

# Reningstekniker för läkemedel och mikroföroreningar i avloppsvatten

Redovisning av åtta projekt som fått medel från Havs- och vattenmiljöanslaget 2014-2017



Havs- och vattenmyndigheten  
Datum: 2018-06-12

Rapporten har tagits fram på uppdrag av Havs- och vattenmyndigheten. Rapportförfattarna ansvarar för innehållet och slutsatserna i rapporten. Rapportens innehåll innebär inte något ställningstagande från Havs- och vattenmyndighetens sida.

Ansvarig utgivare: Havs- och vattenmyndigheten  
Omslagsfoto: Mats Wilhelm / Naturfotograferna / IBL Bildbyrå  
Layout: Karin Enberg, Vid Form  
ISBN 978-91-87967-96-2

Havs- och vattenmyndigheten  
Box 11930, 404 39 Göteborg  
[www.havochvatten.se](http://www.havochvatten.se)

# Reningstekniker för läkemedel och mikroföroreningar i avloppsvatten

Redovisning av åtta projekt som fått medel från Havs- och vattenmiljöanslaget 2014-  
2017

---

Michael Cimbritz, Ann Mattsson

Havs- och vattenmyndighetens rapport 2018:7



## *Förord*

Havs- och vattenmyndighetens har under fyra år, från 2014 till 2017, haft i uppdrag från regeringen att genom sakanslag 1:11 Åtgärder för Havs- och vattenmiljö främja avancerad rening av avloppsvatten. Det handlar om att stödja projekt för att utveckla reningstekniker för de kommunala reningsverken i syfte att reducera utsläpp av läkemedelsrester och andra svårbehandlade föroreningar. Under de fyra åren har 32 miljoner kronor delats ut till totalt åtta projekt. I den här rapporten redovisar Havs- och vattenmyndigheten kortfattat de viktigaste resultaten från projekten. För mer utförlig information hänvisas till rapporter och artiklar från de olika projekten.

Redovisningen har sammanställts av Michael Cimbritz, Lunds Universitet och Ann Mattsson, Gryaab. Margareta Lundin Unger på Havs- och vattenmyndigheten har varit projektsamordnare för arbetet med utlysning och koordinering av projekten.

Resultaten visar att det finns teknik som idag kan tillämpas på kommunala reningsverk i syfte att avlägsna olika typer av mikroföroreningar, däribland läkemedelsrester. Uppdraget har i flera fall banat väg för nya forsknings- och utvecklingsprojekt och skapat en mycket stark plattform att bygga vidare på för eventuellt införande av avancerad rening vid svenska avloppsreningsverk.

Ett stort tack riktas till de personer på olika myndigheter, universitet, forskningsinstitut och företag som bidragit på olika sätt. Vi vill rikta ett särskilt tack till Daniel Hellström och Anders Finnson, Svenskt Vatten, Stefan Gabring, Kemikalieinspektionen, Kia Salin, Läke­medelsverket, Linda Gårdstam och Anna-Maria Sundin, Naturvårdsverket för deras bidrag till arbetet, samt till projektledarna från de olika projekten som bidragit med figurer, bilder och inspel till rapporten; Emelie Ljung, RISE, Robert Sehlén, Tekniska Verken i Linköping, Ola Svahn och Erland Björklund, Högskolan Kristianstad, Christian Baresel, IVL Svenska Miljöinstitutet, Jerker Fick, Umeå universitet och Berndt Björnlenius, Kungliga Tekniska Högskolan.

Göteborg 2018-06-12

**Björn Sjöberg**  
*Avdelningschef, Havs- och vattenmyndigheten*

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD .....	5
SAMMANFATTNING .....	8
INLEDNING .....	9
Utveckling av ny reningsteknik.....	9
Vad är problemet och vad händer i reningsverken? .....	10
Drivkrafter för avancerad rening.....	11
SEX FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGSPROJEKT .....	12
Projekt 1. Läkemedel i källsorterat klosettwater och latrin – behandling och risker – Läk.....	12
Projekt 2. Pilotanläggning för ozonering av läkemedelsrester i avloppsvatten .....	12
Projekt 3. Fullskalig rening av mikroföroreningar – FRAM.....	13
Projekt 4. Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – SystemLäk.....	14
Projekt 5. Utvärdering av avancerad rening i fullskala.....	14
Projekt 6. Rening av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten – RESVAV.....	15
VÅR OMVÄRLD .....	17
Schweiz – först i världen med lagstiftning.....	17
<i>Vilka avloppsreningsverk ska uppgraderas?</i> .....	17
<i>Vilka ämnen ska tas bort?</i> .....	17
Andra länder.....	18
ANALYS AV MIKROFÖRORENINGAR.....	19
Från milligram till nanogram .....	19
Svåra och enkla ämnen .....	20
Från halt till bedömning.....	21
KÄLLSORTERANDE AVLOPPSSYSTEM.....	22
ÖVERSIKT TEKNISKA LÖSNINGAR.....	23
Olika alternativ.....	23
Biologisk rening.....	24
<i>Aktivslam- och biofilmssystem</i> .....	24
<i>Från biologisk rening till avancerad rening</i> .....	25
Ozonering.....	25
<i>Nedbrytning eller omvandling?</i> .....	25

<i>Processutformning</i> .....	26
<i>Energianvändning</i> .....	27
<i>Nyckeltal</i> .....	27
Pulveriserat aktivt kol.....	27
<i>Processutformning</i> .....	28
<i>Energianvändning</i> .....	29
<i>Nyckeltal</i> .....	29
Granulerat aktivt kol .....	29
<i>Processutformning</i> .....	29
<i>Energianvändning</i> .....	30
<i>Nyckeltal</i> .....	30
RESULTAT FRÅN PROJEKTEN.....	31
Specifika belastningar.....	32
Ozonering.....	33
<i>Projekt 2. Pilotanläggning för ozonering av läkemedelsrester i avloppsvatten</i> .....	33
<i>Projekt 5. Utvärdering av avancerad rening i fullskala</i> .....	34
<i>Projekt 6. Rening av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten (RESVAV)</i> .....	36
Aktivt kol.....	38
<i>Projekt 3. Fullskalig rening av mikroföroreningar - FRAM</i> .....	38
<i>Projekt 4. Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – SystemLäk</i> .....	42
Teknikval.....	44
<i>Projekt 4. Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – SystemLäk</i> .....	44
KOSTNADER OCH RESURSÅTGÅNG .....	46
Resursanvändning och miljöpåverkan.....	46
Kostnader.....	46
SLUTORD .....	51
REFERENSER .....	52

# Sammanfattning

På uppdrag av regeringen har Havs- och vattenmyndigheten under åren 2014-2017 finansierat olika projekt för utveckling av reningsteknik i syfte att minska utsläpp av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar från kommunala avloppsreningsverk. Sex olika forsknings- och utvecklingsprojekt har genomförts under ledning av forskare kopplade till RISE, Tekniska verken i Linköping, Högskolan Kristianstad, IVL Svenska Miljöinstitutet, Umeå universitet, Lunds universitet och Kungliga tekniska högskolan. I de olika projekten har även kommunala va-organisationer och företag haft centrala roller. Inom ramen för dessa projekt har omfattande försök genomförts, från laboratorieskala till långtidsförsök i fullskala vid avloppsreningsverk i olika delar av landet.

Utöver dessa projekt har ytterligare två projekt genomförts inom ramen för utlysningen. Vid Högskolan Kristianstad utfördes en interkalibreringsstudie i syfte att uppnå ökad analyskvalitet och öka medvetenheten om problem förknippade med spåranalys av läkemedelsrester. Vid Lunds universitet genomfördes en omvärldsbevakning med en studieresa till Tyskland och Schweiz för att överföra kunskap och driftserfarenheter från avloppsreningsverk som kompletterats med avancerad rening.

Resultaten från projekten visar att det finns teknik som idag kan tillämpas på svenska kommunala avloppsreningsverk i syfte att avlägsna olika typer av mikroförroreningar, däribland läkemedelsrester. De tekniska lösningar som utvärderats baseras i huvudsak på ozonering eller filtrering genom aktivt kol samt olika kombinationslösningar. Lösningarna har i de flesta fall testats och utvärderats i nära samarbete med personal på avloppsreningsverk, vilket är en förutsättning för att kunna utvärdera teknikerna på ett trovärdigt sätt. Detta skapar goda förutsättningar för fungerande lösningar i stor skala. I ett av projekten har även källsorterande system studerats.

Arbetet har i flera fall banat väg för nya forsknings- och utvecklingsprojekt där de parter som arbetat inom nuvarande utlysning kan bidra till och leda utvecklingen av framtidens avloppsvattenrening. Det gäller exempelvis ekotoxikologiska effekter av ozonering, utveckling och förståelse av tillämpningar baserade på aktivt kol och utveckling av analysteknik.

Genom regeringsuppdraget och arbetet i de olika projekten har det skapats en mycket stark plattform att bygga vidare på för införande av avancerad rening vid svenska avloppsreningsverk. I denna rapport beskrivs i korthet och i populärvetenskaplig form bakgrunden till arbetet och resultat från de olika projekten. Kostnader för olika reningstekniker har tagits fram och sammanfattas i rapporten som också erbjuder vägar vidare för den intresserade läsaren.



# Inledning

Svenska kommunala avloppsreningsverk har sedan länge långtgående krav på att rena avloppsvatten från organiskt material och fosfor. Sedan 1990-talet har många avloppsreningsverk även långtgående rening med avseende på kväve. Även andra ämnen kan brytas ned av de mikroorganismer vars huvudsyssla är att ta bort organiskt material eller kväve. Vissa ämnen fastnar på partiklar och kan avskiljas med det slam som lämnar avloppsreningsverket, även om avskiljning av ämnet inte specifikt är målet. För ämnen som inte bryts ned eller avskiljs i avloppsreningsverket och som kan orsaka en miljöskada kan åtgärder vid källan vara viktiga. Detta kallas uppströmsarbete och ingår i va-kollektivets långsiktiga samarbete med de miljövårdande myndigheterna. Utfasning av sådana ämnen ger en större generell positiv miljöpåverkan än enbart förbättrad kvalitet för vatten och slam vid avloppsreningsverken. För läkemedel och andra svårnedbrytbara föroreningar har regeringen gjort bedömningen att det behövs olika riskbegränsande åtgärder, såväl i samband med utveckling och tillverkning som genom att komplettera avloppsreningsverken med avancerade reningstekniker.

## Utveckling av ny reningsteknik

På uppdrag av regeringen har Havs- och vattenmyndigheten finansierat olika projekt i syfte att utvärdera praktiskt användbara reningstekniker för att avlägsna potentiellt miljöfarliga ämnen som inte omfattas av de kommunala avloppsreningsverkens nuvarande reningstekniker. 2014 gjordes en första utlysning i syfte att ge stöd för planering, genomförande, utvärdering och dokumentation av undersökningar för reduktion av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar. Förnyad utlysning gjordes 2015 och 2016. I denna rapport beskrivs i korthet och i populärvetenskaplig form bakgrunden till arbetet och resultat från de olika projekten.

Sex olika forsknings- och utvecklingsprojekt har drivits på olika håll i landet:

- Projekt 1. Läkemedel i källsorterat klosettwater och latrin – behandling och risker – *LäK*
- Projekt 2. Pilotanläggning för ozonering av läkemedelsrester i avloppsvatten
- Projekt 3. Fullskalig rening av mikro-föroreningar – *FRAM*
- Projekt 4. Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – *SystemLäk*
- Projekt 5. Utvärdering av avancerad rening i fullskala
- Projekt 6. Rening av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten – *RESVAV*

Utöver dessa sex större projekt har ytterligare två projekt genomförts:

- Projekt 7. Kunskapssammanställning om rening från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar
- Projekt 8. Interkalibrerad läkemedelsanalys – ett samarbetsprojekt för ökad analyskvalitet.

Dessa båda projekt sammanfattas i kapitlen *Vår Omvärld* och *Analys av mikroföroreningar*.

## Vad är problemet och vad händer i reningsverken?

Flera studier visar att organiska mikroföroreningar, däribland olika läkemedel, kan, eller misstänks kunna, ge upphov till oönskade effekter på växt- och djurliv, även vid mycket låga koncentrationer (se exempelvis Fick m.fl., 2010, Larsson m.fl., 1999). Läkemedel återfinns i avloppsvatten av flera anledningar. Störst mängd läkemedel i avloppsvatten kommer ifrån läkemedel som passerar genom kroppen och utsöndras med urinen. Andra läkemedel appliceras i form av salvor och krämer och kan återfinnas i dusch- och tvättvatten. En mindre del kan nå avloppet direkt från tillverkningsprocesser, om de finns i området, eller om läkemedel slängs i avloppet.

Vad gäller andra organiska mikroföroreningar är en del av dem ämnen som tillverkats specifikt för att ha någon form av giftverkan och samtidigt spädas och transporteras med vatten, t.ex. herbicider (bekämpningsmedel för ogräs). De kan också vara ämnen som ingår i produkter som används i och utanför hemmen samt deras nedbrytningsprodukter och som råkar vara miljöfarliga. Men det finns också ämnen som använts historiskt eller som förekommer som föroreningar i andra material (t.ex. PCB) samt oavsiktligt bildade föroreningar (t.ex. dioxiner) som kan hamna i avloppet under speciella förutsättningar. En del av dessa ämnen är förbjudna idag men finns till viss del fortfarande kvar i samhället och miljön. Spridningsvägarna för organiska mikroföroreningar kan se mycket olika ut. Vissa återfinns i avloppsvatten, andra inte (se Baresel m.fl., 2015) för en genomgång och gruppering av olika organiska mikroföroreningar i avloppsvatten). I praktiken betyder detta att både uppströmsarbete och avancerad avloppsvattenrening utgör viktiga pusselbitar för att åstadkomma sänkta halter av olika ämnen i miljön.

Antibiotikaresistens är ett växande hot eftersom behandling av olika infektioner försvåras eller omöjliggörs. Diskuterade risker med antibiotikaresistens kopplat till avloppsreningsverk handlar om flera olika mekanismer:

- att befintliga antibiotikaresistenta mikroorganismer från avloppsvattnet sprids vidare till miljön.
- att stammar av antibiotikaresistenta mikroorganismer utvecklas på avloppsreningsverket.
- att antibiotikaresistens uppstår efter avloppsreningsverket på grund av antibiotikarester i det renade avloppsvattnet.

- Kombinationer av ovanstående.

En av avloppsreningsverkets viktigaste funktioner är att minska risken för spridning av vattenburen smitta. Det sker genom att partiklar avlägsnas och genom biologiska processer där smittspridande bakterier konkurreras ut av bakterier som är specialiserade på att bryta ned organiskt material. På så vis minskas mängden smittspridande bakterier i vattnet kraftigt. Behövs ytterligare reduktion av smittspridande bakterier, med eller utan antibiotikaresistens, finns det beprövade metoder för att desinficera avloppsvatten, som klorering, UV-ljus eller ozonering (Keen & Montforts, 2012).

## Drivkrafter för avancerad rening

Drivkrafter för införande av avancerad rening kan vara flera. Att skydda den akvatiska miljön är en. Indirekt eller direkt återanvändning av avloppsvatten som dricksvatten eller för bevattning är en annan och försiktighetsprincipen en tredje.

För länder inom EU är vattendirektivet (2000/60/EG), med prioämnesdirektivet (2013/39/EU) och bevakningslistan (artikel 8b), ytterligare en drivkraft, även om de gränsvärden som anges i sig är kopplade till just risker för den akvatiska miljön. Några av ämnena, diklofenak, östradiol och etinylöstradiol har också upptagits som särskilt förorenande ämnen (SFÄ) enligt Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljö kvalitetsnormer för ytvatten (HVMFS 2015:4). Sverige blev därmed ett av de första länderna att införa bedömningsgrunder för just dessa ämnen.

Försiktighetsprincipen nämns i olika sammanhang som en viktig drivkraft för skärpta reningskrav på avloppsreningsverk och därmed också för införande av ny reningsteknik. Principen innebär att en påverkan inte måste konstateras utan att möjliga eller sannolika effekter innebär en skyldighet att vidta åtgärder för att negativa effekter på miljö och hälsa ska undvikas. En storskalig utbyggnad av avloppsreningsverk innebär samtidigt miljöpåverkan i form av ökat energi- och kemikaliebehov och utbyggd infrastruktur, vilket bör vägas mot nyttan.

