

Norrtälje kommun, Norrtälje Vatten och Avfall AB

Rimbo ARV

Pilotförsök med läkemedelsrening 2022

2023-01-10



Berndt Björlenius
Uppdragsnr: 2022-001

Björlenius Labs AB
Eva Bonniers Gata 8
129 54 Hägersten
070-736 67 50

Innehållsförteckning

Sammanfattning	5
Beskrivning av pilotanläggningen	6
Sammanfattning av det dagliga arbetet i pilotanläggningen	8
Behandlingsenheter – schematiskt	8
Förbehandling.....	9
Pilotlinjer läkemedelavskiljning – Granulerat aktiverat kol - GAC.....	10
Pilotlinjer läkemedelavskiljning – Ozonering	11
Lablinjer läkemedelavskiljning – Ozonering + Granulerat aktiverat kol (GAC)	12
Lablinjer läkemedelavskiljning – Ultrafilter + Granulerat aktiverat kol (GAC)	12
Ultrafilter	13
Akvariecontainer för fisk- och snäckexponering i avloppsvatten	14
Analysmetodik mm.....	15
Bromid	15
Bromat.....	15
Läkemedelsrester	15
PFAS-ämnen och speciellt PFOA och PFOS.....	16
TOC- totalt organiskt kol och DOC – löst organiskt kol	16
UV och VIS spektroskopi/absorption.....	16
Effektbaserad analys av avloppsvattenprover	16
Försökskörningar och resultat.....	17
Allmän beskrivning av försöksdriften.....	17
Övergripande statistik om försöken.....	18
Inpumpning till pilotanläggningen	19

Förbehandling med grovfilter och sandfilter	19
Interna och externa analyser – resultat för pilotlinjerna	19
Totalt Organiskt kol - TOC	19
Konduktivitet	22
pH	23
UV254 nm - absorbens	24
Förbehandlingen – drift och process.....	24
GAC-filtret i pilotskala – drift och process.....	25
Ozoneringslinjen – drift och process	26
Driftobservationer	26
Ozonerings dos - respons.....	27
Ultrafilter följt av GAC-filter – drift och process	28
Resultat - Läkemedelsrester	29
Rimbo reningsverk.....	30
Pilotlinjer	34
Ozonerings dos/respons-bestämningar.....	37
Läkemedelsavskiljning över kontakttankarna U0-U3 i ozoneringslinjen	40
Fler jämförelser mellan behandlingsmetoderna avseende läkemedelsrester.....	42
Kemiska analyser	42
Kombinationsprocesser - kontinuerliga labbskaleförsök med – ultrafilter + GAC respektive ozonerat + GAC	44
Jämförelse av analysresultaten för läkemedelsrester från tre lab för samma provvatten.....	49
Resultat - Externa analyser - förutom läkemedelsrester	52
Bromid och bromat i utgående avloppsvatten och ozonerat vatten	52
Hormoner	53

Bromerade flamskyddsmedel	53
Nonylfenol	54
PFOS och PFOA	55
Celltester för analys av vattenprover - bestämning av östrogena m fl effekter	57
Övriga observationer under försöken	58
Pilotdata under biologiska tester – zebrafisk och dammsnäckor	58
Multikriterieanalys - processval	61
Diskussion och slutsatser av pilotförsöken	62
Tack.....	63
Bilagor.....	64
Bilaga 1 Sammanställning av läkemedelsanalyser - UTG Rimbo ARV	64
Bilaga 2 Sammanställning av läkemedelsanalyser - O3+SF Rimbo ARV	65
Bilaga 3 Sammanställning av läkemedelsanalyser – GAC Rimbo ARV.....	66
Bilaga 4 Sammanställning av läkemedelsanalyser – UF + GAC Rimbo ARV	67
Bilaga 5 Sammanställning av läkemedelsanalyser - ozonering + GAC Rimbo ARV	68
Bilaga 6 Pilotförsök Förfilter Absorbans UV254nm	69
Bilaga 7 Pilotförsök O3+SF respektive GAC - Absorbans UV254nm	70
Bilaga 8 Pilotförsök O3 + Uppehållsvolymer U0-U3 Absorbans UV254nm	71
Bilaga 9 Kombinationsprocesser labförsök UF+GAC resp O3+GAC Absorbans UV254nm	72

Norrtälje kommun – Norrtälje Vatten och Avfall AB

Pilotförsök med läkemedelsrening 2022 vid Rimbo reningsverk

Sammanfattning

Pilotförsök med läkemedelsrening och tillhörande fiskexponering genomfördes på Rimbo reningsverk under första halvåret 2022. Försöken förlöpte bra efter det att ordinarie driftorganisation kommit till rätta med slamflykt från efterfällningssteget och efterföljande sandfilter. De första veckornas pilotförsök stördes av slamflykten, vilket gjorde att den planerade försöksperioden sköts fram i tiden tre veckor. Resultaten av pilotförsöken bedöms som relevanta för ett principförslag för läkemedelsrening och senare dimensionering av ett läkemedelsreningssteg för Rimbo reningsverk.

Utvärderingen visar att avskiljningen av kvarvarande läkemedelsrester i dagens utgående vatten kunde uppgå till 95% med aktiverat kol och 90 % med ozonering. Kombinationsprocesser UF+GAC och Ozon+GAC testades i kontinuerlig större labbskala och visade att ultrafilter avlastade kolfiltret från suspenderad substans och minskade TOC- respektive DOC- belastningen med 15%. GAC-filtret behövde inte backspolas. Spolvolymen för UF-enheten var 60% lägre än spolvolymen för ett motsvarande kolfiltret utan föregående UF. Avskiljningen av läkemedelsresterna var i samma höga storleksordning som GAC-filtret som inte föregicks av ultrafilter.

Kombinationen ozonering + GAC-filter avlastade GAC-filtret från läkemedelsrester och avskiljningen av läkemedelsrester ökade med runt 5% genom kombinationen ozonering + GAC jämfört med enbart aktivt kolfiltrering (GAC). Kombinationsprocessen hade en fördel gentemot enbart GAC-filtrering genom att avskiljningen av oxazepam, clarithromycin och flukonazol förbättrades märkbart, vilket kan vara en fördel om specifika ämnen måste tas bort.

Ett framtida reningskrav för läkemedelsrester kan formuleras på många sätt såsom att kräva att en grupp utvalda och relevanta läkemedelsrester avskiljs till 80%. Förbrukningen av GAC för att minst uppnå denna avskiljning uppgick till 39 g/m³, medan ozonering kräver en ozondos av 5,5-6 g O₃/m³ motsvarande 0,50-0,54 g O₃/g DOC.

Den specifika förbrukning av GAC för kombinationen UF+GAC kol hann under försöken gå ned till 36 g GAC/m³ och medelavskiljningen låg ändå kvar på 92% avskiljning. Jämförelseavskiljningen vid 100 g GAC/m³ var 96% jämfört med 92% med enbart GAC, vilket visar att kombinationen UF och GAC kan ha en viss fördel över enbart rening med GAC.

På motsvarande sätt hann den specifika förbrukning av GAC under försöken med Ozon+GAC gå ned till 53 g GAC/m³ och medelavskiljningen låg på 96% avskiljning. Jämförelseavskiljningen vid 100 g GAC/m³ var 97% jämfört med 92% med enbart GAC, vilket visar att kombinationen ozon och GAC har en fördel genom att förbättra avskiljningen något än med enbart GAC.

Utvärderingen av ozoneringen med sina två olika parallella efterbehandlingssteg visade att förlängd efterreaktionstid i uppehållsvolymer med 5 timmar, gav en något förbättrad rening av ett fåtal läkemedelsrester än sandfiltrering. Tvåmediasandfiltret efter ozoneringen bakades in i de flesta ozoneringsprover.

Pilotförsöken utfördes och avrapporterades av Björlenius Labs AB på uppdrag av NVAA via Ramboll. Rapporten är i första hand ett underlag till principförslaget för läkemedelsreningen vid Rimbo reningsverk men utgör även kunskapsuppbyggnad om läkemedelsrester på reningsverket och hur de kan behandlas.

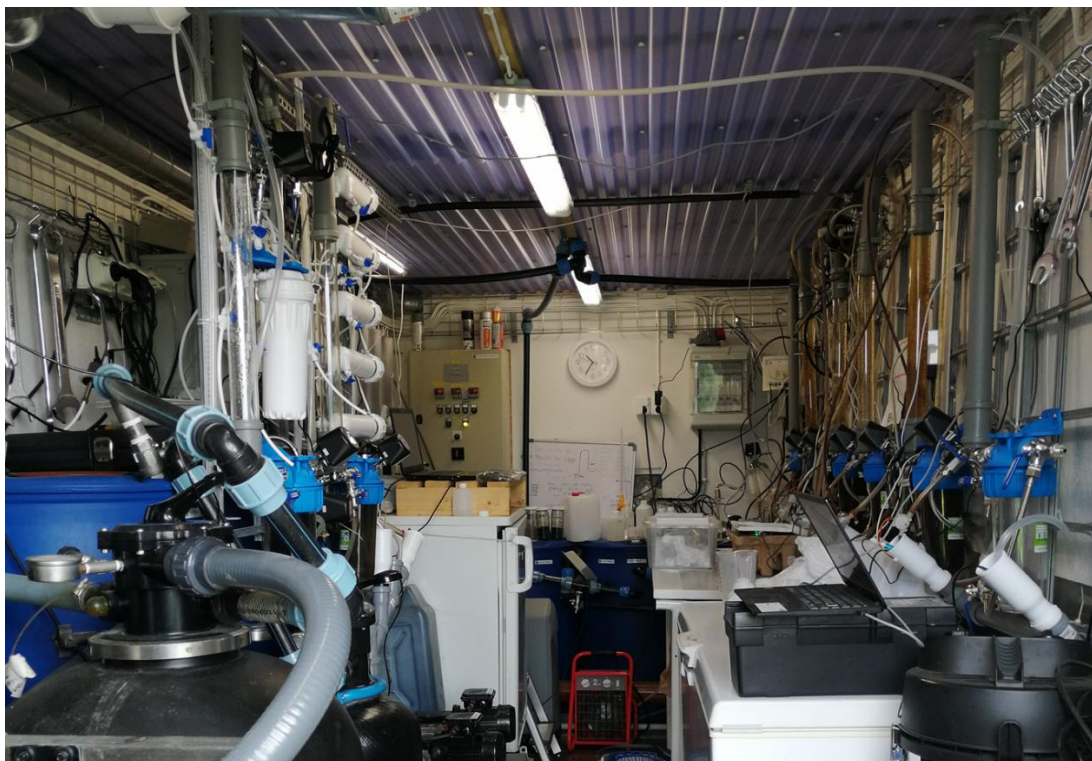
Beskrivning av pilotanläggningen

En pilotanläggning med behandlingsenheter i form av förbehandling, läkemedelavskiljning med aktiverat kol respektive ozonering, samt olika för- och efterbehandlingssteg för aktivkolfiltrering respektive ozonerat vatten sattes upp på Rimbo reningsverk i början av mars 2022 varefter försöken pågick i olika omfattningar t. o. m. 19 augusti 2022. Pilotanläggningen beskickades med ordinarie utgående efterfällt och dynasand-filtrerat avloppsvatten från reningsverket. Det i pilotanläggningen behandlade avloppsvattnet återfördes till pumpstationen före dynasandfiltren.

Pilotanläggningen kompletterades med ultrafilter för att utvärdera betydelsen av avlastning på GAC-filter. Två labfilter med granulerade aktiverade kol (GAC) installerades för att kunna utvärdera ultrafiltrens respektive enbart ozonerat avloppsvattens betydelse på läkemedelsreningen. Slutligen innehöll pilotanläggningen kylar och frysbox för att möjliggöra provinsamling och provförvaring i väntan på analys, figur 1 och figur 2. Pilotanläggningen var inrymd i en isolerad 20 fots container, men vissa delar av ozoneringen placerades utomhus av plats- och säkerhetsskäl, figur 1 och figur 2.



Figur 1. Pilotanläggningen med 5 m höga ozonkontaktkolonner.
Akvariecontainern för fiskexponering i förgrunden och byggnaden med dynasandfilter i bakgrunden.



Figur 2. Interiör av pilotanläggningen. Ultrafilter och pilotlinjer till vänster, labkolfilter till höger.

Sammanfattning av det dagliga arbetet i pilotanläggningen

Pilotförsök med läkemedelsrening och tillhörande fiskexponering genomfördes på Rimbo reningsverk under första halvåret 2022. Försöken förlöpte bra efter det att ordinarie driftorganisation kommit till rätta med slamflykt från efterfällningssteget och efterföljande sandfilter. De första veckorna pilotförsök stördes av slamflykten vilket gjorde att den planerade försöksperioden sköts fram i tiden tre veckor. Pilotlinjerna drevs kontinuerligt med samma inställningar för hela kalenderveckor eller längre. Kontinuerlig insamling av provvatten gjordes med slangpump, till förvaring i kylskåp. Ett urval från de insamlade veckoproven sändes till externt laboratorium för analys av huvudsakligen läkemedelsrester, TOC och DOC. Utöver detta gjordes interna mätningar av temperatur, konduktivitet, pH och UV-ljusabsorbans vid 254 nm, de tre första parametrarna registrerades i många fall kontinuerligt med loggar. Under försöksveckorna tog också i medeltal tre stickprov per behandling för bestämning av konduktivitet, pH och UV-ljusabsorbans. Hydrauliska flöden och nivåer mättes och registrerades för att bestämma uppehållstider, belastningar, doser och igensättningshastigheter mm.

Behandlingsenheter – schematiskt

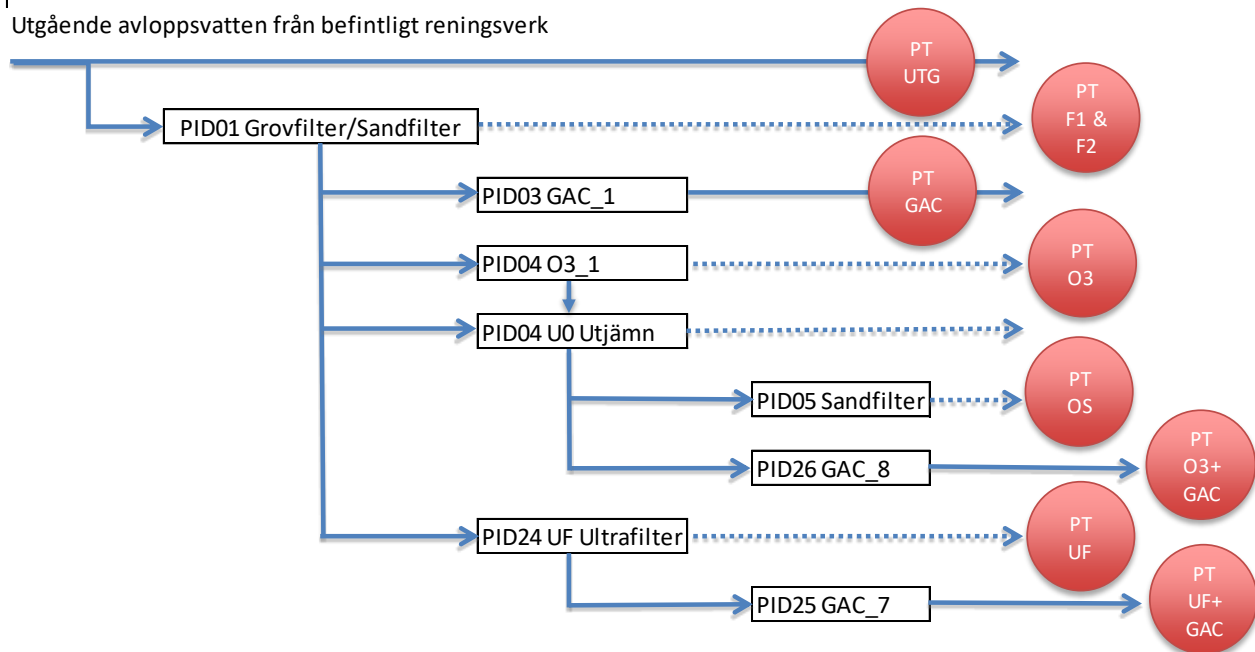
Pilotanläggningen innehöll förbehandling, pilotlinjer med olika delar och reningstekniker samt labkolfilter. Anläggningen matades med utgående, efterfällt och sandfiltrerat avloppsvatten från Rimbo reningsverk som sedan behandlades på olika sätt, varefter vattnets provtogs med stickprover eller med kontinuerligt insamlade veckosamlingsprov, figur 3.

Reningsteknikerna kan delas in i klasser som representerar biologiska, separerande och oxidativa processer, tabell 1.

Tabell 1 Gruppering av de använda lab- och pilotanläggningarna. Labskala med mindre textstorlek

Separationsprocesser	Oxidativa processer
Granulerat kol GAC1	Ozonering, O3
Ultrafilter	Ozonering, O3 + Sandfilter, SF OS
Ultrafilter+ Granulerat kol, GAC_7	Ozonering, O3 + GAC_8

Utgående avloppsvatten från befintligt reningsverk



Figur 3. Schematisk uppbyggnad av pilotanläggningen (PID avser ritning) samt provtagningstyper (— samlingsprov, ---stickprov). PT avser provtagningspunkt.

Förbehandling

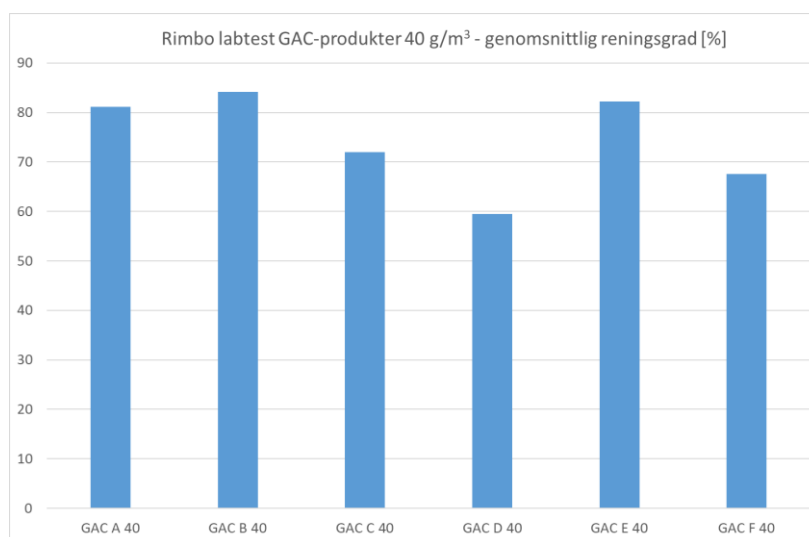
Pilotanläggningens första behandling av inpumpat avloppsvatten bestod av en förbehandling med två grovfilter i serie, utjämnings tank och två seriekopplade sandfilter med var sin filtratt-tank, figur 4. De två grovfiltren hade hål med 3 mm respektive 1,5 mm diameter, varefter det filtrerade vattnet trycktes vidare till en utjämnings tank från vilket det första sandfiltret, F1, hämtade sitt vatten. Sandfiltret F1 innehöll lite grövre sand (1,2–2,0 mm) än det efterföljande sandfiltret F2 (0,4–0,6 mm). Sandfilter F2 hämtade sitt vatten från sandfilter F1s filtratt tank och levererade filtrat till sin efterföljande filtratt tank. Filtrattankarna användes som reservoar för backspolning av respektive sandfilter. Filtrattanken för sandfilter F2 fungerade också utjämnings tank av inkommande avloppsvatten till pilot- och labenheter. Sandfiltren backspolades två till tre gånger i veckan vid behov, typiskt efter att tryckfallet ökat från 0,5–0,6 till 1,5–1,6 bar.



Figur 4. Förbehandling med grovfilter, förfilter och filtrattankar

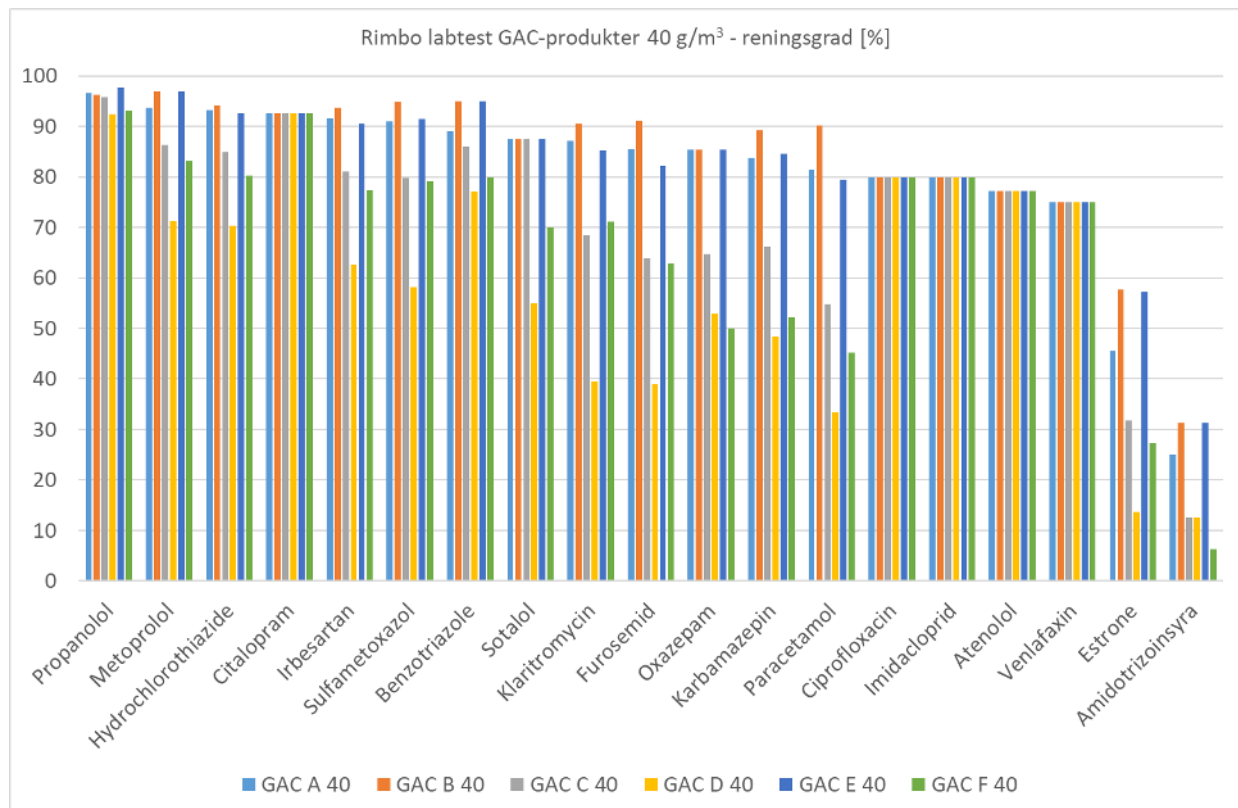
Pilotlinjer läkemedelavskiljning – Granulerat aktiverat kol - GAC

GAC-enheten/linjen bestod av ett nedströmsfilter fyllt med 1 m Jacobi Aquasorb 5000, med kolvolymen 17,6 l. Valet av Aquasorb 5000 baserades dels på tidigare pilottester på sju olika reningsverk, dels på labtester som utfördes på veckoprov på utgående vatten från Rimbo reningsverk. Även här låg Aquasorb 5000 i relativ topp bland de kol som hade hög genomsnittlig avskiljning av läkemedelsrester och dessutom kunde levereras i tid till försöken, figur 5.



Figur 5. Labförsök: Genomsnittlig avskiljningsgrad av 30 läkemedelsrester hos sex olika produkter varav GAC A o GAC B är Aquasorb 5000 i två olika sorteringar av kornstorlek.

De kolsorter som användes i labtesterna var i nämnd ordning, GAC A: Aquasorb 5000 8x30, GAC B: Aquasorb 5000 12x40, GAC C: Aquasorb 6400 12x40, GAC D: Chemviron F400, GAC E: Chemviron Cyclecarb 401 samt GAC Fpp: BG09. Avskiljningen av individuella läkemedelssubstanser varierade mellan substanser och mellan olika kol. Bäst avskildes propranolol och metoprolol medan och östron och amidotrizoinsyra avskildes sämst, figur 6.



Figur 6. Reningsgrad vid labtester av olika GAC-produkter.

GAC-linjen i pilotskala drevs kontinuerligt med ett tillflöde av 50 l/h med förbehandlat, utgående avloppsvatten motsvarande en uppehållstid av ca 21 minuter (Empty Bed Contact Time, EBCT). Filtratet från GAC-filtret samlades upp i en efterföljande utjämningstank för att vid behov kunna pumpas till en exponeringslinje med zebrafisk och dammsnäckor. GAC-filtret backspolades rent från ansamlade partiklar med vatten med en linjär hastighet av 12-13 m/h vatten under 15-30 minuter. Gångtiden beräknades dimensioneringsmässigt till minst två dygn mellan erforderliga backspolningar.

Pilotlinjer läkemedelavskiljning – Ozonering

Sammanfattningsvis drevs ozoneringslinjen kontinuerligt med ett flöde av 250-275 l/h och det ozonerade vattnet leddes efter kontaktkolonnen till ett avslutande sandfilter.

Den ordinarie ozoneringslinjen inleddes med en excenterskruvpump som tryckte förbehandlat, utgående, avloppsvatten genom ett venturidysa som skapade ett undertryck för den i venturidysan tillförda syre- och gasblandningen så att gaserna kan lösas in i avloppsvattnet. Ozonet producerades lokalt i en ozongenerator med maxkapaciteten 10 g O₃/h. Syre koncentrerades lokalt ur luft och trycktes in i den vattenkylda ozongeneratorn. Avloppsvattnet passerade därefter en 5 m höga kontaktkolonn med 15 till 30 minuters uppehållstid (medel 20 minuter) vid de typiska flöden som kördes under pilotförsöken. Utloppet från kolonnen var kopplat till en utjämningstank (U0) varefter det ozonerade vattnet fördelades på tre strömmar: 1) sandfilter, 2) aktivt kol (GAC)-filter i labskala, se nedan 3) provtagning och 4) bräddning. Efterbehandlingsalternativen 1) sandfiltret respektive 2) GAC-filtret installerades för att om möjligt förbättra läkemedelsreningen eller minska den potentiella toxiska effekten av ozoneringen.

