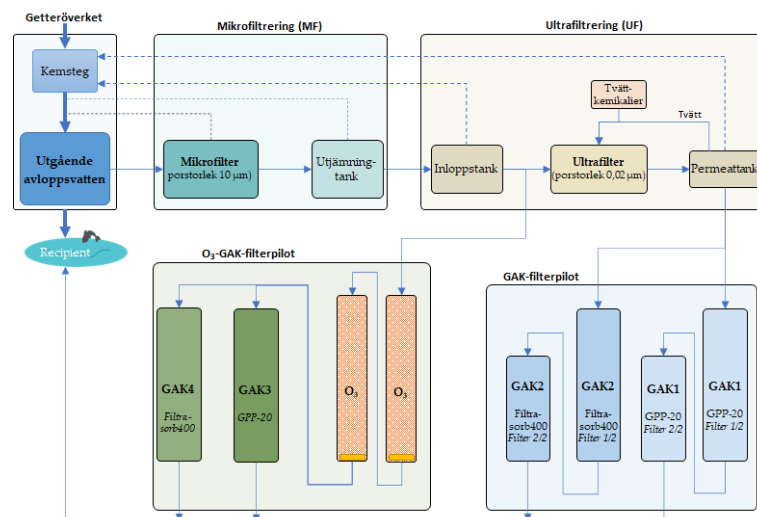


Förstudie - Mikroföroreningar vid Getteröverket i Varberg

Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten



I samarbete med



Rapportnummer: C

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: [Klicka och ange text](#)

Godkännare: [Klicka och ange text](#)

ISBN: [Klicka och ange text](#)

Sammanfattning

Mellan 2020 och 2023 har Vivab i samarbete med IVL Svenska Miljöinstitutet genomfört en förstudie för avancerat rening på Getteröverket i Varberg. Förstudien genomfördes med bidrag från Naturvårdsverket i två olika etapper. Denna rapport kompletterar en tidigare rapport som skickades till Naturvårdsverket efter genomförandet av den första etappen i slutet av 2021 (Baresel et al., 2021). Syften med förstudien var att utreda förutsättningarna för en fullskaleinstallation av lämplig teknik för rening av mikroföroreningar med fokus på läkemedelsrester på Getteröverket och att ge en väl begrundat underlag för beslutsfattarna för implementering av en fullskaleanläggning inom befintligt verksamhetsområde.

För att uppnå dessa mål genomfördes kompletterande screeningar av mikroföroreningar över avloppsreningsverket, potentiella uppströms punktkällor, samt mottagande ytvatten. Vidare fortsatte de tidigare startade långtidsförsöken med teknikkombinationen ultrafiltrering och granulerat aktiv kol (UF-GAK) samt kompletterande pilottester med teknikkombination ozonering och granulerat aktiv kol (O₃-GAK).

Resultat för den kompletterande karteringen av mikroföroreningar över Getteröverket, bidragande källor och olika recipientpunkter visar tydligt att Getteröverket är den dominerande transportvägen för läkemedelsrester till mottagande ytvatten inkl. Inre Farehammarsviken. För andra mikroföroreningar som PFAS och fenoler finns även andra källor än Getteröverket. Lakvattnet från Bösarp deponi bidrar endast en mindre del av PFAS-belastningen till Getteröverket

De genomförda pilottesterna med de olika teknikkombinationer visade att en mycket bra reduktion av läkemedelsrester och andra mikroföroreningar kan åstadkommas. Långtidsförsöken visade också att detta kan åstadkommas med en signifikant mindre resursförbrukning i UF-GAK lösningen jämfört med traditionell design. Principförslaget som togs fram för UF-GAK teknikkombinationen inklusive dimensionering och tekniskt utförande visar en möjlig fullskaleimplementering. Även om projektgruppen valde att fokusera på teknikkombinationen UF-GAK i principförslaget eftersom denna teknicklösning utforskades mest i långtidsförsöken samt att den ger ökade möjligheter även för en återanvändning av vatten, så gjordes även en enkel bedömning av O₃-GAK alternativet. Utifrån den genomförda kostnadsbedömningen skulle implementering av avancerad rening vid Getteröverket generera en specifik reningskostnad på ca 2,3 kr/m³.

Utvärderingen av pilottesterna inkluderades förutom analyser av olika mikroföroreningar ett antal olika aktiviteter inkl. aktivitetstester, flödescytometri, karakterisering av den mikrobiella sammansättning, antibiotikaresistens, avloppsdirektivsämen, med flera som redovisas i rapporten.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Förkortningar	5
1 Inledning	6
1.1 Bakgrund	6
1.2 Syfte och mål	6
2 Metod	7
2.1 Kartering av mikroföroreningar	7
2.2 Kompletterande behovsbedömning	11
2.3 Pilottester	11
2.3.1 Pilottester med teknikkombinationen MF, UF och GAK	12
2.3.2 Pilottester med teknikkombinationen MF, Ozon och GAK	13
2.4 Beslutsunderlag för implementering	14
3 Resultat och diskussion	15
3.1 Mikroföroreningar och reningsbehov	15
3.1.1 Mikroföroreningar vid Getteröverket	15
3.1.2 Mottagande och uppströms recipienter/lakvatten	19
3.1.3 Bedömning av recipientpåverkan och reningsbehov	22
3.1.4 Bedömning av bidragande källor	26
3.2 Pilotförsök med kombinationen UF-GAK	27
3.2.1 Rening av läkemedelsrester	27
3.2.2 Rening av PFAS	33
3.2.3 Rening av hormoner och östrogena effekter (YES)	38
3.2.4 Rening av andra föroreningar	38
3.2.5 Resultat från aktivitetstester	39
3.2.6 Flödescytometri (FCM)	40
3.2.7 Biofilmkaraktisering	42
3.2.8 Utvärdering för antibiotikaresistens	43
3.2.9 Prioriterade kemiska parametrar	45
3.3 Pilotförsök med teknikkombinationen O ₃ -GAK	45
3.3.1 Initiala dos-respons tester	45
3.3.2 Långtidstester	49
3.4 Jämförelse av pilotförsöken	63
3.5 Beslutsunderlag för implementering	64
3.5.1 Dimensionerande förutsättningar	64
3.5.2 Bedömda kolkapacitet/livslängd	66
3.5.3 Förslag till processlösning och -utformning	67
3.5.4 Tekniskt utförande	68
3.5.5 Processbyggnad för avancerad rening	74
3.5.6 Investerings- och driftkostnader	76
3.5.7 Miljöpåverkan och arbetsmiljö	78
3.5.8 Framtida utvecklingspotential	79
3.5.9 Alternativ implementering av O ₃ -GAK	81
4 Slussats och rekommendationer	83
5 Referensförteckning	85
6 Bilagor	87

Förkortningar

ARV	Avloppsreningsverk
BOD	Biochemical oxygen demand
CEB	Chemically enhanced backwash
COD	Chemical oxygen demand
DDD	Definierad DygnsDos, genomsnittliga dygnsdosen av en vuxen
DOC	Dissolved organic carbon, löst organisk 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 Aktiv 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, total organisk kol
Total-P	Total fosfor
UF	Ultrafilter
UF-GAK	Teknikkombination av ultrafilter och filter med granulerat aktivt kol
UVA, UVabs	Ultra-violet Absorbance, 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) om bidrag för rening av avloppsvatten från läkemedelsrester. Projektet bygger på en fortsättning och komplettering av ett tidigare förstudie vid Getteröverket som redovisats av Baresel et al. (2021). Mycket av den allmänna bakgrunden om till exempel ett generellt behov för läkemedelsrening, beskrivning av Getteröverket, erfarenheter från pilottester som Vivab och IVL körde vid Ullared ARV, m.m. beskrivs där och återges inte i detalj i föreliggande rapport.

1.1 Bakgrund

Under tidsperioden juni 2020 till december 2021 har VIVAB i samarbete med IVL Svenska Miljöinstitutet genomfört en förstudie för avancerad rening vid Getteröverket med bidrag från Naturvårdsverket. Utifrån de förstudieresultaten kunde det konstateras att det finns ett stort behov för läkemedelsrening vid Getteröverket för att skydda den känsliga recipienten, Inre Farehammarsviken.

Pilotförsöken som utfördes på reningsverket med avseende på mikroforenningar med teknikkombinationer av mikrofiltrering (MF), ultrafiltrering (UF) och tvåstegs granulerat aktivt kol (GAK), visade lovande resultat med väldigt höga reduktionsgrader för de dominerande mikroforeningarna. Under försöksperioden noterades dock ingen signifikant minskning av läkemedelsreduktionen vilket begränsade möjligheterna för en fullständig utvärdering av försöken och framtagande av underlag för en eventuell framtida fullskaleimplementering. Fortsatta pilottester bedömdes därför krävas för ett avgörande implementeringsbeslut av det fjärde reningssteget på Getteröverket.

Projektet planerade dessutom att komplettera pilotförsöken med ytterligare pilotanläggningar för att kunna få fram ytterligare kunskap och underlag för jämförelser av teknikkombinationer.

1.2 Syfte och mål

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

I den tidigare utförda förstudien under år 2020–2021 framkom att den känsliga recipienten, Inre Farehammarsviken inte är i bra skick med omfattande risker för

negativ påverkan på djurlivet, vilket kan ytterligare försämrats i framtiden p.g.a. kontinuerligt flöde av framför allt läkemedelsrester via Getteröverket. Således har Vivab:s styrelse tagit fram ett inriktningsbeslut om implementering av läkemedelsrening på längre sikt. Målet är att utformningen kommer baseras på förstudiens resultat och rekommendationer.

Den övergripande målsättningen med projektet är att minimera oönskade negativa effekter på recipienten (Inre Farehammarsviken) p.g.a. utsläpp av behandlat avloppsvatten från Getteröverket. Vivab:s ambition är att det renade utgående avloppsvattnet till recipient ska uppvisa en signifikant lägre halt av mikroföroreningarna i förhållande till de dominerande substanserna i utgående vatten som inte behandlas med avancerad rening samt de dominerade substanserna i recipienten.

De kompletterande pilottesterna var även tänkt att generera processdata baserade på faktiska långtidstester som helt saknas i Sverige och därmed kommer att vara till nytta även för andra avloppsreningsverk i Sverige.

2 Metod

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

1. Kompletterande kartering av mikroföroreningar över Getteröverket, andra bidragande källor och recipienten.
2. Fortsatta och kompletterande pilotstudier med olika teknikkombinationer.
3. Ett koncept- och principskissförslag för implementering och integrering av en fullskaleanläggning inom befintliga markytor.

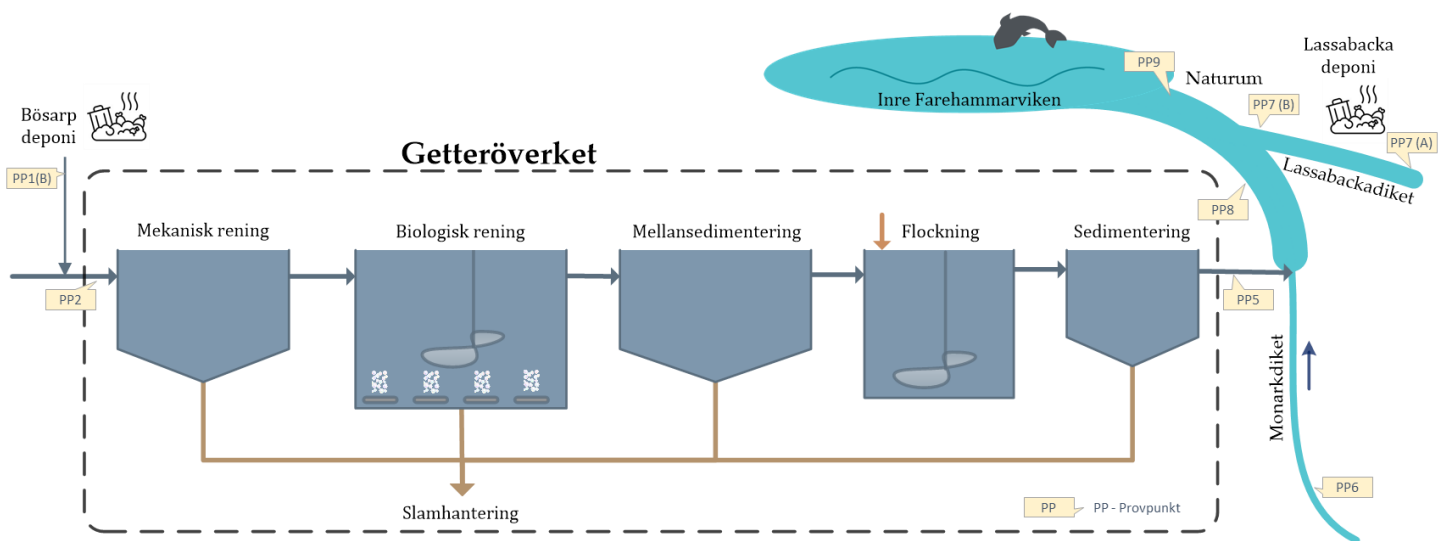
2.1 Kartering av mikroföroreningar

Kartering av mikroföroreningar fortsattes från tidigare projekt men anpassades något för att få en generell överblick av källfördelning och belastningsnivåer i mottagande recipient, samt för att inkludera alla pilotdelar. Förutom kemiska analyser av mikroföroreningar utökades analyserna med effektbaserade analyser. Karteringen omfattar i följande provpunkter (se även Figur 1 och Figur 2):

- In och ut från Getteröverket (PP2 och PP5) för att vidare undersöka belastningssituationen in till reningsverket, reduktion med befintlig rening och innovativa reningsmetoder samt Getteröverkets belastning på recipienten.

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

- Lakvatten från Bösarp deponin (PP1 (A)) eftersom lakvattnet från deponin är kopplat 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 & B), nedströms i recipienten tas det prover direkt efter inblandning av renat utgående avloppsvatten från Getteröverket med dagvatten från Monarkdiket (PP8) och vid Naturum (PP9, efter inblandningen av Getteröverkets utgående renade vatten med dagvatten från Monarkdiket och Lassabackadiket).
- Över pilotanläggningarna för den avancerade reningen inklusive ultrafiltreringen, ozoneringen samt samtliga GAK-filtersteg (Figur 2).



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

Tidigare provpunkter vid sjukhuset (PP1), Inre Farehammarviken (PP10 – PP12), samt mellan olika reningssteg (PP3 och PP4) togs bort då den insamlade kunskapen från tidigare provtagningar bedömdes som tillräckligt. För resultaten hänvisas till Baresel et al. (2021).

Proverna över pilotanläggningen togs, förutom vid specifika tester som dos-responsförsöken över ozoneringen, som tidsproportionella veckoprover från sju åtföljande dagar, där varje dygnsprov togs som tidsproportionellt blandningsprov (provvolym: 70 ml var trettionde minut). Veckoproverna skickades i slutet av varje provperiod till IVL i Stockholm för analys. Prover över Getteröverket, i lakvatten, samt i recipienten (stickprover) togs under det aktuella projektet vid två kampanjer under v16 och v27 2023.

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

Mikroföroreningar som analyserades i olika prover listas i Tabell 1 och omfattade 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).

Tabell 1. Analyserade mikroföroreningar.

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
Clarithromycin*	Paracetamol	PFHpA	PFOS
Diklofenak	Propranolol	PFOA	6:2 FTS
Erythromycin*	Sertraline	PFNA	∑PFAS11
Fluconazole	Sulfamethoxazole*	Tillägg avlopps- och EQS-direktivet*	
Furosemide	Tramadol	Azitromycin	
Ibuprofen	Trimethoprim*	Amisulprid	Irbesartan
Ketoconazole	Venlafaxine	Benzotriazol	Kandesartan
Losartan	Zolpidem	Hydrochlorothiazide	4&6Methylbenzotriazole

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

Förslaget till nya avloppsdirektiv som publicerades under hösten 2022 (EU Commission 2022a) inkluderar 12 indikatorsubstanser varav sex substanser redan ingår i nuvarande analyspaket (karbamazepin, citalopram, clarithromycin, diklofenak, metoprolol och venlafaxine; se Tabell 1). Resterande sex substanser består av ∑6&4-metylbenzotriazol, amisulprid, benzotriazol, candersartan, hydrochlorthiazide och irbersartan. Amisulprid är inte registrerat som läkemedel i Sverige, men kan användas efter tillstånd (licens) från Läkemedelsverket och därmed ändå förekommer i avloppsvatten. Efter att analysmetoden anpassats av IVL-laboratorium för att även kunna kvantifiera dessa substanser, har analys av dessa ämnen inkluderats i den avslutande provtagningsomgången.

Olika aktivitetstester utfördes dessutom av BioCell Analytica (2021) vid några provtagningsstillfällen (se Bilaga 6.3). Dessa inkluderade:

- **AhR-aktivitet** (arylhydrokarbon-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 toxiska ämnen 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. Vilket ligger bakom olika typer av toxiska effekter så som inflammatoriska effekter och cancer. Flertal toxiska ämnen, till exempel organiska miljögifter, pesticider, naturliga ämnen och esinifektionsbiprodukter kan orsaka oxidativ stress. Vid induktion av oxidativ stress uppregleras Nrf2, vilket kan användas som markör vid bioanalys av vattenprovers innehåll av ämnen som orsakar oxidativ stress.
- Östrogen (ER-aktivitet) och androgen (AR-aktivitet) aktivitet: Ämnen kan aktivera (agonistisk aktivitet) eller blockera (antagonistisk aktivitet) östrogen- och androgenreceptorn (Anti AR-aktivitet). Östrogener och androgener har 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.

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 del av driftuppföljning och för utvärderingen av pilottesterna.

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

Behandlat vatten har även kvantifierats med avseende antibiotikaresistenta gener vid samma tillfälle (se Bilaga 6.5). Även dessa analyser genomfördes av DNASense i Aalborg. Den exakta metoden för analysgenomförandet redovisas i bilagan. Antibiotikaresistenta gener (AGR) analyserades endast vid ett tillfälle för att få indikationer på piloternas förmåga att minska en eventuell spridning av antibiotikaresistens. Valet att undersöka antibiotikaresistens gjordes eftersom Getteröverket tar emot vatten 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 resistent i ledningsnätet som behöver hanteras vid Getteröverkets reningssteg.

För att undersöka vattnets kemiska status efter behandling i pilotanläggningarna genomfördes kompletterande analyser vid de sista två provtagningar 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 riskbedömningar för negativ påverkan av mottagande recipienter och därmed behov för avancerad rening vid Getteröverket. Detta gjordes på flera olika sätt enligt följande:

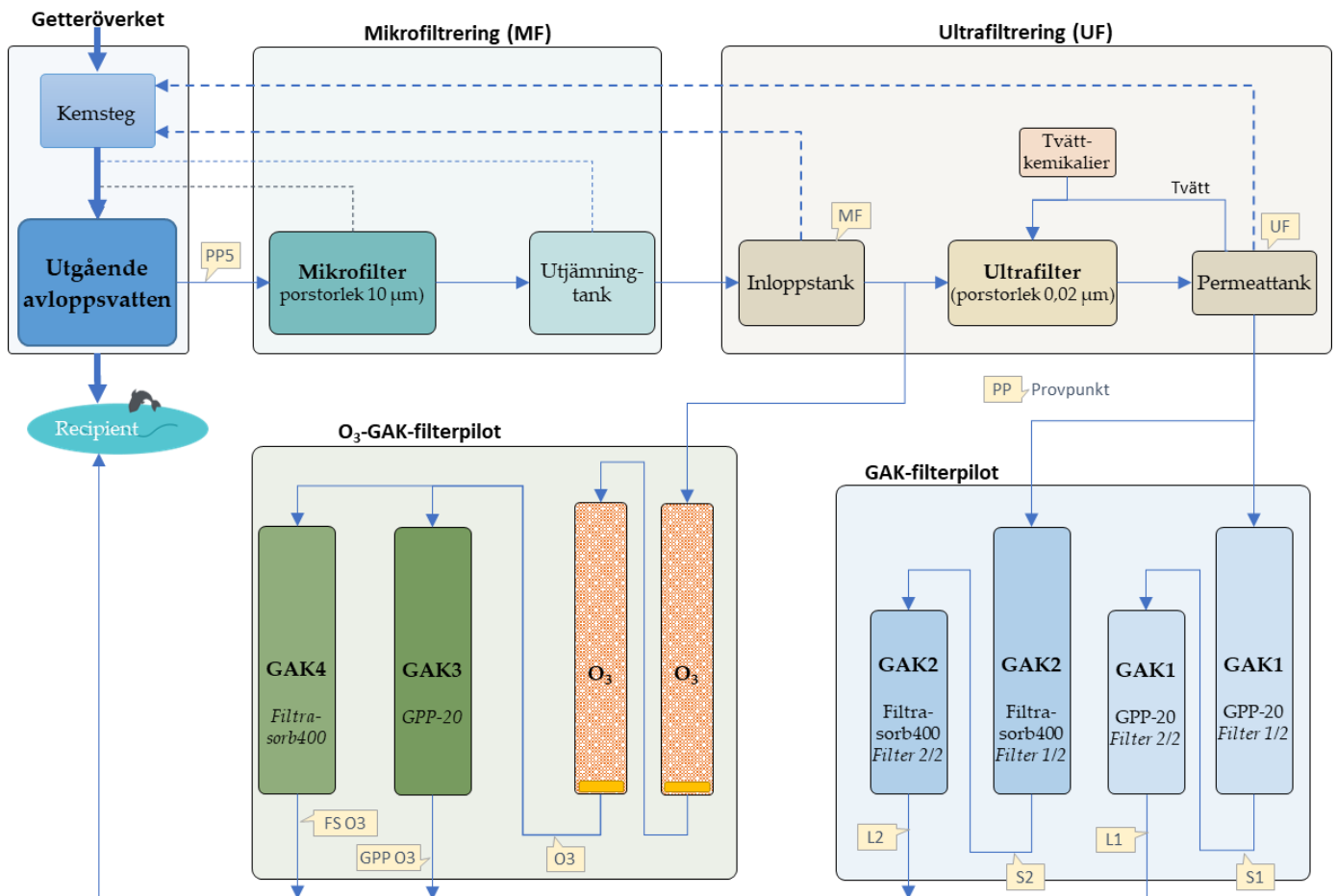
- Utifrån gränsvärden för klassning av kemisk status i vattenförekomster via halter av särskilt förorenande ämnen i enighet med Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter (2019:25) om klassificering och miljökvalitetsnormer avseende ytvatten. Här bedöms recipienten utifrån analyserade halter av ciprofloxacin, diklofenak, östradiol och etinylöstradiol.
- Utifrån beräknade riskkvoter av analyserade läkemedel i utgående vatten med hänsyn till recipientens utspädningsförmåga. Dessutom baseras riskkvoterna på tidigare kända gränser när toxiska effekter på den akvatiska miljön börjar och en säkerhetsfaktor som tar hänsyn till osäkerheten i de ekotoxikologiska studier som föreligger i litteraturen (se Baresel et al., 2021).
- Utifrån förslaget till ändring av direktiv för prioriterade ämnen 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 (AR-antagonism); 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 kombinationerna och för att få ett bättre beslutsunderlag. Vissa av pilotresultaten ligger också till grund för implementeringsförslag av en fullskaleanläggning med den mest fördelaktiga teknikkombinationen för Getteröverket.

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 både pilotlinjer kördes GAK-filtrering med två olika GAK i parallella linjer för jämförelse. Initialt testades även ett organiskt GAK och ett slambaserat GAK

tillverkat från Getteröverket eget slam. Detta beskrivs mer ingående för respektive pilotlinje.



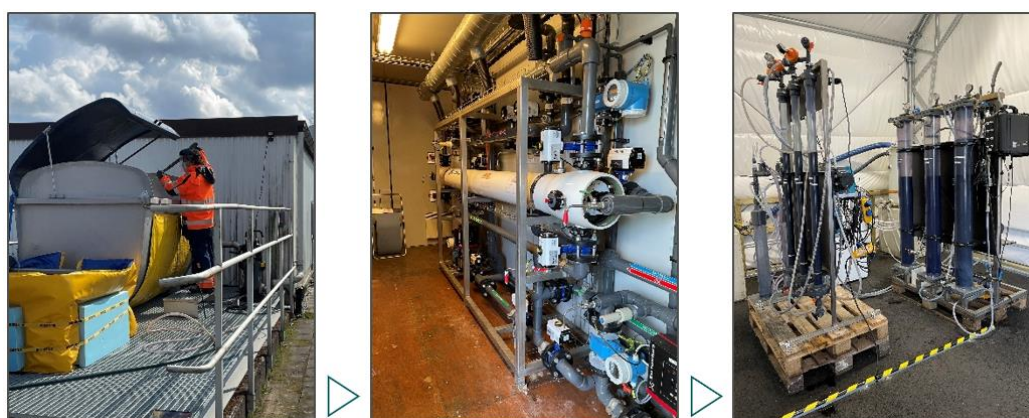
Figur 2. Flödesschema över pilotanläggningarna vid Getteröverket samt provpunkter i piloten.

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

2.3.1 Pilottester med teknikkombinationen MF, UF och GAK

Pilotförsöken med kombination av MF, UF och GAK är en direkt fortsättning av tidigare pilottester som påbörjades i februari 2021 och resulterade därmed i en unik långtidsstudie med kontinuerliga pilottester över 2,5 års tid. En utförlig beskrivning av de olika pilotkomponenter 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). Pilotförsöken startades initial med ytterligare en GAK-pilotlinje med Organosorb

10, ett aktivt kol med något större partiklar som produceras från kokosnötskal som ligger i samma prisklass eller något över FS400 (Desotec Activated Carbon). Efter 21 driftveckor (vid ca 17 500 BV i varje filter och 8 500 BV i hela filterlinjen) bytes Organosorb 10 ut mot ett egenproducerat aktivt kol från Getteröverkets avvattnade och pyrolyserade slam, FoU21. Pilotförsöken med FoU21 pågick sedan till ca 27 000 BV per filter (13 500 BV för hela filterlinjen) 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 och GAK.

2.3.2 Pilottester med teknikkombinationen MF, Ozon och GAK

Parallellt med pilotförsöken med kombination av MF, UF och GAK etablerades även en pilotanläggning för ozonoxidation från Wedeco och en GAK-filterpilot ställdes till förfogande av IVL. Ozongeneratoren (Modular 8HC) hade en kapacitet på upp till 8 g ozon/h som tillsattes till två bubbelkolonner på totalt 220 l. För att uppnå en önskad kontakttid mellan 15 – 20 minuter kunde förutom ozongeneratoren även vattenflödet justeras. Piloten var utrustad med en egen syrgasgenerator, fotometrisk online mätning av ozon i producerat ozonflödet samt offgasflödet, 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 och GAK.

Pilotförsök med ozonering 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 vanligast förekommande teknikerna som också har undersökta med hjälp av pilotanläggningar inom projektet.

För principförslaget valdes att fokusera på teknikkombinationen MF, UF och GAK som framtida avancerade reningsprocess för Getteröverket. Detta med tanke på bedömningen att det behövs en kraftig reduktion av flera mikroforeningar utifrån recipientbedömningen samt att relaterade pilottester kunde ge mest kunskapsunderlag för att utforma beslutsunderlag.

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

3 Resultat och diskussion

I efterföljande avsnitt presenteras och diskuteras resultaten från de olika aktiviteter som genomfördes i projektet och som beskrevs i föregående kapitel. Samtliga analysresultat och annan detaljinformation redovisas i bilagan.

Tabell 2 visar resultatet för de två provomgångarna vad gäller inkommande och utgående halter samt reningseffekt av de vanligaste 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 steget.

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 lakvatten i Bösarp deponi. Baserat på dessa analysresultat görs en uppdatering av behovsanalysen för avancerat 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 medelreduktionsgraden. Halter under detektionsgränsen anges i rött med den faktiska detektionsgränsen (LOD), medan resultat under kvantifieringsgräns anges som halva kvantifieringsgräns (LOQ/2). Faktiska halter kan således vara lägre och reduktionsgraden högre än redovisat i tabellen.

En väldigt bra reningseffektivitet för de kvantifierbara hormonerna östron (E1) och östradiol (E2) kunde påvisas och utgående halter ligger under LOD eller LOQ. Etinylöstradiol (EE2) kunde inte detekteras i någon 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, sulfamethoxazole och trimethoprim ligger medel för reningseffektiviteten under 40 % och för flera substanser kan en negativ reduktion konstateras. Ciprofloxacin, erythromycin, ketoconazole och metotrexat kunde inte detekteras eller kvantifieras i någon av de två provtagningar varken i inkommande eller utgående avloppsvatten vid Getteröverket.

Det bör noteras att de två provomgångar togs under april respektive juli 2023 och medelvärden kan således endast återge en indikation baserat på dessa provomgångar. Jämfört med tidigare tre provtagningar (v37 2020, v15 2021 och v29 2021) kan dock samma haltområden och reningseffektivitet konstateras nu som då (Baresel et al., 2021).

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 %	
Clarithromycin*	21	14	37	32	29	23	21 %	
Diklofenak	810	750	1 200	1 000	1 005	875	13 %	
Erythromycin*	4	4	3	4,5	3,55	4,3	-	
Fluconazole	190	140	190	210	190	175	8 %	
Furosemide	1 400	1 200	1 300	3 200	1 350	2 200	-63 %	
Ibuprofen	6 200^	110	7 500^	230	6 850	170	98 %	
Ketoconazole	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 %	
Sertraline	82	58	220	110	151	84	44 %	
Sulfamethoxazole*	490	70	910	220	700	145	79 %	
Tramadol	280	400	330	380	305	390	-28 %	
Trimethoprim*	130	99	220	96	175	97,5	44 %	
Venlafaxine	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 %

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

Tabell 4 visar halter för de tillkommande läkemedel enligt förslaget till reviderat avloppsdirektiv som baseras på indikatorsubstanser som används för avancerad rening i Schweiz. Dessa läkemedel inkluderades endast vid några analystillfällen. Som framgår från tabellen så kunde amisulprid inte detekteras i avloppsvattnet vilket förklaras med att substansen inte är registrerat som läkemedel i Sverige. Alla andra av dessa läkemedel kunde kvantifieras och som tabellen indikerar renas dessa substanser inte eller endast måttlig bort i dagens reningsprocess.

Tabell 4. Halter av tillkommande läkemedel enligt förslaget till reviderat avloppsdirektiv.

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	680,0	365,0	46%
Amisulprid	0,4	0,4		1	0,4	0,7	
Azitromycin	66	35		370	66,0	202,5	-207%
Benzotriazol	170	210		340	170,0	275,0	-62%
Candersartan	1 200	750		1 100	1 200,0	925,0	23%
Hydrochlorthiazid	3 400	2 100		2 000	3 400,0	2 050,0	40%
Irbersartan	1 000	600		750	1 000,0	675,0	33%
XX - < LOD (Level of Detection), XX - < LOQ/2 (Level of Quantification) --- Ämnet kan inte utvärderas pga. störning i analysen					Reningsgrad		≥80 %
							40-80 %
							≤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. Generellt kan 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 vid provtagningar 2023. Även nonylfenol uppvisar en bra reduktion i den här kartläggningen till skillnad från en kraftig negativ reduktion vid förra karteringen.

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 reduceras väldigt effektivt (Tabell 5) som även vid 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 som detekterats med enbart en produktion i MS/MS.							≤40 %

De vanligaste förklaringarna för en negativ reduktion, alltså lägre koncentrationer uppmäts för inkommande avloppsvatten än utgående avloppsvatten, är att substanserna utsöndras som konjugat (till exempel glukuronidkonjugat) eller att den väldigt komplexa kemiska miljön i inkommande avloppsvatten gör att signalerna undertrycks vid analysen varvid ett lägre värde än den 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 med 106 – 212 ng E2_{ekv}/l den högsta ER-aktivitet (östrogen) av alla prover i inkommande avloppsvatten. Aktiviteten hade dock reducerats i den befintliga reningsprocessen med >98 % till 0,44 - 3,5 ng E2_{ekv}/l i utgående avloppsvatten. Kvantifierade östrogen aktivitet i dessa analyser visar alltså med högre halter v28 2023 motsatt trend än vad YES analyser visar. Dessutom ligger de rapporterade halter i inkommande vatten avsevärt högre än vad YES-analysen visar. Reningsgraden över ende befintliga processen ligger dock på samma nivå för båda analysmetoder. De kemiska analyser för hormoner och fenoler som ger utslag i östrogen aktivitet föreslår eventuell en högre aktivitet vid första provtagning än vid andra, alltså det som YES-analysen visar. Det är dock många fler föroreningar i avloppsvatten som ger upphov till östrogen aktivitet och en bedömning är således svårt.

Androgen aktivitet (AR) uppmättes i det inkommande avloppsvattnet till Getteröverket vid båda provtagningsstillfällena men inte i det utgående renade vattnet.

AhR-aktivitet uppmättes i inkommande vatten med en avsevärt högre halt v17 2023 jämfört med v28 2023. Även i utgående avloppsvatten kunde en AhR-aktivitet konstateras dock i lägre halter. Reningsgraden över den befintliga reningsprocessen vid Getteröverket låg på >93,7 %.

Oxidativ stress (Nrf2-aktivering) uppmättes i det inkommande avloppsvattnet och ett av två prov på utgående vatten. Effekten togs vid detta tillfälle bort med >95 % över Getteröverket.

3.1.2 Mottagande och uppströms recipienter/lakvatten

3.1.2.1 *Hormoner och läkemedel*

Tabell 6 visar halterna av hormoner och läkemedelsrester i olika recipienter uppströms reningsverket (PP6, Monarkdiket) och nedströms reningsverket (PP8), samt när recipienten mynnar 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 Bösarp deponi (PP1-B) visas (se även Figur 1 för en översikt av provtagningspunkter).

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 provtagningspunkter 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 vilket betyder att utgående avloppsvatten troligtvis påverkar denna provtagningspunkt. Inga höga halter läkemedel kunde observeras i lakvattnet från Bösarp 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 6. 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	15,0	8,0	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	54,0	5,4	250,0	1,4	2,3	260,0	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	27,0	22,0	1,6	1,6	18,0	1	54	27	1	1	27
Diklofenak	5,5	30	650	3	3	690	4	120	860	4	7	760
Erythromycin*	4	4	4	4	4	4	3	3	4,5	3	3	4,5
Fluconazole	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
Ketoconazole	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	220,0	4,5	4,5	200,0	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
Sulfamethoxazole*	2	1,8	76	2	2	80	6	49	180	6	6	140
Tramadol	1,0	22,0	230,0	1,0	1,0	240,0	1,5	65	220	1,5	5	270
Trimethoprim*	1,5	2,5	89,0	2,5	2,5	89,0	1,5	37	83	1	1	75
Venlafaxine	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)
 --- 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 7 visar analysresultaten för fenoler, PFAS och östrogen effekt i samma provpunkter för de två provtillfällena. Det kan noteras att halter för Bisfenol A framstår som höga vid Getteröverket utlopp (PP8) och nerströms Lassabakadeponin (PP7-B). Vid första provtagning konstaterades de högsta bisfenol A halter vid Naturum (PP9) vilket tyder på andra bidragande källor. Vid första provtagning kunde dessutom mycket höga halter oktylfenol observeras uppströms och nedströms för utsläppspunkten.

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).

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

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

Tabell 7. 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 _{ekvPFAS11}	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

Aktivitetstesterna visade att ER-aktivitet i lakvattnet från Bösarp var mycket lägre än det inkommande vattnet till Getteröverket (och t.o.m. lägre än i det renade utgående vattnet). Detta skiljer sig från YES-tester som vid aprilprovtagning visade att Bösarps lakvatten hade högst effekt av alla prover (Tabell 7). Bland recipientproverna så var den östrogena aktiviteten högst uppströms i Monarkdiket (PP6) vid båda provtagningstillfällena. Även här visar resultaten ett något annorlunda bild än YES-testerna (Tabell 7). Dock uppvisade vissa provpunkter som PP6 extrem låga flöden vid provtagningstillfället och resultaten kan därför ha påverkats av stillastående vatten.

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

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

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

3.1.3 Bedömning av recipientpåverkan och reningsbehov

Den kompletterande bedömningar för negativ påverkan av mottagande recipienter och därmed behov för avancerad rening vid Getteröverket presenteras nedan för de olika applicerade metoder.

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 8) överskrider halter för diklofenak tydligt bedömda gränsvärden för inlandsvatten nedströms Getteröverket utsläppspunkt och vid Naturum (Tabell 6). Även för oktylfenol överskrids gränsvärdet för årsmedel i PP6 och PP8 vid först provtagning. Gränsvärdet för PFOS överskrids signifikant i samtliga recipientprover. För hormoner är en bedömning inte möjligt p.g.a. att analyserade halter ligger under detektionsgränsen (LOD) som dock är högre än gränsvärdet.

Tas även hänsyn till gränsvärden för god kemisk status enligt ändringsförslaget av ämnesdirektivet för prioriterade ämnen (Tabell 8) så överskrids halter för östron, diklofenak och ibuprofen i flera recipientpunkter (Tabell 6). För bisfenol A överskrids gränsvärden i samtliga ytvattenprover med råge. Även för nonylfenol och oktylfenol ligger uppmätta halter i vissa punkter högre än de föreslagna gränsvärden. Det nya gränsvärdet för summan av PFOA-ekvivalenter överskrids delvis med faktor 10 och mer till trots att summan i Tabell 7 endast baseras på 11 analyserade PFAS och inte PFAS24 som egentligen ska ingå i $\sum PFOA_{ekv}(PFAS24)$.