Skydd av dricksvattentäkter är en annan viktig drivkraft. Även om läkemedelsrester i en vattenförekomst inte bedöms utgöra någon risk för människors hälsa kan det vara så att det faktum att vissa ämnen påträffats, om än i mycket låga halter, kan utgöra en drivkraft för åtgärder utifrån ett förtroendeperspektiv hos vattenkonsumenterna (Joss m.fl., 2008). Detta är ett exempel kopplat till indirekt återanvändning av avloppsvatten. När andelen avloppsvatten i sjön eller floden som utgör dricksvattentäkten är hög blir avancerad rening avseende läkemedelsrester alltmer aktuell. Denna situation finns på många håll och har i Tyskland redan motiverat införande av avancerad rening på flera avloppsreningsverk.

# Sex forsknings- och utvecklingsprojekt

De olika projekten har utförts i olika delar av landet och med olika inriktning. Nedan följer korta beskrivningar av varje projekt. Exempel på resultat från de olika projekten redovisas längre fram i rapporten. För vidare läsning hänvisas till rapporter och artiklar från de olika projekten, sammanfattade i Bilaga I.

## Projekt 1. Läkemedel i källsorterat klosettwater och latrin – behandling och risker – LÄK

Avloppssystem med urin- eller klosettwater-sortering har betydligt större potential att återföra framförallt växtnäringssämnen kväve och kalium till åkermark än konventionella avloppssystem. Å andra sidan återförs också en betydligt större andel av läkemedlen, som i ett avloppsreningsverk istället riskerar att följa med det reade avloppsvattnet till vattenrecipienten.

För att kunna utveckla källsorterande system är det därför viktigt att beskriva vilka läkemedel och vilka mängder som skulle kunna spridas vid användning av gödselmedel från källsorterade avloppsfractioner och även vad som händer i miljön vid växtupptag, transport och nedbrytning i jord och grundwater. Syftet med projektet *LÄK* var att undersöka läkemedelsrester i klosettwater och latrin, både före och efter behandling och lagring, och att beräkna vilka läkemedelsmängder som skulle spridas i jordbruket jämfört med användning av avloppsslam. I projektet har även nedbrytning i mark, ackumulering och upptag beräknats.

Latrinen, som hämtades från en anläggning i Norrtälje, behandlades genom utrotningsförsök vid olika temperaturer. Klosettwaternet hämtades från Telge Näts behandlingsanläggning i Hölö (Södertälje), där det behandlas genom våtkompostering följt av ureahygenisering.

### **Deltagare och projektledare**

Projektet har genomförts i samarbete mellan JTI (Institutet för jordbruks- och miljöteknik, numera RISE Jordbruk och livsmedel), SLU (Sveriges lantbruksuniversitet) och SPPD (SP Process Development). Lotta Levén och David Eveborn har varit projektledare. Kontaktperson är Emelie Ljung från RISE Jordbruk och livsmedel.

## Projekt 2. Pilotanläggning för ozonering av läkemedelsrester i avloppsvatten

I september 2017 invigdes Sveriges första permanenta ozonanläggning för oxidation av läkemedelsrester vid Nykvarnsverket i Linköping. Förhoppningen är att minska belastningen av läkemedelsrester på Stångån, som rinner genom

Östergötland och norra Småland. Bakom anläggningen ligger detta utvecklingsprojekt där syftet var att skapa ett underlag för dimensionering och drift av en fullskaleanläggning. Anläggningen är unik ur ett processtekniskt perspektiv eftersom ozoneringen integrerats med avloppsreningsverkets kväverening för att säkerställa efterbehandling av det ozonerade vattnet.

Förutom att fastställa dimensioneringskriterier och att belysa drifttekniska aspekter undersöktes i pilotförsöken även dygnsvariationer och massflöden över hela anläggningen, tänkbara styrstrategier, störningar på den efterföljande biologiska reningen liksom möjligheterna att minska problemet med bildande av ekotoxiska biprodukter från ozoneringen. Målet var att reducera de mest prioriterade läkemedelssubstanserna till halter som inte leder till negativa effekter i recipienten.

### **Deltagare och projektledare**

Projektet har genomförts i samarbete mellan Tekniska verken i Linköping AB och IVL Svenska Miljöinstitutet. Robert Sehlén, Tekniska Verken, har varit projektledare och är också kontaktperson.

## **Projekt 3. Fullskalig rening av mikroföroreningar – FRAM**

I projektet FRAM var målet att utvärdera avskiljning av organiska mikroföroreningar med granulerat aktivt kol (GAK). Tidigare nationella undersökningar utförda i laboratorieskala har indikerat en relativt hög kostnad för GAK i jämförelse med exempelvis ozonering. Projektet avsåg att utmana denna kostnadsbild genom att utföra filtrering med GAK i större skala och därmed studera om GAK är ett konkurrenskraftigt reningsalternativ vid mer realistiska driftsformer. Projektet var det enda som arbetade med GAK som ett fjärde reningssteg, vilket skulle kunna introduceras separat efter befintliga avloppsreningsverk om kostnaderna kan sänkas.

För att kunna utvärdera olika koltyper och separation av olika läkemedel har det inom projektet utvecklats en helt ny teknik för studier av kemisk inbindning. Med ett nytt analyslaboratorium vid Krinova Incubator & Science Park i Kristianstad kunde lämpligt kol utprovas och sedan testas i stor skala, först vid Osby avloppsreningsverk och senare vid Kristianstads Centrala Reningsverk. I arbetet grupperades olika läkemedel utifrån kemiska egenskaper (och inte medicinsk effekt). Denna indelning användes sedan för att identifiera vilka parametrar som styr inbindningen av läkemedel till det aktiva kolet. Bättre kunskap kring vilka kemiska processer som styr inbindningen kan utnyttjas för utveckling av mer avancerade adsorptiva reningstekniker. Till försöken byggdes en pilotanläggning med ett sandfilter följt av ett aktivt kolfilter. Utöver detta har en ny metod för läkemedelsanalys på UPLC-MS/MS utvecklats innefattande den lista av 22 ämnen som Läkemedelsverket år 2015 föreslog som miljöindikatorer ”*Miljöindikatorer inom ramen för nationella läkemedelssatsningen (NLS)*”.

### **Deltagare och projektledare**

Projektet har genomförts i samarbete mellan Högskolan Kristianstad (HKR), Skåne Blekinge Vattentjänst AB (SBVT), Malmberg Water AB, Krinova Incubator & Science Park och Kristianstads kommun. Ola Svahn och Erland Björklund, HKR, har fungerat som projektledare och är också kontaktpersoner.

## **Projekt 4. Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – SystemLäk**

Inom SystemLäk var målet att ta fram rekommendationer kring avancerad reningsteknik för rening från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar utifrån ett helhetsperspektiv. Genom en omfattande kartläggning av kunskapsläget och befintliga kunskapsluckor har försök med olika tekniker planerats och utförts. Olika systemlösningar har undersökts för ett antal aspekter inklusive den totala miljöpåverkan, kostnader och reningseffektivitet. Slutligen har en helhetsbedömning av de olika systemlösningarna gjorts i syfte att skapa rekommendationer för implementering vid olika avloppsreningsverk under olika förutsättningar, som befintlig reningsprocess, recipient m.m.

Under projektets gång har särskild vikt lagts vid att skapa en helhetssyn där inte bara läkemedelsrester utan även andra svårnedbrytbara föroreningar samlade under begreppet mikroföroreningar analyserats. För att skapa en helhetssyn har också flera olika tekniker studerats liksom pågående teknikutveckling och följder för slamhantering.

I helhetsbedömningen har konsekvenser i form av kostnader, total miljöpåverkan och flexibilitet inför framtidens utmaningar, vid införande av avancerad rening, beskrivits.

### **Deltagare och projektledare**

Projektet har genomförts i samarbete mellan IVL Svenska Miljöinstitutet, Stockholm Vatten och Avfall AB, Sydvästra Stockholmsregionens VA-verksaktiebolag (SYVAB) och Kungliga Tekniska Högskolan (KTH). Christian Baresel, IVL, har varit projektledare och är också kontaktperson.

## **Projekt 5. Utvärdering av avancerad rening i fullskala**

Genom projektet etablerades en anläggning för ozonering i Knivsta söder om Uppsala. Anläggningen kom att bli Sveriges första fullskaleanläggning eftersom ozoneringen utformades för att klara avloppsreningsverkets hela flöde, motsvarande 12 000 pe. Ozoneringssteget i Knivsta byggdes efter det existerande reningsverket men före en befintlig ”poleringsdamm” efter vilken det renade avloppsvattnet rinner ut i recipienten Knivstaån. Etablering av en anläggning i denna storlek ger värdefulla praktiska erfarenheter av både

implementering och drift som sedan kan användas i andra projekt. Optimering av resursanvändning har varit ett viktigt mål.

I projektet har avskiljning av 120 läkemedel studerats. Parallellt har resistensspridning och ekotoxikologiska försök genomförts, där effektbilden i miljön avseende hormonstörningar, organförändringar och beteende hos fisk studerats. Eftersom avloppsreningsverkets hela flöde behandlats har projektet medfört en unik möjlighet att beskriva recipienten Knivstaåns ekologiska status både före och efter införande av avancerad rening. Figur 1 visar anläggningen i Knivsta.



Figur 1. Bild över ozonanläggningen i Knivsta. Foto: Berndt Björlenius.

### Deltagare och projektledare

Projektet har genomförts i samarbete mellan Umeå universitet, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm, Göteborgs universitet och SLU i Uppsala. Jerker Fick, Umeå universitet, har varit projektledare och är tillsammans med Berndt Björlenius, KTH, kontaktpersoner.

## Projekt 6. Rening av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten – RESVAV

Med RESVAV var målet att utveckla reningsprocesser avsedda för reduktion av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar. I praktiken innebar det arbete med att fastställa riktlinjer och dimensioneringskriterier för drift och utbyggnad av olika typer av svenska avloppsreningsverk. Förutsättningarna för införande av avancerad rening kan se väldigt olika ut i olika delar av landet och vid olika avloppsreningsverk. Vissa anläggningar medger kväverening, andra inte. Vissa avloppsreningsverk har små recipienter med låg utspädning, andra har havet som närmsta recipient.

Förståelse för dessa och andra förutsättningar är viktiga utgångspunkter för att identifiera utvecklingsbehov och bygga väl fungerande och kostnadseffektiva

anläggningar. I projektet har bland annat ozonering i pilotskala genomförts vid flera avloppsreningsverk i södra Sverige. I projektets senare fas har även de första stegen mot utveckling av en ny reningsprocess tagits, där dosering av pulveriserat aktivt kol kombinerats med rörliga biofilmsbärare.

### **Deltagare och projektledare**

Projektet har genomförts i samarbete mellan Gryaab, Kretslopp och vatten vid Göteborg Stad, Nordvästra Skånes Vatten och Avlopp (NSVA), Sweden Water Research (SWR), Kemiteknik vid Lunds universitet, Primozone Production AB, Sweco och Aarhus Universitet. Michael Cimbritz, Lunds universitet, har varit projektledare och är också kontaktperson.



# Vår omvärld

Avancerad rening vid kommunala avloppsreningsverk har införts i några länder, exempelvis i Tyskland och Schweiz. Samtidigt har teknik för avskiljning av organiska mikroföroreningar länge använts inom dricksvattenteknik och för återanvändning av avloppsvatten. I syfte att överföra kunskap om de fullskaleanläggningar som byggts genomfördes inom ramen för satsningen en omvärldsbevakning under ledning av Lunds universitet (Projekt 7).

## Schweiz – först i världen med lagstiftning

Schweiz är det enda land som hittills drivit fram en lagstiftning som medför en mer omfattande utbyggnad av landets avloppsreningsverk. Utifrån olika forskningsprojekt formulerades en nationell satsning (*Strategy Micropoll*) där det bland annat konstaterades att rening från mikroföroreningar skulle medföra betydande förbättringar i vattenkvalitet. Därför borde utvalda avloppsreningsverk uppgraderas, till en början med antingen ozon eller aktivt kol. Samtidigt påbörjades en politisk diskussion och ganska snabbt kunde det konstateras att det fanns en betalningsvilja för uppgradering hos allmänheten. Lagstiftningen trädde i kraft 2016 vilket var ca tio år efter att utredningarna inleddes. Utbyggnaden ska vara genomförd under en 25-årsperiod och omfattar ungefär 100 av landets 700 avloppsreningsverk. Det har inrättats en fond för finansiering som i huvudsak bygger på en höjning av va-taxan. Energianvändningen vid avloppsreningsverken beräknas öka med 5-30 %, vilket motsvarar en ökning av landets totala energianvändning med 0,1 %.

### Vilka avloppsreningsverk ska uppgraderas?

Alla stora avloppsverk (>80 000 personer) ska uppgraderas. Motiveringen är att minska den totala belastningen till miljön, samt att alla anläggningar i Schweiz ligger långt från havet, varför det förutsätts att varje insats gör skillnad för en relativt lång flodsträcka. Hälften av befolkningen omfattas av denna åtgärd. Utöver de stora anläggningarna ska utvalda reningsverk byggas ut för att skydda vissa dricksvattentäkter och särskilt känsliga recipienter med otillräcklig utspädning. I huvudsak undantas små avloppsreningsverk (<8000 personer) från kravet på utbyggnad, även om det finns mindre avloppsreningsverk som ska uppgraderas. Vissa mindre avloppsreningsverk läggs istället ner och vattnet överförs till större anläggningar med mer kostnadseffektiv rening. De första anläggningarna togs i drift 2015 med rening genom ozonering eller dosering av pulveriserat aktivt kol.

### Vilka ämnen ska tas bort?

Lagstiftningen innebär att ett antal ämnen ska reduceras till 80 % vid en jämförelse mellan avloppsreningsverkets in- och utgående vatten. Som indikatorsubstanser har man valt ämnen, nästan bara läkemedel, (Tabell 1), som i låg utsträckning påverkas i den biologiska reningen. Reduktionsgraden

som kan uppnås av de olika ämnena är ungefär likvärdig vid användning av aktivt kol och ozon.

Tabell 1. Indikatorsubstanser för kontroll av avancerad rening.

Substans	Typ
Amisulprid	Läkemedel, antidepressivt
Karbamazepin	Läkemedel, lugnande
Citalopram	Läkemedel, antidepressivt
Klaritromycin	Läkemedel, antibiotika
Diklofenak	Läkemedel, antiinflammatoriskt
Hydroklorotiazid	Läkemedel, blodtryckssänkande
Metoprolol	Läkemedel, betablockerare
Venflaxin	Läkemedel, antidepressivt
Benzotriazol	Korrosionsskyddsmedel
Candesartan	Läkemedel, blodtryckssänkande
Irbesartan	Läkemedel, blodtryckssänkande
Mekoprop	Biocid

## Andra länder

Trots att Schweiz är först ut med lagstiftning har grannlandet Tyskland fler fullskaleanläggningar för reduktion av svårnedbrytbara organiska föroreningar, framför allt i regionerna Nordrhein-Westfalen och i Baden Württemberg. Motiven bakom uppförandet av dessa anläggningar är skydd av dricksvattenkällor och känsliga recipienter med låg utspädning. I några fall utgörs en stor del av belastningen av en svårnedbrytbar fraktion från anslutna industrier. Även i Frankrike har några avloppsreningsverk uppgraderats.

Ozon men även aktivt kol används relativt flitigt för avloppsvattenrening på olika håll, exempelvis i Japan och USA, men då framför allt i syfte att kunna återanvända renat avloppsvatten. Det kan röra sig om allt från spolning av toaletter till rengöring och bevattning. Även om motivet inte varit avskiljning eller nedbrytning av mikroförroreningar kan effektiv reduktion av dessa ämnen många gånger uppvisas. I några fall renas vattnet till dricksvattenkvalitet och återanvänds som dricksvatten. Några av de mest kända exemplen finns i Namibias huvudstad Windhoek och i Singapore. I Montreal i Kanada, vid ett av världens största avloppsreningsverk, byggs världens största ozonanläggning.



