VA-teknik Södra

Rapport Nr. 11
2018

Reduktion av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten (RESVAV)

en projektsammanställning

Michael Cimbritz

VA-teknik Södra

Förord

Projektet *Reduktion av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten* (*RESVAV*) startades sommaren 2014 och avslutades vid årsskiftet 2017/2018. Projektet utgör en del av den regeringssatsning på avancerad rening av avloppsvatten som finansierats genom Havs- och vattenmyndigheten, anslaget 1:12 Åtgärder för havs- och vattenmiljö. Denna satsning sammanfattas i rapporten *Reningstekniker för läkemedel och mikroföroreningar i avloppsvatten* (Havs- och vattenmyndigheten 2018) vilken innefattar arbete utfört i såväl *RESVAV* som i de andra projekt som beviljades medel inom samma satsning. I föreliggande rapport lyfts de olika huvudmomenten från *RESVAV* fram med hänvisningar till de olika publikationer som tagits fram inom projektet.

Många har på olika sätt bidragit till arbetet och omnämns i respektive publikation. Ett särskilt tack riktas till anläggningsägare, driftpersonal och andra som varit inblandade i de försök som utförts på olika håll i södra Sverige. Tack även till Christian Abbeglen (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute) och Norbert Jardin (Ruhrverband) för värdefulla insatser i projektets inledning.

I projektets styrgrupp har Jes la Cour Jansen (institutionen för Kemiteknik vid Lunds universitet), Marinette Hagman (NSVA/SWR), Ann Mattsson (Gryaab), Lena Blom (Kretslopp och Vatten, Göteborg Stad), Henrik Aspegren (VA SYD) och Liselotte Ståhlhandske (VA SYD, numera Hässleholms Vatten AB) under olika perioder ingått. Michael Cimbritz har fungerat som projektledare. I projektet har medarbetare från institutionen för Kemiteknik vid Lunds universitet, Sweden Water Research, Gryaab, VA SYD, NSVA, Primzone Production AB, Sweco Environment och Aarhus universitet deltagit.

Sammanfattning

Svenska avloppsreningsverk är inte konstruerade för rening från läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar. Effektiv rening från ett brett spektrum av dessa ämnen förutsätter kompletterande reningsmetoder. Projektet *Reduktion av svårnedbrytbara föroreningar i avloppsvatten* (*RESVAV*) startades sommaren 2014 och avslutades vid årsskiftet 2017/2018 och utgör en del av den regeringssatsning på avancerad rening av avloppsvatten som finansierats genom Havs- och vattenmyndigheten.

Syftet med denna rapport är att sammanfatta resultaten från arbetet i projektet och att erbjuda vägar vidare för den intresserade läsaren. Projektets mål har varit utveckling av reningsprocesser avsedda för reduktion av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar. I praktiken har det inneburit både processutveckling och etablering av dimensioneringskriterier för avancerad rening.

Arbetet har i huvudsak varit inriktat mot ozonering. Flera pilotstudier har genomförts vid olika avloppsreningsverk i syfte att studera doseringsbehov och andra kritiska parametrar. Försöken har genomförts i nära samarbete med personal från berörda organisationer vilket är en stor fördel både för utvärdering och kunskapsspridning. Pilotförsöken visar att ozonering fungerar för reduktion av ett brett spektrum av ämnen men också att doseringsbehov varierar mellan olika avloppsreningsverk. Med projektet togs också ett steg mot en ny processkombination med dosering av pulveriserat aktivt kol (PAK) till en process med rörliga biofilmsbärare (MBBR). Långtidsförsök visar att en sådan kombination är möjlig.

Inom ramen för projektet har även kostnader för olika processlösningar och typer av avloppsreningsverk uppskattats. Kostnaderna sjunker med ökande anläggningsstorlek men varierar mellan tekniker och beror också på hur den befintliga infrastrukturen kan utnyttjas.

Var i landet åtgärder bör sättas in beror på olika faktorer, men i kraft av det arbete som genomförts i detta och andra projekt inom utlysningen finns det nu både kunskap om och driftserfarenhet av olika tekniska lösningar samt en bild av vad det kostar att införa teknikerna. Genom arbetet har också en viktig plattform för fortsatta studier etablerats liksom en viktig kunskapsbas för att tillsammans med de som varit aktiva inom de andra projekten kunna bidra till en framtida utbyggnad av svenska avloppsreningsverk.

Summary

Swedish wastewater treatment plants are not designed for removal of pharmaceutical residues and other persistent contaminants. Removal of a wide range of these substances requires complementary treatment methods. The project *RESVAV* was started in the summer of 2014 and ended at year-end 2017/2018 and is a part of the Swedish government's investment in advanced treatment of wastewater managed by the Swedish Agency for Marine and Water Management.

The purpose of this report is to summarize the results of the work in *RESVAV* and to provide a compilation of the publications produced. The aim of the project has been to develop treatment processes intended for reduction of pharmaceutical residues and other organic micro-pollutants. In practice, this has meant both process development and establishment of design criteria for advanced treatment.

The work has mainly been focused on ozonation. Several pilot studies have been carried out at various wastewater treatment plants with the aim of studying dosage requirements and other critical parameters. The research has been carried out in close collaboration with staff at the wastewater treatment plants, which is a great advantage both for evaluation and knowledge dissemination. The pilot experiments show that ozonation works for reduction of a wide range of substances, but also that, for example, dosing requirements vary considerably between different sewage treatment plants. The project also took a step towards a new process combination with dosing of powdered activated carbon (PAC) into a process with moving biofilm carriers (MBBR). Long-term trials show that such a combination is possible.

Within the framework of the project, costs for various process solutions and types wastewater treatment plants have also been estimated. The costs decrease with increasing plant size but vary between technologies and also depend on how the existing infrastructure can be utilized.

Where in the country measures should be implemented depends on various factors, but by virtue of the work carried out in this and other projects within the call for proposals, there is now both knowledge and operational experience of various technical solutions and estimations of what it costs to introduce the technologies. The work has also established an important platform for further studies as well as an important knowledge base in order to be able, together with those who have been active in the other projects, to contribute to future upgrades of Swedish wastewater treatment plants.

Innehållsförteckning

1 Inledning ... 1
1.1 Syfte ... 2
1.2 Rapportstruktur ... 2
2 Svenska avloppsreningsverk ... 3
2.1 Processkonfigurationer ... 3
2.2 Mikroföroreningar i avloppsvatten ... 5
2.3 Fortsatt läsning ... 7
3 Avancerad rening i andra länder ... 9
3.1 Fortsatt läsning ... 9
4 Avancerad rening vid svenska avloppsreningsverk ... 11
4.1 Ozonering ... 11
4.2 Pulveriserat aktivt kol ... 12
4.3 Fortsatt läsning ... 14
5 Ozonering ... 15
5.1 Processutformning ... 15
5.2 Nyckeltal ... 15
5.3 Pilotförsök ... 16
5.4 Avskiljning ... 18
5.5 Efterbehandling ... 19
5.6 COD eller DOC? ... 19
5.7 Fortsatt läsning ... 20
6 Aktivt kol ... 23
6.1 Varför PAK? ... 23
6.2 Pilotförsök ... 24
6.3 Nyckeltal ... 24
6.4 Fortsatt läsning ... 25
7 Processval och kostnader ... 27
7.1 Utgångspunkter för kostnadsbedömningar ... 27
7.2 Processkonfiguration och val av reningsteknik ... 28
7.3 Dimensionerande flöden ... 29
7.4 Specifika kostnader ... 30
7.5 Fortsatt läsning ... 31
8 Slutord ... 33
9 Referenser ... 35

1 Inledning

Svenska avloppsreningsverk är inte konstruerade för rening från läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar. Effektiv rening från ett brett spektrum av dessa ämnen förutsätter kompletterande reningsmetoder, vilket uppmärksammats i flera olika studier, exempelvis i det regeringsuppdrag som redovisats i rapporten *Avloppsreningsverkens förmåga att ta hand om läkemedelsrester och andra farliga ämnen* (Naturvårdsverket 2008). Ett antal studier har visat att läkemedel finns i den akvatiska miljön och att utsläpp av renat avloppsvatten är en viktig punktkälla. Allt fler studier visar också att läkemedlen kan ge upphov till oönskade biologiska effekter. Naturvårdsverket har i flera övervakningsprogram också undersökt halterna av läkemedel i olika matriser i miljön (Andersson m.fl., 2006, Woldegiorgis m.fl., 2007 och Fick m.fl., 2011). Utsläpp från skånska avloppsreningsverk har nyligen beskrivits av Björklund & Svahn (2017).

Att skydda den akvatiska miljön är en viktig drivkraft för införande av avancerad rening. Att skapa möjligheter för återanvändning av renat avloppsvatten och tillämpning av försiktighetsprincipen är andra drivkrafter bakom utbyggnad av avloppsreningsverk. För länder inom EU är vattendirektivet (2000/60/EG), med prioämnesdirektivet (2013/39/EU) och bevakningslistan (artikel 8b), ytterligare en drivkraft, även om upptagna gränsvärden är kopplade till just risker för och skydd av akvatisk miljö. Några av ämnena, diklofenak, östradiol och etinylöstradiol, vilka återfinns på den ursprungliga bevakningslistan, har också upptagits som särskilt förorenande ämnen (SFÄ) enligt Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljökvalitetsnormer för ytvatten (HVMFS 2015:4). Ytterligare läkemedel (makrolida antibiotika) har sedan lagts till bevakningslistan; erytromycin, klaritromycin och azitromycin (2015/495/ EU).

Avloppsreningsverk i tätorter är sedan länge utbyggda, men potentialen för rening från exempelvis läkemedel hänger samman med verkens processkonfiguration och därmed också med verkens geografiska placering. I norra Sverige är reningskraven i regel begränsad till reduktion av syreförbrukande material och fosfor, medan avloppsreningsverken i söder ofta har långtgående kväverening, i alla fall om de är dimensionerade för >10 000 pe. Flera undersökningar har visat samband mellan reduktion av vissa läkemedel och processutformning, där avloppsreningsverk med kväverening ofta uppvisar högre reduktion för de ämnen som kan brytas ner (Falås, 2012). Förutom att olika processkonfigurationer i sig kan medföra olika reningsgrad för organiska mikroföroreningar kan olika uppbyggnad av reningsprocessen påverka valet av reningsmetod för reduktion av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara ämnen.

På uppdrag av regeringen har Havs- och vattenmyndigheten finansierat ett antal olika projekt i syfte att utvärdera praktiskt användbara reningsmetoder för att avlägsna potentiellt miljöfarliga ämnen som inte omfattas av de kommunala avloppsreningsverkens nuvarande reningsvillkor. 2014 gjordes en utlysning i syfte att ge stöd för planering, genomförande, utvärdering och dokumentation av undersökningar för reduktion av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar. De olika projekten omfattar försök med olika tekniker i olika skala och finns sammanfattade i rapporten *Reningstekniker för läkemedel och mikroföroreningar i avloppsvatten* (Havs- och vattenmyndigheten, 2018). Parallellt med detta arbete har Naturvårdsverket redovisat ytterligare ett regeringsuppdrag i rapporten *Avancerad rening av avloppsvatten för avskiljning av läkemedelsrester och andra oönskade ämnen* (Naturvårdsverket, 2017) där det uttrycks

att det finns behov av att införa avancerad rening från läkemedelsrester i avloppsvatten. Ozonering och aktivt kol framhålls i denna och andra studier som de tekniker som i dagsläget är lämpligast att införa.

