefaction curves for sequencing of samples. The x-axis represents the number of sequences sampled whereas the y-axis depicts the number of observed OTUs.

2.3 Microbial community composition

Figure 3 gives an overview of the 20 most abundant genera across sample groups.

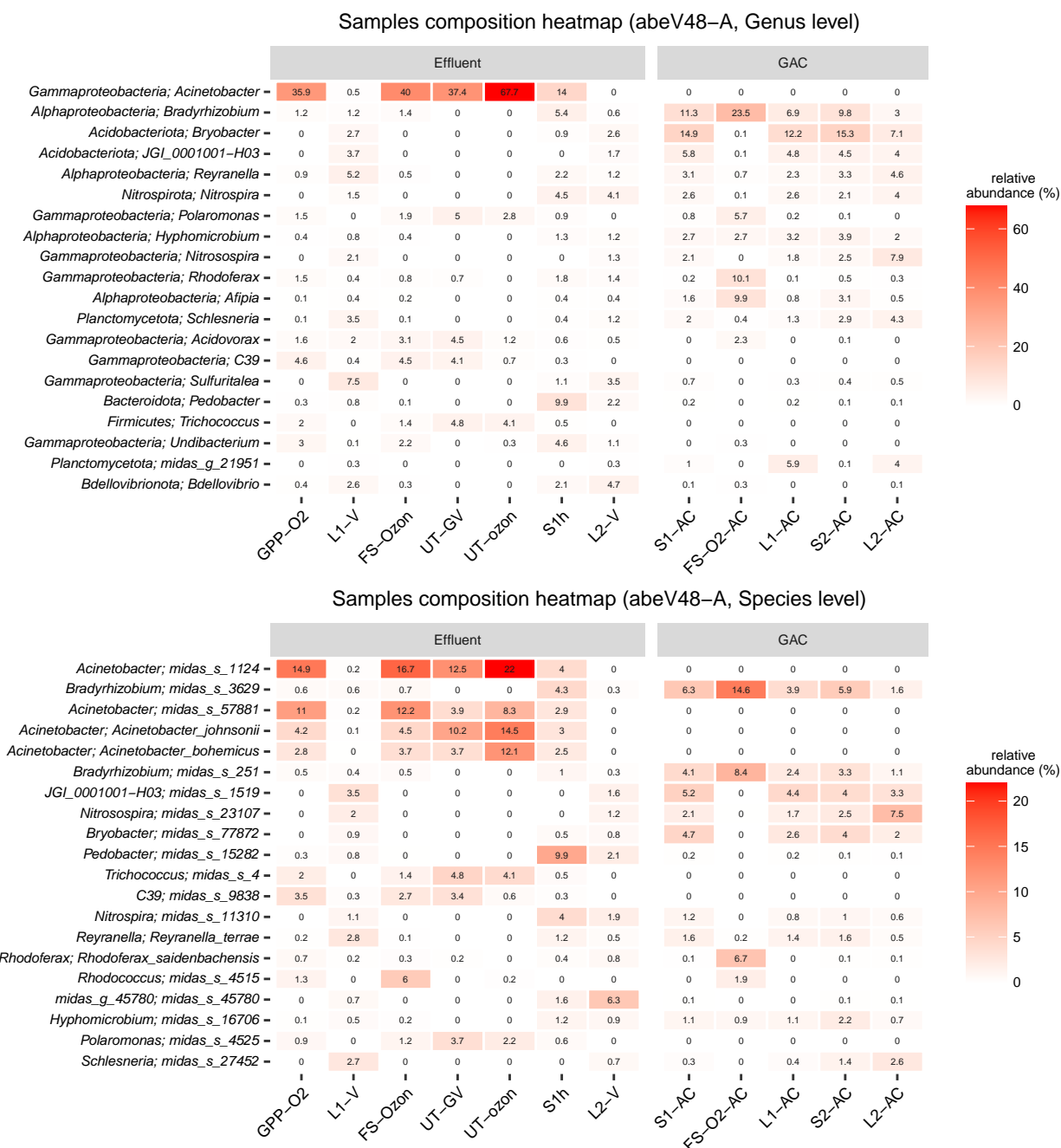


Figure 3: Heatmap of the 20 most abundant genera and species. Top) the most abundant genera in all samples. Where available the OTU's phylum classification is provided along with genus, and if no genus level classification could be obtained, the OTU identification of the sequence mapped to in the database, is given. Bottom) same as top plot but with organisms grouped at the species level with genus also supplied. Values are shown as normalised fraction of total sequences (%).

Figure 4 shows comparison of overall microbial compositions using multivariate statistics (PCA) for all samples.

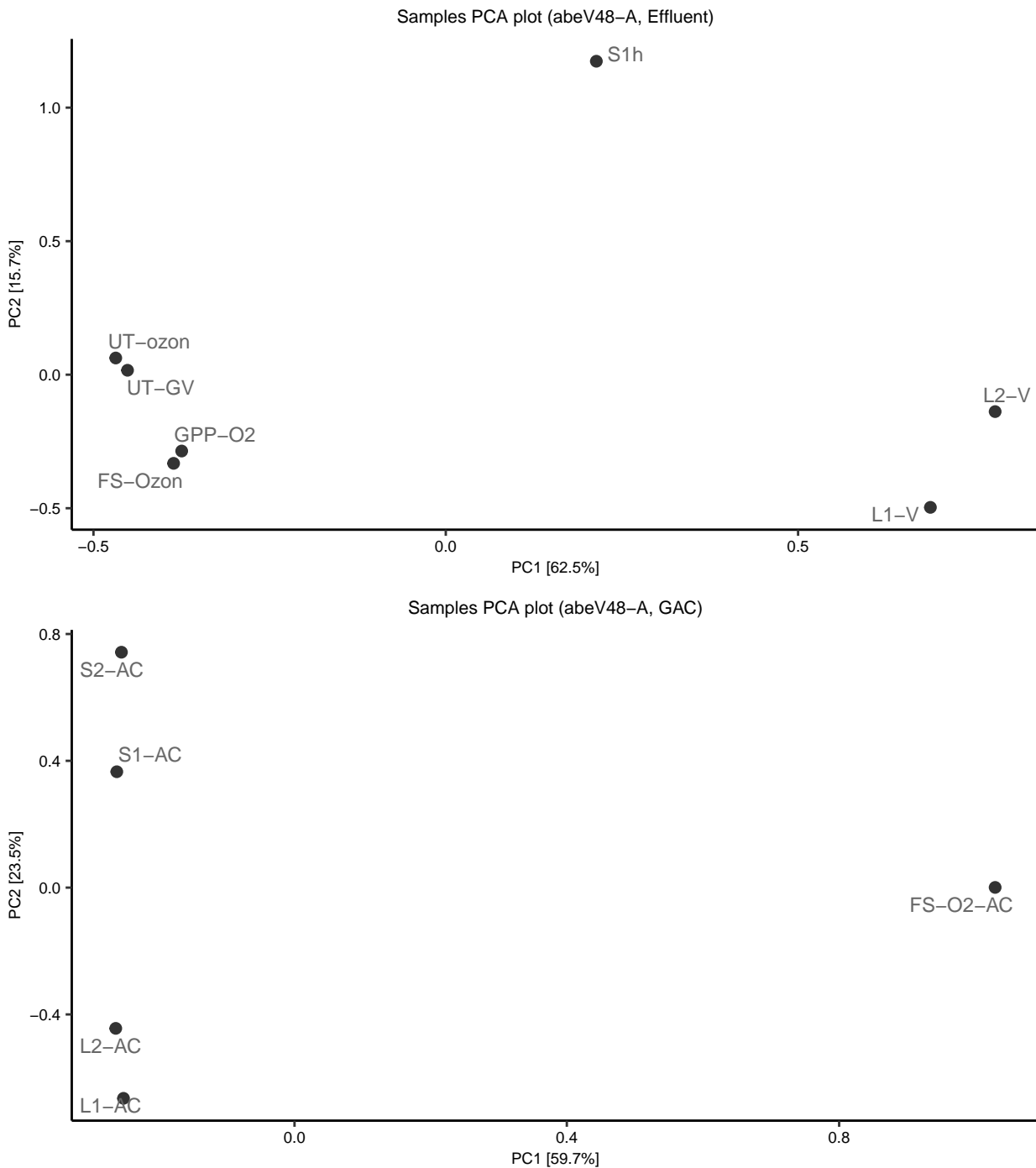


Figure 4: Principal component analysis (PCA). Identification of samples with similar microbial communities using multivariate statistics. Each point represents the microbial community in a specific sample. Distance between the sample dots signifies similarity; the closer the samples are, the more similar microbial composition they have. Hellinger transformation was used for PCA.

3 Materials and methods

The project data analysis and reporting was done using DNASense's custom bioinformatic workflow (version *MCA_ONT_DS230723*).

3.1 Sample DNA extraction

3.1.1 FastDNA SPIN Kit for Soil

DNA extraction of GAC samples was done using a slightly modified version of the standard protocol for FastDNA Spin kit for Soil (MP Biomedicals, USA) with the following exceptions: 500 μ L of sample, 480 μ L Sodium Phosphate Buffer and 120 μ L MT Buffer were added to a Lysing Matrix E tube. Bead beating was performed at 6 m/s for 4x40s [1]. Gel electrophoresis using TapeStation 2200 and Genomic DNA screentapes (Agilent, USA) was used to validate product size and purity of a subset of DNA extracts. DNA concentration was measured using Qubit dsDNA HS/BR Assay kit (Thermo Fisher Scientific, USA).

3.1.2 DNeasy PowerWater Kit

Filtering of effluent samples and extraction of DNA from the filtrate was performed using a slightly modified version of the standard protocol for DNeasy PowerWater Kit (Qiagen, Germany). Gel electrophoresis using TapeStation 2200 and Genomic DNA screentapes (Agilent, USA) was used to validate product size and purity of a subset of DNA extracts. DNA concentration was measured using Qubit dsDNA HS/BR Assay kit (Thermo Fisher Scientific, USA).

3.2 Cross-kingdom 16S/18S rRNA gene variable regions 4-8 (abeV48-A) sequencing

3.2.1 Sequencing library preparation

Amplicon libraries for the archaea/bacteria/eukaryota 16S/18S rRNA gene variable regions 4-8 (abeV48-A) were prepared using a custom protocol. Up to 25 ng of extracted DNA was used as template for PCR amplification, and each PCR reaction (50 μ L) contained 0.2 mM dNTP mix, 0.01 units of Platinum SuperFi DNA Polymerase (Thermo Fisher Scientific, USA), and 500 nM of each forward and reverse primer in the supplied SuperFI Buffer. PCR was done with the following program: Initial denaturation at 98 °C for 3 min, 25 cycles of amplification (98 °C for 30 s, 62 °C for 20 s, 72 °C for 2 min) and a final elongation at 72 °C for 5 min. The forward and reverse primers used include custom 24 nt barcode sequences followed by the sequences targeting abeV48-A: [515FB] GTGYCAGCMGCCGCGGTAA and [1391R] GACGGGCGGTGWGTRCA [2,3].