Sandfiltret i ozoneringslinjen bestod av ett nedströms tvåmediasandfilter som innehöll 0,5 m Filtralite 2,4–4 mm ovanpå 0,5 m Rådasand 1,2–2,0 mm. Filtret spolades rent från ansamlade partiklar med en luft- och vattenblandning med flödena 10 L/h luft respektive 20 m/h vatten. Gångtiden beräknades dimensioneringsmässigt till minst två dygn mellan erforderliga backspolningar. Filtratet från 1) sandfiltret efter ozoneringen samlades upp i en efterföljande utjämningstank för att vid behov kunna pumpas till en exponeringslinje med fisk och snäckor.

Lablinjer läkemedelavskiljning – Ozonering + Granulerat aktiverat kol (GAC)

Den kontinuerligt drivna linjen med inledande ozonering, följt av ett GAC-filter, kördes parallellt med pilotlinjerna. Det ozonerade vattnet hämtades från utgående utjämningstank (U0) enligt ovan. GAC-filtret drev således parallellt med sandfiltret i pilotskalan. Automatisk backspolning av GAC-filtret gjordes med vatten med flödet 2 L vatten/min under 15 minuter för att i möjligaste mån spola rent GAC-filtret från ansamlade partiklar och järnflockar. Gångtiden mellan erforderliga backspolningar bedömdes vara ett dygn, varför backspolningsautomatiken sattes på en backspolning per dygn.

Lablinjer läkemedelavskiljning – Ultrafilter + Granulerat aktiverat kol (GAC)

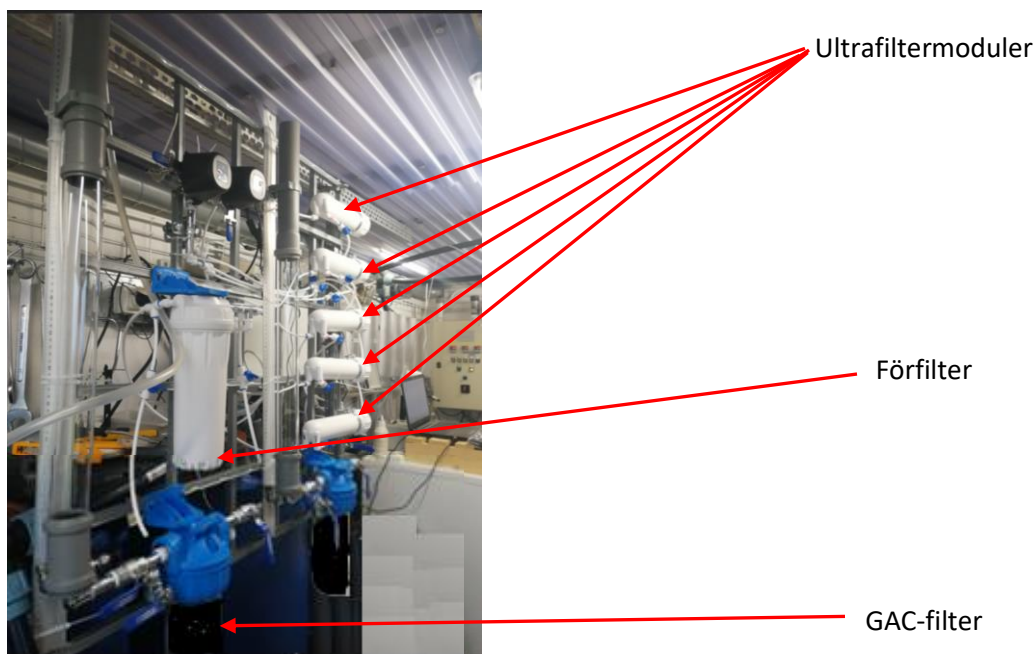
Partikelavskiljande ultrafilter för att avlasta GAC-filter testades i en kontinuerligt driven lablinje med inledande förfilter (60µm) och ultrafilter följt av ett avslutande GAC-filter. Linjen kördes parallellt med de större pilotlinjerna. Filtret spolades rent från ansamlade partiklar och järnflockar

med 2 L vatten under en minut. Gångtiden mellan de erforderliga automatiska backspolningarna bedömdes vara fyra timmar.

Ultrafilter

En mindre ultrafilterenhet sattes upp för kontinuerlig drift med kapaciteten 10-20 l/h beroende på var i driftperioden mellan kemiska rengöringar som filtren befann sig i. Filterelementen var av "spagettityp" dvs bestod av många parallellt monterade tunna ihåliga fibrer som låter partikelfritt avloppsvatten, transporteras, vinkelrätt mot den dominerande strömningsriktningen, in genom den yttre trådmembranytan och samlas i fibrernas inre för vidare transport ut ur filtret som ett filtrat. Denna så kallade "cross-flow" filtrering håller fibrerna rena från större beläggningar av partiklar så de transporteras ut på den "smutsiga sidan", med vatten som inte filtrerats.

Filterelementen hade en cut-off av 0,22 μm vilket innebär att i princip alla bakterier ($>1 \mu\text{m}$) inte kan passera filterelementen, vilket dock de betydligt mindre viruspartiklarna kan. En spolningssekvens för ultrafiltren kördes var fjärde timme, vilken genererade en backspolavloppsvattenvolym av 2 l, vilket motsvarar 2,5% - 5% av flödet.



Figur 7. Ultrafilter och GAC-linjen: Förfilter, fem parallella ultrafilter och ett GAC-filter.

Akvariecontainer för fisk- och snäckexponering i avloppsvatten

Undersökning av hur vattenlevande organismer reagerar på dagens avloppsvatten i jämförelse med avancerat renat avloppsvatten utfördes i en inredd 10 fots container, figur 8 och figur 9. Fyra parallella linjer med tre akvarier i varje linje förbereddes och belastades kontinuerligt med fyra olika vatten. Behandlat vatten från granulerade aktiverade kol, GAC-linjen, respektive behandlat vatten från ozoneringslinjen med ozon + sandfiltrering, tillfördes via var sin utjämnings tank till tre parallella akvarier vardera. Aktivkolfiltrerat kranvatten utgjorde kontrollvatten som tillfördes tre andra parallella akvarier. Referensvatten utgjordes av dagens utgående avloppsvatten från Rimbos reningsverk och tillfördes den fjärde linjen via en utjämnings tank till de tre parallella akvarierna.

Luft tillfördes de behandlade vattnen i fördelningstunnorna för att dels driva av eventuellt restozon och övermättnad av syrgas, dels för att lufta upp utgående respektive kolfiltrerat avloppsvatten för att säkerställa att syrebrist inte stör försöken.

Anläggningen var värmeisolerad och möjlighet fanns till uppvärmning, kylning och hög luftomsättning. Temperaturen loggades i inom- och utomhusluft, i fördelningstankarna för akvarierna och i varje enskilt akvarium.



Figur 8. Akvariecontainern exteriör



Figur 9. Akvariecontainern interiör

Analysmetodik mm

Bromid

Analyserades av SGS Analytics Sweden enligt metod DS/EN 10304-1

Bromat

Analyserades av SGS Analytics Sweden enligt metod SS-EN ISO 11206:2013.

Läkemedelsrester

IVL analyserade läkemedelsrester genom att först extrahera vattenproverna med hjälp av fastfaskolonner (HLB). Analys har skett med HPLC-MS/MS på IVL:s laboratorium i Stockholm. Carbamazepine-13C15N, Diclofenac-13C6, Hydrochlorothiazide-13C6, Atenolol-d7, Metoprolol-d7 och Ibuprofen-d3, Ciprofloxacin-d8, Fluconazole-d4, Sulfamethoxazole-13C6, Clarithromycin-N-methyl-d3, Trimetoprim-d3 har använts som internstandarder för kvantifiering.

Eurofins analyserade medan Miljö och Media på Kivik AB (MoLab) körde med metoder som är validerade enligt standardmetoden, 1694, publicerad 2007 av det Amerikanska Naturvårdsverket (United States Environmental Protection Agency, US EPA), Method 1694: Pharmaceuticals and Personal Care Products in Water, Soil, Sediment, and Biosolids by HPLC/ MS/MS (EPA, 2007). Eurofins analyserade proverna enligt metodreferens EPA 539 och EPA1639.

Flamskyddsmedel - PBDE

SGS analyserade ett urval av åtta bromerade flamskyddsmedel som paket PBDE (V) med GC-MS-MS, enligt en egen metod med rapporteringsgränsen 1 ng/l.

Nonyl- och oktylfenol samt etoxylater

Analyserades av SGS Analytics Sweden som paketet ETOXYL (V) enligt deras egen interna metod baserad på GC-MS.

PFAS-ämnen och speciellt PFOA och PFOS

Analyserades av SGS Analytics Sweden som paket PFAS12 (V) med 12 olika PFAS-ämnen, enligt ISO 21675:2019, och två PFAS-ämnen, PFOA och PFOS, av Miljö och Media på Kivik AB enligt MoLabs analysmetoder.

TOC- totalt organiskt kol och DOC – löst organiskt kol

TOC och DOC analyserades huvudsakligen av SGS som TOC (V) och DOC (V) enligt SS-EN ISO 20236:2021 respektive SS-EN ISO 20236:2021 inklusive provberedning i form av membranfiltrering. Dessutom mättes ett antal driftprover med kyvett-test från HACH med kit-nummer LCK385, vilken inbegriper fysisk koldioxidavdrivning.

UV och VIS spektroskopi/absorption

Analyserades med dubbelstrålig spektrofotometer UV-1800 av märke Shimadzu med 5 cm kvartskyvetter för referensvatten (avjonat vatten) respektive provvatten.

Effektbaserad analys av avloppsvattenprover

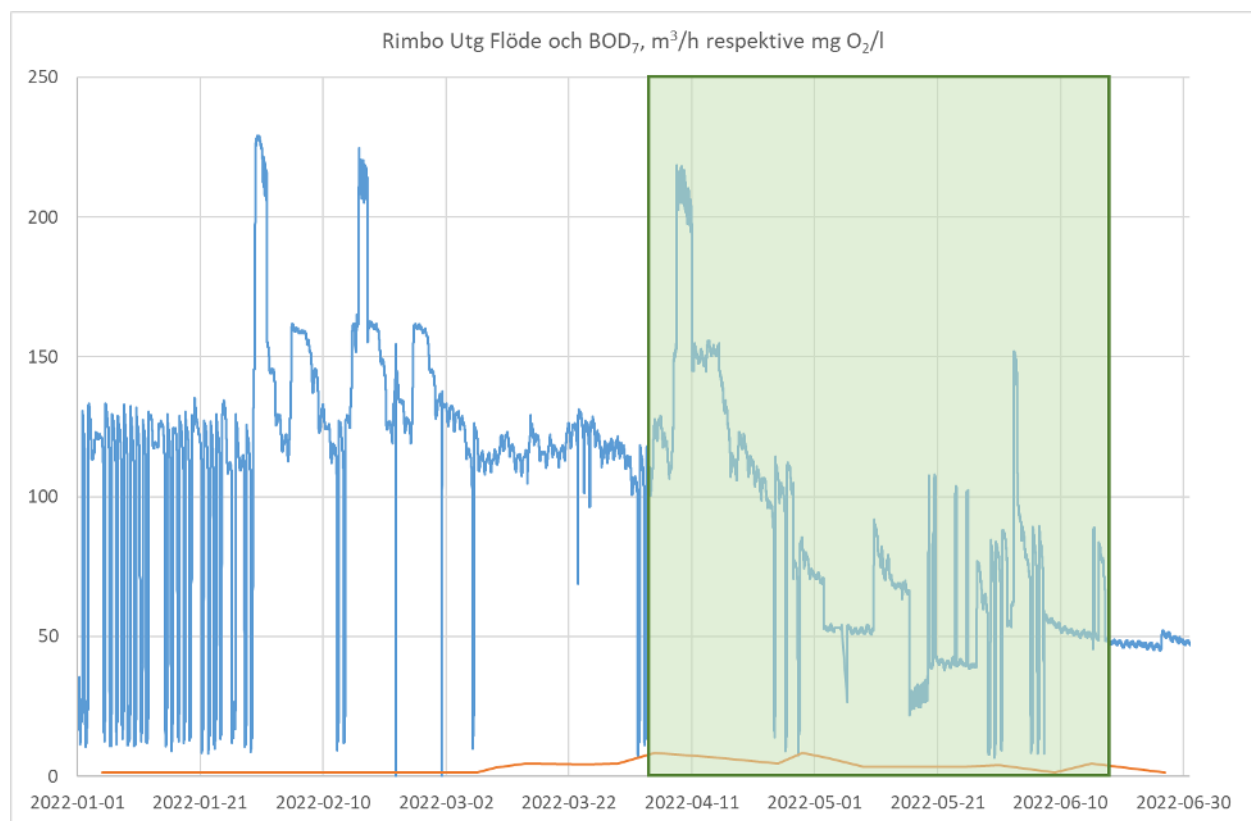
Testen utfördes av Biocell Analytica som studerat förekomsten av ämnen som kan aktivera östrogenreceptorn (ER), androgenreceptorn (AR), arylhydrokarbonreceptorn (AhR) samt orsaka oxidativ stress (Nrf2). Resultaten användes för att beräkna bioekvivalenta koncentrationer (bioequivalent concentrations, BEQ). BEQ-värdet beskriver den observerade effekten uttryckt som en koncentration av en referenssubstans, som är analyserad samtidigt. Referenssubstanserna var 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxin (TCDD) för AhR-aktivitet, 17 β -estradiol (E2) för ER-aktivitet, dihydrotestosteron (DHT) för AR-aktivitet, hydroxyflutamid (OHF) för anti-AR-aktivitet och tertiär butylhydrokinon (tBHQ) för Nrf2 (oxidativ stress).

Försöskörningar och resultat

Pilotförsöken utfördes på plats på Rimbo reningsverk och kördes första halvåret 2022. Mät- och analysresultat samlades in löpande under försöken och externa analysresultat inkom t.o.m. november 2022. Utvärdering och rapportskrivning utfördes under juni t.o.m. december 2022.

Allmän beskrivning av försöksdriften

Pilotanläggningen installerades i Rimbo och togs i drift under mars 2022 och drevs med omfattande provtagning och analys. Försöken utfördes med olika inriktningar och kom att omfatta de skarpa veckorna fr o m 2022_14 till vecka 2022_25. Försöksperioden kan sägas representera typiska driftveckor vid Rimbo reningsverk, med en period med lite högre flöden, vilken inföll i början av försöken, figur 10.



Figur 10. BOD₇ (orange) och utgående flöde (blå) i Rimbo under 2022 samt pilotförsöksveckor i grönt.

Medelvärdet för flöde; BOD₇ och COD under hela den i figur 10 redovisade perioden var 98 m³/h; 3,5 mg/l respektive 24 mg/L. Under försöksperioden var motsvarande värden för flöde; BOD₇ och COD 80 m³/h, 4,6 och 28 mg/l. Beräkningarna av medelvärdena för BOD₇ och COD baseras på halva LOQ i det fall analysresultatet ligger under LOQ.

Försöken inleddes med inställning av adekvata hydrauliska flöden och backspolningsstrategier i de olika linjerna med aktiverat kol baserat på ytbelastning och uppehållstid. Problem med slamflykt från efterfällningen under vecka 11, 12 och 13 försköt de skarpa pilotkörningarna till vecka 14-24. Anläggningen kördes med erfarenhetsbaserade förutsättningar och inställningar för att nå konstant hög läkemedelsrening och på så sätt producera representativa utgående vatten som underlag till dimensionering och för exponeringsförsöken med zebrafisk och dammsnäcka. Provtagning med veckovisa samlingsprov och uttag av frekventa stickprover utfördes löpande under hela försöksperioden. Proverna skickades till externt lab för analys av läkemedelsrester, andra organiska mikroföroreningar, TOC, DOC, bromid och bromat. Driftparametrar mättes och analyserades internt för att ställa in och följa processen i stort.

Biotesterna genomfördes under veckorna 16, 17 och 18, då samtliga linjer bedömdes intrimmade och linjerna kördes så stabil som möjligt för att ge konstanta betingelser i framförallt reningsgrad.

Totalt kördes pilotanläggningen under 15 veckor, varav 11 veckor räknas som skarpa, med löpande veckovisa uttag av samlingsprov. Analys- och reningsresultat redovisas översiktligt och sammanfattningsvis i detta resultatkapitel och resultaten återfinns mer i detalj i bilaga 1–9.

Veckoprover togs ut genom att provvatten samlades in med kontinuerlig pumpning till provkärl som förvarades i kylskåp fram till dess fyra eller tre dagar förflutit. Efter respektive delveckoperiod frystes delveckoprovet in i -20°C och utvalda delprover tinades efter det att försöken avslutats. Delproverna flödesproportionerades till hela veckoprover som skickades i kylväskor till externt laboratorium, eller analyserades omgående på det interna labbet.

Övergripande statistik om försöken

Totalt behandlades drygt 880 m³ avloppsvatten i de olika pilot- och labenheter i pilotanläggningen. Under försöken samlades 55 veckoprover in och de flesta skickades till olika externa lab för att analyseras på läkemedelsrester, medan ett mindre urval skickades för analys av PFAS-ämnen, nonylfenoler, bromerade flamskyddsmedel, bromid och bromat.

Stickprover för analys av bl.a. TOC/DOC, konduktivitet, pH och UV/VIS-absorbans samlades in löpande under försöken och antalet stickprover uppgick till drygt 1400 stycken för mätning och analys på lokalt laboratorium, därtill sändes 17 stickprover från dos-responsförsök till externt laboratorium för läkemedelsanalys mm.

Inpumpning till pilotanläggningen

Pilotanläggningen matades genom en hävert från mätrännan i utloppskanalen efter dynasandfiltren som utgör sista reningssteget i verket. Häverten gick kontinuerligt från 10 mars till 9 december 2022, då den sista loggningen stängdes av.

Förbehandling med grovfilter och sandfilter

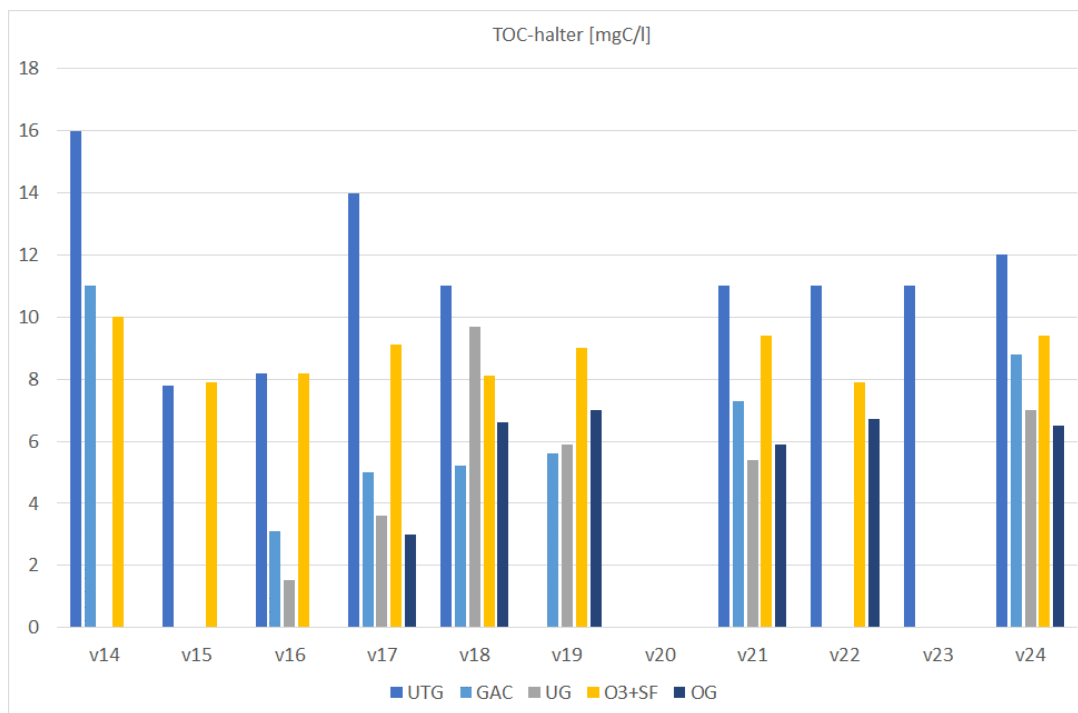
Behandlingens inledande två grovfiltren, med först 3 mm och sedan 1,5 mm håll, i respektive rengjordes manuellt i snitt tre gånger i veckan för att avlägsna brunt, finflockigt material. Sandfiltren backspolades vid behov en till två gånger per vecka, typiskt efter att tryckfallet ökat från 0,6–0,7 bar till 1,5–1,7 bar. Tryckfallet ökade något snabbare med högre susphalt i utgående avloppsvatten, men suspen verkade tidvis vara relativt finpartikulär och därmed svårfångad i såväl reningsverkets dynasandfilter som i pilotanläggningens sandfilter. Däremot föll partiklar ut ovan och i GAC-filtren, kanske beroende på längre uppehållstid, uppluftning i samband med överfall och finare partikelfraktion i GAC-materialet.

Interna och externa analyser – resultat för pilotlinjerna

Kontinuerlig uppföljning gjordes genom mätningar och analyser på insamlade stick- och vecko-samlingsprover. Uppföljningen var nödvändig för dokumentation och beskrivning av försöken, samt viktiga för att kontrollera och vid behov justera driftparametrar såsom ozondos. De interna analyserna omfattade konduktivitet, pH och UV-absorbans vid 254 nm. Till detta utfördes stickprovsmätningar av syre i vatten- och gasfas, ozon i gasfas samt vattentemperatur. I Rimbo sändes prover till externt laboratorium för analys av partikulärt och löst organiskt material rapporterat som TOC (Total Organic Carbon) respektive DOC (Dissolved Organic Carbon)

Totalt Organiskt kol - TOC

Rimbo reningsverk avskiljer organiskt kol (TOC) till mycket stor del, drygt 90 %. Resthalten i ordinarie utgående avloppsvatten är normal till något förhöjd, medel ca 10 mg C/l, jämfört med andra reningsverk, som har avslutande sandfilter där TOC-halten ligger runt 8 mg/l. I samband med försöken följdes TOC-halten, i första hand genom analys av veckoprover insamlade på avloppsvatten, före och efter de olika pilotlinjerna för läkemedelsrening. Analysresultaten visar att TOC in till läkemedelsreningen varierar något under försöksperioderna, figur 11 och tabell 2.

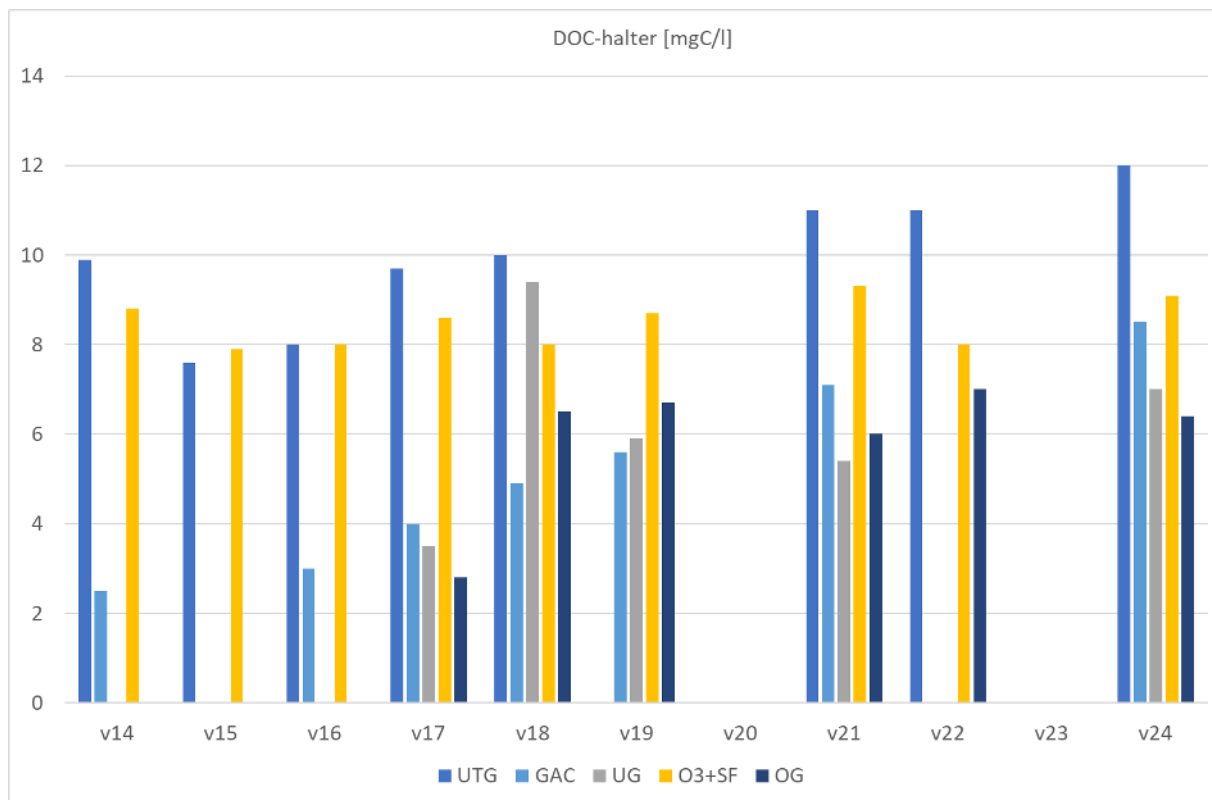


Figur 11. TOC i veckoprover från pilot- och lablinjerna tagna under höstens försök. X-axelns siffror är veckonummer. Beteckningar: UTG – ordinarie utgående avloppsvatten, GAC – aktivt kol filtertrat, UG – ultrafiltertrat och GAC-filtertrat, O3+SF – ozonerat och sandfiltertrat samt OG – ozonerat och GAC-filtertrat.

Ozoneringens påverkan på TOC-halten varierade, men minskningen låg under alla veckor i genomsnitt på 1,7 mg C/l. GAC-linjen i pilotskala avskilde mer TOC än ozoneringen, avskiljningen varierade mellan 3 och 9 mg C/l med i snitt mg 5,3 C/L. Störst avskiljning sker efter ett kolbyte, vilket gjordes vecka 13 den 29 mars, precis innan de skarpa veckorna med pilotanläggningen i Rimbo. Då var avskiljningen av TOC 5 mg/l, vilken sjönk till 3 mg/l efter elva veckors drift, vilket motsvarade nästan 6900 bäddvolym (BV).