Både befintliga och föreslagna gränsvärden och bedömningsgrunder indikerar alltså ett tydligt åtgärdsbehov för att förbättra vattenförekomsten status. För läkemedel och hormoner men även fenoler kan Getteröverket tydligt pekas ut som den huvudsakliga transportväg till recipienten vilket motiverar för åtgärder vid anläggningen. Även för PFAS indikerar analysresultaten att Getteröverket utgör en betydande transportväg till vattenmiljön som motiverar tekniska åtgärder vid anläggningen.

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

Tabell 8. 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
Erythromycin			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	0,0018/0,17	0,037/2,1
OP Oktylfenol	10/-	100/-	0,01/-	0,1/-
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 9 visar effektkoncentrationer (PNEC), relaterade osäkerhetsfaktorer, samt medelhalter i utgående avloppsvatten från Getteröverket (utan utspädning) samt i nedströms recipienter (PP8 och PP9). För alla dessa provtagningspunkter har även riskkvoter för de analyserade läkemedlen beräknats. Läkemedlen fluconazole, ketoconazole, losartan, metotrexat, tramadol, venlafaxine och zolpidem fanns inte med i tidigare utredningar där PNEC och säkerhetsfaktorer har tagits fram. För fluconazole, losartan, tramadol och venlafaxine har därför data från CWPharma projektet använts som dock inte har kvalitetsgranskats i det här projektet. För ketoconazole, metotrexat och zolpidem har inga effekthalter och säkerhetsfaktorer kunnat tas fram. För citalopram används både den bedömda effekthalten enligt Ågerstrand (2019) samt enligt kompletterande studier (Hoyer et al., 2022) tagits hänsyn till. För hormoner har ingen riskkvot beräknats när medelvärdet baseras endast på analyser som inte kunde detektera något.

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

Baserat på de två provtagningar som gjort i projektet bedöms det för sju av de undersökta läkemedlen (atenolol, fluconazole, ibuprofen, naproxen, paracetamol och tramadol) inte föreligga någon risk för negativ påverkan i recipienterna med dagens halter i utgående avloppsvatten från Getteröverket eller observerade halter i ytvatten. För ytterligare nio substanser finns endast en måttlig risk. Halter för citalopram,

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

diklofenak, furosemid, oxazepam och sertralin ger en hög risk för miljöpåverkan i nästan samtliga provtagningspunkter. Även för östron kan en negativ effekt inte uteslutas i recipientpunkterna. Högst riskkvot har citalopram (oavsett PNEC som används) och oxazepam. För citalopram framgår det dessutom att observerade halter i recipienterna ligger nära eller över LOEC (akuttoxicitet) på 150 ng/l. Det betyder med andra ord att Citalopram återfinns i halter som har visat ge en akuttoxicitet på vattenlevande organismer.

Utifrån beräknade riskkvoter i utgående avloppsvatten och recipientprover bedöms att ett tydligt åtgärdsbehov vid Getteröverket föreligger för att minska riskerna för negativ påverkan p.g.a. läkemedelsemissioner.

Tabell 9. Sammanställning av effektkoncentrationer (PNEC), osäkerhetsfaktorer, medelhalter samt riskkvoter i utgående avloppsvatten från Getteröverket (utan utspädning) samt i nedströms recipienter.

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
Clarithromycin*	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
Erythromycin*	20	1000	4,3	0,22	4,3	0,22	4,3	0,22
Fluconazole	15 000#	SSD	175	0,01	123,5	0,01	145	0,01
Furosemide	156	1000	2200	14,10	1425	9,13	1350	8,65
Ibuprofen	102 000	10	170	0	295	0	290	0
Ketoconazole			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
Sertraline	9,4	50	84	8,94	37	3,94	48,5	5,16
Sulfamethoxazole*	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
Venlafaxine	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 (inte kontrollerat),				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 i

närheten av PNEC. Att se på östrogena effekttesten YES kan vara en alternativ för riskbedömningen. Under 2021 har IVL tagit fram förslag till effekthalter för både akut och kronisk toxicitet i recipienter baserat på uppmätt YES-halt. Tabell 10 visar dessa samt medelhalter för inkommande och utgående avloppsvatten vid Getteröverket samt i primärrecipienten (PP8) och Naturum (PP9). Som tidigare diskuterat så minskar den östrogena effekten kraftigt över reningsverket och utgående medelhalt ligger under den bedömda effektgränsen för kronisk toxicitet. Medelhalter i recipientproverna ligger dock över effektgränsen för kronisk toxicitet.

Tabell 10. Effekthalter och medelhalter i utgående avloppsvatten från Getteröverket (utan utspädning) samt i nedströms recipienter.

	Effekthalter/toxicitet		Medelhalter			
	akut	kroniskt	PP2	PP5	PP8	PP9
YES (ng E2 _{ekv} /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 för avloppsreningsverk större än 100 000 pe (alt. 200 000 pe), samt mindre anläggningar om påverkan av recipienten kräver det. Med nuvarande Getteröverket dimensionerat för ca 80 000 pe är det troligt att anläggningen vid framtida utbyggnader kommer passera 100 000 pe och därmed eventuellt behöva implementera en avancerad rening om avloppsdirektivet implementeras enligt förslaget. Även utifrån recipientpåverkan framstår det som troligt att en avancerad rening kommer behövas vid Getteröverket även om anläggningen inte uppfyller storlekskriteriet.

Den kompletta listan för indikatorsubstanser som föreslås i avloppsdirektivet inkluderar amisulprid, karbamazepin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, hydrochlorothiazide, metoprolol och venlafaxin som kategori 1 substanser och benzotriazol, kandesartan, irbesartan och 4&6-methylbenzotriazole som kategori 2 substanser. Av dessa är det endast 4&6-methylbenzotriazole 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.om. negativ reduktion. Oavsett vilka indikatorsubstanser (minst 4 från kategori 1 och minst två från kategori 2) som tas i beaktande, kommer det krävas en kompletterande avancerade rening vid Getteröverket för att uppfylla kravet på en medelreduktion för dessa substanser över anläggningen inklusive den avancerade reningen, enligt föreliggande direktivförslag.

3.1.3.4 Utifrån aktivitetstesterna

Utifrån utförda aktivitetstesterna på östrogenreceptorn (ER-aktivitet) kan aktiviteten i recipient jämföras mot et föreslagen riktvärdet för ER-aktivitet i ytvatten på 0,4 ng E2_{ekv}/l (Kase et al., 2018) som överskreds i samtliga prov utom PP7-A vid provtagningen i april 2023.

3.1.4 Bedömning av bidragande källor

Från uppmätta läkemedelshalter i recipientprover och lakvattnet från Bösarp deponi (Tabell 6) kan det konstateras att ett bidrag till läkemedelsbelastning på vattenmiljön inte finns. Att halter uppströms utsläppspunkten (PP6) är höga beror som diskuterat på det väldig låga flöde i Monarkdiket som gör att utgående avloppsvatten mest sannolik påverkar denna provpunkt. Även om dessa höga halter skulle härstamma från uppströms källor så skulle bidraget i form av massflödet bli väldig lite ända p.g.a. det låga flöde i diket. Det är således Getteröverket som bedöms som den enskilt största transportväg för läkemedelsrester till vattnet som passerar naturum ut till Inre Farehamnsviken.

Samma gäller generellt även för hormoner även om det kunde kvantifieras Etinylöstradiol i Bösarps lakvatten (som enda provpunkt i hela förstudien) och östron i provpunkten från Lassabackadiket (PP7-A) vid ett tillfälle. Detta eftersom vattenflödet i PP7-B vid provtagningstillfället var väldig lite och att det totala massbidraget således inte skulle bli signifikant.

För fenoler verkar lakvattnet från Bösarp inte heller bidra mycket till belastningen på Getteröverket och därmed vidare på recipienten (Tabell 7). Det kan dock observeras att provpunkter som bedöms representerar dräneringsvatten från industriområdet öster om järnvägen (PP7-A) och Lassabackadeponin (PP7-B) uppvisar förhöjda halter bisfenol A. På grund av ett väldigt lågt flöde vid dessa provpunkter kan det inte uteslutas att utgående vatten från Getteröverket som innehar höga bisfenol A halter kan påverkat dessa provpunkter. Det observerades dock vid första provtagningen en mycket högre halt bisfenol A vid Naturum än i mätpunkter vid utsläppspunkten. Detta kan antyda att det finns en annan okänd bidragande källa för bisfenol A mellan utsläppspunkten och Naturum.

När det gäller PFAS så visar Tabell 7 de absolut högsta halter i lakvattnet från Bösarp deponi (PP1-B) efterföljd 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 11 visar ett försök till kvantifiering av Bösarps lakvatten på PFAS belastningen till Getteröverket. Det bör noteras att underlaget är begränsat till få mätpunkter då en bra uppföljning av PFAS utsläpp från deponin inte finns idag. Det framstår ändå som tydligt att även om PFAS halter i lakvatten är mycket höga så ligger det totala bidraget till PFAS-belastningen till Getteröverket på mindre än 5 %. Detta illustrerar att en stor del av PFAS belastningen kommer från andra källor och att en rening även av PFAS vid Getteröverket kan vara motiverat. De

mycket höga halterna i lakvatten från Bösarps deponi bör dessutom göra en implementering av en separat PFAS-rening vid deponin attraktivt också.

Tabell 11. Bösarps bidrag till PFAS belastningen på Getteröverket.

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

3.2 Pilotförsök med kombinationen UF-GAK

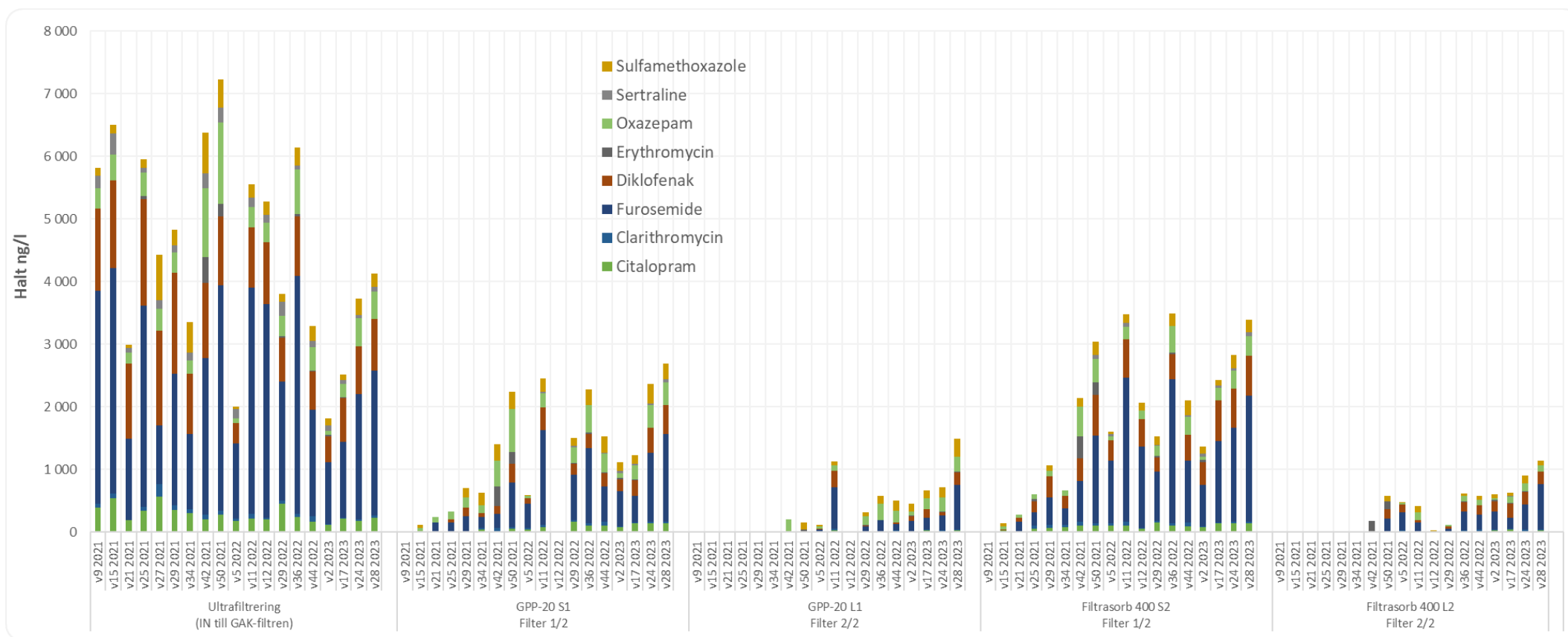
Nedan visas resultaten från pilotförsöken med teknikkombinationen ultrafiltrering och 2-steps aktivkolfilter mer olika adsorbenter.

3.2.1 Rening av läkemedelsrester

Figur 5 visar halter för de mest prioriterade läkemedel efter UF och de olika GAK-filtren. Variationer förekommer både i vattnet in till GAK och efter GAK-filtren. Variationerna följer delvis genom piloten som de olika provtagningar bra illustrerar. Efter andra GAK-filter i varje serie är dock variationerna naturligt nog avsevärt mindre utpräglade. 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.

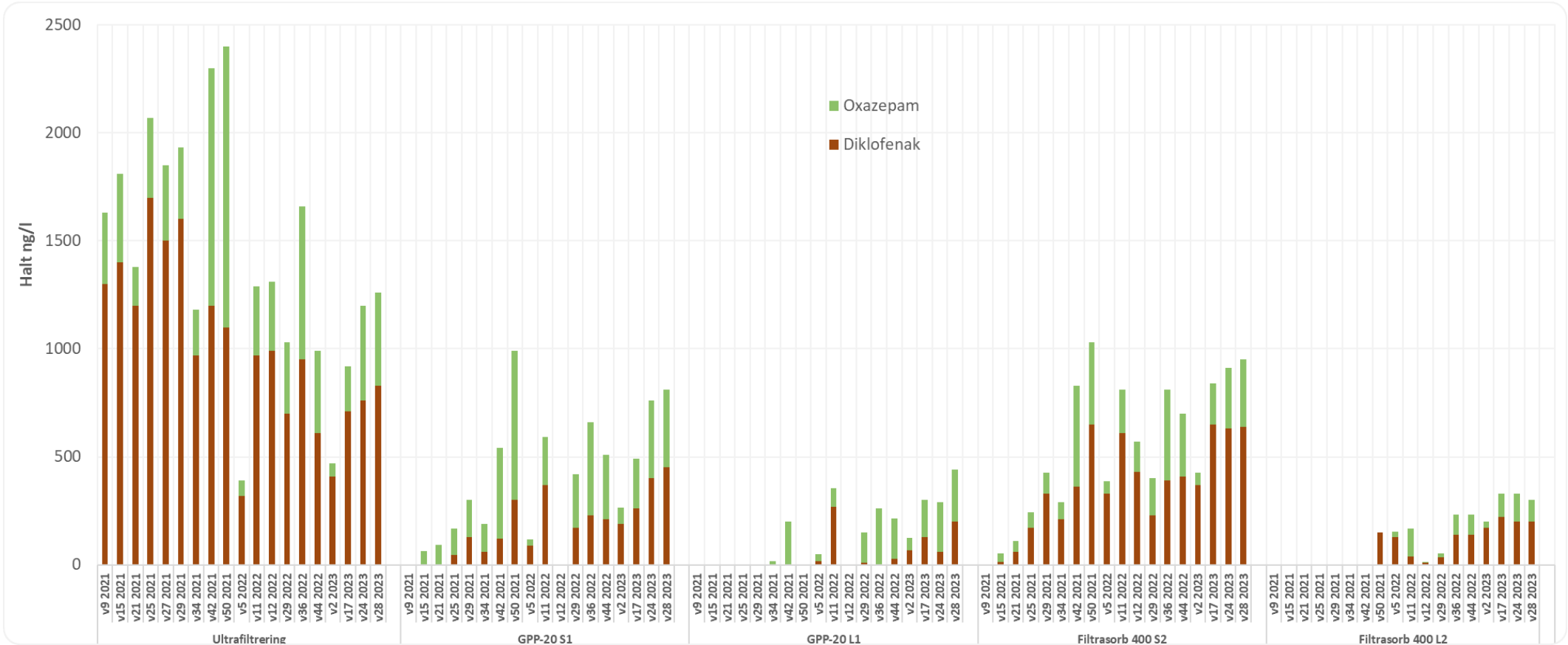
Figur 6 visar motsvarande figurer för endast diklofenak och oxazepam som har identifierats som de två styrande substanser för den avancerade reningen eftersom dessa substanser är svårast att avlägsna i den avancerade reningen. Det framgår från figuren att utgående halter efter andra GAK-filtret verkar ha stabiliserat i båda pilotlinjer till trots för högre halter in och efter först GAK-filtret de senaste fyra provtagningar.

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



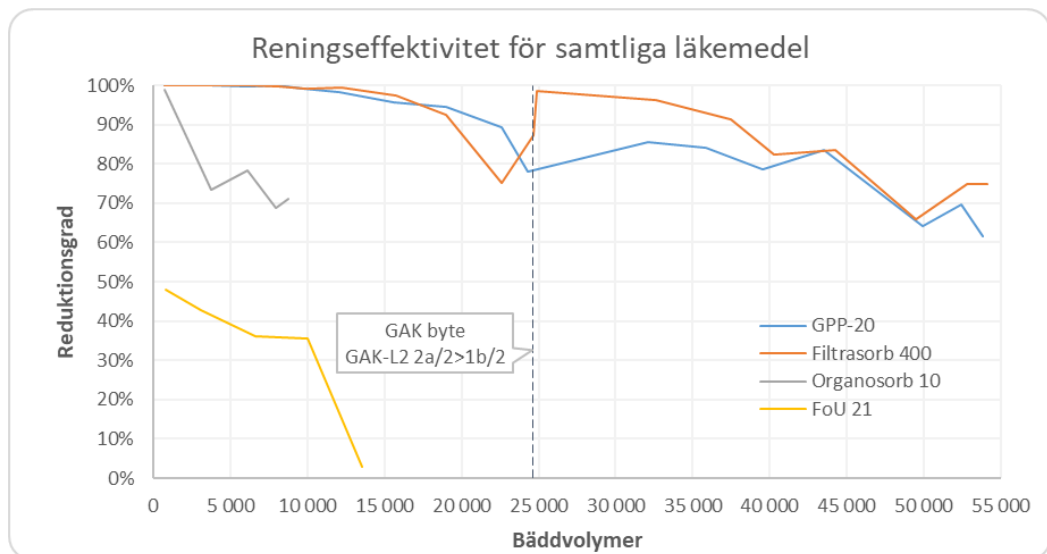
Figur 5. Halter av läkemedel i efter UF och över GAK-filtren vid olika provtagningar.

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



Figur 6. Halter av oxazepam och diklofenak i efter UF och över GAK-filtren vid olika provtagningar.

För samtliga undersökta läkemedel ligger både GPP20 och FS400 på samma reningsgrad på ca 65 % vid >50 000 behandlade bäddvolymmer. Även om totalt 24 läkemedel analyserades avser denna reduktion framför allt 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). Reningseffekten minskar dock snabbare än för GPP20-pilotlinjen för att sedan hamnar på samma nivå redan efter ca 15 000 behandlade BV efter filterbytet. Även om den aktuella reningseffektiviteten vid senaste provtagning ligger under ett tänkbart reningsmål på 80 % reduktion, så ligger den genomsnittliga reduktionsgraden över på GAK-linjer, alltså reduktionen över hela driftperioden, fortfarande avsevärt högre än 80 % för båda linjer. Medelreduktion kan anses som relevant om flera GAK-filter drivs parallellt i en fullskaleanläggning och en sämre momentanreduktion i ett filterpar kompenseras genom en bättre momentanreduktion i ett annat filterpar. Detta förutsätter olika tidpunkter för driftstart av de parallella filterpar.



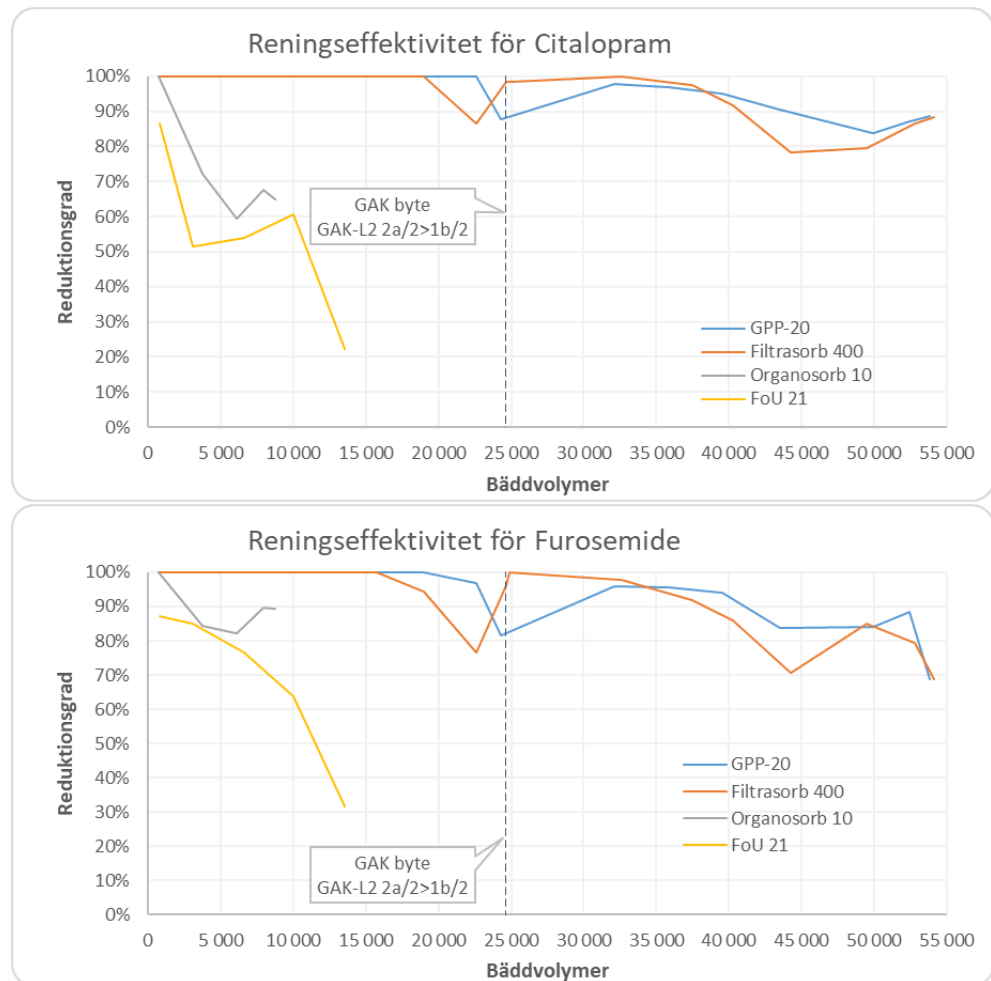
Figur 7. Reningseffektivitet för samtliga analyserade läkemedel för de olika GAK-typer.

För de två andra testade GAK-typer, Organosorb 10 och FoU 21 visar figuren att reningseffekt avtar redan efter få behandlade bäddvolymmer och för det slambaserade kolet uppnås aldrig en reningseffekt över 50 %.

För de två fokussubstanser citalopram och furosemid är reningseffekten med ca 80 % vid senaste provtagning något bättre än för summan av läkemedelsrester (Figur 8). Både FS400 och GPP20 indikeras liknande reningseffekter, trots byte av

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

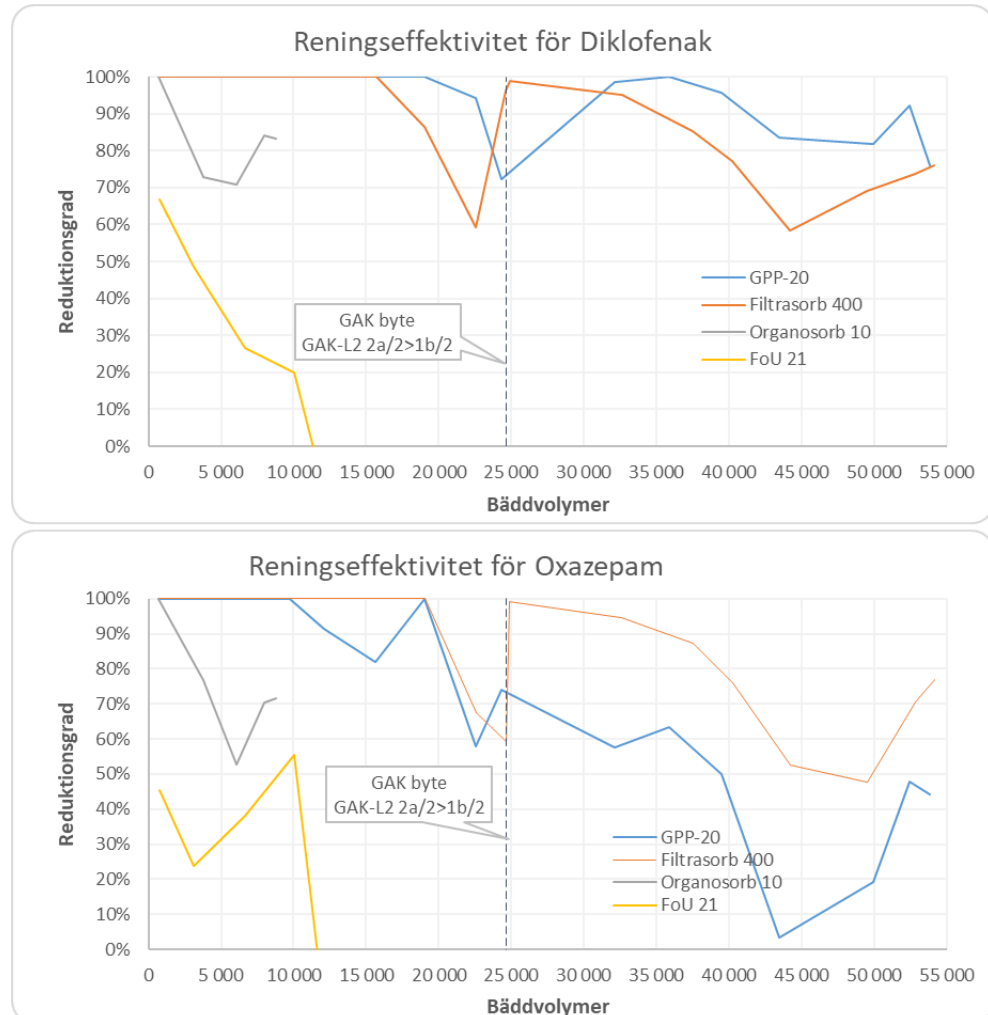
filtermaterial i första FS400-filtret. För Organosorb 10 och FoU 21 minskar den initial höga reningseffekten snabbt. Organosorb 10 visade dock en reningseffekt på >80 % för citalopram tills filtret togs ur drift vid ca 8000 behandlade BV.



Figur 8. Renings effektivitet för Citalopram och Furosemide.

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

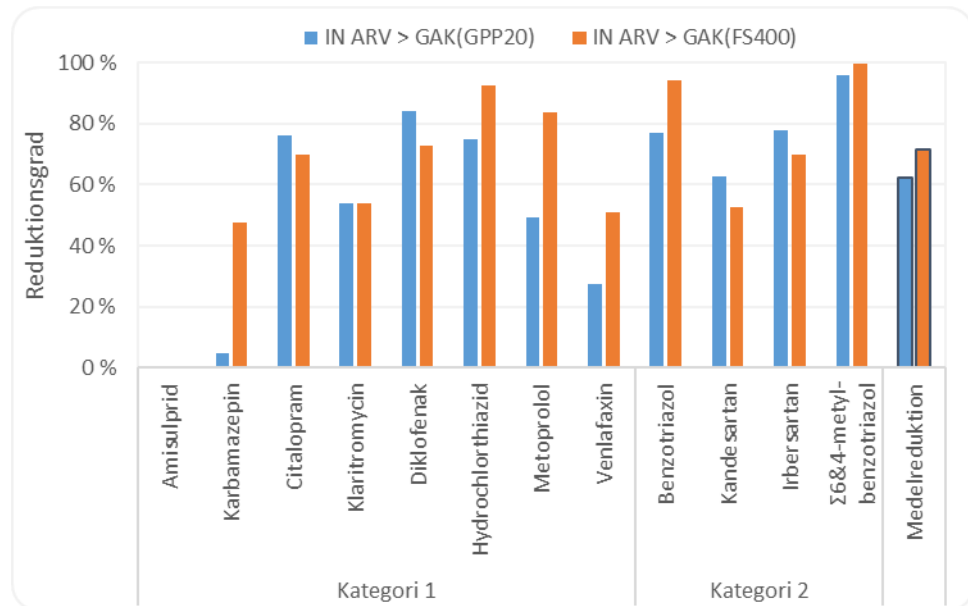
Även för diklofenak indikerar Figur 9 en reningsnivå som fortfarande ligger på >70 % för GPP20 och FS400. Trots filterbyte i F400-linjen har reningseffektiviteten för det mesta legat under reningseffektiviteten i GPP20-filtret. För oxazepam är reningseffekten tvärtom. För GPP20 finns nästan endast en måttlig reningseffekt kvar vid senaste provtagning 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 bedömning av behov för filterbyte.

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


Figur 9. Renings effektivitet för Diclofenak och Oxazepam.

För Organosorb 10 minskar den initial höga renings effekten snabbt för diklofenak och ännu mer för oxazepam. FoU 21 hade endast en måttlig renings effekt för diklofenak som dessutom vid 10 000 BV hade fallit 0 %. För oxazepam är renings effekten i FoU 21 filtret mer oklart men renings graden överstiger aldrig 55 % (Figur 9).

Figur 10 visar renings effektiviteten från inkommande till Getteröverket till utgående från de två GAK-filtre linjer för samtliga substanser i kategori 1 (K1; amisulprid, karbamazepin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, hydrochlorothiazide, metoprolol och venlafaxin) och kategori 2 (K2; benzotriazol, kandesartan, irbesartan och 4&6-methylbenzotriazole), enligt förslag för den reviderade avloppsdirektivet. Enligt förslaget krävs en medelreduktion på ≥ 80 % baserat på reduktion av minst 4 substanser från K1 och 2 från K2. Det bör noteras att många av dessa substanser endast analyserades vid de senaste provtagningar och renings effekten återspeglar således statusen efter att mer än 50 000 BV (som är ca 250 % av traditionell GAK-filtre design) har behandlats i båda GAK-linjer.

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


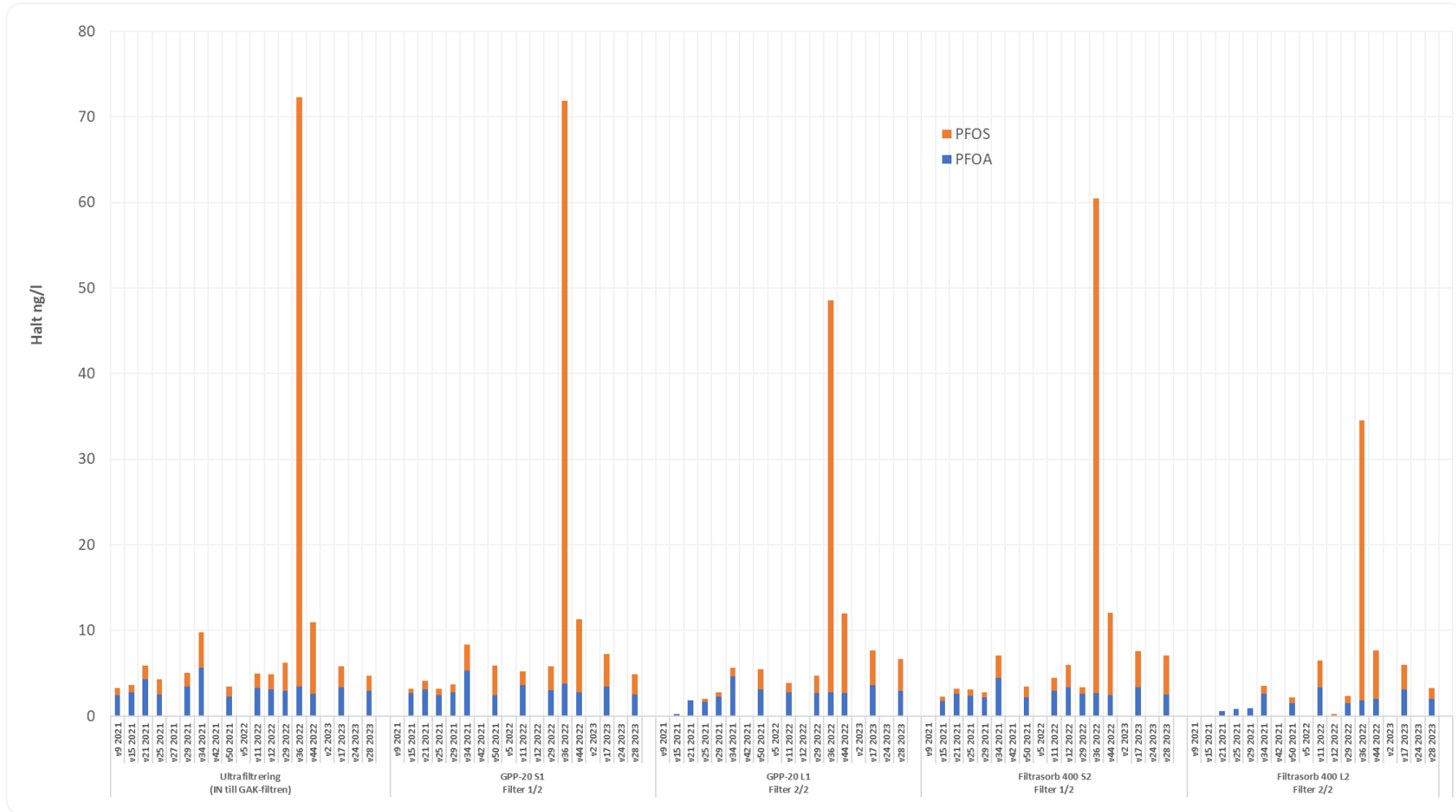
Figur 10. Reningseffektivitet för analyserade Kategori 1 och 3 substanser enligt förslag för reviderat avloppsdirektiv.

Som figuren visar så varierar reduktionen för olika substanser och för 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 GPP20 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 en delvis kraftig negativ reduktion av flera av dessa läkemedel i huvudreningen och att reduktion före den aktuella provtagningen kan antas vara avsevärt högre. Reningsskrav enligt direktivförslaget bedöms således kunna uppfyllas med den testade pilotuppsättningen och ett kolbyte skulle ännu inte behövas utifrån antagandet med drift av flera parallella GAK-filterpar i fullskala.

3.2.2 Rening av PFAS

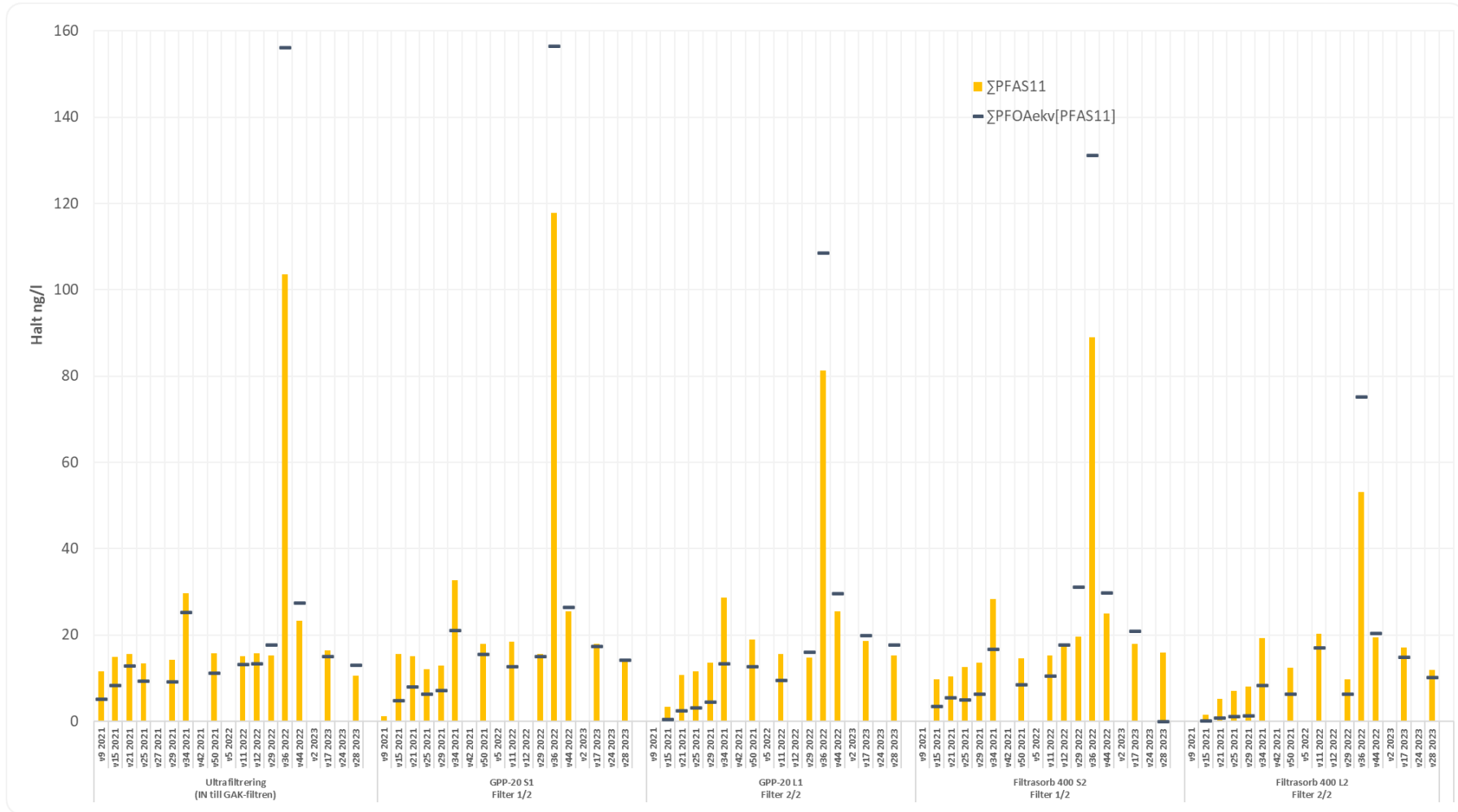
Figur 11 visar halter för PFOS och PFOA och indikerar att under v36 2022 har PFOS-halten avvikit extremt från vanliga halter över hela piloten. Att detta observerades i samtliga prover indikerar en faktiskt kraftig avvikande PFOS-halt i inkommande avloppsvatten till piloten. Eftersom prover från lakvatten 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.