I denna rapport sammanfattas aktiviteterna utförda inom ett av de projekt som finansierats via Havs- och vattenmyndigheten, projektet *RESVAV* (*Rening av svårnedbrytbara ämnen i avloppsvatten*) där företrädelsevis tekniska lösningar med ozonering och pulveriserat aktivt kol utvärderats och utvecklats.

1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att sammanfatta arbetet i och de viktigaste resultaten från projektet *RESVAV* och att erbjuda vägar vidare för den intresserade läsaren. Projektets mål har varit utveckling av reningsprocesser avsedda för reduktion av läkemedelsrester och andra svårnedbrytbara föroreningar som inte effektivt kan reduceras i avloppsreningsverken. Det innebär i praktiken både processutveckling och etablering av riktlinjer och dimensioneringskriterier för drift och utbyggnad av olika typer av avloppsreningsverk. Till denna beskrivning hör också kostnadsuppskattningar för olika typer av svenska avloppsreningsverk.

1.2 Rapportstruktur

Rapporten bygger på ett antal relativt korta kapitel där projektets olika huvudmoment beskrivs. Till varje kapitel finns läshänvisningar till de publikationer som tagits fram under arbetet.

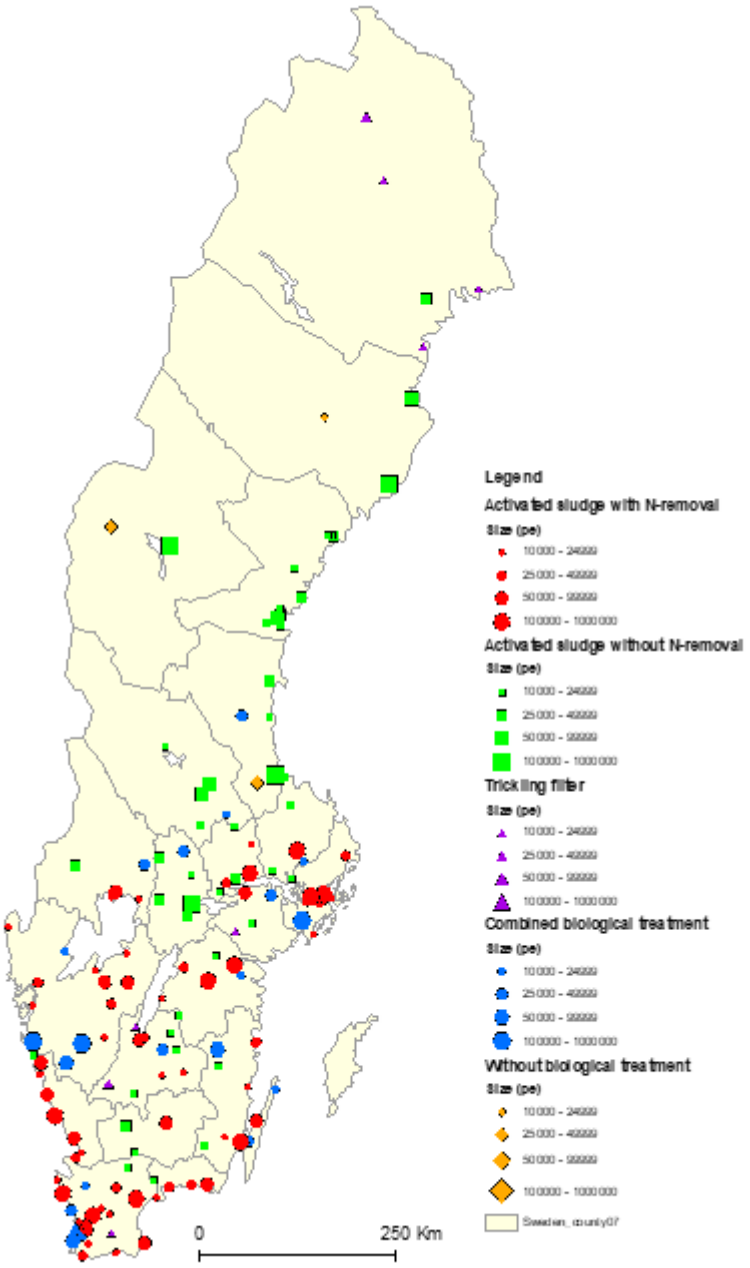
2 Svenska avloppsreningsverk

Svenska avloppsreningsverk har olika uppbyggnad. Anledningarna kan vara flera. Ett skäl är att reningskraven ser olika ut beroende på de recipientförhållanden som råder. Inte sällan har avloppsreningsverken byggts ut i etapper till följd av ökad belastning eller skärpta reningskrav. Nya typer av reningskrav på läkemedel och andra ämnen kommer i sin tur att medföra nya utbyggnader. Det är viktigt att utgå från rådande förhållanden i form av befintliga processer och befintlig infrastruktur vid varje enskilt avloppsreningsverk för att kunna hitta effektiva lösningar för avancerad rening. Även behovet av avancerad rening kan se olika ut. Ett avloppsreningsverk vid kusten kan sannolikt tillgodoräkna sig hög utspädning, vilket inte nödvändigtvis är fallet för ett avloppsreningsverk med en liten recipient i inlandet. Samtidigt återfinner vi flera av våra största avloppsreningsverk utmed kusten. Även om utspädningen är hög kan åtgärder vid dessa anläggningar ge betydande utsläppsminskningar ur ett nationellt perspektiv.

Det finns i Sverige en lång och framgångsrik tradition av uppströmsarbete. Frågor relaterade till åtgärder uppströms har inte behandlats i projektet och belyses därför inte i texten. I följande avsnitt lyfts ett antal viktiga frågeställningar och förutsättningar som legat till grund för arbetet i projektet fram.

2.1 Processkonfigurationer

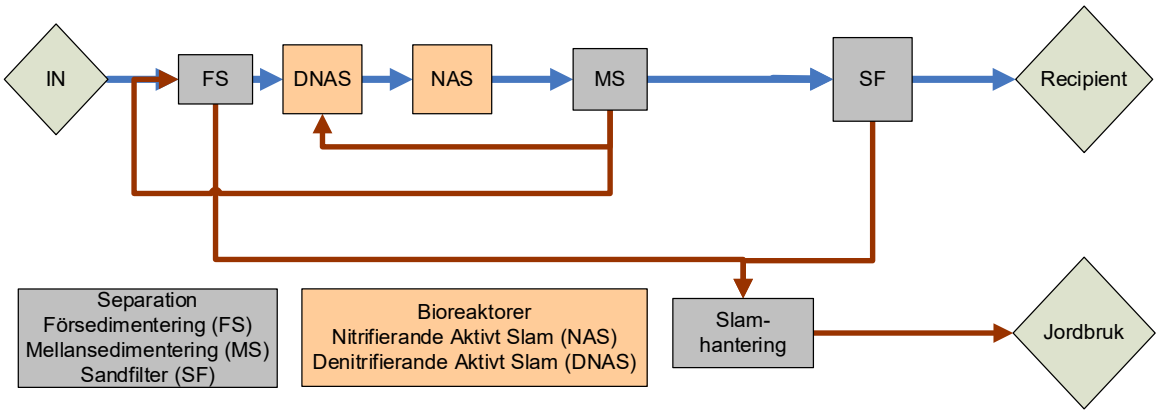
Reningskraven i Sverige för BOD, kväve (N) och fosfor (P) påverkar vilka reningsmetoder som används. Det är vanligt med fosforkrav på 0,3 mg P/l, vilket i princip innebär att processen omfattar kemisk fällning, i en del fall som komplement till biologisk fosforrening, samt någon form av slutsteg för långtgående partikelavskiljning. Sandfilter är vanligast men även skivfilter och flotationsprocesser förekommer. Det finns även förväntningar och kravformuleringar med skärpta fosforkrav (0,1-0,2 mg/l). Kvävekrav för större avloppsreningsverk är 10 mg N/l på årsbasis, men det finns också svenska reningsverk utan krav på kväverening. Även för kväve och organiskt material (BOD) diskuteras skärpta krav. Figur 1 illustrerar vilka reningsprocesser som används var i landet. Det kan konstateras att det finns avloppsreningsverk helt utan biologisk rening och avloppsreningsverk med olika typer av biologisk rening. Vanligast är aktivslamprocesser, med eller utan kvävavskiljning, men det finns också ett antal anläggningar som bygger på olika biofilmsprocesser eller kombinationer av aktivslam och biofilm. Biofilmsprocesser har under vissa omständigheter visat sig ge bättre reduktion av vissa ämnen, exempelvis diklofenak, (Falås, 2013) och aktivslamprocesser med nitrifikation ger mer långtgående nedbrytning av vissa ämnen. Låga halter av organiskt material i utgående vatten, ofta uttryckt som TOC eller DOC, nämns ofta som en förutsättning för effektiv och resurssnål avancerad rening. Det är därför viktigt att anpassa den avancerade reningen till den befintliga processen eller att anpassa den befintliga reningen innan avancerad rening kan komplettera processen. Andra mycket viktiga frågor i sammanhanget rör tillskottsvattenmängder och slambehandling. Förbränning av slam eller ambitioner om att sprida slam skapar olika förutsättningar för avancerad rening. Sammantaget finns det således många parametrar som kan påverka valet av teknik.



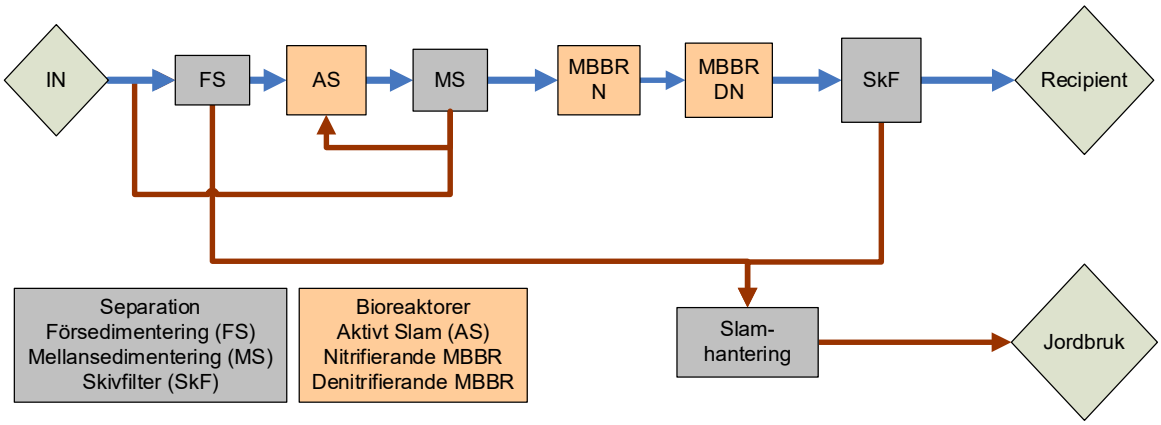
Figur 1. Geografisk fördelning av avloppsreningsverk, >10 000 pe, som använder sig av de vanligaste teknikerna för biologisk rening (Falås, 2012)

Det bör tilläggas att de flesta avloppsreningsverk inte syns på kartan, eftersom de flesta anläggningar är dimensionerade för < 2000 pe. Dessa kan mycket väl släppa ut renat avloppsvatten till små och känsliga recipienter och det kan därför vara motiverat med införande av avancerad rening även vid dessa anläggningar. Större delen av den totala belastningen, sett ur ett nationellt perspektiv, kommer emellertid från anläggningarna som återfinns i figuren. Processkonfigurationer och anläggningsstorlekar diskuterar vidare i avsnitt 7, *Processval och kostnader*. Utifrån

en kartläggning av svenska avloppsreningsverk identifierades två ”typverk”, Figur 2 och 3, för det fortsatta arbetet.