Ultrafiltren sänkte TOC-halten med en tredjedel, vilket borde bero på avskiljningen av partiklar större än 0,22 µm. Kombinationen av ultrafilter och GAC-filter sänkte TOC-halten ytterligare till i genomsnitt 50%. Genom att kombinera ozonering och GAC-filtrering sjönk den genomsnittliga avskiljningen till knappt 60%.

Ett delvis liknande mönster kunde noteras för det lösta organiska materialet mätt som DOC, figur 12 och tabell 3.



Figur 12. DOC i veckoprover från pilot- och lablinjerna tagna under höstens försök. X-axelns siffror är veckonummer. Beteckningar: UTG – ordinarie utgående avloppsvatten, GAC – aktivt kol filtrerat, UG – ultrafiltrerat och GAC-filtrerat, O3+SF – ozonerat och sandfiltrerat samt OG – ozonerat och GAC-filtrerat.

Pilotfiltret med GAC gav de lägsta utgående halterna av DOC tätt följt av kombinationen ozonering och aktiverat kol och därefter ultrafilter i kombination med GAC-filter. Den något sämre avskiljningen av TOC i labkolfiltren kan förmodligen förklaras av en lägre baddhöjd, uppehållstiden var den samma.

Sandfiltret efter ozoneringen avskiljer i snitt 1 mg DOC/l vilket borde förklaras av bakteriell nedbrytning. Andelen DOC av TOC i utgående uppgår till i snitt 90 %.

Tabell 2. TOC [mg C/l] i veckoprover från pilotlinjerna

Vecka 2022	TOC [mg/l]	UTG	GAC	UF	UG	O3	O3+SF	OG
v14		16	11				10	
v15		7,8					7,9	
v16		8,2	3,1		1,52		8,2	
v17		14	5	9,8	3,6	12	9,1	3
v18		11	5,2	5,6	9,7	9,8	8,1	6,6
v19			5,6	10	5,9	11	9	7
v20						9,8		
v21		11	7,3		5,4	10	9,4	5,9
v22		11				9,4	7,9	6,7
v23		11				8,9		
v24		12	8,8	9,3	7	9,7	9,4	6,5
Medel		11,3	6,6	8,7	5,5	10,1	8,8	6,0

Tabell 3. DOC [mg C/l] i veckoprover från pilotlinjerna

Vecka 2022	DOC [mg/l]	UTG	GAC	UF	UG	O3	O3+SF	OG
v14		9,9	2,5				8,8	
v15		7,6					7,9	
v16		8	3				8	
v17		9,7	4	9,2	3,5	10	8,6	2,8
v18		10	4,9	5,5	9,4	9,8	8	6,5
v19			5,6	9,9	5,9	10	8,7	6,7
v20						9,6		
v21		11	7,1		5,4	10	9,3	6
v22		11				9,5	8	7
v23						8,7		
v24		12	8,5	9,1	7	9,5	9,1	6,4
Medel		9,9	5,1	8,4	6,2	9,6	8,5	5,9

Konduktivitet

Mätningarna av konduktivitet (elektrisk ledningsförmåga p.g.a. joner i avloppsvattnet) visar att utgående vatten håller en typisk konduktivitet för kommunalt avloppsvatten under försöken och att möjligen GAC-linjen och kombinationen ultrafilter och GAC-filter sänker konduktiviteten något, tabell 4.

Tabell 4. Konduktivitet [$\mu\text{S}/\text{cm}$] i prover från pilotlinjerna (kursiva värden baseras på flera stickprover)..

Vecka 2022	Konduktivitet [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	UTG	GAC	UF	UG	O3	O3+SF	OG
	v14	723	678	-	-	727	819	-
	v15	746	748	-	-	744	748	-
	v16	763	756	676	666	749	765	769
	v17	706	701	680	676	693	709	683
	v18	778	753	727	768	736	761	750
	v19	779	773	735	702	788	779	772
	v20	800	798	724	738	801	791	794
	v21	799	806	804	783	794	805	798
	v22	765	768	762	727	759	764	749
	v23	773	765	745	762	767	766	762
	v24	772	747	723	719	775	771	765
	Medel	764	754	731	727	758	771	760

Förklaringen till den något lägre konduktiviteten kan vara utfällning av kemisk flock i GAC-linjen och rester av backspolningsvatten i systemet med ultrafilter och GAC-filter.

pH

Mätningarna av pH visar att utgående vatten är neutralt och i samband med ozoneringen ökar pH något sannolikt p.g.a. gasflödet som strappar bort koldioxid ur avloppsvattnet, tabell 5. En höjning av pH över linjer med GAC-filter kan ofta noteras när kolet är nytt, men efter kolbytet i GAC-linjen vecka 13 kunde detta inte noteras efterföljande veckor, däremot steg pH efter lablinjerna ultrafilter+GAC (UG) respektive ozonering+GAC (OG).

Tabell 5. pH i prover från pilotlinjerna (kursiva värden baseras på flera stickprover).

Vecka 2022	pH	UTG	GAC	UF	UG	O3	O3+SF	OG
	v14	7,22	7,65	-	-	7,61	7,66	-
	v15	7,54	7,74	-	-	7,75	7,54	-
	v16	7,53	7,54	7,77	7,85	7,78	7,61	7,87
	v17	7,87	7,91	7,67	7,91	7,71	7,9	7,99
	v18	7,83	7,73	7,94	8,09	7,76	7,9	8,22
	v19	7,88	7,93	8,39	7,74	8,32	7,76	8,64
	v20	7,95	7,5	8,11	8,25	7,95	7,55	7,78
	v21	7,24	7,77	7,46	7,88	8,02	7,78	7,74
	v22	7,69	7,57	7,56	8,61	8,05	7,84	7,78
	v23	7,44	7,55	7,9	8,02	7,9	7,94	7,87
	v24	8,11	8,18	8,04	8,02	8,28	8,1	8,09
	Medel	7,66	7,73	7,87	8,04	7,92	7,78	8,00

UV254 nm - absorbans

Mätningarna av absorbans visar att kombinationsprocesserna ozonering+GAC (OG) respektive ultrafilter+GAC (UG) avskiljer överlägset mest av ämnen som absorberar UV ljus, följt av effekten av GAC-filtrering, ozonering+sandfilter, ultrafilter och sist enbart ozonering, tabell 6.

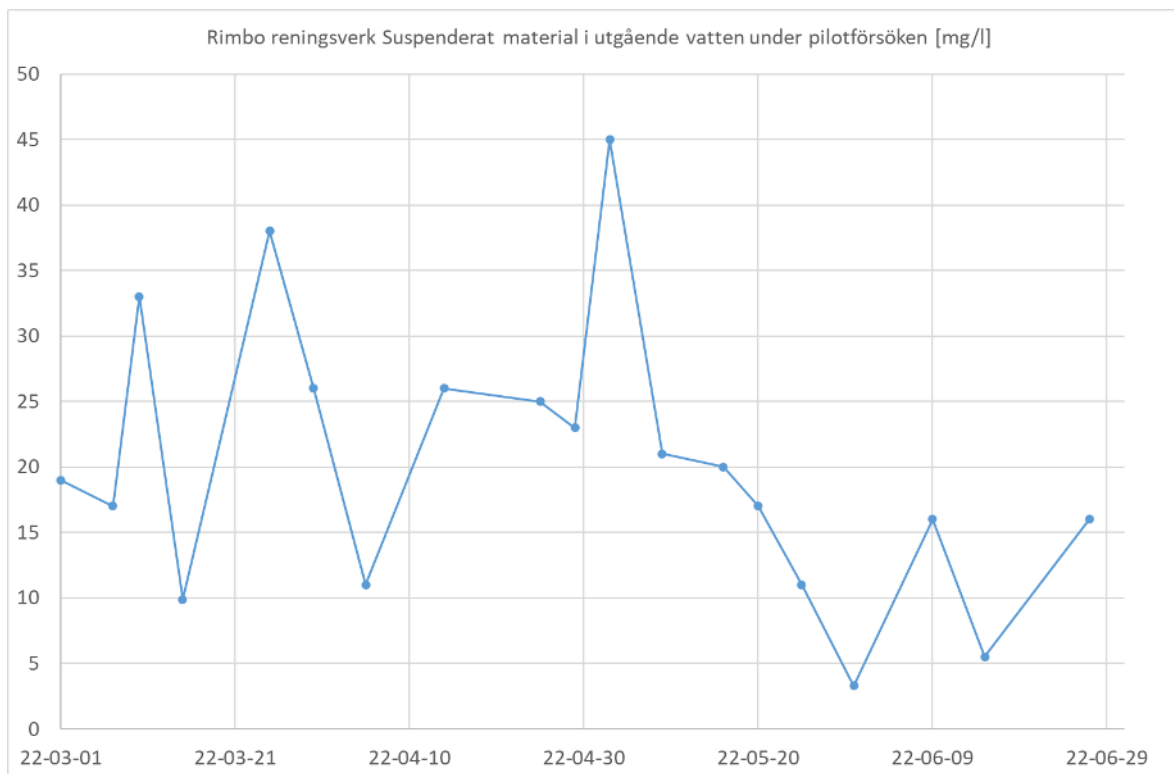
Tabell 6. UV absorbans [cm^{-1}] i prover från pilotlinjerna (kursiva värden baseras på flera stickprover).

Vecka 2022	UV-absorbans [cm^{-1}]	UTG	GAC	UF	UG	O3	O3+SF	OG
	v14	0,978	0,310	-	-	1,103	0,581	-
	v15	1,285	0,278	-	-	0,827	0,461	-
	v16	0,776	0,124	0,369	0,031	0,642	0,473	-
	v17	0,401	1,447	0,733	0,165	1,267	0,688	0,326
	v18	0,999	0,291	0,328	0,636	0,803	0,370	0,370
	v19	0,973	0,362	0,902	0,41	0,659	0,514	0,339
	v20	0,951	0,376	0,796	0,349	0,865	0,508	0,405
	v21	0,973	0,470	0,862	0,352	0,618	0,646	0,262
	v22	0,979	0,527	0,801	0,478	0,483	0,455	0,283
	v23	1,020	0,531	0,823	0,442	0,467	0,419	0,262
	v24	1,032	0,712	0,874	0,578	0,594	0,612	0,330
	Medel	0,94	0,49	0,72	0,38	0,76	0,52	0,32

Förbehandlingsfiltren F1 och F2 avskilde ämnen och partiklar som absorberar UV-ljus vid 254 nm till i medeltal $10 \pm 5\%$, se nästa delkapitel om förbehandlingen. Mätningarna av UV-absorbans hade stor betydelse under försöken för att momentant och direkt i fält kunna ställa in erforderlig ozondos för att uppnå hög läkemedelsoxidation. Vidare användes UV-resultaten för att följa läkemedelsreningen med kombinationsprocesserna.

Förbehandlingen – drift och process

Suspenderat material kan påverka läkemedelsreningen negativt p.g.a. igensättningar och ökad resursåtgång i ozoneringssteget. Rimbo reningsverk avslutas med ett Dynasandfiltersteg. Trots detta, speciellt efter att suspbelastningen var hög när pilotanläggningen körts i gång i mars 2022, kördes pilotanläggningens inledande sandfilter. Effekten av pilotanläggningens förbehandling, i form av två seriekopplade sandfilter, utvärderades med hjälp av UV/VIS-absorbans vid 254 nm mätt på stickprover från pilotanläggningen. Utgående avloppsvatten från Rimbo reningsverk höll i medeltal halter av suspenderade substans på 20 mg/l, men med variationer mellan 3 och 45 mg/l, figur 13. Susphalten är förvånande hög med tanke på de avslutande dynasandfiltren. Enligt uppgift skulle de tvättas extra manuellt under våren men tvätten sköts upp med hänsyn till försöken med läkemedelsrening.



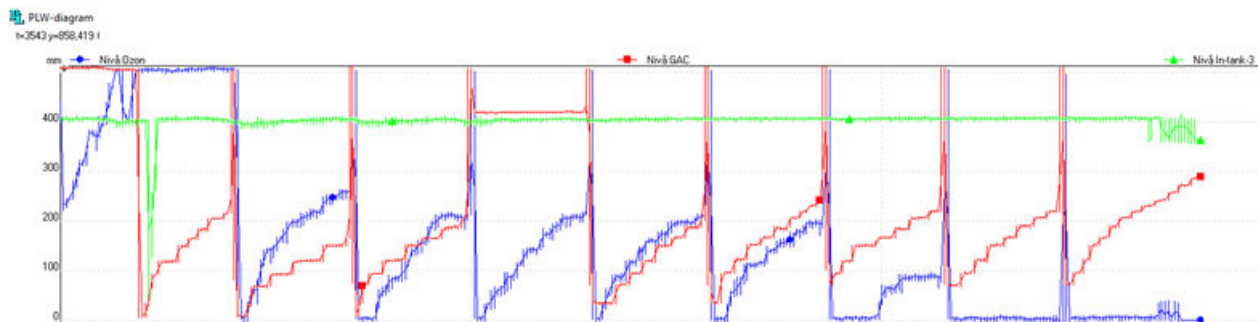
Figur 13 Suspenderad substans i utgående avloppsvatten från Rimbo reningsverk under försöken

Förbehandlingsfiltren F1 och F2 avskilde ämnen och partiklar som absorberar UV-ljus vid 254 nm med i medeltal 5 % och med min- och maxvärden på 3 % respektive 12%. Två tredjedelar, 67%, av avskiljning skedde redan i det första sandfiltret F1 som innehöll lite grövre sand (1,2–2,0 mm) än sandfilter F2 som innehöll finare sand (0,4 - 0,6 mm). Omräknat till suspenderad substans för provtagningsdagarna i pilotanläggningen sänktes susphalten från drygt 21 mg/l till 19 mg/l i medeltal, motsvarande knappt 10 % reduktion.

GAC-filtret i pilotskala – drift och process

GAC-linjen kördes kontinuerligt under totalt 15 veckor. GAC-filtret backspolades med vatten under 30 minuter varje dag för att bli fritt från ansamlade partiklar och säkerställa hög hydraulisk kapacitet, ca 50 l/h. Backspolhastigheten var låg, motsvarande 13 m/h vatten, för att undvika förlust av GAC-korn till spolavloppet. Gångtiden var relativt lång mellan erforderliga backspolningar och kunde i GAC-filtret uppgå till två till tre dagar, varunder tryckfallet successivt ökade med ca 650 mm H₂O. Under en period i Rimbo backspolades filtret automatiskt och

förebyggande en gång per dygn, figur 14. Ytbelastningen på filtret under nedströmsdrift var i snitt 2,5 m/h.



Figur 14. Nivåer, mm, i pilotfiltren på Rimbo reningsverk i maj 2022, trendlängd 10 d. Röd trend är nivån i GAC-filtret.

GAC-filtret backspolades under 30 minuter som ett standardförfarande varvid tydliga flockar kunde observeras i spolvattenavloppet, speciellt under de första fem till sju minuterna.

Ozoneringslinjen – drift och process

Ozoneringen drevs kontinuerligt under försöksveckorna med en ozondos som beräknades ge mellan 80 % och 90 % oxidation eller nedbrytning av läkemedelsresterna. Ozoneringen var därefter i drift i elva veckor.

Tre större dos/respons-försök med ozon gjordes i Rimbo och prover för läkemedelsanalys skickades in från försöken i pilotlinjen. Ozoneringslinjen innehöll, förutom själva ozonbehandlingen, två olika efterbehandlingsalternativ: sandfilter respektive ett GAC-filter (granulerat aktiverat kol). Under försöken kördes sandfiltret kontinuerligt och veckosamlingsprover togs ut från kombinationen ozonering och sandfilter respektive ozonering och GAC-filter. Stickprover togs ut för löpande kontroll av processen. Analysresultat för läkemedelsrester återfinns i detalj i bilaga 1-5.

Driftobservationer

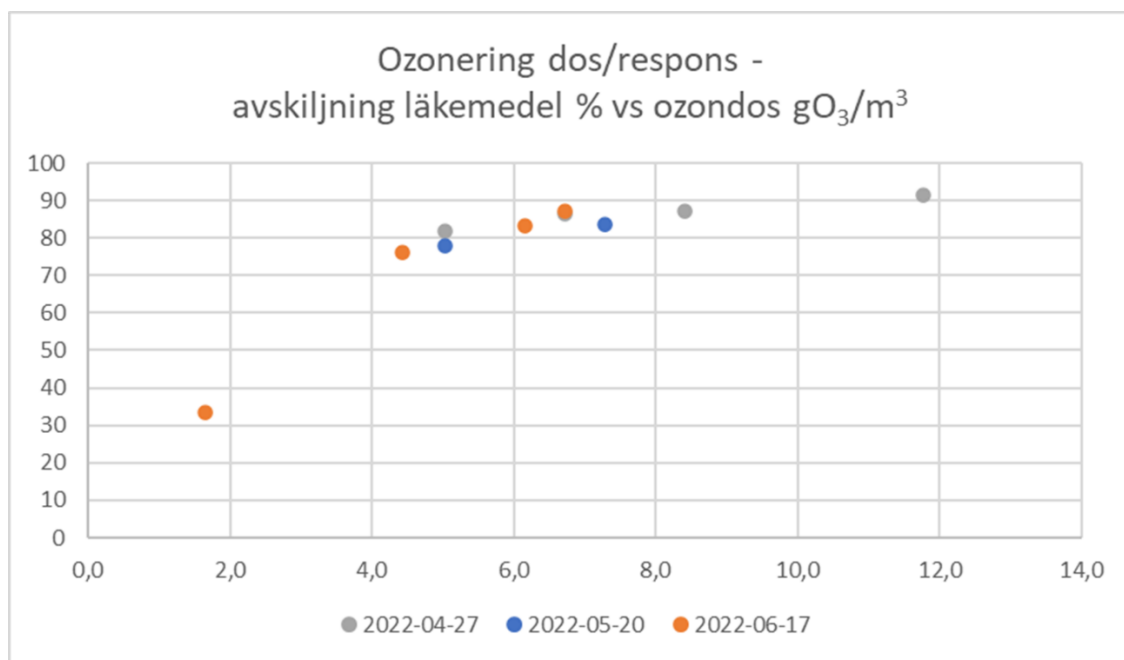
Ozoneringslinjen rullade på kontinuerligt under hela försöksperioden med undantag för en timmes planerat avbrott då kylvattnet föll bort p.g.a. ledningsarbete. Inga ozonläckor noterades och anläggningen slogs inte heller av automatiskt av ozondetektorerna i anläggningen. Ingen nämnvärd skumning förekom i ozoneringen, vare sig i gasuttaget i toppen av kontaktkolonnen eller i utgående vatten. Begränsad skumning noterades dock i samband med dos-responsförsöken och då i testerna med höga doser, 12 g O₃/m³.

Ozonering dos - respons

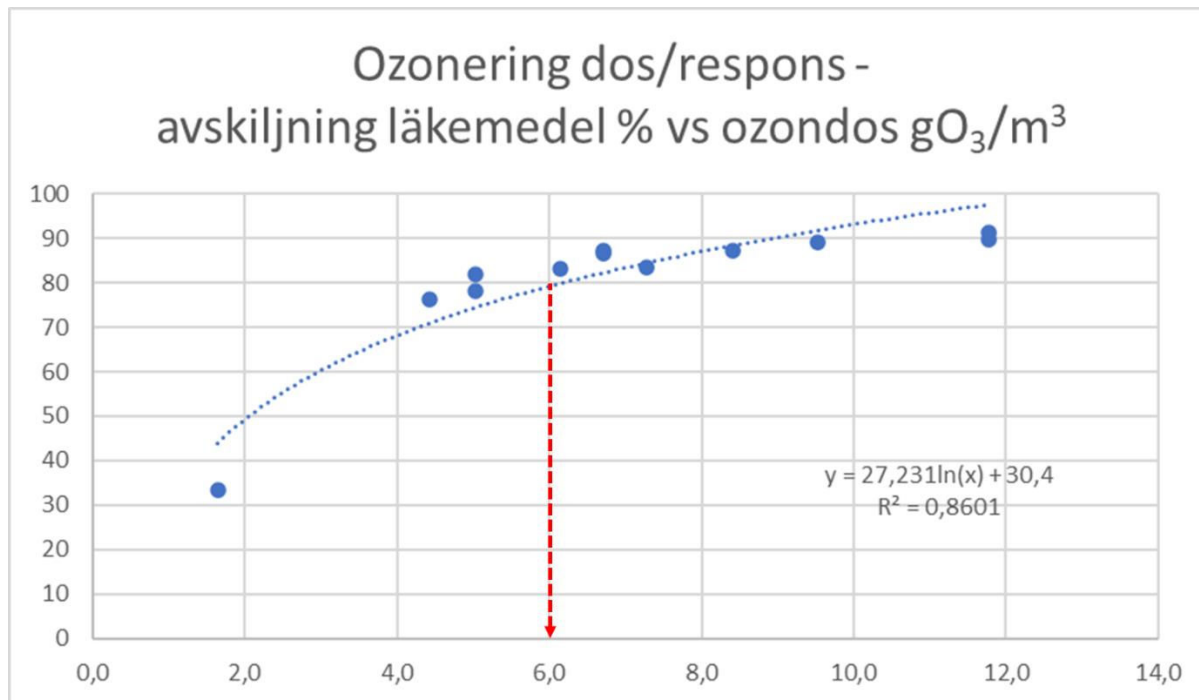
Dos - responsförsök med ozon utfördes tre gånger under försöken med pilotkolonnen: 2022-04-27, 2022-05-20 och 2022-06-17, tabell 7, varefter prover för analys av läkemedelsrester skickades till externt laboratorium. Vattenvolymen i ozoneringslinjen omsattes sex gånger efter det att en ny dos ställts in innan prover togs ut.

Tabell 7. Data för dos/responsförsöken med ozon

Datum	Avloppsflöde [L/h]	Uppehållstid [min]	TOC [mg/L]	DOC [mg/L]
2022-04-27	267	20	14	9,8
2022-05-20	267	20	13	12
2022-06-17	267	20	11	11



Figur 15. Genomsnittlig avskiljning av läkemedelsrester som funktion av ozondosen.



Figur 16. Genomsnittlig avskiljning av läkemedelsrester som funktion av ozondosen med trend.

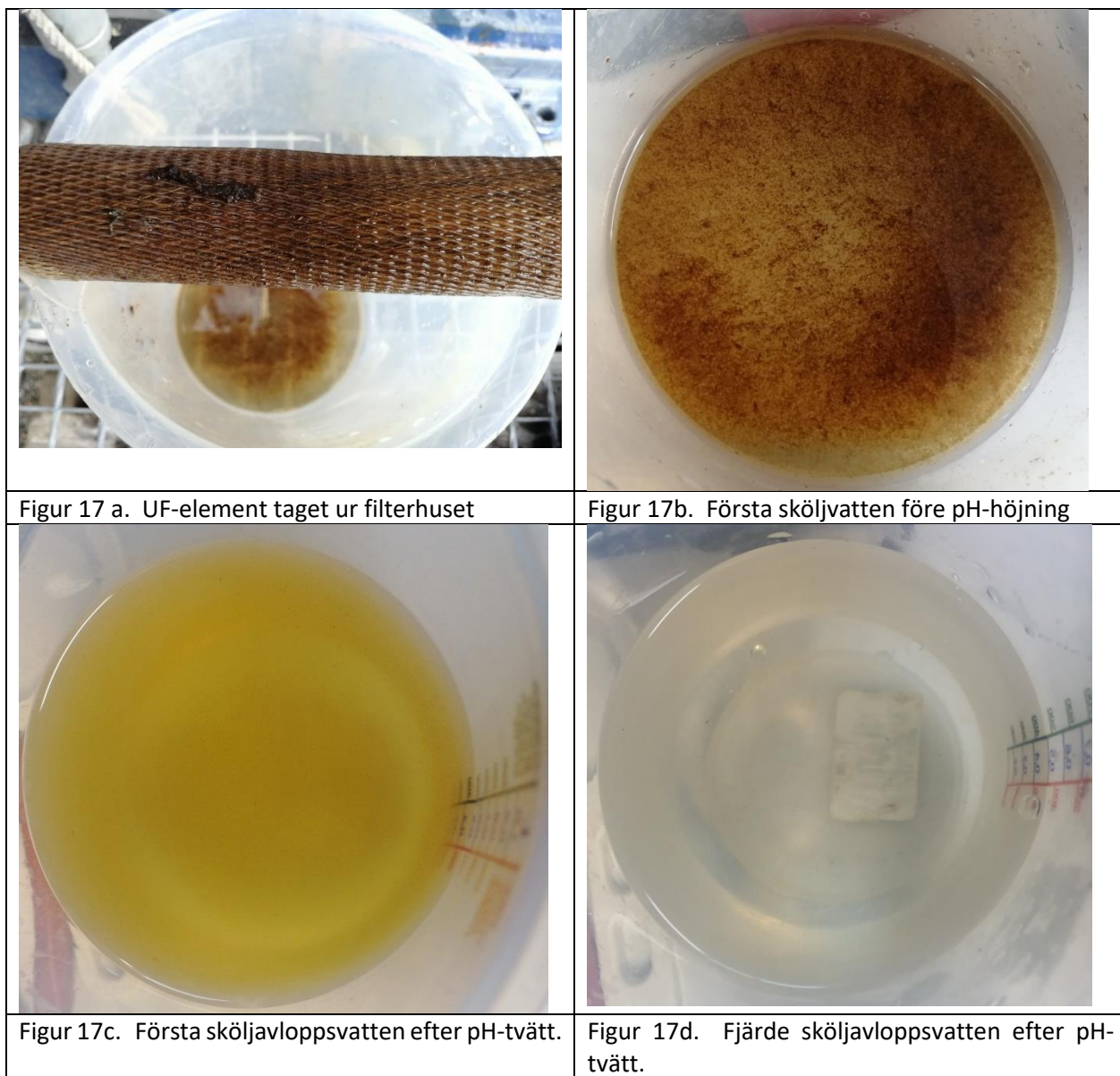
Dos/responsförsöken visade att erforderlig ozondos var $6,0 \text{ g/m}^3$ för att uppnå 80% avskiljning. De veckovisa kontinuerliga körningarna visade att ozondosen behöver vara i samma storleksordning, motsvarande $5,5\text{-}6,0 \text{ g/m}^3$ för att säkert uppnå minst 80 % avskiljning av läkemedelsrester.

Absorbansmätningar vid UV-254 nm användes under försöken som en snabb indikation på anläggningens funktion och mätningarna gav underlag till inställningar av driften av bl.a. ozoneringslinjen som fick sin dos/respons relation snabbt fastställd före och under de skarpa försöksveckorna.