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 analyserade PFAS före och efter de olika kolfilter vid olika provtagningar.

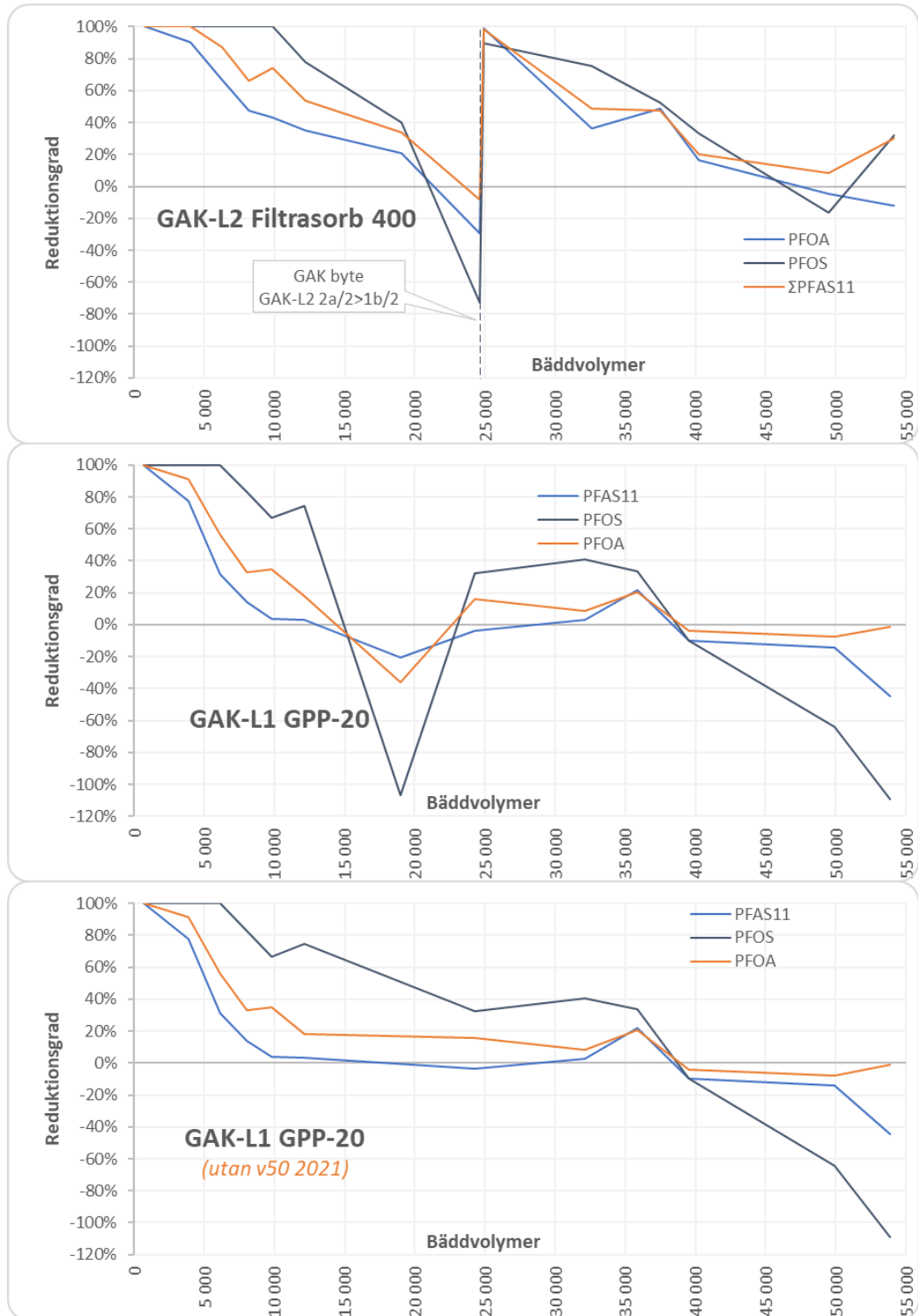
Figur 12 visar summan av samtliga analyserade PFAS (\sum PFAS11) och summan PFOA-ekvivalenter baserat på de 10 PFAS som ingår i PFAS11 (\sum PFOA_{ekv(PFAS11)}) och som utgör största delen av de föreslagna PFAS24 i nya EQS-direktivet (EU Commission 2022b) som föreslår ett gränsvärde (MKN) på \sum PFOA_{ekv(PFAS24)} på 4,4 ng/l för inlandsvatten som mottagande vattenförekomster för Getteröverket inkl. Inre Farehammarsviken klassas som. Det kan observeras att summan PFOA-ekvivalenterna kan vara högre än summan PFAS11 och att prover från v36 sticker ut även här.

För både PFOS, PFOA, \sum PFAS11 och \sum PFOA_{ekv(PFAS11)} halttrender efter GAK-filtren observeras som 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 olika PFAS parameter observeras. Därefter varierar halter i högre grad i samma utsträckning som inkommande halter. Detta kan indikera att den initiala sorptionskapaciteten av filtren för olika PFAS har efter de först 6 månader varit till stor del förbrukat.

Utvärderas de två GAK-pilotlinjer angående reningseffektiviteten för PFAS så kan det observeras en bättre reningseffekt för FS400 än för GPP20 upp till 20 000 behandlade bäddvolymeter (Figur 13). Denna bedömning kvarstår även om provtagningen v50 2021 tas bort för GPP20 då den avviker avsevärt från trenden i övrigt. Efter passerade 20 000 BV för FS400 och 15 000 BV för GPP20 kan även en negativ reduktion för olika PFAS över GAK-pilotlinjen konstateras. Rent praktiskt innebär det att tidigare adsorberade PFAS släpps igen från GAK-filtret. För GPP20 sker detta dock inte för vid ca 40 000 behandlade BV för hela pilotlinjen (alltså ca 80 000 BV per filter), ifall provtagningen v50 2021 inte tas med i beaktandet. För GPP20 sker dock vid passerade 40 000 BV en kraftig negativ reduktion för PFOS vilket behöver beaktas vid implementering eftersom nyttan med tidigare PFOS reduktion i filtret kan förstöras om denna negativa reduktion kvarstår över tid.

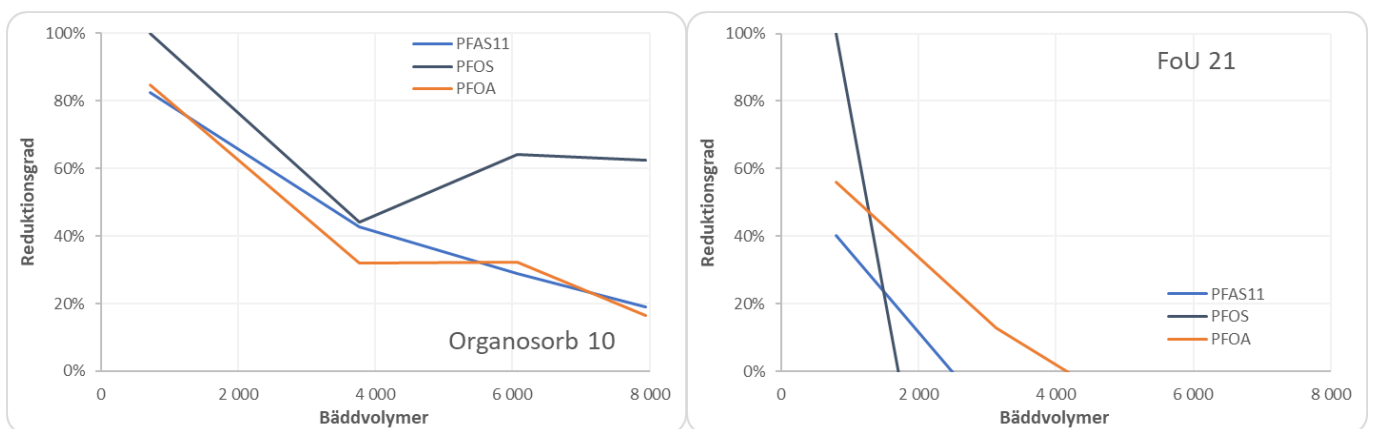
Som förväntat återställs reningseffekten för hela FS400 pilotlinjen vid byte av filtermaterialet i första filtret. Reningseffekten avtar dock på samma sätt som vid uppstart av GAK-piloten, direkt efter filterbytet. Detta kan förklaras med att andra filtret i serien som efter filterbyte bli första filtret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

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



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

Figur 14 visar motsvarande reningsgrad för PFAS11, PFOS och PFOA för Organosorb 10 och FoU 21 pilotlinjerna. Det kan observeras att Organosorb 10 renar bort olika PFAS under hela driftperioden fram till avslut av testerna. Det slambaserade GAK åstadkommer däremot endast en liten reduktion av PFAS som sjunker väldigt snabbt och som dessutom sedan låg på en kraftig negativ reduktion till avslut av testperioden.



Figur 14. Reningsgrad för PFAS11, PFOS och PFOA för Organosorb 10 och FoU 21 pilotlinjerna.

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 effekter (YES) som tydligt kunde kvantifieras i inkommande avloppsvatten till Getteröverket renas 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 reningseffekt på dessa parametrar. 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 inga halter kunde kvantifieras i de efterföljande GAK-filtren.

TOC-reduktionen som kunde observeras i första och även andra GAK-filter minskar succesivt för båda GAK-typer med ökande antal BV. Medan TOC-reduktionen i början på försöksperioden (BV <10 000) var tydligt för samtliga prover (över 1,0 mg/l) så har reduktionen varit svårt att se vid större antal BV. Efter filtermaterialbyte i GAK2 (filter1/2) kunde igen, som förväntat, en bättre reduktion observeras. 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 UVabs med ökade BV. Till skillnad från TOC var det nedåtgående reduktionstrenden för UVabs mindre kraftigt utpräglat. Efter ca 20 000 BV låg reduktionen på låga nivåer (under 2,0 mg/l) för att sedan fortsätta neråt till noll. Därmed bedömdes UVabs inte heller kunna användas som uppföljningsparametrar för mättnadsgraden av GAK-filtren för mikroforeningar.

Uppföljning av färgreduktionen 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.om. 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 – 50 %. Enligt ER-aktivitetstesterna har det sedan skedd en mycket varierande reduktion på -300 – 91 % över de första GAK-filtren i serie. I andra filtersteget rapporteras 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 E₂ekv/l, alltså lägre än det 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.

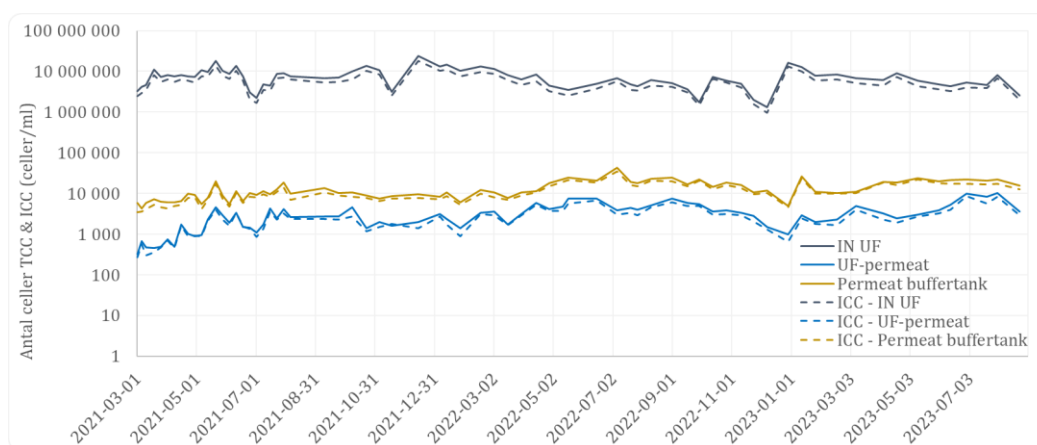
Halter och reningseffektiviteten för AhR-aktivitet och oxidativ stress (Nrf2-aktivitet) är också svårtolkat då halter och reningseffekt varierar mellan en kraftig negativ och positiv reduktion både för samma provpunkt och provtagningstillfällen. Då det inte finns någon bedömningsgrund att förhålla sig bli även fråga om en bra eller dålig reduktion svårt att diskutera. Holm och Önnby

(2022) rapporterade tidigare en bra reduktion av dessa över GAK-filtrering. Detta dock baserat på endast en provtagning vilket gör långtgående slutsatser svåra att dra.

Samtliga resultat för alla aktivitetstester visas i bilagan.

3.2.6 Flödescytometri (FCM)

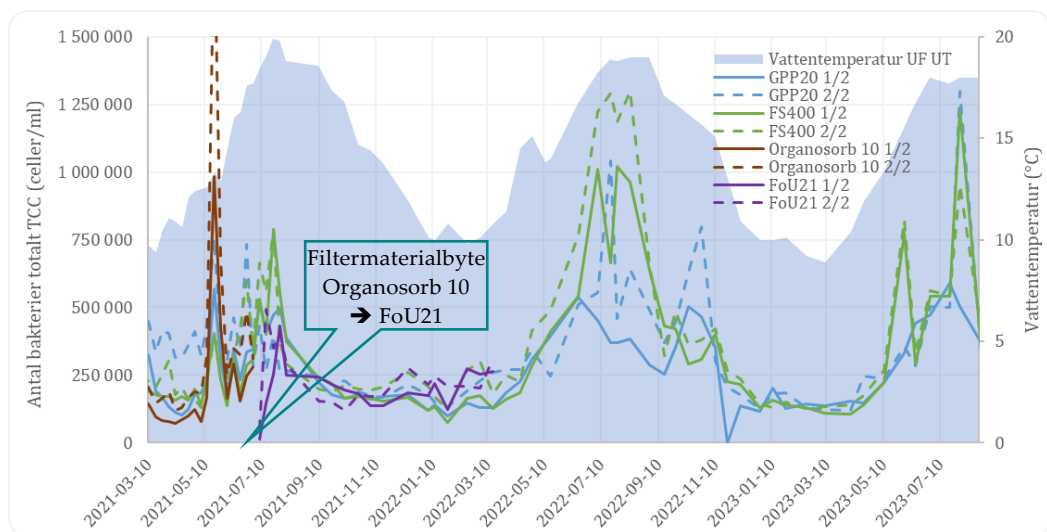
Flödescytometrin visar att UF-anläggningen uppnådde en kraftig reduktion av totalantalet celler (TCC) från runt $7\,800\,000 \pm 3\,310\,000$ celler/ml i matarvattnet till runt $1\,900 \pm 1\,300$ celler/ml i permeatet (Figur 15). Detta motsvarar en log 4 reduktion över UF-steget. Mätningen av matarvattnet krävde en fem gånger utspädning av proverna med destillerat vatten innan analysen p.g.a. de stora bakteriehalter som ligger över mätgränsen för instrumentet (5×10^6 celler/ml). Detta och möjliga bildningar av bakterieflockar tros förklara de stora mätvariationerna. Det kan även noteras ett bakteriell tillväxt (biofilm på väggar och slangar) mellan provtagningspunkten för permeatet och bufferttanken, som med ett TCC av $9\,204 \pm 3\,700$ celler/ml visade mycket högre bakteriehalter. Trenderna i bufferttanken följer trenderna i permeatet med en ökning under sommaren som kan kopplas till ökningen av vattentemperaturen. 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 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. TCC i kolumnerna var väldigt låga direkt efter bytet för

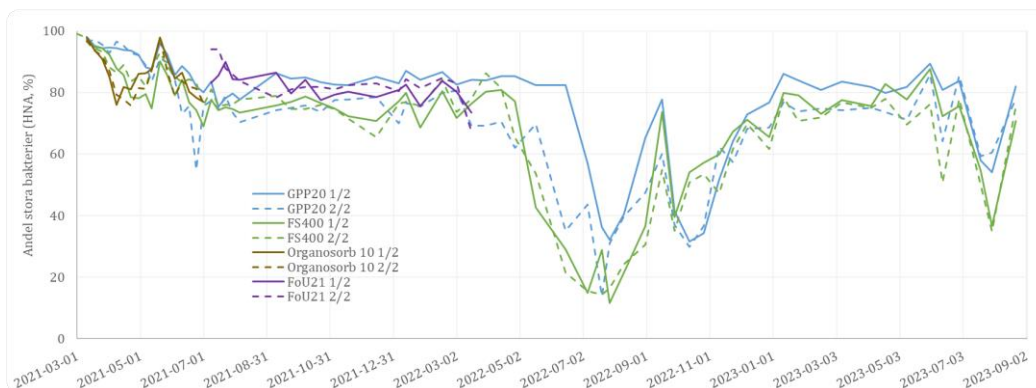
att de sedan ökade kraftigt och stabiliserades sedan på liknande nivåer som de andra två GAK-filter. Ökningar TCC som observerades i samtliga linjer kunde tydligt sammankopplas med vattentemperaturen som konstaterades har en mycket större påverkan på bakterieantalet än antal bäddvolymen.



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 % ± 1%, främst stora bakterier med mycket DNA-halt i vattnet (high nucleic acid bacteria = HNA). Över tiden började andelen HNA bakterier sjunka i alla GAK-filter (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 % ± 1%, Linje 2 (FS400) med 87 % ± 1% och Linje 3 (Organosorb 10) med 78 % ± 1% efter tryggt två månader drift. Värdena började stabiliseras under sommaren på en nivå mellan 70 – 84 % HNA bakterier. Ökningen av HNA bakterier i maj 2021 står i samband med den förändrade matarvattenkvaliteten den 20:e maj 2021. Uppgången av andelen HNA bakterier i linje 3 i juli berodde på utbytet av kolet i filterlinjen. Under sommaren 2022 syntes en plötslig nedgång av andelen 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 om än något svagare visades under sommaren 2023. Orsaken är oklart där %HNA från permeatet var stabilt under hela försöksperioden.

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



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

Eftersom GAK-filtren inte är utrustade med provpunkter för provtagning av filtermaterial i olika nivåer som möjliggör undersökningar under långtidstesterna, genomfördes biofilmkaraktiseringen endast vid avslut av försöksperioden. Den mikrobiella sammansättningen i biofilmen från filtermaterialet samt i vattenfasen in och ut från de olika pilotsteg 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.

	UT	UF	L1	L2	S1-AK	L1-AK	S2-AK	L2-AK
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
Reyranella	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
Rhodoferrax	0.7	1.8	0.4	1.4	0.2	0.1	0.5	0.3
Afpia	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

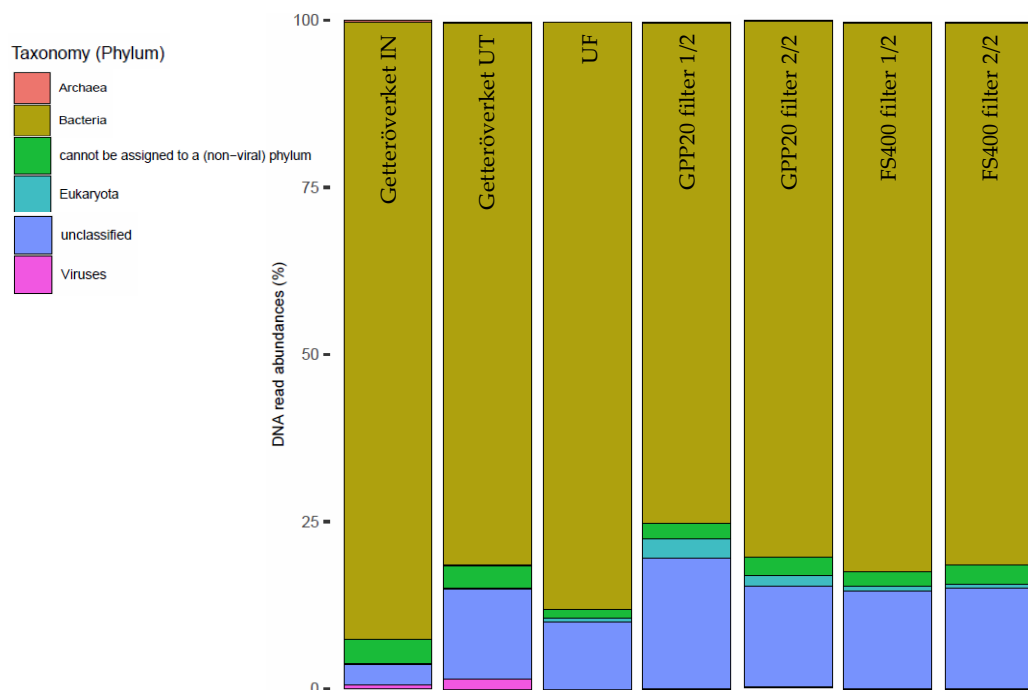
Figur 18. Mikrobiella karakterisering (det 15 mest förekommande klasser) i olika provpunkter samt från extraherade prover från filtermaterialet (Provpunkter: UT – Getteröverket UT, UF – Ultrafiltrering, L1 – GPP20 filter 2/2, L2 – FS400 filter 2/2, S1-AK – biofilm GPP20 filter 1/2, L1-AK – biofilm GPP20 filter 2/2, S2-AK – biofilm FS400 filter 1/2, L2-AK – biofilm FS400 filter 2/2).

Resultaten visar att det bildades biofilm i samtliga GAK-filter (OBS, även GAK-filter för O₃-GAK piloten visas i figuren). 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-filter 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 i de övriga GAK syns 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.

3.2.8 Utvärdering för antibiotikaresistens

Figur 19 visar den övergripande taxonomifördelning för de olika prover över Getteröverket och UF-GAK piloten. Bakterier dominerar i samtliga prover medan virus som finns i inkommande och utgående avloppsvatten i Getteröverket tas bort i ultrafiltreringen och kunde inte heller detekteras i vattnet efter de efterföljande GAK-filtren.



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

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

Figur 20 visar halterna av antibiotikaresistenta gener (AGR) i jämförelse med resterande gener som kvantifierats i de olika provtagningspunkter 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. En viss förekomst indikeras framför allt för GAK-filterlinjen med FS400 men endast i mycket små omfattning och endast för enstaka AGR. Dessa resultat tyder på att teknik Kombinationen UF-GAK aktivt kan hindra en spridning av antibiotikaresistenta gener till vattenmiljön.



Figur 20. Halter av antibiotikaresistenta gener (AGR, baserat på Comprehensive Antibiotic Resistance Database) i förhållande till resterande identifierade gener (Provpunkter: IN – Getteröverket IN, UT – Getteröverket UT, UF – Ultrafiltrering, S1 – GPP20 filter 1/2, L1 – GPP20 filter 2/2, S2 – FS400 filter 1/2, L2 – FS400 filter 2/2).

3.2.9 Prioriterade kemiska parametrar

Den utvidgade analys 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-filterlinjer låg för 42 av det 49 analyserade substanser lägre än bedömningsgrunden/gränsvärdet. För 6 substanser låg halten under rapporteringsgränsen som dock var högre än gränsvärdet. Endast för PFOS överskreds gränsvärdet med faktor 2 - 3.

3.3 Pilotförsök med teknikkombinationen O₃-GAK

3.3.1 Initiala dos-respons tester

De initiala tester inkluderade flera aktiviteter som redovisas nedan.

3.3.1.1 Renvattentester

Med erfarenheter från tidigare försök med en ozonpilot (Habagil et al., 2020; dock från en annan teknikleverantör) 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 processluften utvärderas för de ozondoser som planerades användas i dos-responsförsöken. Dessa tester visade en bra överensstämming av förväntade och uppmätta ozonhalter.

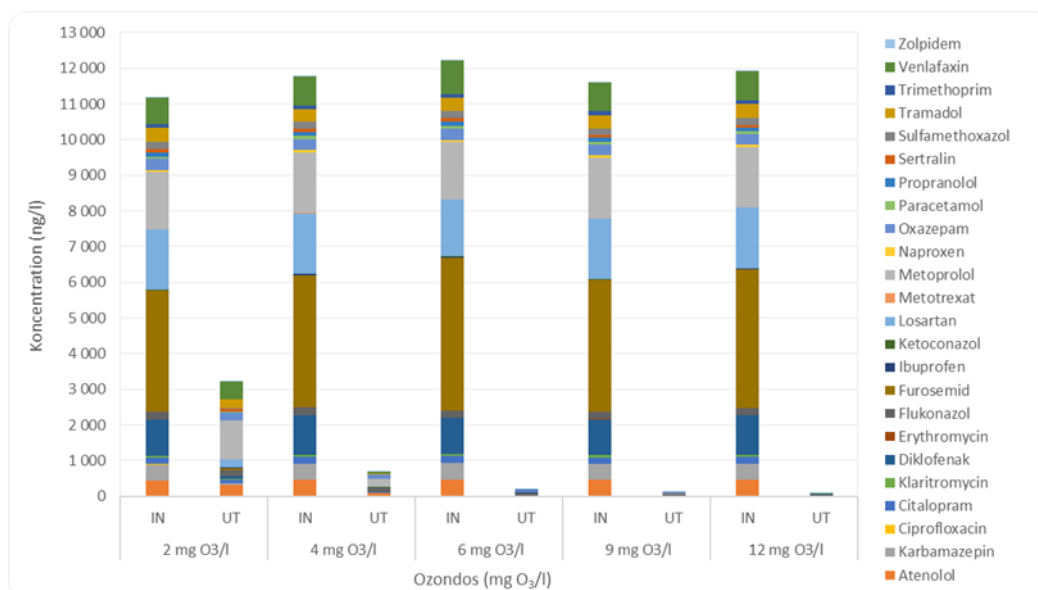
3.3.1.2 Reduktion av läkemedelsrester

Under v43-44 2022 genomfördes dos-responstester med endast ozonpiloten för att undersöka reningseffektiviteten av ozoneringssteget med avseende för läkemedelsrester för Getteröverkets vattenmatris. Försöken användes också för att bekräfta vald ozondos för långtidstesterna. Ozondoser som ansågs som relevant 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 i minst 3 kontakttider innan en ny provtagning påbörjades. Provtagningen skedde nedströms över piloten med hänsyn till kontakttider för mest representativa prover.

För dos-responstester analyserades endast läkemedelsrester enligt Tabell 1 och Figur 21 visar analysresultat för samtliga läkemedlen (inklusive LOD och LOQ/2-halter) för de 5 testade ozondoser. Från figuren kan det observeras att sammansättningen av avloppsvatten som användes för dos-responstesterna (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 koncentrationer i testvattnet. Detta då

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

de annars i avloppsvatten vanligt dominerande läkemedel som ibuprofen, naproxen och paracetamol redan har renast bort i huvudreningen och når därmed inte det avancerade reningssteget. En kraftig minskning av läkemedelshalter kan observeras från figuren redan vid dos 4 mg O₃/l. Liknande reduktioner kunde även observeras vid samma dos under långtidsförsöken (se 3.3.2).

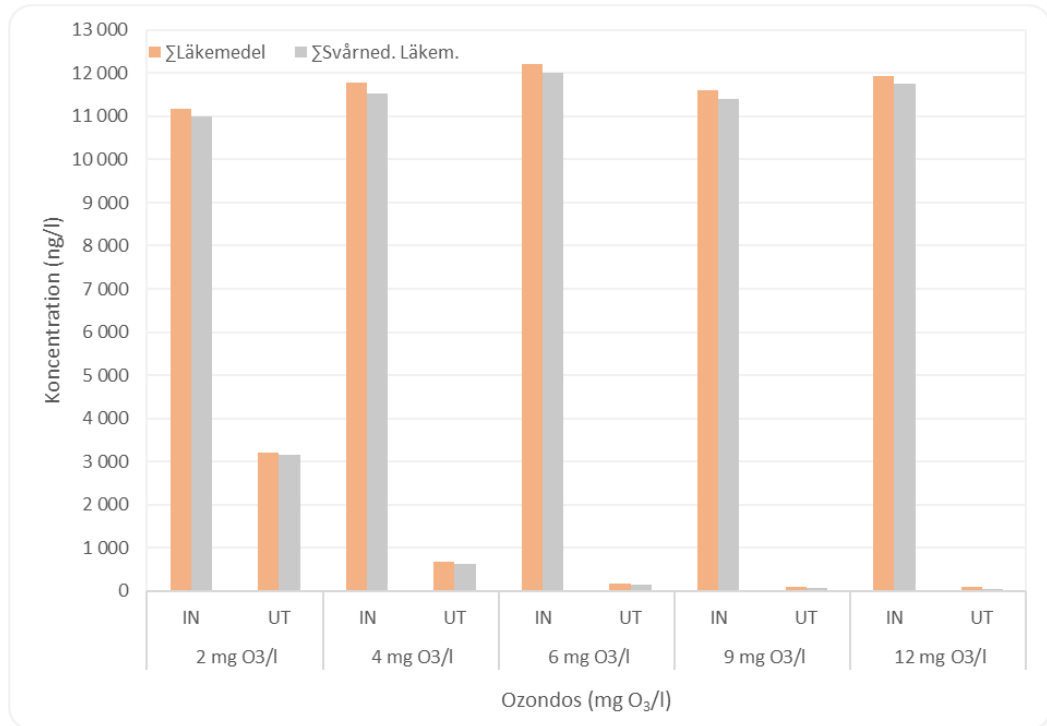


Figur 21. Halter av läkemedel In och UT vid de olika testade ozondoser.

Figur 22 visar endast summan av samtliga 24 läkemedel och summan av endast de 16 svårnedbrytbara läkemedel². Det framgår att båda summor ligger på samma nivå eftersom de lätt-nedbrytbara läkemedlen redan tagits bort 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.

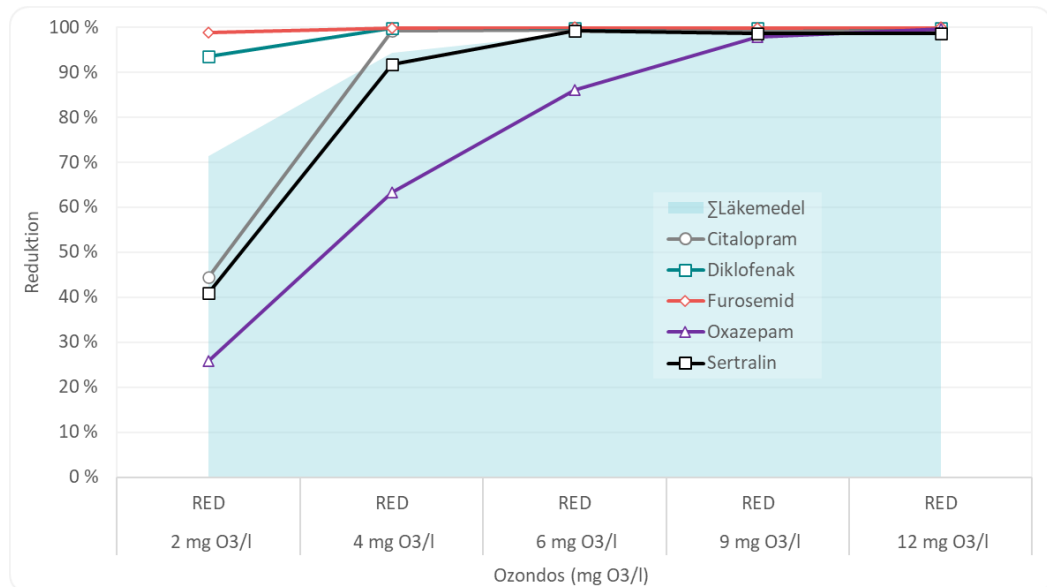
² Svårned. Läkem. inkluderar atenolol, karbamazepin, ciprofloxacin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, flukonazol, furosemid, losartan, metoprolol, oxazepam, propranolol, sulfamethoxazol, tramadol, trimethoprim och venlafaxin

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 för de i förstudien utpekade läkemedlen med högst risk till negativ recipientpåverkan citalopram, diklofenak, furosemid, oxazepam och sertralin (Baresel et al., 2021) vid olika ozondoser. Medan furosemid renas bort redan vid lägsta ozondosen krävs som förväntat en högre ozondos på 6 mg/l för att reducera oxazepam med minst 80 %. Vid en ozondos på 9 mg/l 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 implementeras om bromidhalten i vattnet är högre än 0,4 mg/l på grund av risker med bromatbildning. Detta eftersom det vid ozonering av bromidhaltigt vatten kan bromid oxideras till bromat. Bromat är toxiskt och har ett gränsvärde för otjänligt vatten på 10 µg/l (SLVFS 2001:30). Detta gränsvärde gäller dock för dricksvatten och inte för reat avloppsvatten. Ett gränsvärde för utsläpp av reat 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 inkommande testvattnet, alltså lägre än den maximala rekommenderade halten, men inte avsevärt lägre. Analyserade bromathalter i 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 en bromidoxidation kunde således inte observeras. Vid 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 ozondos 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 är redan fördelaktigt utifrån en minskad risk för bromatbildning.

3.3.1.4 Eventuella styrningsparameter

Under dos-responstesterna kördes även onsite analyser för att undersöka om en samband av reduktionen av DOC, TOC, nitrit, färg eller UVA över ozonpiloten med olika ozondoser kunde observeras. Detta för att identifiera eventuella styrningsmöjligheter för en framtida implementering. Medan ingen samband i reduktion av DOC, TOC och nitrit för olika ozondoser kunde observeras, så visade både UVA och färg en lineär 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 12: Dos-responstest på ozondoseringen med succesiv doseringsökning av ozon från 2 till 12 O₃ mg/l.

Ozon-dos mg/l	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 dosresponstester valdes en ozondos på 4 mg O₃/l (motsvarande 0,57 mg O₃/g DOC vid DOC på 7 mg/l) för långtidstester. Även om denna dos redan applicerades eftersom långtidstesterna kördes i gång direkt efter avslut av dos-responstesterna, så bekräftade analysresultaten projektgruppens initiala bedömning.

Ozondosen i piloten styrs 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 för DOC i utgående vatten vid Getteröverket som brukar ligga på ca på 10 mg/l. 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

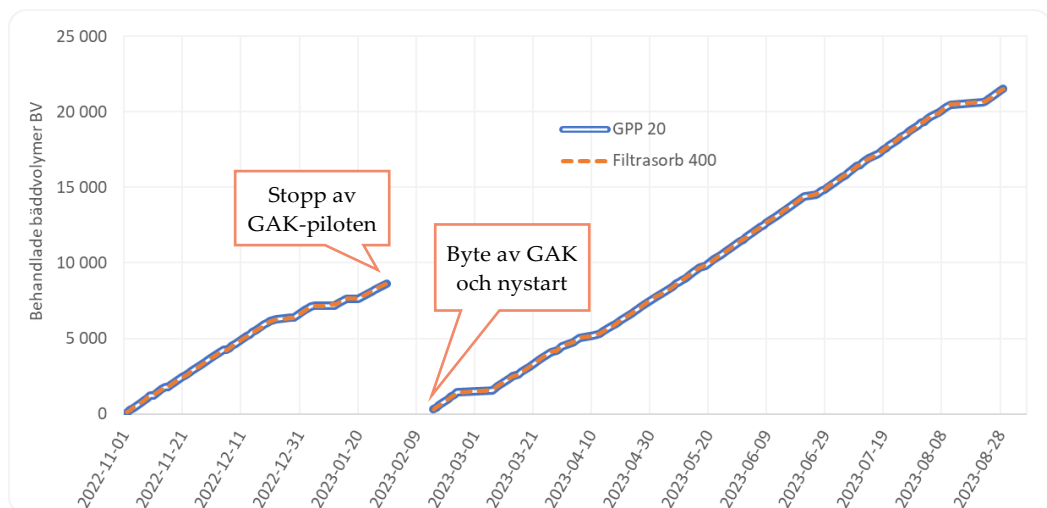
Långtidstester med teknikkombinationen ozonering och aktivt kol (O₃-GAK) kördes i gång 01/11/2022 direkt efter dos-responstesterna avslutades. Ozondosen valdes till 4 mg O₃/l under hela driftsperioden. DOC-halten i vattnet låg i medel på 10 mg/l under långtidstesterna som varade i 10 månader.