The resulting amplicon libraries were purified using the standard protocol for CleanNGS SPRI beads (CleanNA, NL) with a bead to sample ratio of 3:5. DNA was eluted in 25 μ L of nuclease free water (Qiagen, Germany). Sequencing libraries were prepared from the purified amplicon libraries using the SQK-LSK114 kit (Oxford Nanopore Technologies, UK) according to manufacturer protocol with the following modifications: 500 ng total DNA was used as input, and CleanNGS SPRI beads for library clean-up steps. DNA concentration was measured using Qubit dsDNA HS Assay kit (Thermo Fisher Scientific, USA). Gel electrophoresis using TapeStation 2200 and D1000/High sensitivity D1000 screentapes (Agilent, USA) was used to validate product size and purity of a subset of amplicon libraries.

3.2.2 DNA sequencing

The resulting sequencing library was loaded onto a MinION R10.4.1 flowcell and sequenced using the MinKNOW 23.04.6 software (Oxford Nanopore Technologies, UK). Reads were basecalled and demultiplexed with MinKNOW guppy g6.5.7 using the super accurate basecalling algorithm (config r10.4.1_400bps_sup.cfg) and custom barcodes.

3.2.3 Bioinformatic processing

The sequencing reads in the demultiplexed and basecalled fastq files were filtered for length (320 - 2000 bp) and quality (phred score > 15) using a local implementation of *filtlong* v0.2.1 with the settings `-min_length 320`

-max_length 2000 -min_mean_q 97. The SILVA 16S/18S rRNA 138 SSURef NR99 full-length database in RESCRIPt format was downloaded from the [QIIME](#) on 29 september 2022 [4–6]. Potential generic placeholder and dead-end taxonomic entries were cleared from the taxonomy flat file, i.e. entries containing *uncultured*, *metagenome* or *unassigned*, were replaced with a blank entry. The filtered reads were mapped to the SILVA 138.1 99 % NR database with minimap2 v2.24-r1122 using the **-ax map-ont** command [7] and downstream processing using samtools v1.14 [8]. Mapping results were filtered such that query sequence length relative to alignment length deviated < 5 %. **Noteworthy**, low-abundant OTUs making up < 0.01 % of the total mapped reads within each sample were disregarded as a data denoising step. Further bioinformatic processing was done via RStudio IDE (2023.3.0.386) running R version 4.3.0 (2023-04-21) and using the R packages: ampvis2 (2.8) [1], tidyverse (2.0.0), seqinr (4.2.30), ShortRead (1.58.0) and iNEXT (3.0.0) [9,10].

References

- 1 Albertsen M, Karst SM, Ziegler AS, Kirkegaard RH & Nielsen PH (2015) [Back to basics – the influence of DNA extraction and primer choice on phylogenetic analysis of activated sludge communities](#). *PLOS ONE* **10**, e0132783.
- 2 Apprill A, McNally S, Parsons R & Weber L (2015) [Minor revision to V4 region SSU rRNA 806R gene primer greatly increases detection of SAR11 bacterioplankton](#). *Aquatic Microbial Ecology* **75**, 129–137.
- 3 Parada AE, Needham DM & Fuhrman JA (2016) [Every base matters: Assessing small subunit rRNA primers for marine microbiomes with mock communities, time series and global field samples](#). *Environmental microbiology* **18**, 1403–1414.
- 4 Robeson MS, O'Rourke DR, Kaehler BD, Ziemski M, Dillon MR, Foster JT & Bokulich NA (2020) [RE-SCRIPT: Reproducible sequence taxonomy reference database management for the masses](#). *bioRxiv*, 2020.10.05.326504.
- 5 Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, Gerken J, Schweer T, Yarza P, Peplies J & Glöckner FO (2013) [The SILVA ribosomal RNA gene database project: Improved data processing and web-based tools](#). *Nucleic Acids Research* **41**, 590–596.
- 6 Yilmaz P, Parfrey LW, Yarza P, Gerken J, Pruesse E, Quast C, Schweer T, Peplies J, Ludwig W & Glöckner FO (2014) [The SILVA and “all-species living tree project \(LTP\)” taxonomic frameworks](#). *Nucleic Acids Research* **42**, D643–D648.
- 7 Li H (2018) [Minimap2: Pairwise alignment for nucleotide sequences](#). *Bioinformatics* **34**, 3094–3100.
- 8 Danecek P, Bonfield JK, Liddle J, Marshall J, Ohan V, Pollard MO, Whitwham A, Keane T, McCarthy SA, Davies RM & Li H (2021) [Twelve years of SAMtools and BCFtools](#). *GigaScience* **10**, 1–4.
- 9 Hsieh TC, Ma KH & Chao A (2016) [iNEXT: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity \(hill numbers\)](#). *Methods in Ecology and Evolution* **7**, 1451–1456.
- 10 Chao A, Gotelli NJ, Hsieh TC, Sander EL, Ma KH, Colwell RK & Ellison AM (2014) [Rarefaction and extrapolation with hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies](#). *Ecological Monographs* **84**, 45–67.

CP1234b

Metagenomics including antibiotic resistance gene evaluation

Vatten & Miljö i Väst AB (VIVAB)

DNASense Aps

15-09-2023

Contents

1	Project scope	2
2	Data availability	3
3	Results	4
3.1	DNA extraction and sequencing	4
3.2	Gene-centric metagenomics	5
3.2.1	Protein gene-centric microbiome composition	5
3.2.2	rRNA gene-centric microbiome composition	6
3.3	Genome-centric metagenomics	8
3.3.1	Holometagenome (hMG)	9
3.3.2	Genome-based microbiome composition	12
3.4	Antibiotic resistance genes	14
3.4.1	Gene-centric ARG evaluation	14
3.4.2	MAG-centric ARG evaluation	15
4	Materials and methods	16
4.1	DNA extraction	16
4.2	DNA sequencing	16
4.3	ARG profiling	16
4.4	<i>de novo</i> assembly	16
4.5	MAG binning	16
4.6	MAG classification	16
4.7	DNA read classification	16
4.7.1	Protein-based classification	16
4.7.2	rRNA gene-based classification	16
4.8	Gene annotations	17
4.8.1	MAG gene annotation	17
4.8.2	Metagenomes	17
5	Supplementary information	18
5.1	Kaiju taxa	18
	References	19

1 Project scope

The project concerns quantifying antibiotic resistance genes (ARGs) in differentially-treated water samples. The project aims to provide insight into the relative ARG abundance and the associated microbial communities. Two approaches were pursued to obtain information about the ARGs in the samples and the ARG-associated microorganisms. The MAG-centric approach aims to obtain metagenome-assembled genomes (MAGs) from a holometagenome (sample co-assembly) and obtain a direct coupling between MAGs, taxonomy, and ARGs through classification and gene annotation. The second approach involves directly classifying reads against the Comprehensive Antibiotic Resistance Database (CARD), solely focusing on the ARG identities and abundances. DNASense received 10 water samples from Moshe Habagil (Vatten & Miljö i Väst AB (VIVAB)). The samples were processed using a state-of-the-art workflow, including the latest Oxford Nanopore Technologies (ONT) sequencing chemistry, see figure 1.

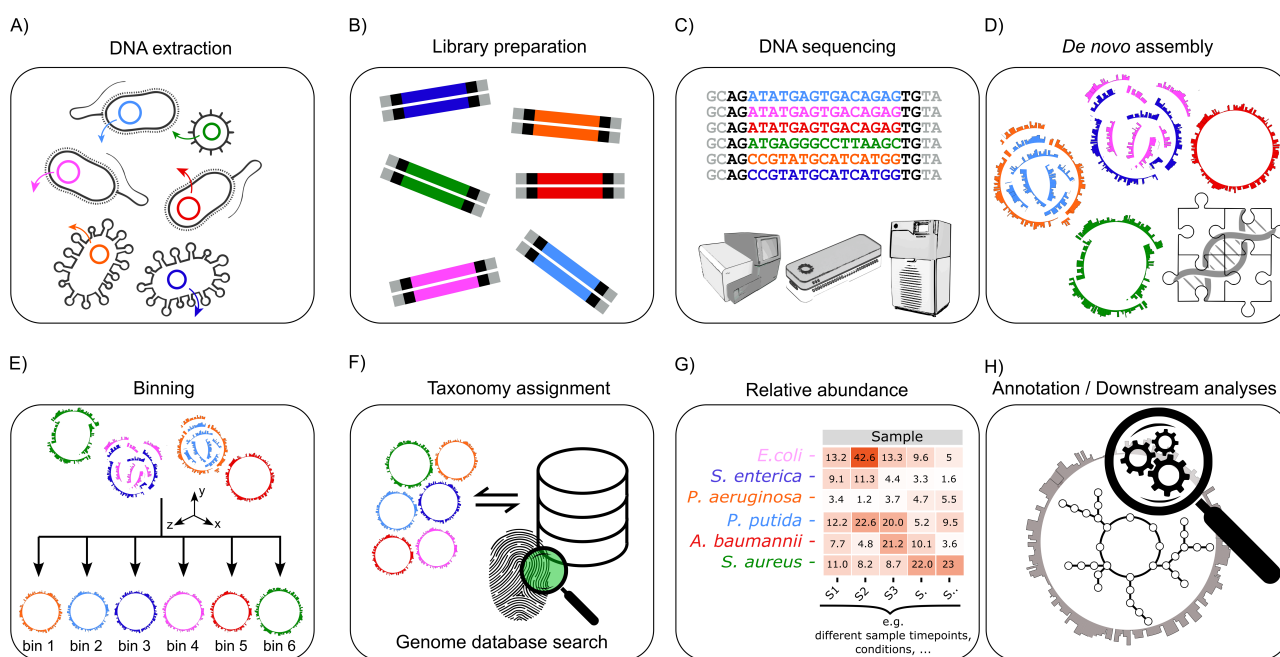


Figure 1: Metagenomics analysis workflow. The metagenomics workflow begins with the extraction of DNA from biomass, e.g. wastewater sludge, gut content, tissue, oil-spills, wood or soil (A). A DNA sequencing library is then prepared from either native (Oxford Nanopore Technologies) or PCR-processed (Illumina) sample DNA and sequenced on a compatible platform (B-C). The generated sequencing data is quality filtered to ensure only high-quality data is processed further. Quality-filtered data is used to generate highly contiguous de novo metagenome assemblies (D). Using different experiment data dimensions - e.g. different time points, sampling points, treatments - individual metagenome-assembled genomes (MAGs) are isolated into so-called bins (E). MAGs are then classified against a state-of-the-art genome or ribosomal RNA (rRNA) taxonomy database to assess the identity (F) and relative abundance (G) of the organisms associated with the extracted MAGs. High-quality MAGs can be further used for a multitude of bioinformatic analyses e.g. gene annotation, metabolic pathway analysis, functional attributes, etc. (H).

2 Data availability

The project outcome data is available from the dropbox folder [/CP1234b](#) using the password **future94sessions**. Data is available in compressed format along with md5sums for assessing file integrity. The folder */rawData* contains the raw sequencing data (*.fastq.gz*). The */annotation* folder contains the metagenome assemblies, metagenome-assembled genomes (MAGs) and annotation files in compressed and uncompressed formats, see tables 1 and 2 for a description of annotation output files. For further information on annotations please see section 4.8. The folder */misc* contains miscellaneous data, such as general report figures and summary tables e.g. overview of essential MAG statistics.