Ultrafilter följt av GAC-filter – drift och process

De fem ultrafiltren med efterföljande GAC-filter kördes kontinuerligt under totalt 11 veckor. Ultrafiltren backspolades med automatik var fjärde timme. Kolfiltret behövde aldrig backspolas under försökstiden på 11 veckor.

Ultrafiltren tvättades tre gånger under försöken genom pH-höjning till $\text{pH} > 12,5$, ultrafiltret före tvätt var fullt av utfälld järnflock, liksom första sköljvatten före pH-höjningen. Tvättilösningen sköljes ur filtret med brutet dricksvatten innan filtret togs i drift. Sköljvattnet blev allt klarare samtidigt som pH-värdet sjönk efter varje sköljning, figur 17 a-d.



GAC-filtret som följde UF-filtren såg opåverkat ut och utan järnutfällningar som noterats i andra motsvarande GAC-filter men som inte föregåtts av ett så tätt filter som ultrafilter utgör.

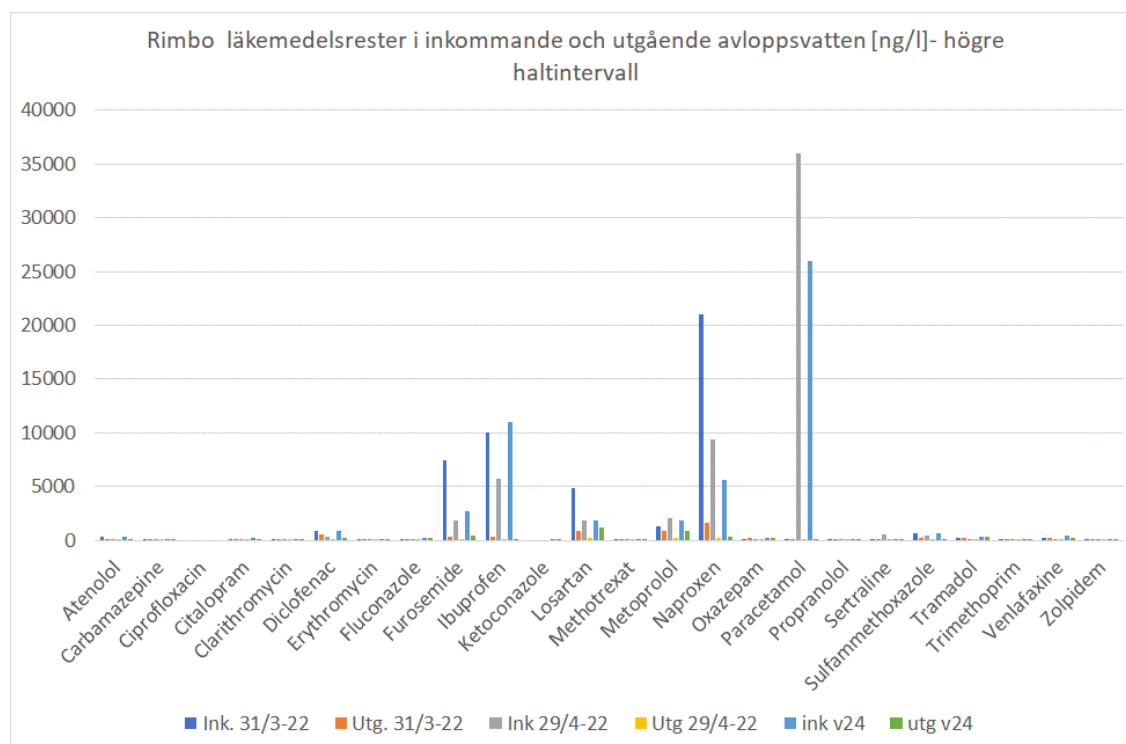
Resultat - Läkemedelsrester

Utvärderingen av pilotförsöken gjordes huvudsakligen baserat på interna analyser av fysikalisk/kemiska parametrar och externa läkemedelsanalyser. De flesta prover för läkemedelsanalyser, 72 st, analyserades av IVL som rapporterade resultaten för de 24 utvalda

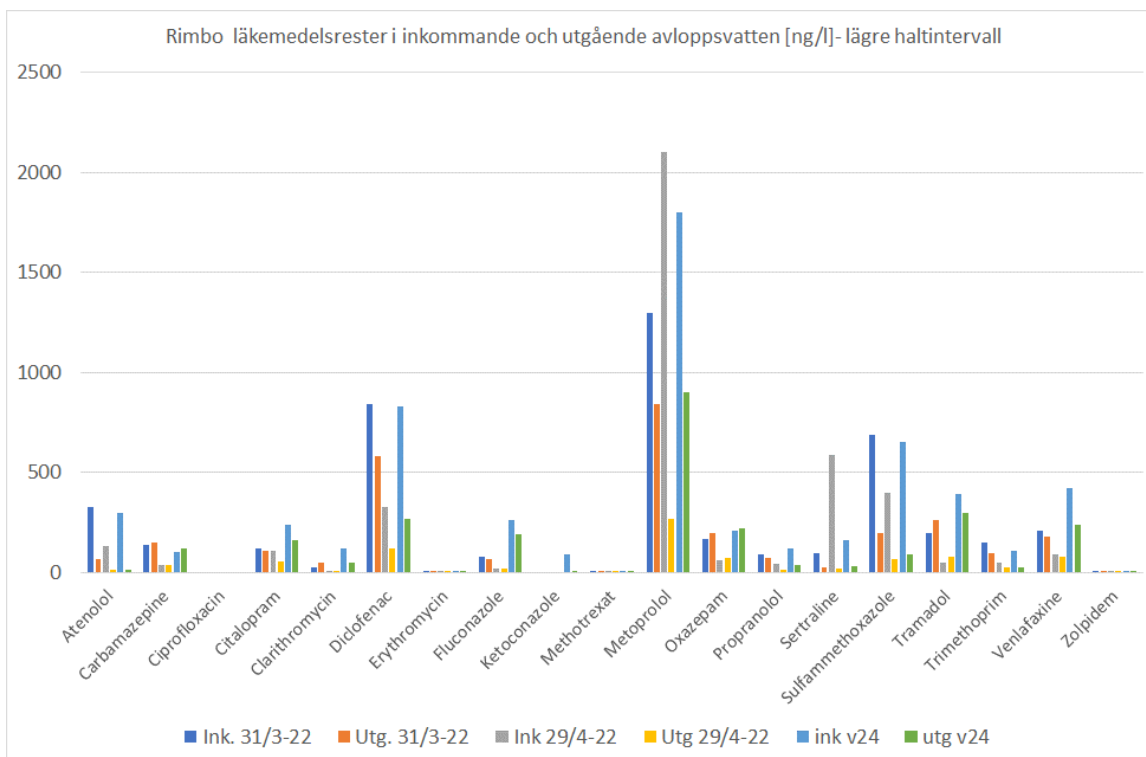
substanser som projektet valt ut. Miljö och Media på Kivik AB (MoLab) analyserade totalt 34 prover varav runt nio prover överlappade båda laboratorierna.

Rimbo reningsverk

Provtagning utfördes på det befintliga Rimbo reningsverk dels genom tre omgångar med enbart inkommande och utgående avloppsvatten, dels med utvidgad provtagning till att omfatta även försedimenterat och biorenat avloppsvatten, figur 18 och figur 21. De genomsnittliga koncentrationerna i inkommande och utgående vatten vid Rimbo reningsverk tillsammans med min- och maxvärden återfinns i tabell 8. Genom att ta hänsyn till avloppsflödet under respektive provtagningsdag kunde även de specifika läkemedelsmängderna per person och dygn beräknas, tabell 9.



Figur 18. Halter av läkemedelsrester i inkommande och utgående från Rimbo reningsverk – högre haltintervall



Figur 19. Halter av läkemedelsrester i inkommande och utgående från Rimbo reningsverk – lägre haltintervall

Koncentrationsminskningen mellan inlopp och utlopp är högst för de ämnen som förekommer i högst koncentrationer i inkommande avloppsvatten dvs ämnena furosemid, losartan, paracetamol, ibuprofen och naproxen, som alla är smärtlindrande och inflammationsdämpande. I Rimbo reningsverk var den genomsnittliga reningsgraden av analyserade ämnen 45% över befintligt reningsverk, med variationer mellan 99,97 % och minus (-) 44%, figur 20.

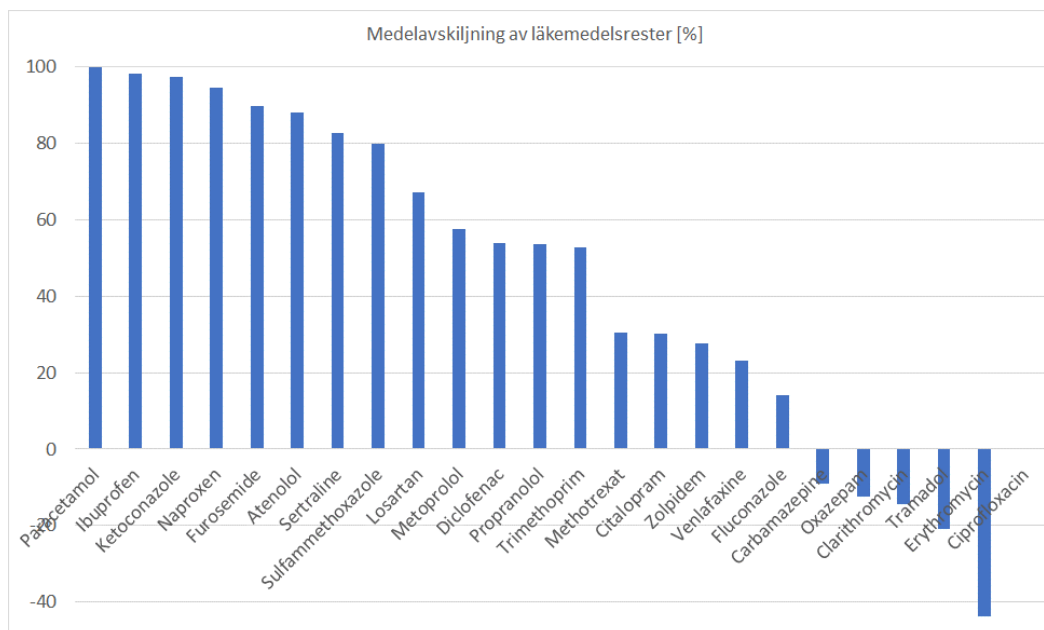
Tabell 8. Koncentrationer av analyserade läkemedelsrester i inkommande och utgående avloppsvatten på Rimbo reningsverk

Halter	Halter Ink [ng/L]	Medel (min-max)	Halter Utg Medel (min-max)
Atenolol	253	(130-330)	32 (13-66)
Carbamazepine	93	(38-140)	103 (38-150)
Ciprofloxacin			
Citalopram	157	(110-240)	109 (56-160)
Clarithromycin	49	(3,3-120)	32 (3,3-47)
Diclofenac	667	(330-840)	323 (120-580)
Erythromycin	1,3	(0,11-2,0)	2,2 (0,11-4,4)
Fluconazole	118	(18-260)	91 (18-190)
Furosemide	4000	(1900-7400)	333 (150-480)
Ibuprofen	8900	(5700-11000)	163 (10-370)
Ketoconazole	88		2,3
Losartan	2833	(1800-4900)	780 (250-1200)
Methotrexat	1,5	(0,17-3,6)	0,36 (0,17-0,61)
Metoprolol	1733	(1300-2100)	670 (270-900)
Naproxen	12000	(5600-21000)	717 (180-1600)
Oxazepam	147	(61-210)	163 (70-220)
Paracetamol	20667	(1,8-36000)	13 (2,2-24)
Propranolol	83	(41-120)	40 (13-70)
Sertraline	283	(99-590)	27 (22-31)
Sulfamethoxazole	580	(400-690)	121 (69-200)
Tramadol	214	(52-390)	214 (81-300)
Trimethoprim	103	(48-150)	49 (23-97)
Venlafaxine	239	(88-420)	166 (77-240)
Zolpidem	1,6	(1,0-2,0)	1,0 (0,33-1,7)
Summa alla	53212	(47741-58813)	4151 (1472-6148)
Summa exkl 3 största	11644	(7713-16739)	3258 (1280-4333)

Tabell 9. Medelvärde för specifika mängder av analyserade läkemedelsrester i inkommande och utgående avloppsvatten på Rimbo reningsverk

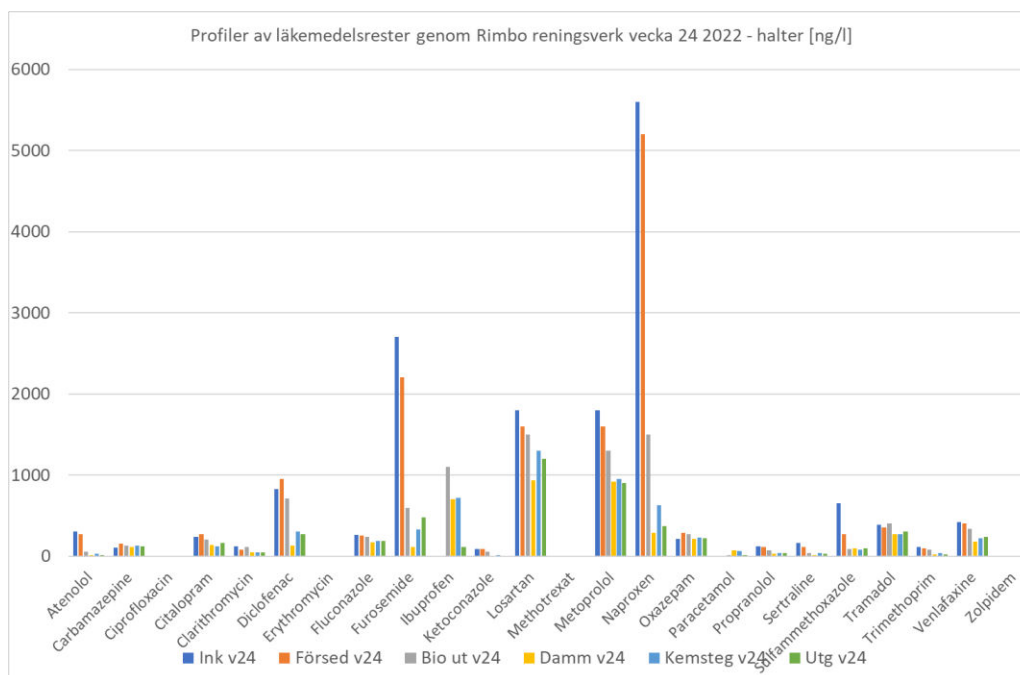
Dygnsmängder	INK Mängd ng/pe, d	UTG Mängd ng/pe, d
Atenolol	410	68
Carbamazepine	163	177
Ciprofloxacin	0	0
Citalopram	195	154
Clarithromycin	50	55
Diclofenac	1058	633
Erythromycin	1	2
Fluconazole	137	109
Furosemide	7990	494
Ibuprofen	13303	372
Ketoconazole	20	1
Losartan	5431	1170
Methotrexat	1	0
Metoprolol	2160	1059
Naproxen	23212	1619
Oxazepam	222	255
Paracetamol	15185	26
Propranolol	121	77
Sertraline	279	39
Sulfamethoxazole	894	225
Tramadol	290	332
Trimethoprim	177	102
Venlafaxine	315	243
Zolpidem	2	1
Summa alla	71618	7213
Summa exkl 3 största	19918	5195

Erfarenhetsmässigt är koncentrationerna av läkemedelsrester flera fall lägre i Rimbo jämfört med några andra verk i regionen, speciellt när utgående vatten jämförs. I inkommande avloppsvatten förefaller koncentrationerna av antiinflammatoriska läkemedel vara lite högre än i några andra reningsverk i regionen. Mer om tolkningen senare i rapporten.



Figur 20. Genomsnittlig reningsgrad över Rimbo reningsverk baserat på tre provtagningar på inkommande och utgående halter i korresponderande dygns- och veckoprover.

Vid ett par tillfällen togs veckoprover från de olika huvudprocesserna i reningsverket, inkommande efter galler, efter försedimentering, efter biosteg, efter damm, efter efterfällning och utgående efter dynasandfiltren, Figur 21.



Figur 21. Profil av summan av läkemedelsrester efter olika reningssteg på Rimbo reningsverk

Pilotlinjer

En sammanställning av medel-, min- och maxvärden samt standardavvikelser för läkemedels-halterna i inkommande till och utgående avloppsvatten från pilotlinjerna visar att GAC-linjen uppvisade de lägsta koncentrationerna, tätt följd av ozoneringslinjen, tabell 10.

Tabell 10. Läkemedelskoncentrationer i inkommande till och utgående vatten från pilotlinjerna.

Prov	UTG 2022 V14-V24	Ozon+SF 2022 V14-V24	GAC 2022 V14-V24
Substans [ng/l]	Medel (min-max) $\pm$ std avv.	Medel (min-max) $\pm$ std avv.	Medel (min-max) $\pm$ std avv.
Atenolol	23 (11-66) $\pm$ 14	2,3 (<5-12,5) $\pm$ 3,9	<5
Carbamazepine	109 (38-154) $\pm$ 33	3,0 (2,8-3,3) $\pm$ 0,23	3,0 (2,8-3,3) $\pm$ 0,21
Ciprofloxacin	-	-	-
Citalopram	96 (38-160) $\pm$ 38	3,0 (<3-15) $\pm$ 4,6	1,0 (<3-1,7) $\pm$ 0,58
Clarithromycin	23 (3,3-56) $\pm$ 16	1,4 (0,93-1,67) $\pm$,36	2,2 (0,93-6) $\pm$ 1,6
Diclofenac	247 (57-580) $\pm$ 136	7,4 (0,20-49) $\pm$ 15,9	11,8 (<3-58) $\pm$ 19,4
Erythromycin	6,3 (<1-17) $\pm$ 4,8	5,1 (1-25) $\pm$ 7,6	5,1 (1,7-25) $\pm$ 8,0
Fluconazole	76 (18-190) $\pm$ 46	42,6 (17,5-97) $\pm$ 23,4	7,5 (1,3-44) $\pm$ 14,9
Furosemide	194 (5,0-480) $\pm$ 160	6,4 (0,45-40) $\pm$ 12,8	13,7 (1,5-71) $\pm$ 23,5
Ibuprofen	46 (<1-370) $\pm$ 91	12,4 (<1-62,5) $\pm$ 19,4	4,6 (<3-12) $\pm$ 3,9
Ketoconazole	-	-	-
Losartan	400 (61-1200) $\pm$ 310	15,6 (0,93-83) $\pm$ 25,6	45 (12,5-160) $\pm$ 47,5
Metotrexat	1,2 (<2-5,0) $\pm$ 1,5	0,65 (0,33-1,67) $\pm$ 0,4	0,87 (0,33-1,67) $\pm$ 0,52
Metoprolol	557 (47-923) $\pm$ 254	16,3 (3,5-65) $\pm$ 18,9	14,4 (<3-85) $\pm$ 29
Naproxen	258 (19-1600) $\pm$ 376	7,8 (0,33-51) $\pm$ 16,4	15,2 (<5-85) $\pm$ 28,6
Oxazepam	186 (70-280) $\pm$ 61	40,8 (10,5-78) $\pm$ 19,4	7,1 (<3-42) $\pm$ 14,3
Paracetamol	100 (<7-347) $\pm$ 136	1,6 (<7-2,2) $\pm$ 0,39	1,7 (<7-2,2) $\pm$ 0,37
Propranolol	29 (6,0-70) $\pm$ 16	2,3 (<5-12,5) $\pm$ 3,9	<5
Sertraline	15 (<1-41) $\pm$ 12	1,0 (<5-1,7) $\pm$ 0,65	1,3 (<1-1,7) $\pm$ 0,57
Sulfamethoxazole	112 (23-250) $\pm$ 68	2,6 (<5-13) $\pm$ 3,9	13,2 (1-39) $\pm$ 11,9
Tramadol	207 (81-310) $\pm$ 82	4,3 (1,8-19,5) $\pm$ 5,8	6,1 (1,5-32) $\pm$ 10,6
Trimethoprim	57 (21-120) $\pm$ 34	1,9 (<5-9) $\pm$ 2,7	0,79 (0,67-<5) $\pm$ 0,08
Venlafaxine	158 (65-247) $\pm$ 60	2,4 (<3-15) $\pm$ 4,8	5,1 (0,33-33) $\pm$ 11,4
Zolpidem	1,4 (<1-2,5) $\pm$ 0,62	<5	<5
Summa av medel	2904	181	163

Summan av läkemedelsrester, amidotrizoinssyra ej medräknat, minskade markant över aktivt kol och ozoneringslinjen. I de fall analysvärdet var lägre än kvantifierings- eller detektionsgränsen (halten) användes halva värdet i summering, medelvärdesbildning etc.

Avskiljningsgraden (eller reningsgraden) beräknades för varje substans och för korresponderande datapar av inkommande och utgående vatten från pilotlinjerna. I de fall ämnet var detekterat eller kvantifierat i inkommande vatten, men att ämnet låg under detektions- eller kvantifieringsgränsen i utgående, behandlat vatten, användes halva kvantifierings- eller detektionsvärdet i beräkningarna av avskiljningsgraden.

Beräkningarna visar att de högst avskiljningsgraderna av läkemedelsrester för samtliga substanser uppnåddes med aktiverat granulerat kol (GAC), tätt följt av ozoneringslinjen (med genomsnittlig ozondos ca 8 g O₃/m³), tabell 11 och tabell 12. Den fiktiva kolåtgången sjönk successivt ned till 39 g/m³ när försöket avbröts, då hade avskiljningen sjunkit under 80 % (77%). Kolförbrukningen i Rimbo är högre än den typiska måldosen 25 g/m³. Orsaken kan vara den relativt höga DOC-halten som konkurrerar med läkemedelsresterna om avskiljning. Resultatet stämmer bra överens med labmätningar.

Avskiljningsgraden för de 21 detekterade läkemedelsresterna i utgående avloppsvatten var i snitt 92 % med GAC och 89 % med ozonering, tabell 12. Ozondosen var 8,0 g/m³ för att uppnå 91 % rening i genomsnitt baserat på veckomedelvärden av reningsgrader för varje ämne, tabell 11.

Tabell 11. Ozondosen för olika veckor och genomsnittlig reningsgrad.

Medeldos vecka	gO ₃ /m ³	gO ₃ /gDOC	Medelavskiljning %
14	7,8	0,79	89,4
15	7,8	1,03	90,1
16	7,8	0,97	
17	7,8	0,80	
18	7,8	0,78	91,1
19	7,8	0,78	95,6
20	8,3	0,79	
21	7,4	0,68	89,5
22	8,2	0,75	93,6
23	8,6	0,78	
24	9,1	0,76	90,6
25	9,1	0,76	
Medel v 14-24	8,0	0,81	91,4
Medel v 14-25	8,1	0,81	

En förklaring till den relativt höga ozondosen som hölls under försöken var att TOC- och DOC-halterna var relativt höga, 11,2 respektive 10,1 g/m³ i utgående vatten från Rimbo ARV. Den specifika ozondosen var i genomsnitt 0,81 g O₃/g DOC. Ozonbehovet för att nå 80%, hade varit ca

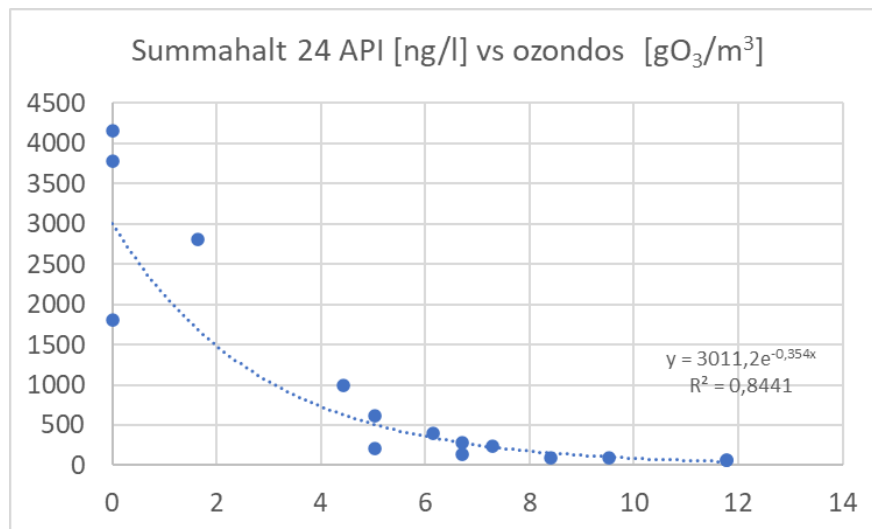
0,50-0,60 gO₃/g DOC, baserat på både veckoproverna och dos-responsförsök samt urval av substanser, figur 27. Den specifika ozondosen varierade under de kontinuerliga pilotförsöken mellan 0,68–1,03 g O₃/g DOC med standardavvikelsen ±0,1.

Tabell 12. Avskiljningsgrader för läkemedelsrester under de skarpa försöksveckorna med ozonering följt av sandfilter respektive aktiverat granulerat kol (GAC).

