

Karlstad Kommun

Avancerad rening av läkemedelsrester vid Sjöstadsverket

Förstudie

Uppdragsnr: 106 23 80 Version: 2 Datum: 2020-12-18



Uppdragsgivare: Karlstad Kommun
Uppdragsgivarens kontaktperson: Christer Pettersson
Konsult: Norconsult AB, Theres Svenssonsgata 11, 417 55 Göteborg
Uppdragsledare: Christel Kampman
Handläggare: Karin Öhrman

2	2020-12-18	Slutlig handling	chrkam, karoeh	chrkam, karoeh	chrkam
1.1	2020-12-18	Granskningshandling	chrkam, karoeh	chrkam, karoeh	chrkam
1	2020-12-09	Delgranskningshandling	chrkam, karoeh	chrkam, karoeh	chrkam
Version	Datum	Beskrivning	Upprättat	Granskat	Godkänt

Detta dokument är framtaget av Norconsult AB som del av det uppdrag dokumentet gäller. Upphovsrätten tillhör Norconsult. Beställaren har, om inte annat avtalats, endast rätt att använda och kopiera redovisat uppdragsresultat för uppdragets avsedda ändamål.

► Sammanfattning

Naturvårdsverket har i uppdrag att ge bidrag till projekt som bland annat bidrar till att öka kunskapsuppbyggnad kring avancerad rening av läkemedelsrester. Inom dessa ramar har Karlstads kommun ansökt om bidrag för en förstudie. På uppdrag av kommunen har Norconsult genomfört aktuell förstudie och undersökt behovet av avancerad rening för läkemedelsrester på Sjöstadsverket i Karlstad, samt identifierat vilka reningstekniker som är mest lämpliga. Resultaten av förstudien presenteras i denna rapport.

Förekomst av läkemedel och dess metaboliter i ytvatten härstammar till stor del från utsläpp från avloppsreningsverk. Halterna är generellt högre vid reningsverkens utsläppspunkter, framförallt när flödet från reningsverket är stort jämfört med flödet i recipienten, för att sedan minska nedströms pga. utspädning, nedbrytning och omfördelning till t.ex. luft, sediment, flora och fauna. Hur läkemedlen beter sig i miljön beror på läkemedlens fysiokemiska egenskaper (1).

Rening av avloppsvatten i Sverige styrs av ramdirektivet för vatten, underordnat avloppsdirektiv och avloppsföreskrifterna. Dagens avloppsreningsverk är designade för rening av organiskt material, kväve och fosfor, inte för rening av läkemedel, såsom antibiotika, hormoner, antiinflammatoriska och antidepressiva, eller läkemedelsrester (nedan "läkemedel"). Läkemedlens nedbrytbarhet samt fysiokemiska egenskaper (vattenlöslighet, persistens) avgör vad som händer med dem i reningsverken, total reduktion är inte möjlig. Reduktion av läkemedel varierar mellan olika reningsverk och olika substanser. Det är framförallt den biologiska reningen som binder och renar läkemedel. Mer hydrofoba läkemedel binder till slammet och suspenderat material.

Sjöstadsverkets process består av mekanisk, biologisk och kemisk rening. Reningresultaten är bra med avseende på organiskt material, kväve och fosfor. Reduktionsfaktorn för i denna förstudie undersökta läkemedel varierar mellan -13 och 100%, med 52 % som medianvärde. Utgående vatten innehåller oxazepam och ciprofloxacin i halter som överskrider predicted no effect concentrations (PNEC). Behovet av avancerad rening för läkemedelsrester är inte fastställt ännu. Vänerns Vattenvårdsförbund har sett endast en marginell förhöjning av halter av läkemedel och andra mikroföroreningar efter reningsverket är marginella. Utökad recipientprovtagning inklusive ekotoxikologiska tester behövs för att identifiera behovet av avancerad rening för läkemedelsrester. Då det varken finns krav på läkemedelsrening eller tydlighet gällande det faktiska behovet av läkemedelsrester vid Sjöstadsverket har det antagits att avancerad rening behövs för oxazepam och ciprofloxacin.

Det finns många olika tekniker för avancerad rening för läkemedelsrening, bland dessa membranfiltrering, oxidativa reningstekniker (ozonering och avancerade oxidativa processer såsom ozon/UV, H₂O₂/UV eller Fenton-processen), adsorptiva tekniker (granulerat aktivt kol, pulveriserat aktivt kol) och kombinationer av dessa. Baserad på det eventuella behovet av avancerad rening för läkemedelsrester och förutsättningar specifika för Sjöstadsverket har ozonering och GAK identifierats som de två alternativa tekniker som passar bäst för avancerad läkemedelsrening. Dessa har en medel till bra reningseffektivitet för oxazepam, ciprofloxacin och de övriga ämnen som överskrider PNEC-värden vid några enstaka tillfällen eller klassas som särskilt förorenande ämnen. Fullskaliga anläggningar finns i dagsläget.

Ozonering är den vanligaste tekniken för läkemedelsrening. Tekniken är kompakt, billig och ger en bra rening för många läkemedelsrester och andra mikroföroreningar. Den konfigurationen som har undersökts in denna förstudie är multiple point ozonation, bestående av integrerad ozonering i biosteget och ozonering som slutpolering. Den specifika kostnaden för rening av en kubikmeter avloppsvatten är ca 0,2 SEK för en anläggning på 100 000 pe. Hänsyn måste tas till arbetsmiljö då syrgas och framförallt ozon är kraftfulla oxidationsmedel.

GAK har en bra reningseffekt på många läkemedel och andra mikroföroreningar. GAK har en bättre reningseffekten för ciprofloxacin och några ämnen som förekommer i halter >PNEC vid några enstaka tillfällen än ozonering. De filtren som har undersökts är av typen DynaDand (Nordic Water). Dessa filter är platseffektiva och klarar en kontinuerlig drift. Den specifika kostnaden för rening av en kubikmeter avloppsvatten är ca. 0,35 – 0,6 SEK. Energibehovet är mycket låg, men koldioxidfootprinten är högre än för ozon. Inga farliga restprodukter bildas. Aktivt kol kan leda till dammbildning och det finns en risk att en explosiv blandning uppstår, åtgärder för att minska dammbildning måste undersökas och utvärderas.

Pilotförsök behövs för att utvärdera vilken teknik passar bäst för Sjöstadsverket, för att dimensionera anläggningar, samt, vid ozonering, bildning av eventuella toxiska bi- och nedbrytningsprodukter.

► Innehåll

1	Bakgrund	7
1.1	Beskrivning förstudie	7
1.2	Humanläkemedel i avloppsvatten	7
1.3	Läkemedelsrening i avloppsvattenreningsverk	7
1.4	Läkemedelsrester i miljön	8
1.5	Innehåll förstudie	8
2	Sjöstadsverket	9
2.1	Avloppsvattenrening	10
2.2	Slambehandling	12
2.3	Anläggningens prestanda	12
2.4	Platsbesök	12
2.5	Råvatten och recipient	12
3	Omvärldsbevakning	13
3.1	Miljö kvalitetsmål	13
3.2	Direktiv för rening av läkemedelsrester från avloppsvatten i Sverige	13
3.3	Vad händer i Sverige?	15
3.4	Fullskaliga anläggningar i Sverige	15
3.5	Vad händer i Europa?	16
4	Reningstekniker	18
4.1	Fysikaliska reningstekniker	18
4.2	Oxidativa reningstekniker	18
4.3	Adsorptiva reningstekniker	20
4.4	Kombinationer	21
5	Egenskaper läkemedel	23
6	Läkemedelsrening vid Sjöstadsverket	26
6.1	Bakgrund	26
6.2	Inkommande halter och mängder	26
6.3	Utgående halter och mängder	28
6.4	Reningsgrad	32
6.5	Recipient	33
6.6	Behov av utökad läkemedelsrening	34
7	Möjliga tekniker för Sjöstadsverket	36
7.1	Behov och förutsättningar för avancerad rening vid Sjöstadsverket	36
7.2	Multiple point ozonation	38
7.3	Granulerat aktivt kol	40

8	Slutsatser/rekommendationer	43
	Litteraturförteckning	45
	Bilaga A. Inkommande och utgående halter och mängder per prov samt flödesviktade medelvärden	49
	Bilaga B. Diagram inkommande och utgående halter, reningsgrad	53
	Bilaga C. Diagram inkommande, utgående och renade mängder	57

1 Bakgrund

1.1 Beskrivning förstudie

Naturvårdsverket har i uppdrag att ge bidrag till projekt som bland annat bidrar till att öka kunskapsuppbyggnad kring avancerad rening av läkemedelsrester. Inom dessa ramar har Karlstads kommun, i uppdrag av teknik- och fastighetsnämnden och med ursprung i en motion som beviljades av kommunfullmäktige i november 2017, ansökt om bidrag för en förstudie. Syftet med denna förstudie var att undersöka behovet av avancerad rening för läkemedelsrester på Sjöstadsverket i Karlstad, samt för att identifiera vilka reningstekniker som är mest lämpliga. Resultaten av förstudien presenteras i denna rapport.

1.2 Humanläkemedel i avloppsvatten

Användning av läkemedel har lett till en förbättring av människans livskvalitet och individens livslängd. Läkemedel och dess rester har dock hittats i ytvatten, var de kan ha negativ påverkan på ekosystem (1).

Mer än 1 000 olika substanser i ca 7 600 olika preparat används som humanläkemedel i Sverige (2). De flesta läkemedel ges oralt. Via magtarmkanalen tas de upp i blodet och distribueras till verkningsställen i kroppen (1; 3). De flesta läkemedel utsöndras via urin och avföring till våra avloppssystem. Fettlösliga läkemedel omvandlas generellt i levern till mer vattenlösliga metaboliter som sedan utsöndras via njurarna. Vattenlösliga läkemedel utsöndras oftast oförändrade direkt via njurarna.

Läkemedel måste vara tillräckligt kemiskt stabila för att kunna distribueras till verkningsställen i kroppen, vilket ur miljösynpunkt är en negativ egenskap. Då läkemedel framförallt utsöndras via urin och avföring utgör hushållsspillvatten således den största källan till spridning av läkemedelsrester i miljön. Framförallt vattenlösliga och stabila läkemedel kan ha effekt efter utsöndring från kroppen, inte enbart på användaren, men även – oavsiktligt – på andra organismer än de är avsedda för, såsom däggdjur och fiskar (1; 3).

1.3 Läkemedelsrening i avloppsvattenreningsverk

Dagens avloppsreningsverk är designade för rening av organiskt material, kväve och fosfor, inte för rening av läkemedel, såsom antibiotika, hormoner, antiinflammatoriska och antidepressiva, eller läkemedelsrester (nedan "läkemedel"). Läkemedlens nedbrytbarhet samt fysiokemiska egenskaper (vattenlöslighet, persistens) avgör vad som händer med dem i reningsverken. Lättnedbrytbara läkemedel bryts ändå till stor del ner i dagens avloppsreningsverk. Fettlösliga, stabila läkemedel absorberar till slammet för att sedan med slammet spridas till jordbruksmark (2; 3). Vattenlösliga, stabila läkemedel renas nästan inte alls utan passerar avloppsreningsverken och släpps ut till recipient (3).

Reduktion av läkemedel varierar mellan olika reningsverk och olika substanser. Det är framförallt den biologiska reningen som binder och renar läkemedel. Mer hydrofoba läkemedel binder till slammet och suspenderat material. Vattnet i slamflockarna tar upp läkemedel med i kapillärerna varifrån de adsorberas till slammet. Adsorberade läkemedel kan sedan brytas ned, beroende på hur persistenta de är (4). Utvecklingen av avloppsreningsverken med till exempel kväverening som kräver en högre hydraulisk uppehållstid samt en högre slamålder i reningsverket, har ökat möjligheten att bryta ned läkemedel. En kombination av aerob och anaerob behandling verkar vara effektivare för en del läkemedel än enbart aerob behandling. Nedbrytning av läkemedel är koncentrationsberoende och sker snabbare vid högre halter. En längre uppehållstid betyder således en högre reningsgrad. Nedbrytningshastigheten går ner på vintern pga. att vattnet är kallare. Nedbrytning av läkemedel

ökar snabbt vid en slamålder mellan 10 - 15 dygn. Höjning av slamåldern med ett antal dygn påverkar slammets sammansättning och kan förbättra reningen av ett antal läkemedel, men total reduktion är inte möjlig (5).

Vid införande av ett extra reningssteg för läkemedelsrening kan det behövas en kombination av tekniker om läkemedel med olika fysiokemiska egenskaper behöver renas. Tekniker som kan användas i dagsläget är fysikaliska, oxidativa och adsorptiva tekniker.

Utöver läkemedel finns det andra mikroföroreningar i utgående vatten från avloppsreningsverk. Även rening av dessa mikroföroreningar kan förbättras vid införande av ett extra steg för avancerad rening för läkemedelsrester.

1.4 Läkemedelsrester i miljön

Förekomst av läkemedel och dess metaboliter i ytvatten härstammar till stor del från utsläpp från avloppsreningsverk. Halterna är generellt högre vid reningsverkens utsläppspunkter, framförallt när flödet från reningsverket är stort jämfört med flödet i recipienten, för att sedan minska nedströms pga. utspädning, nedbrytning och omfördelning till t.ex. luft, sediment, flora och fauna. Hur läkemedlen beter sig i miljön beror på läkemedlens fysiokemiska egenskaper (1).

Utgående vatten från avloppsreningsverk innehåller en blandning, en "cocktail", av olika läkemedel och metaboliter. Dessa ämnen kan tillsammans ge upphov till synergieffekter. Bedömning av cocktaileffekten behöver studeras mer ingående.

Det är mycket viktigt att skydda ytvatten från förorening av läkemedel av flertalet anledningar, exempelvis för att vårt dricksvatten i stor utsträckning produceras från ytvatten, fisk för mänsklig konsumtion kan innehålla läkemedel samt att läkemedel utgör risk för ekosystem (3). De halter av läkemedel som uppmätts i miljön i Sverige är mycket låga och det finns ingen antydning att de utgör någon hälsorisk (2). Negativa effekter av läkemedel, i halterna som förekommer i vår miljö, på levande organismer har dock uppmätts i fältstudier och laboratoriestudier. Exempel på observerade negativa effekter är reproduktionsstörningar och förändringar av beteende i fisk samt förgiftning av fåglar (6). Förekomst av antibiotika kan leda till utveckling av antibiotikaresistenta bakterier (2). Effekter på människor via upptag av läkemedel från dricksvatten har inte påvisats (6; 7).

1.5 Innehåll förstudie

I denna förstudie har behovet av utökad läkemedelsrening vid Sjöstadsverket studerats. Förutsättningar på reningsverket har kartlagts (kapitel 2). I omvärldsbevakningen (kapitel 3) beskrivs gällande direktiv, andra initiativ samt planerade och befintliga fullskaliga anläggningar. Tekniker för läkemedelsrening beskrivs i mer detalj i kapitel 4. Vilka läkemedel är prioriterade beror på deras predicted no effect concentration (PNEC). Dessa är framtagna med hjälp av litteratursökning. Vilka tekniker som fungerar för de olika läkemedel beror på deras fysiokemiska egenskaper. En överblick av PNEC-värden och relevanta kemiska egenskaper presenteras i kapitel 5. Halter av läkemedel i inkommande och utgående vatten vid alla 6 provtagningstillfällen samt behov av avancerad läkemedelsrening beskrivs i kapitel 6. Utifrån resultaten från provtagningen har två tekniker för läkemedelsrening utvalts för Sjöstadsverket. Miljöeffekter och påverkan på arbetsmiljö beskrivs och en uppskattning av kostnader för införande beskrivs (kapitel 7). Resultaten av kapitel 7 samt rekommendationer för fortsatt utredning sammanfattas i kapitel 8.

2 Sjöstadsverket

Sjöstadsverket, beläget vid Klarälvens östra fåra i Karlstad, behandlar avloppsvatten från Karlstads tätort, Skattkärr och Alster samt externslam. Vattnet renas i en aktivslamprocess¹ med fosfor- och kväverening. Verket har en kapacitet om 97 000 pe och är dimensionerat för ett flöde om 1 650 m³/h och en BOD₇-belastning på 6 300 kg/d (Tabell 1). Processen består av processtegen redovisade i Tabell 2 och beskrivs nedan.

Tabell 1. Dimensioneringsdata Sjöstadsverket.

Parameter	Enhet	Värde
Anslutning (invånare och industri)	pe	97 000
Hydraulisk belastning		
Medeldygnstillrinning Q_s	m ³ /d	25 000
Q_{dim}	m ³ /h	1 650
$Q_{max,bio}$	m ³ /h	2 000
$Q_{max,kem}$ (2 x Q_{dim})	m ³ /h	3 300
$Q_{max,mek}$ (4 x Q_{dim})	m ³ /h	6 600
Föroreningsbelastning		
BOD ₇	kg/d	6 300
Tot-N	kg/d	1 150
Tot-P	kg/d	230

¹ I aktivslamprocesser bryts organiskt material ner med hjälp av mikroorganismer. Dessa mikroorganismer bildar slamflockar som avskiljs som returslam i mellansedimenteringsbassängerna för att sedan återföras till aktivslamprocessen. En liten del av slammet tas ut som överskottsslam för att sedan rötas.

Tabell 2. Dimensioner (volym, yta, djup) av anläggningsdelar för vattenrening på Sjöstadverket.

Processteg	Antal	Volym		Yta		Djup ³
		Bassäng	Total	Bassäng	Total	
Mekanisk rening						
Rensgaller	2					-
Sandfång	1	550	550			
Försedimentering	6	530	3 180	265	1 590	2,0
Biologisk rening						
Biosteg 1			1 580	1 580		
Ox	1	790	790			4,35
Anox	1	790	790			4,35
Biosteg 2¹			3 630	7 255		
Anox	2	1 750	1 750			4,05
Anox/ox ²	2	815	1 630			4,05
Ox	2	1 062	2 120			4,05
Biosteg 3³			270	810		3,5
Mellansedimentering	6	737	4 420	335	2 010	3,5
Kemisk rening						
Flockning	9	90	810			3,5
Slutsedimentering	6	733	4 400	333	2 000	3,5

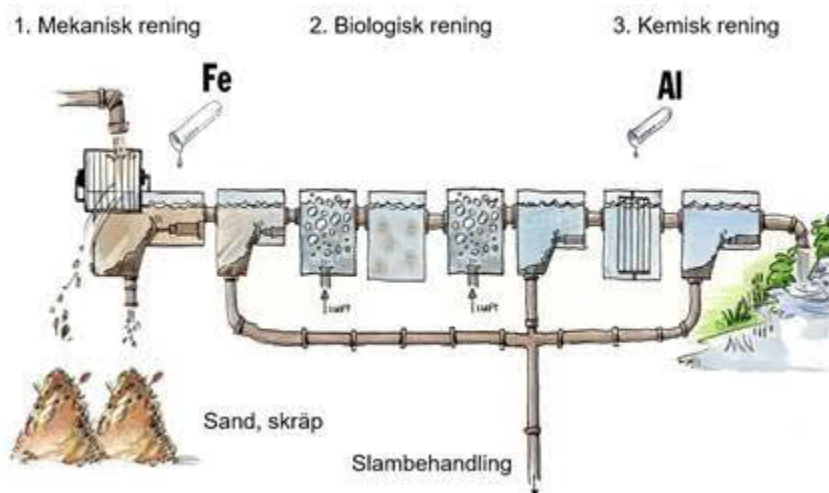
1. Två parallela linjer.
2. Anox/Ox är oftast oluffat.
3. Tre parallela linjer.