Table 1: Bacterial annotation files. Overview of the annotation files outputted for each of the assembled bacterial genomes. The description is adapted from the *Bakta github page*; see section 4 for further information.

Extension	Description
.tsv	annotations as simple human readable TSV.
.gff3	annotations & sequences in GFF3 format.
.gbff	annotations & sequences in (multi) GenBank format.
.embl	annotations & sequences in (multi) EMBL format.
.fna	replicon/contig DNA sequences as FASTA.
.ffn	feature nucleotide sequences as FASTA.
.faa	CDS/ORF amino acid sequences as FASTA.
.hypotheticals.tsv	Information on hypothetical protein CDSs as tab-separated values.
.hypotheticals.faa	hypothetical protein CDS amino acid sequences as FASTA.
.txt	summary as TXT.
.png	circular genome annotation plot as PNG.
.svg	circular genome annotation plot as SVG.

Table 2: Archaeal annotation files. Overview of the annotation files outputted for each of the assembled archaeal genomes. The description is adapted from the *Prokka github page*; see section 4 for further information.

Extension	Description
.gff	Master annotation in GFF3 format, containing both sequences and annotations.
.gbk	Standard Genbank file derived from the master .gff.
.fna	Nucleotide FASTA file of the input contig sequences.
.faa	Protein FASTA file of the translated CDS sequences.
.ffn	Nucleotide FASTA file of all the prediction transcripts (CDS, rRNA, tRNA, tmRNA, misc_RNA)
.sqn	An ASN1 format Sequin file for submission to Genbank.
.fsa	Nucleotide FASTA file of the input contig sequences, used by tbl2asn to create the .sqn file.
.tbl	Feature Table file, used by tbl2asn to create the .sqn file.
.txt	Statistics relating to the annotated features found.
.tsv	Tab-separated file of all features: locus_tag, ftype, len_bp, gene, EC_number, COG, product.

3 Results

3.1 DNA extraction and sequencing

Table 3 shows the outcome of the DNA extraction along with essential sequencing output statistics. DNA extraction yielded between 0.5 ng/ μ L (total 0.03 μ g) and 616 ng/ μ L (total 37 μ g). A total of 0.4 μ g of high-quality DNA is recommended for downstream long-read sequencing. The estimated modal DNA fragment sizes were between 12-25 kbp based on gel electrophoresis but with a significant tail of short DNA fragments (below 3000 bp), indicating partial DNA degradation, specially for sample **FS o2H2**.

DNASense recommends a 5000 bp lower read N50 threshold, corresponding to the length needed to span the repetitive rRNA operon of most prokaryotes. Many factors affect DNA fragmentation, including sample composition and bead-beating procedures. To avoid metagenome composition biases from the DNA extraction, DNASense recommends thorough bead-beating followed by a moderate size-selection procedure [1]. A total of 119 gigabases (Gbp) were obtained from the sequencing of the 10 samples, compared to the targeted 100 Gbp. The yield was unevenly distributed as a result of the partially degraded samples. The sequencing quality score was *on par* with the raw read accuracy supported by the current kit chemistry (V14 kit), flow cell (R10.4.1), and basecalling algorithms.

Table 3: Sequencing statistics. *sampleName* and *seqID* denote customer- and DNASense-assigned sample identification nomenclature, respectively. *concExt* is the measured concentration of extracted, double-stranded DNA in ng/ μ L. *rawBases* and *filteredBases* denote the sequencing data yield in total basepairs (Gbp) before and after quality filtering, respectively. *rawReads* and *filteredReads* denote the number of sequencing reads (mio.) before and after data filtering, respectively. *filteredN50* indicates that half of the data is contained within reads of length N50 or greater (bp). *filteredMedianQ* denotes the median Phred-scaled accuracy score for the quality filtered data.

sampleName	seqID	concExt	rawReads	rawBases	filteredReads	filteredBases	filteredN50	filteredMedianQ
GPP O2	DJ1448-barcode65	113.6	3.16	15.0	2.36	12.5	7618	21.4
L1	DJ1448-barcode66	14.1	4.03	21.7	3.28	18.3	7340	21.2
S1	DJ1448-barcode67	26.9	3.51	16.7	2.81	14.2	6659	21.3
S2	DJ1448-barcode68	23.0	3.61	17.2	2.91	14.7	6851	21.4
uT o2oH	DJ1448-barcode69	15.7	3.04	16.8	2.45	14.4	8005	21.9
L2	DJ1448-barcode70	9.2	3.50	17.2	2.84	14.6	6737	21.5
S1H	DJ1448-barcode71	0.5	0.36	1.4	0.28	1.2	5596	21.8
1h G.V	DJ1448-barcode72	616.0	1.32	7.9	1.10	6.9	8334	21.4
UT G.V	DJ1448-barcode73	595.0	1.41	5.0	0.94	4.0	6866	21.2
FS o2oH	DJ1448-barcode74	131.5	0.02	0.1	0.01	0.0	5997	21.2

3.2 Gene-centric metagenomics

3.2.1 Protein gene-centric microbiome composition

Figure 2 shows the distributions of organisms at the taxonomic kingdom/domain level when the sequencing reads are classified against a reference database consisting of 321 mio. protein sequences covering microbial prokaryotes, microbial eukaryotes, and viral genomes. See table 6 for an overview of the taxa included in the database.

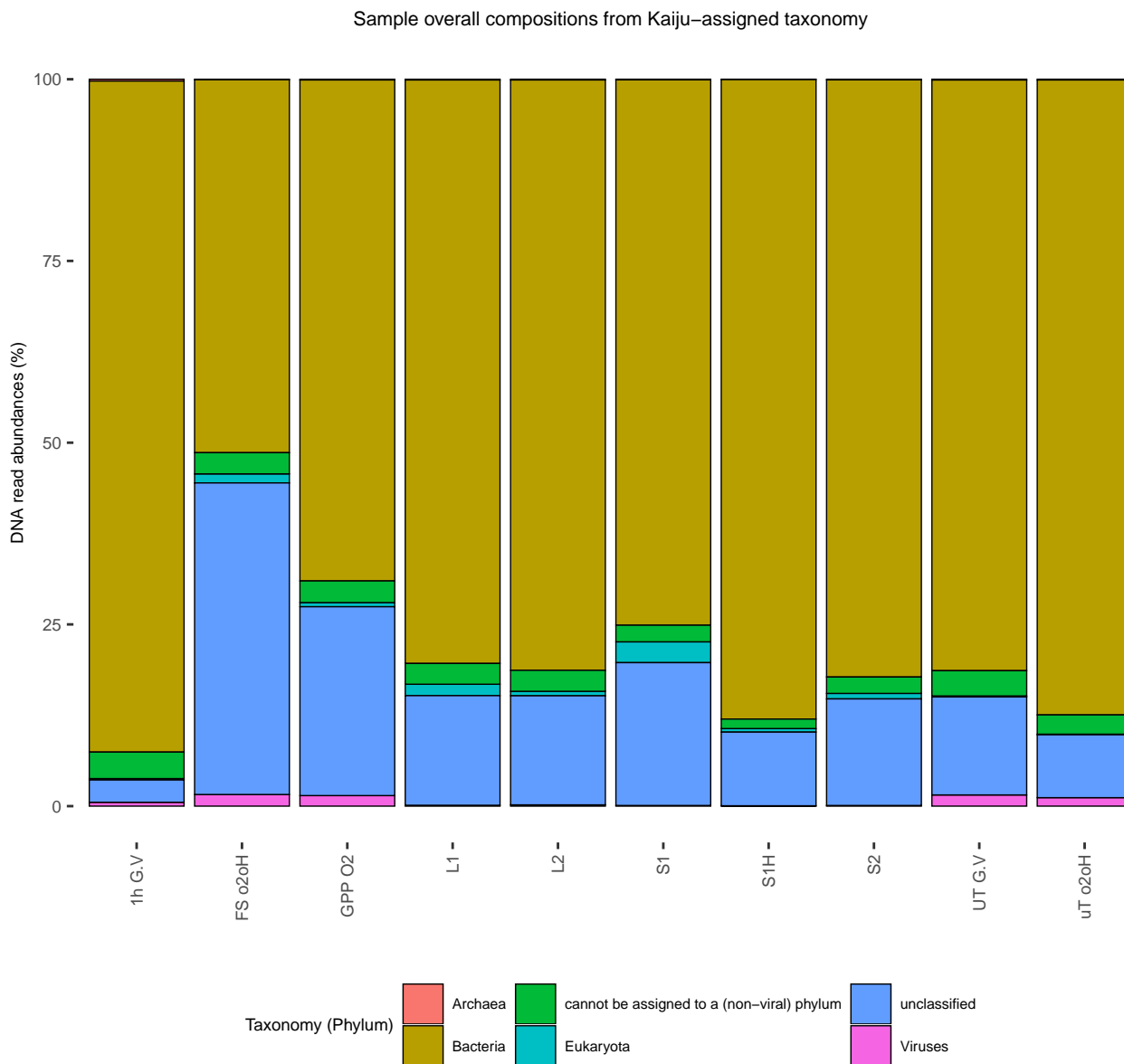


Figure 2: Read classification. Stacked bar plot highlighting the read-based distribution of phyla (based on the classification of reads) among the different domains of life. The NCBI reference database includes 321 mio. microbial protein sequences of both prokaryotic, eukaryotic, or viral origins.

3.2.2 rRNA gene-centric microbiome composition

Figures 3 and 4 present overviews of the microbiome compositions based on ribosomal RNA gene (rRNA) identification in the quality-filtered DNA sequencing reads, and classification and quantification of these. Note that gene sequences were classified against the SILVA 138.1 NR 99 % database.