Läs mer i rapporten som kan laddas ner via [www.svenskvatten.se](http://www.svenskvatten.se)

## Analys av mikroföroreningar

För att kunna utvärdera och utveckla ny teknik och för att kunna bedöma var eventuella åtgärder i form av avancerad rening bör sättas in är tillförlitliga analyser en nödvändig förutsättning. De olika laboratorier som varit kopplade till de olika projekten – Umeå Universitet, Sveriges Lantbruksuniversitet, IVL Svenska miljöinstitutet, Högskolan i Kristianstad och Aarhus universitet i Danmark – har därför ingått i en jämförande studie (interkalibreringsprojekt) under ledning av Högskolan Kristianstad (Projekt 8). Målet med studien var att uppnå ökad analyskvalitet och ökad medvetenhet kring problem förknippade med spåranalys av läkemedelsrester. Projektet utgör ett viktigt första steg mot ökad kvalitet och nationell samordning där mätdata i olika sammanhang kan jämföras. Inom FRAM (se Bilaga I) och SystemLäk (se Magnér m.fl., 2017) har även olika analystekniska frågor adresserats inom ramen för respektive projekt.

## Från milligram till nanogram

Avloppsreningsverk omfattas idag av utsläppskrav för att begränsa och förhindra syrebrist och övergödning. I praktiken innebär det att koncentrationer av fosfor, kväve och organiskt material ska kunna analyseras till i storleksordningen enstaka milligram per liter. Att bestämma halter av olika läkemedelsrester ställer helt andra krav på analysteknik och analysmetodik eftersom det kan röra sig om enstaka nanogram av ett enskilt ämne som ska både identifieras och kvantifieras. (1 nanogram är en miljon gånger mindre än 1 milligram.)

Ibuprofen, som är smärtstillande och febernedsättande, är välbekant för många. En maximal dygnsdos för en vuxen person uppgår enligt FASS till 1200 mg och kan intas i form av tre tabletter på 400 mg vardera. Om tabletterna istället slängs i skånska Ringsjön är det möjligt att med dagens analysteknik bestämma den koncentration (10 ng/l) som teoretiskt sett skulle uppstå i sjön.

## Svåra och enkla ämnen

Tio ämnen valdes ut för analys i interkalibreringsstudien. Ämnena analyserades utifrån standardprover och autentiska prover tagna från bland annat Kristianstads Centrala Reningsverk och Hammarsjön som ligger nedström avloppsreningsverket och utgör en del av biosfärsområdet Kristianstads Vattenrike. Figur 2 visar preparering av prover på Högskolan Kristianstad redo att sändas ut till de fyra laboratorierna.



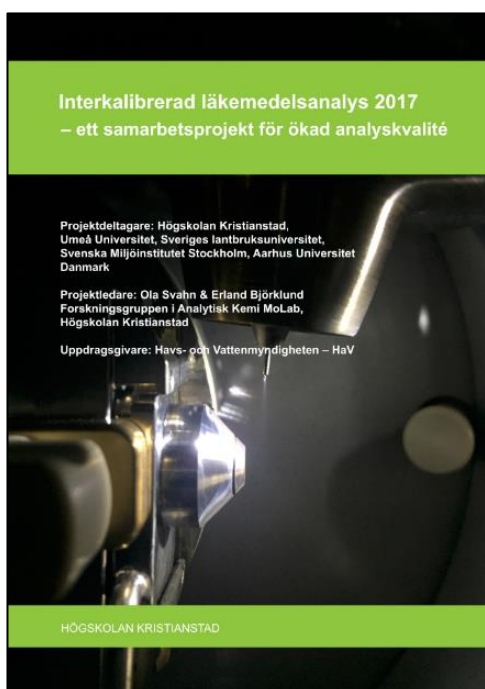
Figur 2. Preparering av prover på Högskolan Kristianstad för utskick till de laboratorierna i interkalibreringsprojektet. Foto: Erland Björklund.

Några av ämnena (karbamazepin, citalopram, diklofenak, metoprolol och sulfametoxazol) var förhållandevis enkla att analysera medan andra var mer problematiska (ciprofloxacin, klaritromycin, etinylestradiol, ibuprofen och tramadol). Det är samtidigt svårare att analysera olika ämnen i ett avloppsvatten jämfört med att analysera dem i ett rent vatten, exempelvis dricksvatten. Av de mer svåranalyserade ämnena är klaritromycin (antibiotikum) och etinylestradiol (syntetiskt hormon) särskilt intressanta

eftersom de står med på EU:s bevakningslista. I undersökningen underskattades halterna av dessa ämnen av flera laboratorier, vilket naturligtvis skulle kunna leda till motsvarande underskattning av koncentrationer i miljön. Etinylestradiol har i olika sammanhang visat sig mycket besvärligt att analysera vilket är olyckligt eftersom effekter på akvatisk miljö påvisats redan vid mycket låga halter.

## Från halt till bedömning

Tillförlitliga analyser är helt nödvändiga för att kunna bedöma om ett utsläpp av ett visst ämne ger upphov till risker för oönskade effekter i en sjö eller ett vattendrag. Ett exempel är det smärtstillande ämnet diklofenak som regleras genom Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljö kvalitetsnormer avseende ytvatten (HVMFS 2015). Halten ska inte överskrida 100 ng/l som årsmedelvärde. För att kunna göra en bedömning av en vattenförekomst krävs flera mätningar under året, men över- eller underskattning av halten kan leda till att statusen på ytvattnet under- respektive övervärderas. Halten av diklofenak i renat avloppsvatten varierade i denna studie mellan 800 och 1500 ng/l när de olika laboratorierna analyserade vatten från samma prov. En sådan variation kan naturligtvis få konsekvenser vid bedömning av halter efter utspädning i recipienten eller vid bedömning av olika massflöden. I andra sammanhang är den relativa skillnaden mellan två värden mer intressant. Det kan exempelvis vara fallet när avskiljning med olika tekniker ska studeras och in- respektive utgående värden jämförs. I sådana fall kan systematiska fel vara av mindre betydelse, men även i detta fall kan över- och underskattningar ge upphov till felbedömningar, vilket understryker vikten av tillförlitliga analyser.



Läs mer i rapporten som kan laddas ner via [www.havochvatten.se](http://www.havochvatten.se)

# Källsorterande avloppssystem

Källsorterande avloppssystem där urin och fekalier tas om hand utan att först spädas med stora mängder vatten är en principiellt god lösning om det är reduktion av mängden läkemedel till vattenrecipienten som ska åstadkommas. I tillägg finns fördelen att en större del av kvävet och kaliumet kan återföras i kretslopp. Hinder för tillämpning har bland annat varit de nödvändiga ombyggnaderna av befintlig infrastruktur och farhågor angående tillförsel av läkemedel till åkermarken.

I ett av de av HAV finansierade projekten, *LäK* (Projekt 1), har JTI utrett riskerna med tillförsel av läkemedel till jordbruksmark med källsorterade fraktioner och med slam från avloppsreningsverk (Levén m.fl., 2016). JTI har i ett första steg analyserat läkemedel i klosettwater, fekalier och avloppsslam under olika stadier av slambehandlingen. I klosettwater är halten av läkemedel högre än i avloppsslam. Detta kompenseras delvis av att läkemedel reducerades bättre under aerob behandling av klosettwater och efterföljande ureabehandling än med mesofil eller termofil rötning av avloppsslam. När skillnaderna mellan gödslingsstrategin mellan klosettwater och avloppsslam tas med i beräkningen är tillförseln av läkemedel till jordbruksmark i samma storleksordning oavsett om åkern gödslas med avloppsslam eller klosettwater.

Så här långt kunde JTI basera sina slutsatser på analyser. För att kunna uppskatta riskerna för människor av de ytterst små mängder läkemedel som kan tänkas tas upp i ätbara delar av växterna återstår enbart modellering eftersom det förväntas handla om extremt låga halter, långt under detektionsgränserna. Man har räknat med nedbrytning och urlakning i jord, upptag i växter och till slut vilken dos som en människa kan utsättas för den här vägen. I flera led har man tagit till i överkant och eftersom inte risknivåer för läkemedel finns så har man jämfört med en tiotusendels dygnsdos för varje läkemedel. Inte ens då fann man något läkemedel för vilket upptaget ens teoretiskt kunde närma sig risknivån. JTI vände också på steken och räknade ut hur många år det skulle ta en människa att konsumera grödor innehållande en dygnsdos av något av läkemedlen. För alla utom två läkemedlen skulle detta ta mer än 100 000 år. För de läkemedlen tar det enligt dessa modelleringar drygt 20 000 år för en människa att konsumera tillräckligt mycket grödor för att få i sig en dygnsdos av läkemedlet vare sig åkern gödslades med anaerobt behandlat slam eller aerobt behandlat klosettwater. Forskarna har flera förslag på hur beräkningarna kan förfinas och underlaget förbättras.

# Översikt tekniska lösningar

Tekniska lösningar för avskiljning av mikroföroreningar vid kommunala avloppsreningsverk måste uppfylla flera olika krav. Ett brett spektrum av problematiska substanser ska kunna avskiljas och kostnader för investering och drift måste kunna motiveras utifrån ett nyttoperspektiv. En viktig förutsättning för att konsekvenserna ska bli rimliga i förhållande till nyttan är att tekniken kan integreras med befintlig infrastruktur utan att äventyra kraven på rening från syreförbrukande ämnen, kväve och fosfor. Om den nya tekniken påverkar andra funktioner, som till exempel biogasproduktion eller slamhantering och disponering, måste även detta tas i beaktande.

## Olika alternativ

Det finns några principiellt olika metoder för avskiljning av mikroföroreningar:

- Fysikaliska
- Adsorptiva
- Oxidativa
- Biologiska

Det finns också möjlighet att kombinera de olika alternativen. Avskiljning kan avse såväl nedbrytning som separation av olika mikroföroreningar. Med fysikaliska och adsorptiva metoder kan ett stort antal olika ämnen avskiljas genom separation. En fysikalisk metod som visat sig ge hög avskiljning är membranfiltrering i form av omvänd osmos eller nanofiltrering. Nackdelar är hög energianvändning och ett koncentrat som kan vara besvärligt och kostsamt att hantera. Till de adsorptiva metoderna hör behandling med aktivt kol, antingen genom dosering av pulver eller filtrering genom granuler. Nackdelen är att adsorbenten, det aktiva kolet, måste bytas ut eller regenereras med jämna mellanrum.

De oxidativa liksom de biologiska metoderna bygger på omvandling och nedbrytning snarare än separation. Det finns flera olika oxidativa metoder, men ozonering är den vanligast förekommande och har i många studier visat sig effektiv. En nackdel är kopplad till det faktum att oxidationen i regel inte ger fullständig nedbrytning. Istället bildas olika transformationsprodukter som skulle kunna ge upphov till negativa miljöeffekter.

Biologisk rening ger med dagens processer god nedbrytning av en del substanser, medan andra inte bryts ned alls. Idag finns det inte någon biologisk metod som i sig själv ger samma breda effekt som ozonering eller behandling med aktivt kol. Den biologiska reningen utgör dock en viktig förutsättning för eventuella tillkommande reningssteg för läkemedelsrening, eftersom effekten av dessa blir bättre om vattnet innehåller mindre organiskt material och färre partiklar. Biologisk rening kan också utgöra ett komplement till vissa reningstekniker, exempelvis ozonering.

Än så länge är ozonering och behandling med aktivt kol de tekniker som funnit flest praktiska tillämpningar i stor skala, vilket hänger samman med både renings- och kostnadseffektivitet. Vilka framtidens lösningar blir återstår att se. Allt fler studier genomförs med kombinerade metoder vilket kan ge avskiljning av fler ämnen och mer resurseffektiva lösningar.

## Biologisk rening

Våra avloppsreningsverk är inte konstruerade för avskiljning av svårnedbrytbara organiska ämnen, men det betyder inte att alla läkemedel passerar opåverkade genom reningsprocesserna. Kemisk rening tillämpas vid de flesta reningsverk, främst för att reducera fosfor, men utgör inte ett alternativ för långtgående rening från läkemedel. Biologisk rening, framför allt i form av aktivslam- och biofilmssystem, har däremot visat sig ha effekt på vissa läkemedel. Med bättre kännedom om mekanismerna för en god biologisk avskiljning skulle många avloppsreningsverk kunna göra de förbättringar som är möjliga inom de befintliga anläggningsdelarna och därmed kunna åstadkomma en viss sänkning av utgående halter utan alltför stor resursåtgång.

### Aktivslam- och biofilmssystem

I princip kan olika substanser antingen adsorbera till biomassa eller brytas ner. Adsorptionen och nedbrytningen varierar från ämne till ämne beroende på ämnenas egenskaper. Läkemedel är inte lättflyktiga och avdrivning till luften anses därför försumbar.

I Sverige förekommer biologisk rening på avloppsreningsverk både i form av aktivslam- och biofilmssystem. Den vanligaste biologiska reningsmetoden är rening i olika typer av aktivslamsystem. I dessa system har det visat sig att vissa läkemedel, exempelvis naproxen och ketoprofen, kan brytas ner och att nedbrytningen är bättre i system med kväverening. Hormoner som estradiol och etinylestradiol bryts ner i relativt hög utsträckning och uppvisar därför ofta hög avskiljning (Schlüsener & Bester, 2008).

En del avloppsreningsverk har biofilmssystem för den biologiska reningen. Försök med rörliga bärare har visat lovande resultat och högre nedbrytningshastigheter för några ämnen, exempelvis diklofenak, som inte tycks brytas ner i samma utsträckning i aktivslamsystem (Falås m.fl., 2013).

Det har genomförts omfattande studier för att utvärdera vilken potential det finns i olika biologiska reningssystem. Lång uppehållstid, hög slamålder, biofilmsprocesser, samt närvaro av nitrifikationsbakterier tillhör de mekanismer som i olika sammanhang gett bättre avskiljning. Ett antal mikroföroreningar, däribland flera läkemedel, påverkas emellertid inte i nämnvärd utsträckning av biologiska reningsprocesser, i varje fall inte med dagens teknik och reningsprocesser (Falås m.fl., 2016).



## Från biologisk rening till avancerad rening

Biologisk rening ger således god reduktion av vissa ämnen medan andra förblir opåverkade. Om slamåldern och uppehållstiden kan förlängas finns det möjlighet att optimera nedbrytningen av vissa substanser. Biologisk rening i form av MBR (membranbioreaktor) är en variant där utökad nedbrytning för vissa ämnen konstaterats. Detsamma tycks gälla om biofilmsprocesser kan tillämpas. MBR-tekniken, som också medger långtgående partikelavskiljning, har studerats inom *SystemLäk* (Allard & Wahlberg 2017). I samma projekt har biologiskt aktiva kolfilter (BAF) studerats, vilket också är ett exempel på utökad nedbrytning och optimering av biologisk rening. Tekniken introduceras under avsnittet om granulerat aktivt kol och återfinns även i resultatsammanställningen.

Samtidigt finns det hinder för att potentialen i den biologiska reningen, liksom alla former av efterföljande avancerad rening, utnyttjas i form av utspätt avloppsvatten, bräddningar före avloppsreningsverket och förbiledning av den biologiska reningen vid höga flöden. Eftersom de allra flesta avloppsreningsverk har någon form av biologisk rening är det viktigt att den fungerar så bra som möjligt för att skapa förutsättningar för nedbrytning av vissa ämnen. En väl fungerande biologisk rening är också en viktig förutsättning för avancerad rening med exempelvis aktivt kol eller ozon. Låga halter av organiskt material i avloppsvattnet medför lägre behov av ozon och ett mer effektivt utnyttjande av aktivt kol. För att uppnå låga utgående halter av organiskt material krävs såväl optimerade reningsprocesser som måttliga tillflöden till reningsverket.

## Ozonering

Ozon har länge använts som reningsteknik inom dricksvattenproduktion, bland annat för desinfektion. Vid uppgradering av avloppsreningsverk är ozonering en av de tekniker som förs fram som ett kostnadseffektivt alternativ för oxidation av svårnedbrytbara organiska föroreningar. Det finns också erfarenheter av ozonering för filamentbekämpning vid avloppsreningsverk.