Kontakttiden (EBCT) i de två parallella aktivkolfilter som matades med ozonerat 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 fick kolet i båda GAK-filter bytas i början av februari 2023 eftersom tekniska problem i mikrofiltreringen lede till att ofiltrerat vatten kom in i O₃-GAK piloten. Detta orsakade igensättningar i båda GAK-filtren som inte kunde åtgärdas trots försök med flera backspolningar. I samband med kolbyte justerades även filterbädden (och flödet) för att kunna ge större expansionsmöjligheter vid backspolning och ett extra patronfilter installerades i inkommande vatten till piloten som extra skydd vid driftproblem i mikrofiltreringen.

Figur 24 visar behandlade bäddvolymer 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 bäddvolymer (BV) i de två GAK-filter efter ozoneringen.

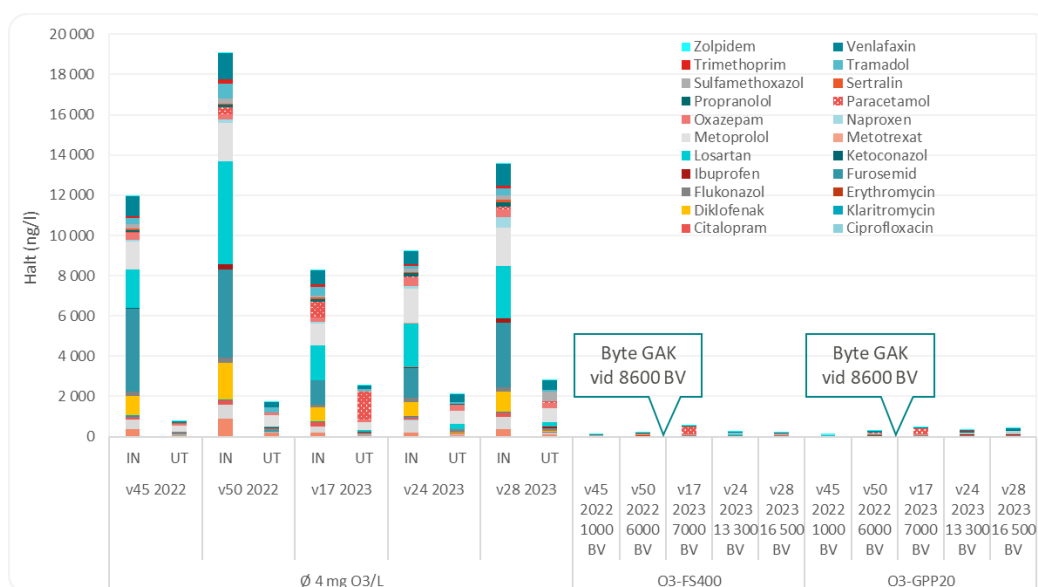
Eftersom igensättningen av GAK-filtren under en period krävde en backspolning flera gånger om dagen genomfördes i januari 2023 även tester med att köra GAK-filtren som fluidiserade bäddar (uppströmsdrift) i stället. Efter flera dagar med denna driftform stoppades dock försöken då en stabil drift med den befintliga pilotutformningen inte kunde åstadkommas och filtermaterialet flera gånger spolades ut.

3.3.2.2 Rening av läkemedelsrester

Figur 25 visar analyserade läkemedelshalter över de två pilotlinjen 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 varierar något mellan de olika provtagningstillfällen är fördelning av olika läkemedelssubstanser jämförbart. Även minskningen av läkemedel över ozoneringen varierar. V17 2023 kan en

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

negativ reduktion bland annat för paracetamol observeras som påverkar stapeln. 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 v 17 2023 har den effektiva ozondosen varit med 0,47 respektive 0,35 mg O₃/mg DOC varit ca 20 % länge v17 2023 än v50 2022, vilket leder till en sämre reduktion av läkemedelsresterna.

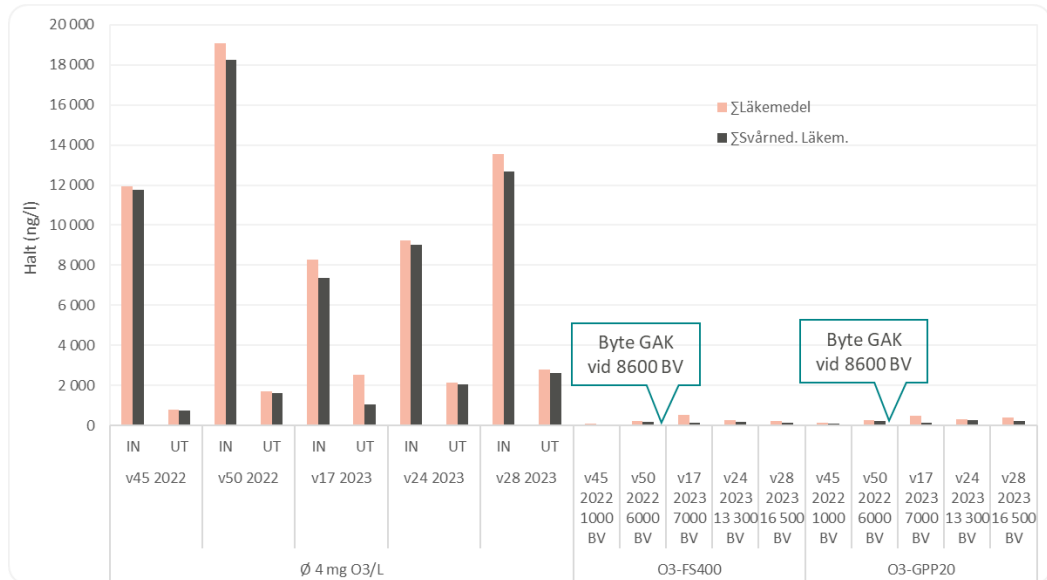


Figur 25. Halter av läkemedel över ozonering och tillkopplade GAK-filtre.

Efter båda GAK-filtren kan endast några få läkemedel kvantifieras och ingen väsentlig skillnad ses mellan de två olika GAK-typer. I provtagningen v17 2023, alltså efter GAK-byte, har antal behandlade bäddvolymeter i filtret redan legat något högre än vid provtagning v50 2022. Den något sämre reduktion av läkemedel som inte togs bort i ozonsteget kan dock även bero på att paracetamol även kvantifierades i något högre halter efter båda GAK-filtren. Eftersom detta endast gäller paracetamol och i samtliga provpunkter vid provtagning v17 2023, kan även en störning av analysen för denna substans inte uteslutas.

Figur 26 visar motsvarande figur för summan av samtliga 24 läkemedel och summan av endast de 16 svårnedbrytbara läkemedel. 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 reningseffekten över ozoneringen och det två GAK-filter GPP20 och FS400 för samtliga provtagningstillfällen. Som figuren illustrerar så tas de läkemedel som inte helt renas bort i ozonering (till exempel oxazepam) effektivt bort i de efterföljande GAK-filtren. Reningseffekten för teknikkombinationen O₃-GAK ligger över 90 % över hela försöksperioden för de presenterade parametrar i Figur 27. Vid sista provtagning har båda GAK-filter behandlat ca 16 500 BV.

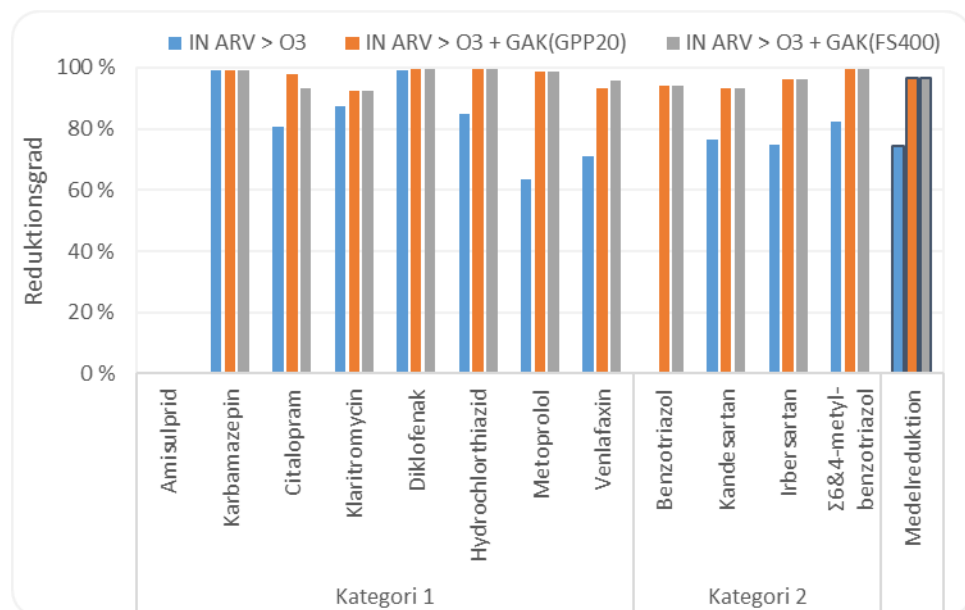


FÖRSTUDIE - MIKROFÖRORENINGAR VID GETTERÖVERKET I VARBERG
Tekniska lösningar för en utökad rening av avloppsvatten

Figur 27. Reningseffekt för samtliga analyserade läkemedel i de två GAK-filterlinjer.

Figur 28 visar reningseffektiviteten från inkommande till Getteröverket till utgående från ozoneringen samt de två GAK-filter 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-methylbenzotriazole), enligt förslag för reviderat avloppsdirektiv. Enligt förslaget förslås medelreduktion ligga $\geq 80\%$ 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).

Som figuren visar så varierar reduktionen för olika substanser framför allt över ozoneringen och benzotriazol kan t.ex. inte reduceras med ozonering alls. Eftersom endast ca 7000 BV har behandlats vid provtagningen är reningseffekten för samtliga substanser i de två GAK-filtren mycket hög. Amilsuprid är inte tillgängligt som läkemedel i Sverige och återfinns därför inte i avloppsvattnet. Medelreduktion för samtliga substanser ligger på 75 %, 97 % och 97 % för ozonering, O3-GPP20 respektive O3-FS400-pilotlinjen. Reningskrav enligt direktivförslaget skulle således kunna uppfyllas dock behövs en längre utvärdering till filterbyte för att kunna bedöma den faktiska resursförbrukningen för att uppnå detta reningsmål över tid.



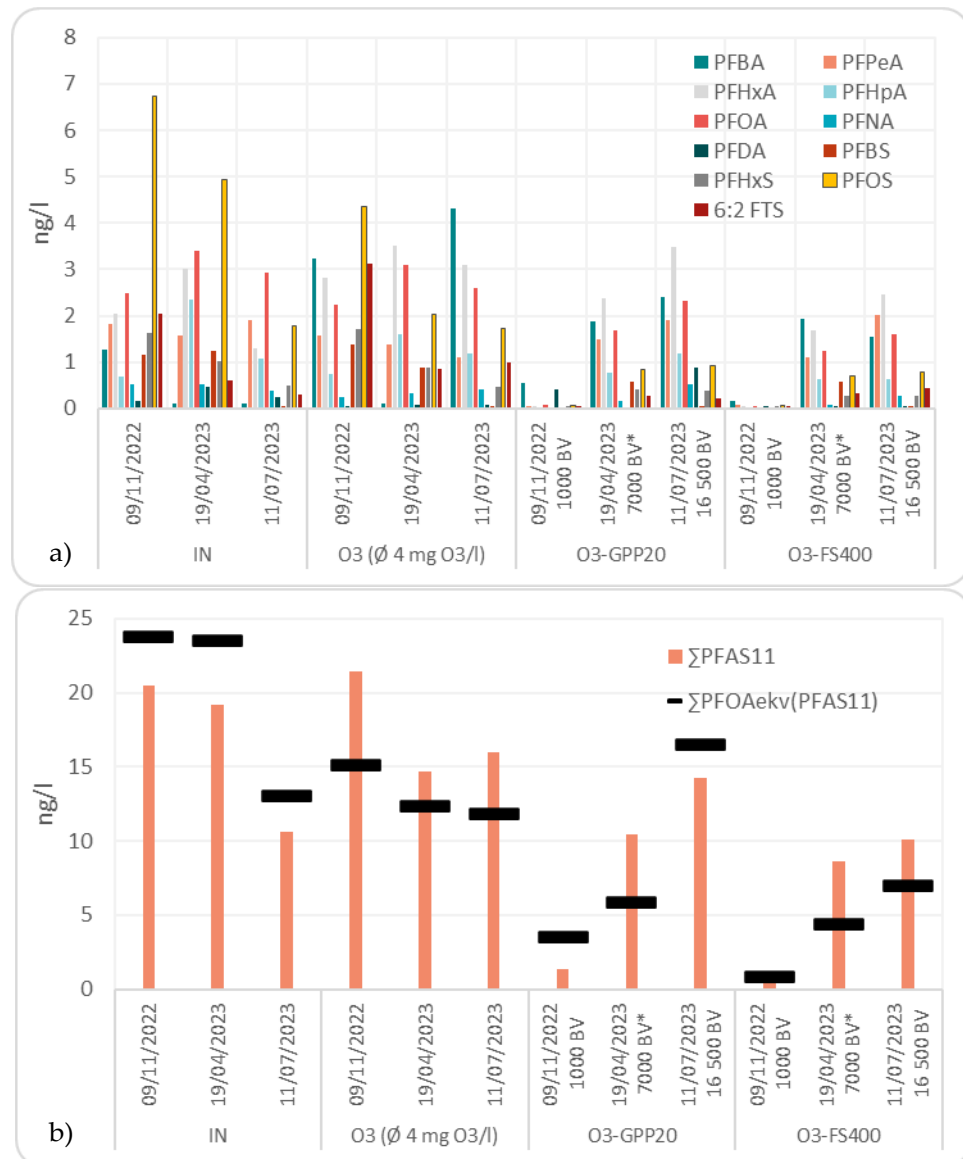
Figur 28. Reningseffektivitet för analyserade Kategori 1 och 2 substanser enligt förslag för reviderat avloppsdirektiv.

3.3.2.3 Rening av PFAS

Figur 29a visar halter för de analyserades PFAS11 före och efter ozonringspiloten, samt de två efterföljande GAK-filter. Även om halter i de olika provpunkter

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

varierar mellan de olika provtagningstillfällena så kan ändå en tydlig sämre reduktion av flera PFAS observeras för v17 2023 jämfört med provtagningen i 2022. Figur 29b visar motsvarande figur för summaparametrar Σ PFAS11 och Σ PFOA_{ekv}(PFAS11). Från figuren kan det observeras att 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 ökande antal behandlade bäddvolymeter i båda GAK-typer.



Figur 29. Halter av PFAS11 (a), och Σ PFAS11 och Σ PFOA_{ekv}(PFAS11) (b) före och efter ozonringningspiloten, samt de två efterföljande GAK-filtren.

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.

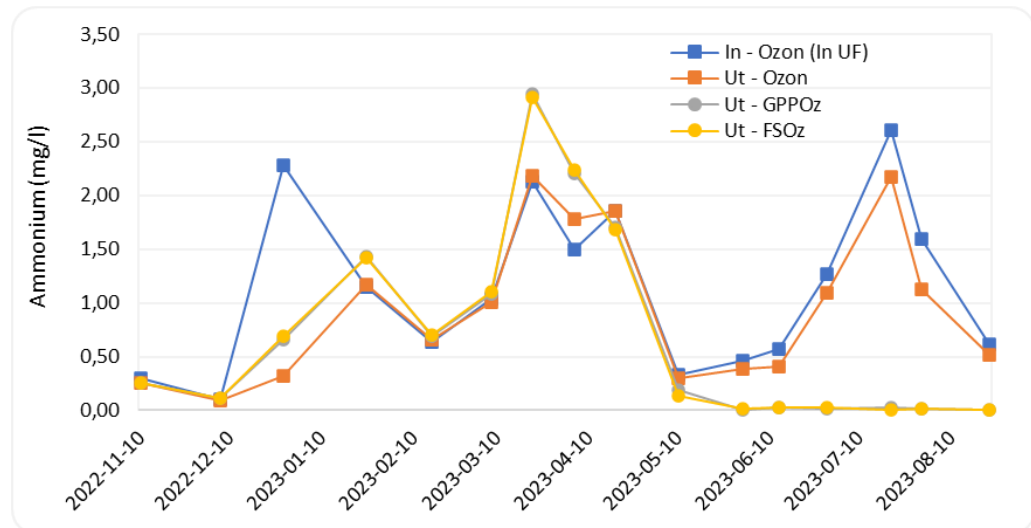
Vid provtagning v17 2023 kunde en ökning av östron (E1) över ozoneringen observeras. Ökningen från under detektionsgräns till 2,8 ng/l är relativt lite dock oväntat eftersom hormoner vanligtvis oxideras helt redan vid låga ozondoser. En möjlig förklaring kan vara att någon, eller flera, former av transformationsreaktioner 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 sedan renades bort i de efterföljande GAK-filter (se Bilaga 6.1).

De östrogena effekter (YES) som tydlig kunde kvantifieras i inkommande avloppsvatten till Getteröverket renas effektivt bort till under kvantifieringsgränsen redan i Getteröverkets reningsprocess (Tabell 5). Inga östrogena effekter kunde sedan detekteras efter ozoneringen eller GAK-filtren.

3.3.2.5 Rening av andra föroreningar

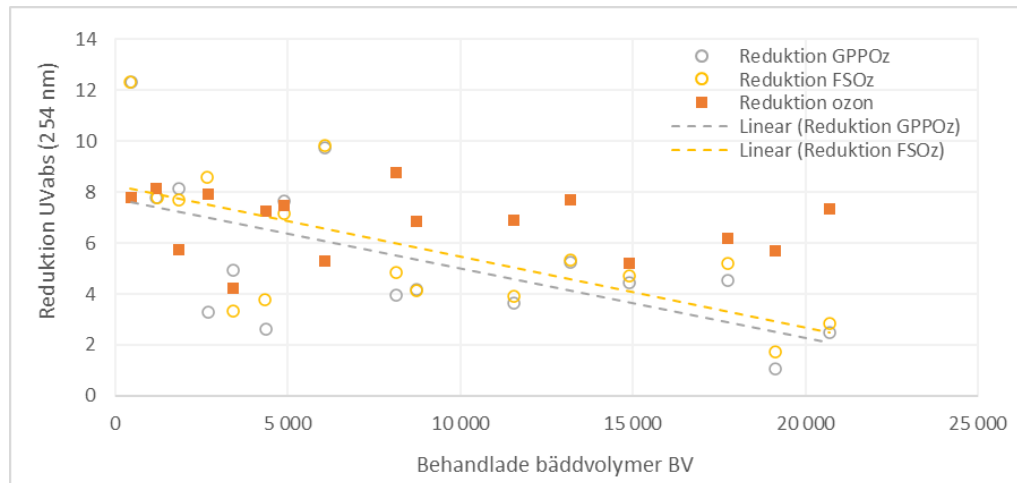
Enligt de analyserna av totalkväve, nitrat, fosfat och totalfosfor kunde ingen påverkan av dessa parametrar konstateras varken över ozoneringen eller de två efterföljande GAK-filter. Dock kunde det observeras haltvariationerna mellan olika provtagningar i samtliga provpunkter som beror på variationer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

Däremot förbrukades den inkommande ammonium till FS400 och GPP20 filtren från 2023-05-10 (vid ca 8 700 BV) till försökets slut (se Figur 30). Dock kunde tydliga nitrathaltsökningar p.g.a. den förväntade nitrifikation inte observeras. 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 öknings av nitrat kunde observeras. Liknande reduktioner av ammonium har inte observerats för GAK-filtren i teknikkombinationen UF-GAK.

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

 Figur 30. Ammoniumhalter över O₃-GAK piloten.

En tydlig påverkan av TOC-halter kunde inte observeras, varken över ozoneringen eller över de två efterföljande GAK-filtrer. TOC-reduktionen över de två GAK-filtren var minimalt under hela testperioden och varierade mellan 0,1 och 0,5 mg/l.

Däremot kunde en tydlig reduktion av UVabs observeras över GAK-filtren i början av långtidskörningen medan reduktionen minskade successivt oavsett filtermaterial (Figur 31). De högre reduktioner som observerades i början av pilottesterna var i storleksordning 8,0 mg/l (förutom vid ett tillfälle där reduktionen låg på 12,0 mg/l för FS400) för att sedan minska till ca 2,0 mg/l. I och med detta kan det konstateras att UVabs (i likhet med samtliga testade parametrar) inte kan användas som indikator för behov av filterbyte.


 Figur 31. Reduktion av UVabs i teknikkombinationen O₃-GAK.

3.3.2.6 Resultat från aktivitetstester

Östrogen aktivitet (ER) uppmättes i samtliga analyserade prover in till ozoneringen och i samma halter som in till ultrafiltreringen. Detta då båda pilotsteg matades med utgående renat avloppsvatten från Getteröverket som filtrerats genom ett mikrofilter på 10 µm. Reningsgraden över ozoneringssteget varierade mellan -36 % till 63 % vilket är avsevärt lägre än förväntat och rapporterat av Holm och Önnby (2022) som dock baserade sina resultat 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 utgående prover. 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 motsvarande 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.

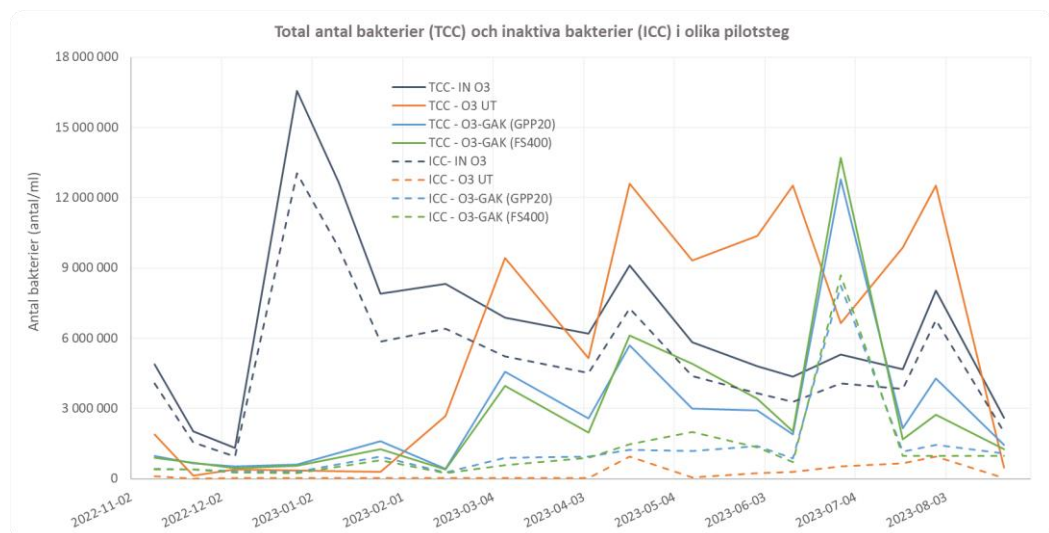
Halter och reningseffektiviteten för AhR-aktivitet och oxidativ stress (Nrf2-aktivitet) över ozoneringen är svårtolkat då halter och reningseffekt varierar mellan en kraftig negativ och positiv reduktion. För augusti 2023 kunde bl.a. en kraftig ökning över ozoneringen observeras till halter betydligt högre än vad som uppmätts i något av proven på utgående renat avloppsvatten från Getteröverket. Oxidationsprocesser som 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. GAK-filtret med FS400 minskade AhR-aktiviteten med 61 - 96% och GAK-filtret med GPP20 med 56 - 93 % vid de tre första provtagningarna medan en ökning med 73% sågs vid den fjärde

provtagningen i augusti 2023. Samtliga prov för GAK-filtren låg under detektionsgräns förutom för ett prov efter filtret med GPP20.

Samtliga resultat för alla aktivitetstester visas i bilagan.

3.3.2.7 Flödescytometri (FCM)

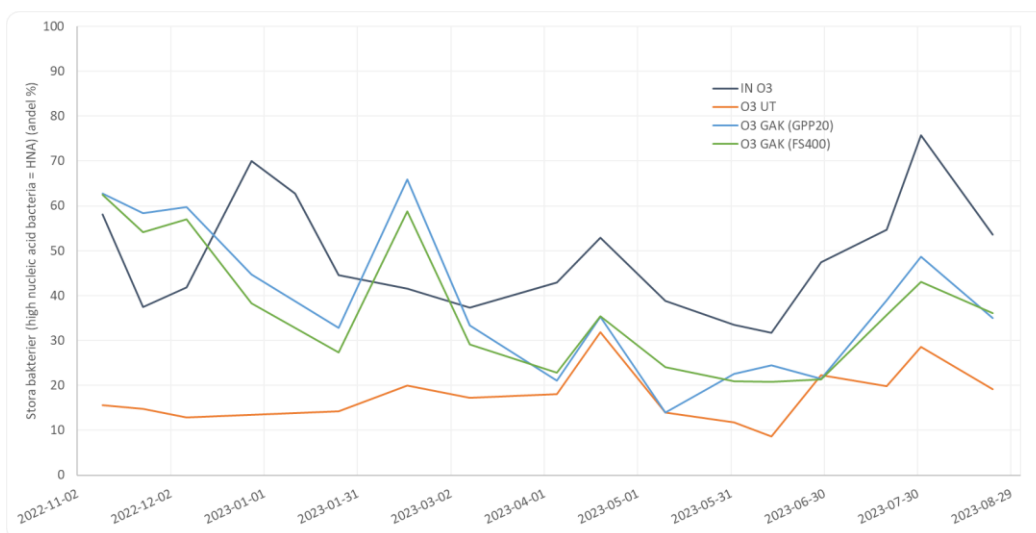
Resultaten från flödescytometrin i Figur 32 visar att problem med pilotanläggningen mellan jul och nyår 2022 ledde till höga bakteriehalter i vattnet efter mikrofiltrering in till ozonpiloten men låga halter efter ozoneringen. Totalhalter bakterier efter ozoneringen ligger sedan över inkommande halter. För aktiva bakterier kan det dock se satt halter är mycket låg 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 uppnås över ozoneringen om totalantal celler beaktas. De totala bakteriehalterna efter GAK-filtren ligger i snitt lägre än totalbakteriehalterna direkt efter ozonanläggningen. Halter aktiva bakterier är dock högre igen efter de två GAK-filtren (ca 47 % av TCC). Detta tyder på mikrobiologisk tillväxt i båda GAK-filtren. Båda GAK följer samma trend med en ökning av bakterieantalet under sommaren som troligtvis beror på en ökande vattentemperatur.



Figur 32. Utveckling av 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 33), en trend som också observerades i UF-GAK piloten (3.2.6).

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



Figur 33. Utveckling av %HNA i O₃-GAK piloten.

3.3.2.8 Biofilmskarakterisering

Eftersom GAK-filtren inte är utrustade med provpunkter för provtagning av filtermaterial i olika nivåer som möjliggör undersökningar under långtidstesterna, genomfördes biofilmkarakteriseringen endast vid avslut 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 samt i vattenfasen in och ut från ozoneringen visas nedan i Figur 34.

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

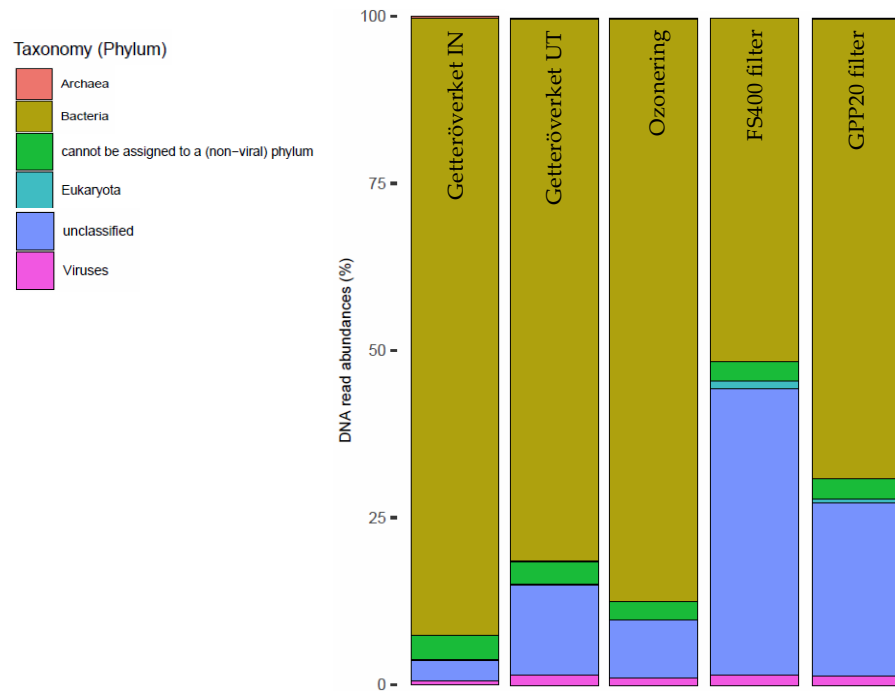
	UT	O ₃	FS	GPP	FS-AK
Acinetobacter-	37.4	67.7	40	35.9	0
Bradyrhizobium-	0	0	1.4	1.2	23.5
Bryobacter-	0	0	0	0	0.1
JGI_0001001-H03-	0	0	0	0	0.1
Reyranella-	0	0	0.5	0.9	0.7
Nitrospira-	0	0	0	0	0.1
Polaromonas-	5	2.8	1.9	1.5	5.7
Hyphomicrobium-	0	0	0.4	0.4	2.7
Nitrosospira-	0	0	0	0	0
Rhodofera-	0.7	0	0.8	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 34. Mikrobiella karakterisering (det 15 mest förekommande klasser) i olika provpunkter samt från extraherade prover från filtermaterialet (Provpunkter: UT – Getteröverket UT, O₃ - ozonering, FS – FS400 filter, GPP - GPP20 filter, FS-AK – biofilm FS400 filter).

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

3.3.2.9 Utvärdering för antibiotikaresistens

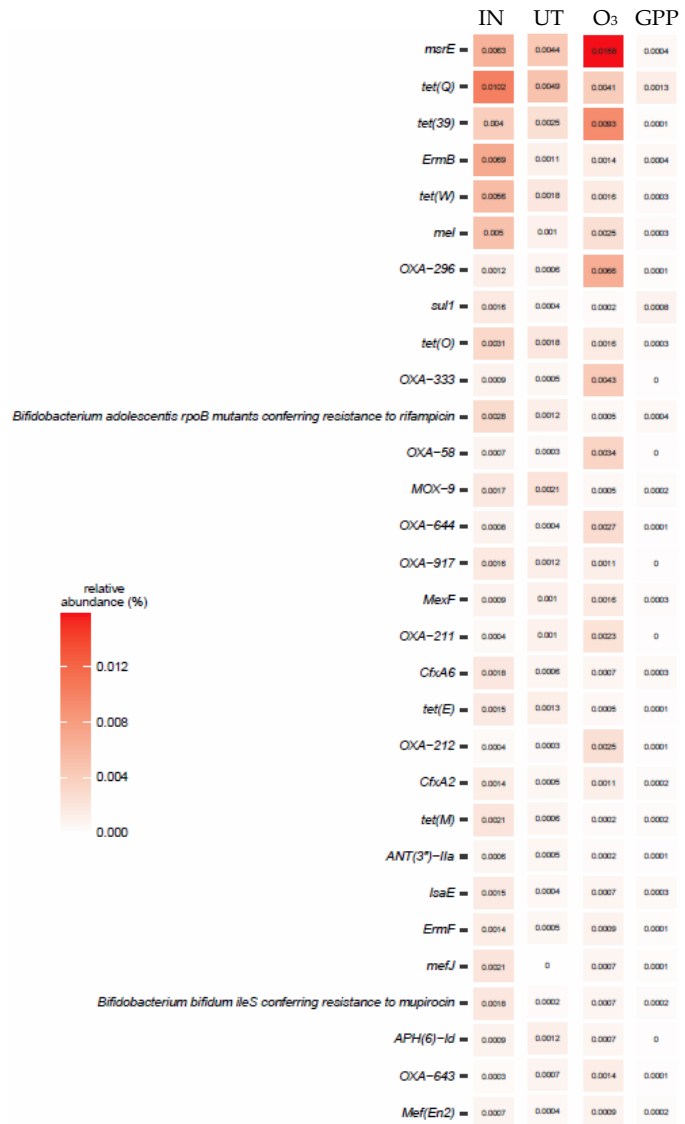
Figur 35 visar den övergripande taxonomifördelning för de olika prover över Getteröverket och UF-GAK piloten. Bakterier dominerar i samtliga prover men även virus återfinns i samtliga prover. Ozoneringen minskar virusandelen endast marginellt och ingen ändring sker över GAK-filtren.



Figur 35. Övergripande taxonomi för de olika prover (modifierat från analysrapport för korrekt beteckning).

Figur 36 visar halterna av antibiotikaresistenta gener (AGR) i jämförelse med resterande gener som kvantifierats i de olika provtagningspunkter över Getteröverket och O₃-GAK-piloten. Tyvärr kunde inte GAK-filtret med FS400 utvärderas p.g.a. för låga halter gener som 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 en ozonering som inte är kraftigt nog för en komplett desinfektion kan förbättra betingelser för antibiotikaresistenta bakterier. Det kan dock observeras att det efterföljande GAK-filtret motverkar detta. Eftersom för låga halter gener gjorde att GAK-filtret med FS400 inte kunde utvärderas kan detta tolkas som att även detta filter motverkade den ökade selektionen av antibiotikaresistenta bakterier.

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



Figur 36. Halter av antibiotikaresistenta gener (AGR, baserat på Comprehensive Antibiotic Resistance Database) i förhållande till resterande identifierade gener (Provpunkter: IN – Getteröverket IN, UT – Getteröverket UT, O₃ - ozonering, GPP - GPP20 filter).

3.3.2.10 Prioriterade kemiska parametrar

Den utvidgade analys 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-filter låg för 42 av det 49 analyserade substanser lägre än bedömningsgrunden/gränsvärdet. För 6 substanser låg halten under rapporteringsgränsen som dock var 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.

3.4 Jämförelse av pilotförsöken

En jämförelse av de två pilotförsöken är i utgångspunkten väldigt svårt eftersom båda pilotlinjer inkluderar aktivkolfilter 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 bäddvolymeter (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 MF. 2-steps GAK-filter som föregås av en ultrafiltrering i UF-GAK piloten förses med en mycket stabilare och renare vattenmatris som också leder till mindre igensättning i filtren. Även för O₃-GAK kan så klart en UF som förbehandling tänkas men i så fall bli det tre "avancerade" reningstekniker vilket ökar komplexiteten och resursbehovet.

En jämförelse av reningseffektiviteten med avseende för läkemedel och PFAS är svårt att göra p.g.a. de helt olika antal behandlade bäddvolymeter i respektive GAK-filter för de två piloter. Båda teknikkombinationen kan principiellt uppnå samma reningseffekt med avseende för läkemedelsrester i avloppsvatten samt hormoner och fenoler. Detta eftersom både bytesintervall av filtermaterialet och ozondosen kan anpassas efter olika reningskrav. Pilotförsöken visade dock att ozoneringen i O₃-GAK piloten inte kunde ta bort samtliga hormoner och att den inte hade någon reningseffekt alls på avloppsdirektivsämnet benzotriazol. Att aktivkol ingår i båda teknikkombinationer innebär att en bred rening av många olika mikroföroreningar kan åstadkommas oavsett. Ska även så mycket PFAS som möjligt renas bort är UF-GAK kombinationen den mest resurseffektiva lösningen på sikt av de två undersökta teknikkombinationer. Detta eftersom kolets kapacitet kan bäst utnyttjas p.g.a. en bättre förbehandling och 2-stepsdrift. Detta gäller även ifall en hög PFAS rening ska åstadkommas, även om bytesintervaller för GAK kommer behöva vara mer frekvent då än vad som krävs vid fokus på läkemedelsrening.

Både UF och O₃ fungerar som en förbehandling till GAK-filter för att öka utnyttjandegraden av adsorptionskapaciteten i det aktiva kolet maximalt. Biofilmkaraktäriseringen indikerade dessutom att det finns en etablerad biofilm i GAK-filtren i båda teknikkombinationer som även ger en biologisk nedbrytning av föroreningar i filtren. I teknikkombinationen O₃-GAK uppfyller GAK-filtren dessutom den viktiga uppgiften att ta bort nedbrytnings- och biprodukter som kan uppstå vid ozoneringen.

Vid utökade krav på det reade vatten t.ex. till återanvändning för internt eller externt bruk utgör ultrafiltreringen i UF-GAK teknikkombinationen en stor skillnad. Detta då ett partikelfritt och i princip desinficerat vatten kan produceras som redan innan filtrering genom GAK-filtren kan återanvändas för olika ändamål

som kräver dessa egenskaper för återbruk. Även mikroplaster kan endast tas bort med UF-GAK teknikkombinationen.