2.1 Avloppsvattenrening

Vatten på Sjöstadverket renas från organiskt material, kväve och fosfor med hjälp av mekanisk, biologisk och kemisk renings (Figur 1).

2.1.1 Mekanisk rening

Inkommande vatten leds först till reningsverkets mekaniska behandling, bestående av två rensgaller, ett sandfång och sex parallella försedimenteringsbassänger. Rensgallrens funktion är att rena vattnet från grova partiklar. Avskild rens tvättas och avvattnas innan det deponeras. Vattnet behandlas sedan i ett sandfång var tunga partiklar som sand och grus avskiljs för att skydda anläggningsdelar nedströms från slitage. I sandfångets inlopp doseras en järnbaserad fällningskemikalie för att fälla ut en del av fosfor och organiskt material som bildar flockar. Dessa sedimenterar i försedimenteringen som är det sista behandlingssteget i den mekaniska reningen. I försedimenteringsbassängerna avskiljs partikulärt (organiskt) material för att minska belastningen på den efterföljande biologiska reningen.



Figur 1. Schema över avloppsreningsprocessen på Sjöstadverket.

2.1.2 Biologisk rening

Den biologiska reningen är uppbyggd av tre aktivslamsteg. Rejektvatten från slamavvattningen, med en hög kvävehalt och hög temperatur, samt returslam förbehandlas i en aktivslamprocess bestående av ett nitrifikationssteg² och ett denitrifikationssteg³.

Det förbehandlat rejecktwater tillsammans med vatten från den mekaniska reningen, behandlas i två parallella aktivslambassänger som vardera behandlar halva flödet. Varje bassäng är uppdelat i en anoxisk zon för fördenitrifikation, en zon som är luftad vid behov, generellt vid låg vattentemperatur, och en oxisk zon (omkring 2 mg syre/l) för nitrifikation. Slutligen behandlas vattnet i en aktivslamprocess bestående av tre parallella bassänger för efternitrifikation. Omrörare är installerade i de syrefria zonerna för att hålla slammet i suspension.

Slam från aktivslamstegen separeras från vattnet i mellansedimenteringen som består av sex parallella bassänger. Den största mängden av slam från mellansedimenteringen pumpas retur till aktivslamprocessen och en liten del tas ut som överskottsslam. Överskottsslam pumpas till försedimenteringen, var det tas ut som ett blandslam tillsammans med primärslammet för att sedan rötas.

2.1.3 Kemisk rening

Efter den kemiska reningen behandlas vattnet kemiskt. I en luftad fördelningsbassäng blandas det med vattnet som förbiletts den biologiska reningen och en polyaluminiumbaserad fällningskemikalie. Kemsлам fälls ut i eftersedimenteringsbassängerna och pumpas tillbaka till inloppspumpstationen för att tas ut från försedimenteringen som ett blandslam.

² Nitrifikation är det första steget i kväverening. I detta steg tillsätts luft för att biologiskt oxidera kväveföreningar till nitrat.

³ Denitrifikation är reduktionen av nitrat till kvävgas som avges till atmosfären. Denna process sker under syrelösa (anoxiska) förhållanden och behöver en kolkälla. I fördenitrifikation recirkuleras ett stort del av det biologiskt behandlade vatten som innehåller nitrat till början av aktivslamprocessen var bakterierna använder organiskt material från det mekaniska förbehandlade vatten som kolkälla för denitrifikation. Efterdenitrifikation sker i slutet av den biologiska behandlingen var en extern kolkälla tillsätts då halten kolkälla i avloppsvatten är för låg för denitrifikation.

2.1.4 Utgående vatten

Utgående vatten provtas och rinner till recipienten med självfall.

2.2 Slambehandling

Ett blandslam bestående av primärslam, överskottslam och kemsлам förtjockas i en gravitationsförtjockare och silbandspress. Det avvattnade slammet pumpas till två termofila röt-kammare (52 °C) med en uppehållstid på ca. 20 d. Efter rötning avvattnas slammet till ca 30 % TS i två skruvpressar. Efter avvattning pumpas det REVAQ-certifierade slammet upp till en slamsilo varifrån det transporteras till jordbruksmark. Polymer tillsätts innan silbandspressen och skruvpressar.

Biogas från röt-kammarna uppgraderas till fordonsgas i en uppgraderingsanläggning invid reningsverket. Om denna ej är i bruk kan gasen brännas i en gaspanna eller fackla.

2.3 Anläggningens prestanda

Sjöstadverket har en väl fungerande reningsprocess och klarar med god marginal villkoren för BOD₇, kväve och fosfor samt innehåller en låg halt partiklar (Tabell 3), vilket är en viktig förutsättning för införandet av avancerad rening av läkemedelsrester.

Tabell 3. Utgående halter BOD₇, kväve (Tot-N), fosfor (Tot-P) och SS beräknat som flödesviktat medelvärde för 2017-juli 2019.

Parameter	Enhet	Värde
BOD ₇	mg/l	3,6
Tot-N	mg/l	10,4
Tot-P	mg/l	0,17
SS	mg/l	6,9

2.4 Platsbesök

Begränsande för utbyggnad med läkemedelsrening är tillgänglig yta. Lediga ytor finns mellan försedimenteringen och flockningsbassängerna, öster om mellan- och slutsedimententeringsbassängerna och söder om biosteget och slammottagningen, i vilket fall ny mark behöver tas i anspråk (se sektion 7.1).

2.5 Råvatten och recipient

Utgående vatten släpps via Kaplansådran till Klarälven och slutligen Väneren. Väneren är även vattentäkt för Sörmoverket som försörjer Karlstad med dricksvatten.

Vänerens vattenkvalitet kontrolleras av Vänerens Vattenvårdsförbund. Utöver recipientprovtagning har vattenvårdsförbundet även tagit prover för analys av mikroföroreningar, däribland läkemedel, på inkommande och utgående dricksvatten från Sormöverket samt inkommande och utgående avloppsvatten från Sjöstadverket.

3 Omvärldsbevakning

3.1 Miljö kvalitetsmål

Genom FN:s Agenda 2030 har Sverige ålagt sig att sätta in sig för att nå 17 globala mål för hållbar utveckling som innefattar ekonomiska, sociala och ekologiska dimensioner. Utöver dessa globala mål har Sverige ställt upp 16 nationella miljö kvalitetsmål som definierar den ekologiska dimensionen av de globala målen på nationell nivå. Avloppsvattenrening styrs i hög grad av de miljö kvalitetsmålen. De globala mål för hållbar utveckling i Agenda 2020 som avancerad rening av läkemedelsrester från avloppsvatten bidrar till är *Hav och marina resurser, Ekosystem och biologisk mångfald, Rent vatten och sanitet för alla, Hållbara städer och samhällen och Hållbar konsumtion och produktion*. De svenska miljö kvalitetsmål som läkemedelsrening bidrar till är *Hav i balans samt levande skärgård, Giftfri miljö och Levande sjöar och vattendrag*.

3.2 Direktiv för rening av läkemedelsrester från avloppsvatten i Sverige

Rening av avloppsvatten i Sverige styrs av ramdirektivet för vatten (Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG; "vattendirektiv" nedan) och underordnat direktiv om rening av avloppsvatten från tätbebyggelse (Rådets direktiv 91/271/EEG; "avloppsdirektiv"). Sverige har infört strängare regler, som beskrivs i Naturvårdsverkets föreskrifter (NFS 2016:6) om rening och kontroll av utsläpp av avloppsvatten från tätbebyggelse ("avloppsföreskrifterna") och även egna föreskrifter om klassificering och miljö kvalitetsnormer avseende ytvatten (Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter HVMFS 2019:25, miljö kvalitetsnormer upprättade med stöd av miljö balkens kapitel 5). Europaparlamentet har dessutom den 17 september 2020 utfärdad en resolution om strategin om läkemedel i miljön (2019/2816(RSP)). Särskilt fokus för bl.a. reningsverk begärs och Europeiska kommissionen och medlemsstaterna uppmanas att stödja forskning, innovation och utveckling inom avancerad läkemedelsrening.

I varken avloppsdirektivet eller avloppsföreskrifterna finns gränsvärden för läkemedel. För ytvatten har några läkemedel klassats som prioriterade ämnen eller särskilt förorenande ämnen.

I vattendirektivet finns miljö kvalitetsnormer för prioriterade ämnen (Bilaga X i Europaparlamentets och rådets direktiv 2013/39/EU) som översyns regelbundet. Listan reviderades senast 2013 och för närvarande ingår det inga läkemedel. I enlighet med detta direktiv ska EU utarbeta en strategi mot förorening av vatten genom läkemedel. Enligt direktiv 2008/105/EG ska EU upprätta en bevakningslista med 10 – 14 ämnen. Underlag ska samlas in för att avgöra om dessa ämnen ska läggas till som prioriterade ämnen. Bevakningslistan uppdaterades senast 2020 (Kommissionens genomförandebeslut (EU) 2020/1161) och de läkemedel som är med på den senaste uppdateringen är amoxicillin, ciprofloxacin, sulfametoxazol, trimetoprim, venlafaxin samt azolföroreningarna (bland dessa läkemedel finns klotrimazol, flukonazol, mikonazol). Amoxicillin och ciprofloxacin har varit med på en tidigare bevakningslista (Kommissionens genomförandebeslut (EU) 2018/840 (aktiv)). Andra läkemedel som har varit med på denna och på den första listan (Kommissionens bevakningslista (EU) 2015/495 (upphävd)) omfattade 17 α -etinylestradiol, 17 β -estradiol och östron, erytromycin, klaritromycin, azitromycin (2015 och 2018) diklofenak (2015). Diklofenak kommer troligen överföras till listan med prioriterade ämnen (8).

Sverige har klassats 17 α -etinylestradiol, 17 β -estradiol, diklofenak och ciprofloxacin som särskilt förorenande ämnen enligt Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter (HVMFS 2019:25). Halterna av dessa ämnen avgör hur t.ex. sjöar eller vattendrag statusklassificeras. En översikt av läkemedel analyserade i denna förstudie och förekomst på bevakningslistor eller som indikatorämnen (se sektion 3.5) presenteras i Tabell 4.

Tabell 4. Läkemedel analyserade inom denna förstudie, användningsområde och förekomst på bevakningslistor, som miljökvalitetsnormer eller indikatorämne.

Ämne	Användningsområde	Bevakningslistor/indikatorämnena					
		EU ¹	HAV ²	N ³	L ⁴	S ⁵	NI ⁶
Atenolol	Betablockerare			v			
Azitromycin	Antibiotikum	v					
Karbamazepin	Antiepileptikum			v	v	v	v
Klaritromycin	Antibiotikum	v		v	v	v	v
Diklofenak	Smärtstillande	v*	v	v	v	v	v
Erytromycin	Antibiotikum	v		v	v		
Flukonazol	Antimykotikum	v		v	v		
Furosemid	Blodtryckssänkande			v			
Losartan	Blodtryckssänkande			v	v		
Metotrexat	Immundämpande			v	v		
Metoprolol	Betablockerare, blodtryckssänkande			v	v	v	v
Naproxen	Antiinflammatorisk och smärtstillande			v	v		
Oxazepam	Ångstdämpande och lugnande			v	v		
Sertralin	Antidepressiv			v	v		
Trimetoprim	Antibiotikum	v		v	v		v
Ciprofloxacin	Antibiotikum	v	v	v	v		
Citalopram	Antidepressiv			v	v	v	
Ketoconazol	Antimykotikum			v	v		
Paracetamol	Smärtstillande			v			
Propranolol	Betablockerare, blodtryckssänkande			v			v
Sulfametoxazol	Antibiotikum	v		v	v		v
Tramadol	Smärtstillande			v	v		
Venlafaxin	Antidepressiv	v		v		v	
Zolpidem	Sömnmedel			v	v		
Östron	Hormon	v					
17β-estradiol	Hormon	v	v				
17α-etinylestradiol	Syntetiskt hormon	v	v				
Ibuprofen	Antiinflammatorisk och smärtstillande			v	v		

1. Bevakningslista över ämnen för unionsomfattande övervakning enligt artikel 8b i direktiv 2008/105/EG, Kommissionens genomförandebeslut (EU) 2020/1161 (**fetstil**), 2018/840 och 2015:495; även **amoxicillin**, **klotrimazol** och **mikonazol** ingår men har ej analyserats. Diklofenak, överförs troligen till Bilaga X i Europaparlamentets och rådets direktiv 2013/39/EU.
2. Särskilt förorenande ämnen i inlandsvattenytan enligt Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter HVMFS 2019:25.
3. Rekommenderade ämnen för analys enligt Naturvårdsverket (9). Mutagenicitet och östrogena effekter har inte analyserats i denna förstudie.
4. Förslag på läkemedel som Läkemedelsverket inom ramen för nationell läkemedelsstrategi (NLS) har tagit fram som miljöindikatorer. Levongesterol har inte analyserats i denna förstudie.
5. Indikatorämnena utvalda i Schweiz som kan adsorberas eller oxideras (mycket) bra. Andra indikatorämnena som inte analyserats i denna förstudie är amisulprid, hydroklorthiazid, candesartan och irbesartan.
6. Indikatorämnena utvalda i Nederländerna. Andra indikatorämnena som inte analyserats för i denna förstudie är benzotriazol, 4-och 5-metylbezotriazol, hydroklorthiazid och sotalol.

3.3 Vad händer i Sverige?

Avancerad rening av läkemedelsrester är ett populärt forskningsämne som studeras i hela landet. 2017 har Naturvårdsverket, i uppdrag av regeringen, redovisat en analys av behovet av avancerad rening av läkemedelsrester, av för- och nackdelar med befintliga tekniker och en analys av övriga konsekvenser av avancerad läkemedelsrening. Slutsatsen är att det finns ett behov av avancerad rening av läkemedelsrester i Sverige. Följande prioritering föreslås: reningsverk med recipienter med låg vattenomsättning, reningsverk med utsläpp till recipienter som tar emot vatten från flera reningsverk eller som påverkas av stora reningsverk, reningsverk som släpper ut stora mängder av läkemedel var det finns en risk för ackumulering av persistenta ämnen och reningsverk med känsliga recipienter (7).

Sedan 2014 har Havs- och vattenmyndigheten och Naturvårdsverket gett bidrag för projekt inriktade på utveckling av tekniker för rening av avloppsvatten från läkemedelsrester och andra miljöfarliga ämnen. Dessutom finns det kommuner som har börjat analys av läkemedel i avloppsvatten.

Tekniska Verken i Linköping var bland de första som fick finansiering för pilotanläggning (10) och som har numera en fullskalig anläggning för avancerad rening av läkemedel (11). Även Simrishamn och Kristianstad och Tierp har byggt fullskaliga anläggningar. Fullskaliga försök på Knivsta reningsverk har avslutats. Andra kommuner och kommunala bolag som har fått investeringsprojekt beviljade är Kristianstad, Lidköping, NSVA, Simrishamn, Tierp, Östra Göinge och Ronneby. Utöver dessa har fler än 20 kommuner och kommunala bolag fått beviljade förstudier.

3.4 Fullskaliga anläggningar i Sverige

3.4.1 Nykvarn reningsverk, Linköping

Anläggningen för avancerad rening av läkemedelsrester vid Nykvarns invigdes 2017. Innan den fullskaliga anläggningen byggdes gjordes pilotförsök med ozon. Ozoneringen är placerad mellan mellansedimenteringsbassängerna och reaktorerna för efternitritifikation/-denitrifikation (moving bed biofilm reactors) och eftersedimentering, inte i slutet av processen. Vid dosering av 0,55 mg ozon/mg dissolved organic carbon (DOC), ca 8 mg ozon/l, och korrigerat för utspädning i recipient är halterna av alla läkemedelsrester som analyserats under så låga att de inte utgör någon risk för miljön. Några toxiska transformationsprodukter bildas under ozoneringen men dessa neutraliseras i den biologiska efterbehandlingen (11).

3.4.2 Stengårdens och Kiviks reningsverk, Simrishamn

Anläggningen för avancerad rening av läkemedelsrester vid Stengårdens reningsverk invigdes 2019. Vattnet behandlas först i ett skivfilter, leds till en ozoneringsanläggning och slutpoleras i ett aktivkol- eller sandfilter. Anläggningen för läkemedelsrening vid Kiviks reningsverk består av en membranbioreaktor följd av aktivkolfilter (12). Provdrift är pågående (november 2020).

3.4.3 Degeberga reningsverk, Kristianstad

Anläggningen i Degeberga togs i drift april 2020. Tekniken som använts är aktivkol. Reningresultaten för 18 av de 20 undersökta läkemedel låg nära eller över 80% under hela undersöksperioden, med en drifttid av 30 000 bäddvolym (13).

3.4.4 Tierps reningsverk, Tierp

Anläggningen i Tierp som togs i drift juni 2020 består av förbehandling i ett sandfilter följt av ozonering och slutligen GAK-filtrering för nedbrytning av transformationsprodukter samt för att rena de låga halter läkemedel som finns kvar (14).

3.4.5 Knivsta reningsverk, Knivsta

Den första fullskaliga anläggningen för läkemedelsrening i Sverige fanns vid Knivsta reningsverk. Läkemedel renades med ozon och efterpulerades i ett GAK-filter. Två tekniker för ozoninblandning testades, inblandning med diffusorer och med statiska mixrar. Anläggningen var i drift från juli 2015 – januari 2016 (15). Detta system erbjuds av flera teknikleverantörer och kan användas oavsett anläggningsstorlek (16).

3.5 Vad händer i Europa?

3.5.1 Schweiz

Schweiz är det landet som ligger i framkanten var det gäller avancerad rening av läkemedelsrester. Schweiz var det första landet som antog en lagstiftning om avancerad rening vid reningsverk. En utbyggnad av cirka 100 av totalt ca 750 reningsverk ska vara färdig 2040. De reningsverk som ska byggas ut är reningsverk med en belastning från mer än 80 000 personer, verk med en belastning från mer än 24 000 personer och sjöar som recipient samt verk med känsliga recipienter eller låg utspädning (7).

I Schweiz har man valt 12 indikatorsubstanser, varav 8 läkemedel som kan adsorberas eller oxideras mycket bra (amisulprid, karbamazepin, citalopram, klaritromycin, diklofenak, hydroklorothiazid, metoprolol, venflaxin) och två andra läkemedel (candesartan, irbesartan) och två mikroföroreningar (benzotriazol och mecoprop) som kan adsorberas eller oxideras bra. Vid processuppföljning ska minst fyra av de läkemedel som kan renas mycket bra och minst två av de ämnen som kan renas bra väljas ut. Reningsverk ska klara rening motsvarande 80 % jämfört med inkommande vatten (17).

Den första anläggningen har varit i drift sedan 2014. I dagsläget är 12 reningsverk utbyggda med läkemedelsrening och ytterligare 27 är i planerings- eller byggskede. Fem av de befintliga anläggningar använder sig av ozonering, fem av pulveriserat aktivkol (PAK), en av granulärt aktiv kol (GAK) och en av en kombination av ozon och granulärt aktiv kol. Mer information finns på micropoll.ch/ara-ausbau (18).

3.5.2 Tyskland

Tyskland har ingen nationell lagstiftning om läkemedelsrening, men några av delstaterna har tagit fram strategier. Redan 2015 fanns det 17 anläggningar för läkemedelsrening (19). Idag finns det 22 och ett totalt byggs. PAK är populärt i Tyskland och används på 13 anläggningar, GAK används på 5 och ozon på 4 (18).

3.5.3 Frankrike

Frankrike har i dagsläget fem fullskaliga anläggningar för läkemedelsrening, på fyra av dessa har man valt ozon, på en av dem har man valt GAK (18).