## Nedbrytning eller omvandling?

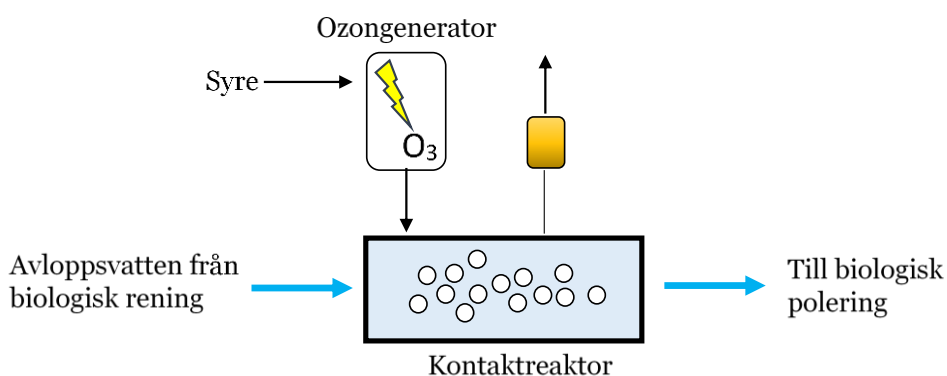
Vid ozonering av avloppsvatten leder oxidationen inte till en fullständig nedbrytning av de organiska ämnen som finns i vattnet. Halten organiskt kol (ofta uttryckt som TOC – Total Organic Carbon) visar normalt en ganska liten förändring för vatten som genomgått ozonering. Det tyder på transformation (omvandling) snarare än fullständig mineralisering (nedbrytning) av ämnen som detekteras före men inte efter processen. Vid reaktionen bildas transformationsprodukter. Några är stabila medan andra är nedbrytbara. Samtidigt finns det andra ämnen än just läkemedel och mikroföroreningar i ett avloppsvatten. Vissa av dessa kan bilda olika biprodukter vid ozonering. De flesta studier tyder på att ozonering minskar toxiciteten i vattnet men det finns också forskare som argumenterar för en mer komplex bild med olika tänkbara ekotoxikologiska effekter. Det finns olika procedurer beskrivna i litteraturen

som kan användas för att ge en indikation på om och hur mycket ozonering ökar eller minskar vattnets toxicitet. Det har också utförts olika toxicitetstester i anslutning till ozoneringsförsöken i Knivsta, Linköping och Stockholm (se exempelvis Baresel m.fl. (2017 a) för ytterligare information).

För att minimera risken för utsläpp av skadliga bi- eller transformationsprodukter rekommenderas i litteraturen ofta någon form av biologisk efterbehandling.

## Processutformning

Det är endast en mindre del av det organiska innehållet i avloppsvattnet som utgörs av problematiska föroreningar, men oxidationsprocessen är inte selektiv utan hela innehållet av organiskt material (och andra ämnen som kan oxideras) kommer att påverka ozonbehovet. Innehåller vattnet mindre organiskt material går det därför åt mindre ozon och därmed mindre energi. Detta betyder att en ozonanläggning med fördel placeras efter en väl fungerande biologisk rening. Figur 3 visar en typisk anläggningsutformning.



Figur 3. En av flera möjliga processutformningar för ozonering av biologiskt reat avloppsvatten. Bild: Michael Cimbritz.

Ozoneringssteget i Knivsta (Projekt 5) utformades och placerades på liknande sätt som i figur 3, men efter en avslutande kemisk fällning (efter biosteget) för att belastas av så lite suspenderat och organiskt material som möjligt. Kontaktfilter placerades efter ozoneringssteget för destruktions av ozonrester och möjlighet till etablering av en biofilm.

Ozongas (O<sub>3</sub>) är både explosiv och instabil. Det är därför inte enkelt att lagra eller transportera den. Det betyder i praktiken att ozon måste genereras på plats. Syre (O<sub>2</sub>), som används för produktion av ozon, kan antingen produceras ur luft i anslutning till ozonanläggningen eller levereras i flytande form och lagras i en syretank. I kontaktreaktorn är uppehållstiden i storleksordningen 10-25 minuter, vilket betyder att utrymmeskravet är relativt lågt i förhållande till många andra anläggningsdelar på ett avloppsreningsverk. I det

efterföljande poleringssteget förväntas en biofilm ge vidare nedbrytning av bi- och transformationsprodukterna från ozoneringen. Efterbehandling kan även ordnas i andra biologiska processer. Vid Nykvarnsverket i Linköping sker efterbehandlingen i ett biologiskt reningssteg för kväverening med rörliga biofilmsbärare (Baresel m.fl., 2016).

Ozonering är en flexibel teknik där dosen enkelt kan ändras beroende på reningsbehov. En optimerad dosering förutsätter emellertid avancerad övervakning och styrning. Sådana tekniska processer är under utveckling och de är också en förutsättning för energieffektivisering. Generering av ozon är förhållandevis energikrävande och det är därför viktigt att optimera ozondoseringen i förhållande till önskad effekt.

## Energianvändning

För att uppskatta energianvändningen är det viktigt att bedöma den totala energianvändningen för att ozonera avloppsvattnet. Om flytande syre framställs utanför anläggningen behöver detta tas med i beräkningen vid en jämförelse mellan alternativ. Utöver ozonproduktionen är kylning av ozongeneratoren och pumpning betydande poster. Det betyder att energiförbrukningen kan variera beroende på anläggningsutformning och hur befintlig infrastruktur ser ut. Eftersom doseringen står i proportion till mängden organiskt material kommer uppströms rening att påverka energianvändningen. Vid den fullskaliga reningen i Knivsta uppgick energiförbrukningen till knappt 0,1 kWh/m<sup>3</sup> avloppsvatten. Baresel m.fl. (2017 b) anger ökningen av elförbrukningen på avloppsreningsverket till 0,1-0,2 kWh/m<sup>3</sup>.

## Nyckeltal

Utifrån de försök som genomförts i de olika projekten har nyckeltal för dimensionering tagits fram:

- Uppehållstid i kontaktreaktor: 10-25 minuter
- Specifik ozondosering: 0,4-0,9 g O<sub>3</sub>/g DOC

Det finns som alltid osäkerheter kopplade till nyckeltalen. Det kan exempelvis finnas nitrit eller andra oorganiska ämnen som konsumerar ytterligare ozon. Det kan också tilläggas att de faktiska uppehållstiderna vid olika fullskaleanläggningar varierar kraftigt. Både inom *SystemLäk* och *RESVAV* har goda resultat uppnåtts vid jämförelsevis låga kontakttider.

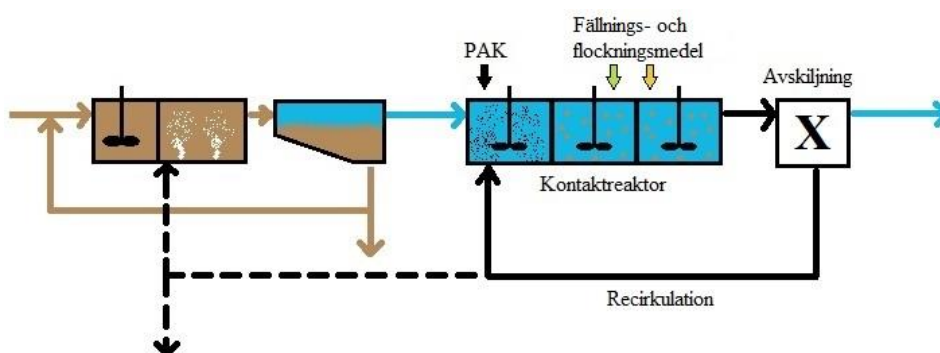
## Pulveriserat aktivt kol

Aktivt kol medger hög avskiljning av ett brett spektrum av organiska ämnen, däribland många läkemedel. Avskiljningen sker genom adsorption till kolstrukturen och bygger på separation snarare än nedbrytning. Hög specifik yta är därför viktig för effektiv avskiljning. Avloppsvatten kan behandlas genom dosering av pulveriserat aktivt kol (PAK) eller filtreras genom granulerat aktivt

kol (GAK) som ett slutsteg. Det sistnämnda alternativet beskrivs närmare i nästa avsnitt. PAK motsvaras på engelska av PAC (powdered activated carbon).

## Processutformning

Dosering av PAK förutsätter att pulveriserat kol kan lagras på avloppsreningsverket. För att kunna kontrollera tillsatsen och minska damningen blandas pulvret med vatten före dosering. Det ställs höga krav på stålqualität för kritiska utrustningsdelar eftersom hantering och pumpning av pulveriserat aktivt kol medför högt slitage. Lagring av PAK kräver också EX-klassning på grund av explosionsrisken. Hanteringen av PAK kan underlättas genom användning av inert gas. Figur 4 visar hur PAK kan doseras vid ett avloppsreningsverk.



**Figur 4.** Generell lösning för hur PAK kan tillsättas till en kontaktreaktor i ett kompletterande steg, där X motsvarar en separationsprocess för avskiljning och recirkulation av PAK. (Högstrand & Ignell, 2018).

Efter dosering krävs en reaktionstid, i storleksordningen en halvtimme, innan kolet med adsorberade ämnen kan avskiljas. PAK-slammet kan avskiljas genom fällning och flockning och sedimentering följt av sandfiltrering. Andra metoder för separation av kol kan tillämpas, exempelvis membranfiltrering. Framställning av aktivt kol är en energikrävande process och det är därför viktigt med ett effektivt utnyttjande av kapaciteten för adsorption av olika ämnen. I praktiken innebär detta att kolet recirkuleras i processen för att minimera behovet av att dosera nytt kol. I de anläggningar som byggts i Schweiz och Tyskland återförs förbrukat kol till den biologiska reningen för att sedan lämna anläggningen med överskottsslammet som ofta förbränns. Om slammet ska återföras i ett kretslopp bör inte det aktiva kolet blandas med slammet.

Det finns andra processutformningar, exempelvis direkt dosering av PAK till aktivslamprocessen. I en sådan konfiguration krävs inga separata reaktionstankar. Inom *SystemLäk* har kombinationen membranbioreaktor (MBR) +PAK studerats vilken medger både långtgående nedbrytning och adsorption. I *RESVAV* har möjligheten att dosera PAK direkt till en biofilmsprocess (MBBR) framgångsrikt testats i bänkskala. Eftersom de flesta

anläggningar i full skala integrerar pulveriserat aktivt kol med biologisk rening är erfarenheterna av hantering av slam bestående av i huvudsak aktivt kol begränsade.

## Energianvändning

De flesta processlösningar med dosering av pulveriserat aktivt kol innebär en marginell ökning av elförbrukningen på själva avloppsreningsverket. Däremot är det viktigt att komma ihåg att framställning av aktivt kol är en energikrävande process. Räknas denna med ökar energianvändningen kraftigt. Med energiåtgång motsvarande 30 kWh/kg PAK (Abegglen & Siegrist 2012) och en dosering på 15 g/m<sup>3</sup> åtgår motsvarande 0,45 kWh/m<sup>3</sup> dvs 65 kWh/PE/år (om varje person genererar 400 l avloppsvatten per dag)

## Nyckeltal

PAK kan integreras i en avloppsreningsprocess på flera olika sätt. Nödvändig dosering beror på önskad avskiljning och andra faktorer, framför allt i vilken utsträckning det aktiva kolet recirkuleras i processen. I en sammanställning gjord av Baresel m.fl. (2017) rapporteras nyckeltal motsvarande:

- 10-20 mg PAK/l i dosering
- Upphållstider motsvarande ca 30 minuter

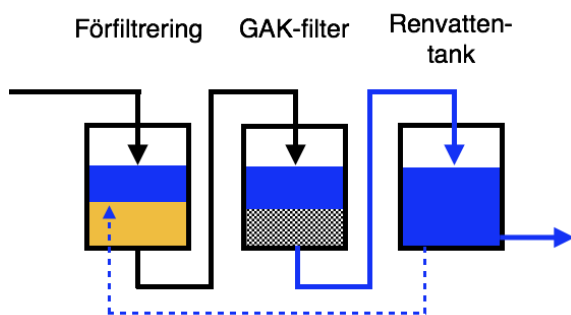
Integreras doseringen med den biologiska reningen krävs inga extra kontaktreaktorer, eftersom uppehållstiden i aktivslambassängen räcker för adsorptionen av läkemedlen på det aktiva kolet. Det aktiva kolet avskiljs tillsammans med det aktiva slammet.

## Granulerat aktivt kol

Ett alternativ till dosering av pulveriserat aktivt kol är filtrering genom en bädd av granulerat aktivt kol (GAK). Motsvarande engelska term är GAC (granulated activated carbon). Precis som vid dosering av pulveriserat aktivt kol är det önskvärt med låga halter av organiskt material för att utnyttja kolet så effektivt som möjligt, dvs. undvika att kolets adsorptionskapacitet utnyttjas för organiskt material som hade kunnat avskiljas i tidigare reningssteg. Det är också viktigt att innehållet av partiklar är lågt så att filtrets makrostruktur inte blockeras och förhindrar ett effektivt utnyttjande av kolets mikrostruktur. Ibland förekommer även andra termer i samband med kolfiltrering. BAC, biologically activated carbon, används i syfte att understryka att det i kolfilter utvecklas en biofilm som kan bidra till avskiljning av olika substanser genom nedbrytning. I det följande förekommer ibland motsvarande svenska akronym, BAK (biologiskt aktivt kol), eller BAF (biologiskt aktivt filtrering).

## Processutformning

Figur 5 visar en processutformning som utvärderats med stor framgång i FRAM-projektet. I denna utformning utnyttjas, efter biologisk rening, ett befintligt sandfilter som förfiltrering till GAK-filtret.



**Figur 5.** Översiktlig skiss av förfiltrering med efterföljande filtrering genom granulerat aktivt kol i FRAM-projektet (Svahn & Björklund 2018).

Driften av ett aktivt kolfilter påminner i allt väsentligt om driften av ett sandfilter för polering av avloppsvatten. Kolets densitet är emellertid lägre än sandens vilket påverkar backspolningen. Avskiljningsgraden avtar med tiden och efter en viss tid, ofta uttryckt i antal filtrerade bäddvolymmer, nås slutligen ett så kallat genombrott, vilket betyder att avskiljningen försämras för ett eller flera ämnen. Gränsen för vad som betraktas som ett genombrott varierar och beror ytterst av det slutliga målet med reningen. I *FRAM*-projektet skedde genombrott först av små negativt laddade molekyler som sulfametoxazol vilket var helt i linje med de studier som tidigare gjort i laborativ skala inom projektet (Svahn & Björklund, 2015). Vid genombrott måste kolet ersättas med nytt eller regenereras. Vid regenerering upphettas kolet och de ämnen som adsorberats mineraliseras. Efter regenerering måste ungefär tio procent nytt aktivt kol tillsättas för att kompensera för förluster.

## Energianvändning

Processlösningar med filtrering genom GAK-filter ger, i likhet med dosering av pulveriserat aktivt kol, en förhållandevis liten ökning av energiförbrukningen på avloppsreningsverket. Energianvändningen kopplas främst till spolning av filtret. Tillverkning och regenerering av aktivt kol kräver dock energi, precis som i fallet med tillverkning av PAK.

## Nyckeltal

GAK-filter dimensioneras enligt ungefär samma kriterier som sandfilter. Spolning av filtret anpassas efter uppströms processer och eventuell förbehandling och genomförs i regel betydligt mer sällan än för ett sandfilter. Utifrån de försök som genomförts i de olika projekten har nyckeltal för dimensionering tagits fram:

- Kontakttid i filtret: >10 minuter
- Filtreringshastighet: 6-10 m/h
- Regenerering: >20 000 bäddvolymmer

Antalet bäddvolymer (ofta benämnt *EBCT*, *Empty Bed Contact Time*) varierar mellan olika studier men har i de försök som genomförts inom *SystemLäk* och *FRAM* uppgått till över 20 000 bäddvolymer. Långa intervall mellan kolbyten ger bättre ekonomi och resurseffektivitet.

## Resultat från projekten

Det finns idag ingen kravbild att förhålla sig till vad gäller läkemedelsutsläpp från avloppsreningsverk och det är därför inte självklart hur olika tekniker bör utvärderas. För att undvika effekter på växter och djurliv i sjöar och vattendrag är halter av olika ämnen i recipienten avgörande. I många studier av olika tekniker utvärderas emellertid reduktionen av olika ämnen. Att betrakta reduktion gör det ibland enklare att jämföra reningstekniker, men det är samtidigt inte säkert att en hög reduktion ger en tillräckligt låg halt i recipienten, eller att samma reduktion behövs för att skydda alla recipienter. Det kan också vara svårare att åstadkomma en viss procentuell reduktion om vattnet är utspädd från början, varför ett krav på en viss reduktionsgrad kan vara svårare att uppnå än ett haltkrav för ett reningsverk med mycket tillskottsvatten.