Den initial utvärdering för antibiotikaresistens indikerade också att teknikkombinationen O₃-GAK inte kunde ta bort virus som fanns i utgående avloppsvatten från dagens anläggning. Dessutom visade analys av antibiotikaresistenta gener att även om andelen resistenta gener generellt låg på en låg nivå så indikerades att ozoneringen ger en framselektering av antibiotikaresistenta bakterier. De efterföljande GAK-filter kunde dock igen minska denna ökade dominans av antibiotikaresistenta bakterier. Med teknikkombinationen UF-GAK kunde både virus och antibiotikaresistenta gener/bakterier avskiljas.

Även de få analysresultat av de kompletterande aktivitetstester som kunde brukas för en jämförelse indikerar en fördel med UF-GAK teknikkombinationen.

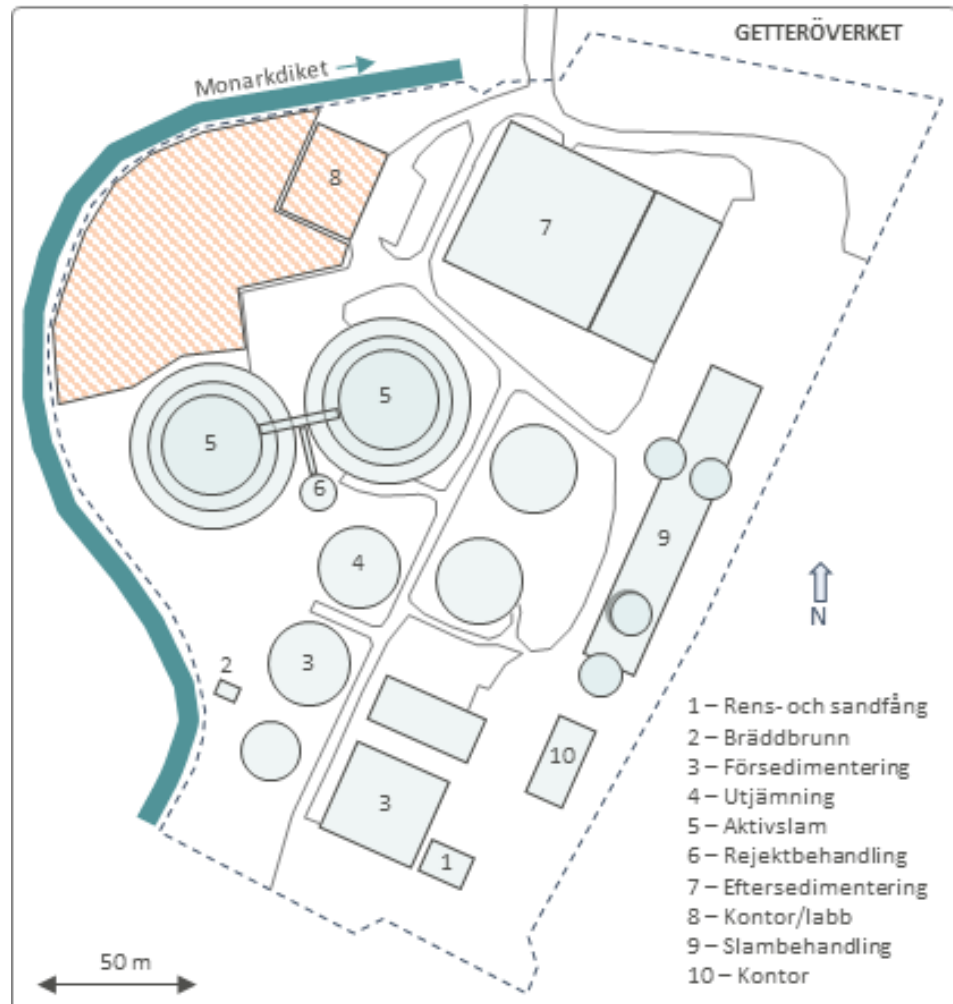
3.5 Beslutsunderlag för implementering

3.5.1 Dimensionerande förutsättningar

Avloppsvattenflöde vid Getteröverket som skulle läggas till grund för framtagande av beslutsunderlag bestämdes till $Q_{\max} = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$ eftersom det är detta maxflöde som kan hanteras i dagens inloppspumpstation och som därmed 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.

Som tänkbar framtida placering av en avancerad rening har främst nuvarande personal-/analysbyggnad och intilliggande fria markområden pekats ut (Figur 37).

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



Figur 37. Områden för en tänkbar placering av en framtida avancerad rening vid Getteröverket.

Teknikkombinationen som har fokuserats på för principförslaget är kombinationen av MF, UF och 2-steps GAK-filter (betecknat som UF-GAK) baserat på de långtidstesterna med teknikombinationen i pilotskala vid Getteröverket (se 3.2). Olika anledningar för detta teknikval diskuteras i Baresel et al. (2021). Till detta kommer de mycket goda reningsresultat och driftstabiliteten som tekniklösningen har uppvisat under de nästan tre år av pilottester. Även möjligheten till en återanvändning av det producerade vattnet har diskuterats som en möjlighet och den valda tekniklösningen bedöms ge en robustare lösning för detta ändamål.

Alternativet med kombinationen av ozonering och aktivkolfilter (O₃-GAK) samt en tänkbar framtida komplettering av UF-GAK teknikombinationen med en föregående ozonering diskuteras i avsnitt 3.5.8.

Vid framtagande och beskrivning av processdesign, processutrustning, kostnader och miljöpåverkan har flera teknikleverantörer som Xylem, Wedeco, Linde, Pentair, Sulzer,

Chemviron, AirLiquide och anläggningskonsulter Sweco involverats. För kostnadsberäkningar har bl.a. uppgifter från teknikleverantörer och Sweco används.

Poster som beräknas 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 som 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 el från befintligt ställverk. Inkluderar dock inte en eventuell uppgradering av ställverket.
- **Oförutsett**
Beräknas som del av summan av investeringskostnader för att ta höjd för oförutsedda kostnader.
- **Byggherrekostnader**
Inkluderar projektledning, projekteringsledning, projektering, upphandling, bygglösning, 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 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. Även om det i pilotlinjen med UF-FS400 kunde göras ett byte i första GAK-filter så har ett filterbyte även i andra filtret inte genomförts ännu. Med 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

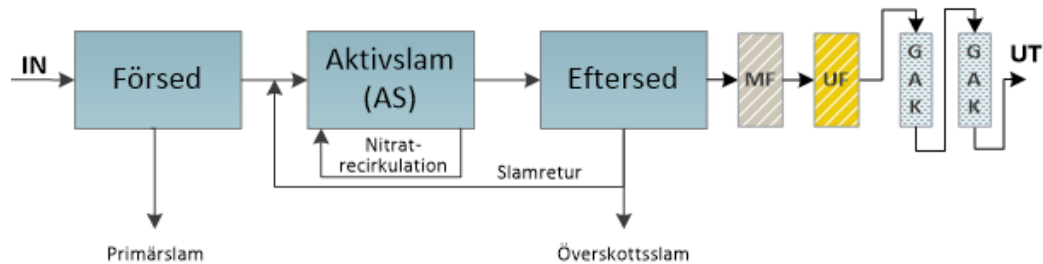
en medelreduktion på 80 % för svårnedbrytbara läkemedel över hela anläggningen eller endast den avancerade reningen så bedömer projektgruppen att minst 40 000 BV ska kunna behandlas innan ett filterbyte krävs i O₃-GAK teknikkombinationen. Ifall även en PFAS reduktion med minst 50 % eller högre ska kunna åstadkommas i den avancerade reningen 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.

För teknikkombinationen UF-GAK indikeras att 100 000 BV skulle kunna uppnås innan ett komplett filterbyte är genomfört om flera parallella filter i en fullskaleimplementering och ett reningskrav som utformas som en medelreduktion på 80 % för svårnedbrytbara läkemedel över hela anläggningen eller endast den avancerade reningen antas. Detta baserat på den kvarvarande kapaciteten i andra filtret i serie som vid ett filterbyte kan nyttjas då filtret placeras först i serien. Ett förändrat jämviktsförhållande för detta filter då inkommande föroreningshalter bli högre vid placering som först filtret kommer också innebära att filtrets kapacitet kan utnyttjas optimalt. Ifall även PFAS ska renas bort med minst 50 % eller högre så visar pilotförsöken att första filtret skulle behöva bytas ut vid samma antal behandlade bäddvolymmer som filtret i O₃-GAK teknikkombinationen. 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 (ändrat jämviktsförhållandet), kommer flera bäddvolymmer totalt kunna behandlas med samma mängd aktivt kol i UF-GAK uppsättningen än i O₃-GAK lösningen.

Det bör noteras att vid ett högt reningsmål för PFAS kan andra aktiva kol vara bättre lämpade för den avancerade reningen eftersom PFAS reningsmålet troligtvis kommer styra GAK-förbrukningen och en optimering till PFAS-reningen kan i så fall även innebära att mindre effektiva kolsorter med avseende för läkemedelsrening kan accepteras eftersom ett kolbyte i alla fall behöver ske redan vid relativt få behandlade bäddvolymmer.

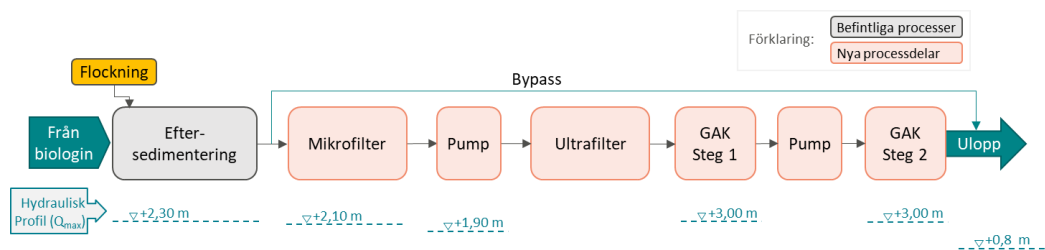
3.5.3 Förslag till processlösning och -utformning

Figur 38 visar den föreslagna processlösningen som baseras på pilottesterna vid Getteröverket och som beskrivs nedan. Utgående avloppsvatten från Getteröverket för-filtreras med hjälp av ett mikrofilter för att sedan passera en ultrafiltrering innan vattnet till slut behandlas i 2-stegs GAK-filtrer. MF och UF-stegen bidrar att minska belastningen på GAK-filtren med andra föroreningar än de mikroföroreningar som den avancerade reningen avser att avlägsna.



Figur 38. Föreslagen processutformning och -placering av den avancerade reningen vid Getteröverket.

Som Figur 37 med markerade ytor för nyttjande till en framtida avancerade rening visar finns inga tydliga platsspecifika begränsningar i form av t.ex. begränsat tillgängliga ytor. Inga befintliga processvolymmer är i nuläge planerat dock föreslås att en befintlig byggnad inom anläggningens område ersätts med den avancerade reningen. Figur 39 visar den föreslagna processplaceringen av en eventuell GAK-filtrering vid Getteröverket inklusive vattennivån i de olika processteg vid $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$ för den avancerade reningen.



Figur 39. 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 installerade. Efter MF-steget pumpas vatten genom trycksatta UF-membran som samtidigt skapar en högre vattennivå för att vattnet kan ledas via självfall till första GAK-filtret. Filtratet från första GAK-filtret pumpas till andra steg 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 processteg som används i principförslaget.

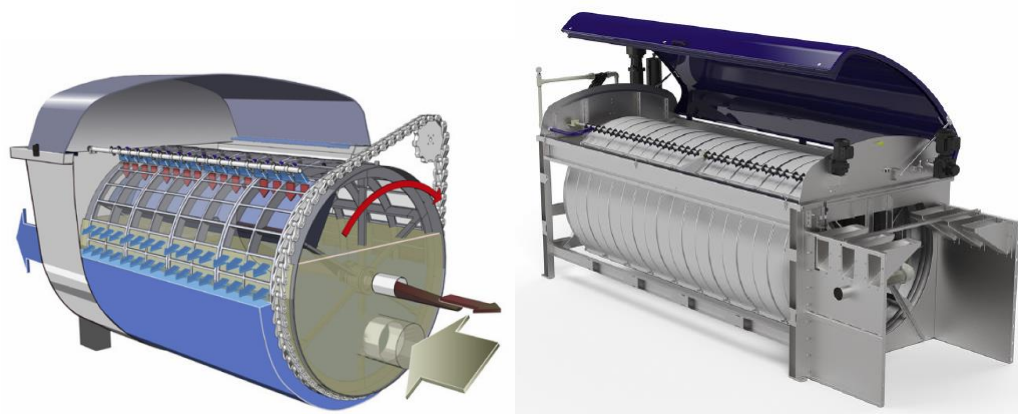
3.5.4.1 Mikrofiltrering (MF)

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 ekonomisk fördelaktigt samtidigt som det behövs extra betongarbeten för installation. Nedan väljs utförande nedsänkt i bassänger för vidare genomgång.

Med 10 µm filterduk och en maximal ytbelastning på <10 m³/h kan utformningen bestå av liknande utrustning som används i pilotförsöken. Med de dimensionerande förutsättningar 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 40). 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 intermittant 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 lågt och en återföring till slambehandlingen bedöms därför inte behövas.

Vid medelflöde $Q_{medel} = 780 \text{ m}^3/\text{h}$ är endast hälften av trumfiltern 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 40. 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 som 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 $Q_{max} = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$ och hänsyn till viss redundans på 30 moduler föreslås en fyra XIGA typ 212 ställningar som kan hålla 96

XF64-moduler var (totalt 384 moduler; Figur 41). Även andra moduler som t.ex. XF75 kan tänkas om en högre kapacitet eller mindre fotavtryck efterfrågas.



Figur 41. UF-steget med Pentair XF64-moduler (illustrationsbild, Pentair).

Installationen av UF-steget inkluderar även av 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 bäddvolym (BV; empty bed volumes, EBV; 20 000 BV motsvarar en dos på ca 25 g GAK/m³) innan filterbyte. En långtgående förbehandling av avloppsvatten innan det filtreras genom GAK-filter kan avsevärt öka utnyttjandegraden av filtermaterialet vilket ökar antal BV som kan behandlas innan byte (se t.ex. Baresel et al., 2017, 2021, 2022; Edefell et al., 2019). Förbehandlingen för den planerade avancerade reningen vid Getteröverket består av en mikro- och ultrafiltrering och genererar således ett partikelfritt vatten för behandling i aktivkolfiltren.

Utifrån pilotförsöken, 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 filterpaaren används vid Q_{medel} vilket betyder en filteryta på 40 m² per filter (4 × 10 m). Det tredje filterpaaret 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 ifall definierade reningsmål kräver detta. Reningseffekten kan ökas genom att aktivera det tredje filterpaaret även vid flöde som inte överstiger medelflödet vilket ger en längre EBCT och därmed ökat reningseffekt. Service- och underhållsarbete för övrigt läggs till perioder med lågflödet. 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.

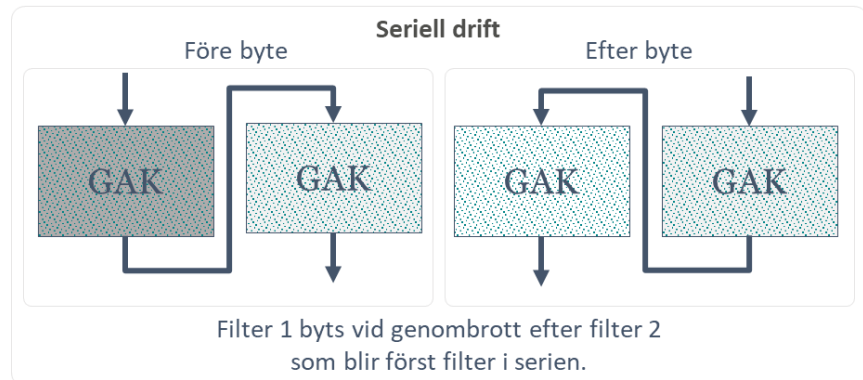
Vid maxflödet minskar kontakttiden till ca 8,6 min i varje filter. Ytbelastningen vid medelflödet och två filterpaar ligger på <8 m/h per filter och vid maxflödet och tre filterpaar på 12,5 m/h.

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

Hur många bäddvolym (BV) som kan behandlade innan kolet behöver bytas ut har undersökts i pilotförsöken vid Getteröverket (se 3.5.2). Även med hänsynstagandet till olika möjliga reningskravformuleringar har dessa tester visat att ett kolbyte i första filtret kan behövas först efter 100 000 behandlade BV. En vanlig dimensionering av GAK-filter baserat på leverantörsrekommendationer utgår från 20 000 BV för enstegsfilter. Det bör noteras att detta inte gäller ifall PFAS ska renas bort i en större utsträckning än vad som gjordes i pilotförsöken. Ska även olika PFAS renas bort t.ex. 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 filter så att det nya kolet kommer sist (se Figur 42).

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

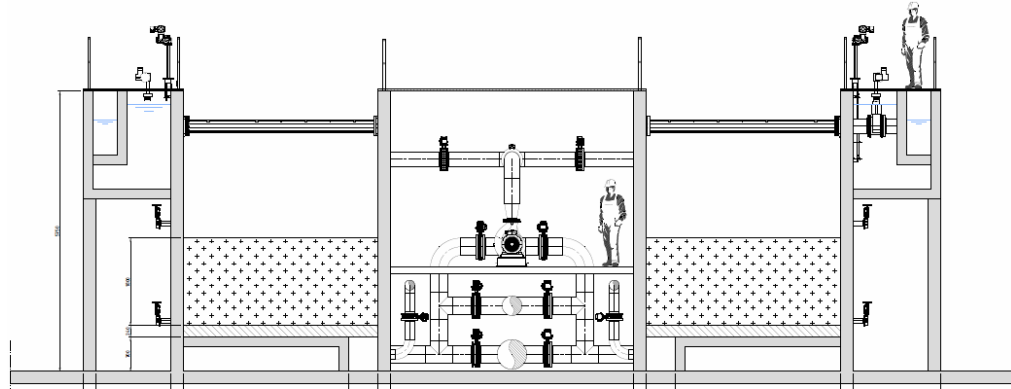


Figur 42. Schematisk bild över de två vanligaste flerfiltersystemen.

Backspolningsbehovet av filtren bedöms utifrån erfarenhet från pilotförsöken och IVL:s erfarenheter från andra pilotförsök vara låg p.g.a. den partikelfria vattenmatris som behandlas i GAK-filtren. Innehåll av organiskt material (som även inkluderar läkemedel) kommer dock leda till biofilmtillväxt som till slut sätter igen filtret. Även filterbädddjup och ytbelastning påverkar backspolningsbehovet p.g.a. kompaktering av filterbädden. I pilotförsöken användes det dock andra ytbelastning och filterbädddjup. 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 nivåsänkning i filtren kan uppnås, tar backspolning av ett filter mindre än 1 tim. 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 2 redundanta installationer för leverans av tryckluft och backspolvatten. Spolvattenpumpar placeras i utloppskanalen efter filterbassängen. Uppsamlat backspolvatten leds via ledningar till inloppskanalen till mikrofilter utan behov för extra pumpning.

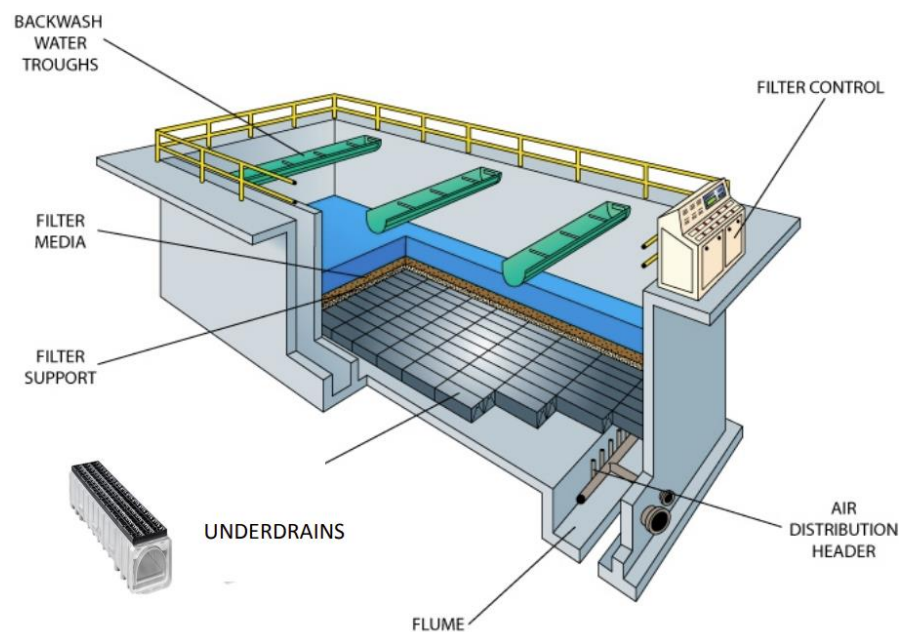
Figur 43 visar en schematisk layout av GAK-filterpar med ett serviceutrymme i mitten som innehåller rörgalleri för filtrerat vatten, backspolvatten och tryckluft, samt pumpar. Tömning av filtermaterialet sker på utsidan av filtren direkt mot tankbil. Fyllning sker via fyllningsledningar från toppen av filtret. Maskinutrustning (blåsmaskin, backspolpumpar, ejektorpumpar) el och styr m.m. placeras i separat utrymme bredvid GAK-filtren. Flera ritningar och detaljer finns i bilagan.

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



Figur 43. Schematisk ritning av 2-steps GAK-filterutformning.

Beroende på vilken GAK som rekommenderas av leverantören kan filterbotten utformas på olika sätt. Vid 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. Ifall dräneringsbotten används i stället för dysor så kan även ett extra "mediahållare" användas som supplement på dräneringsbotten i stället. Båda lösningar fungerar bra men behöver tas hänsyn till i dimensioneringen eftersom t.ex. placering av GAK-tömningsöppning påverkas och även den totala filterbäddhöjden påverkas. I den föreslagna designen räknas med en dräneringsbotten inklusive mediahållare (Figur 44).



Figur 44. Schematisk uppbyggnad av GAK-filter med både dräneringsbotten inklusive mediahållare (Leopold® Type XA™ Underdrain) och stödmaterial.

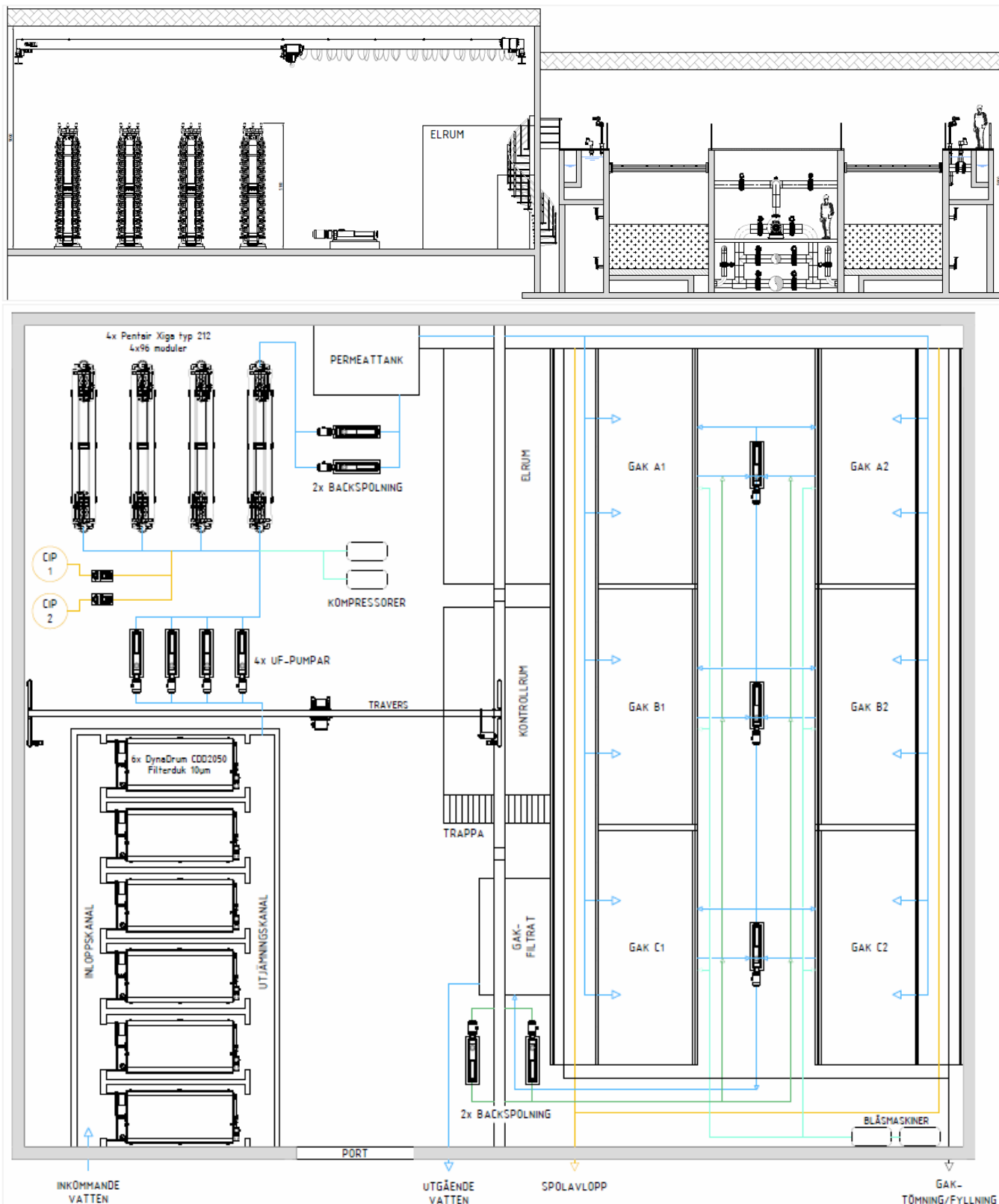
Tömning av förbrukat GAK sker via öppningar i varje filtercell strax över filterbotten som ansluts till en ejektorpump som drivs med vatten från inloppskanalen till den avancerade reningen. Erfarenheter från andra GAK-anläggningar visar att en viss manuell insats kan behövas för tömning av GAK-rester.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

3.5.5 Processbyggnad för avancerad rening

Figur 45 visar hur den föreslagna processlösning bestående av mikrofiltrering, ultrafiltrering och 2-steps aktivkolfilter kunde placeras i en ny processhall som är cirka på samma yta som byggnaden som ska ersättas (se Figur 37). Den nya processbyggnaden föreslås delas i två ihopkopplade sektioner för att underlätta drift och underhåll men även för att underlätta vattnets väg genom de olika processdelar. Vänstra delen av processhallen utrustas med en travers och industriport för enkle hantering av membranmoduler och all maskinutrustning. De tre GAK-filterpar 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.

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

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



Figur 45. Principritning för processbyggnaden för avancerad rening (plan och sektion, se även bilagan).

3.5.6 Investerings- och driftkostnader

Tabell 13 visar en sammanställning av de framtagna kostnadsposter uppdelat på investeringskostnader för principförslaget med den tekniska utformningen som beskrivs ovan. Det bör noteras att vissa antaganden och kostnadsposter som beskrivna 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 förutsättningar på plats.

Som kostnadsberäkningen visar dominerar installationskostnader där en ny processhall (ca 50 Mkr) och den avancerade filtrering med MF och UF står för de största kostnader. 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 4 Mkr enligt tabellen vilket betyder en specifik reningskostnad för den avancerade reningen baserat på medelflödet på ca 2,30 kr/m³.

Tabell 13. Kostnadsposter för UF-GAK teknik Kombinationen.

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	0,03 Mkr/år	- NaOCl (7,2 %): 3000 kr/t

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

	4 t/år		- 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	

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 framför allt med tanke på den mycket känsliga och påverkat recipient. Den avancerade reningen är alltså dimensionerat för en kapacitet som är nästan dubbelt så hög som medelflödet till Getteröverket ($Q_{\text{medel}} = 780\text{ m}^3/\text{h}$) vilket påverkar investeringskostnader avsevärt. Eftersom det är just investeringskostnader i form av avskrivningar som dominerar de årliga kostnader, 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 mikroforeningar 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 producerades vatten för olika ändamål. Ett lägre pris än för dricksvatten till användaren skulle kunna skapa en win-win situationen 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 komma kunna ta bort olika PFAS bör också beaktas i samhällsekonomiska vinster, även om dessa är svårt att kvantifiera. Malovany et al. (2023) är 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}. Dessa siffror är så klart osäkra eftersom det finns utmaningar framför allt p.g.a. att kunskapsläget är ännu på forskningsnivå och det finns många osäkerheter bl.a. kring toxicitet av olika PFAS och bedömningen av miljörisker vid utsläpp av PFAS. Med detta blir det svårt att värdera de oklara riskerna i monetära termer. Samma gäller för övrigt även för utsläpp av läkemedelsrester och fenoler, m.fl. Med utgående medelhalt för PFOS på 4,3 ng/l enligt Tabell 5 och medelflödet på 780 m³/h så emitteras 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 än PFOS, samt läkemedelsrester och fenoler inte är inräknat ännu.

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 än om t.ex. en svensk energimix skulle användas. Energiförbrukningen leder också till annan miljöpåverkan än klimatpåverkan som exempelvis 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 transporterna för endast en mindre del av den totala miljöpåverkan. Att det i principförslaget utgås ifrån att endast reaktiverat GAK används, som också visat bra reningsresultat i pilotförsöken, 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 förnyelsebara material som kokosnötskal eller slamkol kan vara ett alternativ som kan minska miljöpåverkan ytterligare dock kan tillgången vara begränsande och reningskapaciteten av dessa GAK ligger ofta lägre än för fossila GAK (se pilotresultaten i 3.2).

Energibehovet vid drift av GAK-filter är låg och energi krävs endast vid lyft av vatten och för backspolning. Dock finns en klimatpåverkan på grund av 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 för att rengöra membranerna orsakar också en miljöpåverkan som dock jämfört med andra poster kan anses försumbart.

Även själva 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 relaterat 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 några mer övergripande utvecklingsmöjligheter för den 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 referensanläggning 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 först tester med ett aktivt kol som baseras på Getteröverkets slam som betecknas som FoU 21 i ovan beskrivna pilottester. Även om försöken visat att kolet inte uppnå samma reningseffektivitet och livslängd som dem kommersiella fossila GAK (FS400 och GPP20) så visar resultaten ändå på potentialen för slamkol. Jämförd med andra icke-fossila GAK som det testade Organosorb 10 har dessutom reningskapacitet inte varit avsevärt sämre för flera undersökta substanser. Dock visar pilottesterna också att slamkolet inte kunde rena bort PFAS från avloppsvatten och ifall en PFAS rening åstadkommas kan således filterlösningen inte 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) så har liknande problem inte observerats i den genomförda pilottesterna. 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-steget kan vara en viktig förutsättning för tillämpning av ett slamkol av mindre kvalitet i GAK-filtren. Forskning och teknologisk utveckling inom området biokol kan således leda till betydande förbättringar både ur ekonomiskt och 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 en ozonering kan vara en tänkbar framtida komplettering till den presenterade tekniklösningen. Eftersom detta skulle medföra ytterligare ett reningssteg med ökat komplexitet, kostnader och miljöpåverkan är detta endast relevant t.ex. 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 förlänger kolfiltrets livslängd. 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 lösningen utan behov för extra utrymmen för en kontaktreaktor tänkas. I motsats till den traditionella ansatsen att tillsätta en ozon-luftblandning 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 en homogen gasfritt flödet som inte avger ozon till processluften. Den tekniska lösningen som t.ex. tillhandahållas av Air Liquide kallas Ozone Strong Water (OSW) separerar de olika steg ozonöverföring till vattenfasen, inblandning och reaktion. Detta gör att kontakttiden kan reduceras och en kontakttank med restozonbehandling kan faller bort. Vid Getteröverket kunde t.ex. befintliga processvolymen efter eftersedimenteringen som inte nyttjas användas för inblandningen. I den ovan beskrivna tekniklösning leds vatten från dessa processvolymen till den nya processbyggnaden för den avancerades reningen.

Tekniken bedöms även kunna ge en effektivare ozoninblandning som de jämförande tester med traditionell ozoneringen med tallriksluftare ARV Duisburg-Vierlinden indikerar. Det observerade lägre ozonbehovet på ca 20 % p.g.a. en effektivare inblandning vägs dock upp av ozonförluster i OSW-reaktorn. Att syret som inte omvandlas till ozon är vid denna teknik redan trycksatt öppnar även 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 (Andersson et al., 2023). En återanvändning efter en kvalitetssäkring och eventuella kompletterande åtgärder skulle inte bara minska investeringskostnaden dramatiskt utan även miljöpåverkan av UF-installationen. Pilottester rekommenderas för att undersöka detta alternativ. Vanliga UF-membran som används eller kommer användas i Henriksdal, Himmerfjärdsverket

och Margretelund ARV (samt eventuell Nya Sjölunda) inkluderar Veolias ZeeWeed 500D (0,04 μm , outside-in filtration) och nästa generation 500EV (Evolve) som har tätare placering av membrantrådarna och fler moduler per kassett vilket 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 behöva 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 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 som spolning av gator, bevattning, spolvatten inom Getteröverket etc. men även t.ex. för att täcka industriella behov. Ifall det tekniska vatten kan ersätta dricksvatten där en dricksvattenkvalitet inte behövs, skulle det ge en bättre lokal cirkulär vattenhantering och skapa förutsättningar för en eventuell delvis 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 detaljerade utredning av implementering av O₃-GAK teknikkombinationen har genomfört inom projektet så ges nedan en förenklad bedömning av en sådan tänkbar fullskaleimplementering göras baserat på IVL:s samlade erfarenheter.

Baseras en tänkbar fullskaleanläggning även här på de genomförda pilottesterna så skulle ett ozonering ersätta UF-steget medan de andra processdelar enligt implementeringsförslaget för UF-GAK skulle kvarstå. Med en medeldos på 4 g O₃/m³ (ca 0,4 mg O₃/mg DOC) och en kontakttid på 20 min som under pilottesterna skulle en kontakttank på 260m³ behövas. Ifall kontakttanken kan placeras i den förslagna nya processbyggnaden kan ett vattendjup på 6 m ge ett ytbehov på 43 m². Tanken skulle således kunna placeras i byggnaden i stället för UF-steget och resterna yta vara nog för placering av ozongeneratorn, ozondestruktion, kylning och tillhörande övrig utrustning. Då vattendjupet i reaktorn kunde uppgå till minst 6 m kan ozonet induceras både via injektorer och tallriksluftare i kontaktreaktorn. Ifall ozonet produceras från flytande syre kan LOX-tankar placeras utanför den

nya processbyggnaden för 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 visat i Figur 45. Även GAK-filteranläggningen skulle dimensioneras på samma sätt som beskriven i 3.5.4.3 dock vid 10 minuter EBCT som i pilottesterna med endast 50 % av filterstorleken, alltså 3 filterceller i stället för 6. Utifrån en optimal resursutnyttjandet av filtermaterialet kapacitet skulle det dock vara fördelaktiga att köra filtren som 2-stegsfilter även i en eventuell O₃-GAK teknislösning. I så fall skulle filteranläggningen dimensioneras på samma sätt som beskriven i 3.5.4.3.

I en förenklade kostnadsberäkning kan det antas samma kostnad för den nya processbyggnaden och mikrofilteranläggningen, samma kostnad för GAK-filteranläggningen för att räkna för en 2-stegslösningen, samt 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 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.

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 Slussats och rekommendationer

Den övergripande målsättningen av projektet är att minimera oönskade negativa effekter på vattenmiljön (Inre Farehammarsviken) p.g.a. utsläpp av behandlat avloppsvatten från Getteröverket. Med detta som bakgrund har projektet kompletterat tidigare karteringar av olika mikroforeningar vid Getteröverket och relevant recipientpunkter. Projekt har även vidarefört tidigare startade pilotförsök med en teknikkombination av ultrafiltrering och aktivt kol (UF-GAK) samt genomfört kompletterande pilottester med teknikkombinationen ozonering och aktivt kol (O₃-GAK). De kompletterande pilottesterna med UF-GAK har även legat till grund för att ta fram ett initialt förslag till fullskaleimplementering av den avancerade reningen vid Getteröverket.

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

- Även den kompletterande karteringen av mikroforeningar visar tydligt att Getteröverket är den dominerande transportvägen för läkemedelsrester till mottagande ytvatten inkl. Inre Farehammarsviken.
- För andra mikroforeningar som PFAS och fenoler finns även andra källor mellan Getteröverkets utsläppspunkt och Naturum varav en del antas dränerar Lassabackadeponin och industriområdet öster om järnvägen.
- Lakvattnet från Bösarp deponi bidrar med höga PFAS halter till belastningen på Getteröverket dock utgör andelen PFAS som kommer från deponin endast en mindre del (<5%) av PFAS-belastningen till Getteröverket.
- Ursprunget till de höga inkommande halter bisfenol A bör utredas eftersom det också leda till höga halter i utgående renat vatten trots en viss rening över anläggningen. Förslagna bedömningsgrunder för ämnet pekades ut av projekt som en eventuell stor framtida utmaning och 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 bisfenol A halter (Baresel et al., 2021). Även i andra recipientprovpunkter vid industriområdet och Lassabackadiket kunde kraftig förhöjda halter 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.
- Genomförda pilottester med teknikkombinationen UF-GAK har visat att en kraftig reduktion av läkemedelsrester och andra mikroforeningar i utgående avloppsvatten kan åstadkommas vid Getteröverket. Långtidsförsöken har även visat att den valda processdesignen kan åstadkommas denna effektiva

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

reduktion med en signifikant mindre resursförbrukning i form av aktivt GAK-behovet jämfört med traditionell design.