3.5.4 Nederländerna

I Nederländerna finns inga krav på läkemedelsrening. Regeringen ger dock bidrag för byggnad av anläggningar för läkemedelsrening och många pilot- och demonstrationsprojekt utförs. Som i Schweiz, har man valt ut indikatorer för reningen (benzotriazol, klaritromycin, karbamazepin, diklofenak, metoprolol,

hydroklorthiazid, 4-och 5-metylbezotriazol, propanol, sotalol, sulfametoxazol och trimetorprim). För demonstrationsanläggningar gäller att ett extra steg för avancerad rening av läkemedelsrester måste kunna rena 7 utav 11 indikatorsubstanser för åtminstone 70% och utöver detta en 50%-ig reduktion av ekotoxikologiska risker (20).

I Nederländerna finns ett avloppsreningsverk med läkemedelsrening som har varit i drift sedan 2010. Utgående vatten från reningsverket återanvänds som industrivatten. Vattnet behandlas med ultrafiltrering, sedan i ett luftat biologiskt aktivt kolfilter och slutligen med omvänt osmos. Mer än 200 000 bäddvolymeter har behandlats utan att man har bytt kol och läkemedelsreningen fungerar fortfarande bra. Möjliga förklaringar för detta är att läkemedlen bryts ner, att de sorberas i biohuden för att sedan spolas bort när filtren backspolas eller, men inte så sannolikt, att de adsorberas till kolet (21). Det finns en anläggning med GAK som har varit i drift sedan 2013 var tester pågår för förbehandling av vattnet med ozon (22). Den första ozonanläggningen projekteras och beräknas tas i drift i slutet av 2021 (23).

3.5.5 Danmark

I Danmark testas olika tekniker för avancerad läkemedelsrening i pilotskala. Vid sjukhuset i Herlev finns en fullskalig anläggning för behandling av sjukhusavlopp (19).

4 Reningstekniker

4.1 Fysikaliska reningstekniker

4.1.1 Membranfiltrering

Ultrafiltrering (UF) kan avskilja partiklar och molekyler ner till 10 nm. Ultrafiltrering kan bland annat användas integrerat i processen som membranbioreaktor (MBR). Slamåldern i MBR är generellt högre och därför kan ökad biologisk nedbrytning av läkemedel ske. Partikelbundna läkemedel kan avskiljas via membranseparation. En effektiv avskiljning av läkemedel kräver dock membran med mindre porstorlek.

Omvänd osmos (RO) är filtrering genom ett semipermeabelt membran. Genom att applicera ett högre tryck än det osmotiska kan vattenmolekylerna passera genom membranet medan joner och större molekyler blir kvar i retentatet. RO har en hög reningsgrad men är en energikrävande process. Nanofiltrering (NF) bygger på samma princip som RO men har en lägre reningsgrad. Både RO och NF ställer krav på vattenkvaliteten, där för hög turbiditet ger dålig drift på grund av igensättningar av membran.

För att membranfiltrering, UF, RO eller NF, ska fungera krävs regelbunden rengöring. Efter tid kommer membranerna att få beläggningar och därmed tappa i effektivitet. Rengöringen är extra viktig om retentatet genom koncentrationen blivit övermättat med avseende på föreningar som kan falla ut och bilda fasta produkter på membranet, så kallad "scaling". I detta sammanhang används ofta tillsatser av komplexbildare, "anti-scalants" eller beläggningshämmare, för att hålla kvar föreningar som annars skulle ha fallit ut, i lösning.

Gemensamt för alla sorters membran är att en del av vattnet renas, filtrerat eller permeatet, medan resten av vattnet, koncentrat eller retentat, kommer att innehålla högre halter av det man vill filtrera bort, denna restström behöver hanteras. Ju finare membran som används, desto högre tryck måste läggas på för att vattnet ska passera membranet. Efterhand som retentatet koncentreras med avseende på bortfiltrerat material, ökar också det nödvändiga trycket för att koncentrera retentatet ytterligare.

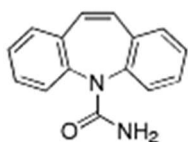
4.2 Oxidativa reningstekniker

Det finns en mängd oxidativa reningstekniker där de vanligaste är behandling med ozon eller olika avancerade oxidativa processer.

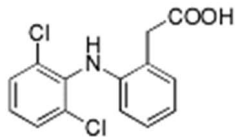
4.2.1 Ozonering

Ozon är en av de vanligaste teknikerna för rening av läkemedel och andra mikroföroreningar. I dricksvattenberedning används ozon för rening av mikroföroreningar samt för desinficering.

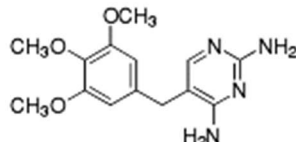
Ozonering kan antingen ske genom direkt oxidering med ozon eller indirekt genom bildandet av hydroxylradikaler. Hydroxylradikaler kan bland annat bildas i vatten av ozon och hydroxidjoner. Hydroxylradikaler är ett starkt oxidationsmedel som agerar oselectivt, vilket betyder att de bryter ner såväl naturligt organiskt material som läkemedelssubstanser. Direkt ozonering sker generellt sett med föreningar som har dubbel eller trippelbundna kolatomer, aromatiska grupper eller specifika funktionella grupper innehållande syre, amin, fosfor eller svavel. Läkemedel innehåller ofta sådana grupper (se Figur 2) och ozon kan således reagera direkt med dessa.



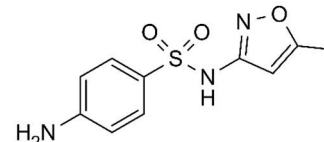
Karbamazepin



Diklofenak



Trimetoprim



Sulfametoxazol

Figur 2. Exempel på läkemedel och dess strukturformler.

Ozon är instabilt och explosivt vilket medför att generering av ozon från syre måste ske på plats. Syrgas för ozongenerering kan antingen utvinnas ur luft i anslutning till ozongenereringen alternativt levereras i flytande form. Hantering av syrgas och ozon kräver särskilda säkerhetsrutiner.

Dosering av ozon till vattnet sker oftast sett i ett kärl eller reaktor där man kan styra dosering samt få god omblandning. Behovet av ozon ökar med högre innehåll av organiskt material vilket medför att ozonering bör ske så långt nedströms i processen som möjligt. Då olika transformationsprodukter bildas vid ozonering krävs någon form av efterbehandling av vattnet. Dessutom krävs behandling av off-gas från processen.

Om vatten innehåller förhöjda halter av bromid finns det risk för att ozonering kan leda till bildande av carcinogena bromater. Om halten av bromid i vattnet överstiger 150 µg/l bör bildandet av bromat att undersökas (24). Generellt sett ökar bildandet av bromat med högre doser av ozon, tillsats av exempelvis väteperoxid eller ammonium kan minska bildandet av bromat (25).

Bland läkemedel med hög reaktivitet med ozon räknas bland annat klaritromycin, östron, 17β-estradiol, trimetoprim. Atenolol och metoprolol räknas ha medelhög reaktivitet (26). Det finns läkemedelssubstanser och övriga mikroföroreningar som är relativt resistent mot ozonering, som till exempel diazepam och ibuprofen (27). För övergripande reningseffektivitet räknas att diklofenak, 17β-estradiol, 17α-etynestradiol, karbazepin, propanolol, sulfametoxazol, trimetoprim, bisfenol A ha bra rening. Oxazepam, sertralin, ibuprofen, dioxiner, nonylfenol anses ha medelbra reningseffekt. Låg effekt uppnås för azitromycin, klaritromycin, erytromycin, endotoxiner, ftalater och PFAS. Ingen effekt uppnås för förorenande metaller och mikroplaster (16).

Studier och simuleringar har visat att transformationsprodukter från ozonering av alkener är oftast mer biologisk nedbrytbara än läkemedlet i sig. Oxidering vid kväveatomer leder ofta till bildande av kväveoxider eller hydroxylkväve för vilka biologisk nedbrytning ofta inte förbättras mot det ursprungliga ämnet. Ozonering av aromatiska kolväten kan ge många olika transformationsprodukter beroende reaktionsväg, men många transformationsprodukter är fortfarande reaktiva med ozon och kan därmed reagera vidare (28).

Ozonering i biosteget

Ett alternativ till ozonering av behandlat vatten är att tillsätta ozon i biosteget. Genom att tillsätta ozon i biosteget sker en oxidering av såväl läkemedelsrester, organiskt material och andra mikroföroreningar. Vidare kan en direkt biologisk nedbrytning ske av resterna.

Metoden har applicerats av SUEZ på olika reningsverk och utöver nedbrytning av läkemedelsrester har andra fördelar observerats. Exempelvis att behov av luft för biosteget minskar, en lägre slamvolym samt att den behövda reaktorvolymen för biosteget blir lägre.

4.2.2 Avancerade oxidativa processer, AOP

Avancerade oxidativa processer är ett samlingsbegrepp för metoder som använder en kombination av oxidationstekniker för att öka bildandet av hydroxylradikaler. Hydroxylradikaler är ett starkt oxidationsmedel som agerar oselektivt, vilket betyder att de bryter ner såväl naturligt organiskt material som läkemedelssubstanser. Exempel på AOP är, ozon/UV, ozon/TiO₂/UV, H₂O₂/UV eller Fenton-processen.

UV-ljus används inom AOP för att genom fotolys bryta kemiska bindningar för att därmed producera hydroxylradikaler. Behandling med H₂O₂/UV består av att väteperoxid doseras till vattnet för att sedan strålas med UV-ljus. Väteperoxid har en begränsad förmåga att absorbera UV-ljus vilket gör att stora delar av UV-dosen blir överksam för produktion av hydroxylradikaler (29).

I Fenton-processen genereras hydroxylradikaler från reaktioner mellan H₂O₂ och järnjoner i en vattenlösning. Metoden har funnits länge men det behövs fortfarande mer forskning för att utvärdera om den är ekonomiskt och kommersiellt hållbar (30).

Avancerade oxidativa processer är oftast mer effektiva än enbart ozon på grund av bildandet av fler hydroxylradikaler samt att fotoner har förmågan att initiera brytning av kol-klorbindningar (27). Däremot är det stora skillnader i olika föroreningars känslighet för olika AOP-metoder vilket medför att det kan vara svårt att välja en metod som kan klara så många substanser som möjligt (31).

4.3 Adsorptiva reningstekniker

Den grundläggande principen för adsorptiv rening är att föroreningar binder in till den aktiva ytan av partiklar, till exempel aktivt kol. Efter tid kommer de aktiva platserna på partiklarna bli upptagna och reningseffektiviteten minskar vilket gör att materialet behöver bytas ut. Generellt sett adsorberas föreningar med hög molekylvikt och låg löslighet bättre än mycket vattenlösliga föroreningar (31). Läkemedel med mycket bra till bra adsorption är bland annat benzotriazol, karbamazepin och diklofenak (26).

De vanligaste adsorptiva reningsteknikerna är behandling med granulerat eller pulveriserat aktivt kol.

4.3.1 Granulerat aktivt kol – GAK

Granulerat aktivt kol kan placeras i filterbäddar som ett separat steg i reningsprocessen. Bildande av biologi i kolfilter inom avloppsrening är nästintill omöjlig att förhindra (16). Däremot ger förekomsten av mikrobiologi möjlighet till ytterligare nedbrytning på grund av biologiska processer. Den biologiska aktiviteten är beroende av nedbrytbart organiskt material i vattnet och det är svårt att säga i förväg hur biologin kommer agera. Nedbrytbara föreningar som adsorberas på kolpartiklarna kan brytas ner av mikroorganismer vilket gör att adsorptionsplatserna frigörs igen. Oorganiska eller stabila organiska föreningar kommer däremot förbruka adsorptionsplatser och leda till att kolet behöver bytas ut. De adsorberade mikroföroreningar förstörs vid regenerering av använt kol, vilket sker via termisk behandling. I dagsläget finns ingen anläggning i Norden som regenererar aktivt kol.

För kolfilterna ska fungera som avsett krävs backspolning med jämna mellanrum. Behovet av backspolning styrs av belastningen över filtret samt biologins tillväxt.

GAK har bra reningseffekt på de flesta läkemedelsrester och andra mikroföroreningar, såsom PFAS, dioxin och ftalater. För oxazepam och trimetoprim har en något lägre effekt observerats och för bisfenol A, nonylfenol, mikroplaster och tungmetaller fås liten effekt (16).

4.3.2 Pulveriserat aktivt kol – PAK

Reningsprincipen i behandling med pulveriserat aktivt kol är adsorption, till skillnad från behandling med GAK fås ingen ytterligare rening via biologisk aktivitet och filtrering. Pulveriserat kol kan användas i olika steg i huvudprocessen som till exempel i det biologiska steget, före en eventuell slutfiltrering eller som ett sista separat reningssteg med avskiljning av använt kol (31). I regel tillämpas recirkulation av separerat kol till den biologiska reningen vilket innebär att det till slut hamnar i överskottslammet (32). För REVAQ certifierade anläggningar kan PAK således inte doseras eller recirkuleras till det biologiska steget. Där med behövs ett separat steg alternativt att slambehandling för slam från det biologiska steget där PAK doseras hanteras separat. Använt pulveriserat aktivt kol från processen kan inte återanvändas och måste således skickas till förbränning.

PAK kan anses ha en något lägre reningseffekt än GAK då ingen ytterligare biologisk rening samt filtrering uppnås.

4.4 Kombinationer

Det kan vara svårt att hitta en reningsmetod som kan hantera många olika typer av läkemedelsrester, av den anledningen kan det vara lämpligt att applicera en kombination av olika reningstekniker.

4.4.1 Ozonering följt av biologiskt aktivt filter O₃-BAF(GAK)

Ozonering följt av efterpolering med aktivt kolfilter kan ge bra resultat då mikroorganismer i kolfiltret har möjlighet att vidare bryta ner material från ozoneringen. Det är viktigt att dosering av ozon optimeras då restozon i vattnet kan förstöra biologin i filtret. (31)

Behandlingen placeras efterföljande steg till eftersedimentering. Ozonering av vattnet leder till nedbrytning av mikroföreningar, dessa kan sedan adsorberas på kolpartiklarna. Nedbrytbara föreningar som adsorberas kan brytas ner av mikroorganismer och således frigörs adsorptionsplatser. När alla adsorptionsplatser är förbrukade behöver kolet bytas ut. Använt kol kan regenereras via termisk behandling. I dagsläget finns ingen anläggning i Norden som regenererar aktivt kol.

Backspolning av kolfilter krävs med jämna mellanrum för att de ska fungera som avsett. Behovet av backspolning styrs av belastningen över filtret samt biologins tillväxt.

Kombination av ozonering och BAF har bra reningseffekt på de flesta läkemedelsrester och andra mikroföreningar, såsom PFAS, dioxin och ftalater. För oxazepam och nonylfenol har en något lägre effekt observerats och för mikroplaster och tungmetaller fås liten effekt (16).

4.4.2 Ultrafiltrering med biologiskt aktivt filter UF-BAF(GAK)

Det finns i huvudsak två metoder för UF-BAF dels som kompletterande process placerad efter eftersedimenteringen eller som integrerad process där ultrafiltrering ersätter eftersedimentering. Integrerat system brukar refereras som MBR-BAF.

Större molekyler och föreningar avskiljs över membranen och mindre molekyler som passerar membranen kan adsorberas på det aktiva kolet. Nedbrytbara föreningar som adsorberas kan brytas ner av mikroorganismer och frigöra adsorptionsplatser. När alla adsorptionsplatser är förbrukade behöver kolet bytas ut. Använt kol kan regenereras via termisk behandling. I dagsläget finns ingen anläggning i Norden som regenererar aktivt kol. Filtringen innan det biologiskt aktiva filtret leder till en lägre partikelbelastning vilket gör att behovet för backspolning minskas.

Vid drift av membran är det oundvikligt att membranens porer sätter igen och således krävs backspolning samt membrantvätt. Membranfiltrering leder till att en restström, som har högre koncentration av det man filtrerar bort, denna behöver tas om hand om på lämpligt sätt.

Kombination av ultrafiltrering och BAF har bra reningseffekt på de flesta läkemedelsrester och andra mikroföroreningar, såsom PFAS, dioxin, ftalater och mikroplast. För oxazepam har en något lägre effekt observerats och för bisfenol A, nonylfenol och tungmetaller fås liten effekt (16).

5 Egenskaper läkemedel

Läkemedel delas ofta in i olika grupper beroende på deras användningsområden. Det är läkemedlens struktur samt funktionella grupper som ger upphov till olika fysiokemiska egenskaper. Ett läkemedel består ofta av olika typer av funktionella grupper. Ofta kan läkemedel i samma användningsområde ha olika struktur och olika funktionella grupper.

Många läkemedel kan ha antingen sura eller basiska funktionella grupper, eller en kombination av båda. Beroende på vilka funktionella grupper ett läkemedel har kan anjoniska, katjoniska, neutrala eller zwitterjoniska variationer förekomma. Vilken form av jon som finns beror på molekylernas syrakonstant, pK_a , och fördelningskonstanten mellan oktanol/vatten, $\log D$. Där negativa värden för $\log D$ indikerar en högre löslighet i akvatisk fas och ett positivt högre löslighet i oktanol. Läkemedel med $\log D < 4$ brukar anses vara bioackumulerbara.

Kemiska egenskaper, såsom pK_a och $\log D$, för utvalda läkemedel är beräknade med hjälp av programvaran in-Silico från ACD/Labs. Värden för PNEC är framtagna med hjälp av litteratursökning. Dessa värden presenteras i

Tabell 5.

LogD- och pKa-värden kan användas för att förklara om läkemedel binder till slam eller förblir i vattenfasen. Generellt binder de läkemedel som har höga LogD-värden (gråmarkerade i Tabell 5) till slammet, exempel är sertralin och ketoconazol. Även citalopram och ciprofloxacin binder till slam, även om de har en högre löslighet i vatten än i oktanol, vilket kan bero på att de är positivt laddade vid i avloppsrening förekommande pH-värden. Ämnen som har pKa-värden <6, t.ex. diklofenak och losartan, är negativt laddade och har högre löslighet i vatten än i oktanol, och binder därmed inte till slammet.

Att många läkemedel är persistenta beror bland annat på att stabilitet har ansetts vara fördelaktigt för att få rätt effekt för människor. Läkemedel med molekylstrukturer där aromatiska ringa har funktionella grupper innehållande klor, kväve och flor är ofta mer persistenta på grund av att de kan motstå oxidering genom att fördela ut laddningen från fria elektronpar, vilket även stabiliserar de aromatiska ringarna (33).

Om en toxisk effekt förväntas beror på läkemedlens PNEC-värde. Det är en uppskattning av den lägsta halten vid vilken ingen toxisk effekt förväntas. Detta beräknas utifrån akut toxiska värden (t.ex. "letal concentration" som dödar 50% av testorganism, LC50) eller kronisk toxiska värden (t.ex. No Observed Effect Concentration, NOEC) Beroende på metod och testorganism delas värdet med en faktor för att ta höjd för osäkerheter.

Tabell 5. Egenskaper för undersökta läkemedel, PNEC genom litteraturstudie. LogD och pKa genom beräkning. Läkemedel med en högre löslighet i oktanol jämför med vatten är gråmarkerade.