Det kan vara värt att påminna sig om att den lagstiftning som införts i Schweiz baseras på procentuell reduktion av ett mindre antal ämnen. Tanken är emellertid att även andra ämnen, än de som omfattas av kraven, avskiljs i motsvarande grad och att den procentuella reduktion som eftersträvas i genomsnitt är tillräckligt hög för att ge avsedd effekt i sjöar och vattendrag. Förenklingar är nödvändiga eftersom det är många olika ämnen som uppträder i olika koncentrationer och kan ge upphov till olika effekter. Det är inte praktiskt möjligt eller ekonomiskt rimligt att följa upp reduktionen eller halten av varje enskilt ämne med hög frekvens. Att bedöma hur eventuella krav ska ställas är en utmaning av flera skäl. Behovet av att reducera tillförseln av läkemedel till en recipient varierar beroende på utspädning och andra lokala faktorer. Analys av läkemedel är förhållandevis kostsamt och kräver sannolikt viss form av standardisering. En utmaning är också att en del av de substanser som ska avskiljas varierar i förekomst och över tid (se kapitel ”Specifika belastningar”).

Det är viktigt att betrakta och diskutera resultat mot denna bakgrund. Önskade halter eller reduktionsnivåer är inte fastställda, i alla fall inte ur ett juridiskt perspektiv. I de olika projekten har därför olika tekniker inte nödvändigtvis utvärderats mot ett och samma mål. Däremot har teknikernas potential i sig prövats och utvärderats. I det följande redovisas *exempel* på resultat från de olika projekten med fokus på reduktion av olika mikroföroreningar i enlighet med utlysningens syfte. Inom *SystemLäk* har flera olika tekniker och teknikkompositioner testats. En samlad bedömning från detta projekt återges i det avslutande avsnittet *Teknikval*.

## Specifika belastningar

Vid dimensionering av avloppsreningsverk är specifika belastningar av kväve, fosfor och organiskt material en viktig utgångspunkt. Det kan vara intressant att studera motsvarande belastningar för olika läkemedel. En sådan studie har genomförts inom RESVAV där inflödet av olika substanser studerats över tid för ett antal avloppsreningsverk. Tabell 2 visar en sammanställning över olika ämnen.

Tabell 2. Reduktion och tillförsel av olika läkemedel vid ett antal svenska avloppsreningsverk (Paxéus m.fl., 2016 och Paxéus, 2018).

Läkemedel	Reduktion ARV %	Till ARV mg/person, dygn	Trend för tillförsel
Atenolol	15-60	0,5	Minskande
Metoprolol	Ca 20	0,3	Stor spridning Minskande
Propranolol	0-20	0,025	Minskande
Sotalol		0,09	
Trimetoprim	0-50	0,02	Minskande
Sulfametoxazol	30-75	0,02-0,4	Minskande
Citalopram	0-20	0,08	Minskande
Tramadol		0,1-0,4	
Karbamazepin	0-20	0,1	Svagt minskande
Ibuprofen	80-100	2,0	Stabilt
Diklofenak	0-25	0,15-0,4	

Utifrån denna typ av data kan olika uppskattningar göras, exempelvis av olika massflöden. Med kunskap om olika reningsprocesser och recipientförhållanden kan specifika belastningar för olika läkemedel användas i olika sammanhang där behov och utformning av avancerad rening diskuteras. Ett steg i denna riktning har tagits med projektet LUSKA (Läkemedelsutsläpp i Skånska Avloppsreningsverk) där prover tagits uppströms, nedströms och i utgående vatten från olika avloppsreningsverk (Svahn & Björklund, 2017). Den procentuella reduktionen har studerats för ett flertal olika läkemedel och bekräftar bilden med relativt låg reduktion för många ämnen.



## Ozonerings

Ozonerings har demonstrerats och utvärderats i flera av projekten och visat sig ge goda resultat för ett brett spektrum av organiska mikroförureningar, inte minst läkemedelsrester. Nedan presenteras några exempel.

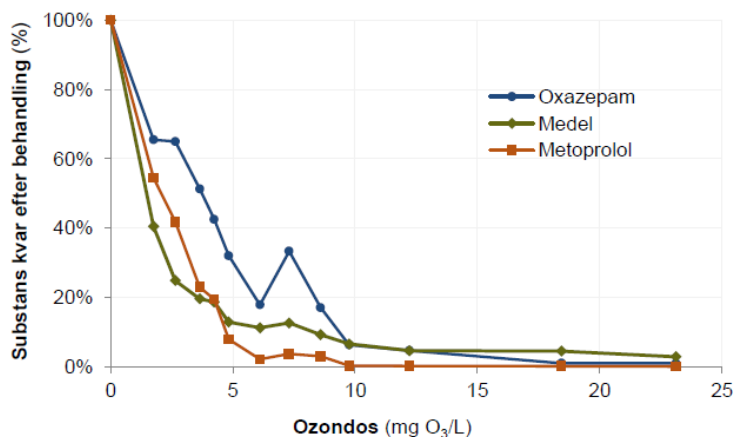
### **Projekt 2. Pilotanläggning för ozonerings av läkemedelsrester i avloppsvatten**

Vid försöken i Linköping testades ozonerings i syfte att skapa ett underlag för utformning av den fullskalanläggning som sedan konstruerades vid Nykvarnsverket efter projektets slut. Syftet med försöken var dock inte enbart att utvärdera ozoneringsens effekt på olika läkemedel utan också att utvärdera hur ozonerings kunde integreras i den befintliga reningsprocessen. Ozonerings har kombinerats med verkets biologiska rening och placerats mellan aktivslamprocessen och verkets biofilmsprocess för kväveavskiljning. I försöken kunde det konstateras att ozonerings inte störde den efterföljande biofilmsprocessen och att den biologiska efterpolerings kunde klaras utan att konstruera ett extra behandlingssteg. Figur 6 visar pilotanläggningen.



Figur 6. Pilotanläggning för ozonerings vid Nykvarnsverket.

En viktig del av försöken var att visa att olika läkemedel verkligen kunde reduceras och vid vilken dos. Figur 7 visar hur återstående andel av vissa läkemedel sjunker med ökande dos.



Figur 7. Återstående andel läkemedel som funktion av ozondos. "Medel" utgör ett medelvärde för de analyserade läkemedlen. (Sehlén m.fl., 2015)

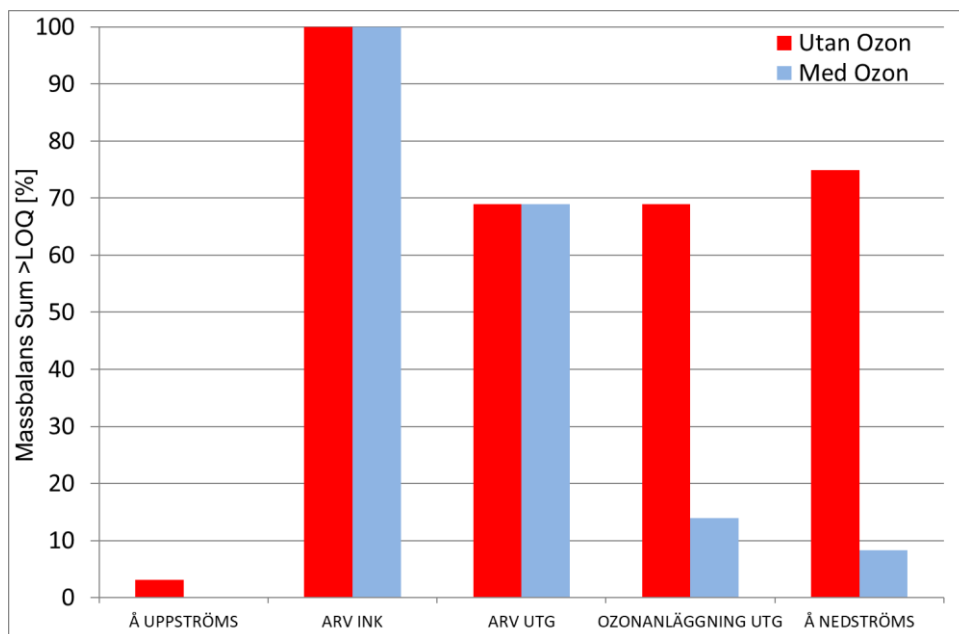
Oxazepam är ett av de ämnen som kräver en, relativt sett, hög ozondos för avskiljning, medan metoprolol tillhör en grupp som är ganska enkel att oxidera med ozon. Med i storleksordningen 5 mg O<sub>3</sub>/l kunde närmare 90 % avskiljas för de flesta av de analyserade läkemedlen. Utifrån denna typ av data kunde sedan halter av olika ämnen i avloppsreningsverkets recipient (Stångån) uppskattas och värderas mot de koncentrationer som kan förväntas ge upphov till risk för negativa miljöeffekter.

En annan viktig del av försöken i Linköping utgjordes av olika ekotoxikologiska försök. Inga av dessa av (östrogen aktivitet, grön- och rödalga, Nitocra- och Amestester) visade negativ påverkan vid de testade ozondoserna (upp till 18 mg O<sub>3</sub>/l). En parameter som ofta nämns i samband med ozonering är bildning av den cancerogena föreningen bromat, men inte heller den kunde detekteras i höga halter vid rimliga ozondoser (<10 mg O<sub>3</sub>/l). Sammantaget bidrog de olika försöken till en samlad bild där ozonering bedömdes vara en passande lösning för Nykvarnsverket i Linköping.

### Projekt 5. Utvärdering av avancerad rening i fullskala

Söder om Uppsala, vid Knivsta avloppsreningsverk, etablerades en fullskalig anläggning för ozonering. Reningsverket är konstruerat för 12 000 pe och för ett dimensionerande flöde på 300 m<sup>3</sup>/h. Ozonanläggningens storlek och det faktum att den byggdes för ozonering av hela avloppsvattenflödet gör den särskilt intressant, både i ett nationellt och ett internationellt perspektiv. Genom att avloppsreningsverkets hela flöde behandlades med ozon skapades en unik möjlighet att studera recipienten, Knivstaån, *före*, *under* och *efter* att ozoneringen var i drift. Detta gjordes genom provtagning i flera olika punkter uppströms och nedströms avloppsreningsverket, den sista 8 km nedströms.

Läkemedel analyserades både i vatten och i biota. Till detta gjordes en omfattande evertebratinventering, en mikrobiell utvärdering och exponeringsförsök med fisk. Figur 8 visar hur massflödet för de läkemedel som analyserades i vatten, förändrades med och utan ozonering.



**Figur 8.** Diagrammet visar hur summan av studerade läkemedel förändras genom avloppsreningsverket och i recipienten, med och utan ozonering. (LOQ står för limit of quantification och massbalansen avser således summan av de ämnen som kunnat kvantifieras i olika punkter.)

Reduktionen av läkemedelsrester i befintligt reningsverk uppgick till ca 30 % och med ozoneringen uppgick den totala reduktionen till mer än 90 %.

Reduktionen av diklofenak, ett fokusämne i vattenförvaltningen, översteg 99 %. Hög reduktion kunde således konstateras för det stora flertalet ämnen men även i denna studie visade sig några ämnen mer besvärliga att avskilja, exempelvis irbesartan (blodtryckssänkande), tramadol (smärtstillande) och speciellt flukonazol (mot svampinfektion). Effekten på fisk av läkemedelsrening med ozon studerades under tre veckor genom att zebrafisk placerades i akvarier vid ozoneringsanläggningen i Knivsta. Försöken visade att zebrafisken påverkades av ozoneringen genom bl. a. en ökad äggläggning, men också genom en något ökad induktion av vitellogenin i hanfiskar, vilket tyder på att östrogenliknande ämnen kan ha bildats i samband med ozoneringen (Pohl m.fl., 2018). Tidigare svenska studier med regnbågslax har visat på minskad induktion av vitellogenin efter ozonering. De olika utfallen talar för att fler exponeringsstudier och eventuellt nödvändiga justeringar i reningsprocessen bör genomföras, parallellt med att ozonering implementeras på bred front för rening från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar.

Ozonering visade sig även leda till betydande reduktioner av läkemedelsrester i biota i Knivstaån, där bland annat olika sländor studerades. I samband med försöken har även en omfattande evertibrat inventering genomförts med inte mindre än 140 000 evertibrater. Signifikanta förändringar i antalet individer har konstaterats för dag- och nattsländor, iglar och snäckor. Antal sländor har ökat medan antalet iglar och snäckor har minskat i samband med att ozoneringen var i drift. Ozoneringen reducerade även förekomsten av virus (Wang m.fl., 2018).

### **Projekt 6. Rening av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten (RESVAV)**

Inom ramen för *RESVAV* testades ozonering i flera olika pilotförsök. I en studie jämfördes ozonering vid en hög- och en lågbelastad aktivslamanläggning mot bakgrund av att det i Sverige finns aktivslamssystem både med och utan kväverening.

I en annan studie flyttades en pilotanläggning runt för korttidsförsök på tio olika avloppsreningsverk i södra Sverige. Syftet med denna studie var att jämföra olika avloppsreningsverk och studera hur ozonbehovet varierar för att uppnå samma halt eller reduktion av ett givet ämne, allt i syfte att skapa dimensioneringsdata för praktiska tillämpningar. Tabell 3 visar ett urval av reningsresultat från denna studie.

Tabell 3. Avskiljning av olika läkemedel som funktion av ozondoser.

Rött: <50 %, gult: 50-79 %, ljusblå: 80-89 %, mörkblå: >90 %, För en fullständig sammanställning med fler ämnen hänvisas till Ekblad m.fl. (2015).

Substans	Grupp	5 g O <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>	5 g O <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>	7 g O <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>	10 g O <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>
Diklofenak	Antiinflammatorisk				
Ibuprofen	Antiinflammatorisk				
Atenolol	Betablockerare				
Metoprolol	Betablockerare				
Ciprofloxacin	Antibiotika				
Klaritromycin	Antibiotika				
Sulfametoxazol	Antibiotika				
Karbamazepin	Lugnande medel				
Venlafaxin	Antidepressivt				
Tramadol	Smärtstillande				
Iohexol	Kontrastvätska				
Karbendazim	Biocid				
Diuron	Biocid				

Tabellen visar att vissa ämnen, som diklofenak och karbamazepin, kan reduceras redan vid ganska låga ozondoser. För andra ämnen krävs högre doser medan vissa ämnen inte tycks påverkas nämnvärt. Detta gäller exempelvis olika typer av kontrastmedel, men även antibiotikan klaritromycin, från EUs bevakningslista, oxideras dåligt också vid höga doser ozon. För enstaka ämnen tycks inte hög reduktion kunna uppnås ens vid hög dos. Ett sådant exempel är ibuprofen. Det bör dock noteras att det för ibuprofen ofta kan uppvisas mycket hög reduktion redan i ett aktivslamsystem med kväverening. Den återstående halten, som kan reduceras i en efterföljande ozonbehandling, är i så fall mycket låg. Exemplet Ibuprofen visar att det är viktigt att studera även halter och att förstå helheten, dvs. vilka processer som finns uppströms och hur dessa påverkar olika ämnen. Reduktionen över hela avloppsreningsverket kan vara mycket hög och närmare 100 % även om reduktionen i den avancerade reningen, i detta fall ozonering, är betydligt lägre.

## Aktivt kol

Aktivt kol har utvärderats i flera av projekten, såväl pulveriserat som granulerat aktivt kol. Inom ramen för *SystemLäk* (Projekt 4) och *RESVAV* (Projekt 6) har dosering av pulveriserat aktivt kol med framgång testats, i *SystemLäk* till en MBR (membranbioreaktor) och i *RESVAV* till en MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor). Figur 9 visar en bild från försöken där PAK doserades till en process med rörliga biofilmsbärare.



**Figur 9.** Bärarmaterial från pilotförsök vid Sjölanda avloppsreningsverk utförda inom RESVAV. Bäraren till vänster kommer från en reaktor med dosering av pulveriserat aktivt kol och bäraren till höger från en referensreaktor utan dosering.

Dosering av pulveriserat aktivt kol förutsätter emellertid en förändrad slamhantering, vilket inte är fallet med filtrering genom granulerat aktivt kol som testats och utvärderats både inom ramen för *SystemLäk* och *FRAM* (Projekt 3).