- Pilotförsöken har dessutom visat att teknikkombinationen UF-GAK kan avlägsna virus samt åstadkomma en log 4 reduktion av bakterier som finns i utgående renat avloppsvattnet från Getteröverket. Även antibiotikaresistensen i avloppsvattnet kunde i princip tas bort med UF-GAK lösningen. Ingen av dessa reningseffekter kunde uppnås i samma utsträckning med O₃-GAK teknikkombinationen.
- Pilotförsöken visar vidare att en stabil drift kan åstadkommas med den föreslagna teknikkombinationen samt 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 relativt 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 utsträckning som för UF-GAK försöken.
- Principförslaget som togs fram inom projektet visar på en möjlig fullskaleimplementeringen av UF-GAK teknikkombinationen vid Getteröverket inklusive tekniska lösningar.
- Kostnadsbedömningen av en avancerad rening vid Getteröverket med den valda teknikkombinationen tyder på en extra kostnad på ca 2,3 kr/m³.
- Även en grov kostnadsberäkning för en möjlig fullskaleimplementeringen av O₃-GAK teknikkombinationen vid Getteröverket indikerar en extra kostnad på ca 2,3 kr/m³. Även om ozoneringen generellt är billigare i investeringen än ultrafiltrering (UF) så ökar kostnader för GAK-filtersteget då inte samma livslängd av det aktiva kolet som i UF-GAK lösningen kan uppnås.
- En användning av det reade vattnet efter den avancerade reningen samt en bedömning av samhällsekonomiska vinster p.g.a. den PFOS rening som åstadkommas 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. 2022. [Resultat från FoU-samarbete Syvab-IVL - Årsredovisning för 2020 - 2021.](#) IVL Svenska Miljöinstitutet B2444.

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.

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.

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

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>

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>

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.

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.

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

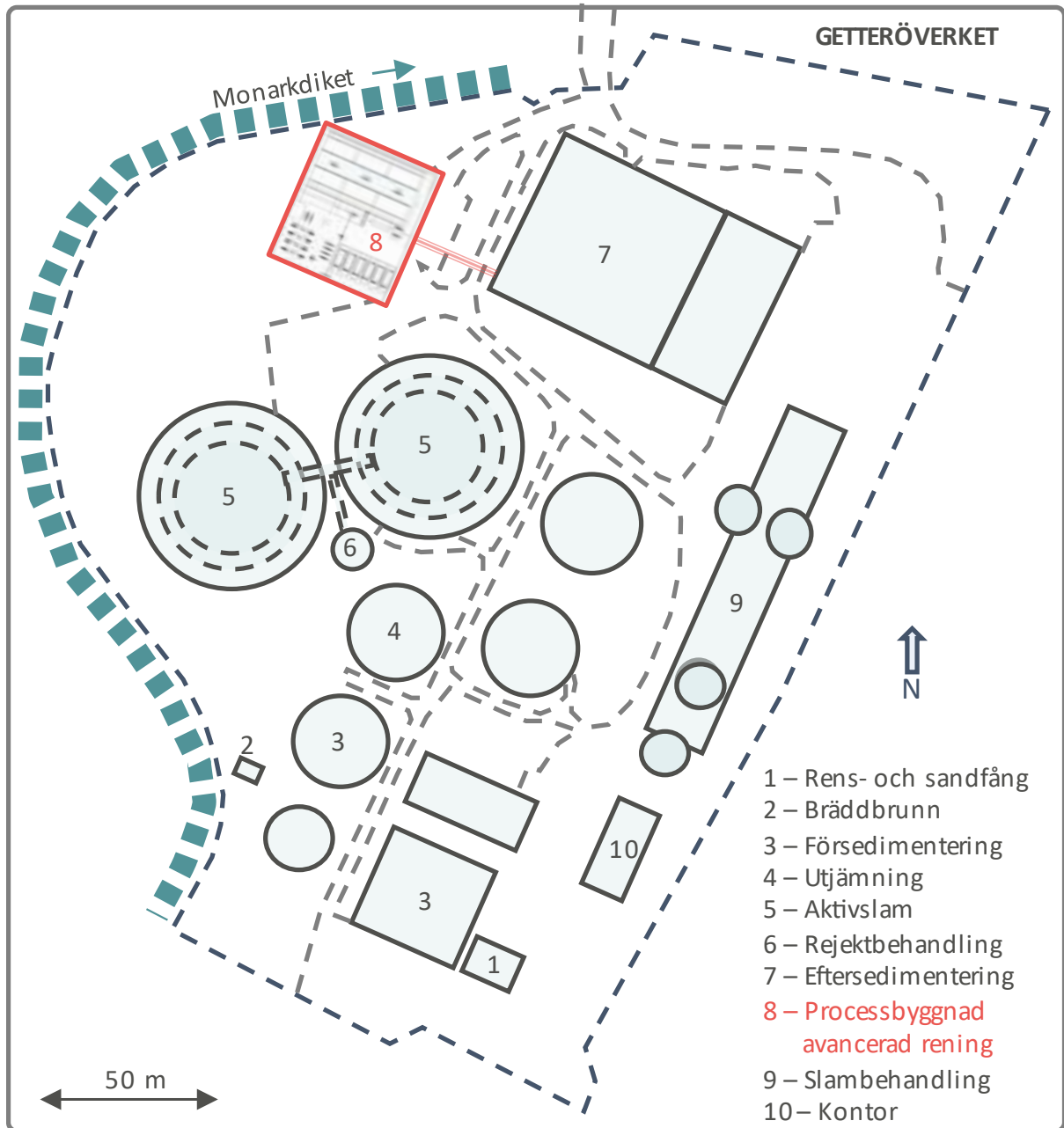
BEIJING, CHINA

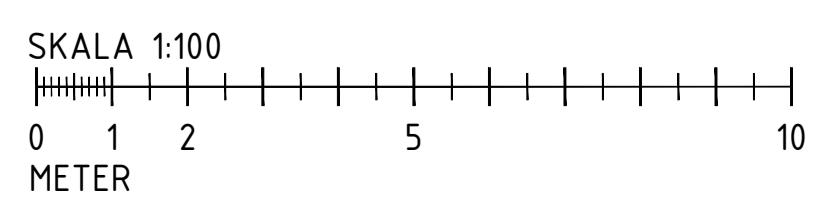
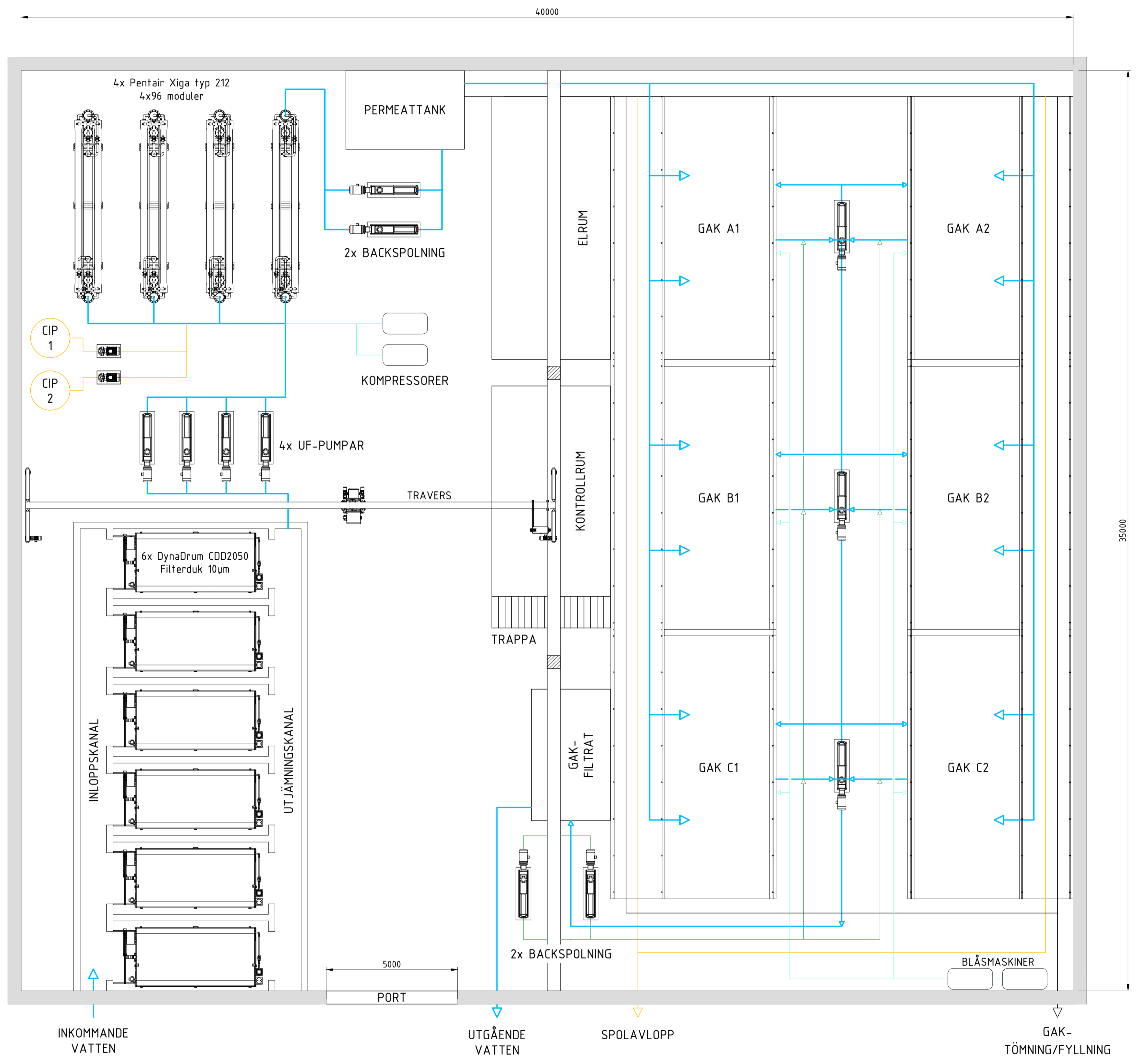
Room 612A
InterChina Commercial Building No.33
Dengshikou Dajie
Dongcheng District
Beijing 100006
China

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

Bilaga 6.1 Ritningar principförslag

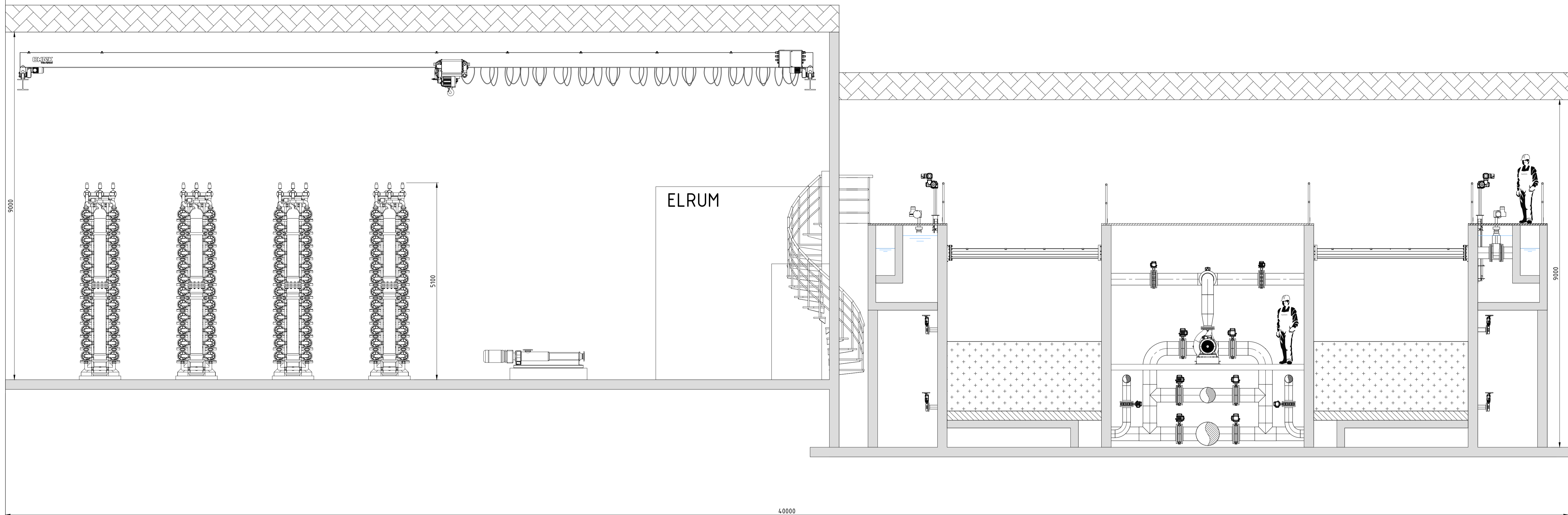
Figur 1. Områdeskarta med processbyggnaden för den avancerade reningen.





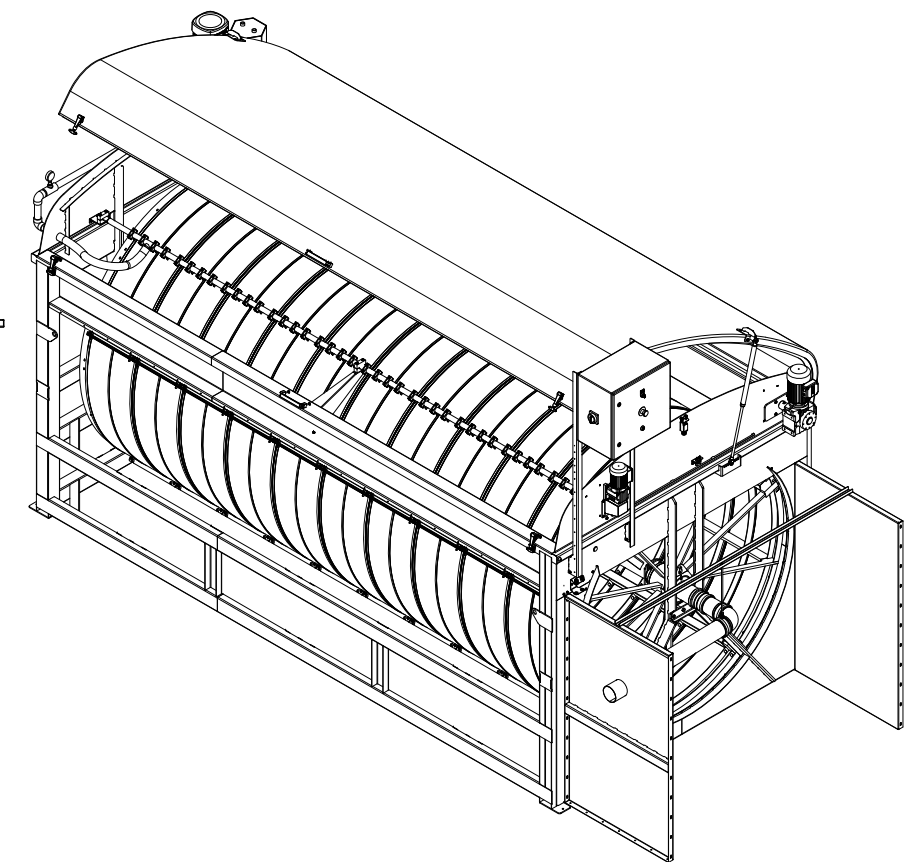
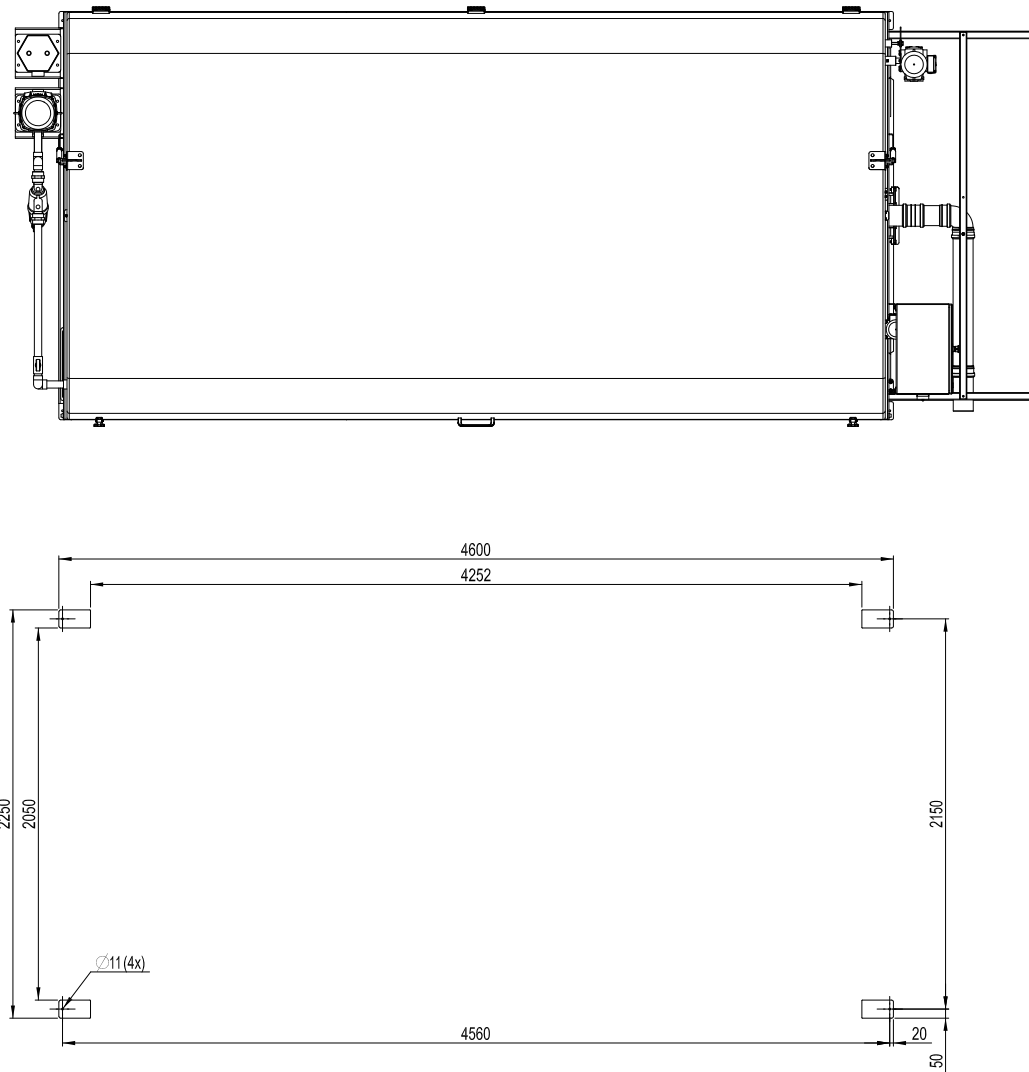
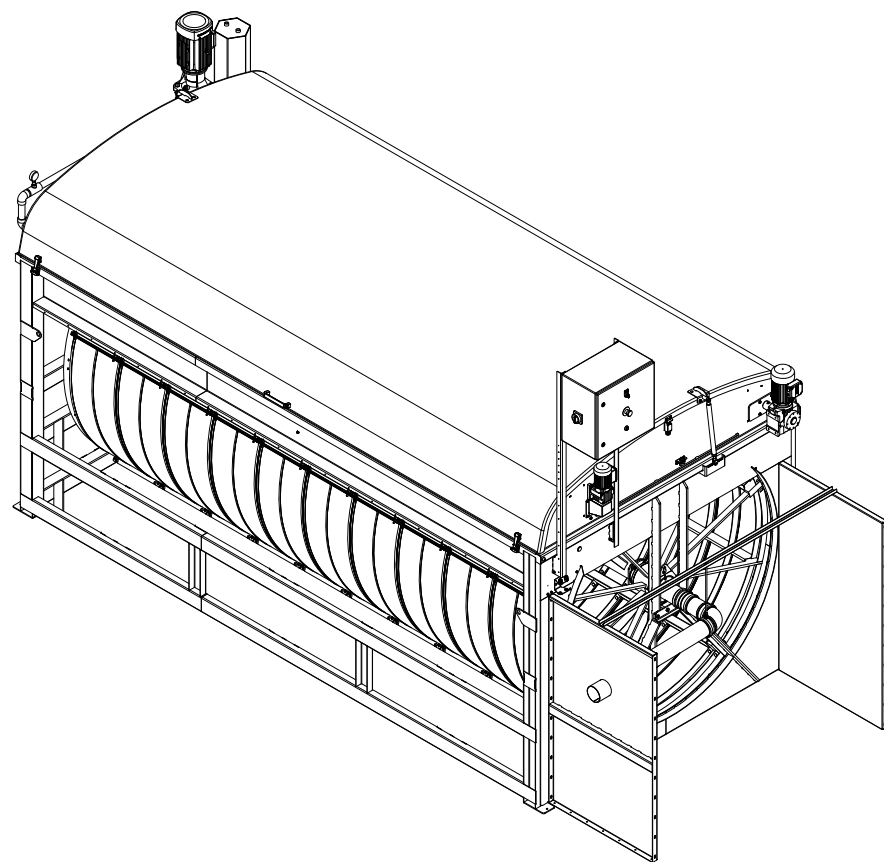
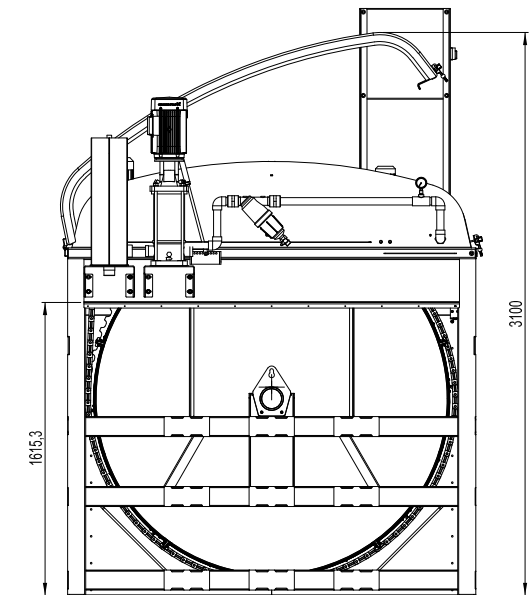
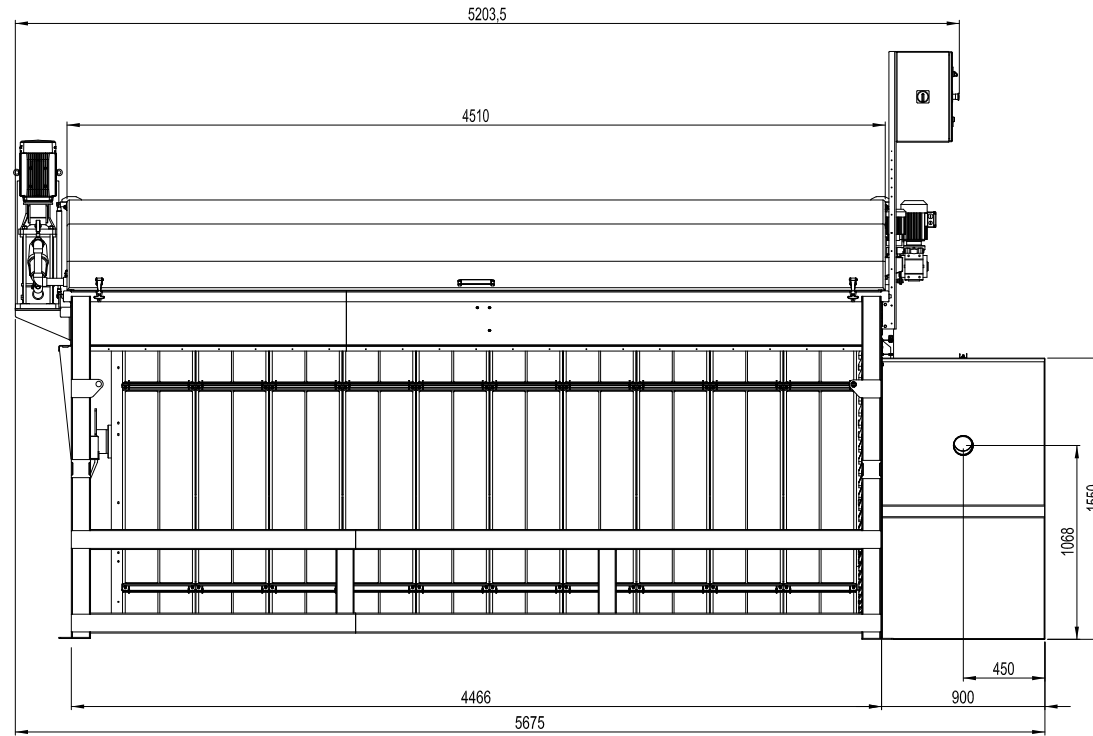
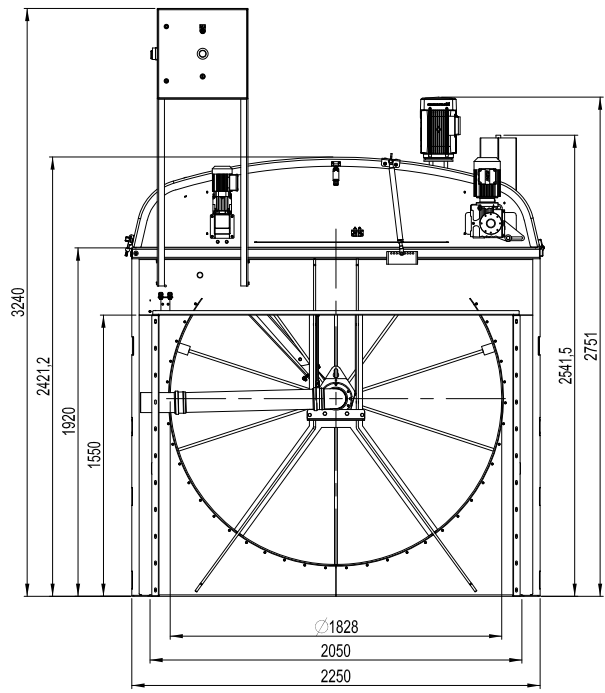
REV	DATUM	SIEN	BESKRIVNING
IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET			
INGENJÖRSFIRMAN RÖRKRAFT			
KONSTRUKTÖR	-	GRANSKAT	-
GRANSKAT	-	UPPDRAGSLEDARE	-
ARBETSNUMMER	3012301	DATUM	2023-09-27
FORMAT	A1	SKALA	1:100
RELATIONSHANDLING	PRINCIPRITNING		
ARBETSPLAN	GETTERÖVERKET		
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-		
GRANSKNINGSHANDLING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



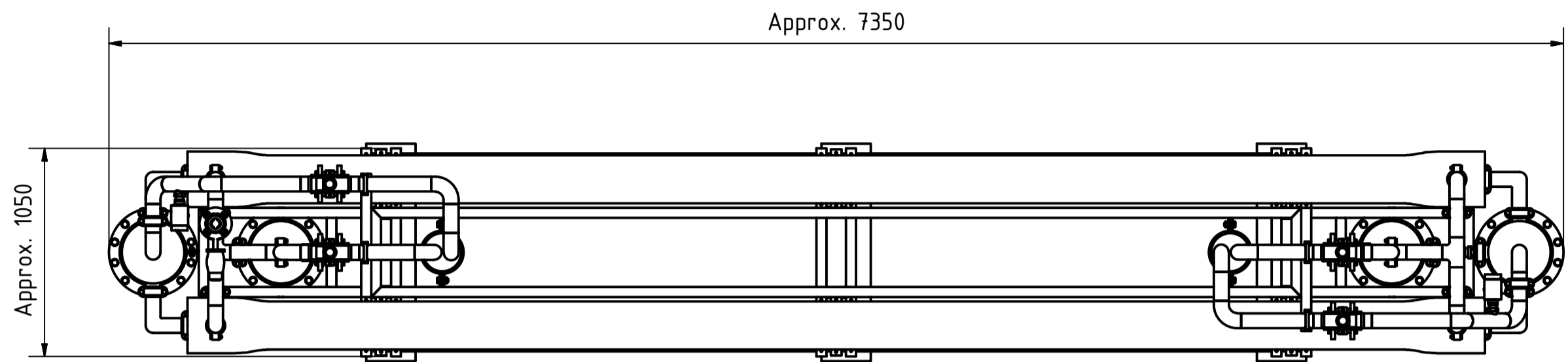
REV	DATUM	SIGN	BESKRIVNING
IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET			
KONSTRUKTÖR		GRANSKAT	
-		-	
GÖDKRÄNT		ÖFFERANSLEDARE	
-		-	
FÖRHANDLINGSNUMMER	DATUM	FÖRHANDLINGSFORMAT	SKALA
3012301	2023-09-29	A1	1:50
RELATIONSHANDLING	PRINCIPRITNING		
ARBETSRIITNING	GETTERÖVERKET		
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-		
GRANSKNINGSHANDLING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

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

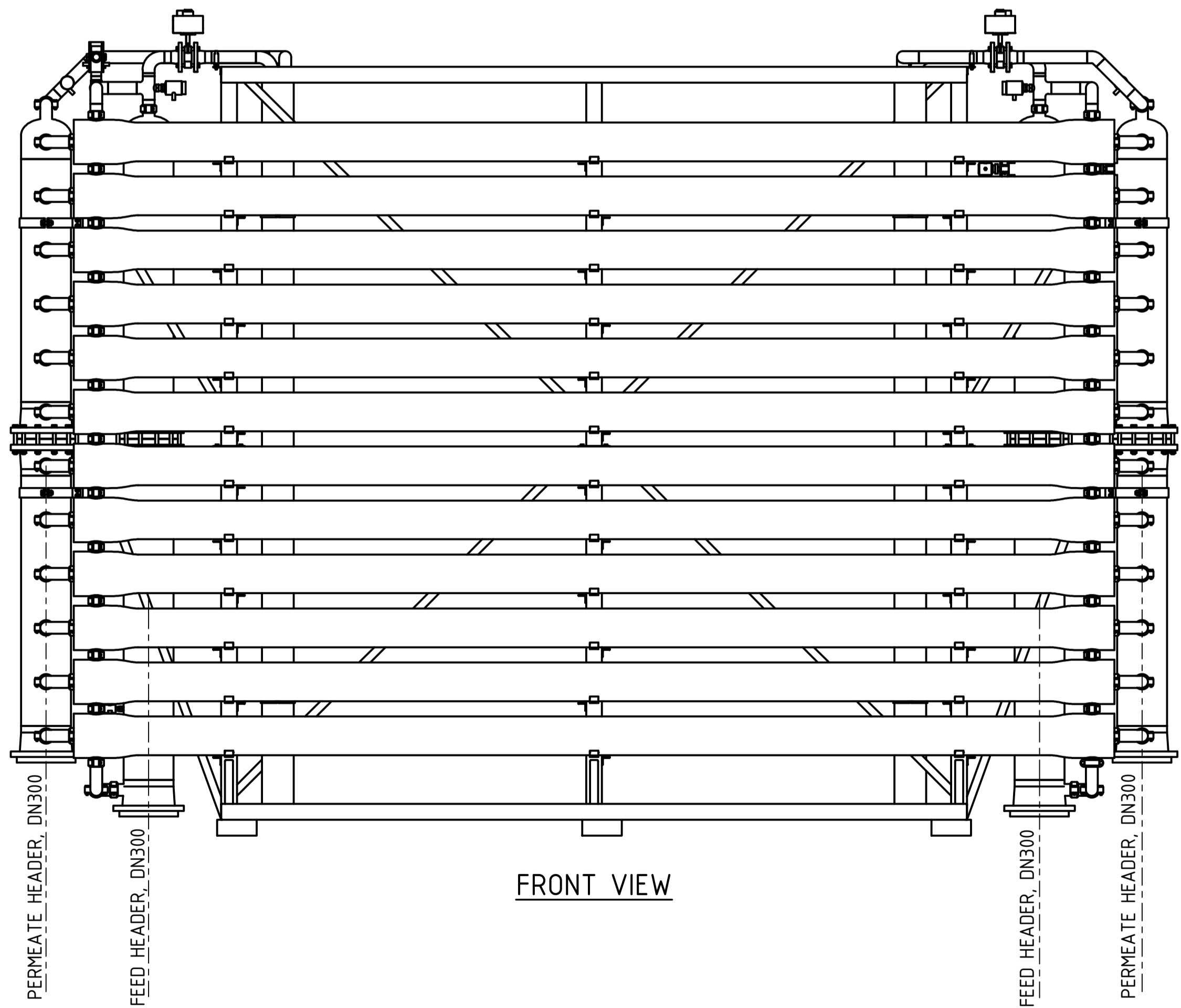


NORDIC WATER	DynaDrum 20 Dimensional Drawing CDD 2050-BBA	Drawn	Designed
		NR	FBE
Project	Drawing number DD77022	Date	Scale
Customer		2018-05-15	1 : 20
	Revision	Production Group	Sheet
		Assembly	1 / 1
Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications acc. to SS-ISO 2768-1-mK. Other measures acc. to digital shape model. All welding according to ISO 5817:2007. Chamfer all sharp edges.		3	

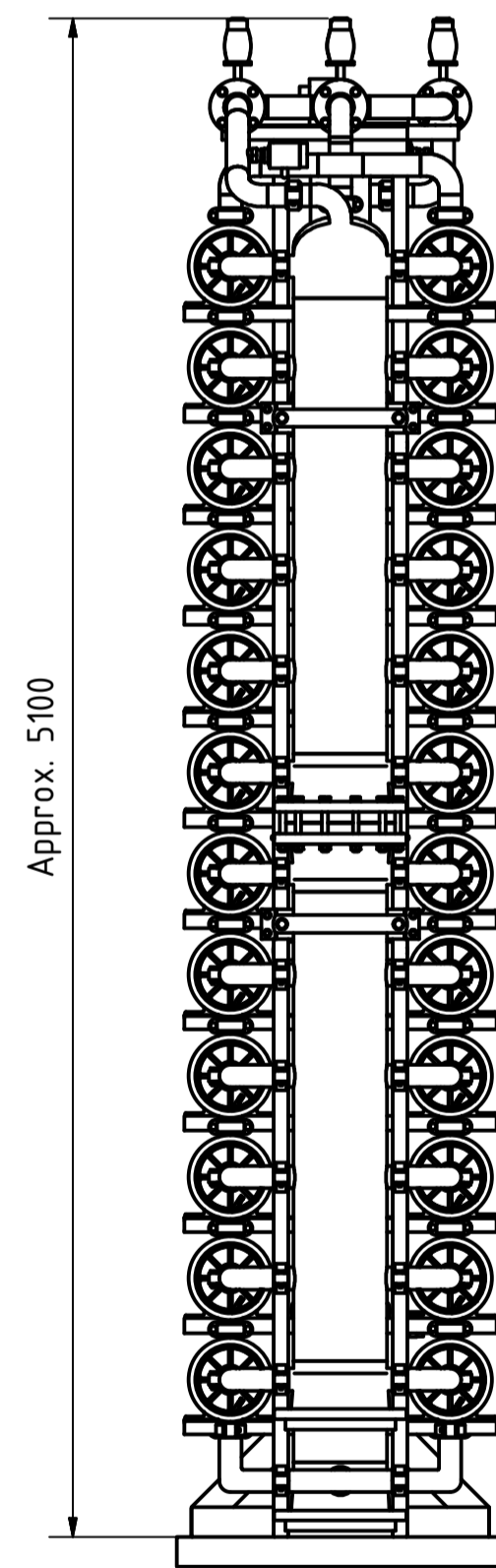
This design and drawing is the property of Nordic Water Products AB, Sweden and protected under international copyright law. The design and drawing is developed solely for use in a project where Nordic Water Products AB supplies the equipment. It shall not be copied, altered or used for any other purpose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



