

Förstudie läkemedelsrening - Rosendals reningsverk, Tomelilla

2022-2023



Framtagen av:
Akvedikt AB
Miljö och Media på Kivik AB

Österlen VA

Titel: Förstudie läkemedelsrening - Rosendals reningsverk, Tomelilla

Författare: Michael Cimbritz och Ola Svahn

Beställare: Österlen VA

År: 2023

Omslagsbild:

Den avslutande poleringsdammens överfall, som fungerar som utlopp innan det renade avloppsvattnet leds vidare till Välabäcken, som rinner genom naturreservatet Skogsbacken och Väladalen.

Foto: Ola Svahn

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Syfte och bakgrund	5
<i>Rosendals ARV.....</i>	<i>6</i>
Provtagning och analys av organiska mikroförureningar.....	7
<i>Analysmetod.....</i>	<i>8</i>
<i>Inledande recipientstudier i juli 2022</i>	<i>9</i>
<i>Flödesmätningar i Sverige</i>	<i>11</i>
<i>Innovativ flödesberäkning utvecklad i projektet</i>	<i>11</i>
<i>Jämförelse med S-Hype-modellen</i>	<i>13</i>
<i>Den europeiska gröna given – utökad ämneslista.....</i>	<i>15</i>
<i>Den europeiska gröna given – utvärdering av avancerad rening.....</i>	<i>17</i>
<i>Vi går till verket - mätning i september 2022</i>	<i>18</i>
<i>Heltäckande screening i oktober 2022</i>	<i>19</i>
<i>Recipientsituationen i oktober.....</i>	<i>20</i>
<i>Slam från plattan i oktober.....</i>	<i>22</i>
<i>Årlig omsättning av läkemedel på Rosendal</i>	<i>23</i>
<i>Recipienten i fokus - monitorering och bedömning.....</i>	<i>24</i>
Det fjärde reningssteget vid Rosendals ARV	27
<i>Principiella reningsalternativ.....</i>	<i>27</i>
<i>Biologisk rening och kemisk rening</i>	<i>28</i>
<i>Ozonering</i>	<i>28</i>
<i>GAK-filtrering.....</i>	<i>28</i>
<i>Ozonering och GAK-filtrering.....</i>	<i>28</i>
<i>Filtrering som för- eller efterbehandling</i>	<i>29</i>
<i>Andra tekniker.....</i>	<i>29</i>
<i>Avskiljning av olika ämnen</i>	<i>29</i>
<i>Avancerad rening vid Rosendals ARV</i>	<i>31</i>
<i>Teknikval.....</i>	<i>31</i>
<i>Dimensioneringsförutsättningar</i>	<i>32</i>
<i>Dimensionering.....</i>	<i>33</i>
<i>GAK.....</i>	<i>34</i>
<i>Ozon</i>	<i>34</i>
<i>Sandfilter</i>	<i>34</i>
<i>Ytbehov.....</i>	<i>35</i>
<i>Kostnadskalkyl.....</i>	<i>36</i>
<i>Investeringskostnader</i>	<i>36</i>

Kapitalkostnader	37
Driftkostnader.....	38
Bäddvolym och kolbyte	39
Årskostnader.....	40
<i>Slutord till förstudien</i>	42
<i>Referenser</i>	44

Sammanfattning

Denna förstudie omfattar utsläppsproblematiken gällande mikroföroreningar, främst läkemedel, och har genomförts vid Rosendals avloppsreningsverk i Tomelilla. Förstudiens syfte har varit att utreda behovet och förutsättningarna kring ett fjärde reningssteg samt föreslå lämpliga och möjliga tekniklösningar för att avskilja läkemedelsrester.

Analysdelen i förstudien har bestått av löpande provtagning för att fastställa läkemedelsresternas halter i inkommande och utgående avloppsvatten samt i de mottagande vattendragen Välabäcken och Örupsån. Provtagnings- och analysarbetet har omfattat 27 avloppsvattenprover, två slamprover och 20 vattenprover i de bägge recipienterna under olika årstider och flödesförhållanden.