### Projekt 3. Fullskalig rening av mikroföroreningar - FRAM

*FRAM*-projektets huvudsakliga målsättning var att i full skala utvärdera granulerat aktivt kols förmåga att avlägsna olika mikroföroreningar. Under tiden som filteranläggningen byggdes utprovades vilka kommersiella koltyper som mest effektivt adsorberade mikroföroreningar baserat på ny kunskap om kemisk interaktion och inte utifrån ”trial-and-error”.

Idag finns flera kommersiella aktiva kol tillgängliga på marknaden. Tillverkningsprocedur och utgångsmaterial varierar. I aktivt kol finns, förutom det kondenserade kolskelettet som utgör grundförutsättningen för adsorptionen, också funktionella grupper som innehåller kväve, syre och väte. Dessa kommer att påverka både humusämnenas och mikroföroreningarnas inbindning. Läkemedel är kemiskt en mycket heterogen grupp av ämnen, och för att få en idé om hur olika slags läkemedel binder in till olika typer av

organiska matriser och aktivt kol utvecklades ett nytt analysinstrument. Resultaten visade att läkemedlens interaktioner med fasta matriser är mycket starkt kopplade till fysikalisk-kemiska egenskaper hos molekylerna. Diklofenak är till exempel en molekyl med sura egenskaper. Den kan avge en proton och bilda en negativ jon och repelleras därmed av den negativt laddade organiska fraktionen i reningsverkets organiska slamfas. Det nya analysinstrumentet kunde användas för att på kort tid utvärdera inbindningsförmågan hos nio kommersiella kolsorter. Kolen uppvisade stora skillnader i förmåga att binda in läkemedel och de två bäst lämpade kolsorterna, 400 kg av vardera, köptes in för test i pilotanläggningen. Detta nya kemiska verktyg, samt utgångspunkten att vid vattenrening gruppera läkemedlen efter kemiska egenskaper och inte medicinsk effekt, är nytt och ger värdefull kunskap om vilka parametrar som styr inbindningen av läkemedel vilket i sin tur leder till en mer kontrollerad och evidensbaserad utveckling av en flexibel och framtidssäkrad reningsmetod.

I projektet har också en ny analysmetod utvecklats baserad på Läkemedelsverkets 22 miljöindikatorer och EUs bevakningslista. Organisk spåranalys av mikroföroreningar är kostsam, men helt nödvändig för att kunna bedöma om reningstekniken fungerar. Under årens lopp har forskare vid olika laboratorier utvecklat ett mycket stort antal metoder för analys av mikroföroreningar, och en så kallad ”multi-metod” kan inrymma över 100 läkemedel. Detta leder å ena sidan till fler analysdata men å andra sidan också till en större komplexitet, vilket kan ge större mätosäkerhet och ökade kostnader vid analysarbetet. Jämförbarheten mellan olika analyser kan också försvåras om man inte mäter samma ämnen i de olika metoderna.

I projektet togs det fram en begränsad men genomtänkt lista, med ca 50 ämnen, att arbeta vidare med. De utvalda ämnena representerar ett brett spektrum av fysikalisk-kemiska egenskaper såsom anjoner, katjoner, zwitterjoner, och varierande hydrofobicitet vilket säkerställer att en maximal andel av befintliga och framtida mikroföroreningar i den ”kemiska cocktailen” täcks in.

Efter utprovning av aktivt kol och konstruktion av anläggningen placerades anläggningen först på avloppsreningsverket i Osby vid Osbysjön och därefter på Kristianstads Centrala Reningsverk vid Hammarsjön. Båda reningsverken är indirekt kopplade via sina sjöar till Helge å som mynnar i Hanöbukten. Figur 10 visar anläggningen.





**Figur 10.** Bild över anläggningen med filtrering av utgående renat avloppsvatten på Osby reningsverk (Skåne), först genom sand och därefter granulerat aktivt kol (GAK). Till vänster konstruktör Måns Hansson, dåvarande chefsingenjör på Malmberg Water AB i Yngsjö, till höger Ola Svahn, forskare på Högskolan Kristianstad. Foto: Erland Björklund.

Sandfiltret skulle fungera som skydd för den aktiva kolfasen med förhoppningen att kolets livslängd skulle förlängas.

Inledande kemisk analys (15-05-29) visade på mycket hög avskiljningsgrad för samtliga undersökta ämnen enligt Tabell 4, vilket tydliggör aktivt kols generellt goda adsorptionsförmåga för ett brett spektrum av ämnen. Ett renat avloppsvatten är rikt på löst organiskt material (DOC) som kommer att nå kolfiltret, vilket tillsammans med mikroföroreningarna kommer att bidra till att kolfiltret mätts.

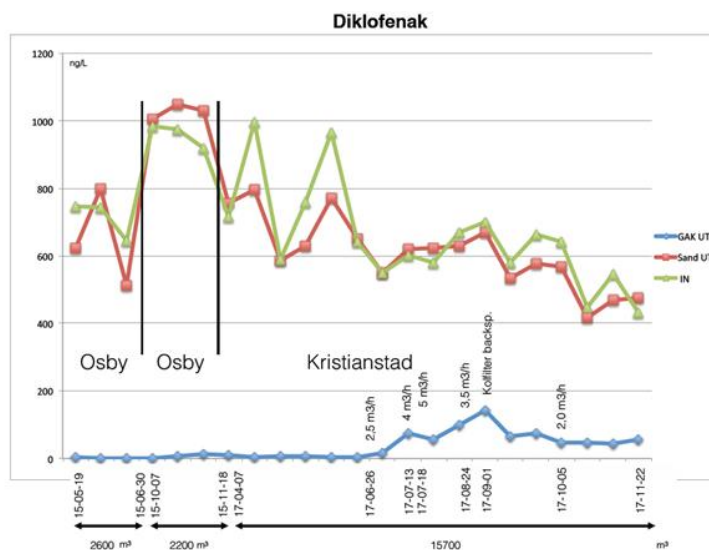


Tabell 4. Avskiljningsgrad av olika ämnen över projektets löptid.

Läkemedel	Datum		
	15-05-29	17-11-22	18-01-27
Atenolol	100	93	96
Ciprofloxacin	100	76	68
Citalopram	100	99	98
Klaritromycin	99	95	91
Diklofenak	99	88	86
Eritromycin	100	89	86
Estrone	97	100	97
Flukonazol	100	61	53
Furosemide	86	89	91
Imidachloprid	100	97	68
Karbamazepin	100	84	82
Losartan	100	84	90
Metoprolol	100	96	96
Naproxen	100	92	93
Oxazepam	99	84	79
Propranolol	100	100	100
Sertralin	96	94	98
Sulfametoxazol	100	26	8
Tramadol	100	99	89
Trimetoprim	99	98	98
Venlafaxin	100	85	82
Zolpidem	99	100	93

Vid försöken uppnåddes mycket hög avskiljning för de studerade ämnena, nedan exemplifierat med diklofenak, figur 11. Under de två driftsperioderna i Osby och fram till slutet av juni i Kristianstad (17-06-21) kunde endast spår av diklofenak detekteras, med en reningsgrad på >99%. I mitten av juli månad beslutades att öka flödet varpå höjd koncentration av diklofenak mättes upp

efter kolfiltret. För att avgöra om genombrottet berodde på filtermättnad eller för kort uppehållstid i filtret sänktes flödet åter med minskade halter av diklofenak som följd. Detta visade att filtret ännu inte var mättat.

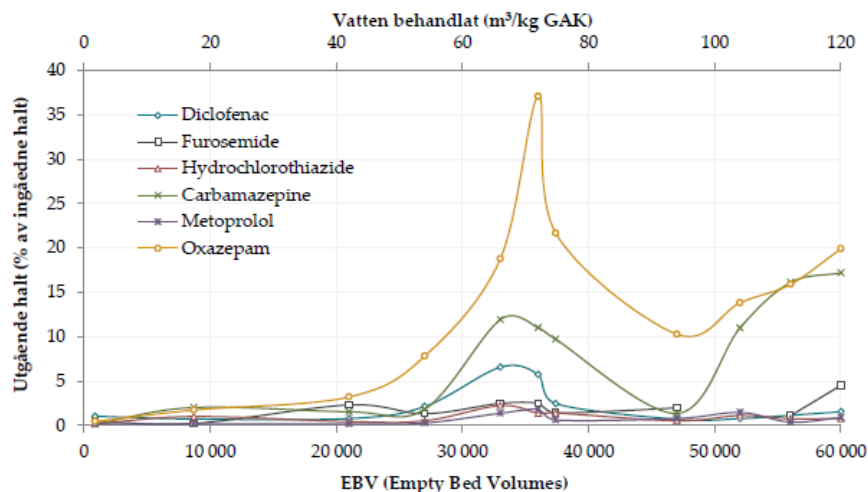


Figur 11. Översikt av analyserade koncentrationer av diklofenak. Grön linje (IN) visar koncentrationerna i det vatten som redan renats vid Osby reningsverk och Kristianstads Centrala Reningsverk och som leddes in till sandfiltret. Röd linje (Sand UT) visar koncentrationerna efter det att avloppsvattnet passerat sandfiltret. Blå linje (GAK UT) visar utgående koncentrationer efter det granulerade aktiva kolet.

Filtret utvärderades kontinuerligt under hösten 2017 och i slutet av november (17-11-22) hade 20 500 m<sup>3</sup> vatten renats. Antibiotikan sulfametoxazol och flukonazol visade tydligt på genombrott (Tabell 5), men för övriga ämnen var reduktionen fortsatt god, till mycket god. Pilotanläggningen drevs därför vidare ända till slutet av januari 2018 (18-01-27), dagarna innan slutredovisningen av projekten på NAM-dagarna i Linköping. Då hade 23 000 m<sup>3</sup> (motsvarande 23 000 bäddvolym) passerat vilket är den volymen som använts för att sätta en ny prislapp på kostnaden för storskalig filtrering med granulerat aktivt kol (GAK).

#### Projekt 4. Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – SystemLäk

Inom *SystemLäk* har flera olika tekniker och teknikkombinationer utvärderats (se vidare under avsnittet *Teknikval*), däribland filtrering genom aktivt kol. Figur 12 visar reduktion av några utvalda läkemedel som funktion av filtreringstid från försök utförda vid Hammarby Sjöstadverket i Stockholm.



Figur 12. Utgående andel av olika ämnen efter filtrering genom granulerat aktivt kol. Utgående andel anges som funktion av antal bäddvolym, dvs. mängd filtrerat vatten. (Baresel m.fl. 2017 a)

Figuren visar att god rening för de olika läkemedlen kan uppnås direkt efter uppstart och bibehållas under åtminstone 25 000 bäddvolym, vilket med rimlig filtrerings hastighet (ungefär 5 m/h) motsvarar mer än ett halvårs drift.

Utifrån de långtidsförsök som genomförts (2 år) uppskattades och jämfördes inkommande respektive utgående mängder av olika ämnen. Skillnaden jämfördes sedan med de mängder som återfanns i kolet, se tabell 5.

Tabell 5. Materialbalans för ämnen som oftast kunde kvantifieras efter BAF(GAK).

Läkemedel	Totalt avskilt mg/kg GAK	Analyserat i kol mg/kg GAK	Återfunnet %
Citalopram	29,2	1,09	3,7
Diklofenak	67,9	0,13	0,2
Furosemid	49,2	0,57	1,2
Hydroklorotiazid	143,4	3,97	2,8
Ibuprofen	8,1	0,01	0,1
Karbamazepin	41,2	13,1	31,8
Metoprolol	82,5	3,15	3,8
Oxazepam	54,3	7,03	12,9
Propranolol	6,7	0,87	12,0

Huvuddelen av de olika ämnena har inte återfunnits. En förklaring kan vara att de brutits ner, helt eller delvis. Om ett GAK-filter medger både adsorption och biologisk nedbrytning kan, förutom mycket god reningseffekt, kapaciteten i ett filtersystem ökas vilket bland annat betyder sänkta kostnader. Utifrån resultat framtagna inom *SystemLäk* har även alternativa driftsätt (seriekoppling av filter) föreslagits vilka skulle medge sänkta kostnader och miljöpåverkan.

## Teknikval

Ingen reningsteknik ger fullständig rening från alla mikroförroeningar och alla tekniker har sina för- och nackdelar. Aktivt kol och ozonering ger emellertid var för sig hög reduktion för det stora flertalet läkemedel och för många andra organiska mikroförroeningar.

### **Projekt 4. Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – SystemLäk**





Inom *SystemLäk* har en av målsättningarna varit att göra en helhetsbedömning av olika systemlösningar och att lämna rekommendationer för implementering vid olika typer av avloppsreningsverk. Inom projektet har också några aspekter, som ibland glöms bort i debatten om läkemedelsrester, särskilt lyfts fram. Det gäller exempelvis det faktum att det ryms ett antal både organiska och icke-organiska förroeningar i begreppet mikroförroeningar. Det handlar alltså inte bara om läkemedel. Att rena bort mikroförroeningar från avloppsvatten kan i många fall innebära att flera mikroförroeningar hamnar i slammet vilket kan kräva en alternativ slamhantering. Pågående teknikutveckling bör också tas in i diskussioner om eventuella framtida reningskrav.

Vilken teknislösning som i slutändan ska väljas är en komplex fråga och kräver ett övervägande av många olika aspekter och förståelse för de förutsättningar som råder vid det enskilda avloppsreningsverket. Ett viktigt resultat från arbetet är att en god rening från läkemedelsrester och andra mikroförroeningar åstadkoms genom kombination av olika tekniker. Ozonering förutsätter exempelvis ett poleringssteg för att eliminera eventuell toxicitet men denna efterbehandling kan också klaras genom integrering i befintlig process. Biofilter med GAK (nedan benämnt BAF(GAK)), med en kombination av adsorption och biologisk nedbrytning, bedöms ge hög kapacitet och god avskiljning och föreslås som lösning efter en membranbioreaktor. För avloppsreningsverk med långtgående kväve-, fosfor och BOD-rening och låga partikelhalter i utgående vatten framhålls kombinationen ozonering och BAF(GAK) som ett bra alternativ. I tabell 6 redovisas reningseffekten för olika ämnen utifrån olika reningstekniker och teknikkombinationer.

Från projektet understryks också vikten av en väl fungerande huvudrening, i syfte att avskilja fosfor, kväve och syreförbrukande ämnen, vilket i praktiken betyder att detta bör säkerställas innan avancerad rening införs.

Tabell 6. Reningseffekt för olika ämnen, med olika tekniker (Baresel m. fl., 2017). UF – Ultrafiltrering, GAK – Granulerat aktivt kol, PAK – Pulveriserat aktivt kol, BAF – Biologiskt aktivt filter, O3 – Ozonering, BAF(GAK) avser en biologisk filtrering med GAK som filtermaterial.

Prioriterade mikroföroreningar och effekter	Reningsteknik/-kombination				
	O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	BAF(GAK)	PAK-UF	O <sub>3</sub> -BAF(GAK)	UF-BAF(GAK)
Azitromycin (antibiotikum)					
Ciprofloxacin (antibiotikum)					
Klaritromycin (antibiotikum)		#	#	#	#
Diklofenak (antiinflammatorisk)					
E2 (17β-estradiol) (hormon)				#	
EE2 (17α-etinylestradiol) (syntetiskt hormon)				#	
Erytromycin (antibiotikum)		#	#	#	#
Ibuprofen (antiinflammatorisk och smärtstillande)					
Karbamazepin (antidepressiv)					
Levonorgestrel (syntetiskt hormon)		#	#	#	#
Metoprolol (betablockerare, blodtryckssänkande)					
Oxazepam (ångestdämpande och lugnande)					
Propranolol (betablockerare, blodtryckssänkande)					
Sertralin (antidepressiv)					
Sulfametoxazol (antibiotikum)					
Trimetoprim (antibiotikum)			#		
Smittrisk (bakterier, patogener)					
Antibiotika resistens (ARB)					
Östrogena effekter (YES) (effekt av hormoner)			#		#
Bisphenol A (plastkemikalie, hormonstörande)					
Cybutryne/Irgarol (Herbicid)		#	#	#	#
Dioxiner och PCB (bl.a. i kylvätskor)		#	#	#	#
Endotoxiner (giftiga bioaerosoler)		#	#	#	#
Ftalater (t.ex. DEHP) (mjukgörare i plastprodukter)					
Flamskyddsmedel (t.ex. HBCD)					
Kloralkaner (C10 till C13) (Smörjvätskor)		#	#	#	#
Linjära alkylsulfonater (LAS) (C10 till C13)		#	#	#	#
Nonylfenol (bl.a. tillsats i rengöringsprodukter)					
Oktylfenol (bl.a. tillsats i rengöringsprodukter)					
PFAS (inkl. PFOS) (Tensid)					
Sukralos (Sötningemedel)					
Terbutryn (Herbicid)		#	#	#	#
Tributyltenn (TBT) (Biocid)		#	#	#	#
Triklorbensen (lösningsmedel & insekticid)		#	#	#	#
Trikloran (Antiseptikum)					
Tungmetaller <sup>2</sup> (lägre prioritering)		#	#	#	#
Mikroplaster 1 µm - 5 mm (lägre prioritering)					
Fosfor					
Kväve					
Organiskt material COD/BOD	*				
Partikelhalt					

	>>80%
	20-<80%
	<20%
	Ingen rening

# - förväntad effekt utifrån substansens egenskaper och teknikens reningsmekanism

1 - För en ozondos på mellan 0,5-1 mg O<sub>3</sub>/g DOC

2 - Förväntad effekt baseras på ett fåtal mätresultat för enstaka metaller och reningsmekanism

\* Kan frigöra hård bunden C, P och N för en efterföljande biologisk nedbrytning

# Kostnader och resursåtgång

Kostnader och miljöpåverkan vid införande av avancerad rening utgör viktiga pusselbitar för att kunna fatta beslut om avancerad rening. Kostnader har uppskattats inom flera av projekten. Inom ramen för *SystemLäk* har även livscykelanalyser genomförts.