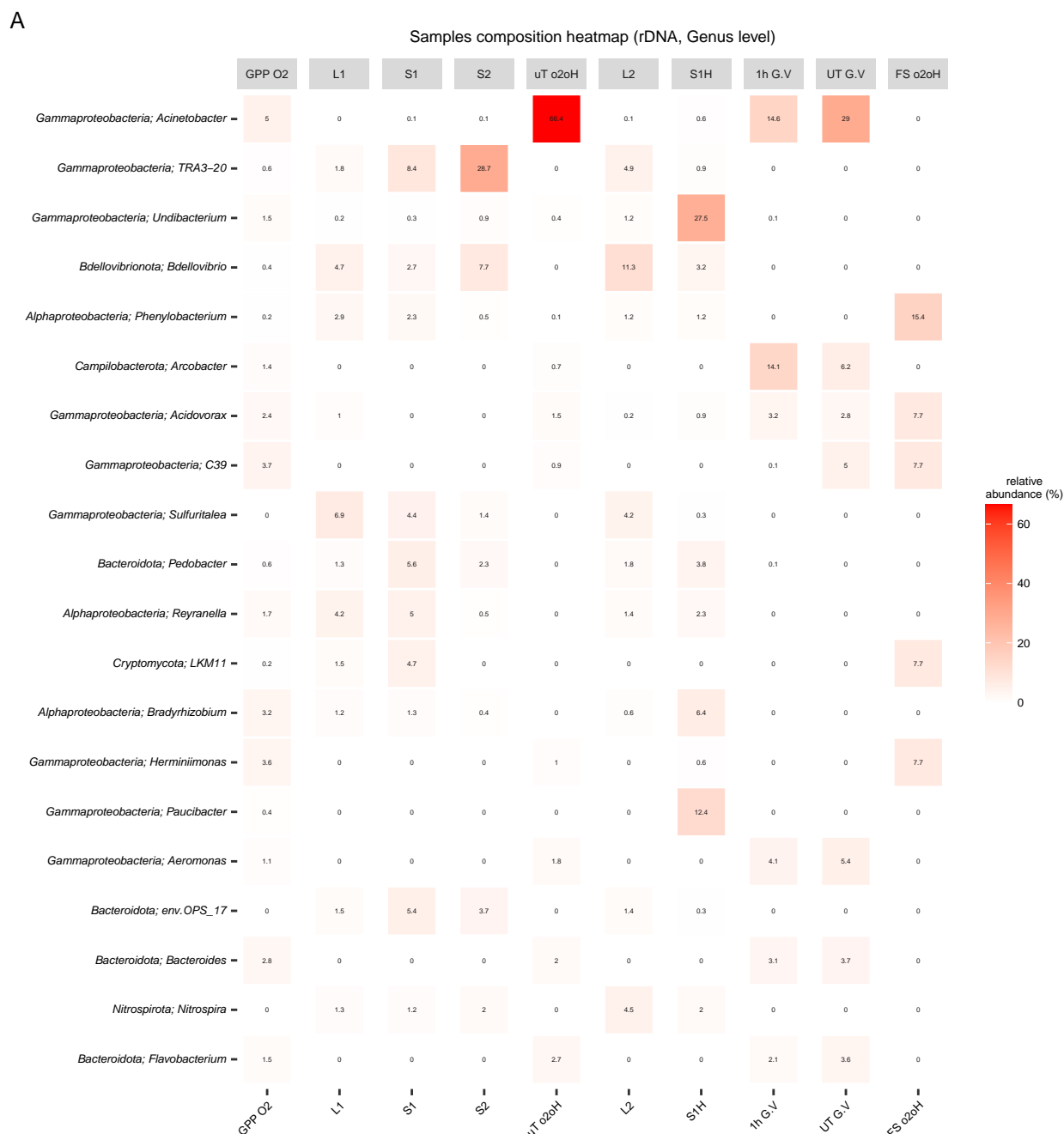


Figure 3: Heatmap of the most abundant organisms. A) The most abundant genera in all samples. If no genus level classification could be obtained, the identification of the sequence mapped to in the database is given. Note that the rRNA gene extraction is based on a bacterial model, i.e. potentially biased against certain archaea and eukaryotes. Values are shown as a normalised fraction of total sequences (%).

Figure 4 compares overall microbial compositions using multivariate statistics (PCA) for all samples. Samples **FS o2oH** and **S1H** were filtered due to low extracted rRNA gene read counts before performing the principal component analysis.

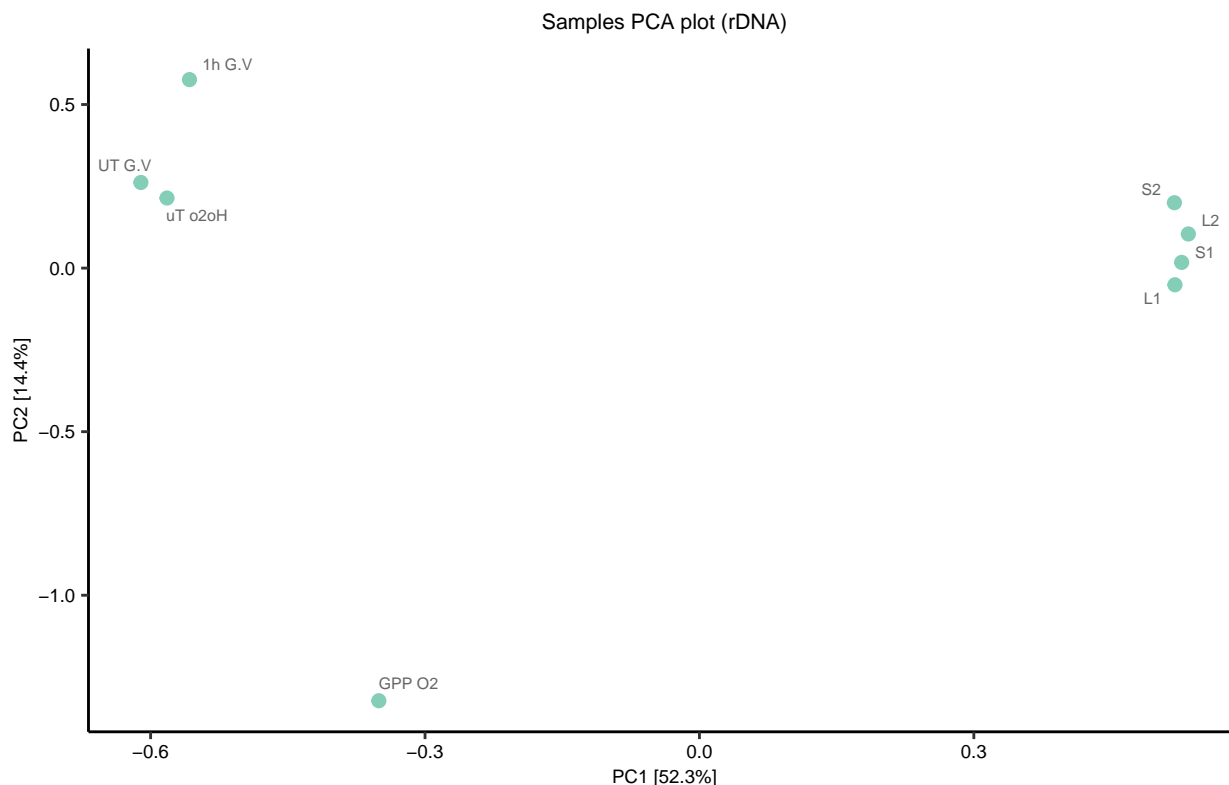


Figure 4: Principal component analysis (PCA). Identification of samples with similar microbiomes using multivariate statistics. Each point represents the microbiome in a specific sample. Point labels correspond to the customer-provided sample names. Distance between the sample dots signifies similarity; the closer the samples are, the more similar microbial composition they have. **Note** that the % variiances accounted for by each principal component is shown in axis titles. Hellinger transformation was used for PCA.

3.3 Genome-centric metagenomics

During metagenome *de novo* sequence assembly, DNA sequencing reads are assembled to form larger contiguous elements (contigs) representing the microbiome in the sample(s) down to the chosen sequencing depth. Depending on the complexity of the sample, the DNA fragmentation pattern, and the sequenced microbes, genomes can be a single contig for a fully-closed genome, or several contigs for a partially fragmented genome. Fragmented DNA with low read N50, microdiversity and long intra-genomic repeat elements are typical causes of fragmented genome assemblies [2].

To obtain individual microbial genomes, so-called metagenome-assembled genomes (MAGs), the contigs are binned based on unique data signatures like GC content, tetranucleotide repeats, or differential contig coverage [3,4]. Contigs associated with the same genome are expected to be co-abundant across different data dimensions including different experimental conditions, sampling time points or sampling depths. The more dimensions available, the more unique coordinates are provided to extract MAGs, even from closely related organisms. While complex samples may require e.g. 20-50 sample dimensions, enriched samples may require substantially fewer dimensions.

An extracted MAG can represent a complete genome, in which case the genome is said to have a completeness of 100 %. A prokaryote lineage is associated with a specific set of single-copy, lineage-specific marker genes, and if a MAG contains the entire set, the MAG is considered 100 %. If no additional marker genes are located, the MAG is said to have 0 % contamination. If more single-copy marker genes than expected from the classification of a single organism are found, the MAG is said to be contaminated in a ratio proportional to the number of additionally identified marker genes. For substantially complete MAGs ($\geq 70 - 90$ %) with medium contamination (5 % - 10 %), completeness and contamination estimates generally have an absolute error of ≤ 6 %, and the error in the quality estimates tends to decrease as the quality of a MAG improves [5]. The MIMAG (Minimal Information about a Metagenome-Assembled Genome) standard provides an objective framework for evaluating the quality of the extracted MAGs, see table 4. While DNASense adheres to the general MIMAG quality parameters for reporting MAG quality (table 4), please consult the publication for a more detailed set of mandatory and also optional requirements [6].

Table 4: Minimum Information about a Metagenome-Assembled Genome. *The MIMAG standard provides a framework for evaluating the quality of metagenome-assembled genomes. Standard assembly statistics may include - but are not limited to - N50, L50, largest contig, number of contigs, assembly size, percentage of reads that map back to the assembly, and number of predicted genes per genome.*

Criterion	Description
Finished MAG	Single contiguous sequence without gaps or ambiguities with a consensus error rate equivalent to Q50 or better.
High-quality (HQ) MAG	Multiple fragments where gaps span repetitive regions. Presence of the 23S, 16S, and 5S rRNA genes and at least 18 tRNAs. Completeness > 90 %, Contamination < 5 %.
Medium-quality (MQ) MAG	Many fragments with little to no review of assembly other than reporting of standard assembly statistics. Completeness ≤ 50 %, Contamination < 10 %.
Low-quality (LQ) MAG	Many fragments with little to no review of assembly other than reporting of standard assembly statistics. Completeness < 50 %, Contamination < 10 %.

The following subsections detail the outcome of MAG binning and dereplication. MAGs were retrieved from the metagenome using all sample dimensions and an automated workflow applying both VAMB and MetaBAT2 binning tools; see table 3. This generated candidate MAGs which were dereplicated and quality filtered based on completeness and contamination criteria. MAGs qualifying as MIMAG high, medium and low quality were included in further analyses and outputted to final result files.

3.3.1 Holometagenome (hMG)

Figures 5-6 and table 5 summarise the outcome from MAG binning. The distribution of MIMAG high-quality (HQ), medium-quality (MQ) and low-quality (LQ) MAGs are summarized in figure 5 along with information on taxonomic distribution for the obtained MAGs [6]. Further information on MAG quality and properties are summarized in figure 6. An example of the extended information available for individual MAGs is presented in table 5 with extensive data available in the *CP1234b_MAG_stats.xlsx* file.