De månatliga mätningarna visade att 35 av 39 analyserade ämnen kunde kvantifieras i det inkommande avloppsvattnet under året. Överlägset högst var halterna av de båda smärtstillande preparaten ibuprofen och paracetamol i det inkommande avloppsvattnet, och som bidrar med över 60 kg per år. Övriga undersökta läkemedel når verket med massan 28 kg per år. Vissa läkemedel reduceras i hög utsträckning i reningsverket, som ibuprofen och paracetamol, andra i mycket mindre omfattning, som till exempel metoprolol och diklofenak, vilka hade medelkoncentration 1043 ng/L respektive 475 ng/L i utgående avloppsvatten. Reningsverkets biologi klarar de av EU föreslagna recipientkraven för ibuprofen, men inte för diklofenak. I medeltal reduceras läkemedlens inkommande mängder med 45%. Screeningen som genomfördes på flera mätpunkter i verket tillsammans med slammets innehåll av läkemedel visar tydligt att ämnen som ketokonazol, ciprofloxacin, ibuprofen, furosemid och citalopram reduceras i hög utsträckning redan i försedimenteringen, men då som adsorption till slammet. Även Bisfenol A återfinns i slam, liksom östrogen och PFOS, vilket också bör uppmärksammas på grund av dess svårnedbrytbarhet kopplat till slamspridning på åkermark. I medeltal hamnar 13 % av mängden ämnen i slammet.

I projektet har, genom analyserna av inkommande och utgående avloppsvatten, sju lämpliga indikatorer identifieras för utvärdering av avancerad rening. Ämnena har valts ut med tanke på analyserbarhet, EU:s kategoriindelning och att det är ämnen vi hittar i stabila halter i Tomelillas avloppsvatten.

Recipientanalyserna visar att halterna av diklofenak, som har både ett befintligt svenskt gränsvärde (100 ng/L i årsmedelvärde) och ett föreslaget värde på 40 ng/L från EU, överskrids. I Örupsån överskrids EUs föreslagna gränsvärde vid fyra tillfällen nedströms reningsverket (medelvärde 64 ng/L) och i Välabäcken vid samtliga tillfällen (medelvärde 182 ng/L) över året. På EU-nivå har även det naturliga könshormonet östrogen (östron, E1) fått ett gränsvärde. Det föreslagna gränsvärdet på 0,36 ng/L överskrids vid samtliga mättillfällen utom i januari, som var högflödesmånad i recipienterna, i båda vattendragen. Det är också tydligt att torrperioder kan infalla vid olika tidpunkter, ej bara sommartid, vilket data från undersökningsåret visar.

I projektet har en innovativ flödesberäkning tagits fram baserat på reningsverkets egna flödesdata tillsammans med uppmätta halter av indikatorämnet karbamazepin. Metoden har jämförts med SMHIs S-Hype modell, och jämförelsen visar att SMHIs modell kraftigt underskattar reningsverkets tillskott av vatten. Reningsverkets bidrag av vatten till Välabäcken har det positiva med sig att trygga vattensituationen, men det innebär också att halterna av föroreningar dramatiskt stiger vid lågvattenflöden, så länge som avancerad rening inte finns på plats.

Den goda biologiska reningen och verkets höga kapacitet, där bräddningar kan undvikas, innebär goda förutsättningar inför en installation av ett fjärde reningssteg för att avlägsna

läkemedelsrester. Både ozonering och filtrering genom granulerat aktivt kol utgör möjliga teknislösningar för en utbyggnad på Rosendals ARV. De bägge alternativen kan installeras på den plats som finns tillgänglig och kommer i jämförelse med andra reningssteg inte att ta särskilt mycket utrymme i anspråk (<200 m²).

Ozonering följt av sandfiltrering blir något billigare än sandfiltrering följt av GAK-filtrering. Alternativet med ozonering och GAK i kombination blir dyrast. De specifika årskostnaderna är i storleksordningen 1,5 SEK/m³ behandlat vatten (inklusive för- eller efterbehandling), där kostnaden för ozonering är något lägre och kostnaden för GAK-filtrering något högre. De slutliga kostnaderna beror av en rad olika faktorer där el- och råvarupriser kommer att spela en stor roll. Kapitalkostnaden utgör i storleksordningen hälften av årskostnaden. Kostnaden för anläggningar med aktivt kol är framför allt känsliga för drifttiden innan kolet byts ut och för priset på aktivt kol medan driftkostnaden för en ozonanläggning kommer att vara känslig för elpriset.

GAK-filtrering med förfiltrering är en enkel och stabil processlösning som kräver ett minimum av tillsyn. Det finns goda erfarenheter inom Österlen VA från närliggande kolfilteranläggningar vilket skapar goda grunder för dimensionering och uppskattning av livslängd för kol. En fördel med GAK-filtrering är att ämnen i huvudsak avskiljs genom adsorption, vilket möjliggör efterföljande destruktion. I en ozonanläggning bygger avskiljningen på omvandling av ämnen genom oxidation som bildas vid reningen.