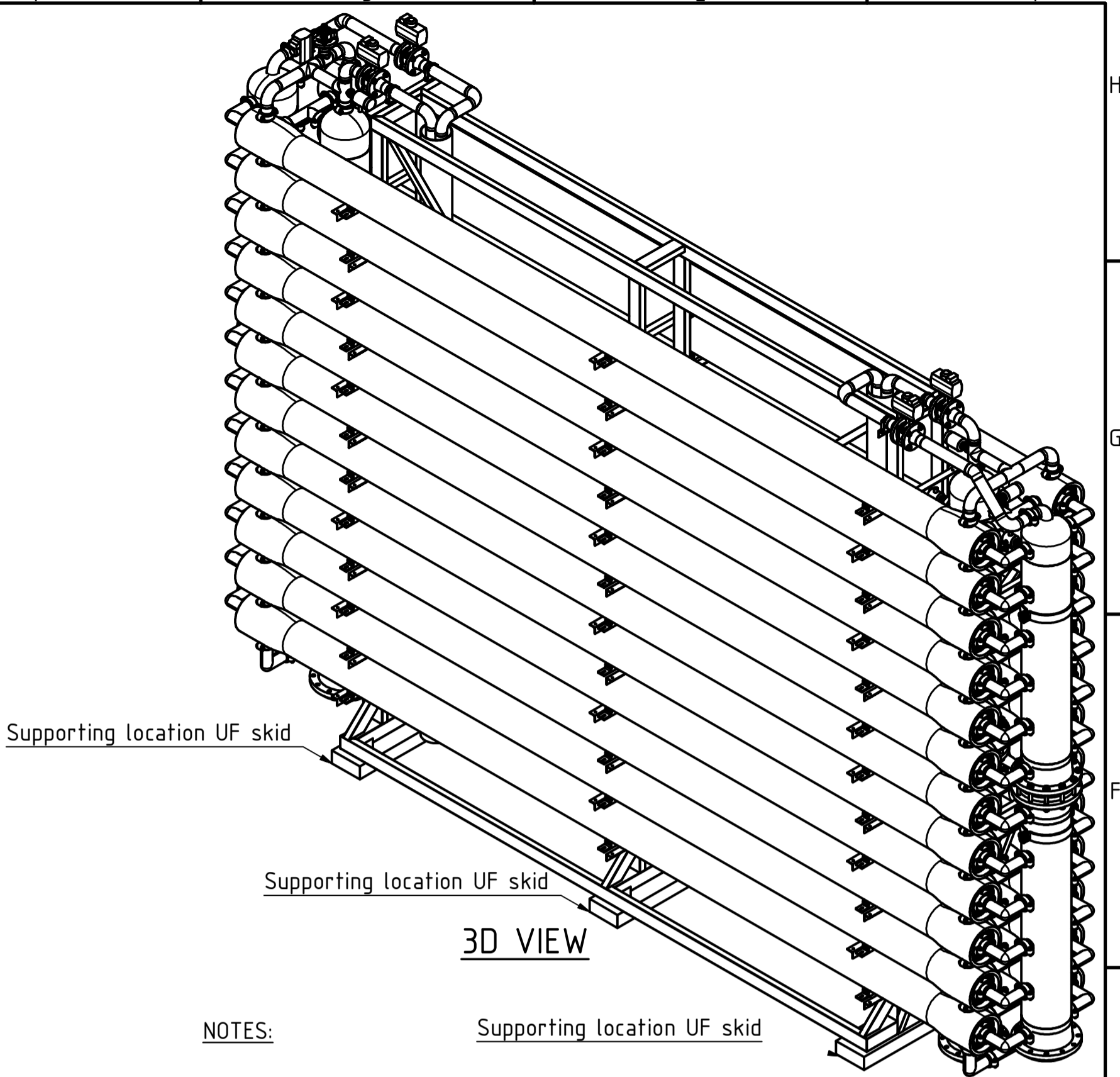
TOP VIEW



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

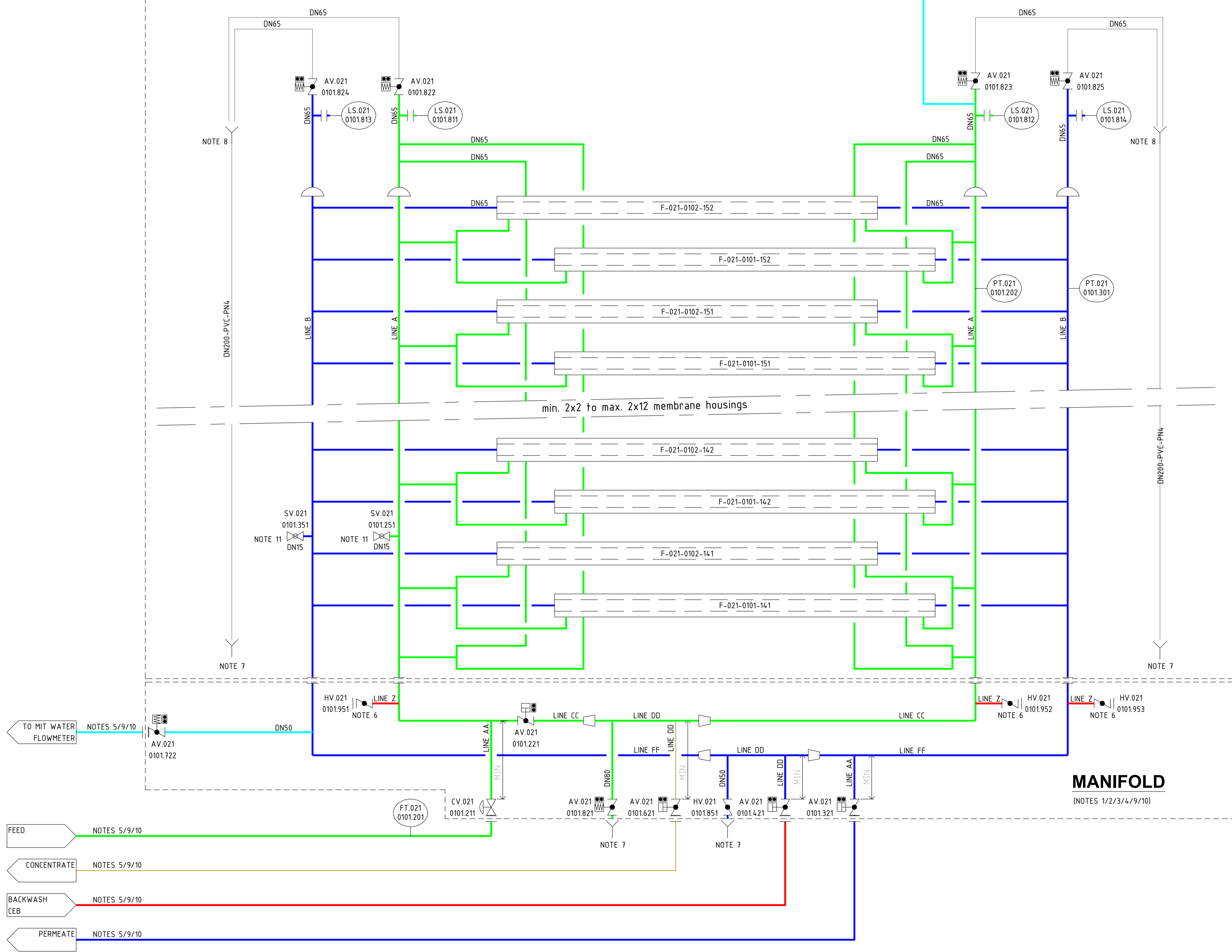
Pentair Water Process Technology BV
 Marssteden 50 - 7547 TC Enschede - The Netherlands
 P.O. Box 741 - 7500 AS Enschede - The Netherlands
 T +31 (0)53 42 87 000 - F +31 (0)53 42 87 001
 E pentairpt@pentair.com - I www.pentair.com

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
Drawing name:	P&ID XIG202B-212B-XF64-UNIT-FUB	Date latest revision:	-
Revised by:	-	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:

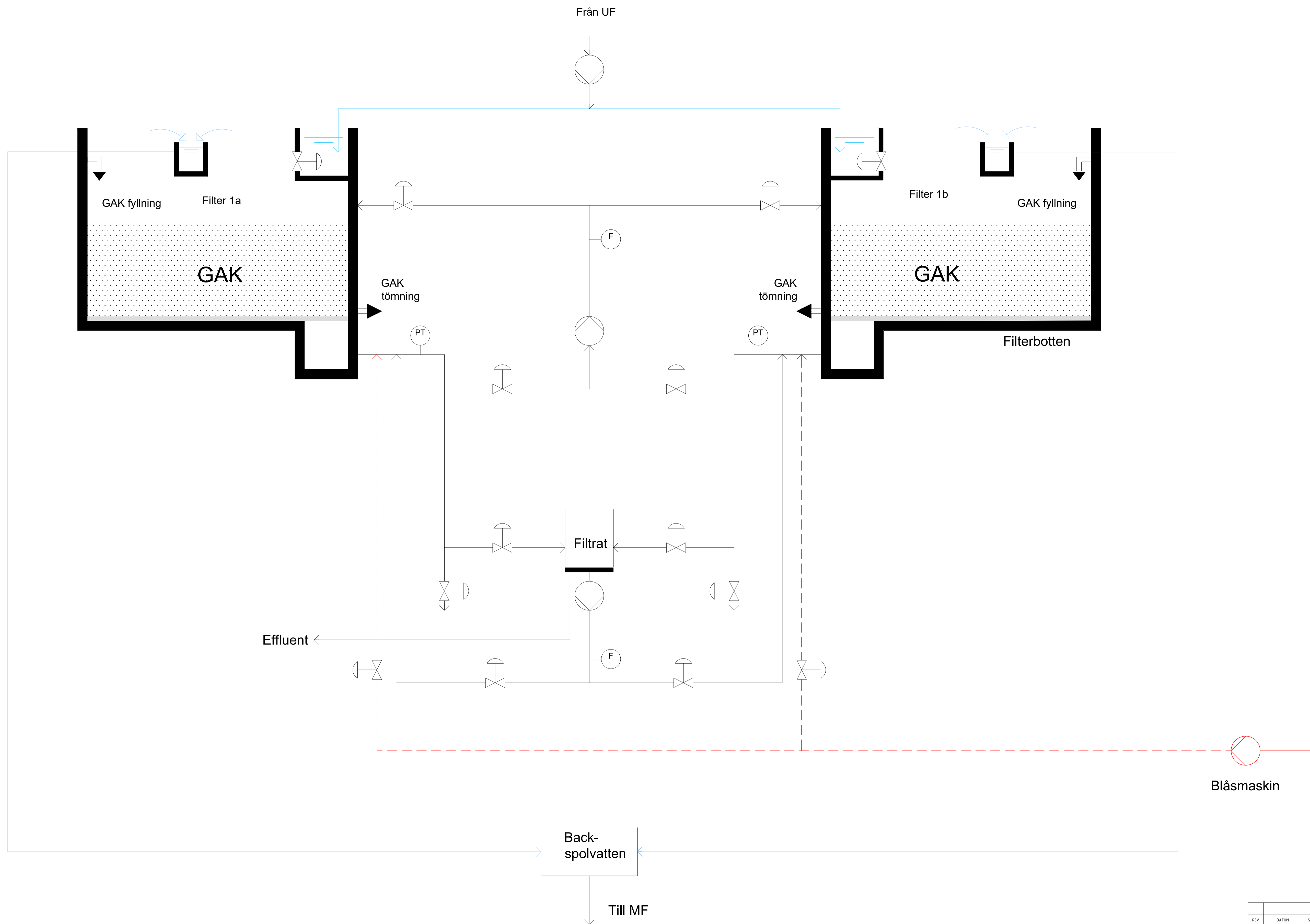
- Feed
- Permeate
- CIP / Cleaning (Backwash)
- Dosing Line (Chemicals)
- Concentrate (Bleed)
- Gasses (Aeration, Compressed Air)
- Steam / Condensate / Cooling
- Hatching (Scope of supply)
- Control / Instrument Line
- General Lines (Multi Purpose)
- Equipment, Instrumentation, Vessels & tanks

MEDIUM / DESCRIPTION :

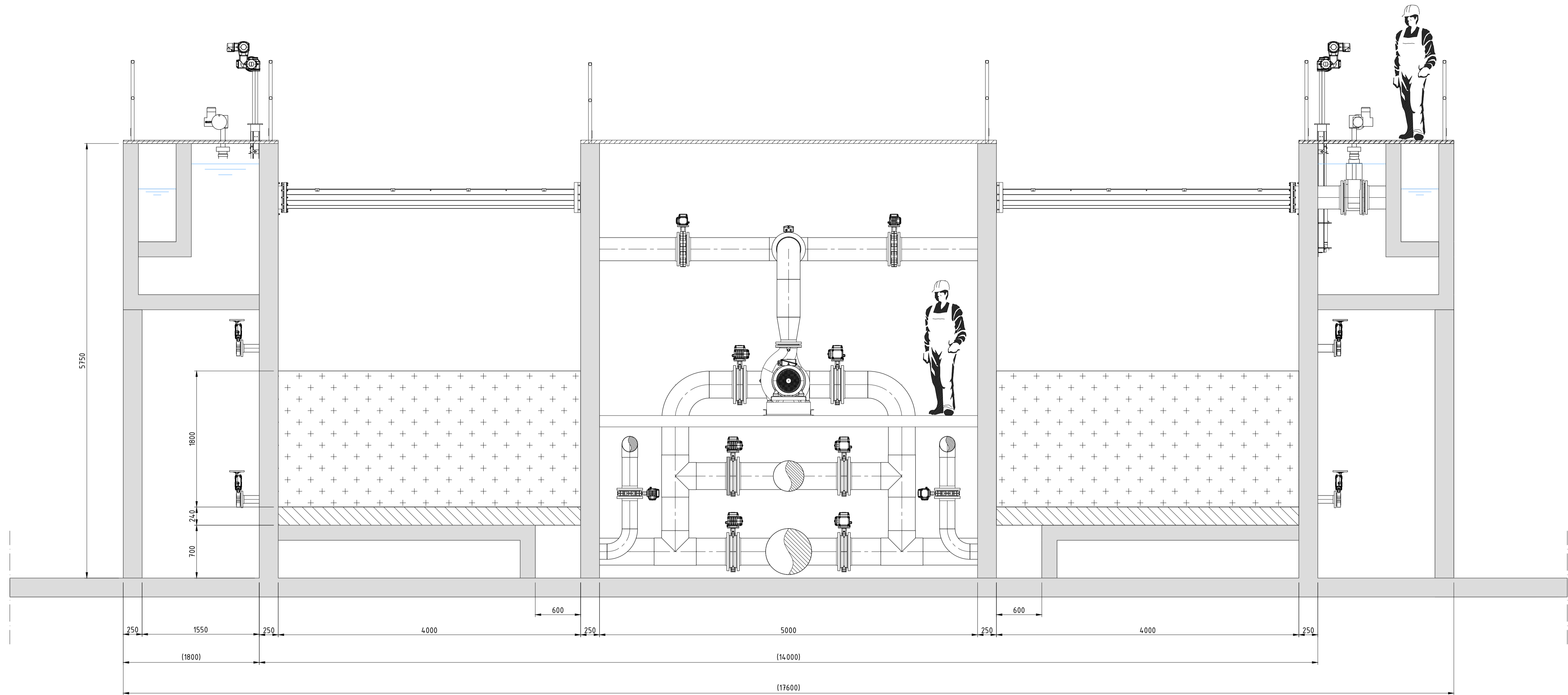
- Hand Driven pump
- Pump (general symbol)
- Pump with foundation
- Centrifugal pump
- Positive displacement pump
- Hose pump
- Membrane pump
- Submerged pump
- Pump Wagon
- Centrifugal Compressor
- Ventilator
- Ejector/Injector
- Dynamic mixer
- Static mixer
- Extruder
- Candle filter
- Separator
- 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

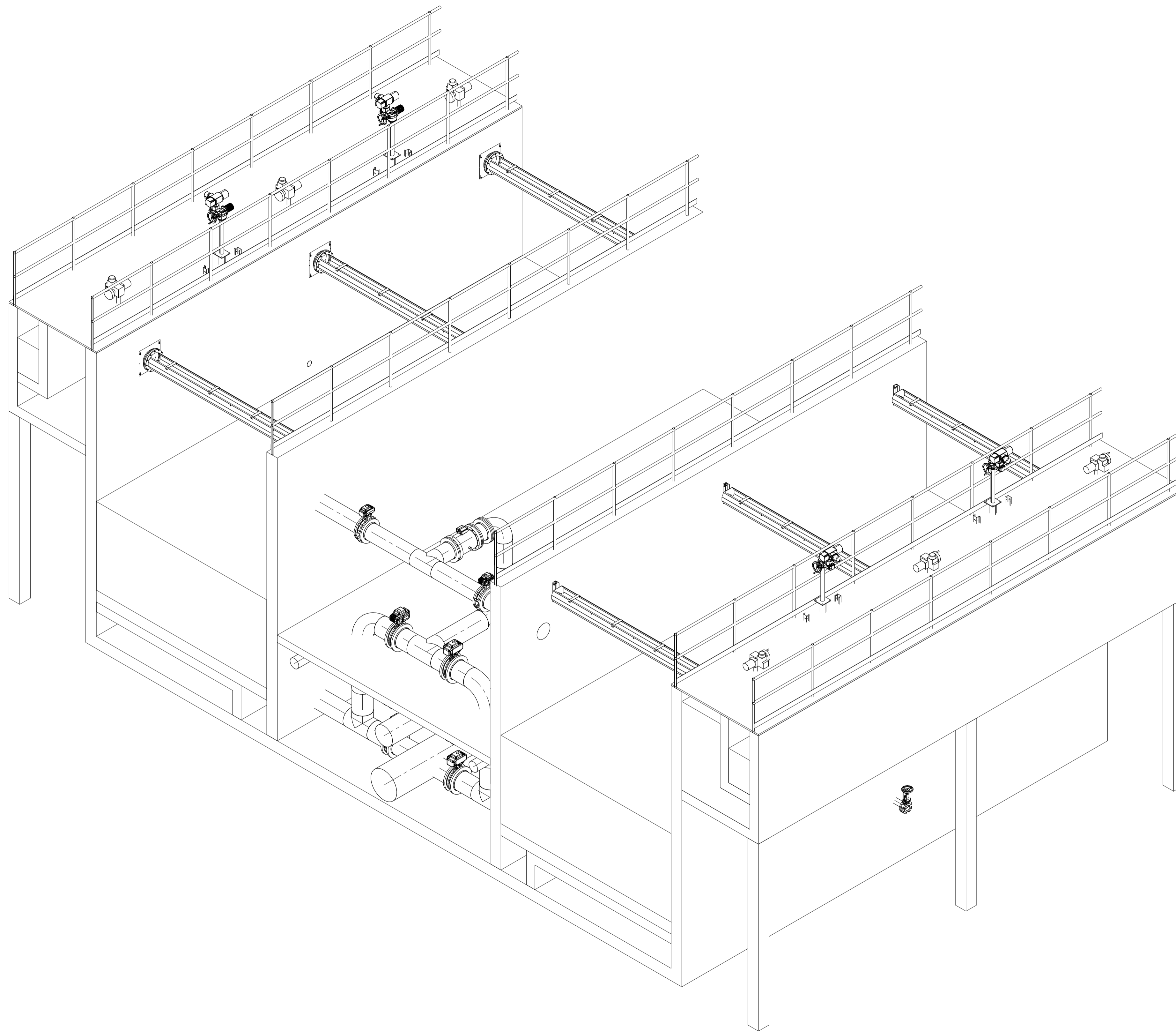
		Pentair Water Process Technology BV Marslaan 50 75c7 TC Enschede The Netherlands P.O. Box 741 7500 AS Enschede The Netherlands T +31 (0)53 42 87 000 F +31 (0)53 42 87 001 E pentairpt@pentair.com I www.pentair.com	
Client : -		Date first issue	11-07-2023
Project : Standard XIGA Unit		Drawn by	EDRR Scale 1:1
Drawing number : XIG-2B-XF64-FUB-2000		Checked by	FMD Sheet 2 of 2
Drawing name : P&ID XIG202B-212B-XF64-UNIT-FUB		Approved by	HLE
Revised by		Status	For Information Only
Approved by		Date latest revision	-
Projection		Revision	-
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		ivl SVENSKA MILJÖINSTITUTET	
KONSTRUKTÖR	-	GRANSKAT	-
GODKÄNT	-	UPPDRAGSLEDARE	-
RÖRKRAFT UPPDRAGSNUMMER	3012301	DATUM	2023-09-14
		FÖRHÅT	SKALA
		A1	NTS
RELATIONSHANDLING	PRINCIPRITNING		
ARBETSRIKNING	TVÅSTEGSFILTER K2		
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-		
GRANSKNINGSHANDLING	SCHEMA		
PRELIMINÄR HANDLING	RITNINGSNUMMER	BLAD	REV
	3012301-08-K2	-	-



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



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	PRINCIPRITNING		
ARBETSITNING	TVÅSTEGSFILTER K2		
FÖRFRÅGNINGSUNDERLAG	-		
GRANSKNINGSHANDLING	ISOMETRISK VY		
PRELIMINÄR HANDLING	RITINGSNUMMER	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
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

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 - Bisfenol A [ng/l]	NP - 4-iso-nonylfenol [ng/l]	OP - -tertiär-oktylfenol [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 - Bisfenol A	NP - 4-iso- nonylfenol	OP - -tertiär- oktylfenol
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
Carbamazepine	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
Clarithromycin	230	**	**	160	140	*	**	**	**	10	120
Diclofenac	360	1600	1400	1400	1400	53	230	1200	1000	6	21
Erythromycin	**	**	**	**	**	*	*	**	**	3	45
Fluconazole	520	180	160	140	140	*	23	130	110	5	18
Furosemide	45 000	6800	4900	3400	3500	*	630	3000	2800	28	85
Ibuprofen	20 000	13 000	9700	*	*	*	*	*	*	28	94
Ketoconazole	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
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
Sertraline	240	580	260	100	200	*	**	78	75	7	22
Sulfamethoxazole	8900	1000	570	180	190	*	39	160	170	5	16
Tramadol	*	*	*	*	*	*	*	*	*	76	250
Trimethoprim	1100	120	120	54	45	*	**	46	37	4	14
Venlafaxine	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
Erythromycin	*	**	*	**	**	*	*	**	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
Ketoconazol	*	*	*	*	*	*	*	*	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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	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
Ketoconazol	*	*	*	*	*	*	*	*	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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	**	**	**	14	47
Flukonazol	160	110	82	6	21
Furosemid	940	380	100	2	6
Ibuprofen	300	220	160	19	65
Ketoconazol	---	---	---	---	---
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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	**	*	**	**	*	*	*	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
Ketoconazol	*	*	*	*	*	*	*	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
Sulfamethoxazol	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	
Erythromycin	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	
Ketoconazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
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	
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	**	**	**	**	**	*	**	**	23	80
Flukonazol	72	65	60	36	72	34	**	73	4	32
Furosemid	800	1200	170	260	430	*	*	180	4	15
Ibuprofen	*	*	*	*	*	*	*	*	20	66
Ketoconazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	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
Ketoconazol	**	*	*	**	*	*	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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	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
Ketoconazol	**	*	*	*	*	*	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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	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
Ketoconazol	**	*	*	*	*	*	*	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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	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
Ketoconazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
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
Sulfamethoxazol	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
Erythromycin	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*	*	*	**	**	**	**	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
Ketoconazol	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	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
Sulfamethoxazol	*	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
Candersartan	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
Hydrochlorthiazid	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
Erythromycin	**	*	*	*	*	*	*	*	*	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
Ketoconazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
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
Sulfamethoxazol	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
Candersartan	1100	1100	350	940	870	800	990	100	170	6	21
Hydrochlorthiazid	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		
Provpunkt	PP1(B)	PP2	PP5	PP7(A)	PP7(B)	PP6	PP8	PP9	UF (Sin)	O3	GPP O3	FS O3	S1	S2	L1	L2	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]
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
Ciprofloxacin	*	**	**	*	*	*	**	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
Erythromycin	*	*	**	*	*	*	**	**	**	*	*	*	**	*	*	*	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
Ketoconazol	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
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
Sulfamethoxazol	*	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. 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
		<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>
Provtagnings v34 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
		<i>LOD</i>	<i>0,06</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>

Tabell 25. PFAS provtagnings v50 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	<i>LOD</i>	<i>LOQ</i>
Substans	211215	211215	211215	211215	211215	211215	211215	211215	211215	<i>[ng/l]</i>	<i>[ng/l]</i>
PFBA [†]	4,50	4,38	3,19	4,22	2,63	2,28	3,59	4,28	4,05	<i>0,10</i>	
PFPeA [†]	2,61	1,93	2,13	2,17	2,47	2,34	2,07	1,42	3,37	<i>0,10</i>	
PFHxA	1,00	1,88	1,41	1,01	1,89	2,15	1,10	1,99	1,59	<i>0,20</i>	
PFHpA	1,30	1,98	1,43	2,21	1,20	1,16	1,05	1,00	1,15	<i>0,07</i>	
PFOA	2,28	3,10	1,51	3,95	2,34	2,39	2,46	2,20	3,09	<i>0,05</i>	
PFNA	0,50	0,28	0,22	0,58	0,41	0,28	0,53	0,27	0,46	<i>0,05</i>	
PFDA	*	*	*	0,10	*	*	0,10	*	*	<i>0,06</i>	
PFBS	0,39	0,72	0,66	0,63	0,51	0,43	0,39	0,55	0,23	<i>0,10</i>	
PFHxS	1,15	1,25	0,52	1,62	0,92	0,91	0,78	0,60	1,23	<i>0,10</i>	
PFOS	1,14	2,36	0,68	3,80	2,19	1,94	3,40	1,23	1,02	<i>0,08</i>	
6:2 FTS	0,82	1,04	0,71	2,83	1,95	2,58	2,52	1,05	1,60	<i>0,06</i>	

Tabell 26. 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 27. 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 28. 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 29. 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 30. PFAS provtagning v17 2023.

IVL-provnr:	312554	312555	312556	312557	312558	312559	312560	312561	312562	312563	312564A	312564B	312565	312566	312567	312568	312569		
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	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]
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 31. PFAS provtagning v28 2023.

IVL-provnr:	321389	321390	321391	321392A	321392B	321393	321394	321395	321396	321397	321398	321399	321400	321401	321402	321403	321404		
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	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]
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

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
	Industriområdet (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	
Pilot O ₃ -GAK	L2 (GAK FS400 2/2)	0,07	1,74	3,90	0,16	0,08	0,12	
	In ozon	0,19	ea	ea	0,26	0,18	0,39	
	Ut ozon	0,06	ea	ea	3,14	0,10	0,33	
Recipient	GAK (FS400)	<LOD	ea	ea	0,14	0,02	0,07	
	GAK (GPP20)	0,03	ea	ea	0,22	0,03	0,57	
	Monarkdiket uppströms (PP6)	ea	ea	ea	6,78	0,97	ea	
	Monarkdiket nedströms (PP8)	ea	ea	ea	2,72	0,13	ea	
Recipient	Industriområdet (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	0,032

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	
Pilot O ₃ -GAK	L2 (GAK FS400 2/2)	5,8	<LOD	21,9	<LOD	7,0	<LOD	
	In ozon	6,2	ea	ea	<LOD	9,6	<LOD	
	Ut ozon	<LOD	ea	ea	<LOD	11,9	80,5	
Recipient	GAK (FS400)	<LOD	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD	
	GAK (GPP20)	6,6	ea	ea	<LOD	<LOD	<LOD	
	Monarkdiket uppströms (PP6)	ea	ea	ea	<LOD	11,3	ea	
	Monarkdiket nedströms (PP8)	ea	ea	ea	14,2	6,1	ea	
Recipient	Industriområdet (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	11,2

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.

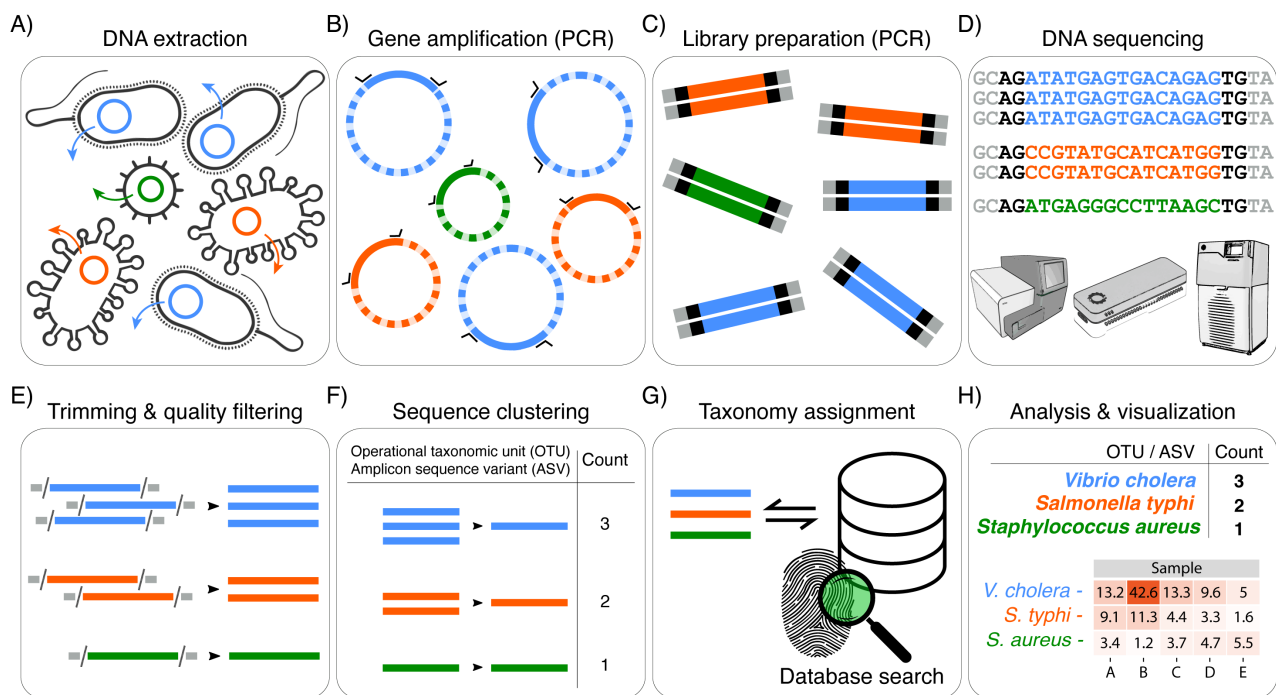


Figure 1: Overview of the general workflow from sample to microbial community profile. **A)** Total community DNA is extracted and **B)** DNA amplicons are prepared using PCR with specific primers (black) targeting e.g. the 16S rRNA gene variable regions for bacterial taxonomic marker genes. **C)** A 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

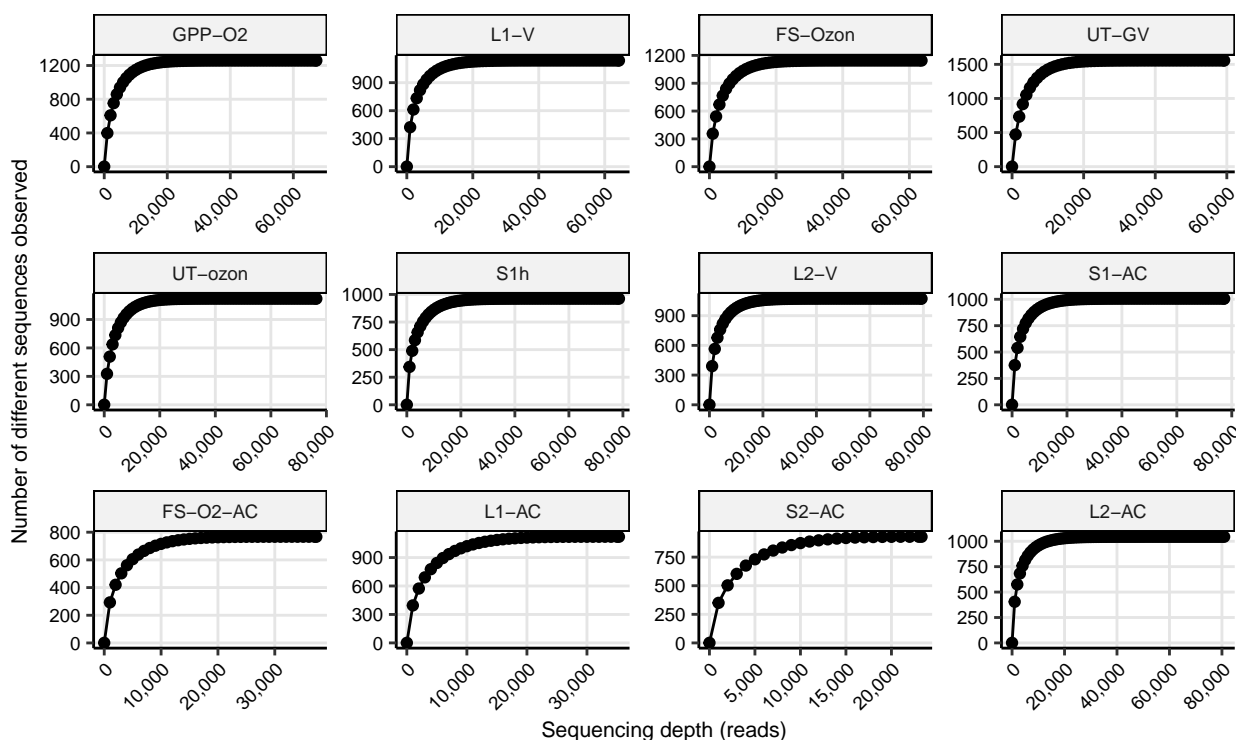


Figure 2: Rarefaction curves for sequencing of samples. The x-axis represents the number of sequences sampled whereas the y-axis depicts the number of observed OTUs.

2.3 Microbial community composition

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

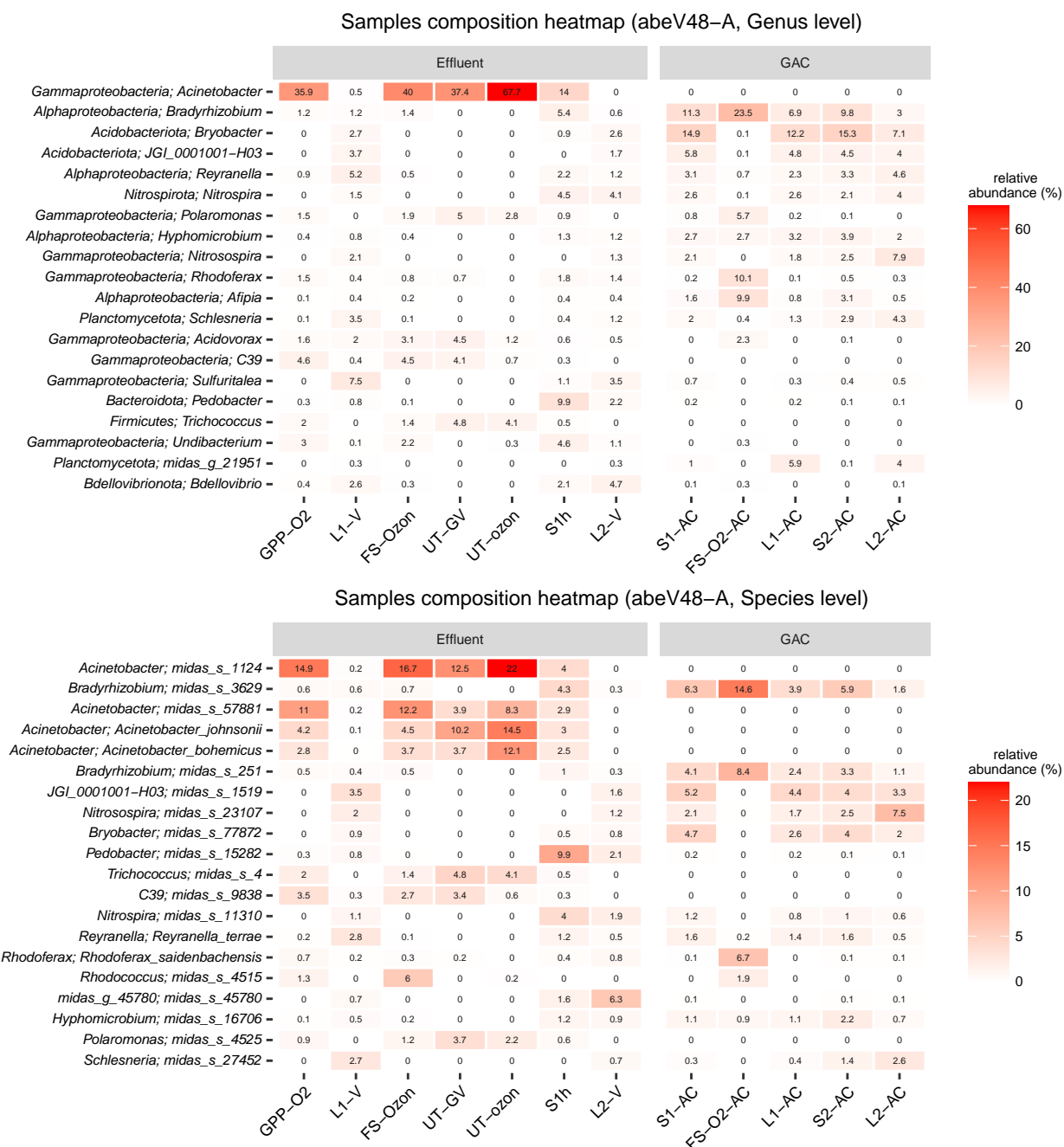


Figure 3: Heatmap of the 20 most abundant genera and species. Top) the most abundant genera in all samples. Where available the OTU's phylum classification is provided along with genus, and if no genus level classification could be obtained, the OTU identification of the sequence mapped to in the database, 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.