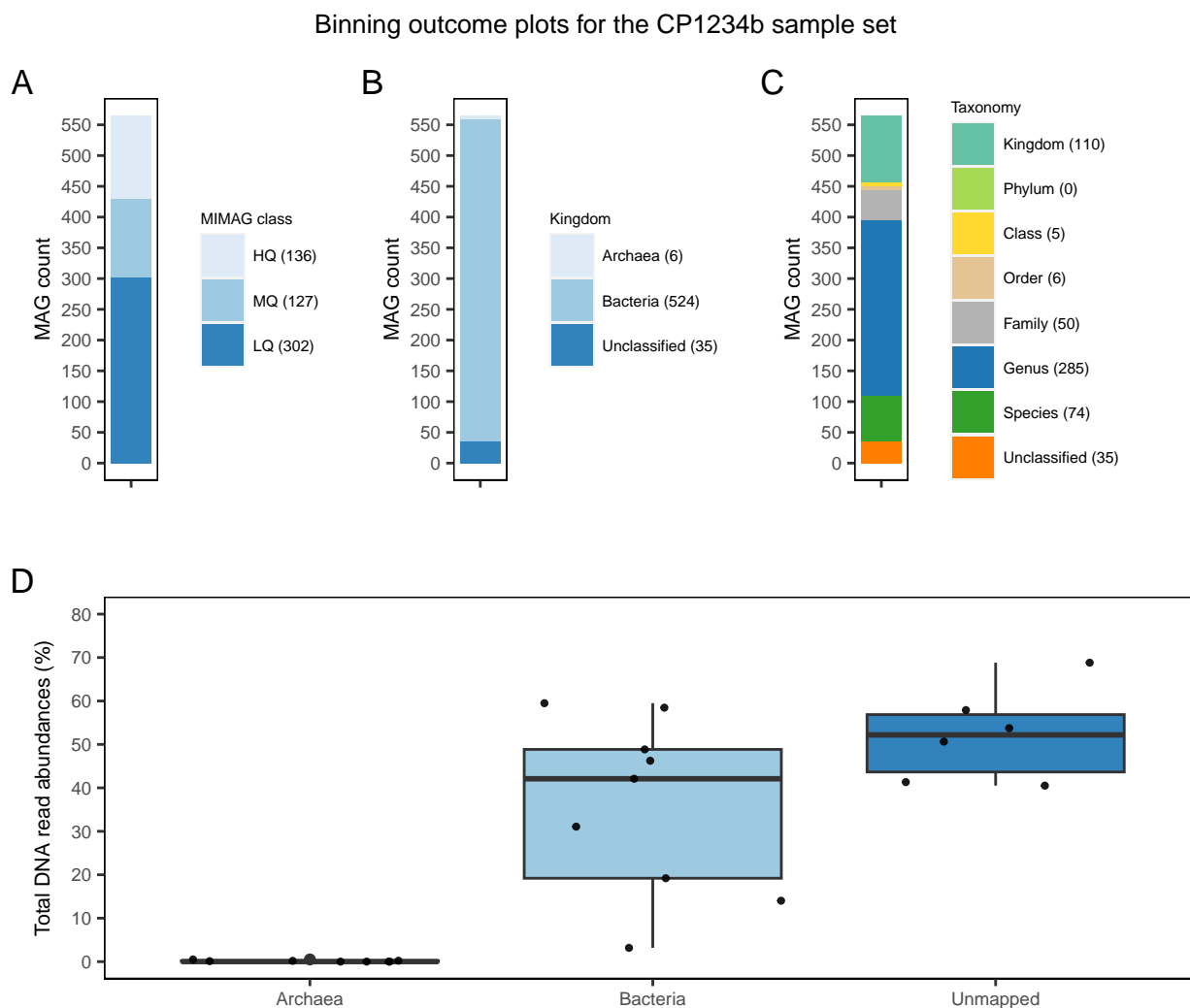


Figure 5: Outcome of binning. Panel A shows the number of extracted MAGs that fulfil the various MIMAG classifications. Panel B shows the distribution of MAGs across the bacterial and archaeal domains, and panel C the corresponding distribution of taxonomy assignments achieved. Panel D shows the relative abundances of MAGs belonging to archaea and bacteria assessed using sample data and also indicates the relative abundance of reads not binned (Unclassified). The median value and the interquartile range are highlighted. MAG: Metagenome-Assembled Genome, MIMAG: Minimum Information about a Metagenome-Assembled Genome.

MAG quality plots for the CP1234b sample set

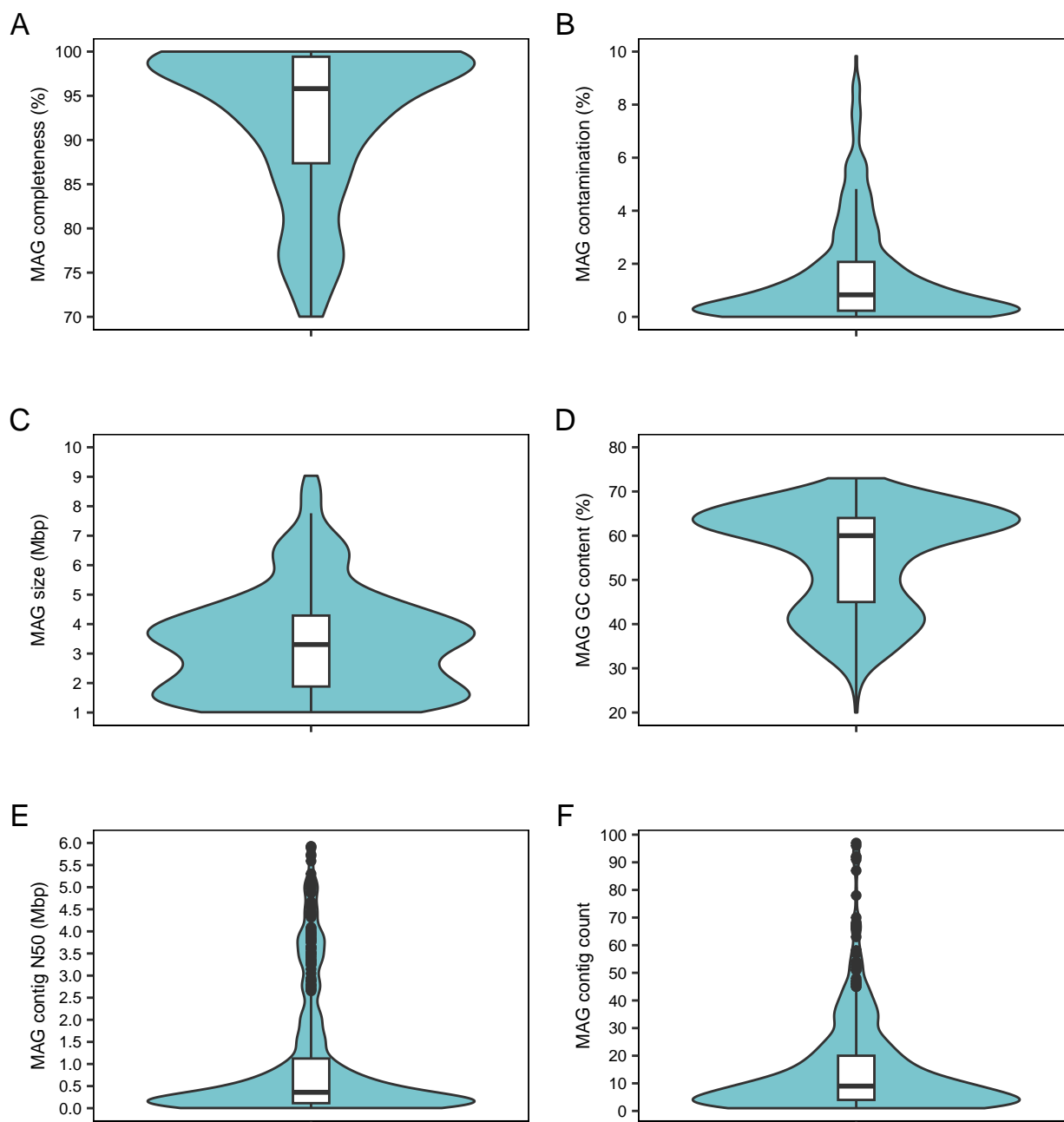


Figure 6: MAG quality assessment. MAG quality parameters depicted as violin plots with the median value and the interquartile range also shown. Panel **A)** MAG completeness (%), **B)** contamination (%), **C)** MAG genome sizes, **D)** MAG relative GC content (%), **E)** the MAGs' contig N50 distribution, and **F)** the number of contigs associated with the individual MAGs. MAG: Metagenome-Assembled Genome.

Table 5: MAG statistics overview. *MAG* and *GenomeSize* refer to a given MAG's identification nomenclature and size in megabasepairs (Mbp), respectively. *Contigs* denotes the number of contiguous DNA elements associated with each MAG. *Completeness* is the estimated genome completeness (%) based on the contents of essential lineage-specific marker genes. *Contamination* is the estimated contamination (%) based on the presence of multiple single-copy marker genes. *ContigN50* is defined as the sequence length (kbp) of the shortest contig at 50 % of all MAG lengths. *MIMAG* refers to the MAG quality of the extracted genome based on the MIMAG standard. *maxTaxonomy* refers to the MAG's classification at the highest taxonomic resolution assigned using the Genome Taxonomy Database (GTDB). Only a subset of MAGs are shown as an example, and the full list is available from the file C1234b_MAG_stats.xlsx.

MAG	Completeness	Contamination	GenomeSize	Contigs	ContigN50	maxTaxonomy	MIMAG
MB_10	100.0	0.9	4.4	1	4366	g__Hyphomicrobium_B	HQ
MB_297	100.0	1.7	3.9	1	3876	o__Bdellovibrionales	HQ
MB_41	100.0	0.8	5.0	1	5045	g__UBA2475	HQ
MB_457	100.0	0.9	2.9	1	2864	f__Legionellaceae	HQ
MB_464	100.0	0.1	0.8	1	838	g__SIBU01	HQ
MB_467	100.0	0.2	1.0	1	987	g__UBA4664	HQ
MB_75	100.0	0.7	4.0	1	3959	g__RGVD01	HQ
MB_79	100.0	1.1	3.8	1	3798	g__UBA2475	HQ
VB_vae_13928	100.0	0.4	3.9	1	3904	s__Giesbergeria sp017985015	HQ
MB_1	100.0	0.8	4.4	1	4438	g__Lacunisphaera	HQ
MB_110	100.0	0.7	3.5	1	3511	s__Thiobacillus thioparus	HQ
MB_114	100.0	0.9	5.0	1	4970	g__JAFDZV01	HQ
MB_207	100.0	3.8	4.5	1	4533	f__JABDFU01	HQ
MB_312	100.0	0.8	4.0	1	4007	g__CADEGL01	HQ
MB_442	100.0	0.5	3.8	1	3838	f__B-17BO	HQ
MB_456	100.0	3.0	6.4	1	6396	g__Mesorhizobium	HQ
MB_59	100.0	0.8	4.1	1	4092	f__UBA6776	HQ
MB_398	100.0	1.4	6.0	2	5304	f__Myxococcaceae	HQ
MB_452	100.0	0.9	4.7	2	3989	g__62-47	HQ
VB_vae_11397	100.0	2.8	3.5	2	3435	g__Bacteriovorax	HQ
MB_233	100.0	0.0	2.4	2	1651	g__SSFR01	HQ
MB_63	100.0	2.4	4.7	2	2623	g__SXRI01	HQ
MB_40	100.0	0.1	3.2	3	2705	s__Acinetobacter sp002135315	HQ
VB_2344	100.0	2.2	6.7	3	4417	g__WHTP01	HQ
MB_220	100.0	0.2	3.6	3	3249	g__Phenylobacterium	HQ
MB_280	100.0	1.0	3.8	3	1331	g__UBA5009	HQ
MB_379	100.0	0.4	3.4	4	1242	g__Kapabacteria	HQ
MB_422	100.0	2.1	7.8	4	7508	g__ER46	HQ
MB_70	100.0	0.6	2.5	5	2034	s__Moraxella_A sp002478835	HQ
MB_310	100.0	0.9	6.7	5	5121	g__Reyranella	HQ
VB_743	100.0	0.5	2.9	6	758	s__Rugosibacter sp004322535	HQ
VB_vae_1835	100.0	1.5	4.6	9	4463	g__JACQAP01	HQ
MB_116	100.0	1.3	3.7	11	924	g__Herminiimonas	HQ
MB_474	99.9	0.4	1.4	1	1415	g__JACRIG01	HQ
MB_203	99.9	0.6	4.9	1	4884	f__Saprospiraceae	HQ
MB_30	99.9	0.9	3.7	3	1269	f__Bdellovibrionaceae	HQ
MB_36	99.9	0.2	2.8	7	2113	s__Flavobacterium sp019105125	HQ
MB_28	99.8	0.4	4.0	1	3966	g__UBA2316	HQ
MB_278	99.8	1.0	4.2	4	2795	g__Palsa-1315	HQ
MB_411	99.8	0.8	4.0	4	3811	s__Nitrospira_D sp002083555	HQ
MB_66	99.8	0.6	3.4	7	1702	s__Nitrosospora multiformis_D	HQ
MB_153	99.8	4.7	3.5	8	809	g__Polaromonas	MQ
MB_407	99.8	0.7	4.3	12	2785	g__Palsa-1315	HQ
MB_223	99.8	1.1	2.0	15	243	g__Fluviibacter	HQ
MB_213	99.8	1.7	3.6	35	414	s__Flavobacterium sp017997335	HQ
MB_190	99.7	0.7	4.7	1	4669	g__JAIBCD01	HQ
MB_49	99.7	0.3	5.0	1	5043	g__Flavipsychrobacter	HQ
MB_32	99.7	1.4	4.9	1	4896	g__Flavipsychrobacter	HQ
VB_vae_1808	99.7	2.5	4.7	14	736	g__JAIBCD01	HQ
MB_3	99.6	0.6	3.7	1	3651	g__SHVO01	HQ
MB_360	99.6	0.1	5.2	1	5182	f__Saprospiraceae	HQ
VB_1089	99.6	2.2	1.9	7	1570	s__JAGOYM01 sp018059165	HQ
VB_vae_1620	99.5	1.1	4.0	4	3249	g__21-14-0-10-47-8	HQ
MB_399	99.4	1.1	6.9	1	6856	g__JAIEPW01	HQ
MB_193	99.4	1.3	7.1	10	2025	g__UBA6159	HQ
MB_431	99.3	1.6	3.8	1	3840	g__Fen-1231	HQ
MB_473	99.2	1.5	3.3	1	3333	f__Bdellovibrionaceae	HQ
VB_4160	99.2	0.6	3.0	4	2900	g__JAFEDN01	HQ
MB_324	99.2	6.0	2.7	22	189	s__Trichococcus flocculiformis	MQ
MB_51	99.1	0.5	1.6	2	1098	s__Megaira sp005791235	HQ