Rosendals reningsverk hamnar inom kategorin (10 000 – 100 000 pe) i det föreslagna EU-avloppsdirektivet, vilket betyder att en riskbaserad bedömning, med recipientperspektivet i fokus, ska ligga till grund för ett åtgärdsbehov. Recipienten Välabäcken är med sina omgivningar och djurliv mycket skyddsvärd, och är med tanke på sin ringa storlek med låg utspädningsgrad en sårbar recipient under alla årstider. Strängare krav från EU väntas fastställas inom en nära framtid, och där kommer nya ämnen och ytterligare åtgärdskrav vad gäller mikroföroreningar, såsom läkemedel, finnas med. Detta tillsammans med det faktum att svenska gällande, och av EU föreslagna, gränsvärden för diklofenak överskrids året runt motiverar en utbyggnad av ett fjärde reningssteg. I rapporten belyses även överträdelser av gränsvärden för andra ämnen.

Syfte och bakgrund

Österlen VA har genomfört en förstudie med huvudsakligt syfte att utreda förutsättningar för en fullskaleinstallation av teknik för rening av avloppsvatten från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar på Rosendals avloppsreningsverk (ARV) i Tomelilla. Förstudien med tillhörande rapport har till 90% finansierats av Naturvårdsverket med beslut daterat 2022-06-23 - *Bidrag enligt förordningen (2018:495) om bidrag för rening av avloppsvatten från läkemedelsrester*, Ärendenr. NV-22-001822.

Resultaten från förstudien ska utgöra underlag för beslut om eventuell investering i utbyggnad med ett fjärde steg för avloppsvattenrening. Förutom att bidraget från Naturvårdsverket ska kunna leda till konkreta åtgärder i form av installationer i fullskala ska satsade medel även bidra till en ökad kunskapsuppbyggnad kring avancerad rening. Detta genom att belysa de frågeställningar som uppstår i samband med behovsbedömning, planering, projektering, upphandling, installation och drift av läkemedelsrening.

Rosendals ARV är beläget i östra delen av Tomelilla tätort och angränsar till Skogsbackens naturreservat i tre väderstreck, Figur 1. Skogsbacken med Väladalen är ett kommunalt naturreservat i direkt anslutning till Tomelilla tätort och har erbjudit ortsborna möjligheter till motion, rekreation och picknick i över hundra år. Trots det tätortsnära läget har reservatet höga naturvärden. Naturen är varierad med lövskog, våtmarker och öppna ytor. Skogsbackens naturreservat har ett rikt fågelliv med cirka fyrtio häckande arter. Strömstare och kungsfiskare ses övervintra längs Vålabäcken, som slingrar sig genom Skogsbackens naturreservat. Båda arterna söker sig till rinnande vatten och är skickliga dykare. Inom området har man funnit minst sju olika fladdermusarter. Att fladdermusen brunlångöra finns här är unikt, då det är första gången arten noterats i ett så tätortsnära område. Detsamma gäller barbastell, vilket är en starkt hotad fladdermusart i Sverige. Den trivs bra i bokskogar och man tror det finns högst ett hundratal individer i Sverige.



Figur 1. Skogsbackens Naturreservat och Rosendals reningsverk



Figur 2. Utloppet från utsläppspunkten som delas i två flöden; en liten delström tar omvägen via en damm på golfbanan och huvudfåran går direkt till Välabäcken.

Rosendals reningsverks utlopp leds till Välabäcken i södra delen av naturreservatet, Figur 2. Välabäcken mynnar ut i Örupsån, några hundra meter från reningsverkets utlopp. I förstudiens slutskede framkom att under andra halvan av 2023 kommer Vattenmyndigheterna att presentera förvaltningscykel 4, som innebär ett utökande av sk vattenförekomster och dess indelning inom respektive vattendistrikt. I samband med det kommer Välabäcken klassas som en vattenförekomst, vilket den tidigare inte gjort. Detta innebär att beslutade miljö kvalitetsnormer med gränsvärden gäller, och att bedömning och bevakning av miljösituationen i bäcken utökas. Örupsån, som redan sen tidigare är en vattenförekomst, klassas i dag inom kategorin; "Uppnår ej god kemisk ytvattenstatus" ([VISS](#)). Detta utan att halter av läkemedel, såsom diklofenak, har vägts in i bedömningen.