Figur 2. Förenklad beskrivning för svenska ARV med aktivslamprocess med biologisk kväverening.



Figur 3. Förenklad beskrivning för svenska ARV med biofilmsprocesser för hela eller delar av kvävereningen

Figur 2 visar en lågbelastad aktivslamprocess med nitrifikation och denitrifikation i aktivslamprocessen. Partikelavskiljning till låga nivåer antas ske i efterföljande sandfilter. Figur 3 visar en högbelastad aktivslamanläggning med nitrifikation och denitrifikation i biofilmsprocesser. Exempel på sådana anläggningar är Ryaverket i Göteborg och Sjölundaverket i Malmö. Motsvarande anläggningar med högbelastade aktivslamsteg (men utan kväveavskiljning) är vanliga norr om Norrtälje. Det finns naturligtvis fler varianter men ovanstående två typverk inbegriper relativt många anläggningar.

2.2 Mikroföroreningar i avloppsvatten

Vid dimensionering av avloppsreningsverk är specifika belastningar (g/p*d) av kväve, fosfor och organiskt material en viktig utgångspunkt. Det är motiverat att studera motsvarande belastningar för olika läkemedel för att kunna göra uppskattningar av massflöden och halter till och från avloppsreningsverk. Sådan uppskattningar kan vara användbara i samband med dimensionering av anläggningar för avancerad rening och vid kartläggning av olika recipientförhållanden. Halter av ett läkemedel i utgående vatten från ett enskilt avloppsreningsverk bestäms av belastningen till reningsverket, flödet, och reningsgraden för ett enskilt läkemedel på reningsverket. Därefter kan uppskattningar av halter i utgående vatten och reningsbehov göras. Halter

av ett givet läkemedel i utgående vatten kan påverka valet av reningsteknik (ozon/aktivt kol) men kan också påverka vilken dos av exempelvis ozon eller pulveriserat aktivt kol som bör tillämpas. Även om dosering av PAK eller ozon är beroende av innehållet av organiskt material och inte bara av halten av enskilda substanser, bestäms val av teknik och eventuell dos i slutändan av vad vi vill åstadkomma, dvs. vilken halt av vilken substans som kan vara kvar i utgående vatten för att uppnå olika krav. Olika steg i har tagits i denna riktning, exempelvis med projektet *LUSKA* (*Läkemedelsutsläpp i Skånska Avloppsreningsverk*) där prover tagits uppströms, nedströms och i utgående vatten från olika avloppsreningsverk (Svahn & Björklund, 2017). Inom ramen för *RESVAV* har mätningar sammanställts från de pilotförsök som utförts med ozonering i Skåne och Halland men även utifrån andra provtagningar, bland annat på Ryaverket i Göteborg, se Tabell 1. För Ryaverket ingick data från 2006 till 2014 vilket gjorde det möjligt att bedöma en eventuell ökning eller minskning av tillförd mängd per person. I de fall data även fanns för utgående vatten har en reduktion över avloppsreningsverket beräknats.

Tabell 1. Läkemedelsbelastningar samt uppskattad reduktion och trend för tillförsel med inkommande vatten.

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	Ej data
Trimetoprim	0-50	0,02	Minskande
Sulfamethoxazol	30-75	0,02-0,4	Minskande? Geografisk spridning?
Citalopram	0-20	0,08	Minskande
Tramadol		0,1-0,4	Ej data
Karbamazepin	0-20	0,1	Svagt minskande
Ibuprofen	80-100	2,0	Stabilt
Diklofenak	0-25	0,15-0,4	Stabilt eller svagt ökande

Utgående halter kommer naturligtvis att variera med flera olika faktorer, exempelvis mängden tillskottsvatten. I en situation med ett genomsnittligt flöde på 400 l/p*d skulle exempelvis 0,2 mg diklofenak per person och dygn motsvara en uppskattad halt motsvarande 500 ng/l. Med ingen eller begränsad avskiljning krävs det således en betydande utspädning i recipienten för att klara de 100 ng/l som krävs i ett ytvatten enligt Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljökvalitetsnormer för ytvatten (HVMFS 2015:4).

2.3 Fortsatt läsning

Mer om bakgrunden till projektet och förutsättningar för avancerad rening finns att läsa i:

- *Ozonering för nedbrytning av organiska mikroföroreningar – Pilottester i södra Sverige*

  Maja Ekblad, Michael Cimbritz, Filip Nilsson, Gustaf Ernst, Haitham El-taliawy, Susanne Tumlin, Kai Bester, Marinette Hagman, Ann Mattsson, Lena Blom, Liselotte Ståhlhandske, Jes la Cour Jansen

  VA-teknik Södra. Rapport Nr. 04, 2015. Laddas ner via: https://va-tekniksodra.se

Mer om belastningar och variationer finns att läsa i:

- *Läkemedelsbelastning till svenska avloppsreningsverk*

  Nicklas Paxéus

  VA-teknik Södra. Rapport Nr. 09, 2018. Laddas ner via: https://va-tekniksodra.se

- *Temporal variations and trends in loads of commonly used pharmaceuticals to large wastewater treatment plants in Sweden, a case study (Ryaverket)*

  Nicklas Paxéus, Kai Bester, Haitham El-taliawy

  Water, Science & Technology (2016), 73(12), s. 3049

3 Avancerad rening i andra länder

Teknik för avskiljning av organiska mikroföroreningar har länge använts inom dricksvattenteknik och för återanvändning av avloppsvatten. Avancerad rening vid kommunala avloppsreningsverk har införts i några länder. I syfte att överföra kunskap om de fullskaleanläggningar som byggts genomfördes en omvärldsbevakning med en studieresa till Tyskland och Schweiz.

Schweiz är det enda land som hittills drivit fram en lagstiftning som medför en mer omfattande utbyggnad av landets avloppsreningsverk. Lagstiftningen trädde i kraft 2016 vilket var ca tio år efter att de första utredningarna initierades. Utbyggnaden ska vara genomförd under en 25-årsperiod och omfattar ungefär 100 av landets 700 avloppsreningsverk. Energianvändningen vid avloppsreningsverken beräknas öka med 5-30 %, vilket motsvarar en ökning av landets totala energianvändning med 0,1 %. De nya kraven innebär att avskiljning motsvarande minst 80 % förväntas för ett antal substanser. Som indikator- och kontrollsubstanser har ett mindre antal ämnen, företrädelsevis läkemedel valts ut. Ämnena har valts ut mot bakgrund av att de är frekvent förekommande och nästan alltid kan detekteras i inkommande vatten, att de påverkas i låg utsträckning av biologisk rening och att reduktionsgraden som kan uppnås är ungefär likvärdig vid användning av aktivt kol och ozon.

Alla stora avloppsverk (>80 000 personer) kommer att byggas ut för att minska den totala miljöbelastningen och belastningen nedströms vilket även förväntas gynna andra länder som Tyskland. Ungefär hälften av befolkningen kommer att omfattas av denna åtgärd. Utvalda avloppsreningsverk ska byggas ut för att skydda dricksvattentäkter och särskilt känsliga recipienter med otillräcklig utspädning. Små avloppsreningsverk (<8000 personer) är i princip undantagna från kravet på utbyggnad. Ett antal mindre avloppsreningsverk kommer att läggas ner. De första anläggningarna togs i drift 2015 med rening genom ozonering eller dosering av pulveriserat aktivt kol.

Trots att Schweiz var först med lagstiftning har grannlandet Tyskland fler anläggningar för avancerad rening framför allt i Nordrhein-Westfalen och i Baden Würtemberg. Även i Tyskland är motiven att skydda dricksvattenkällor och känsliga recipienter. I några fall har anslutna industrier motiverat utbyggd rening. Det finns ytterligare exempel från andra länder, men det kan konstateras att även om förutsättningarna är olika på olika platser finns det mycket kunskap och erfarenheter att hämta från projekt som genomförts på olika håll, inte minst rörande arbetsmiljö och drift av anläggningar.

3.1 Fortsatt läsning

- *Rening från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar – En kunskapssammanställning*

  Michael Cimbritz, Susanne Tumlin, Marinette Hagman,
  Ivelina Dimitrova, Gerly Hey, Maria Mases,
  Niclas Åstrand, Jes la Cour Jansen

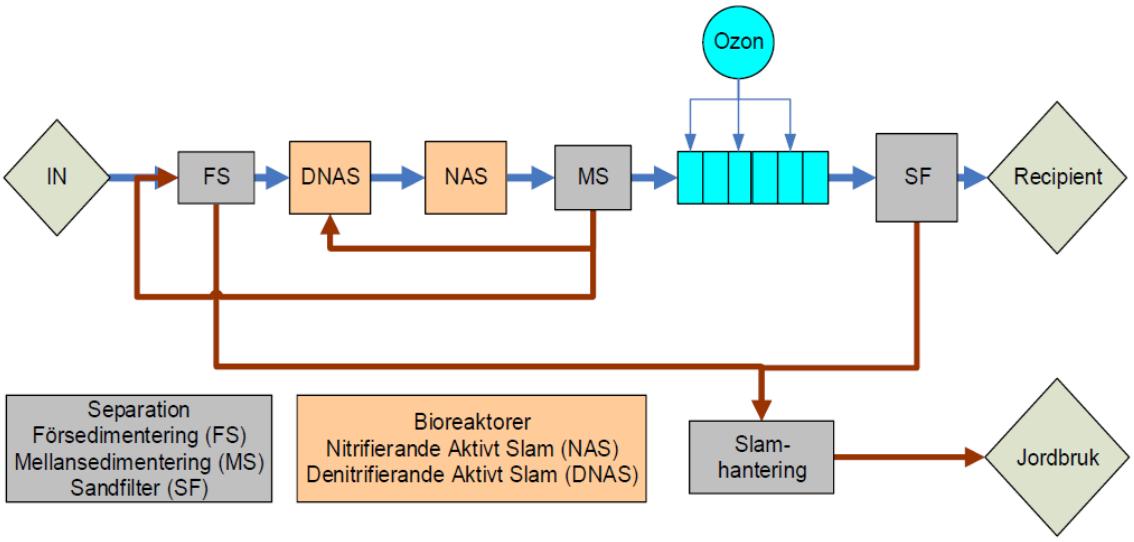
  Svenskt Vatten Utveckling. Rapport 2016-04.
  Laddas ner via: www.svensktvatten.se

4 Avancerad rening vid svenska avloppsreningsverk

Utifrån en workshop i projektets inledning med gäster från Tyskland (Norbert Jardin) och Schweiz (Christian Abegglen) identifierades olika principiella möjligheter för införande av avancerad rening vid svenska avloppsreningsverk, företrädelsevis med ozonering eller pulveriserat aktivt kol (PAK). Filtrering genom granulerat aktivt kol (GAK) har undersökts i andra projekt inom ramen för utlysningen. Nedan återges de principiella processutformningar som undersökts i projektet. En närmare beskrivning av de olika tekniska lösningarna återfinns i kommande kapitel.