3.3.2 Genome-based microbiome composition

Figures 7 and 8 present overviews of the microbiome compositions based on MAG identification, classification and quantification. **Importantly**, MAGs are classified against the full-genome GTDB database as opposed to the 16S rRNA gene sequences in section 3.2.2 which classified against the 16S/18S rRNA gene database SILVA 138.1 NR 99 %. Generally, nomenclature is consistent between SILVA and GTDB but there are also areas of differences. Typically this is a matter of nomenclature updating between databases. Moreover, it is worthwhile exploring the species level microbiome composition using the MAG information e.g. via the DNASense app. Please note that samples **FS o2oH** and **S1H** should be interpreted cautiously due to low sample read counts.

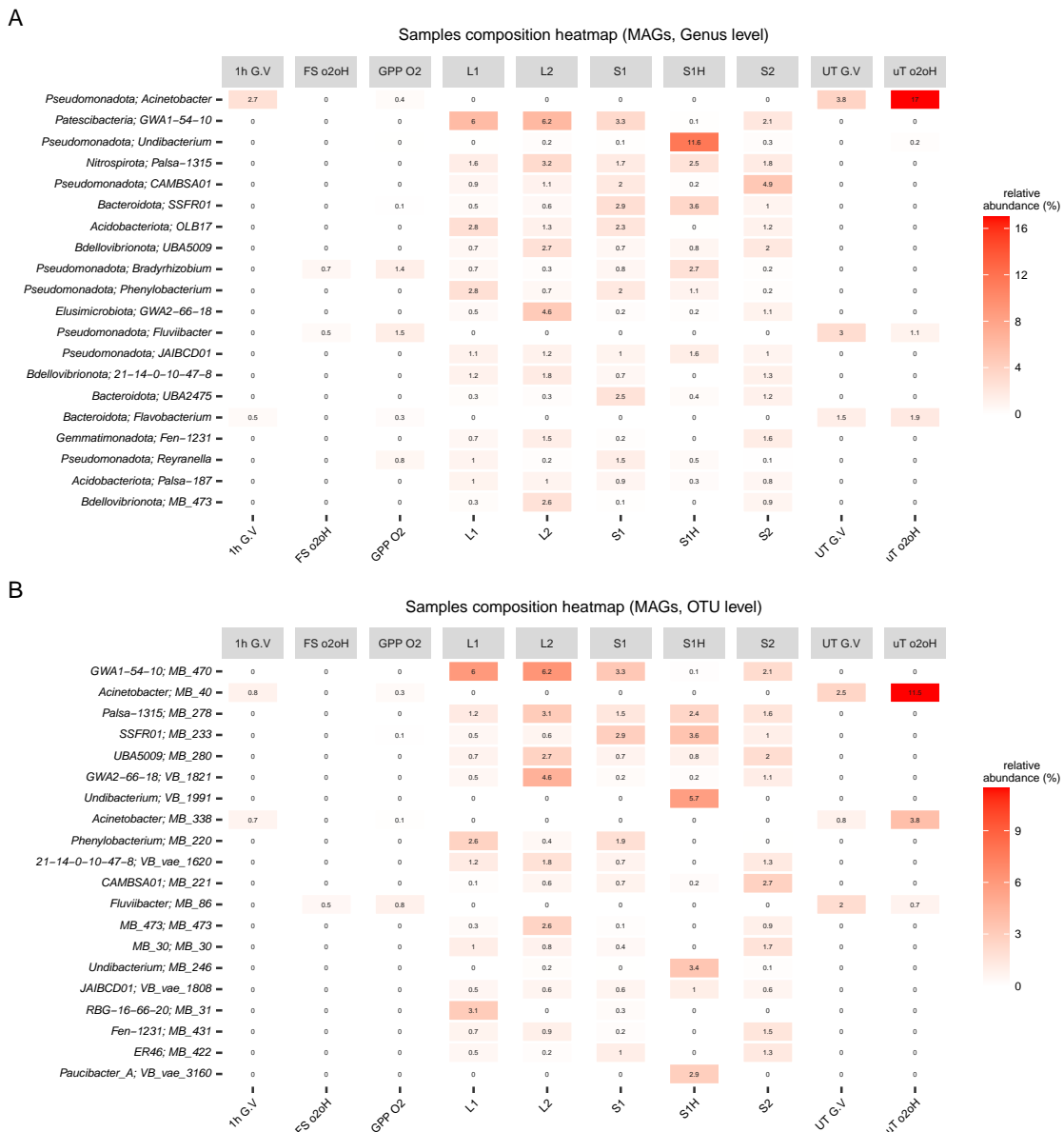


Figure 7: Heatmap of the most abundant organisms. A) The most abundant genera in all samples, and if no genus level classification could be obtained, the MAG identification is given. Values are shown as a normalised fraction of total sequences (%). B) The most abundant MAGs in the samples and their genus-level classification.

Figure 8 shows a comparison of overall microbial compositions using multivariate statistics (PCA) for all samples. Samples **FS o2oH** and **S1H** were filtered due to low read count before performing the principal component analysis.

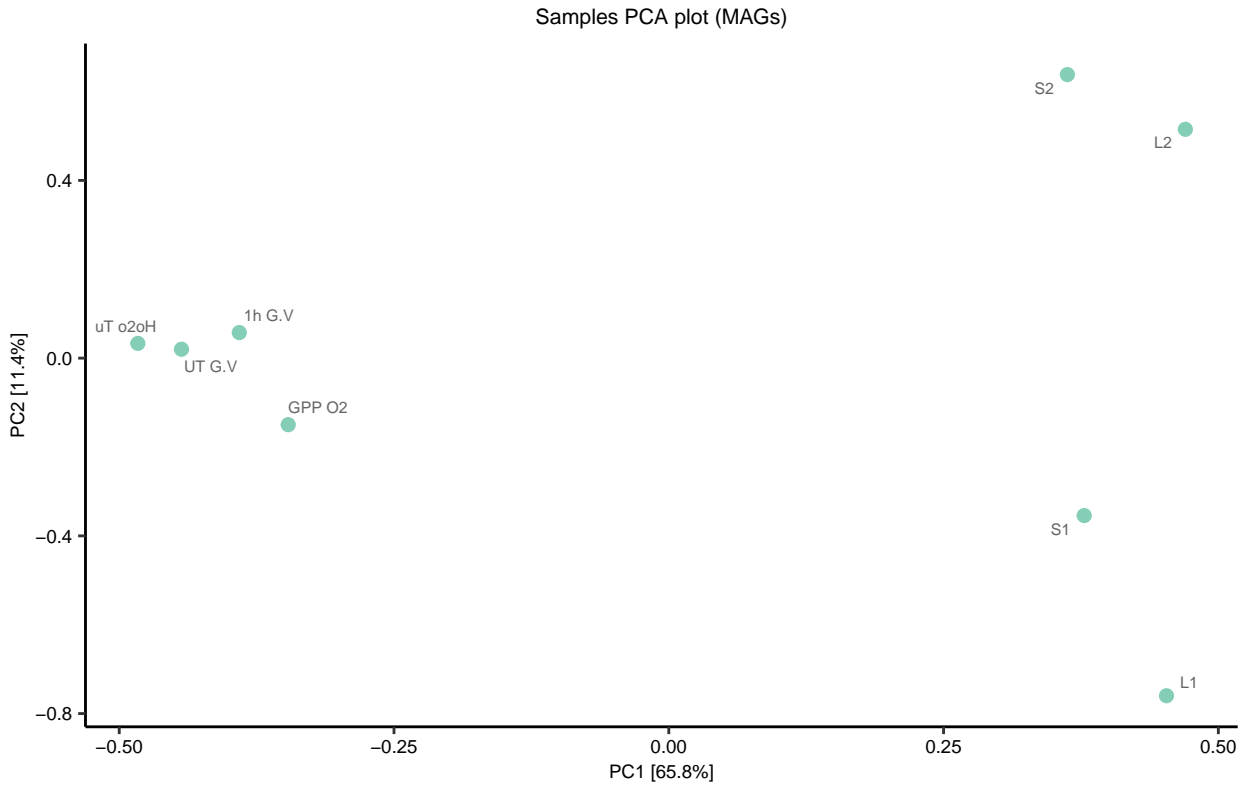


Figure 8: Principal component analysis (PCA). Identification of samples with similar microbiomes using multivariate statistics. Each point represents the microbiome in a specific sample. Point labels correspond to the customer-provided sample names. Distance between the sample dots signifies similarity; the closer the samples are, the more similar microbial composition they have. **Note** that the % variiances accounted for by each principal component is shown in axis titles. Hellinger transformation was used for PCA.