Rosendals ARV

Vid Rosendals ARV finns i dag mekanisk, biologisk och kemisk rening. Den mekaniska reningen består av galler och luftade sandfång samt försedimentering. Den biologiska reningen består av en aktivslamprocess med fördenitrifikation och slamhydrolys (av returslam) för biologisk fosforavskiljning. Den kemiska reningen består av en efterfällningsanläggning. Renat vatten leds därefter till poleringsdammar innan vattnet når Välabäcken. Slambehandlingen består av förtjockning, rötning och slutavvattning. Rötningen var emellertid avställd under projektets genomförande. Verkets dimensionerande kapacitet motsvarar 16 500 pe och under 2022 beräknades 7 850 personer vara anslutna. Österlenmejeriet är anslutet till verket och står för en betydande del av belastningen (se vidare under dimensionerande belastning).

Provtagning och analys av organiska mikroföroreningar

I samband med recipientprovtagning förekommer ofta diskussioner kring representativa prover. Det är till exempel väsentligt att inkludera recipientprover tagna vid lågflöden så att inte recipientens mest sårbara period förbises. Analyssvaren kan ge värdefull kunskap för framtida utvärdering, uppföljning och drift av det fjärde reningssteget, som kan komma att drivas med olika belastning beroende på recipientens flödesvariationer. Mellan juli 2022 och juli 2023 genomfördes därför upprepad provtagning och analys av avloppsvattnet i reningsverk och recipienter för karaktärisering av mikroföroreningars förekomst, samt fastställande av halternas variation under året. Proverna togs enligt de rekommendationer som finns framtagna i rapporten *Interkalibrering av läkemedelsanalys för utvärdering av avancerad rening* (Svahn, 2023). Råden har sammanställts av HKR, IVL och SLU¹, och innefattar några praktiska enkla råd vid provtagning och provhantering, vilka utgör en viktig del av analyskedjan och bidrar till goda analysresultat. Avloppsvattenproverna togs som dygnsamlingsprover och förvarades i frys fram till analys.

I projektet utgjorde två vattendrag recipienter; en primär och en sekundär – Vålabäcken och Örupsån.

Recipientproverna togs som stickprover. Nedströmsprover togs på sådant avstånd från utsläppspunkten så att tillräcklig inblandning skett, dvs ca 200 m nedströms utsläppspunkten. I Vålabäcken användes Rosendals ARVs ordinarie provtagningspunkt. Provet togs mitt i vattendraget. Provtagning i Vålabäcken och Örupsån genomfördes vid sex tillfällen: sommar, höst, vinter respektive vår, med några extraprover under förväntad torrperiod (maj-juni 2023). I Figur 3 presenteras projektets provtagningspunkter i recipienten.

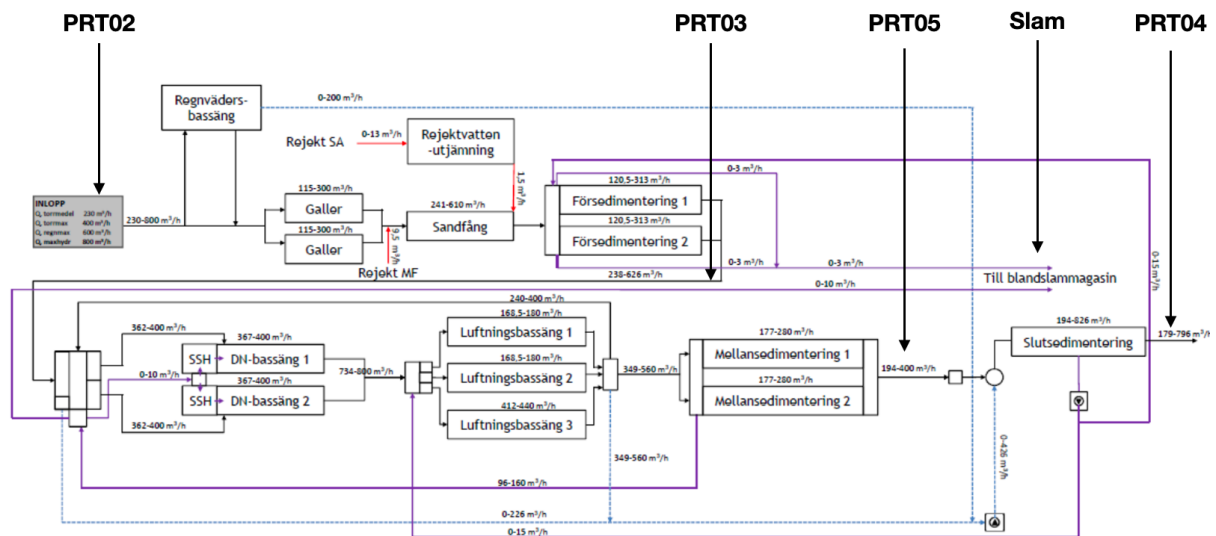
I reningsverket togs prover från inkommande vatten (PRT02), efter försedimentering (PRT03), efter mellansedimentering (PRT05) och i utgående prov från reningsverket (PRT04), dvs. före poleringsdammar.