## Resursanvändning och miljöpåverkan

För att kunna beskriva resursanvändning och emissioner till miljön har IVL inom *SystemLäk* genomfört en livscykelanalys enligt ISO14044:2206 (med modellering i programvaran Gabi 7.2). Med denna metodik beaktas, i utvärderingen av olika tekniker, exempelvis produktion av el och kemikalier vilka behövs för rening på avloppsreningsverket. Analysen har genomförts utifrån olika miljöindikatorer; klimatpåverkan, försurningspotential, övergödningspotential samt utarmning av icke-förnyelsebara energi- och materialresurser. Toxiska effekter ingår inte, företrädesvis beroende på begränsningar och osäkerheter i bedömning av toxicitetspotential.

De viktigaste slutsatserna från analysen är att:

- miljöpåverkan, per behandlad m<sup>3</sup>, blir mindre ju större anläggningen är.
- kombinationslösningar ger större miljöpåverkan än enskilda tekniker men ger samtidigt en större miljönytta då fler mikroföroreningar kan avlägsnas.
- tillverkning av aktivt kol har förhållandevis stor miljöpåverkan men utveckling mot biokol visar en potential att minska denna miljöpåverkan signifikant.
- ozonering har en relativt sett lägre miljöpåverkan än andra lösningar men då har rekommenderade efterpoleringssteg inte tagits med i bedömningen liksom ekotoxikologiska effekter av nedbrytningsprodukter.

Även om ozonering kräver mer energi vid avloppsreningsverket än vad filtrering genom aktivt kol gör bedöms miljöpåverkan vara lägre beroende på de CO<sub>2</sub>-emissioner som uppkommer vid tillverkning av aktivt kol. Även om det aktiva kolet regenereras uppkommer en förhållandevis hög miljöpåverkan eftersom ca 10 % nytt kol behöver tillsättas vid varje regenerering. Vid en jämförelse mellan ozonering och behandling med aktivt kol bör dock risken för uppkomst av toxiska transformationsprodukter vid ozonering övervägas. Risken kan reduceras om det finns ett efterföljande biologiskt steg.

## Kostnader

Det förekommer olika uppgifter om kostnaden för att införa läkemedelsrening vid ett avloppsreningsverk. Skillnaderna kan bland annat bero på vilken reningsgrad som eftersträvas för vilka ämnen, hur stora flödestoppar som

anläggningen dimensioneras för och vilken förbehandling eller andra omständigheter som förutsätts. Även inom de av HaV finansierade projekt har olika kostnader redovisats.

*RESVAVs* kostnader är beräknade kostnader för en dimensionerad typanläggning. Där ingår kapitalkostnader och driftkostnader med undantag för personal- och underhållskostnader. Moms ingår inte.

*SystemLäk* har definierat förhållanden för varje teknik som kostnadsberäkningar gjordes för. Detta inkluderar bl.a. processspecifika nyckeltal som kontakttid, doser, typ av aktivt kol, etc. Baserat på detta dimensioneringsunderlag har sedan ett antal svenska och utländska leverantörer lämnat specifika offerter för installation och drift av ett antal typreningsverk av varierande storlek. Kostnadsberäkningar från leverantörer som inte använt de bestämda dimensioneringsgrunderna har utelämnats från redovisningen.

För anläggningarna i Linköping, Knivsta och Kristianstad har de faktiska kostnaderna angetts. Notera dock att kostnaderna för Kristianstads anläggning enbart omfattar driftkostnader. För mer detaljer hänvisas till respektive projekt. Kostnaderna tillsammans med förutsättningarna för kostnadsberäkningarna har angivits i tabell 7 (ozonering) och tabell 8 (GAK).

Tabell 7. Några nyckeltal för reningsanläggningar med ozonbehandling. Avser förhållanden för en anläggning för 100 000 personekvivalenter (pe) om inget annat anges.

	SystemLäk	RESVAV	Tekniska verken, Linköping	Knivsta
Kostnad, SEK/m <sup>3</sup>	0,19 - 0,20	0,3 - 0,4	0,25 - 0,3***	0,7 ** (0,9*)
Kostnad, SEK/PE/år	28 - 30	41 - 54	17 - 20	74
Medelflöde till ARV, l/PE/d	410	370	185	290
Max flöde till ozonanläggning, l/PE/d	410	410	306	1120
Uppehållstid i kontaktbassäng vid medel/max flöde, minuter	>10	33/30	20/12	30/11
Volym kontaktbassäng, l/PE	-	8,5	2,6	8,3
Ozondos, g O <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>	5	7	4 - 8	7 (3 - 9)
Ozonåtgång, g O <sub>3</sub> /PE/år	-	850	447	636
Elförbrukning anläggning, kWh/pe/år	15 / 45	17	10	8,1
Efterföljande biologiskt steg som ingår i kostnad	Inga	Inga	Inga	Kontaktfilter
Anpassningar till befintligt ARV som ingår i kostnad	Inga	Inga	Röjning inför bygge	Pumpning
I angiven elförbrukning ingår produktion av O <sub>2</sub>	Ja - den högre siffran	Ja	Nej	Nej
produktion av Ozon från O <sub>2</sub>	Ja	Ja	Ja	Ja

\* För den faktiska belastningen som var 12 000 pe. \*\* Uppskalat till 100 000 pe. \*\*\* 235 000 pe.

Reningsgraden för själva ozonbehandlingssteget anges vara från 80 % till mer än 90 % för de olika läkemedelspaket som bedömts eller analyserats i studierna. Reningsgraden över hela reningsverket kan bli högre när reningen i övriga reningssteg medräknas, eller lägre på grund av att inte allt vatten vid höga flöden leds genom reningssteget för läkemedelsrening. Den högre kostnaden per kubikmeter vid anläggningen i Knivsta, förklaras delvis av att ozonbehandlingen är dimensionerad för ett mycket högt flöde för att kunna behandla allt vatten under hela året. Ytterligare delförklaringar är att det i Knivstas kostnad ingår ett efterföljande kontaktfilter och pumpning från den befintliga anläggningen. Skillnader i flödesvariationer och andra



förutsättningar innebär att man räknar med olika storlek på kontaktbassängen per person i de olika projekten. Den angivna ozonförbrukningen för alla projekt förutsätter att avloppsvattnet först är biologiskt renat i en nitrifierande anläggning (till < 10 mg DOC/l) för att minimera mängden löst organiskt material som förbrukar ozon. *SystemLäk* påtalar därtill att hänsyn måste tas till eventuella andra ozonförbrukande ämnen som järn eller nitrit.

**Tabell 8.** Några nyckeltal för reningsanläggningar med granulerat aktivt kol. Avser förhållanden för 100 000 personekvivalenter (pe) om inget annat anges.

	SystemLäk	RESVAV	Knivsta	Kristianstad
<b>Kostnad, SEK/m<sup>3</sup></b>	0,35 – 0,60	0,8 – 1,1	1,1*	(0,17**)
<b>Kostnad, SEK/PE/år</b>	52 - 90	108 - 148	-	(12)**
<b>Medelflöde, l/PE/d</b>	410	370	-	194
<b>Max flöde genom filter, l/PE/d</b>	410	410	400	486
<b>Upphållstid i filter (EBCT) vid medel/max, minuter</b>	x/15	23/20	17/12	30/12
<b>Ytbelastning filter vid medel/max flöde, m/h</b>	3,5 /4,8	2,6/2,8	3,4/4,7	2/5
<b>Volym i filter, l/PE</b>		6	2 - 4	4,0
<b>Tid mellan backspolningar, timmar</b>	48 - 2000	48	35	***
<b>Andel av det behandlade flödet till backspolning, %</b>	-	5	6	***
<b>Andel av kol som regenereras, %/år</b>	-	100	106	100
<b>Elförbrukning anläggning, kWh/pe/år</b>	<1,5	3		0
<b>För GAK ingår regenerering</b>	Ja	Ja		Ja
<b>... förbränning</b>			Ja	

\* Pilotanläggning för 8 pe uppskalat till 100 000 pe. \*\* Driftkostnad för pilotanläggning för 250 pe (ej kapitalkostnader). \*\*\* Filtret backspolas inte.

För behandling med granulerat aktivt kol varierar förutsättningarna men projekten uppskattar reningsgraden i själva filtret till 90 – 95 % och det förutsätts att vattnet är väl biologiskt renat före filtret. Den antagna

uppehållstiden i filtret liksom intervall mellan backspolningar varierar något mellan projekten. Det tillsammans med olika antaganden avseende flödesfördelning innebär att filtervolymen som behövs per pe, och därmed kostnaden, varierar. Filterspolvattnet förutsätts recirkuleras till reningsverket, för de anläggningar som spolar sina filter, men inga kostnader för detta är medräknade. Man räknar med att regenerera allt kol på ca ett år och att 10 % nytt kol måste tillsättas vid regenerering. Elförbrukningen för GAK är låg, särskilt om man som i Kristianstadsfallet inte behöver pumpa vattnet till eller från filtret.

Kostnadsberäkningar gjorda i Tyskland, Nederländerna och Schweiz indikerar något högre kostnader per m<sup>3</sup>. Det är dock viktigt att komma ihåg att förutsättningarna är olika (se Cimbritz m.fl., 2016 för mer information).

# Slutord

Arbetet i de olika projekten visar att det finns teknik som kan tillämpas på kommunala avloppsreningsverk i syfte att avlägsna olika typer av mikroförureningar, däribland läkemedelsrester. Var åtgärder bör sättas in beror på olika faktorer, men i kraft av det arbete som genomförts finns det nu både kunskap om och driftserfarenhet av olika tekniska lösningar. De lösningar som utvärderats baseras i huvudsak på ozonering eller aktivt kol och olika kombinationslösningar där det visat sig mycket viktigt att på ett förnuftigt sätt integrera de nya reningsteknikerna med befintliga reningsprocesser. Lösningarna har i de flesta fall testats och utvärderats i nära samarbete med personal på avloppsreningsverk runt om i landet, vilket är en förutsättning för att kunna utvärdera teknikerna på ett trovärdigt sätt.

I de olika projekten har inte bara ny teknik testats utan det har även kunnat beskrivas hur olika tekniska lösningar kan anpassas till olika, svenska, avloppsreningsverk. Samtidigt har studier genomförts som öppnar för nya forsknings- och utvecklingsprojekt där de parter som arbetat inom nuvarande utlysning kan bidra till och leda utvecklingen av framtidens avloppsvattenrening. Det gäller exempelvis ekotoxikologiska effekter av ozonering, utveckling och förståelse av tillämpningar med aktivt kol och utveckling av analysteknik.

Med införande av ny teknik för rening från ämnen som uppträder i mycket låga koncentrationer i en besvärlig matris (avloppsvatten) står vi inför en rad analystekniska utmaningar. Utifrån det analysarbete som gjorts i de olika projekten och med den interkalibreringsstudie som genomförts har viktiga steg tagits mot ökad förståelse för den problematik som omger analys av mikroförureningar. Det är mycket viktigt att det arbetet fortsätter och att fler steg tas mot erfarenhetsutbyte och standardisering.

I kraft av det arbete som genomförts har olika lösningar demonstrerats både i pilot- och i fullskala. I Linköping visades hur klivet från pilot till fullskala kan tas och i Knivsta hur ozonering kan tillämpas i fullskala och vilka effekterna blir i recipienten. I Lund utvärderades ozonering i pilotförsök vid flera olika typer av avloppsreningsverk och samtidigt togs de första stegen mot en integrerad process med PAK och MBBR. IVL har testat flera olika tekniker och med hjälp av livscykelanalys visat hur dessa kan tillämpas och kombineras för att skapa resurseffektiva systemlösningar. I Kristianstad demonstrerades potentialen för tillämpning av aktiva kolfilter parallellt med utveckling av analysteknik för att öka förståelsen för vad som händer i ett kolfilter och hur man bör välja aktivt kol. JTI (numera RISE) har visat att alla lösningar inte nödvändigtvis behöver baseras på ny teknik utan att systemförändringar också kan vara motiverade. Genom regeringens satsning och arbetet i de olika projekten har det skapats en mycket stark plattform att bygga vidare på för införande av avancerad rening vid svenska avloppsreningsverk.

# Referenser

- Abegglen, C. & Siegrist, H. (2012). *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser – Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen*. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern 2012.
- Allard, A.-S., Wahlberg, C. (2017). *Förekomst och reduktion av fokusämnen i fyra reningsverk*. Delrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2279.
- Baresel, C., Cousins, A.P., Hörsing, M., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.S., Magnér, J., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Söhr, S. (2015). *Pharmaceutical residues and other emerging substances in the effluent of sewage treatment plants - Review on concentrations, quantification, behaviour, and removal options*. IVL Swedish Environmental Research Institute, Report 2226, Stockholm.
- Baresel, C., Malmborg, J., Ek, M., Sehlén, R. (2016). Removal of pharmaceutical residues using ozonation as intermediate process step at Linköping WWTP, Sweden. *Water Science & Technology*, 73, 8, 2017-2024.
- Baresel, C., Ek, M., Harding, M., Magnér, J., Allard, A.-S., Karlsson, J. (2017 a). *Kompletterande tester för en resurseffektiv avancerad rening av avloppsvatten*. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B 2287, Oktober 2017.
- Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Söhr, S. (2017 b). *Handbok för rening av mikroföroreningar vid avloppsreningsverk - Planering och installation av reningstekniker för läkemedelsrester och andra mikroföroreningar*. Slutrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2288.
- Björklund, E. & Svahn, O. (2017). *LUSKA Läkemedelsutsläpp från skånska Avloppsreningsverk 2017. Ett utvecklings- och samverkansprojekt på Högskolan Kristianstad i samarbete med Region Skåne och 6 skånska reningsverksaktörer*, Högskolan Kristianstad Rapport (2017); 58 sidor.
- Cimbritz, M., Tumlin, S., Hagman, M., Dimitrova, I., Hey, G., Mases, M., Åstrand, N., Jansen, J. la Cour (2016). *Rening från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar - En kunskapsmanställning*. Svenskt Vatten Utveckling, Rapport 2016-04.
- Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy.