Prov	Ozon+SF 2022 V14-V24	GAC 2022 V14-V24
Substans [ng/l]	Avskiljning [%]	Avskiljning [%]
Atenolol	96,0	96,0
Carbamazepine	97,0	97,2
Ciprofloxacin		
Citalopram	98,8	99,2
Clarithromycin	93,4	90,9
Diclofenac	99,5	95,5
Erythromycin	29,0	41,3
Fluconazole	49,7	94,7
Furosemide	98,6	95,4
Ibuprofen	98,3	89,1
Ketoconazole		
Losartan	98,9	92,4
Metotrexat		
Metoprolol	98,1	98,3
Naproxen	98,0	94,1
Oxazepam	78,2	96,6
Paracetamol	51,3	91,0
Propranolol	97,5	97,5
Sertraline	92,9	91,3
Sulfamethoxazole	98,9	85,5
Tramadol	99,0	97,6
Trimethoprim	98,4	98,4
Venlafaxine	99,6	97,7
Zolpidem		
Medel	88,6	92,0
Median	98	95,4
Min	29	41,3
Max	99,6	99,2

Ozonering - dos/respons-bestämningar

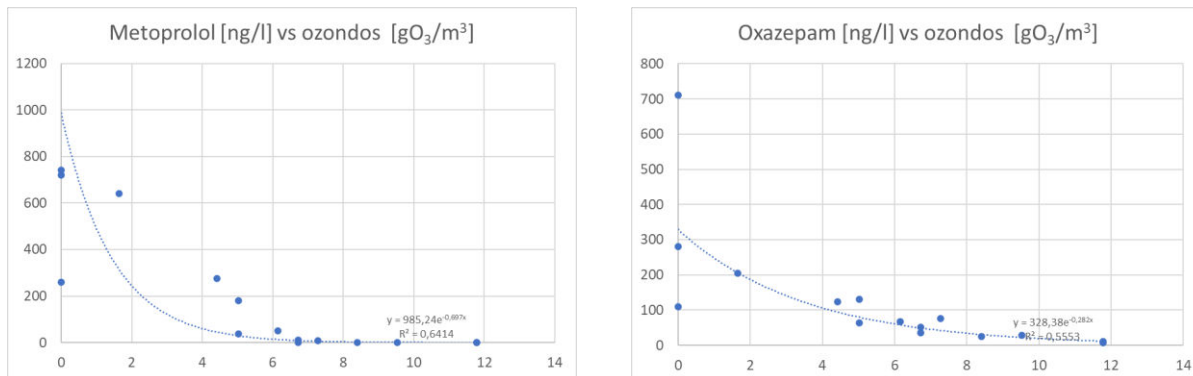
Dos/responsförsöken med ozon visade att summan av de 24 utvalda läkemedelsresterna, "APlerna", minskade med ökande ozondos, figur 22. I de fall analysvärdet var lägre än kvantifierings- eller detektionsgränsen (halten) användes halva värdet i summeringen.



Figur 22. Summa [µg/l] av de utvalda 24 läkemedelsrester (APler - Active Pharmaceutical Ingredient) som funktion av ozondosen [gO₃/m³] vid tre tillfällen 2022 på Rimbo reningsverk.

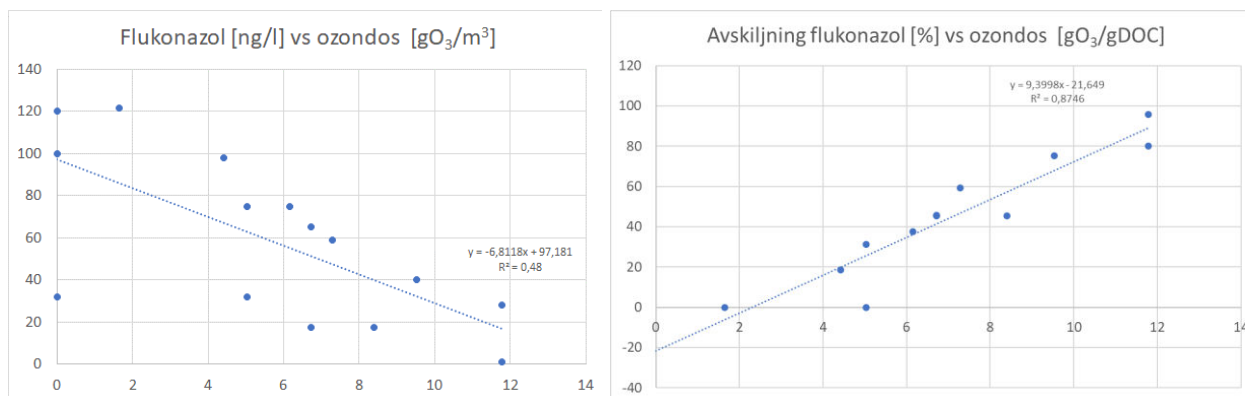
Dos responskurvan visar att erforderlig ozondos ligger runt 5-6 g/m³ för att uppnå 80% avskiljning av läkemedelsrester från utgående avloppsvatten från Rimbo reningsverk.

Ett urval gjordes av två representanter för de 24 läkemedelsrester som analyserats i ozonerat vatten, metoprolol (en betablockerare) och oxazepam (lugnande medel). Minskningen i metoprolol- respektive oxazepamhalt som funktion av ozondosen var tydlig, figur 23 och liknar mönstret för summan av de 24 utvalda, figur 22.



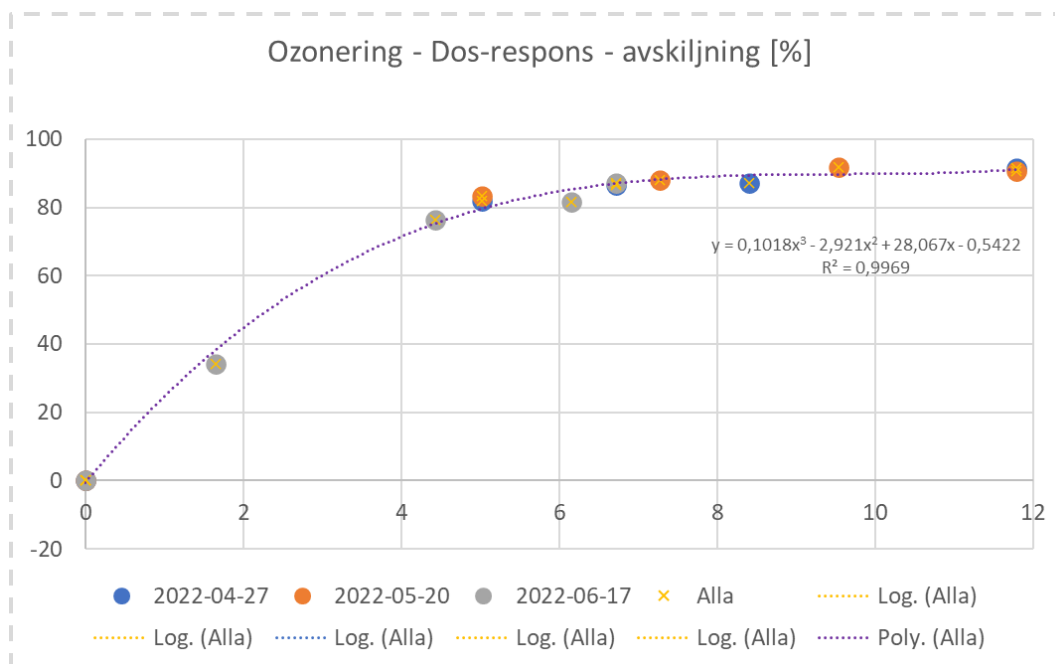
Figur 23. Halten av metoprolol respektive oxazepam som funktion av ozondosen på Rimbo ARV.

Flukonazol är det läkemedel som brukar vara svårt att bryta ned med ozon och så även på Rimbo reningsverk, även om halten trycks ned under kvantifieringsgränsen med mycket höga ozondoser som 16 g/m³. För att nå 80% avskiljning av flukonazol krävs 11 g/m³, figur 24.



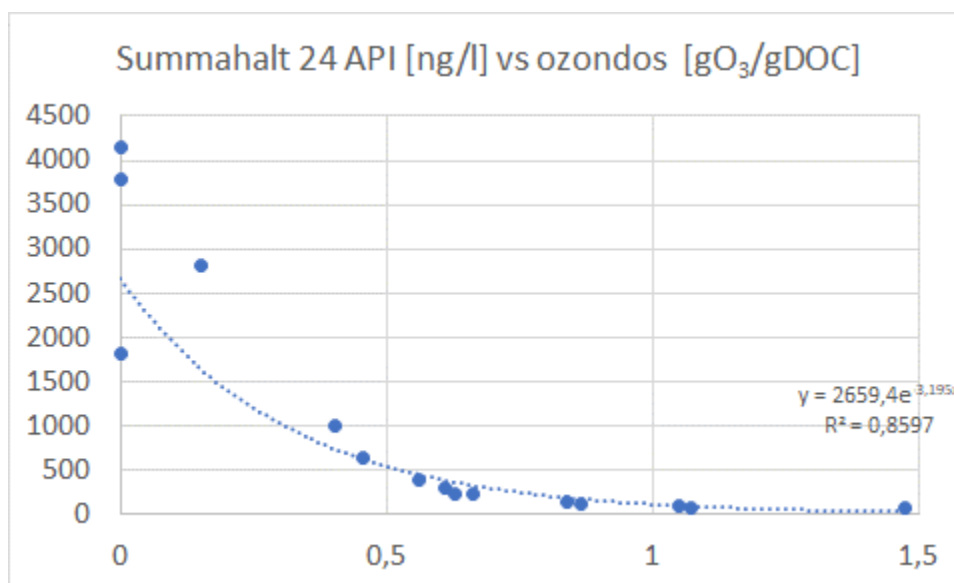
Figur 24. Halten av flukonazol och dess avskiljningsgrad som funktion av ozondosen.

Den genomsnittliga avskiljningsgraden för de 24 utvalda läkemedelsresterna ökade med ökande ozondos enligt ett typiskt mönster, figur 25. I de fall analysvärdet var lägre än kvantifierings- eller detektionsgränsen (halten) användes halva värdet vid beräkningen av avskiljningsgraden. Den erforderliga ozondosen för att nå 80 % avskiljning (ca 6 g/m³) var normal i jämförelse med några andra pilotförsök runt Mälardalen (ca 5-7 g/m³).

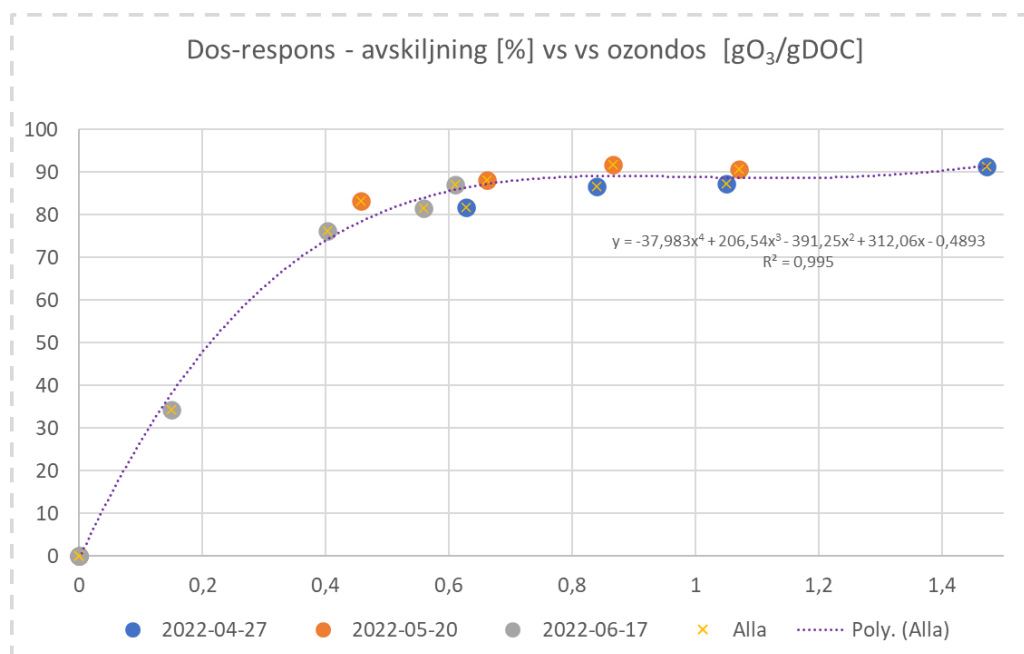


Figur 25. Dos-responsförsök genomsnittlig avskiljningsgrad vid olika ozondoser på Rimbo ARV.

Normering av ozondosen mot halten löst organiskt kol, DOC, i avloppsvattnet görs för att lättare kunna jämföra resultat och bedöma designer och dessas rimlighet mellan olika försök och olika reningsverk. Figur 22 och figur 25 ovan kan jämföras med följande två figurer där ozondosen normerats med DOC för att bestämma den så kallade specifika ozondosen, figur 25 - 26.



Figur 26. Summa [ng/l] av de utvalda 24 läkemedelsresterna som funktion av ozondosen [gO₃/gDOC] vid tre tillfällen år 2022.



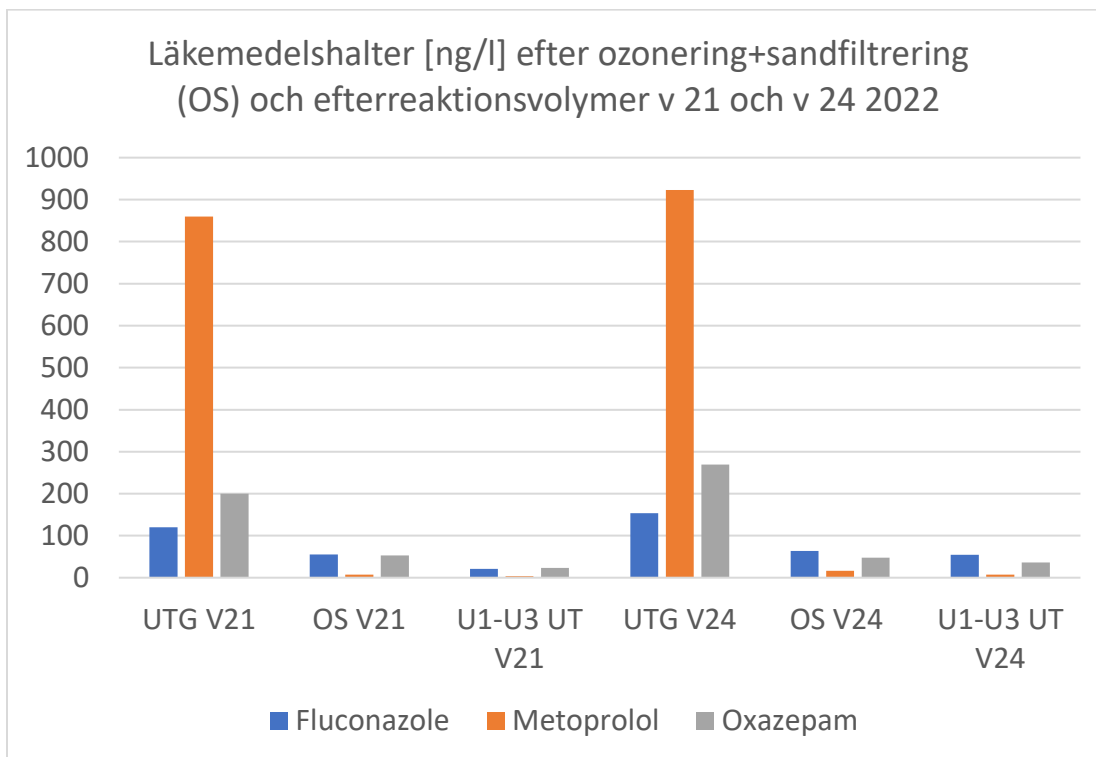
Figur 27. Genomsnittlig avskiljningsgrad för 24 läkemedelsrester vid olika specifika ozondoser.

Den genomsnittliga avskiljningsgrad för de olika specifika ozondoserna beräknades genom att använda värdet för halva detektionsgränsen i det fall halten sjönk nedanför detektionsgränsen vid ozoneringen. Kurvorna har ett typisk utseende. För att uppnå minst 80% genomsnittlig avskiljning fordras ca 0,5-0,6 gO₃/g DOC.

Läkemedelsavskiljning över kontakttankarna U0-U3 i ozoneringslinjen

I projektet undersöks möjligheten att förlänga den kontrollerade efterreaktionstiden för ozonerat vatten som ett alternativ till sandfiltrering. Prover från utloppet av den tredje av de tre sekventiella tankarna utvärderades framförallt med UV-absorbans, men också med läkemedelsanalyser vid två tillfällen, bilaga 8. Samlingsprover för analys av läkemedelsrester samlades in med kontinuerlig pumpning från utgående avloppsvatten, efter ozoneringens sandfilter och utloppet från den i serien tredje extra kontakttanken.

En jämförelse mellan effekten av att ha ett sandfilter med att inrätta en förlängd reaktionstid efter själva ozoneringskolonnen visar att kvarvarande läkemedelsrester efter ozoneringen minskade i åtta respektive fyra fall successivt genom den förlängda kontakttiden i kontakttankarna U1+U2+U3 jämför med att ha ett sandfilter. Antalet som minskar beror på vilket lab som analyserat proverna. Labbet i Kivik redovisade 27 olika ämnen efter ozoneringskolonnen varav åtta minskade tack vare den förlängda uppehållstiden. På motsvarande sätt visade resultaten från IVLs lab att av de 17 kvarvarande substanserna minskade fyra mer i upphållsvolymer än i sandfiltret. Resultaten för de tre läkemedelsrester som minskat enligt båda labben redovisas i figur 28.



Figur 28. Koncentrationen av fyra utvalda substanser genom serien av efterreaktionstankar.

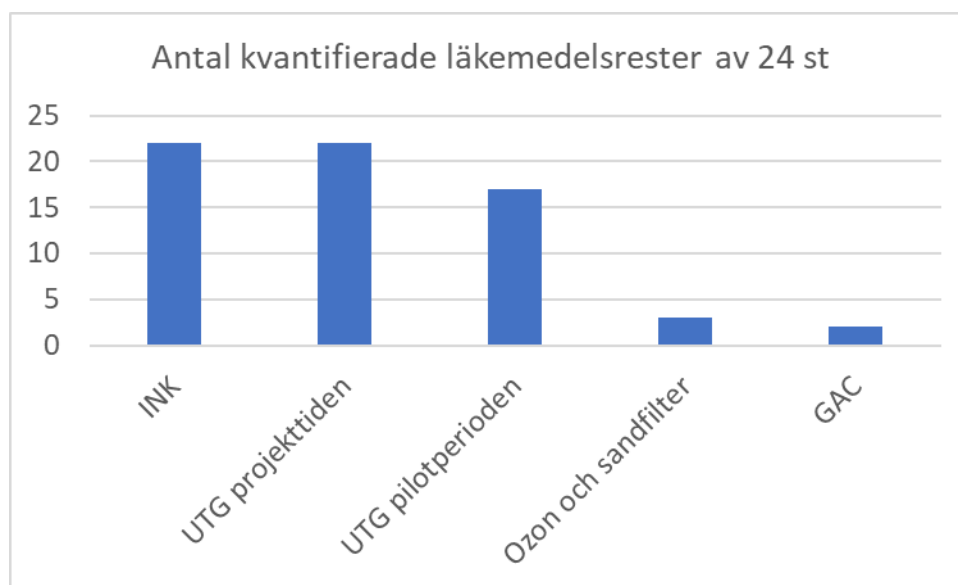
Den förlängda reaktionstiden har således viss effekt, vilket visar hur låga reaktionshastigheterna med ozon kan vara för vissa ämnen, åtminstone när ozonet är förbrukat och inte mätbart (<0,01 mg/l) i efterreaktionsvolymerna. Reaktionerna antas ske med radikaler, men det resonemanget utvecklas inte här.

Kostnaden för reaktionsvolymerna kan bli stora, speciellt om de skall byggas nya. I Rimbo reningsverk finns inga begagnade bassänger tillgängliga för förlängd reaktionstid, men nyttan av efterreaktionsbassängerna bedömdes som begränsade för att väga upp kostnaden för att bygga nya bassänger som alternativ till sandfilter. Baserat på dessa begränsade mätningar kommer efterreaktionsvolymerna i nuläget inte förberedas i reningsverket, utan möjliga efterreaktioner får ske i recipienten. Ytterligare ett alternativ är att placera hela eller delar av den stora dammen i reningsverket efter ett läkemedelsreningssteg för att putsa lite extra på avskiljningen.

Fler jämförelser mellan behandlingsmetoderna avseende läkemedelsrester

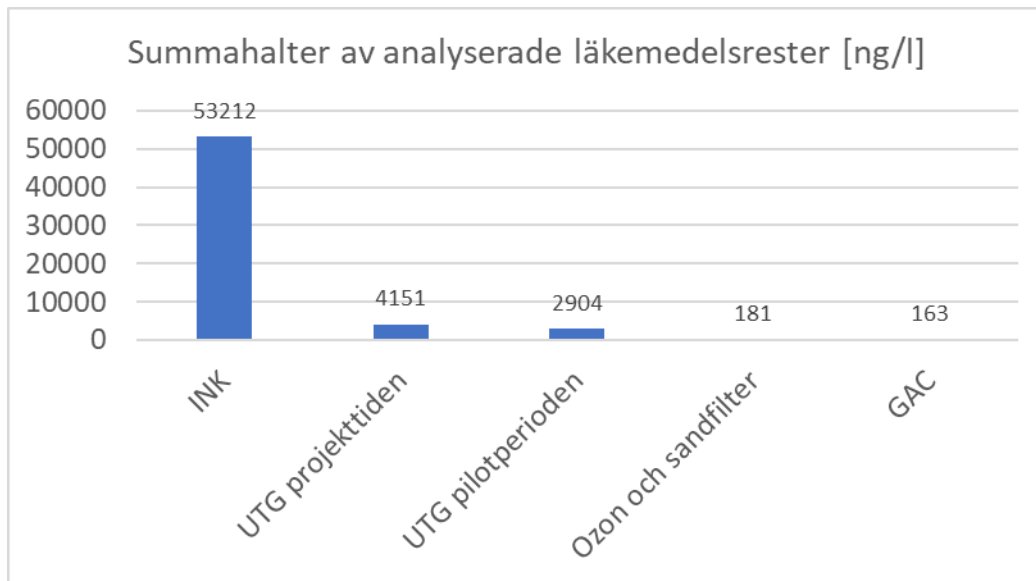
Kemiska analyser

Antalet detekterade läkemedelssubstanser kan vara ett enkelt, men grovt, sätt att undersöka olika behandlingars effekt på läkemedelskoncentrationerna. Analyser av proverna från försöken visar att av de 24 utvalda läkemedelsresterna detekterades i genomsnitt 22 i dagens inkommande och utgående avloppsvatten. Ozonering och GAC sänkte antal detekterade ämnen till tre respektive två detekterade substanser, vilket är ett bra och eftersträfvansvärt resultat, figur 29.



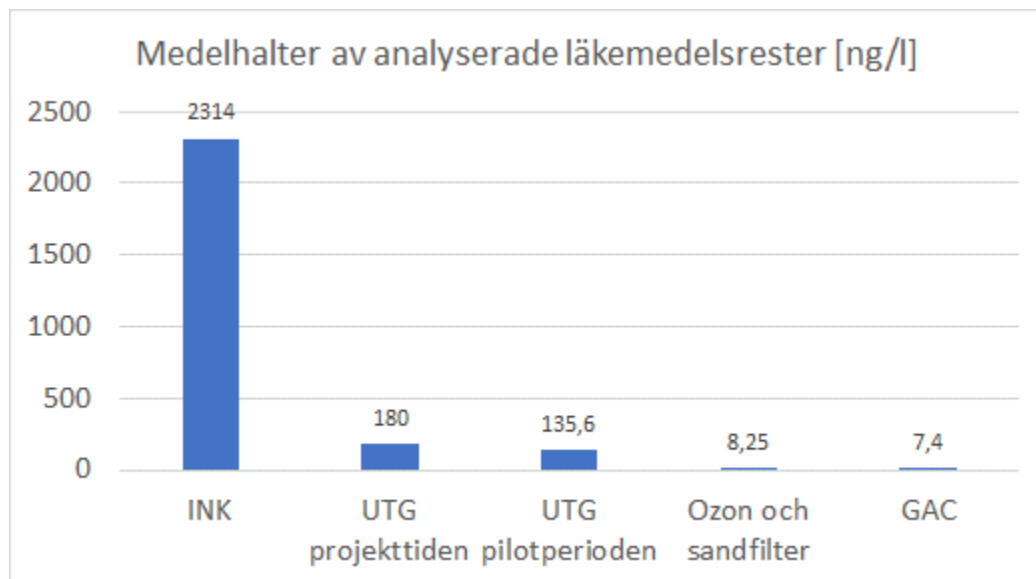
Figur 29. Antal detekterade läkemedelsrester i Rimbo reningsverk och efter pilotlinjerna.

En annan översiktlig jämförelse mellan de undersökta metoderna är att beräkna summahalter av de 24 utvalda läkemedelsresterna vilket visar att aktiverat kol hade den lägsta summan följt av ozonerat och sandfiltrerat med en något högre summa därefter ett tydligt steg upp till utgående och med ett rejält hopp upp till summahalten för inkommande avloppsvatten, figur 30.



Figur 30. Summahalter [ng/l] av läkemedelsrester i Rimbo reningsverk och i behandlat vatten från pilotlinjerna.

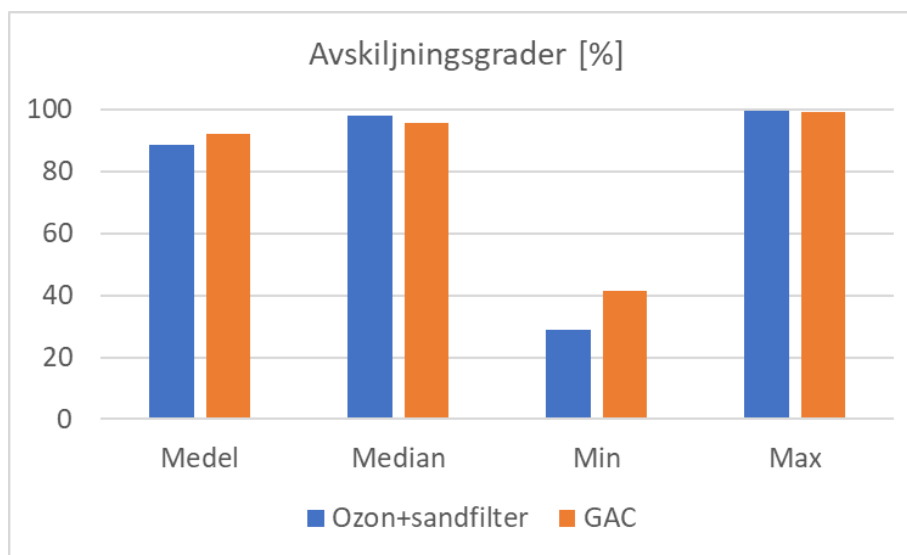
Medelhalten av läkemedelsresterna är en till summahalten snarlik parameter som kan beräknas för de olika vattnen in till och ut från pilotlinjerna. Mönstret av summahalterna från pilotstudien på Rimbo reningsverk upprepas i medelhalterna av de 24 ämnena, figur 31.



Figur 31. Medelhalt [ng/l] av de 24 läkemedelsresterna i Rimbo reningsverk och i behandlat vatten från pilotlinjerna.

Medelhalterna av de undersökta 24 läkemedelsresterna sjönk markant över dagens reningsverk, men medelhalterna var 16 respektive 18 gånger lägre med ozonering och respektive GAC, jämfört med dagens utgående halter.