Vid försedimenteringen avskiljs suspenderad substans, som skickas till slambehandlingen, där ca 20-30% BOD avskiljs. Just före detta steg tillförs rejektvatten från slambehandlingen. Mellan PRT03 och PRT05 återfinns reningsverkets biologi. Mellan PRT05 och PRT04 finns ett slutsedimenteringssteg och där avskiljs kvarvarande fosfor som skickas till slambehandlingen. Provpunkterna finns angivna i reningsverkets principskiss över processen, Figur 4.



Figur 3. Projektets provtagningspunkter.

¹ Högskolan Kristianstad, Svenska Miljöinstitutet och Sveriges lantbruksuniversitet



Figur 4. Principskiss över reningsverkets processteg.

Analysmetod

För att analysera läkemedel i vattenprover, som dessutom ofta förekommer i låga till mycket låga koncentrationer, krävs särskild provupparbetnings- och analysteknik (Loos m.fl., 2013). Vid provupparbetningen separeras och koncentreras mikroföroreningarna. Vidare avskiljs analysstörande bakgrundsämnen, som till exempel humus, från provet (Wickramasekara m.fl., 2012). Inom organisk spåranalys av polära till semipolära mikroföroreningar har det närmast blivit standard att använda SPE (Solid Phase Extraction) som upparbetningsteknik (Petrovic, 2014). När SPE används överförs (extraheras) mikroföroreningarna till en adsorbent som utgörs av en polymer innesluten i en provpatron. Efter extraktionen sköljs proverna ut med ett lämpligt organiskt lösningsmedel. Därefter indunstas proverna och överförs till särskilda provvialer i väntan på slutanalys. Analys av proverna sker med kromatografi i kombination med masspektrometri, ofta förkortad SPE-HPLC-MS/MS.

Den särskilda provupparbetningsteknik som har utvecklats och används på MoLab vid analys av prover möjliggör analys i hela vattenprovet, utan filtrering genom ett 0,45 µm filter som annars är brukligt (Svahn & Björklund, 2019a). På EU:s bevakningslista anges att "För att säkerställa jämförbara resultat från olika medlemsstater ska alla ämnen övervakas i hela vattenprover (EU 2015). Även i HVMFS 2019:25 nämns totala koncentrationer i hela vattenprover för de aktuella ämnena. Metoderna är validerade enligt standardmetoden, 1694, publicerad 2007 av det Amerikanska Naturvårdsverket (United States Environmental Protection Agency, US EPA), Method 1694 (EPA 2007) (Svahn & Björklund, 2016).



Figur 5 Upparbetade prover överförda till vialer i väntan på slutanalys.

I projektet har även slam från avloppsreningsverket analyserats med avseende på innehåll av mikroföroreningar. Vid provupparbetningen har en teknik baserad på ultraljud använts (Chemat m.fl. 2017). Metoden har validerats mot den teknik som tidigare använts på MoLab för extraktion av mikroföroreningar – SHWE (Super Heated Water Extraction) (Svahn & Björklund, 2019b).