Ämne	Användningsområde	PNEC		LogD		pKa
		Halt [ng/l]	Källa	pH 6,5	pH 7,4	
Atenolol	Betablockerare	148 000	(34)	-2,83	-1,94	9,43
Azitromycin	Antibiotikum	200	(35)	-0,84	0,91	13,74, 8,85, 8,30
Karbamazepin	Antiepileptikum	25 000	(36)	2,67	2,67	13,94
Klaritromycin	Antibiotikum	80	(35)	0,46	1,35	13,49, 9,20
Diklofenak	Smärtstillande	32 000	(37)	1,73	0,84	4,18
Erytromycin	Antibiotikum	500	(35)	0,13	1,02	13,49, 9,20
Flukonazol	Antimykotikum	250	(35)	0,50	0,50	10,55, 3,32, 2,68
Furosemid	Blodtryckssänkande	142 000	(38)	-0,40	-1,30	3,04, 9,79
Losartan	Blodtryckssänkande	1 000 000	(39)	1,23	0,34	4,16, 2,45, 0,60
Metotrexat	Immunvägshämmande	80	(40)	-4,79	-6,53	3,56, 4,78, 5,55
Metoprolol	Betablockerare, blodtryckssänkande	7 300	(41)	-1,15	-0,25	9,43
Naproxen	Antiinflammatorisk och smärtstillande	15 000	(42)	0,74	-0,16	4,24
Oxazepam	Ångestdämpande och lugnande	4,6	(43)	2,31	2,31	10,94, 12,90, 1,17
Sertralin	Antidepressiv	56	(43)	1,84	2,74	9,47
Trimetoprim	Antibiotikum	100 000	(44)	0,24	0,67	6,90
Ciprofloxacin	Antibiotikum	5	(45)	-1,63	-1,57	6,16, 8,68
Citalopram	Antidepressiv	4 900	(46)	-0,77	0,13	9,79
Ketoconazol	Antimykotikum	50	(47)	3,02	3,43	6,88, 3,58
Paracetamol	Smärtstillande	46	(48)	0,34	0,34	9,86, 1,72
Propranolol	Betablockerare, blodtryckssänkande	230	(49)	0,10	0,99	9,50
Sulfametoxazol	Antibiotikum	600	(44)	0,38	-0,39	5,81, 1,39
Tramadol	Smärtstillande	64 000	(50)	-0,82	0,08	9,38
Venlafaxin	Antidepressiv	900	(50)	-0,03	0,87	9,44
Zolpidem	Sömnmedel	2 200	(51)	2,28	2,85	13,38, 6,72
Östron	Hormon	3,4	(52)	-	-	-
17 β -estradiol	Hormon	2,9	(53)	4,13	4,13	10,27
17 α -etinyloestradiol	Syntetiskt hormon	0,03	(54)	4,52	4,52	10,24, 13,34
Ibuprofen	Antiinflammatorisk och smärtstillande	1 000	(55)	1,63	0,73	4,41

6 Läkemedelsrening vid Sjöstadsverket

6.1 Bakgrund

6.1.1 Provtagning

Dygnsprover på inkommande och utgående avloppsvatten har tagits av driftpersonal i Karlstads kommun. Proverna togs den 19 december 2019, den 22 januari, den 2 mars, den 5 maj, den 22 juli och den 21 september 2020. Proverna har förvarats frysta innan transport till laboratoriet.

6.1.2 Analysmetod

Prover har analyserats med hjälp av Solid-phase Extraction följt av UHPLC-MS/MS av MoLab vid Högskolan i Kristianstad enligt metoden i Svahn och Björklund, 2016. Interna standarder tillsätts för att kunna korrigera för matriseffekten som är stor, framförallt för inkommande avloppsvatten (56).

6.1.3 Dataanalys

Inkommande halter och utgående halter från alla 6 provtagningar (se Bilaga A och B) har använts för att beräkna inkommande och utgående mängder (Bilaga A och C), reningsgrader och flödesviktade medelhalter. De flödesviktade medelvärden har använts för att beräkna in- och utgående mängder läkemedel per år. Halter i både inkommande och utgående vatten har jämförts med PNEC-värden för att evaluera reningsgraden i befintlig anläggning samt behov av utökad rening. Här har det antagits att utökad rening behövs om halter läkemedel i utgående vatten överskrider respektive PNEC-värden. Om rening av läkemedel behövs för en god kemisk status av recipienten är ännu oklart.

6.2 Inkommande halter och mängder

De ämnen som förekom i högsta halter och således störst mängd vid alla sex provtagningstillfällen var smärtstillarna paracetamol och ibuprofen. Flödesviktade medelhalter var 52 µg/l paracetamol och 29 µg/l ibuprofen. De läkemedelsrester varav flödesviktade medelhalterna var bland de tio högsta redovisas i *Tabell 6*.

Tabell 6. De tio högsta halter (flödesviktade medelvärden) och mängder läkemedelsrester i inkommande vatten till Sjöstadsverk samt PNEC-värden.

Ämne	Inkommande halt (ng/l)		PNEC (ng/l)	Inkommande mängd (kg/år)
	Medel	Max		
Paracetamol	49 093	69 371	46	445
Ibuprofen	28 640	65 674	1 000	260
Naproxen	5 499	10 966	15 000	50
Losartan	2 606	5 550	142 000	24
Furosemid	2 451	4 277	1 000 000	22
Atenolol	1 700	2 538	148 000	15
Metoprolol	897	1 479	7 300	8,1
Diklofenak	698	1 080	5	6,3
Ciprofloxacin	584	1 394	32 000	5,3
Trimetoprim	523	860	600	4,7

Att halterna är högst betyder inte att det är hög risk förknippad med dessa ämnen. Både halten paracetamol, ibuprofen och ciprofloxacin i inkommande vatten överskrider dock PNEC (Tabell 6). Halten ciprofloxacin är hög jämfört med halter in till andra reningsverk, som är <104 ng/l (57). Halterna ketoconazol, klaritromycin, sertralin, oxazepam och östron är inte bland de tio högsta, men dess flödesviktade medelhalter överskrider ändå PNEC-värden (Tabell 7).

Ciprofloxacin, östron och klaritromycin är med bland de ämnen som Havs- och vattenmyndigheten betraktar som särskilt förorenande. Halterna av diklofenak, 17 α -etinylostradiol och 17 β -estradiol är lägre än deras respektive PNEC-värde, men de tas hänsyn till i förstudien pga. att även dessa betraktas som särskilt förorenande.

Tabell 7. Läkemedel dess inkommande halter (flödesviktade medelvärden) överskrider PNEC alternativt klassas som särskilt förorenande ämnen; inkommande halter, PNEC samt hur många gånger högre än PNEC-värdet halterna är (överskridningsfaktor). Gråmarkerade är särskilda förorenande ämnen enligt Havs- och vattenmyndigheten.

Ämne	Inkommande halt (ng/l)		PNEC (ng/l)	Överskridning PNEC		Inkommande mängd (kg/år)
	Medel	Max		Medel	Max	
Paracetamol	49 093	69 371	46	1 067	1 508	445
Ciprofloxacin	584	1 394	5	117	279	5,3
Oxazepam	298	442	4,6	65	96	2,7
Ibuprofen	28 639	65 674	1 000	29	66	260
Östron	45,1	90,8	3,4	13	27	0,41
Ketoconazol	231	794	50	4,6	16	2,1
Sertralin	106	265	56	1,9	4,7	0,97
Klaritromycin	118	261	80	1,5	3,3	1,1
Diklofenak	698	1080	32 000	0,022	0,034	6,3
17 α -etinylostradiol	<0,1	<0,1	0,03	n.d.	n.d.	n.d.
17 β -estradiol	<0,1	<0,1	2,9	n.d.	n.d.	n.d.

Det smärtstillande läkemedlet paracetamol förekom i högst halter och största mängder av alla de analyserade läkemedel, förutom i mars, då halten var signifikant lägre, 23 mg/l och 673 g/d. Halten (och mängden) av smärtstillaren ibuprofen däremot var signifikant högre i mars, 66 mg/l. Halten av smärtstillande diklofenak ökade från december – januari, var lite lägre i mars för att sedan öka igen i maj och juli. Halten i september var lite lägre. Flödet var högre i december – mars vilket orsakat en större spädning av inkommande avloppsvatten. Sett till inkommande mängder, så förändras bilden för diklofenak, dock ej för paracetamol eller ibuprofen. Den totala inkommande mängden var relativt stabil, 14 – 19 g/d. Tabletter och kapslar med diklofenak har blivit receptbelagda den 1 juni 2020, men ingen effekt av det har observerats på inkommande mängder och halter.

Halten och mängden av antibiotikum ciprofloxacin ökade från februari till juli, för att sedan minska lite i september. Halten och mängden klaritromycin däremot ökade från december till januari, var lägre i mars, maj och september, för att sedan nå en högsta halt i september.

Halten och mängden av ångestdämpande och lugnande oxazepam gick ner under våren för att gå upp i september igen.

Halten och mängden av antimykotikum ketoconazol var stabil och låg i december – mars. Halten och mängden i maj, juli och framförallt september var mycket högre.

Halten av antidepressivum sertralin följer samma trend som ketoconazol.

Halten av hormonen östron var relativt stabil, men en utstickare uppåt i juli. Hormoner 17 α -etinylestradiol och 17 β -estradiol förekom i för låga halter för att se någon variation mellan provtagningarna.

Trots att flödet minskade från december till september visar inkommande halter och inkommande mängder till stor del samma mönster. Se Bilaga A för inkommande halter och mängder vid de olika provtagningar, Bilaga B för diagram med förändring av inkommande halter mellan provtagningar, jämfört med utgående halter och flödesviktade medelvärden och Bilaga C för diagram med inkommande och utgående mängder för alla prover samt medelvärden.

6.3 Utgående halter och mängder

De läkemedelsrester dess flödesviktade medelhalter i utgående vattnet var bland de tio högsta redovisas i *Tabell 8*. Halten losartan var högst, 1,8 $\mu\text{g/l}$. Bland de tio ämnen med högsta utgående halter är det bara ett ämne, oxazepam, som överskrider PNEC-värdet. Andra ämnen som förekom i halter högre än PNEC-värden men dess halter var inte bland de tio högsta halterna är ciprofloxacin (flödesviktat medelvärde) samt ibuprofen, paracetamol östron och klaritromycin, vid några provtagningstillfällen. Halterna av dessa läkemedel samt de ämnen som betraktas som särskilt förorenande ämnen eller är med på bevakningslistan redovisas i *Tabell 8*. *De tio högsta halter (flödesviktade medelvärden) och mängder läkemedelsrester i utgående vatten från Sjöstadsverk samt PNEC-värden.*

Ämne	Utgående halt (ng/l)		PNEC (ng/l)	Utgående mängd (kg/år)
	Medel	Max		
Losartan	1 768	3 590	1 000 000	16
Metoprolol	1 010	1 581	7 300h	9,2
Atenolol	960	1 514	148 000	8,7
Naproxen	862	1 719	15 000	7,8
Ibuprofen	527	1 011	1 000	4,8
Diklofenak	521	920	32 000	4,7
Venlafaxin	359	528	900	3,3
Furosemid	308	474	142 000	2,8
Oxazepam	298	395	4,6	2,7
Tramadol	259	291	64 000	2,4

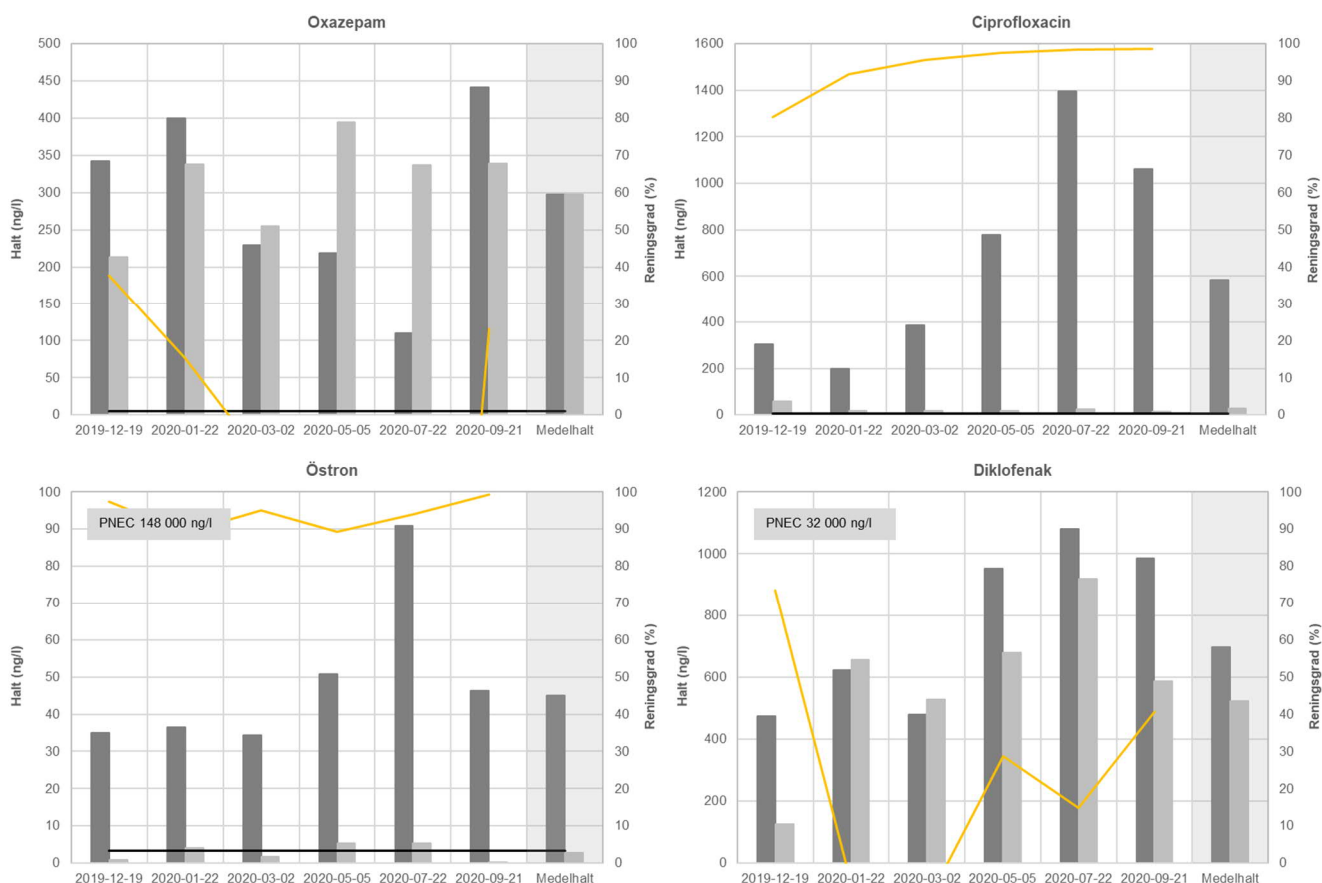
Tabell 9 och Figur 3.

Tabell 8. De tio högsta halter (flödesviktade medelvärden) och mängder läkemedelsrester i utgående vatten från Sjöstadsverk samt PNEC-värden.

Ämne	Utgående halt (ng/l)		PNEC (ng/l)	Utgående mängd (kg/år)
	Medel	Max		
Losartan	1 768	3 590	1 000 000	16
Metoprolol	1 010	1 581	7 300h	9,2
Atenolol	960	1 514	148 000	8,7
Naproxen	862	1 719	15 000	7,8
Ibuprofen	527	1 011	1 000	4,8
Diklofenak	521	920	32 000	4,7
Venlafaxin	359	528	900	3,3
Furosemid	308	474	142 000	2,8
Oxazepam	298	395	4,6	2,7
Tramadol	259	291	64 000	2,4

Tabell 9. Läkemedel dess utgående halter (flödesviktade medelvärden) överskrider PNEC alternativt klassas som särskilt förorenande ämnen; inkommande halter, PNEC samt hur många gånger högre än PNEC-värdet halterna är (överskridningsfaktor). Gråmarkerade är särskilda förorenande ämnen av Havs- och vattenmyndigheten.

Ämne	Utgående halt (ng/l)		PNEC (ng/l)	Överskridning PNEC		Utgående mängd (kg/år)
	Medel	Max		Medel	Max	
Oxazepam	298	395	4,6	65	86	2,7
Ciprofloxacin	28,5	59,8	5	5,7	12	0,3
Östron	2,7	5,4	3,4	0,79	1,6	0,02
Diklofenak	521	920	32 000	0,016	0,029	4,7
17 α -etinyloestradiol	<0,1	<0,1	0,03	n.d.	n.d.	n.d.
17 β -estradiol	<0,1	<0,1	2,9	n.d.	n.d.	n.d.



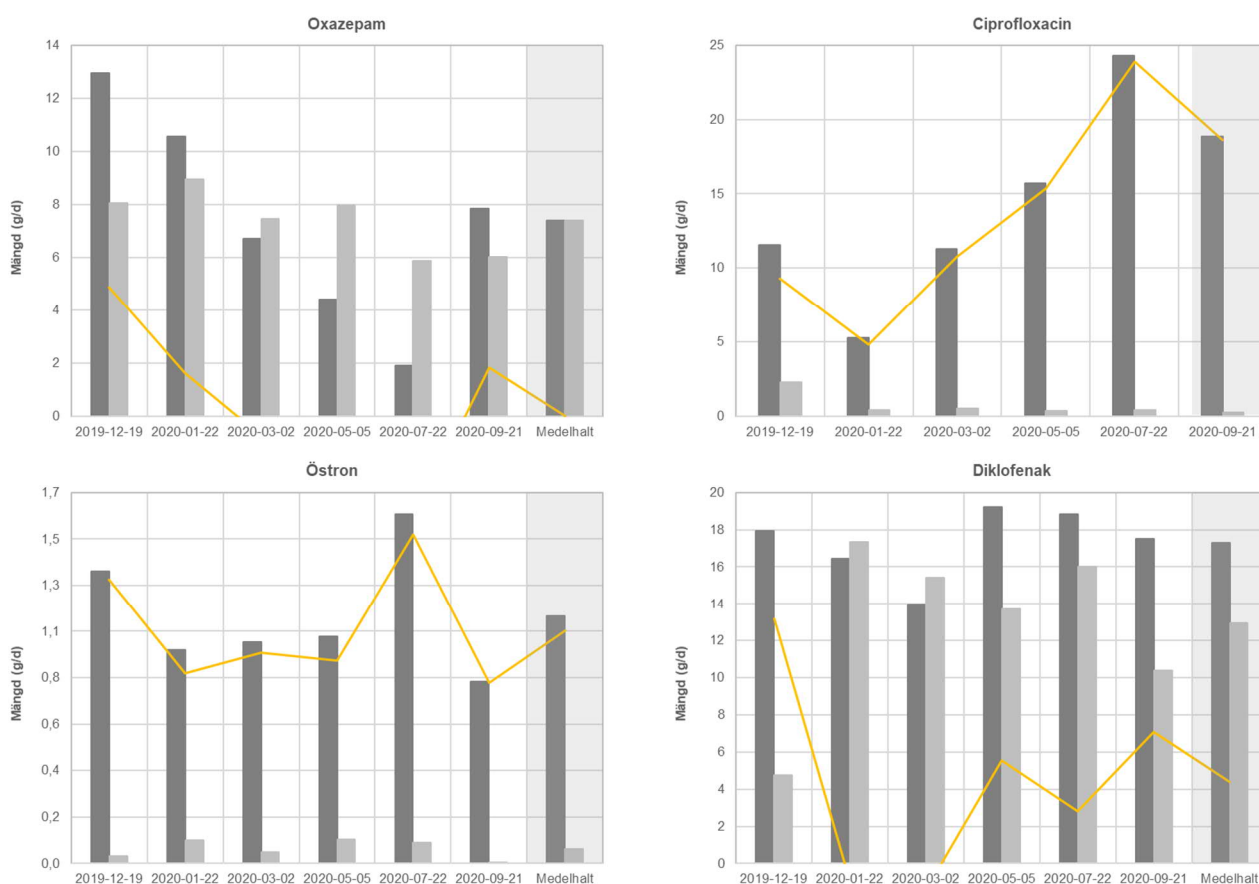
Figur 3. Halter i inkommande vatten (mörkgrå stapel), utgående vatten (ljusgrå stapel), reningsgrad (gul linje) och PNEC-värde (rak, svart linje) för läkemedel som överskrider PNEC-värden eller klassas som särskilt förorenande ämnen. Resultat från alla provtagningar samt flödesviktade medelvärden (höger i varje diagram, markerat med ett grått block).