4.1 Ozonering

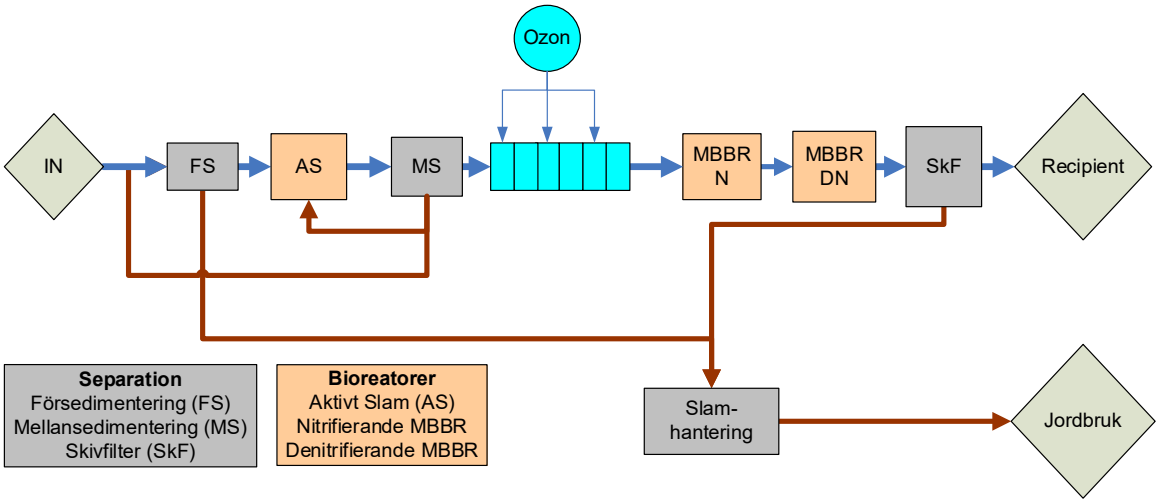
Ozonering kan integreras med en avloppsreningsprocess på flera olika sätt. En springande punkt är just integrationen med övriga processteg, där efterföljande biologisk rening rekommenderas för nedbrytning av olika biprodukter som kan uppstå vid ozonering. Figur 4 illustrerar en processkonfiguration som undersökts i projektet där ozonering införs nedströms i reningen och efter nitrifikation/dentrifikation. Denna processkonfiguration är relativt vanlig och det bedömdes därför som angeläget att utvärdera den vid ett antal svenska avloppsreningsverk.



Figur 4. Lågbelastad aktivslamanläggning med ozonering och efterföljande sandfiltrering.

Det kan noteras att det förutsätts att sandfiltret ger en tillräcklig biologisk efterbehandling.

I figur 5 nedan visas ytterligare en processutformning som användes som utgångspunkt för delar av det fortsatta arbetet. I denna variant ozoneras utgående vatten från en högbelastad aktivslamprocess, vilket är intressant för avloppsreningsverk där BOD- och kväveavskiljning separerats och för avloppsreningsverk utan kväverening. Sådana finns det flera av i Sverige, särskilt i landets norra delar där krav på kväveavskiljning saknas. Undersökningar av denna typ av reningsverk med ozonering är inte heller särskilt frekvent rapporterade i litteraturen.

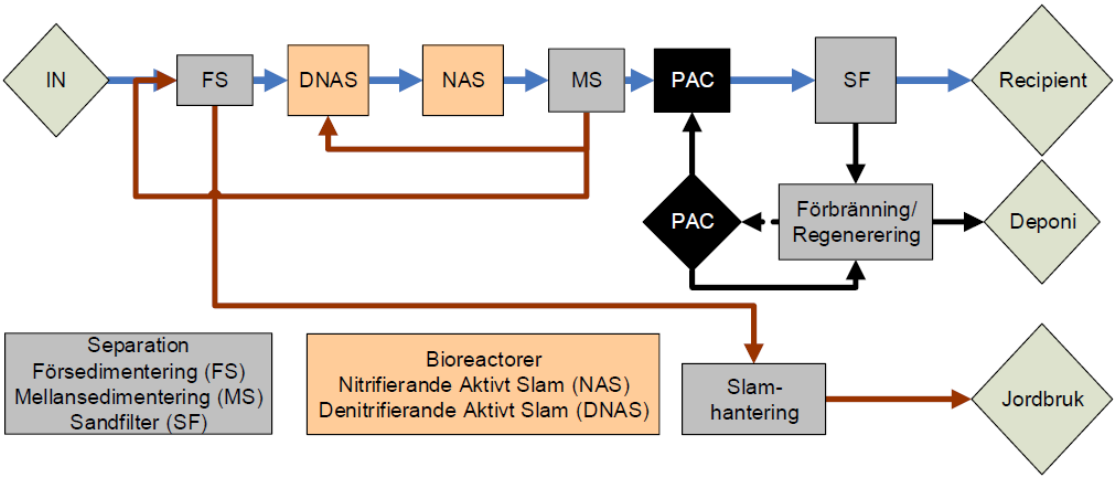


Figur 5. Ozonering efter högbelastad aktivslamanläggning. Efterbehandling och kväveavskiljning i biofilmsprocesser (MBBR-processer).

En fördel med denna anläggningstyp är att biologisk efterbehandling kan integreras med kväveavskiljningen, dvs. med biofilmsprocesserna. Om kväveavskiljning inte finns krävs ett sandfilter eller annat processteg för att säkerställa efterbehandling. En nackdel kan vara att det krävs högre ozondoser om utgående halter av organiskt material (TOC eller COD) är högre än från motsvarande lågbelastade aktivslamprocess. Även denna anläggningstyp valdes ut för fortsatta studier. Pilotförsöken med ozonering, motsvarande konfigurationerna i Figur 4 och 5, beskrivs närmare i Kapitel 5, *Ozonering*.

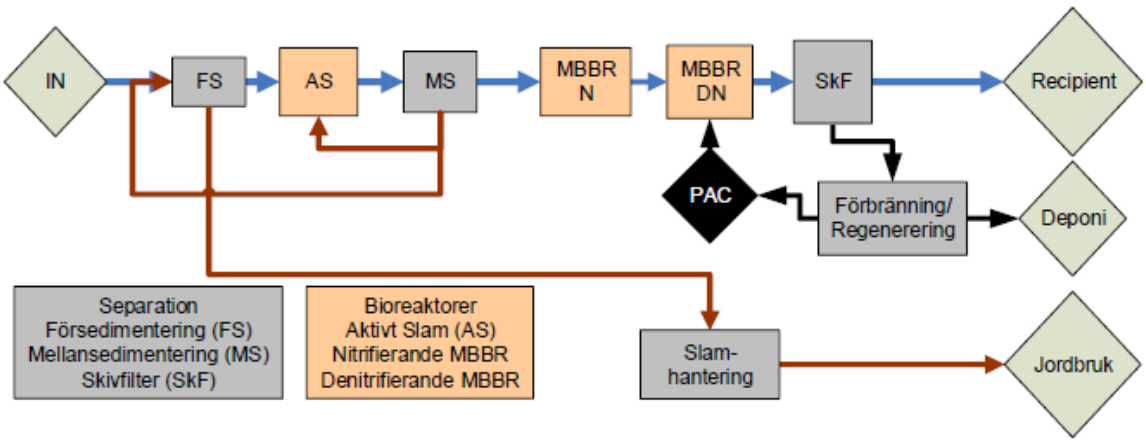
4.2 Pulveriserat aktivt kol

Ett annat reningsalternativ är dosering av pulveriserat aktivt kol (PAK). I de anläggningar som tagits i bruk doseras kolet i regel till en kontaktreaktor som placerats efter den biologiska reningen, men det finns även exempel med direkt dosering till aktivslamprocessen (Boehler m.fl., 2012). Även om dosering sker efter den biologiska reningen tillämpas i regel recirkulation av separerat kol till den biologiska reningen i syfte att maximera avskiljningen och utnyttjandet av kolet. Det betyder emellertid att kol med adsorberade mikroföroreningar för eller senare hamnar i överskottsslammet. Ett sådant förfarande strider mot ambitionen att återföra slam till jordbruket. Med denna anläggningstyp och en önskan om att återföra slam till åkermark bör PAK doseras i ett separat steg efter aktivslamsteget så som visas i figur 6. PAK-slammet avskiljs i efterföljande separationsprocess. Det finns idag ingen eller mycket begränsad erfarenhet av detta förfarande.



Figur 6. Dosering av pulveriserat aktivt kol efter ett aktivslamsteg. PAC kan i figuren inbegripa separat kontaktreaktor.

Separation av PAK och möjligheter att regenerera kol är viktiga frågor för en sådan tillämpning. Att kombinera PAK med biofilmssystem, enligt principen i figur 7, hade vid projektets start inte testats i stor skala. Dosering av PAK till en biofilmsprocess, i figuren illustrerad genom dosering till en denitrifierande MBBR, bedömdes som intressant för projektet. Arbetet med denna processvariant, i form av dosering till en nitrifierande MBBR, beskrivs i kapitel 6. Av-skiljning av biomassa och pulveriserat kol kan eventuellt göras i ett skivfilter, eller med annan separationsprocess. Möjligheten att avskilja pulveriserat aktivt kol i efterföljande skivfilter kan vara en möjlighet för de anläggningar som idag har efterpolering i skivfilter, med eller utan fällning/flockning.



Figur 7. Dosering av pulveriserat aktivt kol till en biofilmsprocess.