Medelvärdet av de beräknade avskiljningsgraderna av läkemedelsrester med de olika pilotlinjerna, jämfört med dagens utgående vatten, uppgick till 89 % och 92 % för ozonering och sandfilter respektive aktiverat kol (GAC) för pilotperioden vecka 14-vecka 24 2022, figur 32.

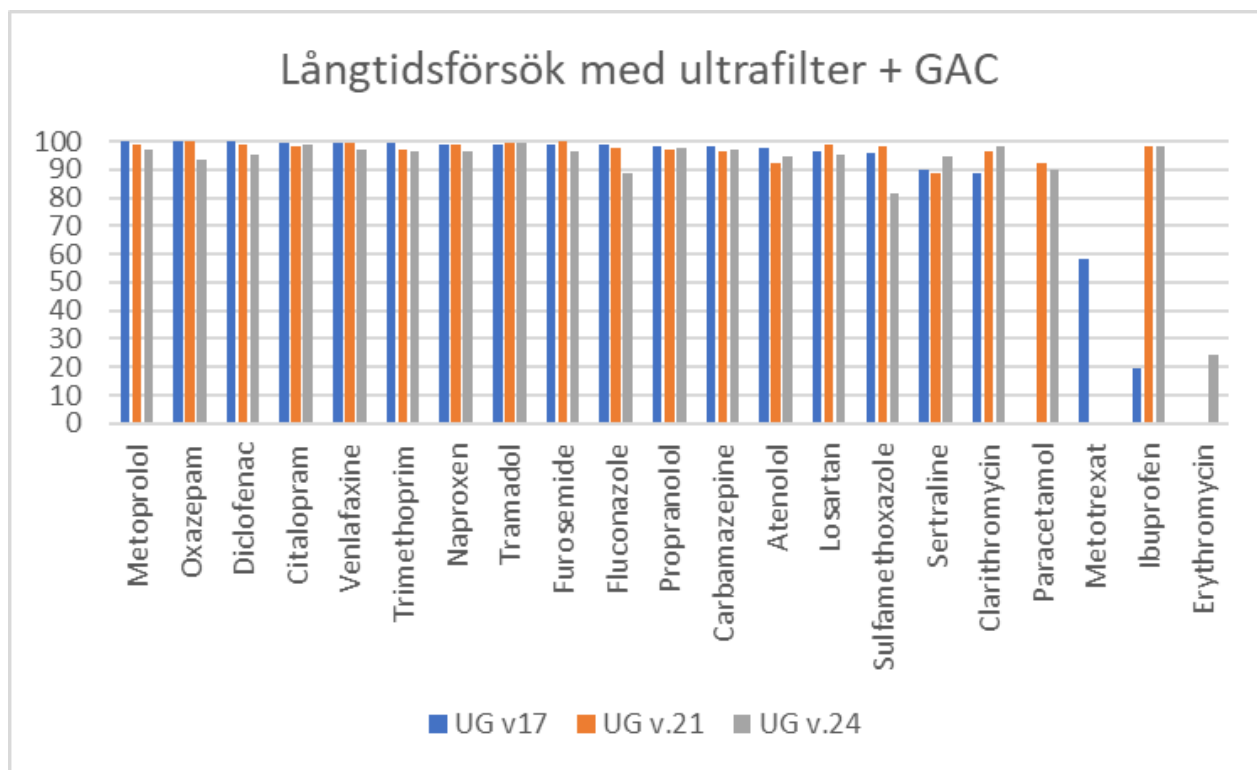


Figur 32. Avskiljningsgrader [%] i pilotlinjerna.

Variationen i avskiljningsgrad är stor, men genomsnittlig och speciellt medianavskiljningsgraden är hög. De genomsnittliga avskiljningsgraderna för läkemedelsrester i pilotanläggningarna var som förväntat större än 80%.

Kombinationsprocesser - kontinuerliga labskaleförsök med – ultrafilter + GAC respektive ozonerat + GAC

Två olika labanläggningar (mycket små pilotanläggningar) med ultrafilter plus GAC-filter respektive ozonering plus GAC-filter drevs kontinuerligt och parallellt med de större pilotanläggningarna. Kombinationen ultrafilter + GAC drevs för att se hur en avlastning av suspenderat material påverkade driften och reningsresultatet med avseende på läkemedelsrester. GAC-filtret behövde inte backspolas någon gång under hela försöksperioden, tryckfallet över bädden var oförändrat under försöksperioden. Däremot backspolades den föregående UF-enheten regelbundet sex gånger per dygn. Spolvolymen för UF-enheten var 60% lägre än spolvolymen för ett motsvarande kolfiler utan föregående UF. Avskiljningen av läkemedelsresterna var hög och minskade marginellt under försökstiden, figur 33.



Figur 33. Avskiljningsgrader [%] i linjen med ultrafilter + GAC.

Avskiljningen var i samma storleksordning som GAC-filtret som inte föregicks av ultrafilter, tabell 13 och 14. Några ämnen avskildes dock marginellt bättre, vilket kan vara en effekt av lägre DOC- och TOC-halt efter ultrafiltrering jämfört med sandfiltrerat utgående avloppsvatten.

Den specifika förbrukningen av GAC i kombinationsprocessen hann under försöken gå ned till 36 g GAC/m³ och medelavskiljningen låg ändå kvar på 92% avskiljning. En från analysdata beräknad jämförelseavskiljning vid 100 g GAC/m³ gav medeltal 96% avskiljning, jämfört med 92% med enbart GAC, vilket visar att kombinationen UF och GAC kan ha en viss fördel över enbart rening med GAC, tabell 13.

Tabell 13 Avskiljningsgrad vid 100 g/m³ för GAC, ultrafilter+GAC respektive ozon+GAC

Grupp eller ämne	Avskiljningsgrad vid 100 g/m ³		
	GAC	UF+GAC	Ozon+GAC
Alla 20 kvantade	92,4	95,6	97,2
Flukonazol	91,9	93,7	93,5
Oxazepam	95,0	97,0	97,2

Tabell 14. Avskiljningsgrader för kombinationsprocesser – sorterade i fallande ordning

Kombinationen ultrafilter och GAC

Ämne \ Dos g/m ³	UG v17	UG v.21	UG v.24
Metoprolol	99,9	98,9	97,1
Oxazepam	99,8	99,8	93,2
Diclofenac	99,8	98,6	95,2
Citalopram	99,6	98,5	99,0
Venlafaxine	99,6	99,7	96,8
Trimethoprim	99,4	96,9	96,4
Naproxen	99,1	99,1	96,6
Tramadol	99,1	99,2	99,2
Furosemide	99,0	99,8	96,3
Fluconazole	98,6	97,7	88,7
Propranolol	98,5	96,9	97,7
Carbamazepine	98,1	96,5	97,2
Atenolol	97,5	92,4	94,8
Losartan	96,6	98,8	95,3
Sulfamethoxazole	96,1	98,2	81,8
Sertraline	90,0	88,9	94,6
Clarithromycin	88,9	96,7	98,0
Paracetamol		92,3	89,6
Metotrexat	58,0		
Ibuprofen	19,4	98,1	98,5
Erythromycin	0,0	0,0	24,2
Medel	86,9	92,3	91,5

Kombinationen ozonerat och GAC

Ämne	OG v17	OG v22	OG V24
Diclofenac	99,8	99,7	99,8
Citalopram	99,5	99,7	99,4
Sulfamethoxazole	99,5	88,7	99,9
Naproxen	99,4	99,6	98,1
Venlafaxine	99,4	99,8	99,8
Trimethoprim	99,2	96,4	98,2
Furosemide	99,2	99,3	93,8
Metoprolol	98,4	99,9	99,8
Tramadol	98,3	99,4	99,7
Propranolol	98,3	97,7	99,8
Carbamazepine	98,0	97,6	99,8
Atenolol	97,4	94,8	98,5
Losartan	96,9	96,9	99,8
Sertraline	94,4	99,5	96,8
Oxazepam	88,1	99,8	98,9
Clarithromycin	77,8	96,5	98,1
Fluconazole	75,7	99,3	96,4
Ibuprofen	35,9	95,6	
Ciprofloxacin			96,3
Erythromycin			95,5
Paracetamol		84,2	91,5
Zolpidem			87,2
Medel	92,0	97,1	97,5

Kombinationen ozonering + GAC drevs för att se hur en avlastning av läkemedelsrester med ozonering påverkade reningsresultatet med avseende på läkemedelsrester efter ett efterföljande GAC-filter. Avskiljningen av läkemedelsresterna var hög och minskade marginellt under försökstiden, figur 34 och tabell 14.

Avskiljningen ökade med i genomsnitt runt 5% genom kombinationen ozonering + GAC jämfört med enbart aktivt kolfiltrering (GAC). Ozoneringen var först i kombinationsprocessen och tog därför lejonparten av läkemedelsresterna, 83-93%, figur 34.

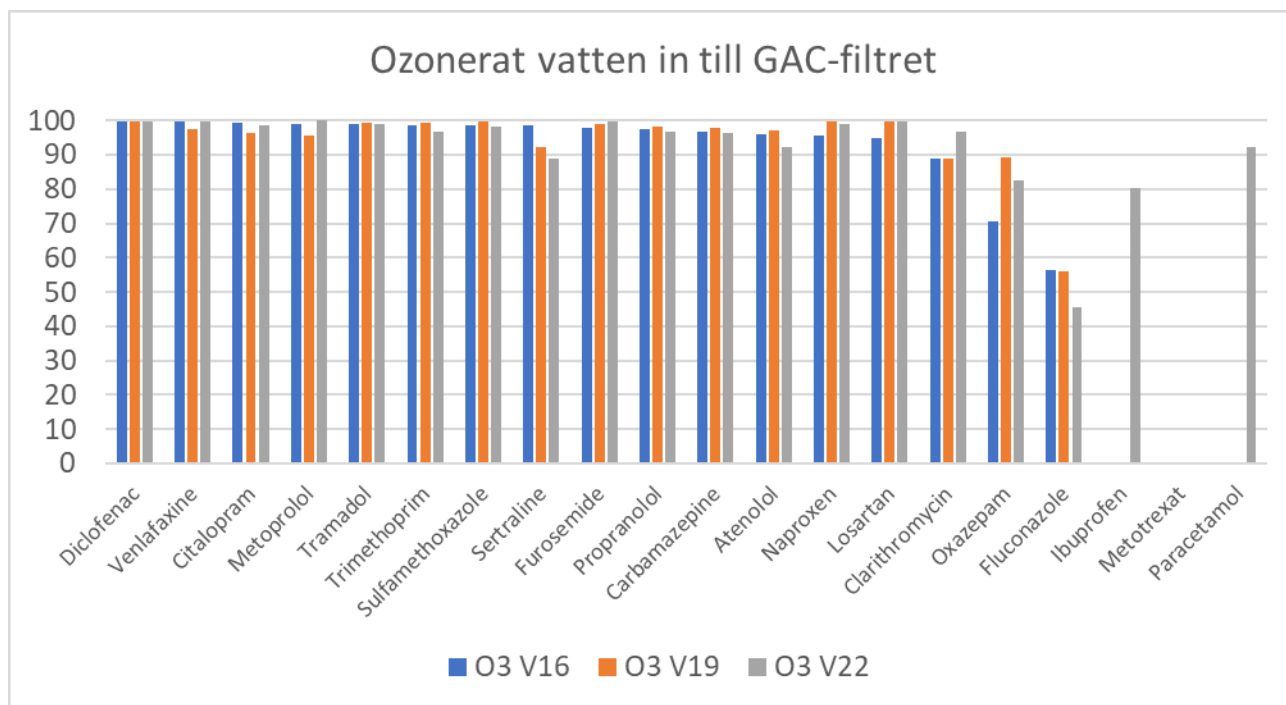
Den beräknade specifika förbrukning av GAC under försöken med Ozon+GAC hann gå ned till 53 g GAC/m³ och medelavskiljningen låg på 96% avskiljning. Jämförelseavskiljningen vid 100 g GAC/m³ var 97% jämfört med 92% med enbart GAC, vilket visar att kombinationen ozon och GAC har en fördel genom att förbättra avskiljningen än med enbart GAC, tabell 13 ovan.

En jämförelse mellan enbart ozonerat med ozonerat plus sandfiltererat visar att avskiljningsgraden endast ökade med 1-3 % genom att låta ozonerat vatten passera ett sandfilter, tabell 15.

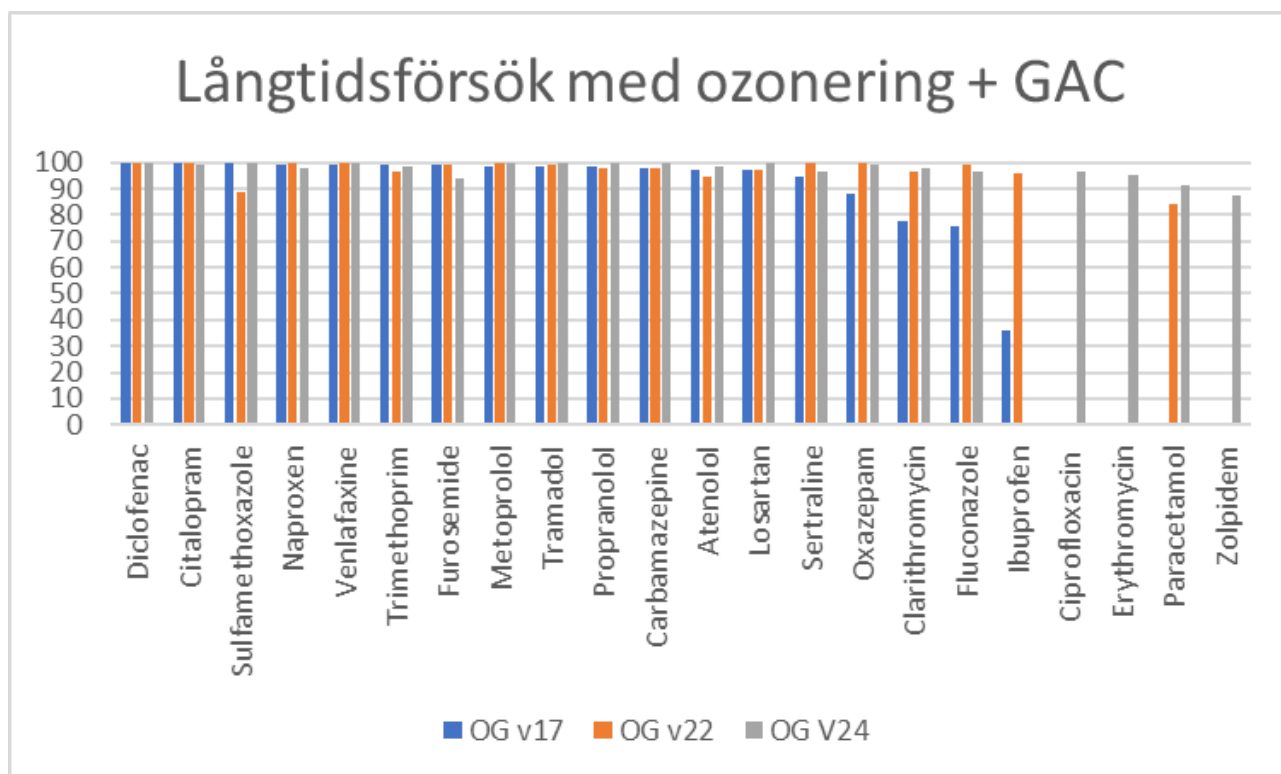
Tabell 15. Avskiljningsgrader för ozonerat avloppsvatten utan eller med efterföljande sandfiltrering. Avskiljningsgraderna är sorterade i fallande ordning.

Avskiljningsgrader ozonerat				Avskiljningsgrader ozonerat + sandfiltererat			
Ämne\veckoprov	O3 V16	O3 V19	O3 V22	Ämne\veckoprov	OS v15	OS v19	OS v.22
Diclofenac	99,6	99,8	99,9	Diclofenac	99,9	99,9	99,9
Venlafaxine	99,6	97,6	99,7	Venlafaxine	99,5	99,7	99,7
Citalopram	99,5	96,3	98,5	Citalopram	98,5	99,0	98,5
Metoprolol	98,9	95,7	100,0	Metoprolol	96,7	99,0	99,4
Tramadol	98,9	99,5	99,2	Tramadol	98,4	99,4	99,2
Trimethoprim	98,8	99,4	96,9	Trimethoprim	98,8	99,3	96,9
Sulfamethoxazole	98,7	99,6	98,2	Sulfamethoxazole	97,9	99,5	98,2
Sertraline	98,5	92,4	88,9	Sertraline	84,8	97,0	88,9
Furosemide	97,8	99,1	99,8	Furosemide	99,7	99,6	99,8
Propranolol	97,5	98,1	96,9	Propranolol	97,5	98,1	96,9
Carbamazepine	96,7	97,7	96,5	Carbamazepine	96,1	97,8	96,5
Atenolol	96,0	97,1	92,4	Atenolol	96,0	97,1	92,4
Naproxen	95,7	99,8	99,1	Naproxen	94,6	99,8	99,1
Losartan	94,9	99,7	99,8	Losartan	99,8	97,7	98,8
Clarithromycin	88,9	88,9	96,7	Clarithromycin	93,8	88,9	96,7
Oxazepam	70,8	89,3	82,5	Oxazepam	62,3	91,1	82,5
Fluconazole	56,3	56,0	45,7	Fluconazole		62,0	42,9
Ibuprofen	0,0	0,0	80,2	Ibuprofen	64,8	-33,3	98,1
Metotrexat				Metotrexat	28,6	80,0	
Paracetamol	0,0	0,0	92,3	Paracetamol	34,6	30,0	92,3
Medel	83,5	84,5	92,8	Medel	86,4	85,1	93,5

GAC-filtret kunde således något förbättra den genomsnittliga läkemedelsreningen än vad ett sandfilter gjorde, jämför tabell 15 med tabell 14. När det gäller enskilda ämnen förbättrades avskiljningen av t.ex. oxazepam och flukonazol med kombinationsprocessen i motsvarande grad, tabell 13. I det fall specifika substanser måste avskiljas med hänsyn till recipienten och att de är svåra att avskilja med antingen ozonering eller aktiverat kol kan kombinationsprocessen bäst komma till sin rätt. Kostnaden blir dock betydligt högre med två processer.



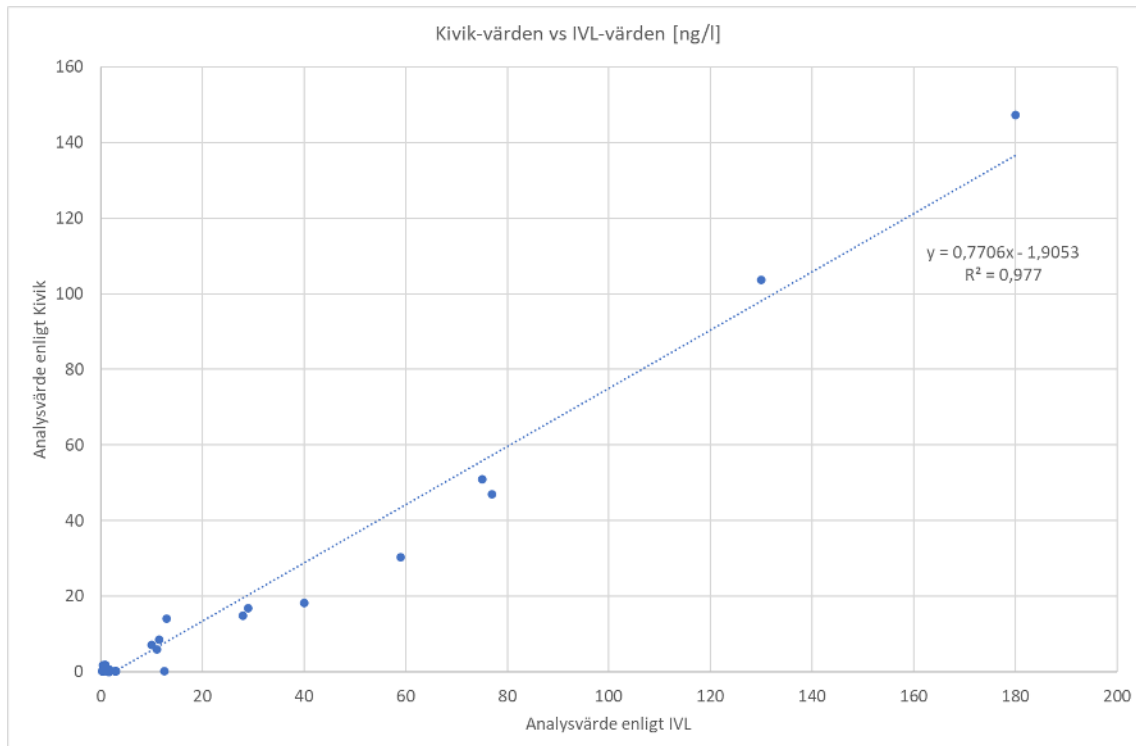
Figur 34. Avskilningsgrader efter enbart ozonering (men ej sandfiltrerat).



Figur 35. Avskilningsgrader efter ozonering plus GAC-filtrerat.

Jämförelse av analysresultaten för läkemedelsrester från tre lab för samma provvatten

Tre olika laboratorier har varit involverade i analyserna av läkemedelsrester i avloppsvatten. IVL analyserade flertalet av proverna. Miljö och Media på Kivik AB /MoLab (Kivik) analyserade 34 prover, medan SGS Analytics Sweden AB (SGS) analyserade ett prov från Rimbo.



Figur 36. Jämförelse mellan IVL och Kivik av analysresultat från ozonerat avloppsvatten från dos-respons, halter av olika substanser i prover analyserade parallellt av de två labben.

Summan av halterna i de analyserade proverna i figur 36 uppgick till 707 och 476 ng/l för IVLs respektive Kiviks analyserade prover.

I form av en marginell interkalibrering, analyserades ett prov på samma avloppsvatten av alla de tre laboratorierna för att jämföra analysernas rimlighet och halternas nivå samt att ge data för några fler substanser än de 24 substanser som IVL analyserade. En jämförelse mellan resultaten visar att halterna grovt sett ligger i samma härad/inom samma tiopotens, men att halterna i något fall kan skilja sig upp till 100 %, tabell 16. IVLs uppmätta halter är i flera fall högre än Kiviks och SGSs rapporterade halter.

Tabell 16. Jämförelse mellan analysresultat från SGS, Kivik och IVL halter, ng/l.

Substans	Rapporterade halter				Avvikelse mot medel [%]		
	SGS	Kivik	IVL	Medel	SGS	Kivik	IVL
Atenolol	22	20	16	19,3	13,8	3,5	-17,2
Ciprofloxacin	25	22	--	23,7	5,7	-5,7	
Citalopram	68	84	160	104	-34,6	-19,3	53,9
Clopidol	<10						
Crotamiton	<10						
Diklofenak	180	232	270	227	-20,9	2,2	18,7
Erytromycin	<10	11	4,4	7,8		43,5	-43,5
Flukonazol	130	154	190	158	-17,7	-2,6	20,3
Furosemid	380	81	480	314	21,2	-74,2	53,1
Ibuprofen	<30	17	110	63,3		-73,7	73,7
Karbamazepin	160	154	120	145	10,5	6,6	-17,1
Ketoconazol	<10	0,8	2,3	1,6		-47,4	47,4
Klaritromycin	34	27	47	35,9	-5,3	-25,7	30,9
Losartan	420	209	1200	610	-31,1	-65,7	96,8
Metoprolol	840	923	900	888	-5,4	4,0	1,4
Metotrexat	<10	<0,1	0,31	0,3			0,0
Naproxen	120	257	370	249	-51,8	3,3	48,5
Oxazepam	430	269	220	306	40,4	-12,2	-28,2
Paracetamol	<10	94	14	53,9		74,0	-74,0
Primidon	<10						
Propanolol	20	24	36	26,8	-25,4	-8,9	34,3
Sertralin	<10	2,6	31	16,8		-84,6	84,6
Sotalol	100						
Sulfadiazin	<10						
Sulfametoxazol	220	56	93	123	78,7	-54,2	-24,5
Tramadol	310	288	300	299	3,6	-3,8	0,2
Trimetoprim	25	28	23	25,5	-1,8	11,5	-9,7
Venlafaxin	190	223	240	218	-12,7	2,4	10,3
Zolpidem	<10	1,3	0,33	0,8		59,2	-59,2
Summa	3674	3179	4827	3916	-6,2	-18,8	23,3
Medel	204	138	210	163	-1,9	-11,6	13,1
Median	145,0	80,8	110,0	83,7	-5,3	-3,8	10,3

Beräkning av avskiljningsgrader vid ozonering – dos responsförsök – jämförelser mellan lab

Fem av proverna som analyserades av två lab kom från ett dos-responsförsök på Rimbo den 20 maj 2022. Kivik analyserade flest ämnen och deras resultat användes för att beräkna avskiljningsgraderna, vilka sedan sorterades i fallande effekt dvs från mest till minst avskilt. Beräkningar av avskiljningsgrad för den bland de testade doserna mest realistiska ozondosen för fullskala, 5 g/m³, redovisas, med 7,5 g/m³ som jämförelse, tabell 17.

Tabell 17. Jämförelse mellan avskiljningsgrad vid ozondosen 5 g/m³ respektive 7,5 g/m³, beräknade på analysvar från Kivik och IVL.