Utgående mängden oxazepam var relativt stabil, 6 – 9 g/d (Figur 4). Halten oxazepam i utgående vatten fluktuerar mellan provtagningar på grund av flödesfluktuationer. I mars – juli, när inkommande halter var lite lägre, var halten i utgående vatten högre än i inkommande vatten. Medelhalten var 298 ng/l, vilket är mycket högre än PNEC-värdet som är 4,6 ng/l.

Halten och mängden ciprofloxacin i utgående vatten var lite högre i december, men sedan ganska stabilt och <25 ng/l. Ciprofloxacin är dock svår att analysera (58). Trots att halten var låg överskreds PNEC-värdet som är 5 ng/l.

Halten och mängden östron i utgående vatten var relativt stabil, med en utstickare i juli. Det är oklart om inkommande vatten innehöll mer östron eller om det var ett analysfel.

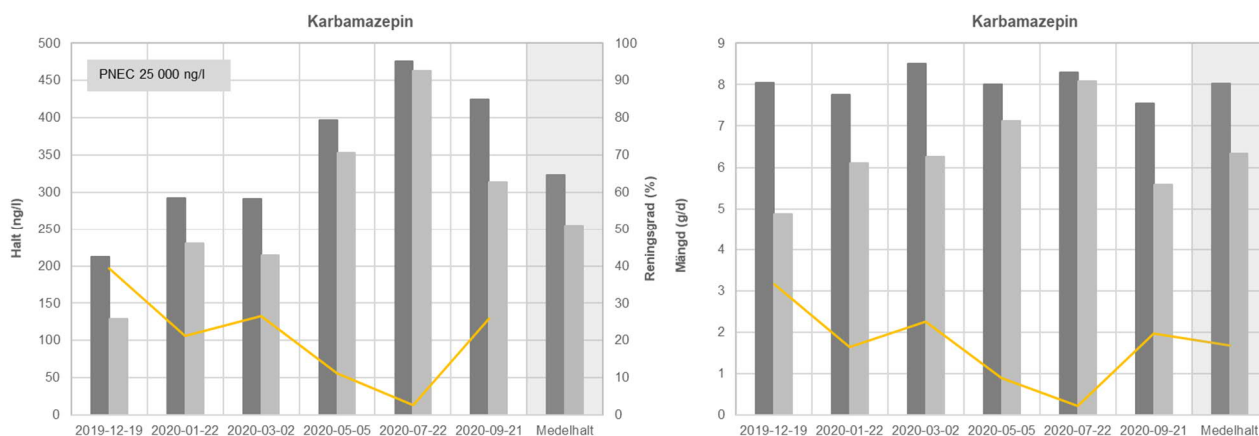
Fluktuationer i utgående halter för diklofenak kan delvis förklaras med flödesfluktuationer. Även utgående mängder fluktuerade och var lägre i december och september.



Figur 4. Mängder i inkommande vatten (mörkgrå stapel), utgående vatten (ljusgrå stapel) och renad mängd (gul linje) för läkemedel som överskrider PNEC-värden eller klassas som särskilt förorenande ämnen. Resultat från alla provtagningar samt flödesviktade medelvärdet (höger i varje diagram, markerat med ett grått block).

Antiepileptikum karbamazepin kan ses som en indikator för hur pålitliga analysresultaten är. Konsumtionen är relativt konstant under året och läkemedlet bryts varken ner i reningsverket eller binder till slam. Från inkommande halterna framgår att det sker en tydlig utspädningseffekt med lägre inkommande halter vid höga

flöden. Den totala inkommande mängden är dock mycket stabil (Figur 5). Även mängderna av karbamazepin i utgående vatten var relativt stabila, vilket antyder att provtagning och analys är pålitliga.



Figur 5. Halter (vänster) och mängder (höger) karbamazepin i inkommande vatten (mörkgrå stapel), utgående vatten (ljusgrå stapel) och reningsgrad/renad mängd (gul linje). Resultat från alla provtagningar samt flödesviktade medelvärden (höger i varje diagram, markerat med ett grått block).

6.4 Reningsgrad

Spridningen i reduktionen av läkemedel är stor. Vissa halter renas nästan helt medan andra förekommer i högre halter i utgående vatten än i inkommande vatten. Medianvärdet för reduktionen är 52 % (Tabell 10).

Reduktionen av de läkemedel som överskrider PNEC-värdet eller betraktas som särskilt förorenande ämnen skiljer sig åt mycket.

Ingen reduktion av oxazepam skedde i avloppsreningsprocessen. Reduktionen av diklofenak var endast 25%.

Reduktion av ciprofloxacin gick upp från december – september och var 95% som medelvärde, trots det överskrider utgående halterna PNEC-värdet. Reduktionen beror på absorption till slammet, då nästintill ingen nedbrytning sker. Det gäller även för citalopram, sertralin och ketoconazol (58).

Reduktion av östron var hög varje provtagning, med 94% som medelvärde, vilket sannolikt beror på absorption till slammet samt nedbrytning (58).

Många av de analyserade ämnena binds till slam. Dock bryts ibuprofen och paracetamol bryts ned av biologin i slammet. Naproxen och atenolol bryts ned i slam med en högre slamålder. Även om metoprolol och propranolol är ganska lik atenolol, så sker en lägre nedbrytningen av dessa läkemedel. Det kan sannolikt relateras till skillnaden i den funktionella grupperna på molekylerna.

Tabell 10. Reduktionsfaktor (reduktion av halter i Sjöstadsverket, medelvärde av alla 6 provtagningar) av läkemedel analyserade i denna förstudie och medianvärde. n.d. halterna för låga för att bestämma reningsgrad.

Ämne	Reduktionsfaktor (n = 6) (%)
Atenolol	44
Azitromycin	61
Karbamazepin	21
Klaritromycin	66
Diklofenak	25
Erytromycin	13
Flukonazol	14
Furosemid	87
Losartan	32
Metotrexat	90
Metoprolol	-13
Naproxen	84
Oxazepam	0
Sertralin	67
Trimetoprim	69
Ciprofloxacin	95
Citalopram	12
Ketoconazol	98
Paracetamol	100
Propranolol	21
Sulfametoxazol	85
Tramadol	-10
Venlafaxin	0
Zolpidem	29
Östron	94
17 β -estradiol	n.d.
17 α -etinylestradiol	n.d.
Ibuprofen	98
Median	52

6.5 Recipient

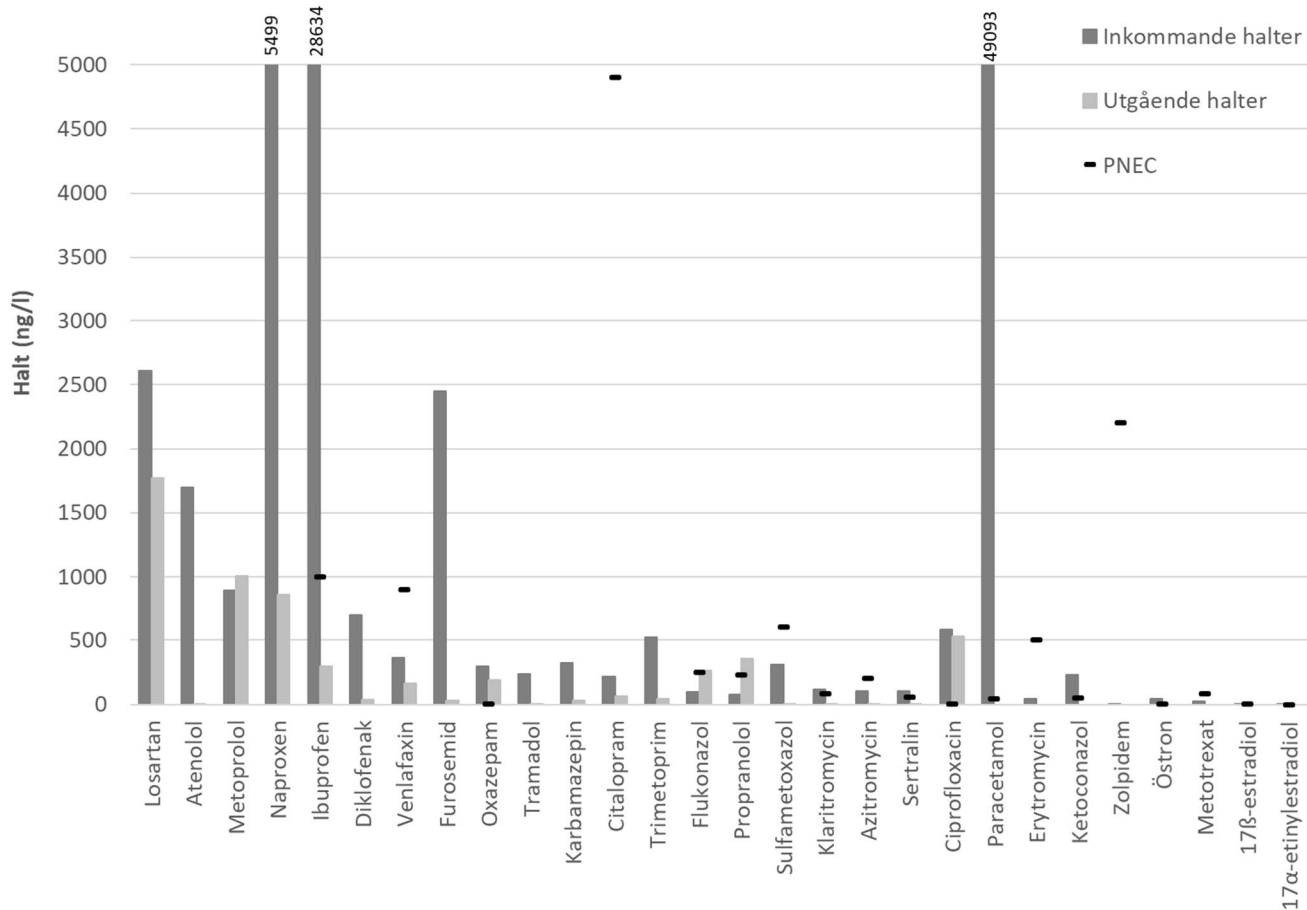
Vänerns Vattenvårdsförbund tillsammans med SLU har analyserat halter av särskilt förorenande ämnen i fyra prover av inkommande och utgående vatten samt två prover upp- och nedströms Sjöstadsverket. De har sett en marginell förhöjning av halterna nedströms av reningsverket. Detta kan förklaras med att utgående vatten från Sjöstadsverket utgör endast 2 % av det totala flödet i recipienten. Fortsatt utredningsarbete, däribland toxikologiska tester, behövs för att identifiera behovet för utökad rening av läkemedelsrester (59).

6.6 Behov av utökad läkemedelsrening

Fortsatt utredning behövs för att identifiera om det finns ett behov av utökad rening av läkemedelsrester. En stor utspädning av utgående avloppsvatten sker i recipienten. Det har antagits att utökad rening behövs för ämnen som förekommer i halter som överskrider respektive PNEC-värdet som flödesviktat medelvärde, möjligtvis även för läkemedel dess PNEC-värden överskrivs vid enstaka provtagningar, eller läkemedel som anses som särskilt förorenande går denna förstudie in på tekniker för rening av dessa ämnen.

Tabell 11. Läkemedel dess halter överskrider PNEC-värden som flödesviktat medelvärde över alla provtagningar, vid några enstaka provtagningar eller anses som särskilda förorenande ämnen av Havs- och vattenmyndigheten (HAV).

Ämne	Användningsområde	Halter >PNEC		HAV
		Flödesviktat medelvärde	Enstaka prover	
Oxazepam	Ångestdämpande och lugnande	v		
Ciprofloxacin	Antibiotikum	v		v
Klaritromycin	Antibiotikum		v	
Sertralin	Antidepressiv		v	
Paracetamol	Smärtstillande		v	
Östron	Hormon		v	
Ibuprofen	Antiinflammatorisk och smärtstillande		v	
Diklofenak	Smärtstillande			v
17 β -estradiol	Hormon			v
17 α -etinylestradiol	Syntetiskt hormon			v



Figur 6. Läkemedel dess inkommande halter och utgående halter (som flödesviktade medelvärden) och PNEC-värde.

7 Möjliga tekniker för Sjöstadsverket

7.1 Behov och förutsättningar för avancerad rening vid Sjöstadsverket

De utgående halter av oxazepam och ciprofloxacin överskrider respektive PNEC-värden. Halter av klaritromycin, sertralin, paracetamol, östron och ibuprofen överskrider PNEC-värden vid några provtagningstillfällen. Diklofenak, 17 β -estradiol och 17 α -etinyloestradiol klassas som särskilt förorenande ämnen. Läkemedlens egenskaper bestämmer hur dessa reduceras både i aktivslamprocessen och i en process för avancerad rening av läkemedelsrester.

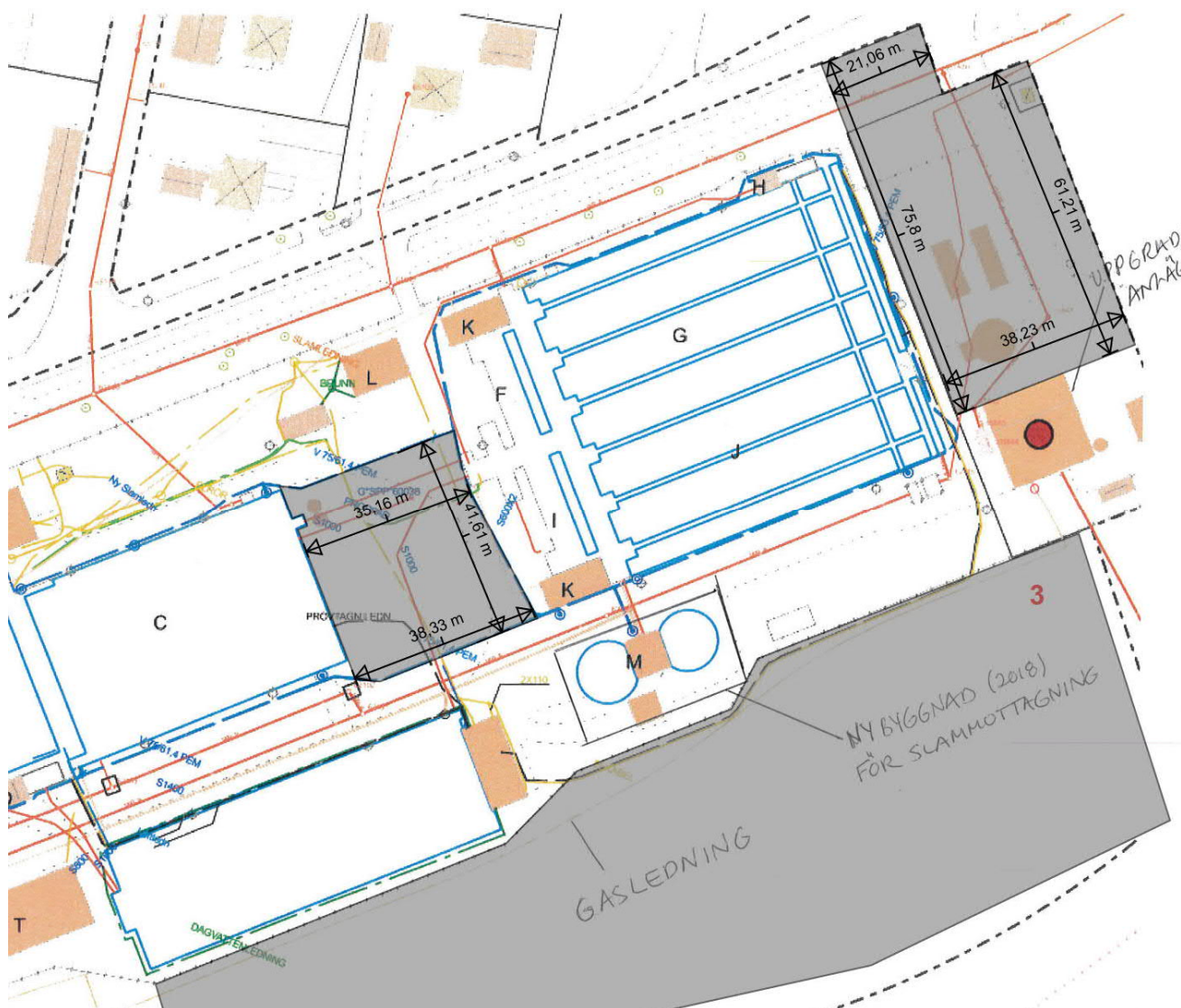
Lokaliseringmöjligheter för en ny anläggningsdel för läkemedelsrening är:

1. Mellan försedimenteringen och flockningsbassängerna. Tillgänglig yta är ca 1 500 m².
2. Öster om mellan- och slutsedimenteringsbassängerna. Tillgänglig yta är ca 2 700 m² när containrarna och ångmagasinet har tagits bort.
3. Eventuellt kan mark söder om biosteget och slammottagningen tas i anspråk.

Baserad på det eventuella behovet av avancerad rening för läkemedelsrester, tillgängliga ytor och att slammet används i jordbruksmark har ozonering och GAK identifierats som de två alternativa tekniker som passar bäst för avancerad läkemedelsrening vid Sjöstadsverket. Dessa har en medel till bra reningseffektivitet för de halterna som överskrider PNEC-värden (flödesviktat medelvärde eller vid enstaka analystillfällen) samt särskilt förorenande ämnen (Tabell 12). Spädning i recipient är stor och endast halterna av oxazepam och ciprofloxacin överskrider PNEC-värden (flödesviktat medelvärde). Kombinationer av olika tekniker som t.ex. ozonering med GAK kan därför anses vara onödigt komplexa, platskrävande och kostsamma.

Tabell 12. Reningseffektivitet med ozonering (paracetamol 3,6 mg O₃/l, övriga 0,5 – 1 mg O₃/g DOC) och GAK för läkemedel dess halter överskrider PNEC-värden som flödesviktat medelvärde över alla provtagningar, vid några enstaka provtagningar eller anses som särskilt förorenande ämnen. Reningseffektivitet för paracetamol (ozon resp. GAK) från (60) och (61); östron från (62); övriga värden från (63).

	Ozonering	GAK
Oxazepam	medel	medel
Ciprofloxacin	medel	bra
Klaritromycin	lite	bra (beräknat)
Sertralin	medel	bra
Paracetamol	bra	bra
Östron	bra	bra
Ibuprofen	medel	bra
Diklofenak	bra	bra
17 β -estradiol	bra	bra
17 α -etinyloestradiol	bra	bra



Figur 7. Urklipp från situationsplan Sjöstadsverket och fordonsgasanläggningen med lokaliseringmöjligheter för en ny anläggningsdel för läkemedelsrening markerade. Mått är ungefärliga. (C) försedimentering, (F) efternitrikering, (G) mellansedimentering, (I) flockningsbassänger, (J) slutsedimentering, (K) pump- och kompressorbyggnad, (M) slammottagning, röd cirkel fordonsgasanläggning.