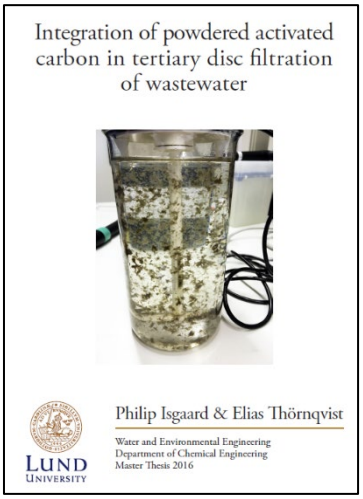
4.3 Fortsatt läsning

Mer att läsa om skivfiltrering för avskiljning av PAK finns i:

- *Integration of powdered activated carbon in tertiary disc filtration of wastewater*

  Philip Isgaard och Elias Thörnqvist

  Examensarbete i VA-teknik vid institutionen för Kemiteknik (2016).
  Kan laddas ner via: www.lub.lup.lu.se



Mer att läsa om möjligheten att kombinera PAK och MBRR finns att läsa i:

- *Möjligheten att kombinera pulveriserat aktivt kol (PAK) och MBBR för avskiljning av organiska mikroföroreningar*

  Sofia Högstrand och Maja Ignell

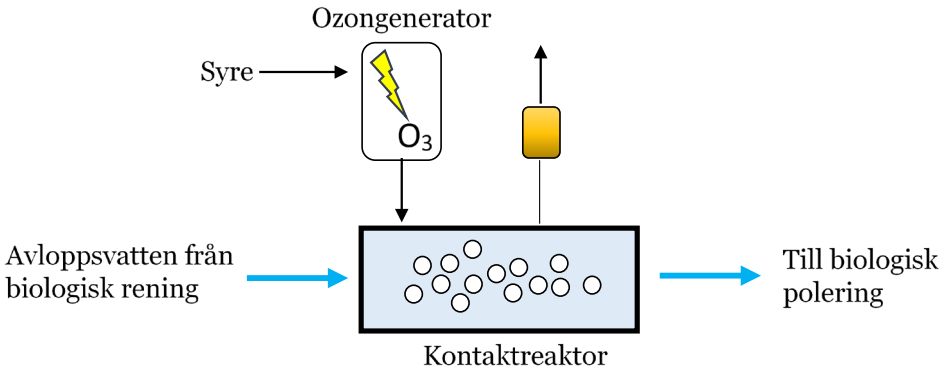
  Examensarbete i VA-teknik vid institutionen för Kemiteknik (2018).
  Kan laddas ner via: www.lub.lup.lu.se

5 Ozonering

Ozonering är en av de tekniker som framförs som ett kostnadseffektivt alternativ för avskiljning av organiska mikroföroreningar. Vid ozonering av avloppsvatten sker inte en fullständig nedbrytning (mineralisering) utan snarare en omvandling (transformation) till nya ämnen som kan vara mer eller mindre nedbrytbara. Det är således inte helt korrekt att tala om avskiljning.

5.1 Processutformning

Ozongas (O_3) är både explosiv och instabil. Den behöver därför genereras i anslutning till anläggningen eftersom den inte enkelt kan lagras eller transporteras. Syre (O_2) produceras direkt ur luften eller levereras i flytande form för lagring i en särskild tank. Efter inblandning reagerar ozon med läkemedel och andra organiska ämnen som finns i avloppsvattnet. Oxidationsprocessen är inte selektiv utan allt organiskt material och andra ämnen som kan oxideras kommer att påverka ozonbehovet och slutresultatet. Ju mindre organiskt material som vattnet innehåller desto mindre ozon, och därmed energi, går åt. Ozonanläggningar placeras därför med fördel efter den biologiska reningen, men det finns också varianter där ozonering integrerats med den biologiska reningen (se kapitel 4.1). Figur 8 visar en principiell processutformning.



Figur 8. En av flera möjliga processutformningar för ozonering av biologiskt renat avloppsvatten.

I regel rekommenderas någon form av biologisk efterbehandling för fortsatt nedbrytning av ämnen som bildas i samband med ozoneringen. Tidigare studier har visat att toxiciteten sjunker efter biologisk behandling.

Ozonering är en flexibel teknik där dosen enkelt kan ändras beroende på reningsbehov. Optimering av ozondosen är viktig både för att minimera energiåtgången och uppkomsten av vissa transformationsprodukter. Processer för övervakning och styrning är under utveckling och är en viktig förutsättning för energieffektiviseringar.

5.2 Nyckeltal

I de försök som genomförts har olika doser och uppehållstider testats. Följande nyckeltal kan användas för uppskattningar i samband med dimensionering:

- Uppehållstid i kontaktreaktor: 10-25 minuter
- Specifik ozondosering: 0,4-0,9 g O_3/g DOC

Under pilotförsöken har lyckade resultat uppnåtts även vid lägre uppehållstider än 10 minuter, men i de flesta sammanhang rekommenderas åtminstone 10 minuters uppehållstid. Det betyder att ozonering inte kommer att kräva särskilt mycket plats i jämförelse med övriga processteg på ett avloppsreningsverk med biologisk och kemisk rening. Den specifika ozondosen varierar mellan olika anläggningar. Det kan finnas olika skäl till detta. Det kan exempelvis finnas nitrit eller andra oorganiska ämnen som konsumerar ytterligare ozon.

Generering av ozon är förhållandevis energikrävande och det är därför viktigt att förstå bakomliggande orsaker till hög specifik ozonförbrukning och optimera ozondoseringen i förhållande till önskad effekt. För att uppskatta energianvändningen är det också viktigt att bedöma den totala energianvändningen för ozonering. Om flytande syre framställs utanför anläggningen behöver detta tas med i beräkningen. Utöver ozonproduktionen är kylning av ozongeneratorn och pumpning viktiga poster. Det betyder att energiförbrukningen kommer att variera beroende på hur ozonanläggningen integrerats med befintlig infrastruktur. De flesta studier pekar på att elförbrukningen vid avloppsreningsverket ökar med 0,1 kWh/m^3 eller mer.

5.3 Pilotförsök

Pilotförsök genomfördes vid elva avloppsreningsverk i södra Sverige. Vid Ryaverket i Göteborg genomfördes försök med en pilotanläggning från Ozonia och vid övriga avloppsreningsverk, illustrerade i figur 9, utfördes försök med en pilotanläggning från Primozone.

Figur 9. Pilotförsök genomförda med pilotanläggningen från Primozone.

I Göteborg genomfördes försök under en längre period hösten 2015 medan det vid de andra anläggningarna genomfördes korttidsförsök i syfte att ge en bild av doseringsbehov och avskiljning vid flera olika avloppsreningsverk med olika processutformning. Bland annat gav försöken en möjlighet att jämföra ozonering efter en hög- respektive en lågbelastad aktivslamprocess.

Figur 10 och 11 visar de olika pilotanläggningarna.

Figur 10. Pilotanläggningen från Primozone.

Figur 11. Pilotanläggningen från Ozonia, placerad vid Ryaverket.

5.4 Avskiljning

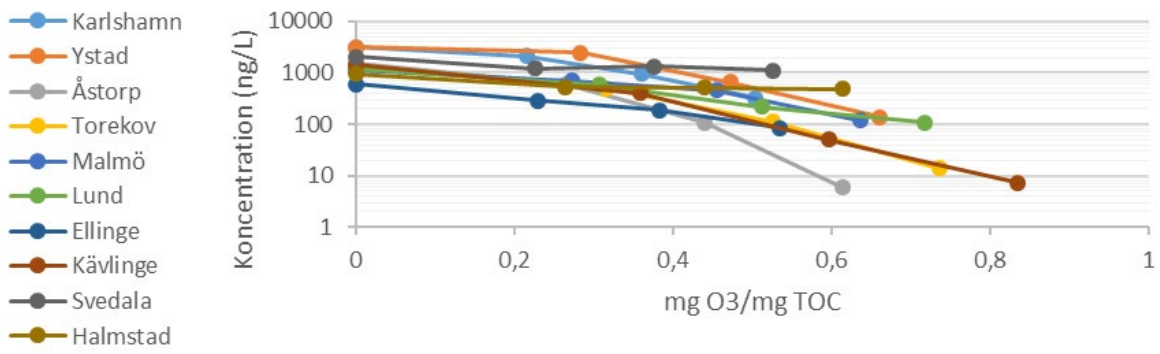
Tabell 2 visar exempel på reduktionsgrader som uppnåtts vid de olika pilotförsöken.

Tabell 2. Avskiljning av olika läkemedel som funktion av ozondos.
Rött: <50 %, gult: 50-79 %, ljusgrönt: 80-89 %, mörkgrönt: >90 %.

Substans	Grupp	3 g O_3/m^3	5 g O_3/m^3	7 g O_3/m^3	10 g O_3/m^3
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*				

Några ämnen, som diklofenak och karbamazepin, kan oxideras redan vid jämförelsevis låga ozondoser. Andra ämnen kräver högre doser medan vissa ämnen inte tycks påverkas i någon större utsträckning. Detta gäller exempelvis olika typer av kontrastmedel som används i samband med röntgen. Inte heller ibuprofen uppvisar hög reduktion ens vid hög ozondos men det hänger samman med att ibuprofen kan brytas ner i ett aktivslamsystem med kväverening. Återstoden som kan oxideras i en efterföljande ozonbehandling är låg vilket kan göra det svårt att uppnå en hög reduktionsgrad i själva ozoneringsprocessen. Exemplet ibuprofen visar att det är viktigt att studera även halter och att förstå helheten, dvs. vilka processer som finns upp- och nedströms. Reduktionen över hela avloppsreningsverket kan vara mycket hög även om reduktionen i den kompletterande reningen, i detta fall ozonering, är förhållandevis låg.

Det råder olika förutsättningar vid olika anläggningar, både ifråga om processutformning och skillnader i det som ibland benämns vattenmatrisen, dvs. innehållet av olika ämnen i det vatten som ska behandlas. Figur 12 visar koncentration för metoprolol som funktion av ozondos.



Figur 12. Koncentrationer av metoprolol som funktion av ozondos.

Resultaten visar, både för metoprolol och andra ämnen, att den nödvändiga dosen föra att avskilja ett givet ämne kan variera ganska mycket mellan olika anläggningar. Det betyder i sin tur att laboratorie- eller pilotförsök kan vara en god idé för att utvärdera ozonering före installation och att verklig energiåtgång för att klara en given avskiljning kan skilja sig ganska mycket mellan olika anläggningar.

5.5 Efterbehandling

Det finns andra ämnen än just läkemedel och mikroföroreningar i ett avloppsvatten. Vissa av dessa kan bilda olika biprodukter vid ozonering. Det talas därför ibland om både bi- och transformationsprodukter, där de sistnämnda bildas ur just läkemedel och andra organiska mikroföroreningar när de *transformeras*. Samtidigt bildas biprodukter av andra ämnen. Ett av de mest kända exemplen är bildning av bromat som är cancerframkallande. Finns det höga bromidhalter i vattnet bör ozonering därför undvikas eftersom bromat kommer att bildas.

De flesta studier tyder på att ozonering minskar toxiciteten i vattnet, men det finns studier som pekar på en mer komplex bild med olika tänkbara ekotoxikologiska effekter, både från bi- och transformationsprodukter. Fortsatt forskning inom området, både om vilka ämnen som bildas, deras effekter och hur de eventuellt kan brytas ner är viktig. Frågan om lämplig efterbehandling och nedbrytbarhet för olika transformationsprodukter utgör en viktig del av forskningsprojektet BONUS *Cleanwater* som skapats i kölvattnet av *RESVAV*. En första ansats gjordes dock redan inom ramen för detta projekt där nedbrytning av några olika transformationsprodukter i en MBBR studerades.

5.6 COD eller DOC?

Genom pilotförsöken skapades även möjligheter att jämföra ozonering vid en hög- respektive lågbelastad aktivslamanläggning. Samma avskiljning kunde uppnås vid båda anläggningarna (Sjölunda respektive Klagshamn) men med olika doseringsbehov. Innehållet av organiskt material var något högre efter den högbelastade anläggningen på Sjölunda ARV vilket också medförde ett högre ozonbehov. Samtidigt jämfördes COD med DOC som normerande parameter, vilket visade att COD i det givna fallet medgav bättre möjligheter att jämföra och beskriva dos-responsförhållandet. Ozonbehov beskrivs nästan alltid utifrån DOC, eller TOC, men möjligheten att använda COD som mått eller kompletterande mått är nytt och kommer att undersökas vidare i framtida studier. Möjligheten är särskilt intressant eftersom COD-mätningar görs rutinmässigt vid många anläggningar och i sig beskriver ett oxidationsbehov.