3.4 Antibiotic resistance genes

3.4.1 Gene-centric ARG evaluation

Figure 9 shows the relative abundance of the most abundant identified antibiotic resistance genes (ARGs) when quality- and length-filtered reads are classified against the Comprehensive Antibiotic Resistance Database (CARD) containing 5159 reference sequences [7,8]. Consult the [CARD](#) website for further information and descriptions on specific ARGs. Note that sample **FS o2oH** was removed prior to the analysis due to a low read count.

A



Figure 9: Antibiotic resistance genes. Identification of antibiotic resistance genes (ARGs) across all samples using the the Comprehensive Antibiotic Resistance Database (CARD). Values are shown as a normalised fraction of total sequences (%). The full list is available from the file CP1234b_CARD_abundances.xlsx.

3.4.2 MAG-centric ARG evaluation

Figure 10 presents an overview of the most abundant bacterial MAGs associated with identified antibiotic resistance genes across all samples. The ARGs have been identified using the NCBI Antimicrobial Resistance Gene Finder as an integral part of the bacterial annotation workflow [Feldgarden2019;Feldgarden2021;Schwengers2021]. The number and identity of the ARGs associated with each bacterial MAG can be obtained from the file CP1234b_MAG_stats.xlsx and the functional gene annotations, respectively. No firm conclusion should be drawn from sample **FS o2oH** due to insufficient data.

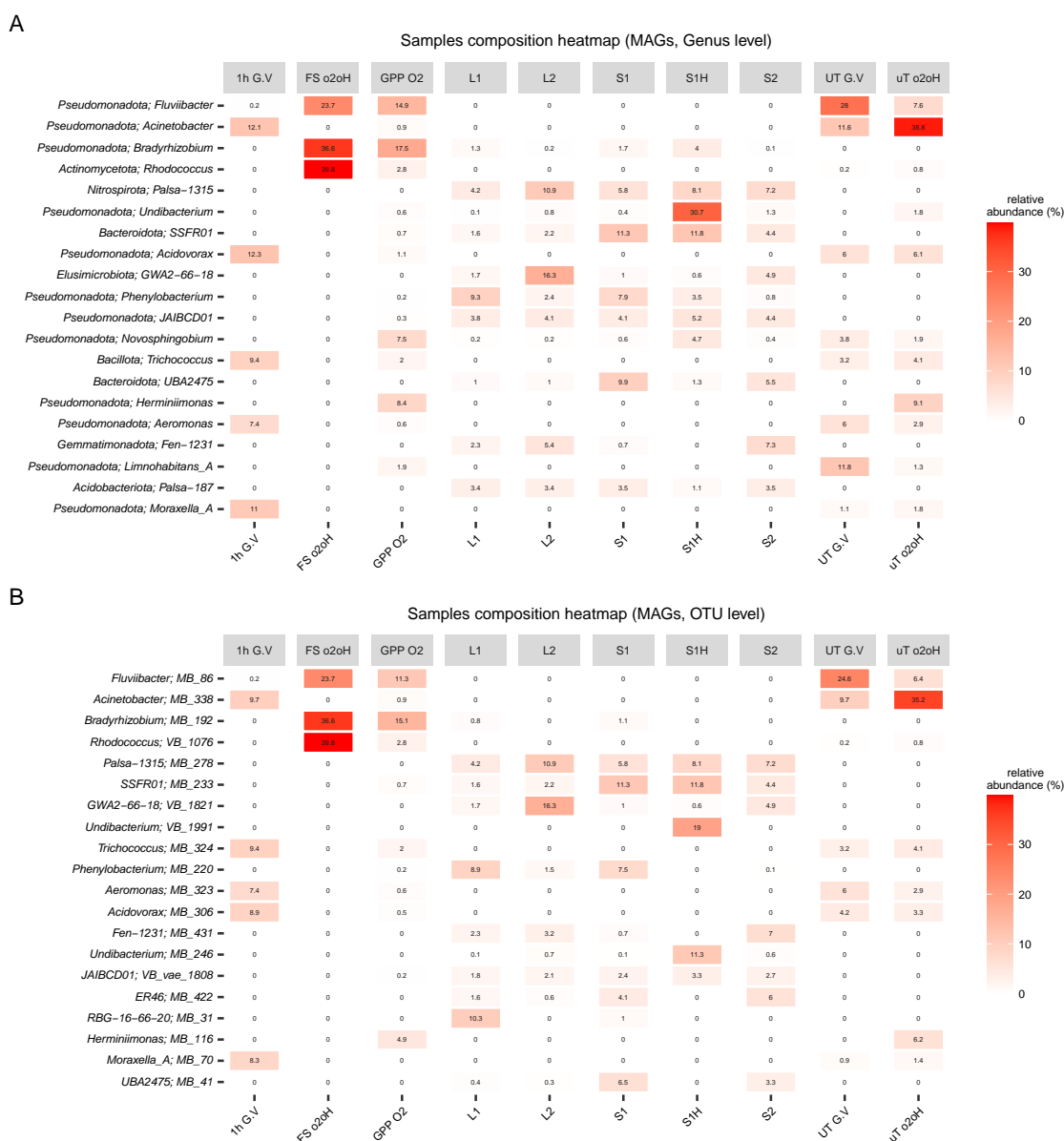


Figure 10: MAG-level heatmap of the most abundant organisms containing identified antimicrobial resistance genes. A) The most abundant genera in all samples. The MAG identification is given if no genus-level classification could be obtained. Phylum-level classification is also provided. B) The most abundant MAGs in the samples and their genus-level classification. Values are shown as a normalized fraction of total sequences (%), and reflect the subset of MAGs containing identified antimicrobial resistance genes.

4 Materials and methods

4.1 DNA extraction

DNA was extracted using the DNeasy PowerWater Kit following the manufacturer's recommendations (Qiagen, Germany). DNA concentrations and purities were measured with the Qubit dsDNA HS Assay kit (Thermo Fisher Scientific, USA) and on the NanoDrop One (Thermo Fisher Scientific, USA). DNA size distributions were evaluated using the Genomic DNA ScreenTapes on the Agilent TapeStation 4200 (Agilent, USA).

4.2 DNA sequencing

A barcoded SQK-LSK114 DNA library was prepared according to the manufacturer's protocol, except for minor modifications (Oxford Nanopore Technologies, Oxford, United Kingdom). The barcoded DNA library (approximately 10-20 fmol) was loaded onto a primed FLO-PRO114M flow cells and sequenced on a PromethION P2 Solo device, running MinKNOW v. 22.07.9. Signal data was basecalled and demultiplexed with Guppy v. 6.3.9 (Oxford Nanopore Technologies, Oxford, United Kingdom) using the *super-accurate* algorithm (dna_r10.4.1_e8.2_400bps_5khz_sup.cfg). Adapters were trimmed with Porechop v. 0.2.4. Removal of low quality reads and generation of basic sequencing data statistics were obtained using Nanoq v. 0.10.0 [9].

4.3 ARG profiling

Filtered sequencing reads were mapped to the Comprehensive Antibiotic Resistance Database (CARD) v. 3.2.7 using the Resistance Gene Identifier (RGI) tool v. 6.0.2 [7,8]. The rgi bwt workflow (KMA algorithm) for metagenomic read mapping were adapted for long reads using custom modifications.

4.4 *de novo* assembly

De novo assemblies were produced with Flye v. 2.9.1-b1780 [10–12], setting the parameters `–meta` and `–extra-params min_read_cov_cutoff=10`. The draft assemblies were subsequently polished once with Medaka v. 1.8.0 (Oxford Nanopore Technologies, Oxford, United Kingdom) and draft assembly graphs were inspected with Bandage v. 0.8.1 [13]. Contigs below 1000 bp were removed with SeqKit v. 2.2.0 [14].

4.5 MAG binning

Following *de novo* assembly, contigs were subjected to automated binning using VAMB v. 4.1.3 and MetaBAT2 v. 2.15 [15,16]. MAG dereplication was conducted using dRep v. 3.4.3 setting the `–genomeInfo` flag to accommodate CheckM2 v. 1.0.1 MAG quality estimates [5,17], minimum MAG length (clustersize) to 0.5 Mbp, minimum completion to 1 % and maximum contamination to 10 % thresholds [18]. MAG abundances were calculated using CoverM v. 0.6.1, setting `–min-read-percent-identity 95` and `–min-read-aligned-percent 90`.

4.6 MAG classification

MAGs were classified against the Genome Taxonomy Database release214 using the Genome Taxonomy Database toolkit v. 2.3.0 [21].

4.7 DNA read classification

4.7.1 Protein-based classification

Quality filtered DNA sequencing reads were classified with Kaiju v. 1.9.2, against the nr_euk 2022-05-10 database (321 mio. protein sequences from both prokaryotes, microbial eukaryotes and vira) [22].

4.7.2 rRNA gene-based classification

Filtered ONT fastq reads were converted to fasta using GNU Awk v. 5.0.1, and genes encoding rRNA were extracted with Barrnap v. 0.9 using a bacterial hidden Markov model. The SILVA 16S/18S rRNA 138 SSURef

NR99 full-length database in RESCRIPt format was downloaded from the [QIIME](#) on 29 September 2022 [23–25]. Potential generic placeholders and dead-end taxonomic entries were cleared from the taxonomy flat file, i.e. entries containing *uncultured*, *metagenome* or *unassigned*, were replaced with a blank entry. Extracted rRNA genes were mapped to the database using [Minimap2](#) v. 2.24-r1122 [26] and sorted using [Samtools](#) v. 1.15.1 [27]. Mapping results were filtered such that alignment sequence length covered > 85 % of database entry, and with mapping quality score > 0.85. Further bioinformatic processing was done via RStudio IDE (2022.12.0.353) running R version 4.3.1 (2023-06-16 ucrt) and using the R packages: [ampvis2](#) [28], [tidyverse](#) (2.0.0), [seqinr](#), [ShortRead](#) and [iNEXT](#) [29,30].

4.8 Gene annotations

4.8.1 MAG gene annotation

[Bakta](#) v. 1.8.1 [31] and [Prokka](#) v. 1.14.6 [32] were used to annotate the dereplicated bacteria and archaea MAGs using the `–compliant` flag (Genbank/ENA/DDJB compliance), respectively. The `–skip-crispr` flag was invoked in [Bakta](#).

[Bakta](#) and [Prokka](#) constitute two main pipelines available for gene-annotating prokaryotic genomes. [Bakta](#) is the preferred tool for annotating bacterial genomes or metagenome-assembled genomes (MAGs) as it provides fewer hypothetical proteins [31] than [Prokka](#). While [Bakta](#) is limited to bacterial genomes or MAGs, [Prokka](#) allows for annotating bacterial and archaeal genomes and MAGs. DNASense uses [Bakta](#) and [Prokka](#) for annotating bacterial and archaeal genomes/MAGS, respectively.