7.2 Multiple point ozonation

7.2.1 Beskrivning av teknik

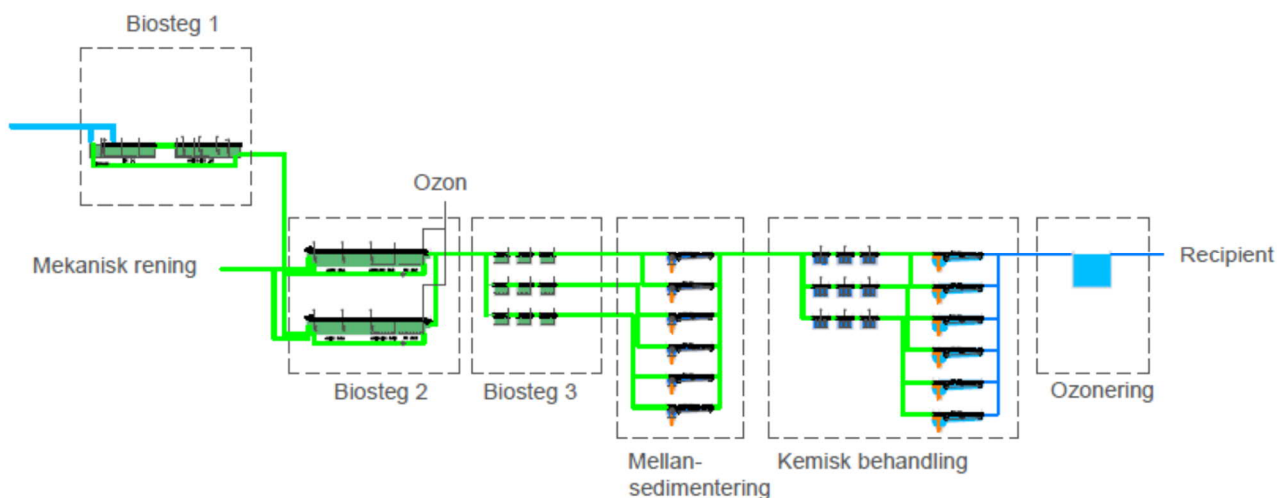
Den första tekniken som har valts är ozonering. Detta är den vanligaste tekniken för läkemedelsrening som används på flertal anläggningar i Schweiz, Tyskland, Frankrike och även i Sverige. Metoden angriper läkemedel och andra mikroföroreningen med ett brett spektrum av kemiska egenskaper som ger en bra rening för många läkemedelsrester och kan rena 70 – 80 % av läkemedel på årsbasis (57), är mer kompakt än GAK-behandling (31) och är den billigaste av de tillgängliga teknikerna (31).

Ozonering kan användas som slutpolering, som mellanliggande reningssteg eller integrerad i den biologiska reningen. I denna förstudie har en kombination av dessa undersökts (Figur 8). Metoden har applicerats av SUEZ på olika reningsverk (t.ex. Brædstrup i Danmark) och kallas för multiple point ozonation. Genom att tillsätta ozon i biosteget sker en oxidering av såväl läkemedelsrester som mikroföroreningar (med ozon) samt organiskt material (med hydroxylradikaler). Vidare kan en direkt biologisk nedbrytning ske av bi- och nedbrytningsprodukter som bildas vid ozonering i den biologiska reningen. Utöver nedbrytning av läkemedelsrester har andra fördelar observerats såsom ett lägre luftbehov för biosteget, ett kompaktare slam pga. reduktion av filamentbildande bakterier samt att eventuell dosering av extern kolkälla kan minskas pga. att nedbrytbart material bildas.

För att generera ozon används en ozongenerator med flytande syrgas. Ozonet fördelas över aktivslambassängen och slutpoleringen. Ozondoser och kontakttider varierar starkt mellan olika studier. Vid SUEZ anläggning används en halt om 11 mg O₃/l fördelad över den biologiska reningen och slutpoleringen med en kontakttid på >20 min i slutpoleringen. Baresel et al. har fått bra resultat vid en halt om 5 mg O₃/l och en kontakttid på 5 min (31). Då förutsättningarna skiljer sig mellan varje anläggning rekommenderas pilotförsök. Studier har visat på att nedbrytning av t.ex. ciprofloxacin är bättre vid högre ozonhalter (medel vid 7 mg O₃/l, mycket bra vid 10 mg O₃/l) (62).

Styrning av ozondosering sker vanligtvis med absorption vid 254 nm, men kan också styras på ozonhalt i utgående gas, halten löst organiskt material, löst syrehalt och redox potential (11).

För ett dimensionerande flöde på 2000 m³/h krävs en kontakttank på 730 m³ (yta 130 m², höjd 5,6 m). Ytan för byggnaden för ozongeneratoren är 70 m².



Figur 8. Placering av multiple point ozonation i den befintliga reningsprocessen på Sjöstadverket.

7.2.2 Kostnader

Ozonering är ett av de billigaste tekniker för avancerad rening för läkemedelsrester. Den totala kostnaden, investering samt drift, är ca 0,2 SEK/m³ för en anläggning dimensionerad för 100 000 pe (31).

7.2.2.1 Investeringskostnader

SUEZ har uppskattat att kostnaderna för syrgastank, ozongenerator inkl. kylning, byggnad för ozongenerator, inblandning av ozon i avloppsvatten, kontakttank, mekanisk och elektrisk utrustning, design och intrimning är ca 20 MSEK. Det är stora prisskillnader mellan olika leverantörer. Baresel et al. har beräknat att investeringskostnader för en anläggning för slutpolering med en kapacitet på 100 000 pe ligger på 10,5 – 20 MSEK (63), så priset ovan ligger i överkanten. Multiple point ozonation är generellt 10 – 15 % dyrare än ozonering som slutpolering då utrustningen är densamma, med undantaget att det behövs en extra injektor.

Pilotförsök rekommenderas för att dimensionera en anläggning. Kontakttider varierar mellan 5 och 25 min, vilket påverkar storlek på kontakttank och därigenom investeringskostnaderna.

Då elförbrukningen vid ozonering är signifikant högre än dagens situation kan en uppgradering av elförsörjningen behövas.

För kostnadsberäkningen har det antagits att befintliga pumpar kan användas för pumpning till slutpoleringen. Utgående vatten tryckhöjs med nya pumpar för transport till utsläppspunkten.

7.2.2.2 Drift- och underhållskostnader

Driftskostnader (el och syrgas) beräknas ligga på 0,4 SEK/m³ vatten. Den största driftkostnader är energiförbrukningen. Även flytande syrgas utgör en stor kostnad. Den årliga driftskostnaden för en anläggning på 100 000 pe beräknas ligga på 1,5 MSEK/år.

Energiförbrukning kan optimeras genom optimering av styrningen. Ozondoser varierar mellan 0,3 – 1,2 mg O₃/mg löst organiskt material (3 – 12 mg O₃/l vid 10 mg löst organiskt material/l). För en optimerad ozondosering och låga kostnader bör ozondosering styras på belastning. Olika styrningar är under utveckling (63).

7.2.3 Miljöpåverkan

7.2.3.1 Energibehov

Energibehovet vid ozonering är 0,1-0,2 kWh/m³ vatten varav 10 kWh/kg O₃. Även om energibehovet är högt ligger det på samma nivå som för rening med t.ex. aktivt kol om tillverkning och regenerering av kolet räknas med (63).

7.2.3.2 Koldioxidfootprint

Energiförbrukning för ozongeneration orsaker störst koldioxidfootprint, ca 8 g CO₂-ekvivalenter/m³ vatten för en anläggning på 100 000 pe (63).

7.2.3.3 Råvaror/resurser

Syrgas för ozongenerering kan köpas in eller genereras på plats. Tillverkning av syre tillsammans med den höga energianvändningen dominerar miljöpåverkan (63). Inga kemikalier behövs utom för rengöring av inblandare.

7.2.3.4 Utsläpp av farliga restprodukter

Vid ozonering kan bi- och nedbrytningsprodukter bildas. Pilotförsök och toxikologiska tester behövs för att utvärdera om toxiska produkter bildas och om efterbehandling (t.ex. ett sandfilter eller kolfilter) behövs.

En ökning av BOD-halter i utgående vatten har setts i pilotförsök (31).

Om vatten innehåller förhöjda halter av bromid finns det risk för att ozonering kan leda till bildande av carcinogena bromater. Om halten av bromid i vattnet överstiger 150 µg/l bör bildandet av bromat att undersökas (24). Generellt sett ökar bildandet av bromat med högre doser av ozon, tillsats av exempelvis väteperoxid eller ammonium kan minska bildandet av bromat (25).

Ozonering kan ha som positiv bieffekt att antalet fekala koliforma bakterier och det totala antalet bakterier minskas (31).

7.2.4 Arbetsmiljö

Arbetsmiljö är en mycket viktig fråga för ozoneringsanläggningar. Ozon måste generas på plats pga. det är instabilt och explosivt. Syrgas för ozongenerering köps vanligtvis in. Både hantering av syrgas och ozon kräver särskilda säkerhetsrutiner. Installationen bör förses med läckvarnare, gaslarm och ozondestruktör och driftpersonal bär använda gaslarm för att hantera säkerhetsriskerna (63).

Risken av bi- och nedbrytningsprodukter behöver undersökas (63).

7.3 Granulerat aktivt kol

7.3.1 Beskrivning av teknik

Den andra teknik som valts är filtrering med hjälp av granulerat aktivt kol. Anledningen att tekniken valts är att behandling med aktivt kol har en bra reningseffekt på många läkemedel och andra mikroföroreningar.

De filter som har undersökts är av typen DynaSand från Nordic Water då de är platseffektiva och ej kräver ytterligare platsbehov för exempelvis spolvattenbassänger. En annan fördel är att de klarar av en kontinuerlig drift utan avbrott för backspolning.

Inkommande vatten påförs filtret genom ett centrumrör som fördelar ut vattnet en bit ner i filterbädden. Vattnet filtreras uppåt genom bädden medan det aktiva kolet rör sig nedåt. Det filtrerade vattnet lämnar filtret via en filtratkant och går ner genom utloppet i filtrets övre del.

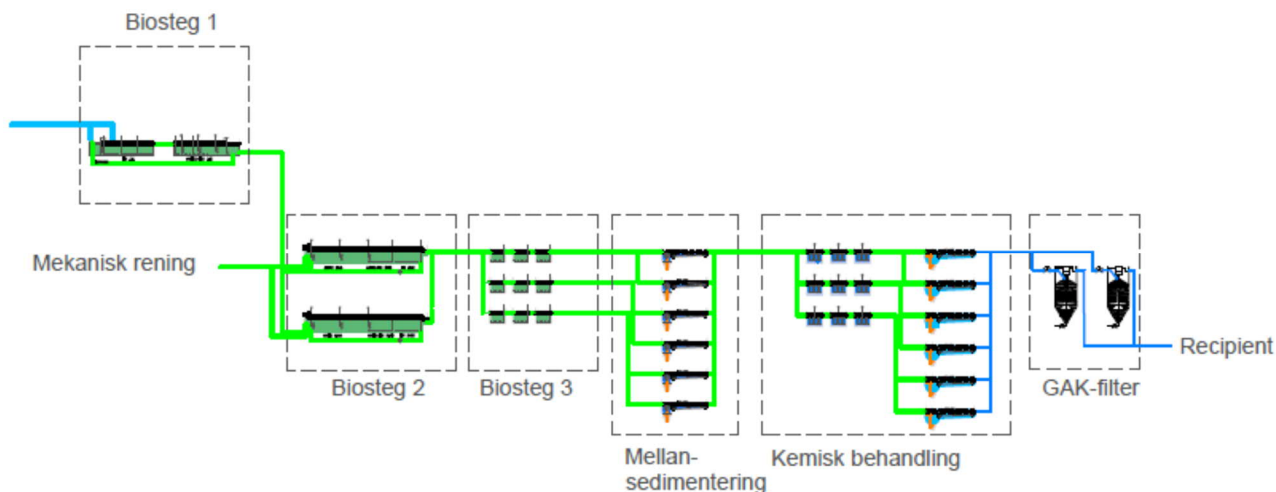
Samtidigt med denna filtreringsprocess renas det försmutsade filtermaterialet. En mammutpump lyfter filtermaterialet från botten upp till överdelen av en tvättbehållare. I tvättbehållaren renas genom att falla i en motström av filtrerat vatten. Det renade filtermaterialet faller ner till toppen av filterbädden och de avskilda föroreningarna lämnar filtret tillsammans med tvättvattnet.

För ett dimensionerande flöde på 2000 m³/d krävs två parallella Dynasandfilter. Filtren behöver placeras inomhus för att klara av drift under vinterhalvåret. Ytbehovet för Dynasandfiltren uppgår till ca 34 m² och höjden på filtren är ca 7,5 m.

Kompressorn är nödvändig för driften av mammutpumpen föreslås att kolfiltren förses med en egen kompressor. Denna kompressor bör av hänsyn till buller placeras i ett eget rum i filterhuset.

Byte av aktivt kol kan beroende på hur byggnaden utformas ske på olika sätt. Tömning kan utföras på olika sätt antingen genom att öppna bottenflänsen och slamsuga eller genom att lyfta mammutpumpen och samla upp. Ett av de vanligaste sätten att fylla på kol är att från en storsäck använda en ejektor för att pumpa vatten och

kol in till filtren. Om byggnaden förses med tillräcklig takhöjd och travers kan tömning från storsäck ske direkt ner i filtren.



Figur 9. Placering av GAK-filtrering i den befintliga reningsprocessen på Sjöstadverket.

7.3.2 Kostnader

GAK-filtrering kostar, investering samt drift, ca 0,35 – 0,6 SEK/m³ för en anläggning dimensionerad för 100 000 pe (31).

7.3.2.1 Investeringskostnader

Den uppskattade investeringskostnaden för GAK-filtrering inklusive kolfilter, kompressor, mekaniskt och elektrisk utrustning, byggnad, indirekta entreprenadkostnader är uppskattad till ca 9,6 MSEK.

För kostnadsberäkningen har det antagits att befintliga pumpar kan användas för matning av kolfilter. Utgående vatten tryckhöjs med nya pumpar för transport till utsläppspunkten.

7.3.2.2 Drift- och underhållskostnader

Den största kostnaden relaterade till drift och underhåll är byte av bäddmaterial. Bädden består av 13 ton aktivt kol och kostnad för denna uppskattas till ca 290 000 SEK.

7.3.3 Miljöpåverkan

7.3.3.1 Energibehov

Anläggningen har ett relativt lågt energibehov, <0,01 kWh/m³ (31), den största delen av energibehovet kan tillräknas kompressorerna.

Regenerering av aktivt kol är energikrävande och sker därför på speciella anläggningar.

7.3.3.2 Koldioxidfotprint

Det mesta av aktivt kol på marknaden produceras i centrala eller södra Europa vilket innebär en betydande andel transporter. Aktivt kol kan produceras av förnyelsebar råvara.

I dagsläget finns ingen anläggning för regenerering av aktivt kol i Skandinavien utan den närmaste anläggningen är i Belgien.

Koldioxidfotprinten är ca 42 (vid regenerering i Sverige) – 46 (vid regenerering utomlands) g CO₂-ekvivalenter/m³ vatten.

7.3.3.3 Råvaror/resurser

Bäddvolymen kommer med tid behöva bytas ut, hur ofta beror på de aktuella förutsättningarna vid Sjöstadverket och det är svårt att veta utan pilotförsök. Vid andra anläggningar har kolet behövt bytas ut efter ca 30 000 bäddvolym, vilket med flödet vid Sjöstadverket och två filter skulle betyda en gång per år.

7.3.3.4 Utsläpp av farliga restprodukter

Då principen för behandling med aktivt kol bygger på adsorption finns ingen risk för utsläpp av farliga restprodukter.

7.3.4 Arbetsmiljö

Filtret har inga rörliga delar och utgör således ingen risk för arbetsmiljön i form av klämskador.

På grund av ljudnivå bör hörselskydd användas vid arbete i kompressorum.

Aktivt kol kan leda till dammbildning vilket gör att god ventilation måste säkerställas. Vid byte av kol bör andningsskydd samt skyddsglasögon användas. I kombination med luft finns en risk att damm bildar en explosiv blandning. Åtgärder för att minska bildning av damm och bör undersökas och utvärderas.

8 Slutsatser/rekommendationer

Sjöstadsverket har en bra fungerande rening med avsikt på organiskt material, kväve och fosfor. Analys avseende mikroföroreningar har visat att utgående vatten innehöll oxazepam och ciprofloxacin i halter som överskred respektive PNEC-värden.

Recipientprovtagning utförd av Vänerens Vattenvårdsförbund har inte gett än så länge inte gett tydlighet gällande behovet av utökad rening för läkemedelsrester vid Sjöstadsverket. Spädning i recipient är stor och förhöjning av halterna nedströms reningsverket är marginella. Utökad recipientprovtagning inklusive ekotoxikologiska tester behövs för att identifiera behovet av avancerad rening för läkemedelsrester.

Då det varken finns krav på läkemedelsrening eller tydlighet gällande det faktiska behovet läkemedelsrester vid Sjöstadsverket har det antagits att avancerad rening behövs för oxazepam och ciprofloxacin. Hur effektiv reningen måste vara, beror på vilka gränsvärden som kommer att gälla för ytvatten och/eller utgående vatten. Att rena avloppsvatten så att utgående vatten inte överskrider PNEC-värden innebär >98 % reduktion för oxazepam och >82 % reduktion för ciprofloxacin, vilket skulle innebära höga kostnader. Bortsett från behov så finns det argument för att minimera utsläpp av (antropogena) föroreningar till vattendragen. Det är fördelaktigt om vald teknik även renar särskilt förorenande ämnen (ciprofloxacin, diklofenak, 17 β -estradiol och 17 α -etinylestradiol) samt ämnen som förekom i halter över PNEC-värdet vid enstaka analystillfällen (klaritromycin, sertralin, paracetamol, östron, ibuprofen).

Baserad på det eventuella behovet av avancerad rening för läkemedelsrester och platsspecifika förutsättningar har ozonering och GAK identifierats som de två alternativa tekniker som passar bäst för avancerad läkemedelsrening vid Sjöstadsverket. Dessa metoder har en medel till bra reningseffektivitet för oxazepam, ciprofloxacin och de övriga ämnen som listas ovan. Kombinationer av olika tekniker som t.ex. ozonering med GAK anses vara onödigt komplexa, platskrävande och kostsamma.

Ozonering är i dagsläget den vanligaste tekniken för läkemedelsrening. Tekniken är kompakt, billig och ger en bra rening för många läkemedelsrester och andra mikroföroreningar. Den konfigurationen som har undersökts in denna förstudie är multiple point ozonation (SUEZ), bestående av integrerad ozonering i biosteget och ozonering som slutpolering. Ozonering i biosteget har som fördel att en direkt biologisk nedbrytning av bi- och nedbrytningsprodukter sker men har även positiv påverkan på luftbehov och slamkomposition. Totalkostnader för installation varierar mellan olika leverantörer och ligger mellan 10,5 och 20 MSEK. Driftkostnader beräknas ligga på 1,5 MSEK/år. Den specifika kostnaden för rening av en kubikmeter avloppsvatten är ca 0,2 SEK. Trots den höga energiförbrukningen, 0,1-0,2 kWh/m³ vatten, är koldioxidfootprinten låg, ca 8 g CO₂-ekvivalenter/m³ vatten för en anläggning på 100 000 pe. Hänsyn måste tas till arbetsmiljö då syrgas och framförallt ozon är kraftfulla oxidationsmedel. Det finns dock många anläggningar med ozon och riskerna är hanterbara om installationer är utrustade med säkerhetssystem och driftpersonal med gaslarm. Pilotförsök behövs för att bestämma bland annat hur lång kontakttid behövs och för att utvärdera om toxiska produkter bildas.