5.7 Fortsatt läsning

Mer om resultat från pilotförsöken finns att läsa i:

- *Ozonering för nedbrytning av organiska mikroföroreningar – Pilottester i södra Sverige*

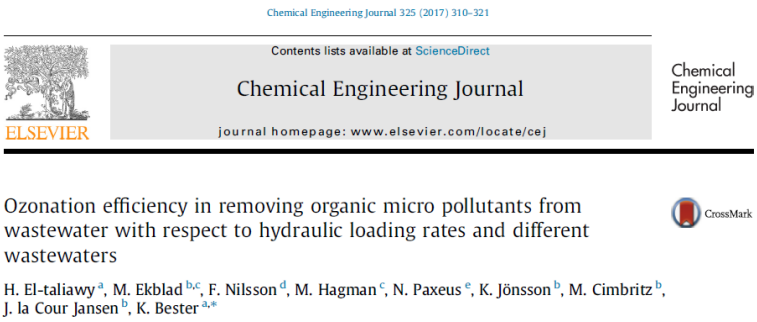
  Maja Ekblad, Michael Cimbritz, Filip Nilsson, Gustaf Ernst, Haitham El-taliawy, Susanne Tumlin, Kai Bester, Marinette Hagman, Ann Mattsson, Lena Blom, Liselotte Ståhlhandske, Jes la Cour Jansen

  VA-teknik Södra. Rapport Nr. 04, 2015. Laddas ner via https://va-tekniksodra.se

- *Ozonation efficiency in removing organic micropollutants from wastewater with respect to hydraulic loading rates and different wastewaters*

  Haitham El-taliawy, Maja Ekblad, Filip Nilsson, Marinette Hagman, Karin Jönsson, Michael Cimbritz, Jes la Cour Jansen, Kai Bester

  Chemical Engineering Journal (2017), 325, s. 310.


Chemical Engineering Journal 325 (2017) 310–321

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Engineering Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

ELSEVIER

Chemical Engineering Journal

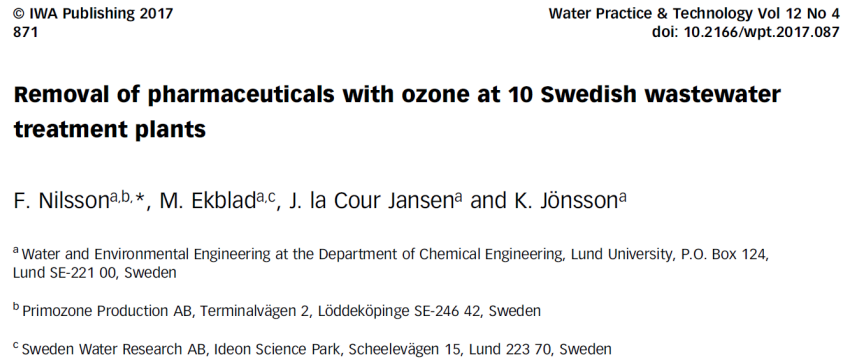
Ozonation efficiency in removing organic micro pollutants from wastewater with respect to hydraulic loading rates and different wastewaters

H. El-taliawy [a], M. Ekblad [b,c], F. Nilsson [d], M. Hagman [c], N. Paxeus [e], K. Jönsson [b], M. Cimbritz [b], J. la Cour Jansen [b], K. Bester [a,*]

- *Removal of pharmaceuticals with ozone at 10 Swedish wastewater treatment plants*

  Filip Nilsson, Maja Ekblad, Karin Jönsson, Jes la Cour Jansen

  Water, Practice & Technology (2017), Vol 12(4), s. 871.


© IWA Publishing 2017
871

Water Practice & Technology Vol 12 No 4
doi: 10.2166/wpt.2017.087

Removal of pharmaceuticals with ozone at 10 Swedish wastewater treatment plants

F. Nilsson[a,b,*], M. Ekblad[a,c], J. la Cour Jansen[a] and K. Jönsson[a]

[a] Water and Environmental Engineering at the Department of Chemical Engineering, Lund University, P.O. Box 124, Lund SE-221 00, Sweden

[b] Primozone Production AB, Terminalvägen 2, Löddeköpinge SE-246 42, Sweden

[c] Sweden Water Research AB, Ideon Science Park, Scheelevägen 15, Lund 223 70, Sweden

Mer om nedbrytning av transformationsprodukter finns att läsa i:

- *Removal of ozonation products of pharmaceuticals in laboratory Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs)*

  Haitham El-taliawy, Monica Escola Casas, Kai Bester

  Journal of Hazardous Materials (2018), 347, s. 288.

Journal of Hazardous Materials 347 (2018) 288–298

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hazardous Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhazmat

Removal of ozonation products of pharmaceuticals in laboratory Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs)

Haitham El-taliawy, Monica Escola Casas, Kai Bester*

Department of Environmental Science, Aarhus University, Frederiksborgsvej 399, Roskilde 4000, Denmark

Mer om ozonering efter en hög- respektive lågbelastad aktivslamanläggning samt möjligheten att använda COD som utgångspunkt för att beskriva dosbehov finns att läsa i:

- *Is dissolved COD a suitable design parameter for ozone oxidation of organic micropollutants in wastewater?*

  Maja Ekblad, Per Falås, Haitham El-taliawy, Filip Nilsson, Kai Bester, Marinette Hagman, Michael Cimbritz

  Science of the Total Environment (2019), 658, s. 449.

Science of the Total Environment 658 (2019) 449–456

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Is dissolved COD a suitable design parameter for ozone oxidation of organic micropollutants in wastewater?

M. Ekblad [a,b,*], P. Falås [a], H. El-taliawy [c], F. Nilsson [a,d], K. Bester [c], M. Hagman [b], M. Cimbritz [a]

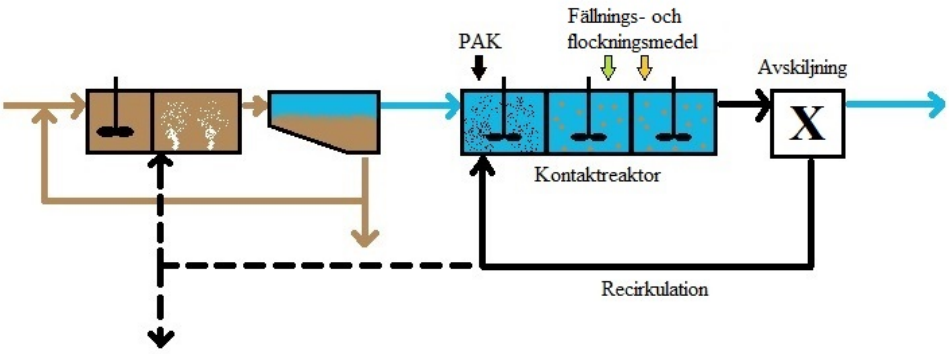
[a] Department of Chemical Engineering, Lund University, PO Box 124, 221 00 Lund, Sweden
[b] Sweden Water Research AB, Ideon Science Park, Scheelevägen 15, 223 70 Lund, Sweden
[c] Department of Environmental Science, Aarhus University, Frederiksborgsvej 399, Roskilde 4000, Denmark
[d] Primozone Production AB, Terminalvägen 2, 246 42 Löddeköpinge, Sweden

6 Aktivt kol

Med aktivt kol kan olika organiska mikroföroreningar avskiljas i ordets faktiska bemärkelse eftersom olika ämnen adsorberas till kolstrukturen. Hög specifik yta är därför viktig för effektiv avskiljning. Avloppsvatten kan behandlas antingen genom dosering av pulveriserat aktivt kol (PAK) eller genom filtrering i granulerat aktivt kol (GAK). Inom ramen för *RESVAV* studerades dosering av PAK.

6.1 Varför PAK?

Genom dosering av PAK kan hög avskiljning av de flesta mikroföroreningar uppnås. Beroende på hur avloppsreningsverket är utformat kan dosering av PAK relativt enkelt införas. Dosering av PAK förutsätter emellertid att pulveriserat kol kan lagras på avloppsreningsverket. I likhet med ozonering eftersträvas i regel låga halter av organiskt material (DOC) varför PAK med fördel doseras nedströms i processen. Det finns dock exempel på dosering av PAK till aktivslamprocesser. I figur 13 visas exempel på hur PAK kan doseras efter en aktivslamprocess.

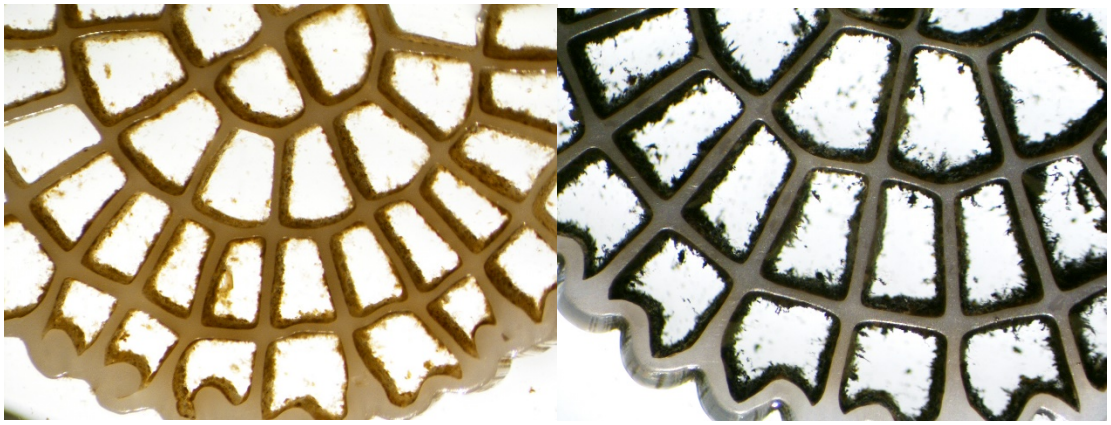


Figur 13. Generell lösning för hur PAK kan tillsättas till en kontaktreaktor i ett kompletterande steg, där X motsvarar en separationsprocess för avskiljning (och eventuell recirkulation av) PAK. (Högstrand & Ignell, 2018).

Efter dosering krävs en reaktionstid, i storleksordningen en halvtimme, innan kolet med adsorberade ämnen kan avskiljas. Separation av pulveriserat aktivt kol är en nyckelfråga för att undvika läckage av kol med adsorberade mikroföroreningar till recipienten. PAK-slammet kan avskiljas genom fällning och flockning och sedimentering följt av sandfiltrering men andra separationsmetoder har med framgång testats, exempelvis membranfiltrering (Abegglen & Siegrist, 2012). Framställning av aktivt kol är en energikrävande process och det är därför viktigt att utnyttja kolet så effektivt som möjligt. Det betyder att kolet i regel recirkuleras till den biologiska reningen för att minimera doseringen. Om slammet ska återföras till åkermark bör det aktiva kolet inte blandas med övrigt slam utan hanteras separat, vilket kan medföra ett ökat doseringsbehov och utrustning för separat slamhantering. Till detta kommer höga krav på stålkvalitet för vissa utrustningsdelar eftersom pumpning och hantering av PAK leder till högt slitage (blästring). Lagring av PAK i silor kräver EX-klassning på grund av explosionsrisk.