4.8.2 Metagenomes

DNASense provides both [Bakta](#)-annotated MAGs and [Prokka](#)-annotated metagenomes for gene exploration, metatranscriptomics, metaproteomics and other analysis options. DNASense recommends that downstream analyses are ideally done using annotated MAGs, except when the data binned to MAGs does not cover a sufficient fraction of the full metagenome in consideration, e.g. ~60 % of all DNA reads. If MAGs provide insufficient coverage, the full gene-annotated metagenome can be used initially for e.g. metatranscriptomics, and then utilising MAG information afterwards. Metagenomes are gene annotated using [Prokka](#), typically using a bacterial gene-prediction model, as [Bakta](#) is not technically feasible for applying to large metagenome datasets. Differentially expressed genes or other features of interest identified in metagenomes can subsequently be searched against and identified in the [Bakta](#)-annotated MAGs to provide a more comprehensive insight into the functional annotation.

5 Supplementary information

5.1 Kaiju taxa

Table 6: Taxa included in the Kaiju database.

NCBI ID	Taxa
2	Bacteria
2157	Archaea
10239	Viruses
33630	Alveolata
554915	Amoebozoa
5794	Apicomplexa
554296	Apusozoa
1401294	Breviatea
193537	Centroheliozoa
3041	Chlorophyta
28009	Choanoflagellida
190322	Colodictyonidae
3027	Cryptophyta
5758	Entamoeba
33682	Euglenozoa
207245	Fornicata
4751	Fungi
38254	Glaucocystophyceae
2830	Haptophyta
5752	Heterolobosea
556282	Jakobida
339960	Katablepharidophyta
5653	Kinetoplastida
136087	Malawimonadidae
66288	Oxymonadida
759891	Palpitomonas
5719	Parabasalia
419944	Picozoa
543769	Rhizaria
2763	Rhodophyta
33634	Stramenopiles
88547	Syndiniales
589438	Telonemida
137418	Trimastix
1084709	Tsukubamonadidae

References

- 1 Albertsen M, Karst SM, Ziegler AS, Kirkegaard RH & Nielsen PH (2015) [Back to basics – the influence of DNA extraction and primer choice on phylogenetic analysis of activated sludge communities](#). *PLOS ONE* **10**, e0132783.
- 2 Koren S & Phillippy AM (2015) [One chromosome, one contig: Complete microbial genomes from long-read sequencing and assembly](#). *Current Opinion in Microbiology* **23**, 110–120.
- 3 Albertsen M, Hugenholtz P, Skarshewski A, Nielsen KL, Tyson GW & Nielsen PH (2013) [Genome sequences of rare, uncultured bacteria obtained by differential coverage binning of multiple metagenomes](#). *Nature Biotechnology* **2013 31:6 31**, 533–538.
- 4 Sereika M, Kirkegaard RH, Karst SM, Michaelsen TY, Sørensen EA, Wollenberg RD & Albertsen M (2022) [Oxford nanopore R10.4 long-read sequencing enables the generation of near-finished bacterial genomes from pure cultures and metagenomes without short-read or reference polishing](#). *Nature Methods* **19**, 823–826.
- 5 Parks DH, Imelfort M, Skennerton CT, Hugenholtz P & Tyson GW (2015) [CheckM: Assessing the quality of microbial genomes recovered from isolates, single cells, and metagenomes](#). *Genome Research* **25**, 1043–1055.
- 6 Bowers RM, Kyrpides NC, Stepanauskas R, Harmon-Smith M, Doud D, Reddy TBK, Schulz F, Jarett J, Rivers AR, Eloe-Fadrosch EA, Tringe SG, Ivanova NN, Copeland A, Clum A, Becraft ED, Malmstrom RR, Birren B, Podar M, Bork P, Weinstock GM, Garrity GM, Dodsworth JA, Yooseph S, Sutton G, Glöckner FO, Gilbert JA, Nelson WC, Hallam SJ, Jungbluth SP, Etema TJG, Tighe S, Konstantinidis KT, Liu WT, Baker BJ, Rattei T, Eisen JA, Hedlund B, McMahon KD, Fierer N, Knight R, Finn R, Cochrane G, Karsch-Mizrachi I, Tyson GW, Rinke C, Lapidus A, Meyer F, Yilmaz P, Parks DH, Eren AM, Schriml L, Banfield JF, Hugenholtz P & Woyke T (2017) [Minimum information about a single amplified genome \(MISAG\) and a metagenome-assembled genome \(MIMAG\) of bacteria and archaea](#). *Nature Biotechnology* **35**, 725–731.
- 7 McArthur AG, Waglechner N, Nizam F, Yan A, Azad MA, Baylay AJ, Bhullar K, Canova MJ, Pascale GD, Ejim L, Kalan L, King AM, Koteva K, Morar M, Mulvey MR, O'Brien JS, Pawlowski AC, Piddock LJV, Spanogiannopoulos P, Sutherland AD, Tang I, Taylor PL, Thaker M, Wang W, Yan M, Yu T & Wright GD (2013) [The comprehensive antibiotic resistance database](#). *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* **57**, 3348–3357.
- 8 Alcock BP, Huynh W, Chalil R, Smith KW, Raphenya AR, Wlodarski MA, Edalatmand A, Petkau A, Syed SA, Tsang KK, Baker SJC, Dave M, Mccarthy MC, Mukiri KM, Nasir JA, Golbon B, Imtiaz H, Jiang X, Kaur K, Kwong M, Liang ZC, Niu KC, Shan P, Yang JYJ, Gray KL, Hoad GR, Jia B, Bhandu T, Carfrae LA, Farha MA, French S, Gordzevich R, Rachwalski K, Tu MM, Bordeleau E, Dooley D, Griffiths E, Zubyk HL, Brown ED, Maguire F, Beiko RG, Hsiao WWL, Brinkman FSL, Domselaar GV & McArthur AG (2023) [CARD 2023: Expanded curation, support for machine learning, and resistome prediction at the comprehensive antibiotic resistance database](#). *Nucleic Acids Research* **51**, D690–D699.
- 9 Steinig E & Coin L (2022) [Nanoq: Ultra-fast quality control for nanopore reads](#). *Journal of Open Source Software* **7**, 2991.
- 10 Kolmogorov M, Yuan J, Lin Y & Pevzner PA (2019) [Assembly of long, error-prone reads using repeat graphs](#). *Nature Biotechnology* **37**, 540–546.
- 11 Kolmogorov M, Bickhart DM, Behsaz B, Gurevich A, Rayko M, Shin SB, Kuhn K, Yuan J, Pevnikov E, Smith TPL & Pevzner PA (2020) [metaFlye: Scalable long-read metagenome assembly using repeat graphs](#). *Nature Methods* **2020 17:11 17**, 1103–1110.
- 12 Lin Y, Yuan J, Kolmogorov M, Shen MW, Chaisson M & Pevzner PA (2016) [Assembly of long error-prone](#)

- reads using de bruijn graphs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **113**, E8396–E8405.
- 13 Wick RR, Schultz MB, Zobel J & Holt KE (2015) [Bandage: Interactive visualization of de novo genome assemblies](#). *Bioinformatics* **31**, 3350–3352.
 - 14 Shen SAL Wei AND Le (2016) [SeqKit: A cross-platform and ultrafast toolkit for FASTA/q file manipulation](#). *PLOS ONE* **11**, 1–10.
 - 15 Nissen JN, Johansen J, Allesøe RL, Sønderby CK, Armenteros JJA, Grønbech CH, Jensen LJ, Nielsen HB, Petersen TN, Winther O & Rasmussen S (2021) [Improved metagenome binning and assembly using deep variational autoencoders](#). *Nature Biotechnology* **39**, 555–560.
 - 16 Kang DD, Li F, Kirton E, Thomas A, Egan R, An H & Wang Z (2019) [MetaBAT 2: An adaptive binning algorithm for robust and efficient genome reconstruction from metagenome assemblies](#). *PeerJ* **2019**.
 - 17 Chklovski A, Parks DH, Woodcroft BJ & Tyson GW (2023) [CheckM2: A rapid, scalable and accurate tool for assessing microbial genome quality using machine learning](#). *Nature Methods* **20**, 1203–1212.
 - 18 Olm MR, Brown CT, Brooks B & Banfield JF (2017) [DRep: A tool for fast and accurate genomic comparisons that enables improved genome recovery from metagenomes through de-replication](#). *ISME Journal* **11**, 2864–2868.
 - 19 Parks DH, Chuvochina M, Chaumeil P-A, Rinke C, Mussig AJ & Hugenholtz P (2020) [A complete domain-to-species taxonomy for bacteria and archaea](#). *Nature Biotechnology* **38**, 1079–1086.
 - 20 Parks DH, Chuvochina M, Waite DW, Rinke C, Skarshewski A, Chaumeil P-A & Hugenholtz P (2018) [A standardized bacterial taxonomy based on genome phylogeny substantially revises the tree of life](#). *Nature Biotechnology* **36**, 996–1004.
 - 21 Chaumeil PA, Mussig AJ, Hugenholtz P & Parks DH (2020) [GTDB-tk: A toolkit to classify genomes with the genome taxonomy database](#). *Bioinformatics* **36**, 1925–1927.
 - 22 Menzel P, Ng KL & Krogh A (2016) [Fast and sensitive taxonomic classification for metagenomics with kaiju](#). *Nature Communications* **7**.
 - 23 Robeson MS, O'Rourke DR, Kaehler BD, Ziemski M, Dillon MR, Foster JT & Bokulich NA (2020) [RE-SCRIPT: Reproducible sequence taxonomy reference database management for the masses](#). *bioRxiv*, 2020.10.05.326504.
 - 24 Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, Gerken J, Schweer T, Yarza P, Peplies J & Glöckner FO (2013) [The SILVA ribosomal RNA gene database project: Improved data processing and web-based tools](#). *Nucleic Acids Research* **41**, 590–596.
 - 25 Yilmaz P, Parfrey LW, Yarza P, Gerken J, Pruesse E, Quast C, Schweer T, Peplies J, Ludwig W & Glöckner FO (2014) [The SILVA and “all-species living tree project \(LTP\)” taxonomic frameworks](#). *Nucleic Acids Research* **42**, D643–D648.
 - 26 Li H (2018) [Minimap2: Pairwise alignment for nucleotide sequences](#). *Bioinformatics* **34**, 3094–3100.
 - 27 Li H, Handsaker B, Wysoker A, Fennell T, Ruan J, Homer N, Marth G, Abecasis G & Durbin R (2009) [The sequence alignment/map format and SAMtools](#). *Bioinformatics* **25**, 2078–2079.
 - 28 Andersen KS, Kirkegaard RH, Karst SM & Albertsen M (2018) [ampvis2: An r package to analyse and visualise 16S rRNA amplicon data](#). *bioRxiv*.

- 29 Hsieh TC, Ma KH & Chao A (2016) [iNEXT: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity \(hill numbers\)](#). *Methods in Ecology and Evolution* **7**, 1451–1456.
- 30 Chao A, Gotelli NJ, Hsieh TC, Sander EL, Ma KH, Colwell RK & Ellison AM (2014) [Rarefaction and extrapolation with hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies](#). *Ecological Monographs* **84**, 45–67.
- 31 Schwengers O, Jelonek L, Dieckmann MA, Beyvers S, Blom J & Goesmann A (2021) [Bakta: Rapid and standardized annotation of bacterial genomes via alignment-free sequence identification](#). *Microbial Genomics* **7**.
- 32 Seemann T (2014) [Prokka: Rapid prokaryotic genome annotation](#). *Bioinformatics (Oxford, England)* **30**, 2068–2069.