GAK har en bra reningseffekt på många läkemedel och andra mikroföroreningar. GAK har jämfört med ozon en bättre reningseffekt för ciprofloxacin, vilken överskrider PNEC som flödesviktat medelvärde, och klaritromycin, sertralin och ibuprofen, vilka överskrider PNEC-värden vid några enstaka tillfällen. De filtren som har undersökts är av typen DynaSand (Nordic Water). Dessa filter är platseffektiva och klarar en kontinuerlig drift utan avbrott för backspolning. Totalkonstanden för installation är uppskattad till ca 9,6 MSEK. Driftkostnader beror på hur ofta kol måste bytas, något som inte går att förutse utan som behöver undersökas i pilotförsök. Kostnad för aktivt kol uppskattas till 290 000 SEK för båda filter. Den specifika kostnaden för rening av en kubikmeter avloppsvatten är ca. 0,35 – 0,6 SEK. Energibehovet är mycket låg, <0,01 kWh/m³. Koldioxidfootprinten är 42 – 46 g CO₂-ekvivalenter/m³ vatten, beroende på var aktivt kol regenereras. Då reningen sker via adsorption förutses inga farliga restprodukter bildas. Då aktivt kol kan leda till dammbildning finns det en risk att en explosiv blandning uppstår och åtgärder för att minska dammbildning måste undersökas och utvärderas.

Pilotförsök rekommenderas oavsett vilken processlösning som väljs för att dimensionera anläggningar, jämföra tekniker samt, vid ozonering, bildning av eventuella toxiska bi- och nedbrytningsprodukter.

Total reduktion av läkemedelsrening i den befintliga aktivslamprocessen är inte möjlig. Det har dock observerats att nedbrytning av läkemedel ökar snabbt vid en slamålder mellan 10 - 15 dygn. Rekommendationen därför är att styra på en hög slamålder vilket kan resultera i kan förbättra reningen av ett antal läkemedel.

I denna förstudie har endast läkemedelsrening undersökts. Både ozonering och GAK renar andra mikroföroreningar också och det rekommenderas att undersöka behov av avancerad rening av mikroföroreningar som t.ex. bisfenol A, nonylfenol, PFOS och PFOA i både befintlig anläggning samt i pilotförsök.

Litteraturförteckning

1. Apoteket AB, Stockholms läns landsting, Stockholms universitet. *Läkemedel och miljö*. 2005.
2. Naturvårdsverket. Läkemedel i miljön. [Online] den 20 april 2020. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Miljogifter/Organiska-miljogifter/Lakemedel/>.
3. Läkemedelsverket. *Miljöutredning 2018*. 2018.
4. Nieuwenhuijzen, A van, Bloks, B., Essed, A., Jong, C. de. *Verkenning technologische mogelijkheden voor verwijdering van geneesmiddelen uit afvalwater*. sl : STOWA, 2017. 978.90.5773.761.9.
5. Naturvårdsverket. *Avloppsreningsverkens förmåga att ta hand om läkemedelsrester och andra farliga ämnen*. Stockholm : u.n., 2008. 978-91-620-5794-7.pdf.
6. Läkemedelsverket. Läkemedel och miljö. [Citat: den 10 11 2020.] <https://www.lakemedelsverket.se/miljo-lakemedel#hmainbody1>.
7. Naturvårdsverket. *Avancerad rening av avloppsvatten för avskiljning av läkemedelsrester och andra oönskade ämnen - Behov, teknik och konsekvenser*. 2017.
8. Janusinfo. *Diklofenak*. [Online] den 20 oktober 2020. <https://janusinfo.se/beslutsstod/lakemedelochmiljo/databasmiljosv/diklofenak.5.30a7505616a041a09b065792.html>.
9. Naturvårdsverket. Naturvårdsverket. *Rekommenderade ämnen för analys*. [Online] den 16 mars 2020. <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Bidrag/Lakemedelsrening-2019/Rekommenderade-amnen-for-analys-/>.
10. Sehlén, R. Malmberg, J., Baresel, C. Ek, M., Magnér, J., Allard, A-S., Yang, J. *Pilotanläggning för ozonoxidation av läkemedelsrester i avloppsvatten*. IVL Svenska miljöinstitutet, 2015.
11. Sehlén, R., Nilsson, J., Stapf, M., Schütz, J., Bester, K., Kharel, S., Lukas, M., Bogusz, A., Putna-Nimare, I. *Evaluation and experiences of full-scale ozonation followed by MBBR post-treatment and comparison with previous pilot tests*. 2020..
12. *Cirkulär vattenförsörjning i Simrishamn*. Vattenmagasinet, 2019, Vol. 3.
13. *Läkemedelsrester renas i aktivt kol*. Cirkulation, 2020, Vol. 7.
14. Winnfors Wannberg, E *Tierp är trea på läkemedelsrening*. 2020, Cirkulation, Vol. 5.
15. *Nu utvärderas läkemedelsreningen i Knivsta*. Cirkulation, 2016.
16. Baresel, C-, o.a. *Handbok för rening av mikroföroreningar vid avloppsreningsverk*. Stockholm : IVL Svenska Miljöinstitutet, 2017.
17. Götz, C., Otto, J., Singer, H. o.a. *Überprüfung des reinigungseffekts - Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe*. Aqua & Gas, 2015, Vol. 2.
18. Micropoll. *ARA Ausbau*. [Online] VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. [Citat: den 11 november 2020.] micropoll.ch/ara-ausbau.
19. Winnfors Wannberg, E. Cirkulation. *Läkemedelsrening långt fram i Europa*. [Online] den 6 november 2019. <https://www.cirkulation.se/artiklar-och-notiser/laekemedelsrening-laangt-fram-i-europa/>.

20. *Monitoring demo's - bijdrageregeling IenW 'Zuivering medicijnresten'*. Rijs, G. Utrecht : u.n., 2019.
21. Maas, P. van der, Veenendaal, G., Nonnekens, J., Brink, H., Vogel, D. de. *Biologische actiefkoolfiltratie met zuurstofdoserings: veelbelovende techniek voor verwijdering geneesmiddelen?* 2020, Vol. 12 februari 2020.
22. Waternet. *Waterschap AGV start proef met combinatie ozon en actief kool om micro's te verwijderen*. [Online] den 30 april 2020. <https://www.waterforum.net/waterschap-agv-start-proef-met-combinatie-ozon-en-actief-kool-om-micros-te-verwijderen/>.
23. H2O Techniek. *Stichtse Rijnlanden plaatst ozoninstallatie voor verwijderen medicijnresten*. [Online] den 20 oktober 2020. <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-techniek/stichtse-rijnlanden-installeert-ozoninstallatie-voor-verwijderen-medicijnresten>
24. Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW. *Fachbrief Bromat*. 2018.
25. Schumacher, J. *Ozonung zur weitergehenden Aufbereitung kommunaler Kläranlagenabläufe*. Berlin : Technischen Universität Berlin, 2005.
26. Jekel, M. och Dott, W. *Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf*. Frankfurt am Main : DECHEMA e.V., 2013.
27. Ikehata, K., Jodeiri Naghashkar, N. och Gamal El-Din, M. *Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review..* 2006, *Ozone: Science and Engineering*, ss. 28:6, 353-414.
28. Hübner, U, Gunten, U. von och Jekel, M. *Evaluation of the persistence of transformation products from ozonation of trace organic compounds - A critical Review*. 2015, *Water Research*, ss. 68 150-170.
29. Baresel, C., Harding, M. och Junestedt, C.. *Removal of pharmaceutical residues from municipal wastewater using UV/H2O2*. Stockholm : IVL Svenska Miljöinstitutet AB, 2019.
30. Xu, Min, Wu, Changyong och Zhou, Yuexi. *Advancements in the Fenton Process for Wastewater Treatment*. [bokförf.] Ciro Bustillo-Lecompte. *Advanced Oxidation Processes*. IntechOpen, 2020.
31. Baresel, Christian, o.a. *Tekniska lösningar för avancerad rening av avloppsvatten*. Uppsala : IVL Svenska Miljöinstitutet, 2017.
32. Cimbritz, Michael. *Reduktion av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten (RESVAV)*. VA-teknik Södra, 2018.
33. Khetan, S.K och Collins, T.J. *Human Pharmaceuticals in the Aquatic Environment: A Challenge to Green Chemistry*. 2007, *Chem. Rev*, ss. 107, 2319-2364.
34. AstraZeneca. *Environmental Risk Assessment Data Atenolol*. AstraZeneca, 2017.
35. AMR Industry Alliance Antibiotic. *AMR Industry Alliance Antibiotic Discharge Targets; List of Predicted No-Effect Concentrations (PNECs)*. AMR Industry Alliance Antibiotic, 2018.
36. OECD. *OECD Studies on Water Pharmaceutical Residues in Freshwater Hazards and Policy Responses: Hazards and Policy Responses*. Paris : OECD Publishing, 2019.
37. FASS. *Diclofenac Bluefish*. [fass.se](https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=20040916002587&docType=78&scrollTop=480). [Online] den 07 09 2020. <https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=20040916002587&docType=78&scrollTop=480>.

38. FASS. Furosemid Orifarm. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=20140603000107&docType=78&scrollTop=600>.
39. FASS. Cozaar®. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=19940902000075&docType=78&scrollTop=400>.
40. Moermond, C, o.a. *Cytostatics in Dutch surface water*. Bilthoven : National Institute for Public Health and the Environment, 2018.
41. FASS. Metoprolol Abcur. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=20120331000099&docType=78&scrollTop=454.5454406738281>.
42. FASS. Naproxen Bluefish. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=19871211000206&docType=78&scrollTop=300>.
43. Ahlford, K. *Environmental Risk Assessment of Selective Serotonin Reuptake Inhibitors (SSRIs) Fluoxetine, Citalopram, Sertraline, Paroxetine and the Benzodiazepine Oxazepam*. Uppsala : Ekotoxikologiska avdelningen Uppsala Universitet, 2007.
44. FASS. Bactrim®. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=19721020000044#env-effect>.
45. FASS. Ciprofloxacin Villerton. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=20061121000076#env-effect>.
46. Engman, M. *Utgör användningen av citalopram, metoprolol och simvastatin inom slutenvården vid Kalmar Länssjukhus någon miljörisk?* Kalmar : Högskolan i Kalmar, Naturvetenskapliga Institutionen, 2008.
47. Woldegiorgis, A., Wiklund, P. och Moe, M. *Retrospective environmental risk assessment of human pharmaceuticals in the Nordic countries 1997-2007*. Köpenhamn : Nordic Council of Ministers, 2009.
48. FASS. Alvedon®. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=19581115000027#env-effect>.
49. FASS. Inderal®. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=19651125000031&docType=78&scrollTop=700>.
50. Grung, M., o.a. *Human and Veterinary Pharmaceuticals, Narcotics, and Personal Care Products In The Environment*. Oslo : Statens forurensningstilsyn, 2008.
51. FASS. Stilnoct. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=19940128000057#env-effect>.
52. Pereira, A.M.P.T, o.a. *Supporting information for Selected pharmaceuticals in different aquatic compartments: Part II - toxicity and environmental risk assessment*. Coimbra : Laboratory of Bromatology and Pharmacognosy, Faculty of Pharmacy, University of Coimbra, 2020.
53. FASS. Progynon®. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=19700130000021#env-effect>.
54. FASS. Abelonelle 28. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=20090611000029&docType=78&scrollTop=500>.

55. FASS. Ibuprofen Orifarm. *fass.se*. [Online] den 07 09 2020.
<https://www.fass.se/LIF/product?userType=0&nplld=20060817000079&docType=78&scrollTop=400>.
56. Svahn, O., Björklund, E. o.a. *Increased electrospray ionization intensities and expanded chromatographic possibilities for emerging contaminants using mobile phases of different pH*. doi.org/10.1016/j.jchromb.2016.07.015, 2016, Journal of Chromatography B, Vol. 1033–1034, ss. 128-137.
57. Svenskt Vatten. *ReningsVÄRK – Läkemedelsrester i vår gemensamma vattenmiljö*. 2020.
58. Svahn, O. *Personlig kommunikation, MoLab*. den 16 december 2020.
59. Malnes, D. *Personlig kommunikation*. den 3 december 2020.
60. Ek, M., Baresel, C. *Ozonförsök för rening av läkemedelsrester vid Himmerfjärdsverket*. IVL Svenska Miljöinstitutet, 2013.
61. Ek, M., Bergström, R., Baresel, C.. *Avskiljning av läkemedelsrester med granulerat aktivt kol, försök vid Himmerfjärdsverket*. IVL Svenska Miljöinstitutet, 2013.
62. Ekblad, M., Cimbritz, M, Nilsson, F., Ernst, G., El-tawialy, H. et al. *Ozonering för nedbrytning av organiska mikroföroreningar, Pilottester i södra Sverige*. VA-teknik Södra, 2015.
63. Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L. *Handbok för rening av mikroföroreningar vid avloppsreningsverk*. IVL Svenska Miljöinstitutet, 2017.
64. Patel, M, o.a. *Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods*. 2019, Chemical Reviews, ss. 119 (6) 3510-3673.
65. Kosjek, T, o.a. Environmental occurrence, fate and transformation of benzodiazepines in water treatment. *Water Research*. 2012, Vol. 46 355-368.
66. *Läkemedelsrester renas i aktivt kol*. 2020, Cirkulation, Vol. 7.

Bilaga A. Inkommande och utgående halter och mängder per prov samt flödesviktade medelvärden

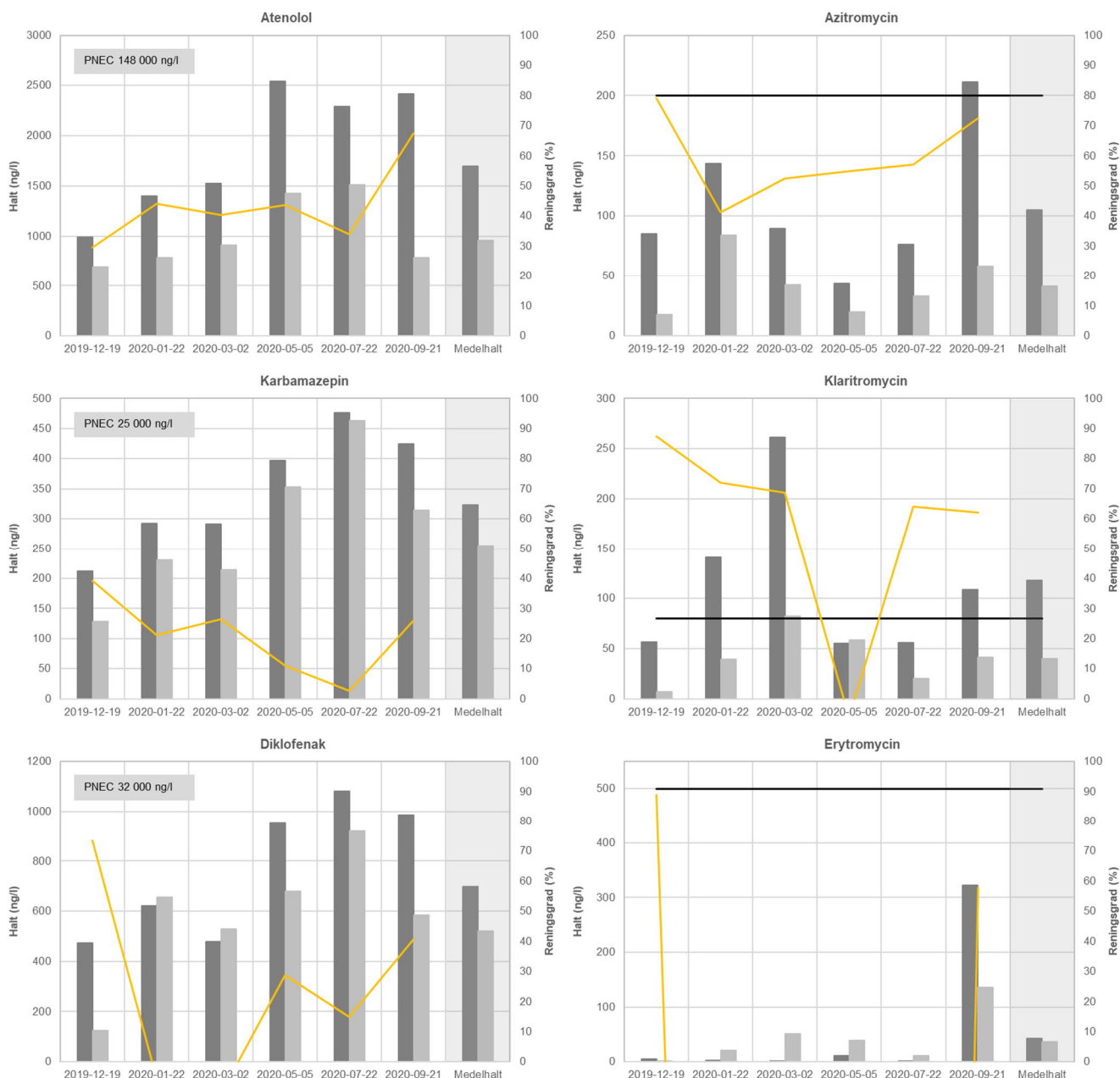
Värden lägre än detekteringsgränsen är gråmarkerade. Räknat med halva medelvärde för mängder.