6.2 Pilotförsök

Inom RESVAV utfördes försök med en ny processkombination som inte testats förut där PAK doserades direkt till en process med rörliga biofilmsbärare. Figur 14 visar bilder från bärare som användes i försöken.



Figur 14. Bärare från försöken med dosering av PAK. Till vänster: bärare från referensreaktorn utan koldosering. Till höger: bärare från reaktorn med dosering av PAK.

Försöken visade att det gick alldeles utmärkt att kombinera dosering av PAK och nitrifikation i en reaktor med rörliga biofilmsbärare. I försöken studerades nitrifikationskapacitet och avskiljning av olika läkemedel som funktion av dosering av pulveriserat aktivt kol. Analysen kompletterades även med en analys av den mikrobiologiska sammansättningen av biofilmen.

6.3 Nyckeltal

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^3 åtgår motsvarande 0,45 kWh/m^3 dvs 65 kWh/PE/år (om varje person genererar 400 l avloppsvatten per dag).

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
- Uppehållstider motsvarande ca 30 minuter

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

6.4 Fortsatt läsning

Mer att läsa om möjligheten att kombinera PAK med en MBBR-process finns att läsa i:

- *Möjligheten att kombinera pulverisat aktivt kol (PAK) och MBBR för avskiljning av organiska mikroföroreningar*

  Sofia Högstrand och Maja Ignell

  Examensarbete i VA-teknik vid institutionen för Kemiteknik (2018).
  Kan laddas ner via: www.lub.lup.lu.se

- *Combining nitrification and PAC-adsorption of micropollutants in an MBBR*

  Michael Cimbritz, Ellen Edefell, Elias Thörnqvist, Haitam el Taliawy, Maria Ekenberg, Cecilia Burzio, Oskar Modin, Frank Persson, Britt-Marie Wilén, Kai Bester, Per Falås

  Artikeln är i skrivande stund under granskning.

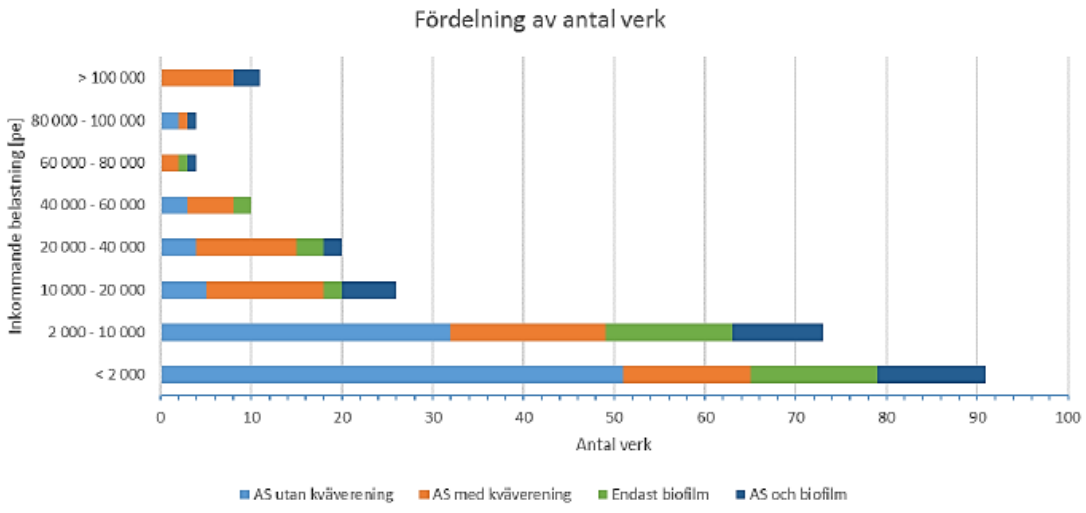
7 Processval och kostnader

Att välja process för avskiljning av organiska mikroföroreningar kan bli en komplex fråga som kräver många olika överväganden. Valet beror naturligtvis på vilka ämnen som avskiljas till vilken grad men också på hur den befintliga reningsprocessen ser ut. Olika processlösningar kan passa olika bra för integrering med exempelvis ozon eller aktivt kol. Vid införande av avancerad rening bör varje enskilt avloppsreningsverk studeras utifrån de förutsättningar som råder i det enskilda fallet. IVL har tagit fram en handbok med handfasta råd (Baresel m.fl., 2017) och det finns även litteratur med erfarenheter från bland annat Schweiz (Abegglen & Siegrist, 2012). Till dessa studier finns även kostnadsbedömningar. Det har även gjorts en mer omfattande kostnadsbedömning av STOWA i Nederländerna (Mulder, 2015) där tyska och schweiziska kostnadsbedömningar jämförs.

7.1 Utgångspunkter för kostnadsbedömningar

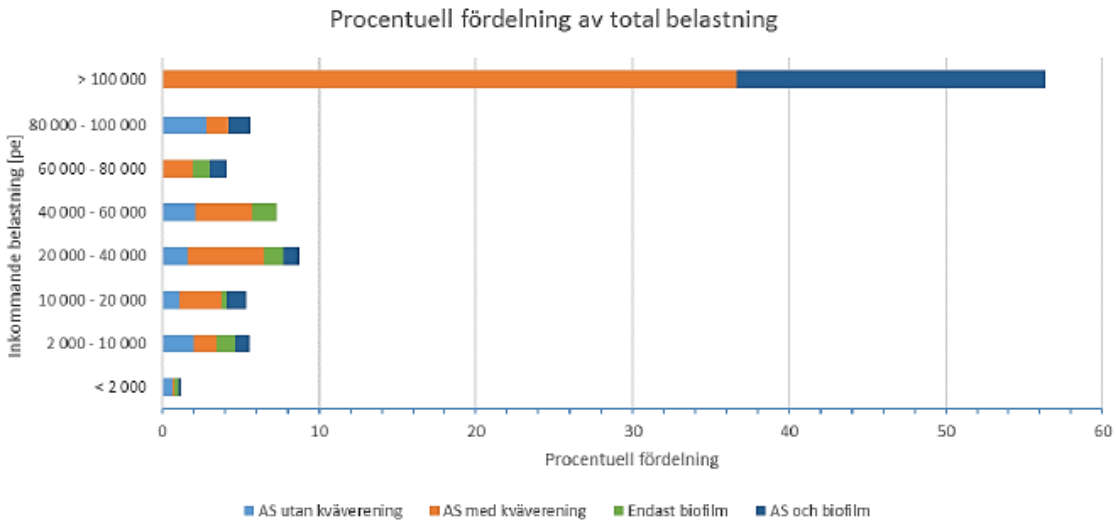
I *RESVAV* har kostnader har tagits fram utifrån olika storlekar på avloppsreningsverk. För att motivera valet av storlek på reningsverken undersöktes avloppsreningsverk i Sverige med avseende på storlek, flöde och processkonfiguration. Dataunderlaget hämtades från Svenskt Vattens Statistiksystem (VASS) med data från 2015 (Svenskt Vatten, 2016). Dataunderlaget motsvarar 441 avloppsreningsverk.

Figur 15 visar antalet avloppsreningsverk i olika storleksintervall (utifrån inkommande belastning). Av figuren framgår även vilken typ av biologisk process som används.



Figur 15. Svenska avloppsreningsverk fördelade utifrån inkommande belastning.

Figur 16 visar motsvarande procentuella fördelning.



Figur 16. Svenska avloppsreningsverk fördelade utifrån inkommande belastning. Fördelningen visar belastning för de olika storleksintervallen (totalt ca 6 500 000 pe) samt typ av biologisk process.

Figurerna visar bland annat att över hälften av inkommande belastning kan knytas till anläggningar dimensionerade för >100 000 pe men att antalet anläggningar är störst i de kategorier som representerar de minsta anläggningarna. Biofilmsprocesser förekommer i alla storlekskategorier. Aktivslamprocesser förekommer med och utan kväverening i alla storlekskategorier utom den största. De allra minsta avloppsreningsverken är flest till antalet men utgör en mycket liten del av den totala belastningen. Samtidigt kan det vara värt att notera att de mycket väl kan vara kopplade till särskilt känsliga eller skyddsvärda recipienter.

Utifrån statistikunderlagen och arbetet med att identifiera olika typreningsverk valdes tre storlekar ut:

- Litet reningsverk: 20 000 anslutna personer
- Mellanstort reningsverk: 50 000 anslutna personer
- Stort reningsverk: 100 000 anslutna personer

Den undre storleksgränsen för typreningsverken valdes till 20 000 personer baserat på det regeringsuppdrag som Naturvårdsverket erhöll i december 2015 för att utreda förutsättningar för införande av avancerad rening omfattade reningsverk > 20 000 anslutna personer. Mindre reningsverk kan dock naturligtvis komma ifråga för rening. Reningsverk i mellanstorlek väljs till 50 000 personer baserat på att förhållandevis många reningsverk återfinns inom storleksintervallet 40 000 - 80 000 p.e. Den övre storleken på 100 000 personer valdes eftersom ca tio reningsverk ligger inom intervallet 80 000 – 150 000 pe. Det finns även ett antal reningsverk som överstiger 150 000 pe i detta dataunderlag och kostnaderna per person eller per m^3 för dessa antas ligga i samma storleksordning som för ett reningsverk på 100 000 pe, eller möjligen lägre.

7.2 Processkonfiguration och val av reningsteknik

Typen av aktivslamprocess, hög- eller lågbelastad, kan vara av stor betydelse för efterföljande reningssteg. Detta har undersökts i projektet och redovisats i en nyligen accepterad artikel. I denna publikation prövas COD, istället för DOC, som utgångsparameter för dimensionering av ozonanläggningar. Huruvida det finns en aktivslamprocess och/eller en biofilmsprocess kan

vara av intresse för möjligheterna att integrera avancerad rening i processen. Ozonering kräver någon form av biologisk efterbehandling och detta kan ordnas med en bärarprocess eller ett efterföljande sandfilter. Pulveriserat aktivt kol kan tillsättas en aktivslamprocess men det har i detta projekt visats möjligt även i en bärarprocess (se kapitel 6).

Ytterligare ett processteg som är av särskilt intresse vid införande av ett reningssteg för mikroföroreningar är ett sandfilter. Sandfilter kan användas för biologisk behandling efter ozonering och för avskiljning av pulveriserat kol eller som förbehandlingssteg till ett aktivkolfilter. Ett befintligt sandfilter kan således användas på olika sätt vid en uppgradering till avancerad rening.

De typreningsverk som identifierats i VASS-underlaget kunde grupperas i två kategorier, de med ett biologiskt steg och de med två biologiska steg. I gruppen med ett biologiskt steg kunde följande indelning göras:

- Aktivslam med och utan kväveavskiljning
- Biologisk rening med rörligt eller fast bärarmaterial

I gruppen med två biologiska steg kunde följande typreningsverk identifieras:

- Aktivslam utan nitrifikation samt MBBR-steg eller biobädd för nitrifikation och/eller kväveavskiljning
- Aktivslam med nitrifikation samt MBBR-steg för kväveavskiljning
- Aktivslam utan/med nitrifikation samt biobädd/MBBR med nitrifikation och/eller MBBR-steg för kväveavskiljning

Många reningsverk har dessutom antingen filter som efterbehandling eller efterfällning med sedimentering eller efterfällning med sedimentering och filtrering.