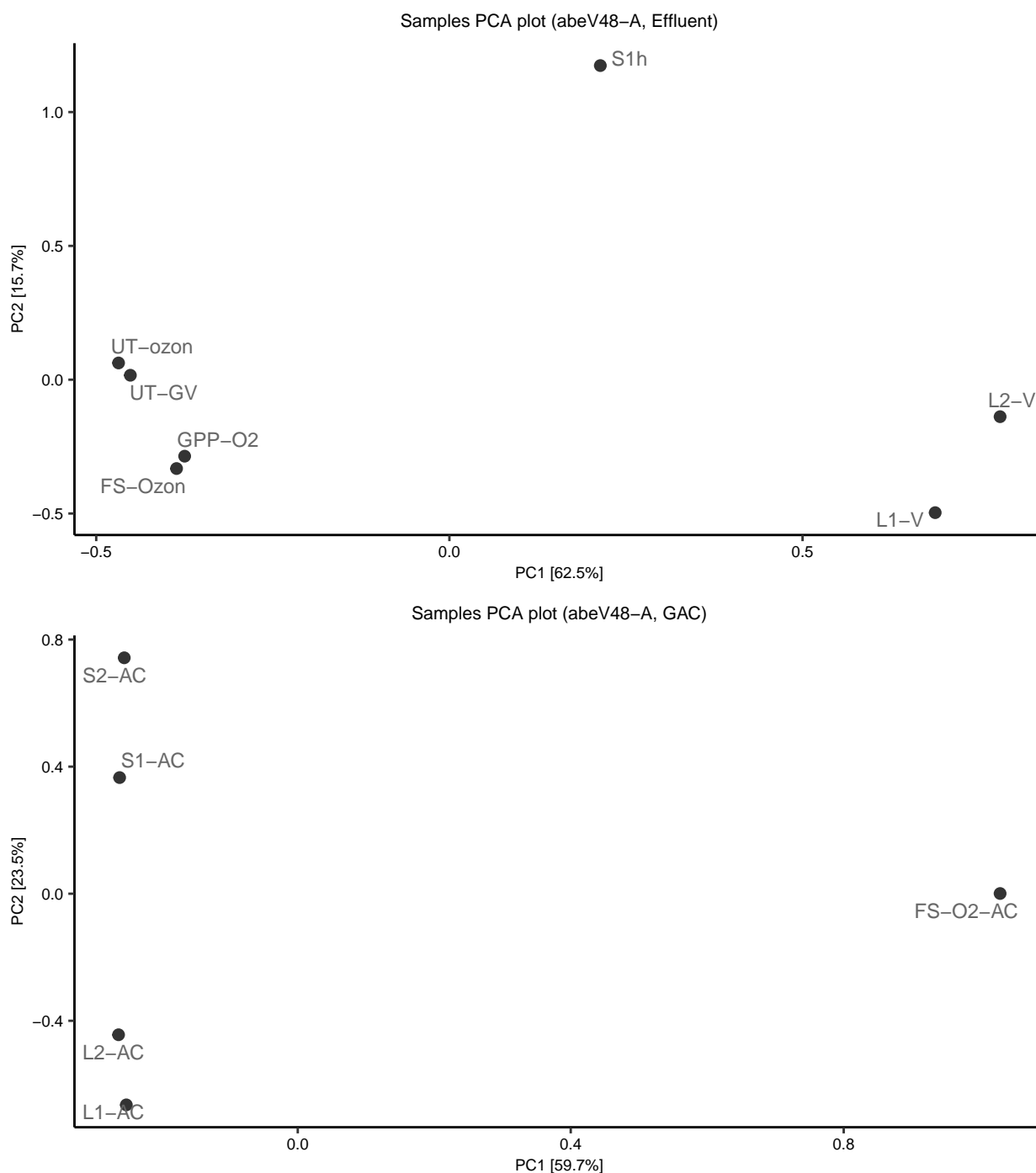


Figure 4: Principal component analysis (PCA). Identification of samples with similar microbial communities using multivariate statistics. Each point represents the microbial community in a specific sample. Distance between the sample dots signifies similarity; the closer the samples are, the more similar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

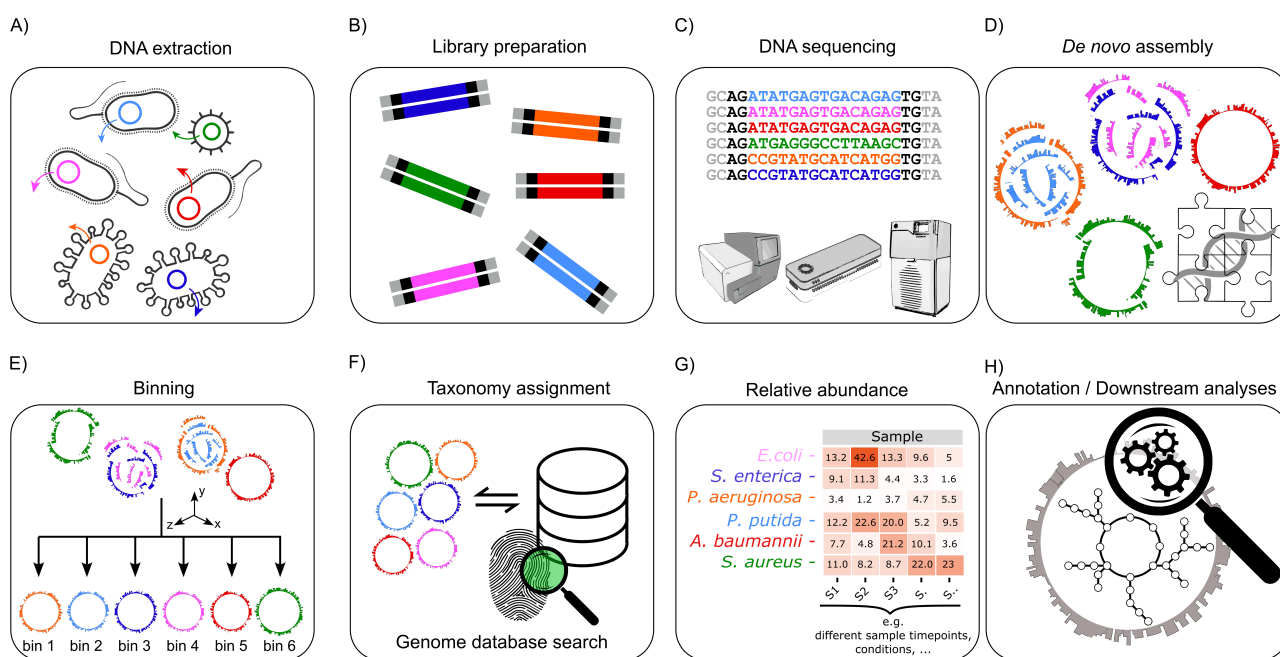


Figure 1: Metagenomics analysis workflow. The metagenomics workflow begins with the extraction of DNA from biomass, e.g. wastewater sludge, gut content, tissue, oil-spills, wood or soil (A). A DNA sequencing library is then prepared from either native (Oxford Nanopore Technologies) or PCR-processed (Illumina) 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.

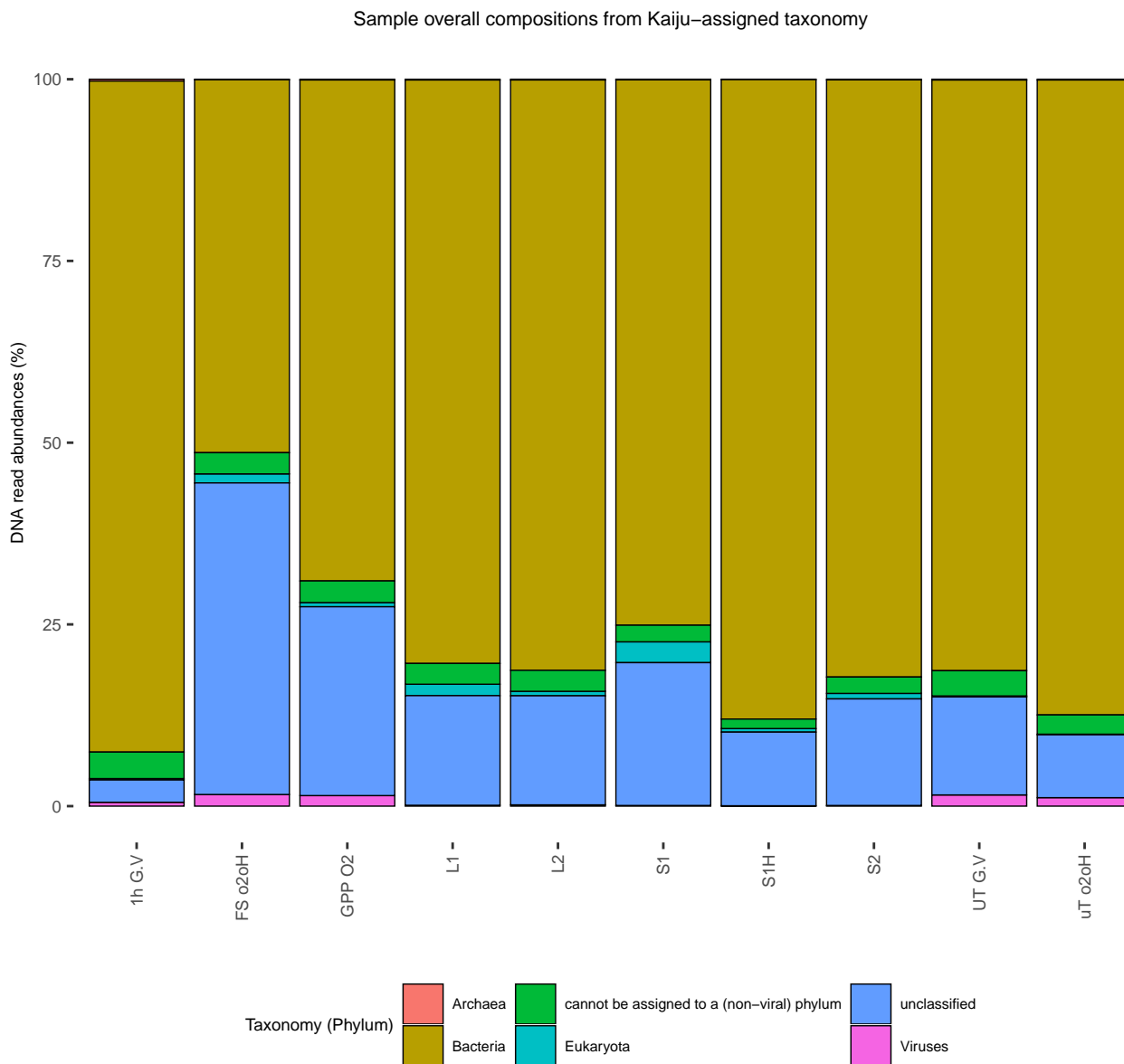


Figure 2: Read classification. Stacked bar plot highlighting the read-based distribution of phyla (based on the classification of reads) among the different domains of life. The NCBI reference database includes 321 mio. microbial protein sequences of both prokaryotic, eukaryotic, or viral origins.

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.

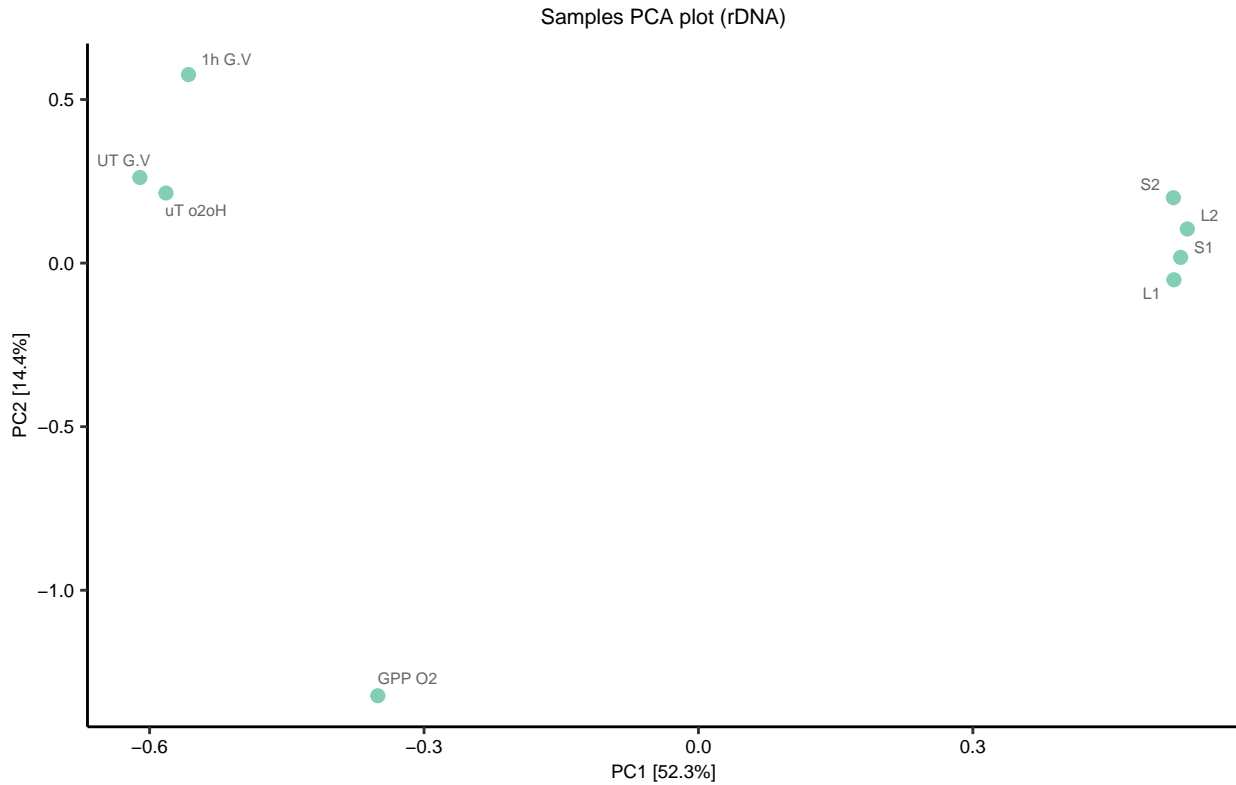


Figure 4: Principal component analysis (PCA). Identification of samples with similar microbiomes using multivariate statistics. Each point represents the microbiome in a specific sample. Point labels correspond to the customer-provided sample names. Distance between the sample dots signifies similarity; 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.

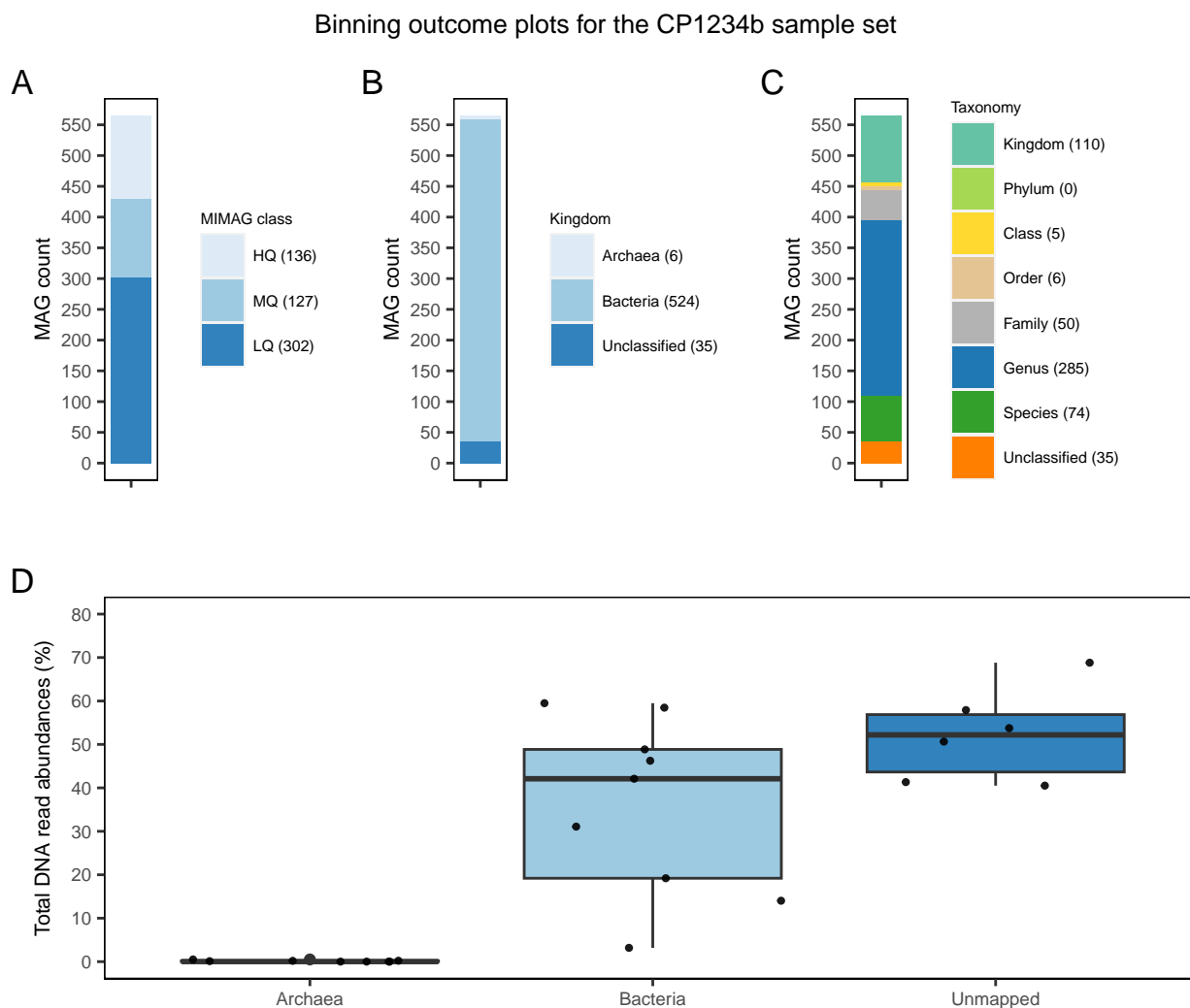


Figure 5: Outcome of binning. Panel A shows the number of extracted MAGs that fulfil the various MIMAG classifications. Panel B shows the distribution of MAGs across the bacterial and archaeal domains, and panel C the corresponding distribution of taxonomy assignments achieved. Panel D shows the relative 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

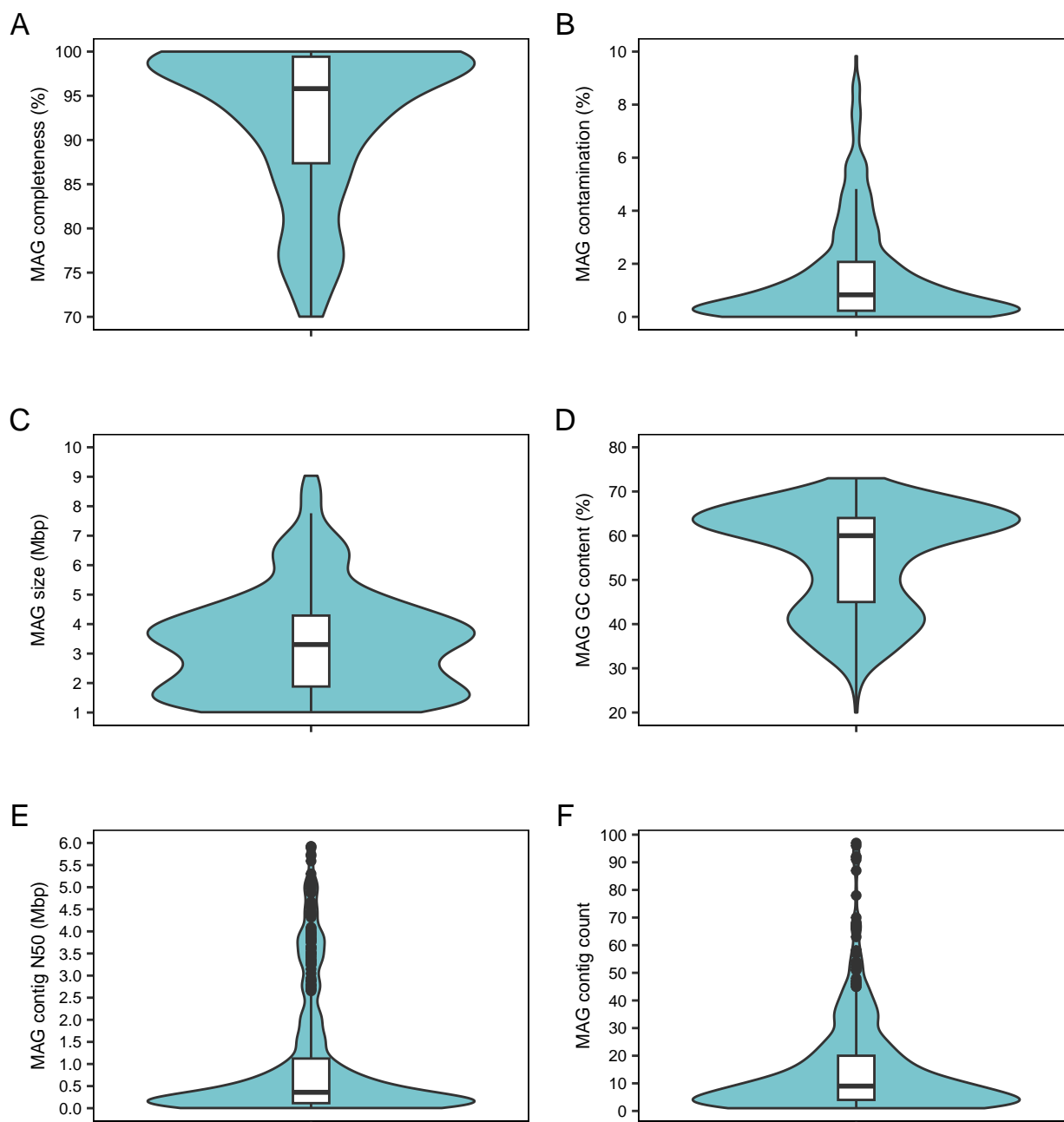


Figure 6: MAG quality assessment. MAG quality parameters depicted as violin plots with the median value and the interquartile range also shown. Panel **A**) MAG completeness (%), **B**) contamination (%), **C**) MAG genome sizes, **D**) MAG relative GC content (%), **E**) the MAGs' contig N50 distribution, 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__Nitrospira multififormis_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.

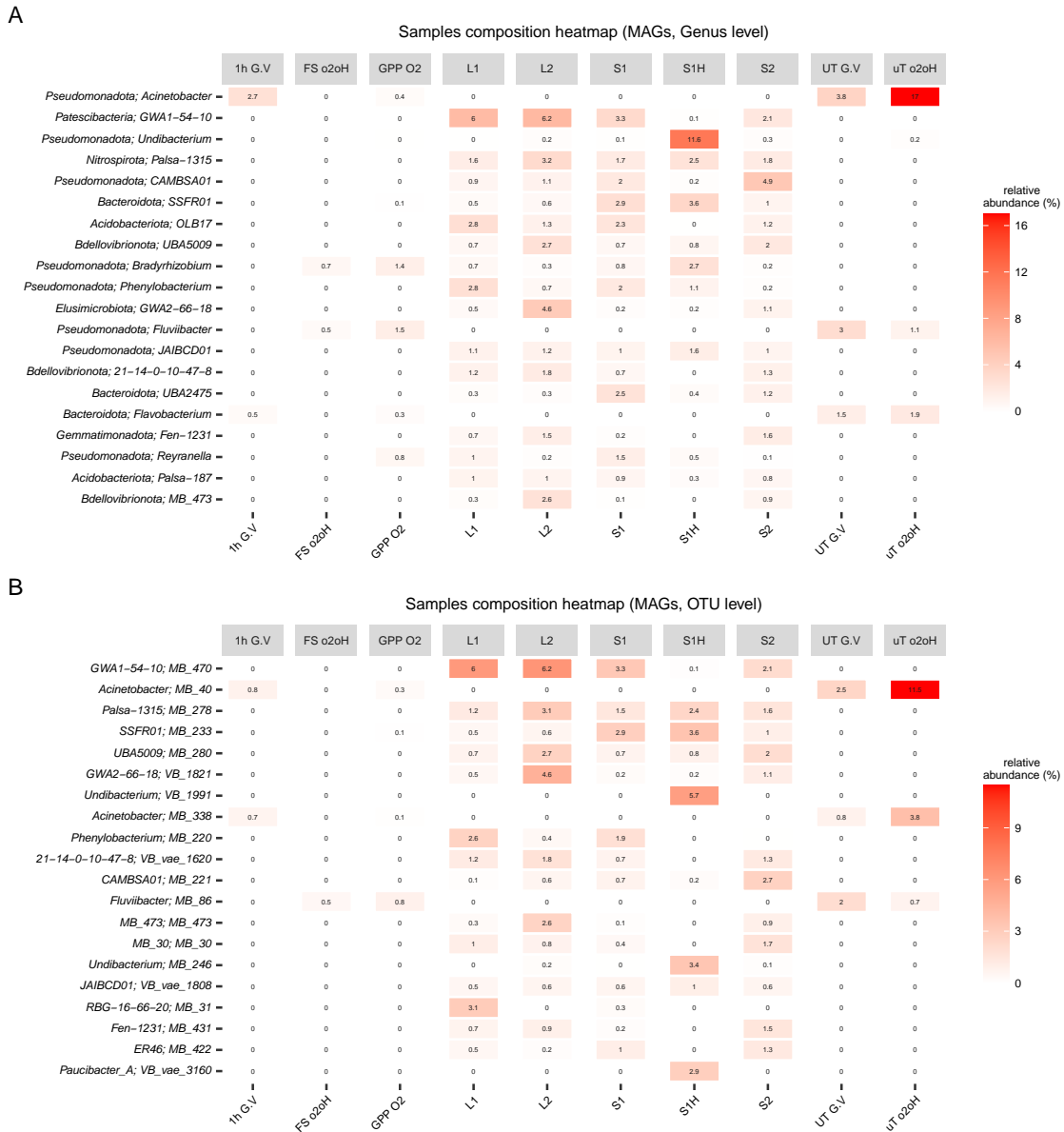


Figure 7: Heatmap of the most abundant organisms. A) The most abundant genera in all samples, and if no genus level classification could be obtained, the MAG identification is given. Values are shown as a normalised fraction of total sequences (%). B) The most abundant MAGs in the samples and their genus-level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

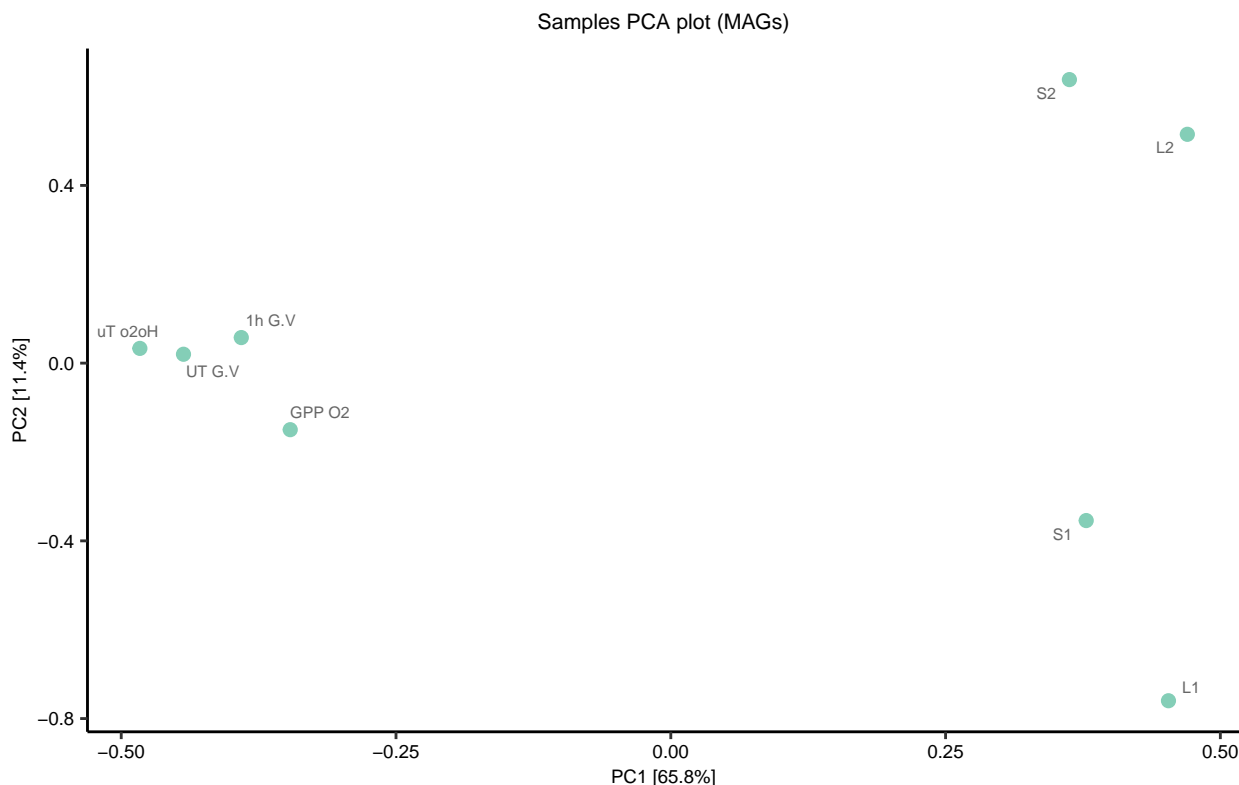


Figure 8: Principal component analysis (PCA). Identification of samples with similar microbiomes using multivariate statistics. Each point represents the microbiome in a specific sample. Point labels correspond to the customer-provided sample names. Distance between the sample dots signifies similarity; 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

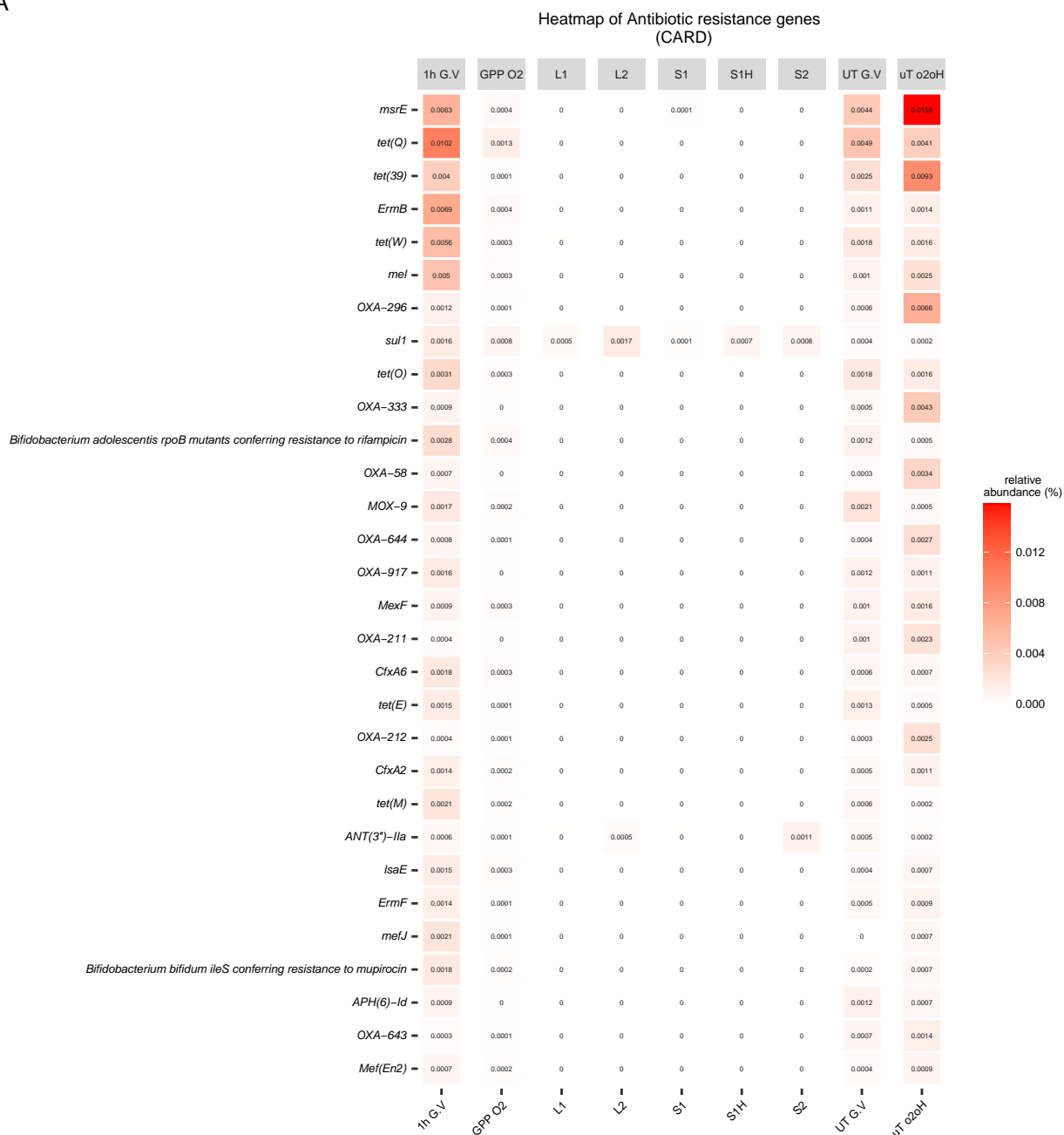


Figure 9: Antibiotic resistance genes. Identification of antibiotic resistance genes (ARGs) across all samples using the the Comprehensive Antibiotic Resistance Database (CARD). Values are shown as a normalised fraction of total sequences (%). The full list is available from the file CP1234b_CARD_abundances.xlsx.

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.

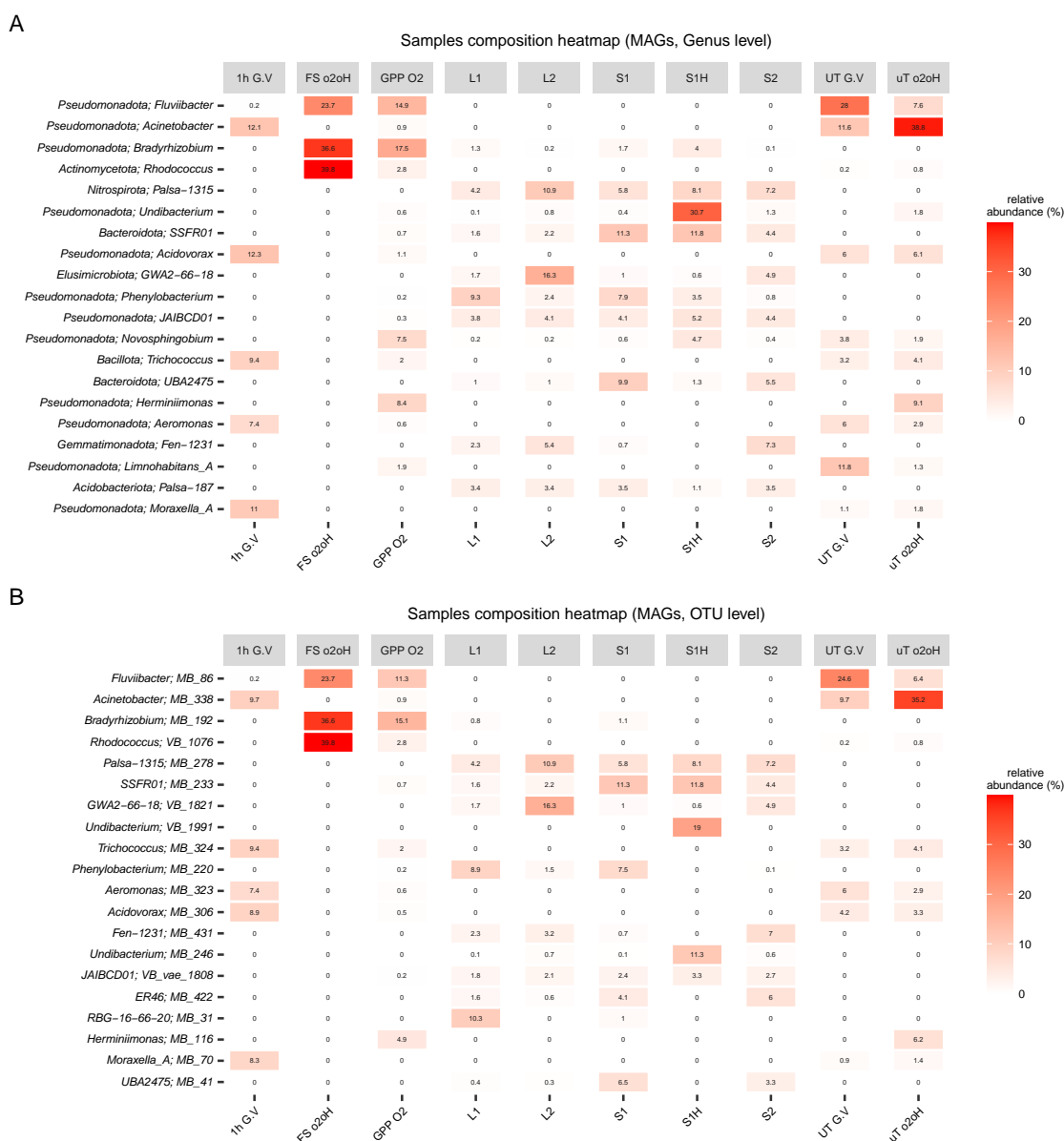


Figure 10: MAG-level heatmap of the most abundant organisms containing identified antimicrobial resistance genes. A) The most abundant genera in all samples. The MAG identification is given if no genus-level classification could be obtained. Phylum-level classification is also provided. B) The most abundant 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	Colloidietyonidae
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.