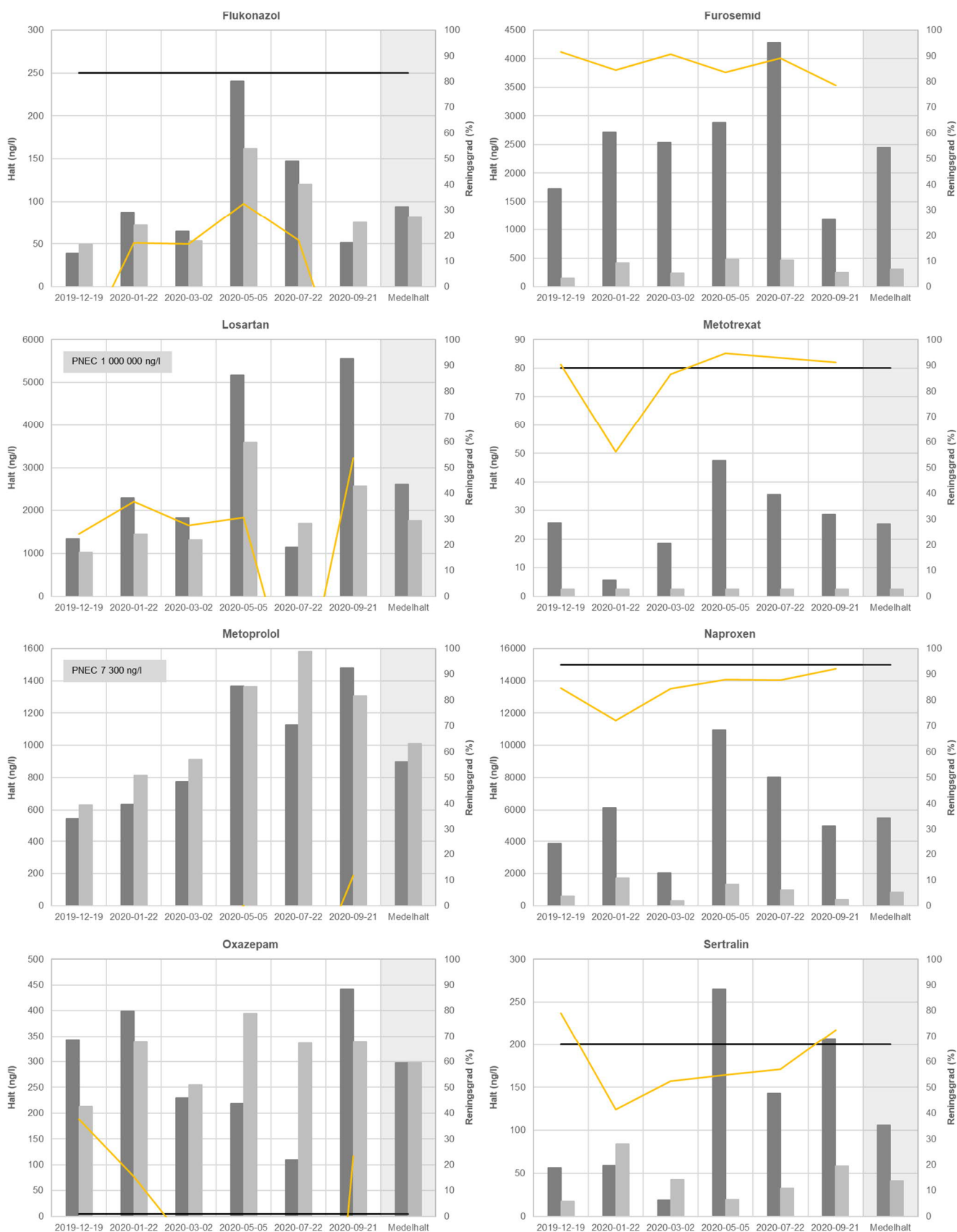
	Inkommande halt (ng/l)						Inkommande mängd (g/d)						Flödesviktad medelhalt inkommande (ng/l)
	2019-12-19	2020-01-22	2020-03-02	2020-05-05	2020-07-22	2020-09-21	2019-12-19	2020-01-22	2020-03-02	2020-05-05	2020-07-22	2020-09-21	
Flöde (m³/d)	37895	26472	29198	20210	17436	17766	37895	26472	29198	20210	17436	17766	
Ämne													
Atenolol	989	1399	1527	2538	2290	2413	37	37	45	51	40	43	1700
Azitromycin	85	144	89	43	77	211	3,2	3,8	2,6	0,88	1,3	3,8	105
Karbamazepin	212	293	291	397	476	424	8,0	7,8	8,5	8,0	8,3	7,5	323
Klaritromycin	57	141	261	55	56	109	2,1	3,7	7,6	1,1	1,0	1,9	118
Diklofenak	474	621	478	952	1080	985	18	16	14	19	19	17	698
Erytromycin	4,5	3,2	2,0	12	1,0	323	0,17	0,08	0,059	0,23	0,017	5,7	42
Flukonazol	39	87	65	240	147	52	1,5	2,3	1,9	4,9	2,6	0,9	94
Furosemid	1728	2716	2536	2883	4277	1176	65	72	74	58	75	21	2451
Losartan	1346	2290	1827	5174	1149	5550	51	61	53	105	20	99	2606
Metotrexat	26	5,7	19	47	36	29	1,0	0,15	0,54	1,0	0,62	0,51	25
Metoprolol	546	633	776	1365	1128	1479	21	17	23	28	20	26	897
Naproxen	3880	6138	2033	10966	8015	5004	147	162	59	222	140	89	5499
Oxazepam	342	399	229	219	110	442	13	11	6,7	4,4	1,9	7,8	298
Sertralin	57	59	19	265	143	207	2,2	1,6	0,5	5,4	2,5	3,7	106
Trimetoprim	498	860	809	241	274	167	19	23	24	4,9	4,8	3,0	523
Ciprofloxacin	305	198	387	779	1394	1062	12	5,2	11	16	24	19	584
Citalopram	132	139	71	401	316	441	5,0	3,7	2,1	8,1	5,5	7,8	216
Ketoconazol	22	40	31	528	389	794	0,83	1,1	0,91	11	6,8	14	231
Paracetamol	53043	69371	23045	65562	48418	35189	2010	1836	673	1325	844	625	49093
Propranolol	32	37	35	133	146	188	1,2	1,0	1,0	2,7	2,5	3,3	79
Sulfametoxazol	97	365	205	418	538	525	3,7	10	6,0	8,4	9,4	9,3	312
Tramadol	186	226	245	266	245	304	7,0	6,0	7,2	5,4	4,3	5,4	236
Venlafaxin	183	222	469	466	429	570	6,9	5,9	14	9,4	7,5	10	359
Zolpidem	2,2	3,9	3,3	4,7	6,6	9,3	0,08	0,10	0,10	0,09	0,12	0,17	4,4
Östron	35	37	34	51	91	46	1,3	1,0	1,0	1,0	1,6	0,8	45
17 β -estradiol	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,1
17 α -etinyloestradiol	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,1
Ibuprofen	20807	34341	65674	12667	13423	9092	788	909	1918	256	234	162	28640

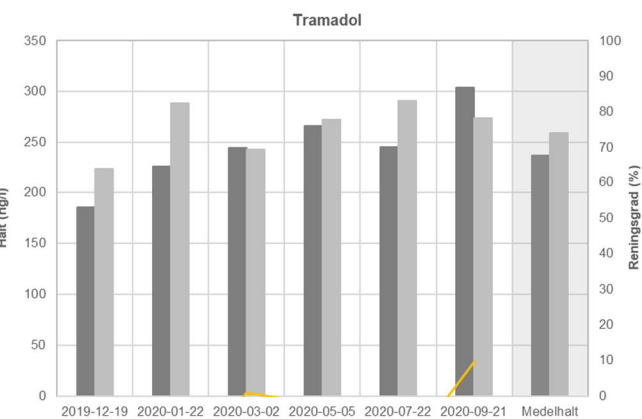
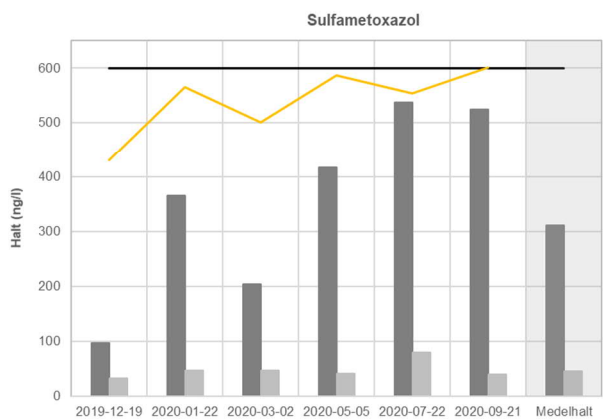
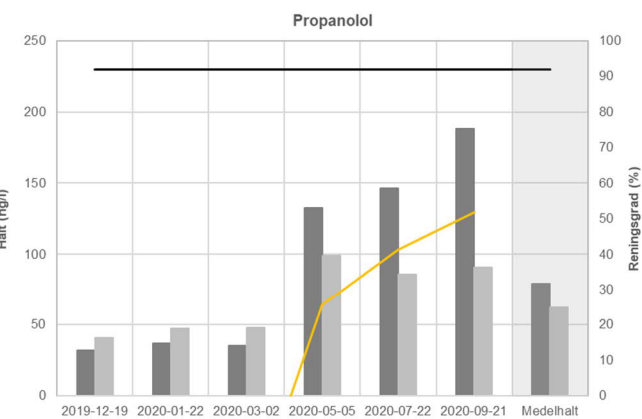
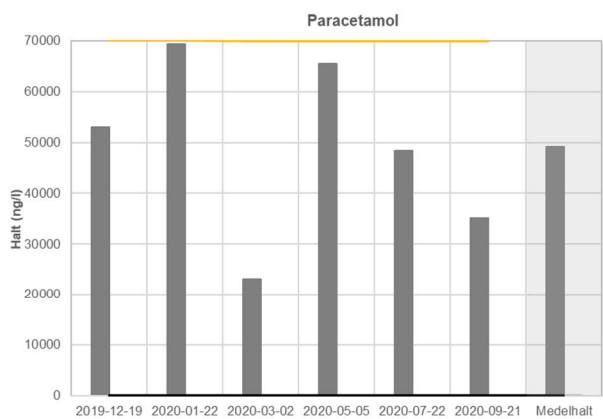
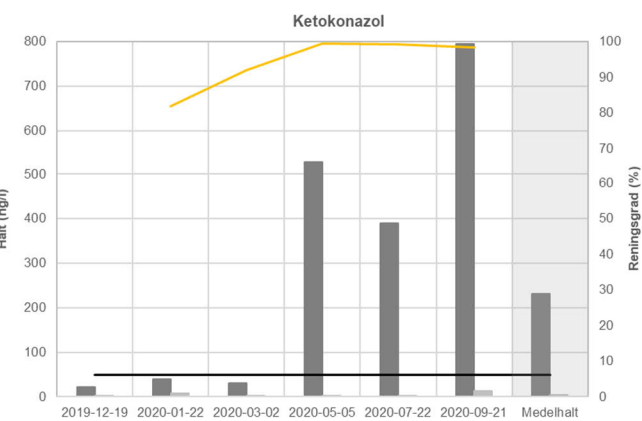
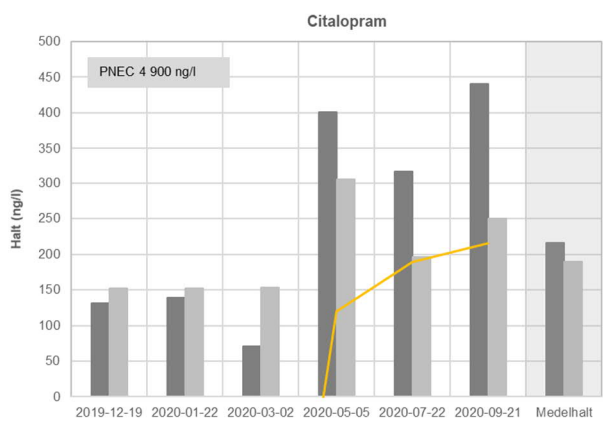
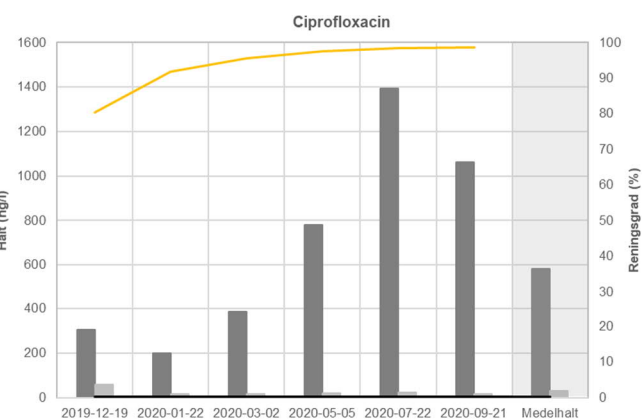
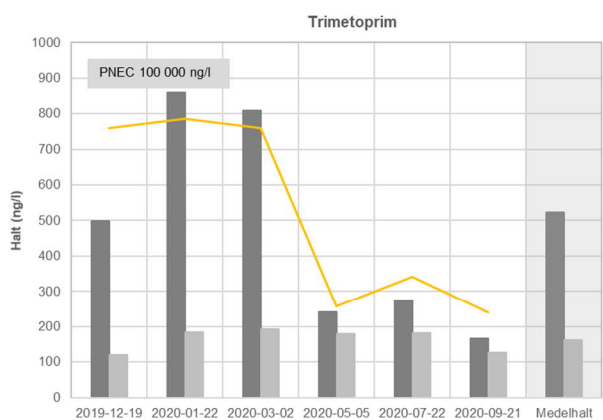
	Utgående halt (ng/l)						Utgående mängd (g/d)						Flödesviktad medelhalt utgående (ng/l)
	2019-12-19	2020-01-22	2020-03-02	2020-05-05	2020-07-22	2020-09-21	2019-12-19	2020-01-22	2020-03-02	2020-05-05	2020-07-22	2020-09-21	
Flöde (m³/d)	37895	26472	29198	20210	17436	17766	37895	26472	29198	20210	17436	17766	
Ämne													
Atenolol	696	782	912	1428	1514	786	26	21	27	29	26	14	960
Azitromycin	18	84	43	20	33	58	0,67	2,2	1,2	0,40	0,57	1,0	41
Karbamazepin	129	231	214	353	463	314	4,9	6,1	6,3	7,1	8,1	5,6	255
Klaritromycin	7,1	39	82	59	20	41	0,27	1,0	2,4	1,2	0,35	0,73	40
Diklofenak	125	655	528	678	920	586	4,7	17	15	14	16	10	521
Erytromycin	0,5	21	51	39	11	136	0,019	0,55	1,5	0,78	0,19	2,4	37
Flukonazol	50	72	54	162	121	76	1,9	1,9	1,6	3,3	2,1	1,3	81
Furosemid	146	422	236	474	468	253	5,5	11	6,9	10	8,2	4,5	308
Losartan	1020	1449	1322	3590	1696	2568	39	38	39	73	30	46	1768
Metotrexat	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0,095	0,066	0,073	0,051	0,044	0,044	3
Metoprolol	632	813	913	1364	1581	1306	24	22	27	28	28	23	1010
Naproxen	599	1719	317	1322	987	399	23	45	9,3	27	17	7,1	862
Oxazepam	213	338	255	394	337	339	8,1	9,0	7,5	8,0	5,9	6,0	298
Sertralin	53	45	8,5	50	24	21	2,0	1,2	0,25	1,0	0,41	0,36	35
Trimetoprim	119	184	194	178	181	127	4,5	4,9	5,7	3,6	3,2	2,3	161
Ciprofloxacin	60	16	17	19	23	15	2,3	0,43	0,50	0,38	0,40	0,27	28
Citalopram	152	152	153	305	197	250	5,8	4,0	4,5	6,2	3,4	4,4	190
Ketoconazol	2,5	7,2	2,5	2,5	3,3	13	0,095	0,19	0,074	0,051	0,058	0,23	5
Paracetamol	16	7,5	24	85	41	29	0,59	0,20	0,69	1,7	0,71	0,51	30
Propranolol	41	48	48	99	86	91	1,5	1,3	1,4	2,0	1,5	1,6	62
Sulfametoxazol	33	47	47	40	79	40	1,2	1,3	1,4	0,82	1,4	0,70	45
Tramadol	223	289	243	273	291	274	8,4	7,6	7,1	5,5	5,1	4,9	259
Venlafaxin	225	328	317	506	528	426	8,5	8,7	9,3	10,2	9,2	7,6	359
Zolpidem	2,3	2,5	3,3	3,2	4,7	3,8	0,087	0,066	0,10	0,065	0,081	0,068	3,1
Östron	0,9	4,0	1,7	5,4	5,4	0,3	0,035	0,11	0,050	0,11	0,094	0,005	3
17β-estradiol	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,1
17α-etinylestradiol	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,1
Ibuprofen	490	1011	926	216	34	50	19	27	27	4,4	0,59	0,89	525

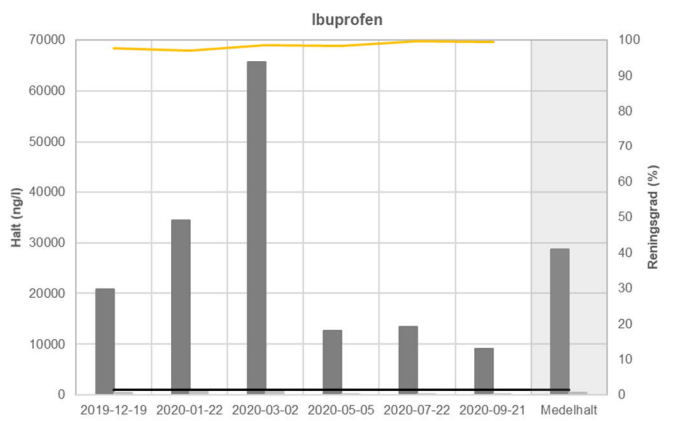
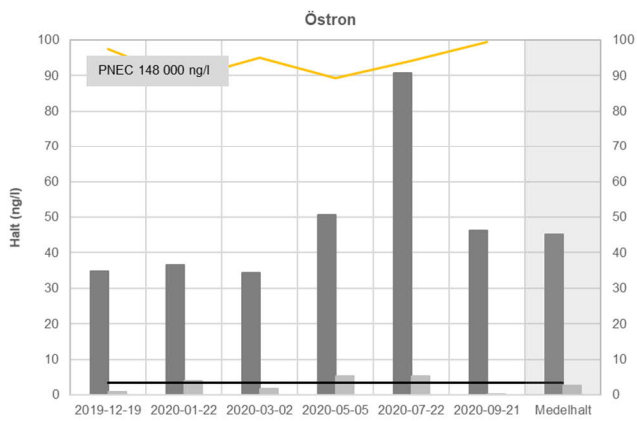
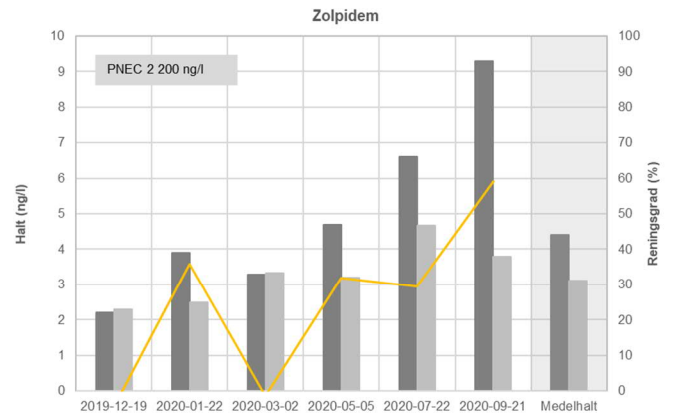
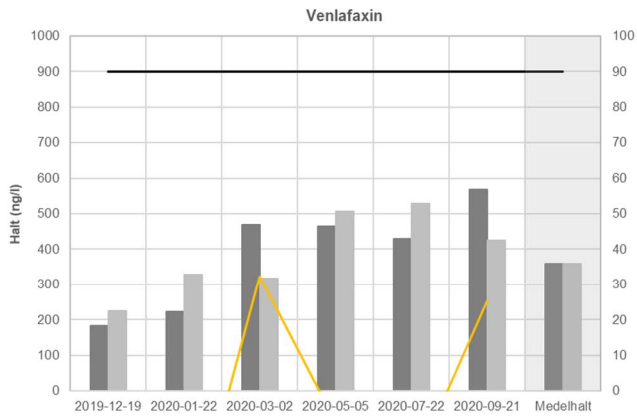
Bilaga B. Diagram inkommande och utgående halter, reningsgrad

Halter i inkommande vatten (mörkgrå stapel), utgående vatten (ljusgrå stapel), reningsgrad (gul linje) och PNEC-värde (rak, svart linje) för alla läkemedel analyserade i denna förstudie och alla provtagningar samt flödesviktade medelvärden (höger i varje diagram, markerat med ett grått block).









Bilaga C. Diagram inkommande, utgående och renade mängder

Mängder i inkommande vatten (mörkgrå stapel), utgående vatten (ljusgrå stapel) och renade mängder (gul linje) för alla läkemedel analyserade i denna förstudie och alla provtagningar samt flödesviktade medelvärden (höger i varje diagram, markerat med ett grått block).