Denna analys av hur svenska reningsverk är uppbyggda ligger till grund för hur kostnadsberäkningarna delas upp och presenteras. Sandfilter (för biologisk efterbehandling) och sedimentering (för separation av PAK) redovisas separat för att det ska vara enklare för en verksamhetsutövare att få en uppskattning av kostnader för att införa avancerad rening. Till de principiella konfigurationer som togs fram i projektets inledning har även slutfiltrering med aktiv kol tillfogats.

7.3 Dimensionerande flöden

Dimensionerande och maximala flöden behöver tas fram för varje aktuellt reningsverk. Det är särskilt viktigt att beakta om ett verk har stor andel av tillskottsvatten vilket medför högre flöden, i alla fall periodvis, och ett mer utspätt vatten. Tabell 3 sammanfattar de flöden som använts i projektets kostnadsbedömningar.

Tabell 3. Flöden för kostnadsberäkningar.

	Litet	Mellan	Stort
Antal anslutna	20 000 personer	50 000 personer	100 000 personer
Årsflöde	8 000 m³/d 400 l/p,d	20 000 m³/d 400 l/p,d	37 000 m³/d 370 l/p,d
$Q_{dim,ar}$ och $Q_{max,ar}$, avancerad rening	400 m³/h 480 l/p,d	1 000 m³/h 480 l/p,d	1 700 m³/h 410 l/p,d

Det bör observeras att dimensionerande flöde är högre än det valda årslödet vilket får konsekvenser för installerad kapacitet eftersom flödesvariationer måste klaras i en verklig situation.

Dimensionerande förutsättningar för de olika kostnadsbedömningarna utgörs av en sammanvägning av resultat från detta och andra projekt. Tanken har varit att ge en rimlig kostnadsbild utifrån ett antagande om att rening motsvarande 90% för att stort antal ämnen ska klaras.

7.4 Specifika kostnader

I tabell 4 och 5 redovisas kostnader uttryckt per m^3 respektive per person för de olika reningsalternativen. Det antas att 90% av årsflödet renas.

Tabell 4. Kapital-, drift- och årskostnader uttryckta i kr/m^3.

Storlek	Ozon	GAK	PAK +slam-hantering	Sandfilter	Sedimentering för PAK
Kapitalkostnad (kr/m³)					
20 000	0,3-0,4	0,5-0,7	-	0,5-0,7	-
50 000	0,2-0,3	0,4-0,5	-	0,3-0,4	-
100 000	0,2-0,3	0,3-0,4	0,1-0,2	0,2-0,3	0,1-0,2
Driftkostnader (kr/m³)					
20 000	0,1-0,2	0,5-0,6	-	ca 0,01	-
50 000	0,1-0,2	0,5-0,6	-	ca 0,01	-
100 000	0,1-0,2	0,5-0,6	0,4-0,6	ca 0,01	**
Årskostnad (kr/m³) *					
20 000	0,4-0,5	1,0-1,3	-	0,5-0,7	-
50 000	0,3-0,4	0,8-1,1	-	0,3-0,4	-
100 000	0,3-0,4	0,8-1,1	0,6-0,8	0,2-0,3	0,1-0,2

* underhålls- och personalkostnader ej medräknat.

** Driftkostnad för sedimentering och recirkulation av PAK inkluderas i kostnaden för PAK+slamhantering

Tabell 5. Kapital-, drift- och årskostnader uttryckta i kr/person.

Storlek	Ozon	GAK	PAK	Sandfilter	Sedimentering för PAK
Kapitalkostnad (kr/person,år)					
20 000	44-59	73-98	-	76-102	-
50 000	31-41	52-69	-	39-52	-
100 000	24-32	41-55	20-26	27-36	22-30
Driftkostnader (kr/person,år)					
20 000	13-18	64-85	-	1,1-1,5	-
50 000	13-18	64-85	-	0,9-1,3	-
100 000	12-16	59-79	51-68	0,9-1,3	**
Årskostnad (kr/person,år) *					
20 000	58-77	137-183	-	78-103	-
50 000	44-59	115-154	-	40-53	-
100 000	36-48	100-134	70-94	28-37	22-30

* underhålls- och personalkostnader ej medräknat.

** Driftkostnad för sedimentering och recirkulation av PAK inkluderas i kostnaden för PAK+slamhantering

Det kan vara värt att notera att den specifika kostnaden sjunker med anläggningsstorlek. Kostnader för ett efterföljande sandfilter är betydande i jämförelse med kostnaderna för den avancerade reningen.

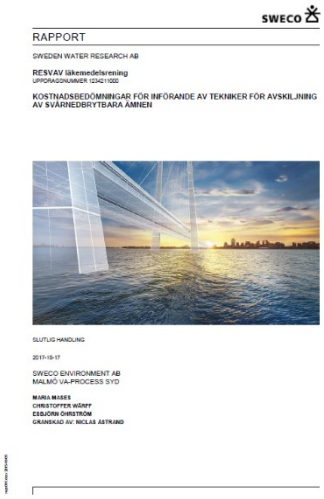
7.5 Fortsatt läsning

Mer om förutsättningarna för kostnadsbedömningarna finns att läsa i:

- *Kostnadsbedömningar för införande av tekniker för avskiljning av svårnedbrytbara ämnen*

  Sweco Environment AB, Malmö VA-process syd
  Maria Mases, Christoffer Wärff, Esbjörn Öhrström

  Rapport
  Sweden Water Research AB


SWECO

RAPPORT

SWEDEN WATER RESEARCH AB

RESVAV läkemedelsrening
UPPDRAGSNUMMER 1234211000

KOSTNADSBEDÖMNINGAR FÖR INFÖRANDE AV TEKNIKER FÖR AVSKILJNING AV SVÅRNEDBRYTBARA ÄMNEN

SLUTLIG HANDLING

2017-10-17

SWECO ENVIRONMENT AB
MALMÖ VA-PROCESS SYD

MARIA MASES
CHRISTOFFER WÄRFF
ESBJÖRN ÖHRSTRÖM
GRANSKAD AV: NICLAS ÅSTRAND

8 Slutord

Med *RESVAV* var målet att utveckla reningsprocesser och dimensioneringskriterier för drift och utbyggnad av olika typer av avloppsreningsverk. Arbetet var i huvudsak inriktat mot ozonering där de olika pilotförsöken uppfyllt flera syften. Dels har specifika doser och andra kritiska parametrar studerats och dels har ozonering testats och demonstrerats hos flera olika VA-organisationer och i nära samarbete med personal på de olika avloppsreningsverken. Detta är en stor fördel både i utvärdering men också för kunskapsspridning. Försöken visar att ozonering fungerar för reduktion av ett brett spektrum av ämnen men också att dosbehovet kan variera mellan olika avloppsreningsverk.

Med projektet togs också ett stort steg mot en ny processkombination med dosering av pulveriserat aktivt kol till en process med rörliga biofilmsbärare. Långtidsförsök visar att en sådan kombination tycks fullt möjlig. Förhoppningen är att utveckla denna process ytterligare.

Inom ramen för projektet har även kostnader för olika processlösningar och typer av avloppsreningsverk uppskattats. Kostnaderna sjunker med ökande anläggningsstorlek men varierar mellan tekniker och beror också på hur den befintliga infrastrukturen kan utnyttjas.

Var i landet åtgärder bör sättas in beror på olika faktorer, men i kraft av det arbete som genomförts i detta och andra projekt inom utlysningen finns det nu både kunskap om och driftserfarenhet av olika tekniska lösningar och vad de kostar.

Projektet har gett flera studenter möjligheter att skriva examensarbete och bidra till arbetet. Flera vetenskapliga publikationer har också författats under resans gång och i skrivande färdigställs ytterligare en. Genom arbetet har en viktig plattform för fortsatta studier etablerats liksom en viktig kunskapsbas för att tillsammans med de som varit aktiva inom de andra projekten kunna bidra till en framtida utbyggnad av svenska avloppsreningsverk.

Projektet har också bidragit till nya initiativ och forskningssamarbeten. Institutionen för Kemiteknik vid Lunds universitet deltar sedan 2017 i ett internationellt forskningsprojekt, BONUS *Cleanwater*, där nedbrytning av organiska mikroföroreningar studeras, både genom ozonering och med biologisk nedbrytning med rörliga biofilmsbärare. Pilotanläggningar har ställts upp på Lundåkraverket i Landskrona. Institutionen leder också sedan 2017 ett internationellt forsknings- och utvecklingsprojekt, *Less is More*, där separation av organiska mikroföroreningar med aktivt kol studeras.

9 Referenser

Abegglen, C. & Siegrist, H. (2012). Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser – Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Scweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern 2012.

Andersson J., Woldegiorgis A., Remberger M., Kaj L., Ekheden Y., Dusan B., Svensson A., Broström-Lundén E., Dye C. & Schlabach M. (2006) *Results from the Swedish National Screening Programme 2005*. Sub report 1 Antibiotics, Anti-inflammatory substances and Hormones. IVL rapport B1689, 2006.

Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Søhr, 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.

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.

Boehler, M., Zwickenpflug, B., Hollender, J., Ternes, T., Joss, A., & Siegrist, H. (2012). Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon, *Water Science & Technology*, 66, 10, 2115-2121.

Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council.

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.

Commission Implementing Decision (EU) 2015/495 of 20 March 2015 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council (notified under document C(2015) 1756) Text with EEA relevance, OJ L 78, 24.3.2015, p. 40–42.

Falås, P. (2012) *Removal of pharmaceuticals in biofilm and activated sludge systems*. Doctoral thesis. Water and Environmental Engineering. Department of Chemical Engineering, Lund University, Sweden.

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.

Fick, J., Lindberg, R., Kaj, L. och Brorström, E. (2011). *Results from the Swedish National Screening Programme 2010*. Subreport 3. Pharmaceuticals. IVL rapport B2014.

Havs- och vattenmyndigheten (2018). *Reningsteknik för läkemedel och mikroföroreningar i avloppsvatten. Redovisning av åtta projekt som fått medel från Havs- och vattenmiljöanslaget 2014-2017*. Rapport 2018:7.

HVMFS (2015). *Havs- och vattenmyndighetens föreskrifter om klassificering och miljökvalitetsnormer avseende ytvatten*, HVMFS 2015:4.

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.

Mulder, M., Antakyali, D., Ante, S. (2015). *Costs of Removal of Micropollutants from Effluents of Municipal Wastewater Treatment Plants - General Cost Estimates for the Netherlands based on Implemented Full Scale Post Treatments of Effluents of Wastewater Treatment Plants in Germany and Switzerland*. STOWA and Waterboard the Dommel, The Netherlands.

Naturvårdsverket (2008). *Avloppsreningsverkens förmåga att ta hand om läkemedelsrester och andra farliga ämnen*. Rapport 5794, februari 2008.

Naturvårdsverket (2017). *Avancerad rening av avloppsvatten för avskiljning av läkemedelsrester och andra oönskade ämnen. Behov, teknik och konsekvenser*. Rapport 6766. April 2017.

Svenskt Vatten (2016). *Svenskt Vattens undersökning VASS reningsverk 2015 – nyckeltal från första året.*

Woldegiorgis A., Green J., Remberger M., Kaj L., Brorström-Lunden E., Dye C. och Schlabach M. (2007). *Results from the Swedish screening 2006*. Sub report 4: Pharmaceuticals. IVL rapport B1751, 2007.