Dos-responsförsök 2022-05-20 – 5 g/m ³			Dos-responsförsök 2022-05-20 – 7,5 g/m ³		
Substans	MoLab (Kivik)	IVL	Substans	MoLab (Kivik)	IVL
Losartan	99,99	99,7	Losartan	99,99	99,7
Carbamazepine	99,9	97,7	Carbamazepine	99,9	97,7
Propranolol	99,9	98,1	Venlafaxine	99,9	99,8
Diclofenac	99,8	99,8	Propranolol	99,9	98,1
Trimethoprim	99,6	99,4	Diclofenac	99,8	99,8
Furosemide	99,6	99,1	Tramadol	99,7	99,5
Sertraline	99,5	92,4	Trimethoprim	99,6	99,4
Citalopram	99,1	99,7	Citalopram	99,6	99,7
Erythromycin	99,0	66,7	Furosemide	99,6	99,1
Azithromycin	98,9		Sertraline	99,5	92,4
Tramadol	97,5	99,5	Paracetamol	99,3	66,7
Sulfamethoxazole	97,2	99,6	Metoprolol	99,1	98,6
Paracetamol	96,9	66,7	Erythromycin	99,0	66,7
Clarithromycin	96,6	88,9	Azithromycin	98,9	
Venlafaxine	94,3	93,2	Atenolol	98,7	97,1
Ciprofloxacin	91,7		Hydrochlorothiazide	98,4	
Naproxen	91,4	99,8	Sulfamethoxazole	98,2	99,6
Hydrochlorothiazide	85,7		Clarithromycin	96,6	88,9
Metoprolol	80,1	75,0	Ciprofloxacin	91,7	
Irbesartan	79,1		Naproxen	91,4	99,8
Atenolol	75,1	62,1	Irbesartan	91,3	
Oxazepam	57,2	53,6	Oxazepam	80,6	72,5
Imidacloprid	39,0		Imidacloprid	72,2	
Fluconazole	31,2	25,0	Fluconazole	59,1	41,0
Medel	87,85	85,05	Medel	94,67	90,32

Samstämmigheten i avskiljningsgrad är stor för många substanser oavsett vilket lab som analyserade proverna, men generellt ger mätdata från IVL något lägre avskiljningsgrader, delvis beroende på högre kvantifieringsgränser (LOQ). Det finns en risk att avskiljningsgraden något underskattats i pilotförsöken på Rimbo reningsverk eftersom de flesta beräkningar baseras på IVL-data.

Enligt beräkningarna av avskiljningsgrader var sertralin, paracetamol, erytromycin, clarithromycin, naproxen, oxacepam och flukonazol de tydligaste exemplen på behovet av interkalibreringar, förbättrade analyser eller kvalitetssäkringsrutiner.

Resultat - Externa analyser - förutom läkemedelsrester

Bromid och bromat i utgående avloppsvatten och ozonerat vatten

En risk med ozonering är att bromat bildas genom oxidation av bromid som kan finnas i avloppsvattnet. Bromat är giftigt och är rapporterat att vara mutagent och cancerogent. LC50-värdet (dödlig koncentration för halva fiskbesättningen) är 100 mg/l efter 96 h exponering. Det finns en rekommendation och föreslag till miljökvalitetsnormen som är satt till 0,050 mg bromat/l. Utvalda prover under perioden för pilotkörningar sändes in till laboratorium för att analysera förekomsten av bromid och bromat i avloppsvattnet, före och efter ozonering, Tabell 18.

Tabell 18. Bromid och bromathalter under pilotförsöken i utgående avloppsvatten från Rimbo ARV och i ozonerat utgående vatten.

Prov	Vecka nr	Ozondos g/m ³	Bromid, Br mg/l	Bromat mg/l
Rimbo Utg v16	V16	0	<1,0	-
Rimbo UTG 2022-04-27	V17	0	-	<0,003
Rimbo OZ 2 2022-04-27	V17	11,8	-	<0,004
Rimbo OZ 4 2022-04-27	V17	5,0	-	<0,003
Rimbo Utg v18	V18	0	<1,0	-
Rimbo OS v18	V18	7,8	-	<0,020
Rimbo Utg v21	V21	0	<1,0	-
Rimbo Utg v24	V24	0	<1,0	-
Rimbo Ozon 4 22-06-17	V24	6,2	-	<0,020

Halterna av bromid och bromat låg alla under respektive kvantifieringsgränser, även för de direktozonerade proverna OZ2 och OZ4 (prover efter ozoneringskolonn, men före tillhörande

sandfilter). Ett stresstest i samband med ett dos-responsförsök den 27 april, där ozondosen var så hög som 11,8 gO₃/m³ (OZ 2 i tabellen ovan), visade en marginellt högre kvantifieringsgräns, men inget kvantifierat värde. Gränsvärdet för bromat är lågt, 50 µg/l och samtliga provresultat under gränsvärden och bromatkoncentrationerna diskvalificerar därför inte ozonering som behandlingsmetod. Vidare är bromidkoncentrationerna som förväntat låga, vilket även det talar för att ozonering är möjlig att välja som process för läkemedelsrening på Rimbo reningsverk.

Hormoner

Prover på utgående vatten från dagens reningsverk och pilotanläggningen analyserades med avseende på östrogener av Kivik och IVL. Estron/östron "E1" detekterades i fyra prover på utgående vatten och medelhalten var 1,7 ng/l i dessa fyra prover, tabell 19. Medräknas alla utgående provresultat, där även ej detekterade halter medräknas, var medelhalten 0,34 ng E1/l. Den enda detekterade halten av E1 i IVLs bestämning kunde dock inte kvantifieras. Kivik kunde detektera E1 i tre prover på utgående avloppsvatten, tack vara lägre detektionsgränser än IVL. Inte i något prov på utgående vatten från pilotlinjerna kunde något hormon detekteras, vilket indikerar att både ozonering och aktiverat kol tar bort de analyserade hormonresterna mer än vad dagens reningsverk gör.

Tabell 19. IVLs och ett urval av Kiviks hormonanalyser

	IVL	IVL	IVL	Kivik	Kivik	Kivik
	E1	E2	EE2	E1	E2	EE2
Provnamn	Estrone	Estradiol	Ethinylestradiol	Estrone	Estradiol	Etinyestradiol
UTG v.17	2-6	<1	<1	<0,02	<0,02	<0,02
GAC v.17	<1	<2	<1	<0,02	<0,02	<0,02
OS v.17	<1	<1	<1	<0,02	<0,02	<0,02
UTG v.24	<1	<1	<1	<0,02	<0,02	<0,02
GAC v.24	<1	<1	<1	<0,02	<0,02	<0,02
Ozonerat v.24	<1	<1	<1	<0,02	<0,02	<0,02
UTG v21	-	-	-	0,5	<0,02	<0,02
UTG v25	-	-	-	1,2	<0,02	<0,02
UTG 22-06-17	-	-	-	0,9	<0,02	<0,02

Bromerade flamskyddsmedel

Med flamskyddsmedel avses oftast bromerade ämnen som ökar brandsäkerheten i många produkter såsom elektronisk utrustning, plaströr, textilier och mjuka möbler. De i runda tal 70-talet olika ämnena är i de flesta fall svårnedbrytbara och därmed långlivade i miljön.

Sex prover analyserades på utgående, ozonerat och aktivt kol-filtrerat avloppsvatten. Samtliga halter av de åtta ämnena låg under kvantifieringsgränsen 1 ng/l, tabell 20.

Tabell 20. SGS analysresultat av bromerade flamskyddsmedel.

Flamskyddsmedel		Rimbo Utg v24	Rimbo Utg v26	Rimbo GAC1, v24	Rimbo OS V24	Rimbo OS v22	Rimbo GAC v22
DekaBDE #209	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,2',4,4',5,5'-HxBDE #153	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,2',4,4',5,6'-HxBDE #154	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,2',4,4',6-PnBDE #100	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,2',4,4',5-PnBDE #99	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,2',4,4'-TeBDE #47	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,4,4'-TrBDE #28	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2,2',3,4,4',5',6-HpBDE #183	ng/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1

I Rimbo projektet analyserades även inkommande avloppsvatten, där låga halter av flamskyddsmedel kunde kvantifieras och prover från det anslutna tvätteriet, där högre halter rapporterades.

Nonylfenol

Nonylfenoletoxilat ger vid nedbrytning i reningsverk upphov till det hormonstörande ämnet nonylfenol. Tidigare har nonylfenoletoxilat funnits i importerade textilier, men innehållet har minskat sedan problemet uppmärksammades i början av 2000-talet. Veckoprover från pilotlinjerna för vecka 22, 24 och 26 2022 analyserades med avseende på nonylfenol i vatten av SGS enligt deras egen interna metod baserad på GC-MS, tabell 21.

Tabell 21. Nonylfenol i utgående, aktivkolfiltrerat och ozonerat avloppsvatten.

Fenoler		Rimbo Utg v24	Rimbo Utg v26	Rimbo GAC1, v24	Rimbo OS V24	Rimbo OS v22	Rimbo GAC v22
4-nonylfenol	µg/l	24	11	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
4-tert-oktylfenol	µg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Nonylfenoletoxylater	µg/l	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Nonylfenol(di)etoxylat	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Nonylfenol(mono)etoxylat	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Nonylfenol(tri)etoxylat	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Oktylfenol(di)etoxylat	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Oktylfenoletoxylater	µg/l	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Oktylfenol(mono)etoxylat	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Oktylfenol(tri)etoxylat	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Proverna från vecka 24 och 26 på utgående avloppsvatten hade relativt höga halter 4-nonylfenol, 24 respektive 11 µg/l, vilket är betydligt högre än ut från t.ex. Henriksdal och Bromma ARV, som i tidigare undersökningar hade halter lägre än 0,1 µg/l i sina utgående vatten. Förklaringen av de höga 4-nonylfenolvärdena kan möjligen hänföras till tvätterivattnet som leds till Rimbo ARV. Avskiljningen av nonylfenol över kolfiltret och ozonering var mycket god. Normalt sett brukar en begränsad avskiljning av nonylfenol ske över ett kolfilter. Avskiljningen över ozoneringen var också bättre än förväntat.

Oktylfenol kunde inte detekteras och inte heller några etoxylater i vare sig utgående avloppsvatten eller efter pilotlinjerna.

PFOS och PFOA

PFAS är ett samlingsnamn för tusentals olika syntetiserade substanser som innehåller kolväten med framförallt flera eller många utbytta väteatomer mot fluoratomer. Vissa PFAS substanser är cancerframkallande, andra kan orsaka leverskador eller påverka reproduktionsförmågan och immunsystemet. Substanserna är mycket svårnedbrytbara och kan finnas i vanliga produkter som smink, kläder och möbler.

Några utvalda veckoprover från pilotlinjerna för vecka 24 och vecka 26 2022 analyserades av SGS med avseende på 14 olika PFAS i avloppsvatten. Detektionsgränsen var mellan 0,3 och 2 ng/l för respektive ämne. En sammanställning av analysresultaten visar att flera former av de 11 PFAS föreningarna fanns i avloppsvattnen och kunde detekteras i alla prov, tabell 22.

Tabell 22. Halter av olika PFAS i några veckoprover från pilotkörningarna

PFAS		Rimbo Utg v24	Rimbo Utg v26	Rimbo GAC1, v24	Rimbo OS V24
PFBA	ng/l	4,1	0,64	8,7	9,3
PFPeA	ng/l	5,8	<2	7	8,5
PFHxA	ng/l	5,9	4,7	8	9,5
PFHpA	ng/l	2,7	2,3	2,8	3,9
PFOA, grenad	ng/l	0,48	0,36	<0,3	0,84
PFOA, linjär	ng/l	5,5	4,8	3,4	8,8
PFNA	ng/l	1,1	3,8	0,55	1,9
PFDA	ng/l	1,9	0,82	0,6	6,1
PFBS	ng/l	1,4	0,9	1,4	1,5
PFHxS	ng/l	1,7	2,2	1,1	1,9
PFOS, grenad	ng/l	2,4	4,4	8,1	8
PFOS, linjär	ng/l	3,1	11	11	11
PFOSA	ng/l	0,52	1,3	<0,3	3,9
6:2 FTS	ng/l	2,3	7,8	1,3	2,4
PFOA, total	ng/l	6	5,2	3,4	9,6
PFOS, total	ng/l	5,5	15	19	19
Summa 4 PFAS	ng/l	14	26	24	32
Summa 11 PFAS	ng/l	38	43	54	74

Halterna var relativt låga, t.ex. underskrids det tidigare gränsvärdet 90 ng/l för PFAS i dricksvatten. Däremot kommer det nya, kraftigt sänkta, gränsvärdet för dricksvatten och vissa livsmedel, 4 ng/l, som träder i kraft 1 januari 2023 inte att underskridas, även om en jämförelse med dricksvatten haltar för avloppsvatten.

Generellt sett visar försöken att granulerat aktiverat kol (GAC) tog bort en del PFAS-ämnen medan ozoneringen inte fungerar bra, alternativt ökar koncentrationerna av enskilda substanser. Sammanfattningsvis är reningen sämre både med GAC och ozon än i våra tidigare undersökningar. GAC funderar dock betydligt bättre än ozon, om ej tillfredsställande, tabell 23.

Summa 4 PFAS utgörs av PFOA, PFNA, PFHxS och PFOS och dessa fyra substanser bidra med knappt hälften av de PFAS som vi får i oss med dricksvatten, mat och luft. Därför är det intressant att se hur mycket som tillförs miljön med avloppsvatten

Tabell 23. Avskiljningsgrader PFAS-föreningar i pilotförsöken på Rimbo ARV 2022

Ämne	Avskiljning, % Rimbo GAC1, v24	Avskiljning, % Rimbo OS V24
PFBA	-112	-127
PFPeA	-21	-47
PFHxA	-36	-61
PFHpA	-4	-44
PFOA, grenad	69	-75
PFOA, linjär	38	-60
PFNA	50	-73
PFDA	68	-221
PFBS	0	-7
PFHxS	35	-12
PFOS, grenad	-238	-233
PFOS, linjär	-255	-255
PFOSA	71	-650
6:2 FTS	43	-4
PFOA, total	43	-60
PFOS, total	-245	-245
Summa 4 PFAS	-71	-129
Summa 11 PFAS	-42	-95

Avskiljningen av PFAS-föreningar har beräknats på korresponderande prov. I det fall en PFAS-förening har kvantifierats i ordinarie utgående avloppsvatten från Rimbo ARV och inte efter en pilotlinje har halva värdet för detektionsgränsen använts i beräkningarna av avskiljningsgrad, tabell 23.

Högst avskiljning stod GAC-linjen för, även om nivån och spridningen var stor. Avskiljningen av PFOS, både grenad och linjär var relativt hög till måttlig, runt 69% respektive 38%. Avskiljningen över ozoneringen var obefintligt dvs för alla ämnen var avskiljningen negativ, vilket skulle kunna tolkas som att PFAS-ämnen frigörs från partiklar som delvis bryts ned av ozon. Ozondosen var relativt hög i Rimbo vilket kan ha förvärrat situationen för PFAS-ämnen. Ozoneringen ger också stor spridning i avskiljningsgrader, vilket även tidigare försök på andra reningsverk visat, t.ex. på Lindholmens reningsverk.

Celltester för analys av vattenprover - bestämning av östrogena m fl effekter

Förutom Microtox användes celltester - effektbaserade metoder baserade på odlade celler som modifierats för att mäta specifika toxiska effekter i avloppsvattnen. Med metoden studerades förekomsten av ämnen som kan aktivera cellernas östrogenreceptor (ER), androgenreceptorn (AR), arylhydrokarbonreceptor (AhR) samt orsaka oxidativ stress (Nrf2), vilka alla återspeglar förändringar i den normala vattenmiljön.

Med celltesterna beräknas så kallade bioekvivalenta koncentrationer, bioequivalent concentrations, (BEQ), vilka beskriver den observerade effekten uttryckt som en koncentration motsvarande ett referensämne, som analyserades samtidigt. Referensämnena som användes var 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxin (TCDD) för att mäta AhR-aktivitet, 17 β -estradiol (E2) för ER-aktivitet, dihydrotestosteron (DHT) för AR-aktivitet, hydroxyflutamid (OHF) för anti-AR-aktivitet och tertiär butylhydrokinon (tBHQ) för Nrf2 (oxidativ stress).

Samlingsprov från utgående avloppsvatten, ozonerat och sandfiltrerat, granulerat aktiverat kol (GAC) samt ett kontrollvatten (KV) i form av ett aktivt kolfiltrerat kranvatten analyserades med celltesterna. Resultaten från celltesterna visade på relativt låg aktivitet i samtliga prover och med filtrering genom aktiverat kol hamnade alla aktiviteter under detektionsgränsen, tabell 24.

Tabell 24. Uppmätta aktiviteter i celltester av olika försöksvatten.

Receptor	Referensämne	Enhet	LOD	Kontroll-vatten (KV)	UTG	Ozon+ sandfilter	GAC
AR	Dihydrotestosteron	[pg DHT/l]	4,05	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
anti-AR	Hydroxyflutamid	[pg OHF/l]	0,0689	0,105	0,121	<LOD	<LOD
ER	17 β -estradiol	[pg E2/l]	16,8	<LOD	674	<LOD	132
Nrf2	tertiär-butylhydrokinon	[μ g BHQ/l]	6,3	11,3	8,59	<LOD	<LOD
AhR	2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxin	[pg TCDD/l]	119	150	732	<LOD	119

Aktivitetsnivåerna var lägre på Rimbo ARV än på Lindholmens ARV där samma typ av analys utfördes i närtid. En förklaring kan vara mer omfattande biologisk rening med flera steg på Rimbo ARV än på Lindholmens ARV.

Övriga observationer under försöken

Driftstörningar i efterfällningssteget på Rimbo ARV ledde till hög belastning på reningsverkets sandfilter, vilket i sin tur resulterade i hög suspbelastning på pilotanläggningens inloppsfilter och kolfilter samt ozoneringen. Pilotförsöken försenades och senarelades för att få mer realistiska förhållanden.

Inga fjädermygg eller dess larver observerades i Rimbo, vilket annars ofta förekommer vid pilotförsök på reningsverk.

Pilotdata under biologiska tester – zebrafisk och dammsnäckor

Effekten av läkemedelsreningen testades även biologiskt under ledning av Stefan Örn och Gunnar Carlsson på SLU: Under vecka 16 – vecka 18 2022 hölls tolv besättningar med zebrafisk, i lika många akvarier. Behandlat vatten från granulerade aktiverade kol, GAC-linjen, respektive behandlat vatten från ozoneringslinjen, ozon + sand-filtrering, tillfördes tre parallella akvarier vardera. Aktivkolfiltrerat kranvatten utgjorde kontrollvatten som tillfördes tre andra parallella akvarier. Referensvatten utgjordes av dagens utgående avloppsvatten från Rimbo reningsverk.

Pilotlinjerna för läkemedelsrening och som producerade behandlat avloppsvatten för den biologiska testning drevs kontinuerligt och med största möjliga stabilitet och konstanta inställningar för att efterlikna en framtida drift där justeringar endast görs när driften hamnat utanför aktuellt driftfönster.

Statistisk bearbetning av analysresultaten för veckoproverna som samlades in under fiskexponeringen visar att dagens utgående avloppsvatten från Rimbo reningsverk innehåller relativt låga halter läkemedelsrester med relativt liten spridning mellan försöksveckorna, tabell 25. Behandlat vatten från granulerade aktiverade kol, GAC-linjen, respektive behandlat vatten från ozoneringslinjen, ozon + sandfiltrering, innehöll dock betydligt lägre halter.

Tabell 25. Läkemedelsrester i kranvatten, utgående avloppsvatten från Rimbo reningsverk samt innehåll i behandlat vatten från ozon + sandfiltrering respektive granulerade aktiverade kol i samband med biostesterna.

Prov	Kranvatten 2022 V16-V18	UTG 2022 V16-V18	Ozon+SF 2022 V16-V18	GAC 2022 V16-V18
Substans [ng/l]	Medel	Medel (min-max) ±std avv.	Medel (min-max) ±std avv.	Medel (min-max) ±std avv.
Atenolol	<5	29 (21-33) ± 5,4	<5	<5
Carbamazepine	4	125 (86-150) ± 28	<17	<17
Ciprofloxacin	<10	-	-	-
Citalopram	<5	120 (110-140) ± 14	<3	<3
Clarithromycin	<1	<30	<10	<10
Diclofenac	<10	373 (230-450) ± 101	<5	<5
Erythromycin	<20	2,4 (1,7-4) ± 1,1	<10	<10
Fluconazole	<1	70 (40-98) ± 24	<8	<8
Furosemide	-	303 (150-430) ± 116	<20	<20
Ibuprofen	-	8,6 (4,8-15) ± 4,5	7,9 (4,8-14) ± 4,3	4,4 (0,5-8) ± 3,1
Ketoconazole	<10	-	-	-
Losartan	<5	597 (430-710) ± 120	19 (12,5-22) ± 4,5	26 (12,5-39) ± 10,8
Metotrexat	-	1,3 (0,7-1,7) ± 0,5	0,6 (0,33-0,7) ± 0,2	0,9 (0,33-0,7) ± 0,2
Metoprolol	<5	463 (400-570) ± 76	8,3 (6,5-12) ± 2,6	1,5 (0,5-3,5) ± 1,4
Naproxen	-	137 (31-230) ± 82	2,6 (1,3-5) ± 1,7	4,2 (1,3-6,4) ± 2,1
Oxazepam	<5	223 (130-280) ± 66	27 (10,5-38) ± 11,7	<3
Paracetamol	<10	1,5 (1,1-1,7) ± 0,2	<7	<7
Propranolol	<50	45 (33-54) ± 9	<5	<5
Sertraline	<10	18 (11-27) ± 6,8	<3	<3
Sulfamethoxazole	<5	164 (62-270) ± 85	<5	<5
Tramadol	8	157 (110-200) ± 37	<11	<11
Trimethoprim	1	102 (67-130) ± 26	<5	<5
Venlafaxine	<0,5	110 (80-130) ± 22	<3	<3
Zolpidem	<0,5	<10	<5	<5

Analysresultaten visade på relativt låga koncentrationer av läkemedelsrester i utgående avloppsvatten från Rimbo ARV, jämfört med Lindholmens och Henriksdals reningsverk från ungefär samma tid 2021 ("Janusinfo.se," 2021), tabell 26.

Tabell 26. Jämförelse av läkemedelshalter i utgående avloppsvatten från Rimbo, Lindholmen, Fors och Henriksdals reningsverk.

Ämne	Rimbo Utg Medel ng/l	Lindholmen Utg Medel ng/l	Fors Utg Medel ng/l	Henriksdal Utg Medel ng/l
Atenolol	23	348	346	108
Ciprofloxacin		48		
Citalopram	96	241	568	124
Clopidol		35		
Crotamiton		35		
Diklofenak	247	511	1480	717
Erytromycin	6	46	136	<20
Flukonazol	76	128	156	39
Furosemid	194	1909	2580	
Ibuprofen	46	320	270	
Karbamazepin	109	377	640	
Ketoconazol	2	31		<10
Klaritromycin	23	82	163	
Losartan	400	1573		
Metoprolol	557	1667	3220	846
Metotrexat	1	35		
Naproxen	258	511	119	
Oxazepam	186	436	312	56
Paracetamol	100	45	1800	105
Primidon		66		
Propanolol	29	85	220	125
Sertralin	15	73	131	34
Sotalol		39		
Sulfadiazin		50		
Sulfametoxazol	112	275	182	56
Tramadol	207	391	1200	600
Trimetoprim	57	125	82	22
Venlafaxin	158	504	742	604
Zolpidem	1	35		8
Summa	2904	10021	14347	3444

Läkemedelskoncentrationerna var i medeltal två-tre gånger lägre i Rimbo reningsverk än i Lindholmens och Henriksdals reningsverk. En förklaring till skillnaderna kan vara att analyserna är utförda av olika laboratorier och med några månaders tidsskillnad, men detta borde endast förklara en del. Förklaringen till de lägre koncentrationerna i utgående renat avloppsvatten kan sammanfattningsvis vara resultatskillnader mellan laboratorier, att konsumtionen i

upptagningsområdet skiljer sig, utpendling till andra orter under vardagar och att uppehållstiden i den biologiska reningen är längre i Rimbo än i Lindholmen reningsverk.

Pilotlinjerna fungerade mycket bra under exponeringsförsöken som utfördes under vecka 16-18, vilket återspeglas i avskiljningsgraderna av läkemedelsrester, tabell 27.

Tabell 27. Avskiljningsgrader för läkemedelsrester under fiskexponeringen med ozonering följt av sandfilter alternativt aktiverat kol (GAC).

Avskiljning %	Pilot O3 V16	Pilot O3 V17	Pilot OS v18	Avskiljning %	Pilot GAC v16	GAC v.17 R	Pilot GAC v18
Atenolol	96,0	97,4	97,5	Atenolol	96,0	97,4	97,5
Karbamazepin	96,7	98,0	98,1	Karbamazepin	96,7	97,9	98,1
Ciprofloxacin				Ciprofloxacin			
Citalopram	99,5	99,5	98,8	Citalopram	99,5	99,5	98,8
Klaritromycin	88,9	88,9	88,9	Klaritromycin	88,9	88,9	88,9
Diklofenak	99,6	99,8	98,4	Diklofenak	99,6	99,8	99,9
Erytromycin				Erytromycin	58,3		
Flukonazol	56,3	75,7	79,6	Flukonazol	96,7	98,1	98,5
Furosemid	97,8	99,2	99,5	Furosemid	97,8	99,2	99,5
Ibuprofen		67,8		Ibuprofen		96,7	
Ketoconazol				Ketoconazol			
Losartan	94,9	96,9	98,1	Losartan	90,9	96,5	98,1
Metotrexat				Metotrexat			
Metoprolol	98,9	98,4	97,1	Metoprolol	99,9	99,1	99,9
Naproxen	95,7	99,4	96,7	Naproxen	95,7	97,2	96,7
Oxazepam	70,8	88,1	96,3	Oxazepam	99,6	99,7	99,7
Paracetamol				Paracetamol			
Propanolol	97,5	98,3	98,5	Propanolol	97,5	98,3	98,5
Sertralin	98,5	94,4	95,6	Sertralin	98,5	93,8	95,6
Sulfametoxazol	98,7	99,5	99,6	Sulfametoxazol	83,1	99,4	99,6
Tramadol	98,9	98,3	99,1	Tramadol	98,9	98,6	99,1
Trimetoprim	98,8	99,2	99,4	Trimetoprim	98,8	99,4	99,4
Venlafaxin	99,6	99,4	99,6	Venlafaxin	99,6	99,6	99,6
Zolpidem				Zolpidem			
Medel	93,3	94,3	96,5		94,2	97,7	98,1

Multikriterieanalys - processval

I syfte att utröna vilken läkemedelsreningsteknik som är den mest optimala lösningen för Rimbo reningsverk genomfördes en multikriterieanalys där resultaten av pilotförsöken, biologiska tester inklusive biocellanalyser och microcosmer mm samt platsens och organisationens förutsättningar vägdes in. Resultatet av multikriterieanalysen blev att ozonering följt av sandfilter (OS), bedömdes som mest relevant för implementering som läkemedelsreningssteg vid Rimbo reningsverk.

Diskussion och slutsatser av pilotförsöken

Dagens utgående avloppsvatten från Rimbo reningsverk har normala till tidvis något höga TOC-halter för en anläggning med avslutande sandfilter, vilket något påverkar resursförbrukningen för ett avslutande läkemedelsreningssteg. Med lägre TOC-halter minskar den onödiga förbrukning av ozon eller aktiverat kol. Försöken kördes i huvudsak under perioder med TOC-halter i utgående avloppsvatten på ca 8–16, med i medeltal 11,3 mg C/l.