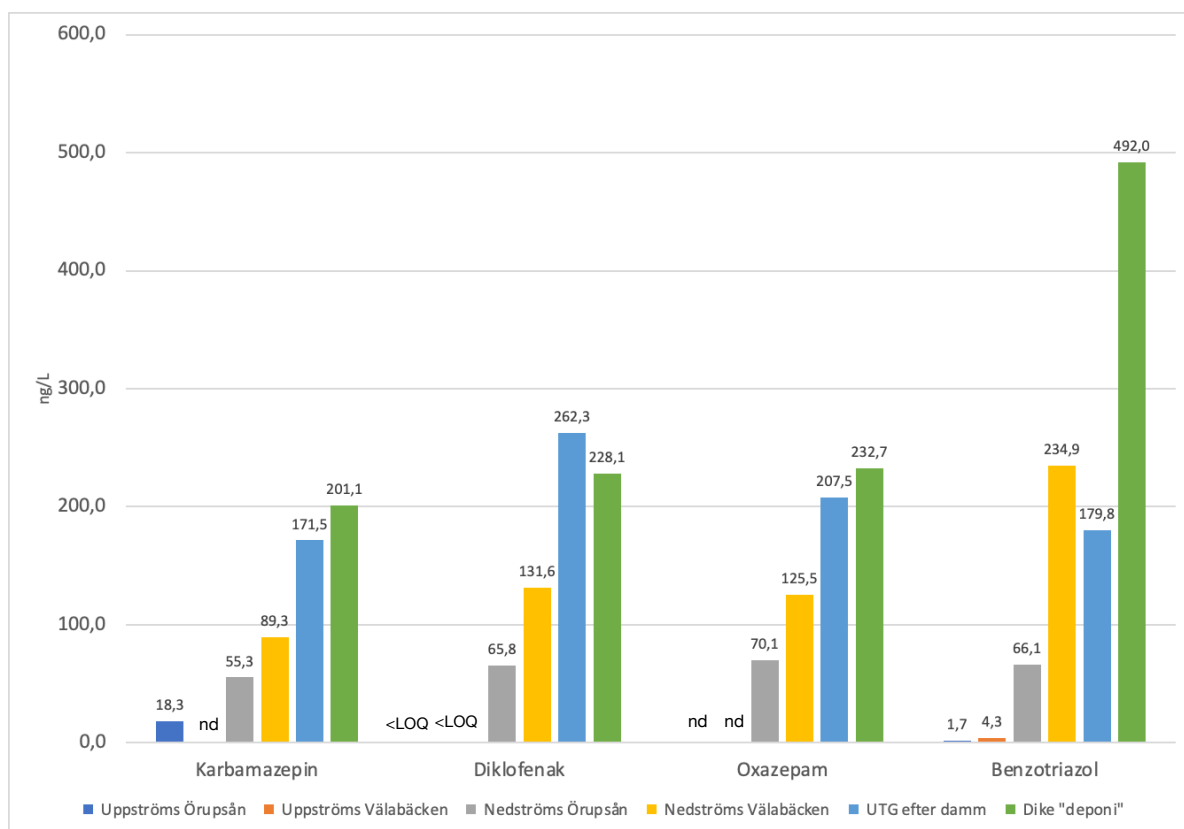
Inledande recipientstudier i juli 2022

Rosendals reningsverk släpper, som tidigare nämnts, ut det renade avloppsvattnet till Välabäcken, som efter en slingrande sträcka om ca 0,5 km ansluter till Örupsån. Tidigare undersökningar har visat att det uppströms Välabäcken inte förekommer några anslutna påverkanskällor innehållande läkemedelsrester (Pirzadeh m.fl., 2021), vilket också bekräftades i den första provtagningen som ägde rum i juli 2022. Juliprovtagningen fokuserade på recipientsituationen och innefattade därför inte prover tagna i reningsverket.

I Figur 7 har fyra ämnen av de totalt 39 undersökta ämnena valts ut för att tydliggöra situationen i recipienten, samt för att illustrera vissa specifika iakttagelser som gjordes i samband med mätningarna. Vidare kommer den metod för flödesbestämning i recipienten, som bygger på reningsverkets egna flödesangivelser samt mätningar av karbamazepin, och som utvecklats i projektet att introduceras och beskrivas.



Figur 6. Välabäcken, mitt i naturreservatet.



Figur 7. Fyra ämnen, av totalt 39 undersökta, har valts ut för att illustrera recipientsituationen i juli 2022.

Uppströms Örupsån kunde vissa läkemedel påvisas såsom karbamazepin samt kemikalien bensotriazol, Figur 7. Enligt VISS (Vatten Informations System Sverige) finns det inte några reningsverk anslutna till Örupsån, vid sidan av Rosendals reningsverk. Förekomsten av läkemedel visar därmed att det finns anslutna enskilda avlopp uppströms Örupsån. Nedströms Örupsån förekommer som väntat läkemedelsrester eftersom Välabäcken ansluter till Örupsån. Halterna av läkemedel i Örupsån nerströms är också lägre än i Välabäcken nerströms till följd av den utspädning som sker, Figur 7.