- Ekblad, M., Cimbritz, M., Nilsson, F., El-taliawy, H., Tumlin, S., Bester, K., Mattsson, A., Blom, L., Ståhlhandske, L., Jansen, J. la Cour. (2015). *Ozonering för nedbrytning av organiska mikroförureningar – Pilottester i södra Sverige*. VA-teknik Södra, Rapport 02.
- Falås, P, Longrée, P, la Cour Jansen, J, Siegrist, H, Hollender, J, Joss, A. (2013). Micropollutant removal by attached and suspended growth in a hybrid biofilm-activated sludge process, *Water Research*, 47, 13, 4498-4506.
- Falås, P, Wick, A, Castronovo, S, Habermacher, J, Ternes, T, Joss, A. (2016). Tracing the limits of organic micropollutant removal in biological wastewater treatment, *Water Research*, 95, 240-249.
- Fick, J., Lindberg, R., Tysklind, M., Parkkonen, J., Arvidsson, B., Larsson, J. (2010). Therapeutic levels of levonorgestrel detected in blood plasma of fish: results from screening rainbow trout exposed to treated sewage effluents, *Environmental Science and Technology*, 44, 7, 2661-2666.
- HVMFS (2015). *Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljö kvalitetsnormer avseende ytvatten*, HVMFS 2015:4.
- Högstrand, S., Ignell, M (2018) *Möjligheten att kombinera pulveriserat aktivt kol (PAK) och MBBR för avskiljning av organiska mikroförureningar*. Institutionen för Kemiteknik, Lunds Universitet, Examensarbete 2018-02.
- Joss, A., Siegrist, H., Ternes, T. (2008). Are We About To Upgrade Wastewater Treatment For Removing Organic Micropollutants, *Water Science & Technology*, 57, 2, s. 251-255.
- Keen, P. och Montforts, M, (2012). *Antimicrobial Resistance in the Environment*. WILEY & SONS, INC.
- Larsson, J., Adolfsson-Erici, M., Parkkonen, J., Pettersson, M., Berg, A., Olsson, P., Förlin, L. (1999). Ethinyloestradiol – an undesired fish contraceptive, *Aquatic Toxicology*, 45, 91-97.
- Levén, L., Eveborn, D., Ljung, E., Gros Calvo, M., Dalahmeh, S., Jönsson, H., Ahrens, L., Wiberg, K., Lundin, G. (2016). *Läkemedel i källsorterat klosettwater och latrin*. RKA 54. JTI – Institutet för jordbruks-och miljöteknik.
- Magnér, J., Fång, J., Sandberg, J., Örtlund, L. (2017). *Utveckling av analysmetoder inklusive detektionsgränser*. Delrapport inom SystemLäk - Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2286.
- Paxéus, N., Bester, K., El-taliawy, H. (2016). Temporal variations and trends of loads of commonly used pharmaceuticals to large wastewater treatment

- plants in Sweden, a case study (Ryaverket). *Water Science & Technology*, 73, 12, 3049-3056.
- Paxéus, N. (2018). Läkemedelsbelastningen till svenska  
Avloppsreningsverk - En sammanställning. VA-teknik Södra Rapport Nr 09  
2018.
- Pohl, J, Björleinius, B, Brodin, T, Carlsson, G, Fick, J, Larsson, D, Norrgren, L,  
& Örn, S. (2018). Effects of Ozonated Sewage Effluent on Reproduction and  
Behavioral Endpoints in Zebrafish (*Danio rerio*), *Aquatic Toxicology*,  
January 2018.
- Schlüsener, M., Bester, K. (2008). Behavior of Steroid Hormones and  
Conjugates During Wastewater Treatment – A Comparison of Three Sewage  
Treatment Plants, *Clean Soil Air Water*, 2008, 36 (1), s. 25 – 33.
- Sehlén, R., Malmberg, J., Baresel, C., Ek, M., Magnér, J., Allard, A-S., Yang, J.  
(2015). *Pilotanläggning för ozonoxidation av läkemedelsrester i  
avloppsvatten*. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B 2218.
- Svahn, O. & Björklund, E. (2015). Describing sorption of pharmaceuticals to  
lake and river sediments, and sewage sludge from UNESCO Biosphere  
Reserve Kristianstads Vattenrike by chromatographic asymmetry factors  
and recovery measurements, *Journal of Chromatography A*, 1415 (2015)  
73–82.
- Wang, H., Sikora, P., Rutgersson, C., Lindh, M., Brodin, T., Björleinius, B.,  
Larsson, D.G.J., Norder, H. (2018). Differential removal of human  
pathogenic viruses from sewage by conventional and ozone treatments.  
*International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221, 479-  
488.

## Bilaga I – Vidare läsning

Det finns ett stort antal olika publikationer att tillgå för den som är intresserad av fortsatt och fördjupad läsning. Flera av dem är tillgängliga på nätet, exempelvis via IVL Svenska Miljöinstitutet eller de olika lärosätenas hemsidor. I skrivande stund arbetas det också på olika publikationer. I några fall anges därför titlar på planerade vetenskapliga artiklar. Det kan vara klokt att kontakta respektive projektledare för att försäkra sig om vilka artiklar som faktiskt publicerats eller förväntas bli publicerade inom den närmaste framtiden.

De olika projekten har rönt stort intresse runt om i Sverige och har på olika sätt omnämnts i såväl tidningar som i radio och TV. Kontakta gärna respektive projektledare vid intresse för vad som skrivits *om* de olika projekten. Nedan följer en sammanställning av de publikationer som tagits fram av de olika projekten.

### Läkemedel i källsorterat klosettwater och latrin – behandling och risker (LäK)

Levén, L., Eveborn, D., Ljung, E., Gros Calvo, M., Dalahmeh, S., Jönsson, H., Ahrens, L., Wiberg, K., Lundin, G. (2016) *Läkemedel i källsorterat klosettwater och latrin*. RKA 54. JTI – Institutet för jordbruks-och miljöteknik.

#### *Planerad publikation*

Gros M. et al. Occurrence and fate of pharmaceuticals in source separated sanitation systems: fecal sludge anaerobic digestion and blackwater liquid composting followed by ammonia treatment.

### Pilotanläggning för ozonoxidation vid Tekniska verken i Linköping

Baresel, C., Ek, M., Malmberg, J., & Sehlen, R. (2016) Removal of pharmaceutical residues using ozonation as intermediate process step at Linköping WWTP, Sweden, *Water Science and Technology*, 73, 8, s. 2017-2024.

Sehlén, R., Malmberg, J., Baresel, C., Ek, M., Magnér, J., Allard, A-S., Yang, J. (2015), *Pilotanläggning för ozonoxidation av läkemedelsrester i avloppsvatten*. Rapport nr B 2218, Februari 2015. IVL Svenska miljöinstitutet.

## Fullskalig rening av mikroföroreningar – FRAM

*FRAM har syns flitigt i olika media, exempelvis i Sveriges Radio P4, SVT, TV4, Kristianstadsbladet och ett antal olika tidskrifter. Kontakta gärna projektledaren för en fullständig förteckning.*

- Björklund, E. & Svahn, O. (2017) Interkalibrerad läkemedelsanalys 2017 – ett samarbetsprojekt för ökad analyskvalité, Högskolan Kristianstad Rapport (2017); 62 sidor.
- Björklund, E. & Svahn, O. (2017) LUSKA Läkemedelsutsläpp från skånska Avloppsreningsverk 2017. Ett utvecklings- och samverkansprojekt på Högskolan Kristianstad i samarbete med Region Skåne och 6 skånska reningsverksaktörer, Högskolan Kristianstad Rapport (2017); 58 sidor.
- Björklund, E., Svahn, O., Bak, S., Bekoe, S., Hansen, M. (2016) Pharmaceutical Residues Affecting the UNESCO Biosphere Reserve Kristianstads Vattenrike Wetlands: Sources and Sinks. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 71 (2016) 423–436.
- Svahn, O., Björklund, E., Ross, E. (2017) Analysis of Macrolides and Three Other Antibiotic Classes at Low ppt Levels in WWTP Effluent and Surface Waters by LC-MS/MS., Technology Brief, May (2017), ©2017 Waters Corporation.
- Svahn, O. & Björklund, E. (2016) Increased electrospray ionization intensities and expanded chromatographic possibilities for emerging contaminants using mobile phases of different pH, Journal of Chromatography B, 1033 (2016) 1–10.
- Svahn, O. (2016) Tillämpad miljöanalytisk kemi för monitorering och åtgärder av antibiotika- och läkemedelsrester i Vattenriket. Center for Environmental Studies and Climate Research, Lunds Universitet. ISBN 978-91-7623-774-8
- Svahn, O. & Björklund, E. (2015) Describing sorption of pharmaceuticals to lake and river sediments, and sewage sludge from UNESCO Biosphere Reserve Kristianstads Vattenrike by chromatographic asymmetry factors and recovery measurements, Journal of Chromatography A, 1415 (2015) 73–82.
- Slam i kolonnen ger resultat. Kemivärlden Biotech med Kemisk Tidskrift, Nr 7 november 2015; 30-31.



## Systemförslag för rening av läkemedelsrester och andra prioriterade svårnedbrytbara ämnen – SystemLäk

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

Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Söhr, S. (2017) *Handbok för rening av mikroföroreningar vid avloppsreningsverk - Planering och installation av reningstekniker för läkemedelsrester och andra mikroföroreningar*. Slutrapport SystemLäk projekt. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2288.

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

Baresel, C., Cousins, A.P., Hörsing, M., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.S., Magnér, J., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Söhr, S. (2015) *Läkemedelsrester och andra skadliga ämnen i avloppsreningsverk - koncentrationer, kvantifiering, beteende och reningsalternativ - Svensk sammanfattning av Rapport B2226*. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2226-P, Stockholm.

### *Konferensbidrag*

Baresel, C., Ek, M., Harding, M., Magnér, J. (2017) *Long-time experiment with biological active filter (BAF) for removal of pharmaceutical residues*. NORDIWA - Nordic Wastewater Conference, 10-12 October, Aarhus, Denmark.

Magnér, J., Örtlund, L., Fång, J., Baresel, C. (2017) *Fate of pharmaceuticals in sewage and sludge*. NORDIWA - Nordic Wastewater Conference, 10-12 October, Aarhus, Denmark.

Baresel, C., Ejhed, H., Westling, K., Fortkamp, U., Hörsing, M., Magnér, J., Allard, A.S., Wahlberg, C., Söhr, S. (2015) *Removal of Pharmaceutical Residues and Other Priority Contaminants in the Effluent of Sewage Treatment Plants*. WWTP-0101, 12th IWA LWWTPL, September 2015, Prag.

### *Examensarbeten*

Alcala Borao, R. (2015) *Oxidation of pharmaceuticals by chlorine dioxide in wastewater effluent*. Examensarbete LWR - EX - 2015:16, Kungl tekniska Högskolan KTH & IVL Svenska Miljöinstitutet, Stockholm.

Mparmpagianni, S. (2016) *Powdered activated carbon (PAC) addition in membrane bioreactor (MBR) for increased removal of organic pollutants*

*in municipal wastewater*. Dept. of Environmental Science and Analytical Chemistry, Division of Analytical and Toxicological Chemistry, Stockholm University IVL Swedish Environmental Research Institute.

### *Annat material*

**Broschyr** – Rening av mikroföroreningar vid ARV

**Leaflet** – Removal of micropollutants in WWTPs

**Presentation** - How to Guide – Removal of micropollutants in WWTPs

**Presentation** - Vägledning – Rening av mikroföroreningar vid ARV

## Utvärdering av avancerad rening i fullskala

Pohl, J, Björleinius, B, Brodin, T, Carlsson, G, Fick, J, Larsson, D, Norrgren, L, & Örn, S. (2018), Effects of Ozonated Sewage Effluent on Reproduction and Behavioral Endpoints in Zebrafish (*Danio rerio*), *Aquatic Toxicology*, January 2018.

Wang, H., Sikora, P., Rutgersson, C., Lindh, M., Brodin, T., Björleinius, B., Larsson, D.G.J., Norder, H. (2018). Differential removal of human pathogenic viruses from sewage by conventional and ozone treatments. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221, pp. 479-488.

### *Planerade publikationer*

Ytterligare tre publikationer är under arbete, en som fokuserar på processen i reningsverket under ozonering, en som fokuserar på de ekologiska effekterna i recipient och en som tittar på den mikrobiella påverkan och förekomsten av resistensgener. Även en sammanställande rapport planeras till hösten.

## Rening av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten – RESVAV

Cimbritz, M., Tumlin, S., Hagman, M., Dimitrova, I., Hey, G., Mases, M., Åstrand, N., Jansen, J. la Cour (2016) *Rening från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar - En kunskapssammanställning*. Svenskt Vatten Utveckling, Rapport 2016-04.

Ekblad, M., Cimbritz, M., Nilsson, F., Ernst, G., El-taliawy, H., Tumlin, S., Bester, K., Hagman, M., Mattsson, A., Blom, L., Stålhandske, L., Jansen, J. la Cour (2015) *Ozonering för nedbrytning av organiska mikroföroreningar – Pilottester i södra Sverige*. VA-teknik Södra, Rapport Nr. 04.

El-taliawy, H, Ekblad, M, Nilsson, F, Hagman, M, Paxeus, N, Jönsson, K, Cimbritz, M, la Cour Jansen, J, & Bester, K. (2017) Ozonation efficiency in removing organic micro pollutants from wastewater with respect to hydraulic loading rates and different wastewaters, *Chemical Engineering Journal*, 325, 310-321.

- El-taliawy, H, Casas, M, & Bester, K. (2018) Removal of ozonation products of pharmaceuticals in laboratory Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs), *Journal of Hazardous Materials*, 347, 288-298.
- Mases, M., Wärff, C., Öhrström, E. (2017) Kostnadsbedömning för införande av tekniker för avskiljning av svårnedbrytbara ämnen. Rapport, Uppdragsnummer 1234211000, SWECO, Malmö.
- Nilsson, F., Ekblad, M., Jansen, J. la Cour., Jönsson, K. (2017) Removal of pharmaceuticals with ozone at 10 Swedish wastewater treatment plants, *Water, Practice & Technology*, 12(4), 871-881.
- Paxéus, N (2018) *Läkemedelsbelastningen till svenska avloppsreningsverk – en sammanställning*. VA-teknik Södra, Rapport Nr. 09.
- Paxeus, N, Bester, K, & El-Taliawy, H. (2016) Temporal variations and trends in loads of commonly used pharmaceuticals to large wastewater treatment plants in Sweden, a case study (Ryaverket), *Water Science And Technology*, 73, 12, 3049-3056

#### *Konferensbidrag*

- Ekblad, M., Cimbritz, M., Mattsson, A., Bester, K., El-taliawy, H., Jansen, J. la Cour (2015) *Considerations for removal of organic micropollutants at Swedish wastewater treatment plants*. Poster vid NORDIWA 2015-Nordic Wastewater Conference, 4-6:e November 2015, Bergen, Norge.

#### *Examensarbeten*

- Isgaard, P., Thörnqvist, E (2016) *Integration of powdered activated carbon in tertiary disc filtration of wastewater*. Institutionen för Kemiteknik, Lunds Universitet, Examensarbete 2016-10.
- Högstrand, S., Ignell, M (2018) *Möjligheten att kombinera pulveriserat aktivt kol (PAK) och MBBR för avskiljning av organiska mikroföroreningar*. Institutionen för Kemiteknik, Lunds Universitet, Examensarbete 2018-02.

#### *Planerade publikationer*

- Ekblad, M., Falås, P., El-taliawy, H., Nilsson, F., Bester, K., Hagman, M., Cimbritz, M. Is dissolved COD a suitable design parameter for ozone oxidation of organic micropollutants in wastewater?
- Cimbritz, M., Edefell, E., Thörnqvist, E., Ekblad, M., El-taliway, H., Ekenberg, M., Bester, K., Hagman, M., Falås, P. Combining PAC-adsorption and nitrification in an MBBR.

# Reningstekniker för läkemedel och mikroföroreningar i avloppsvatten

Redovisning av åtta projekt som fått medel från Havs- och vattenmiljöanslaget 2014-2017

På uppdrag av regeringen har Havs- och vattenmyndigheten under åren 2014-2017 finansierat olika projekt för utveckling av reningsteknik i syfte att minska utsläpp av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar från kommunala avloppsreningsverk. I denna rapport beskrivs i korthet och i populärvetenskaplig form bakgrunden till arbetet och resultat från de olika projekten. Kostnader för olika reningstekniker har tagits fram och sammanfattas i rapporten som också erbjuder vägar vidare för den intresserade läsaren. Resultaten visar att det finns teknik som idag kan tillämpas på kommunala reningsverk i syfte att avlägsna olika typer av mikroföroreningar, däribland läkemedelsrester. Genom regeringsuppdraget och arbetet i de olika projekten har det skapats en mycket stark plattform att bygga vidare på för införande av avancerad rening vid svenska avloppsreningsverk.

Havs- och vattenmyndighetens rapport 2018:7  
ISBN 978-91-87967-96-2

Havs- och vattenmyndigheten  
Postadress: Box 11 930, 404 39 Göteborg  
Besök: Gullbergs Strandgata 15, 411 04 Göteborg  
[www.havochvatten.se](http://www.havochvatten.se)