Pilotanläggningen fungerade mycket bra under försöken och resultaten bedöms som relevanta som underlag för en dimensionering av en fullskaleanläggning. Valet av teknik för läkemedelsreningen vid Rimbo reningsverk gjordes av projektgruppen baserat bl.a. på pilotförsöken.

Filtrering genom granulerat aktiverat kol (GAC) eller ozonering följt av sandfilter uppvisade mycket goda resultat under pilotförsöken vid Rimbo reningsverk, både med möjlighet att nå 80-90% genomsnittlig avskiljning av 24 studerade läkemedelssubstanserna.

Granulerat aktiverat kol gav den högsta avskiljningen av läkemedelsrester, mellan 80-90% av de för studien utvalda 24 läkemedelsresterna. Pilotförsökens längd anpassades så att den specifika kolförbrukningen för minst 80% avskiljning av utvalda läkemedelsrester skulle kunna bestämmas. Kolförbrukningen blev 39 g/m³ för 80% avskiljning. Parallella försök i labbskala visade att i stor sett samma kolförbrukning. Kolförbrukningen i Rimbo är högre än den typiska måldosen 25 g/m³. Orsaken kan vara den relativt höga DOC-halten som konkurrerar med läkemedelsresterna om avskiljning.

Ozonering i kombination med sandfilter gav den näst högsta avskiljningen av läkemedelsrester, över 80% av de för studien utvalda 24 läkemedelsresterna med en ozondos av 5,5-6,0 g O₃/m³ eller motsvarande 0,50–0,54 g O₃/g DOC.

Kombinationen ultrafilter + GAC-filter avlastade kolfiltret från suspenderad substans och minskade TOC- respektive DOC- belastningen med 15% respektive 9%. GAC-filtret behövde inte backspolas någon gång under försöken. Spolvolymen för UF-enheten var 60% lägre än spolvolymen för ett motsvarande kolfilter utan föregående UF. Avskiljningen av läkemedelsresterna var hög och i samma storleksordning, ca 4%, lägre som GAC-filtret, som inte föregicks av ultrafilter. Några läkemedelsrester avskildes marginellt bättre, vilket kan vara en effekt av lägre DOC- och TOC-halt efter ultrafiltrering jämfört med sandfiltrerat utgående avloppsvatten.

Kombinationen ozonering + GAC-filter avlastade GAC-filtret från läkemedelsrester men marginellt från TOC. Avskiljningen av läkemedelsrester ökade med i genomsnitt runt 5% genom kombinationen ozonering + GAC jämfört med enbart aktivt kolfiltrering (GAC).

Kombinationsprocessen hade en fördel gentemot enbart GAC-filtrering genom att avskiljningen av oxazepam, clarithromycin och flukonazol förbättrades märkbart, vilket kan vara en fördel om specifika ämnen måste tas bort enligt platsen utsläppsvillkor.

Tack

Ett stort tack till NVAA:s Emma Gunnerblad, Gunnar Fridén, Christian Hindersson, Ola och Elliot för hjälp, assistens och trevligt sällskap under försökskörningarna på Rimbo reningsverk.

Tack också till Stefan Örn och Gunnar Carlsson på SLU för trevligt samarbete och sällskap på Rimbo reningsverk samt Anneli Andersson Chan och Sara Stemme för intressanta diskussioner under projektiden.

Hägersten den 10 januari 2023



Berndt Björlenius
Björlenius Labs AB

Bilagor

Bilaga 1 Sammanställning av läkemedelsanalyser - UTG Rimbo ARV

	Utg. 31/3-22	Rimbo ARV UTG V14	Rimbo RV V15 UTG	Pilot utg v16	UTG V17 R	Pilot utg 2022-04-27	Utg 29/4- 22	Rimbo RV V18 UTG	UTG V19	Rimbo RV 22-05-20 UTG	UTG v21	UTG v.22	utg v24	Rimbo RV V24 UTG	Rimbo RV 22-06-17 UTG	UTG v25	Utgående (28/6-22)																		
Rimbo ARV																																			
Medeldatum	2022-03-31	2022-03-30	2022-04-14	2022-04-20	2022-04-27	2022-04-27	2022-04-29	2022-05-04	2022-05-11	2022-05-20	2022-05-25	2022-06-01	2022-06-15	2022-06-15	2022-06-17	2022-06-22	2022-06-28	Medel																	
Substance	[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	66	26	36,4	21	32	17	13	10,6	29	24,2	11,2	11	16	20,0	16,0	36,7	22	24,0	5	10															
Carbamazepine	150	70	98,5	86	140	63	**	135,5	130	137,5	99,3	96	120	154,4	114,7	284,0	210	130,6	17	58															
Ciprofloxacin	--	--	*	--	---	--	--	*	---	10,1	*	--	--	22,3	9,4	17,2	--	14,7	--	--															
Citalopram	110	57	136,3	110	110	57	56	37,6	160	126,3	63,1	110	160	83,9	64,4	123,8	29	93,8	3	9															
Clarithromycin	47	56	35,3	**	**	*	*	11,0	**	14,7	13,5	28	47	26,7	20,4	15,7	36	29,3	10	20															
Diclofenac	580	57	214,0	230	450	190	120	98,2	430	281,1	168,3	190	270	232,4	199,4	337,9	400	261,7	5	18															
Erythromycin	*	4	13,3	4	*	2	2	6,0	*	17,5	4,1	*	4	11,2	12,9	13,3	*	7,9	10	40															
Fluconazole	65	41	44,1	40	72	32	**	64,1	100	74,0	51,2	70	190	153,8	120,3	241,6	200	97,4	8	27															
Furosemide	370	**	18,1	150	430	140	150	*	370	377,0	30,8	200	480	80,8	65,9	335,4	1000	279,9	20	60															
Ibuprofen	370	**	*	*	15	*	*	*	**	*	*	9	110	*	*	*	370	174,7	29	96															
Ketoconazole	--	--	*	--	---	--	--	*	---	*	*	--	*	*	*	*	--	--	--	--															
Losartan	890	160	91,0	430	710	260	250	60,9	540	282,5	155,4	490	1200	208,9	266,3	1455,0	1700	538,2	10	34															
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		2	6															
Metoprolol	840	370	661,2	570	400	260	270	46,8	720	741,3	346,1	600	900	923,3	711,5	1480,4	510	608,9	3	10															
Naproxen	1600	48	60,0	31	230	290	180	62,2	140	19,3	133,1	91	370	257,2	365,1	629,7	540	296,9	8	28															
Oxazepam	200	110	171,2	130	260	110	70	209,6	280	242,1	150,9	160	220	269,1	199,8	525,1	340	214,6	3	11															
Paracetamol	**	*	41,0	*	*	**	*	343,5	*	347,4	275,5	**	14	93,9	317,3	830,9	33	255,2	7	22															
Propranolol	70	20	30,8	33	49	28	**	6,0	45	22,2	12,1	27	36	24,4	18,5	49,0	**	31,4	5	20															
Sertraline	28	6	3,3	11	27	41	22	*	22	15,2	2,3	**	31	2,6	1,5	4,7	**	15,5	1	2															
Sulfamethoxazole	200	76	101,6	62	160	95	69	249,5	250	103,6	22,5	74	93	56,3	66,7	133,3	270	122,5	5	16															
Tramadol	260	130	224,0	160	110	84	81	153,2	310	297,8	162,2	300	300	287,9	238,4	400,4	320	224,6	11	36															
Trimethoprim	97	54	103,4	67	110	37	27	71,3	120	45,5	22,5	27	23	28,4	21,2	57,6	23	55,0	5	10															
Venlafaxine	180	96	210,5	130	80	65	77	112,0	190	247,0	134,4	210	240	222,7	173,1	341,2	210	171,7	3	10															
Zolpidem	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1,3	1,0	*	*	1,2	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).																																			
"---" Ämnet kan inte utvärderas pga dålig återvinning, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst av denna analyt.																																			



Bilaga 2 Sammanställning av läkemedelsanalyser - O3+SF Rimbo ARV

Ämne	OS v14 [ng/L]	OS v15 [ng/L]	OS v17 R [ng/L]	OS v18 [ng/L]	OS v19 [ng/L]	OS v21 [ng/L]	OS v22 [ng/L]	OS v24 [ng/L]	LOD [ng/L]	LOQ [ng/L]
Atenolol	*	*	**	*	*	*	*	*	5	10
Carbamazepine	*	*	*	*	*	*	*	*	17	58
Ciprofloxacin	--	--	---	---	---	--	--	--	--	--
Citalopram	*	*	15	*	*	*	*	*	3	9
Clarithromycin	*	*	*	*	*	*	*	*	10	20
Diclofenac	*	*	49	**	*	*	*	*	5	18
Erythromycin	1	**	*	*	*	*	*	*	10	40
Fluconazole	33	**	40	**	38	55	40	97	8	27
Furosemide	*	*	**	*	*	*	*	*	20	60
Ibuprofen	**	*	**	14	**	**	*	**	29	96
Ketoconazole	--	--	---	---	---	--	--	--	--	--
Losartan	*	*	83	**	**	**	**	*	10	34
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	*	2	6
Metoprolol	10	**	65	12	**	7	**	19	3	10
Naproxen	*	*	51	**	*	*	*	*	8	28
Oxazepam	48	35	78	**	25	53	28	49	3	11
Paracetamol	*	*	*	*	*	*	*	*	7	22
Propranolol	*	*	**	*	*	*	*	*	5	20
Sertraline	*	*	*	*	*	*	*	*	1	2
Sulfamethoxazole	*	*	**	*	*	*	*	*	5	16
Tramadol	*	*	**	*	*	*	*	*	11	36
Trimethoprim	*	*	**	*	*	*	*	*	5	10
Venlafaxine	*	*	15	*	*	*	*	*	3	10
Zolpidem	*	*	*	*	*	*	*	*	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).										
"---" Ämnet kan inte utvärderas pga dålig återvinning, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst av denna analyt.										

Bilaga 3 Sammanställning av läkemedelsanalyser – GAC Rimbo ARV

	GAC v14 [ng/L]	GAC v16 [ng/L]	GAC v17 R [ng/L]	GAC v18 [ng/L]	GAC v19 [ng/L]	GAC v21 [ng/L]	GAC v24 [ng/L]	LOD [ng/L]	LOQ [ng/L]
Atenolol	*	*	*	*	*	*	*	5	10
Carbamazepine	*	*	*	*	*	*	*	17	58
Ciprofloxacin	--	--	---	---	---	--	--	--	--
Citalopram	*	*	*	*	*	*	*	3	9
Clarithromycin	*	*	*	*	*	*	**	10	20
Diclofenac	*	*	*	*	**	9	58	5	18
Erythromycin	**	*	*	*	*	*	*	10	40
Fluconazole	*	*	*	*	*	*	44	8	27
Furosemide	*	*	*	*	*	10	71	20	60
Ibuprofen	*	*	*	**	*	**	12	29	96
Ketoconazole	--	--	---	---	---	--	--	--	--
Losartan	**	39	**	**	**	34	160	10	34
Metotrexat	*	*	*	*	*	*	*	2	6
Metoprolol	*	*	**	*	**	6	85	3	10
Naproxen	*	*	6	**	6	**	85	8	28
Oxazepam	*	*	*	*	*	**	42	3	11
Paracetamol	*	*	*	*	*	*	*	7	22
Propranolol	*	*	*	*	*	*	*	5	20
Sertraline	**	*	*	*	*	*	*	1	2
Sulfamethoxazole	**	**	*	*	**	**	39	5	16
Tramadol	*	*	*	*	*	*	**	11	36
Trimethoprim	*	*	*	*	*	*	*	5	10
Venlafaxine	*	*	*	*	*	*	33	3	10
Zolpidem	*	*	*	*	*	*	*	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).									
"---" Ämnet kan inte utvärderas pga dålig återvinning, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst av denna analyt.									

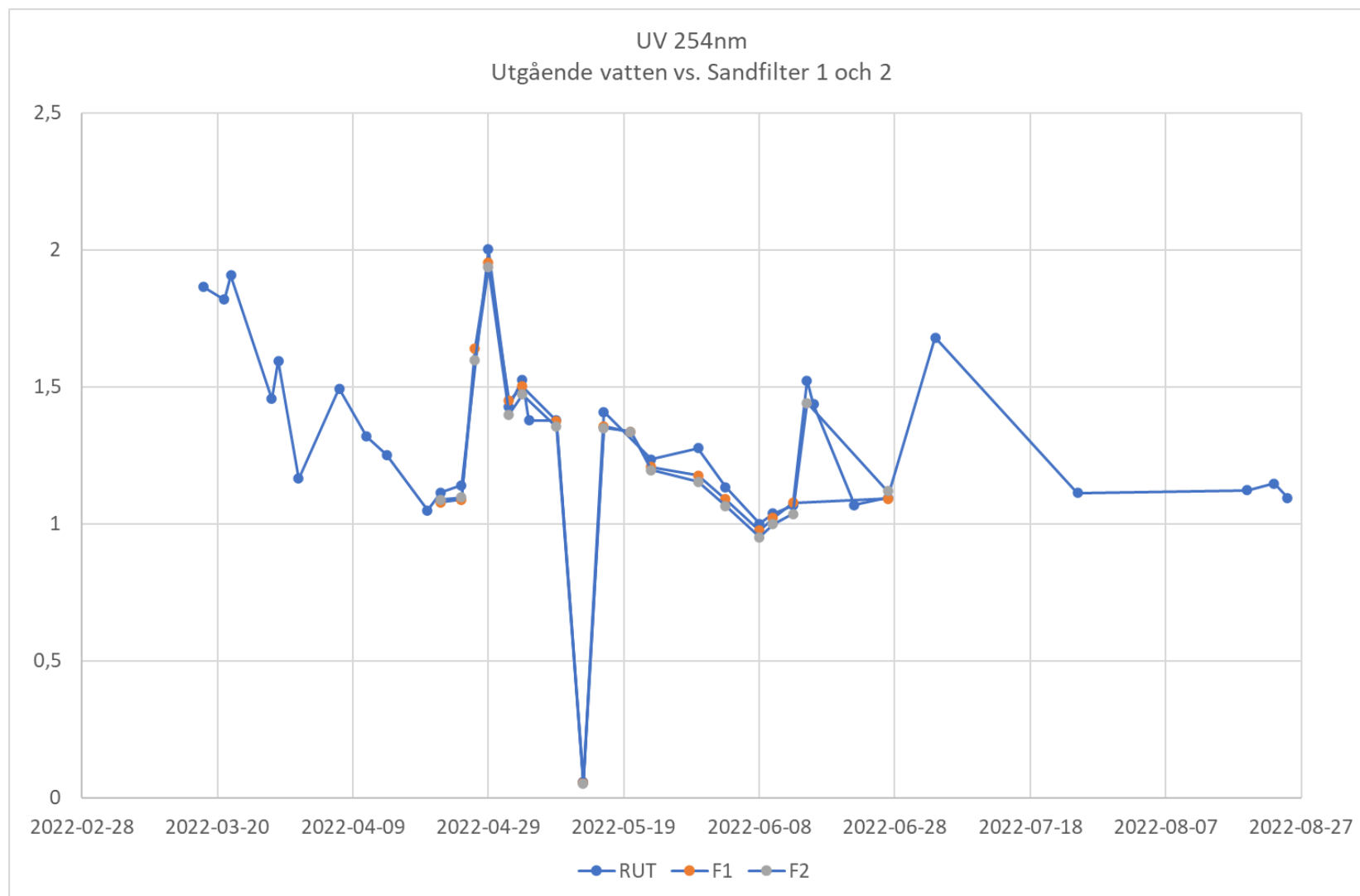
Bilaga 4 Sammanställning av läkemedelsanalyser – UF + GAC Rimbo ARV

Ämne	UG v17 [ng/L]	UG v21 [ng/L]	UG v24 [ng/L]	LOD [ng/L]	LOQ [ng/L]		
Atenolol	*	*	*	5	10		
Carbamazepine	*	*	*	17	58		
Ciprofloxacin	--	--	--	--	--		
Citalopram	*	*	*	3	9		
Clarithromycin	*	*	*	10	20		
Diclofenac	*	**	13	5	18		
Erythromycin	*	*	*	10	40		
Fluconazole	*	*	**	8	27		
Furosemide	*	*	18	20	60		
Ibuprofen	*	*	**	29	96		
Ketoconazole	--	--	--	--	--		
Losartan	**	**	56	10	34		
Metotrexat	*	*	*	2	6		
Metoprolol	*	7	26	3	10		
Naproxen	*	*	**	8	28		
Oxazepam	*	*	15	3	11		
Paracetamol	*	*	*	7	22		
Propranolol	*	*	*	5	20		
Sertraline	**	*	*	1	2		
Sulfamethoxazole	**	*	**	5	16		
Tramadol	*	*	*	11	36		
Trimethoprim	*	*	*	5	10		
Venlafaxine	*	*	**	3	10		
Zolpidem	*	*	*	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).							
"---" Ämnet kan inte utvärderas pga dålig återvinning, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst av denna analyt.							

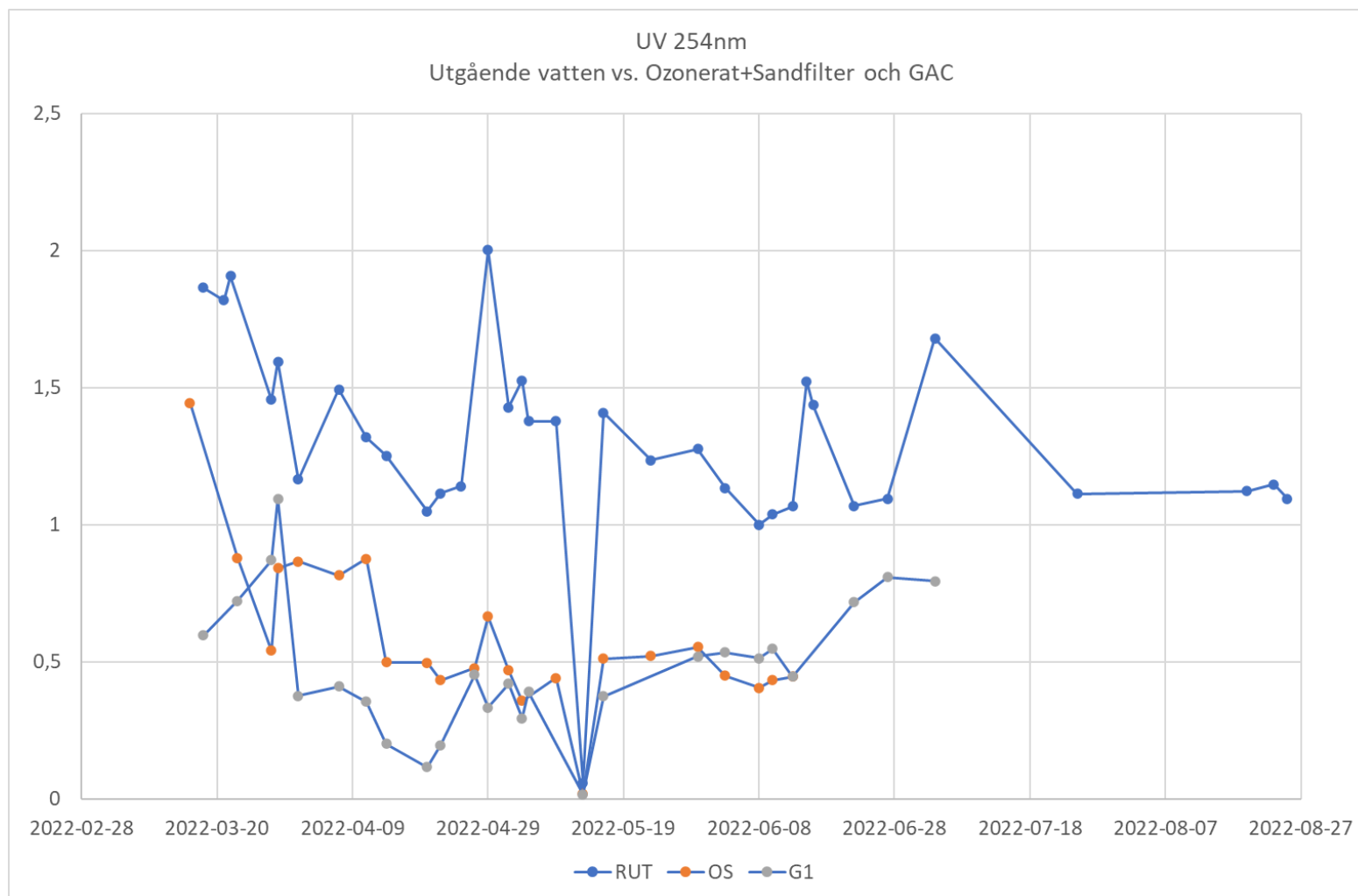
Bilaga 5 Sammanställning av läkemedelsanalyser - ozonering + GAC Rimbo ARV

Ämne	OG v17 [ng/L]	OG v22 [ng/L]	OG v24 [ng/L]	LOD [ng/L]	LOQ [ng/L]
Atenolol	*	*	0,3	5	10
Carbamazepine	*	*	*	17	58
Ciprofloxacin	--	--	*	--	--
Citalopram	*	*	*	3	9
Clarithromycin	*	*	*	10	20
Diclofenac	*	*	<LOQ	5	18
Erythromycin	**	*	*	10	40
Fluconazole	*	*	5,5	8	27
Furosemide	*	*	*	20	60
Ibuprofen	*	**	*	29	96
Ketoconazole	--	--	*	--	--
Losartan	37	*	0,4	10	34
Metotrexat	*	*	*	2	6
Metoprolol	*	*	1,5	3	10
Naproxen	*	*	*	8	28
Oxazepam	*	*	3,0	3	11
Paracetamol	*	*	8,0	7	22
Propranolol	*	*	*	5	20
Sertraline	*	*	*	1	2
Sulfamethoxazole	**	*	*	5	16
Tramadol	*	*	*	11	36
Trimethoprim	*	*	*	5	10
Venlafaxine	*	*	*	3	10
Zolpidem	*	*	*	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).					
"---" Ämnet kan inte utvärderas pga dålig återvinning, det går alltså inte att påvisa eller utesluta förekomst av denna analyt.					

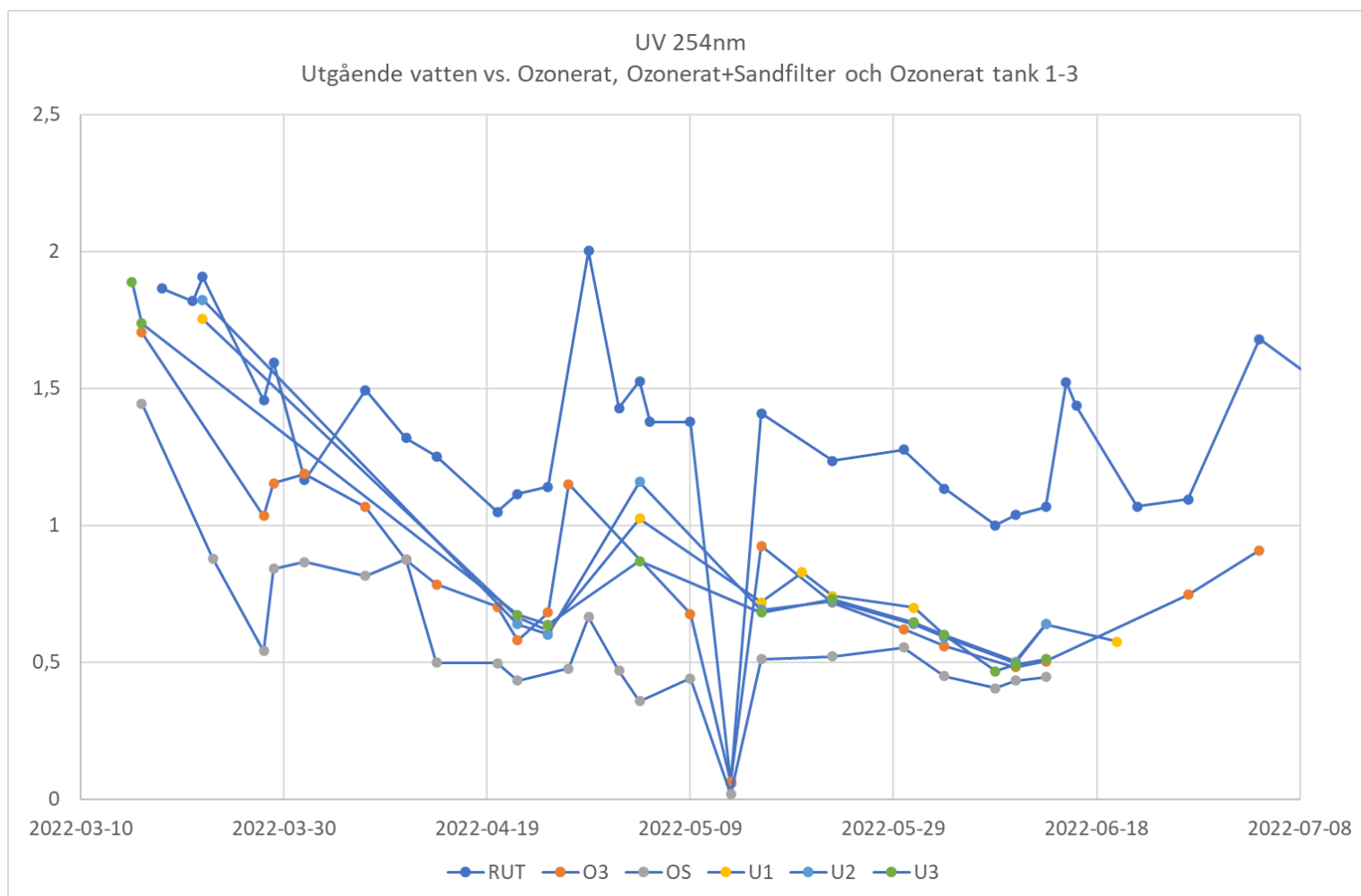
Bilaga 6 Pilotförsök Förfilter Absorbans UV254nm



Bilaga 7 Pilotförsök O3+SF respektive GAC - Absorbans UV254nm



Bilaga 8 Pilotförsök O3 + Uppehållsvolymer U0-U3 Absorbans UV254nm



Bilaga 9 Kombinationsprocesser labförsök UF+GAC resp O3+GAC Absorbans UV254nm