Rosendals reningsverk har seriekopplade dammar för polering av det utgående avloppsvattnet, se Figur 3, och omslagsbild. Det utgående vattnet från dammarna utgör reningsverkets egentliga utsläppspunkt, vilken ansluter till Välabäcken, därutöver går en liten delström vatten via ett dike till en damm på golfbanan, Figur 2. Golfbanan är anlagd ovanpå en nedlagd deponi. I juli provtogs också vatten från diket som har koppling till golfdamm och ev. tillskott från deponin, som också detta leds till Välabäcken, Figur 3. Provet innehöll läkemedelsrester i ungefär samma halter som i det utgående provet, däremot var halterna av bensotriazol mer än dubbelt så höga i detta prov, vilket skulle kunna betyda inslag av lakvatten från den nedlagda deponin, Figur 3. Förhöjda halter av t.ex PFOS och PFOA kunde däremot inte uppmätas.

Flödesmätningar i Sverige

I tider av klimatförändring blir det allt viktigare att i detalj förstå och beskriva hur en recipients flöde (vattenföring) fluktuerar över året. Övervakningen av vattenföring och vattenstånd baseras i Sverige på cirka 300 fysiska mätstationer, vilka utgör SMHIs grundnät. 200 av stationerna är SMHIs egna och 100 drivs av externa aktörer. Vattenförings- och vattenståndsdata från stationerna i SMHIs hydrologiska grundnät finns tillgängliga för nedladdning via applikationen [Vattenwebb](#). I den östra delen av Skåne finns endast *en* station som ingår i grundnätet, vid Hallamölla i Brösarp, som mäter vattenföringen i Verkeån. Verkeån har dock ingen förbindelse med det vattensystem där Välabäcken och Örupsån ingår. Mellan åren 1974 och 2001 fanns en station placerad vid Örupsån, se Figur 8. Stationen är numera nedlagd, liksom den i Köpingsbro nedströms (Nybroån).

I Sverige används SMHIs S-HYPE för att modellera vattenföringen. Idén kring en ny hydrologisk modell utvecklades vid SMHI, ett arbete som påbörjades 2003. 2005 gick startskottet för det storskaliga projektet och en första version av S-HYPE-modellen blev klar 2008. S-HYPE utvecklas kontinuerligt med ambitionen att ”i varje tidpunkt göra bästa möjliga uppskattning i tid och rum av flöden av både vatten och näringsämnen”, enligt SMHIs vattenwebbs-hemsida.

SMHI mäter inte vattenflöden i naturliga vattendrag kontinuerligt, vilket är både tidskrävande och kostsamt. I stället mäts *vattenståndet*, som sedan översätts till *flödet* med hjälp av en avbördningskurva. Utifrån vattenstånd kalibreras avbördningskurvan som visar sambandet mellan vattenstånd och flöde, med hjälp av manuella vattenföringsmätningar på olika vattenstånd. Flödet kan därpå beräknas. Ny teknik har gjort det möjligt att ta fram en ny typ av mätstation. Stationstypen kallas indexstation och finns på åtta av SMHIs hydrologiska mätstationer. Vattennivån, mäts med en ventilerad tryckgivare, och räknas om till area. Vattenhastigheter mäts under vattenytan med ett hydroakustiskt mätinstrument som räknas om till en medelhastighet. Därefter beräknas vattenföringen med hjälp av area och vattenhastigheten.

Innovativ flödesberäkning utvecklad i projektet

Att mäta ett vattendrags flöde är således inte helt enkelt. Flödet kan endast beskrivas exakt om man känner vattendragets tvärsnittsarea och hastigheten på vattnet enligt ovan. Hastigheten kan också bestämmas med apelsinmetoden² eller med ett strömhastighetsverktyg. Den exakta



Figur 8. De båda nedlagda flödesstationerna i Örupsån och Köpingsbro

² ”Apelsinens” hastighet mäts genom tidtagning på en tio meter lång sträcka. En medelhastighet beräknas på 5-10 mätningar.

tvärsnittsarean är mer omständlig att ta fram exakt.

I projektet framkom därför idén att gå en annan väg; det borde vara möjligt att beräkna flödet i en recipient, som har ett anslutande reningsverk, om reningsverkets utgående flöde och halten av en indikator i recipient och utgående flöde är kända. Karbamazepin, Figur 7, är att betrakta som ett förhållandevis inert ämne med avseende på biologisk nerbrytning och förekommer i förhållandevis jämn belastning (Figur 13), och ämnet lämpar sig därför väl som indikator (Björleinius m.fl. 2018). I ett reningsverk mäts dygnsvattenflödena ofta upp mycket exakt.

Flödet kan därmed beräknas enligt följande modell:

Halten karbamazepin mäts uppströms, nerströms samt i utgående vatten från reningsverket. Det totala bidraget till halten karbamazepin nerströms reningsverket kommer från uppströms- och utgående avloppsvatten. Genom att flödet ut från verket är känt kan följande samband ställas upp för att beräkna flödet *uppströms* reningsverket.

$$(Konc. \text{ uppströms } (\mu\text{g}/\text{m}^3)) \cdot X + (Konc. \text{ ut från verket } (\mu\text{g}/\text{m}^3)) \cdot (\text{Flöde ut från verket } (\text{m}^3/\text{d})) \\ = (X + \text{Flöde ut från verket } (\text{m}^3/\text{d})) \cdot (Konc. \text{ nerströms } (\mu\text{g}/\text{m}^3))$$

X står för Flöde uppströms (m^3/d)

Genom att samtliga parametrar är kända vid sidan av X , så kan X beräknas. Vi kan konkretisera med situationen i juli. Halterna karbamazepin som vi behöver för beräkningen av flödet vid det aktuella datumet återfinns i Figur 7;

Uppströms Välabäcken; $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Nerströms Välabäcken; $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Utgående från reningsverket; $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Flödet ut från reningsverket var vid tidpunkten; 3154 m^3

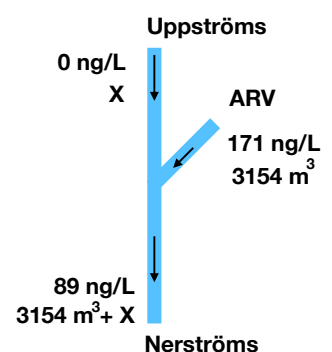
Flödet i Välabäcken uppströms kan därmed ställas upp och beräknas till

$$0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot X + 171 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot 3154 \text{ m}^3/\text{d} = (X + 3154 \text{ m}^3/\text{d}) \cdot 89 \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ 539334 \mu\text{g} = 89X \mu\text{g}/\text{m}^3 + 280706 \mu\text{g} \\ 258628 \mu\text{g} = 89X \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ X = 2904 \text{ m}^3/\text{d}$$

Flödet *nerströms* beräknas genom

$$2904 + 3154 = 6058 \text{ m}^3/\text{d}$$

De framtagna juli-resultaten enligt vår modell presenteras i Tabell 1, kolumn 1. Vid tillfället kan vi utröna att flödet i Välabäcken nerströms var $6058 \text{ m}^3/\text{d}$, innehållande 52% avloppsvatten. Genom att upprepa beräkningarna med Örupså-data så kan även flödet i Örupsån beskrivas. Flödet har nu ökat till $11610 \text{ m}^3/\text{d}$ och andelen avloppsvatten utgör nu 27%. För att få en uppfattning om modellens giltighet jämförs den i nästa avsnitt med S-Hype-modellen.



Tabell 1. Beräknade flöden i juli och oktober, enligt modellen framtagen i projektet, samt enligt S-Hype modellen.

Provplats	Karbamazepin			S-Hype		
	Juli (25/7)	Oktober (26/10)	ng/L	Juli (25/7)	Oktober (26/10)	m3/s
Uppströms Välabäcken	0,0	0,0	ng/L			
Uppströms Örupsån	18,3	0,7	ng/L	0,0641	0,0414	m3/s
Nerströms Välabäcken	89,3	173,1	ng/L	0,0443	0,0119	m3/s
Utgående verket	171,5	181,8	ng/L			
Nerströms Örupsån	55,3	68,8	ng/L	0,116	0,0574	m3/s
Flöde reningsverk (m3/d)	3154,0	2877,0	ng/L			
Flöde Välabäcken uppströms	2904,1	145,7	m3/d			
Flöde Välabäcken nerströms	6058,1	3022,7	m3/d	3827,52	1028,16	m3/d
Flöde Örupsån uppströms	5552,1	4628,0	m3/d	5538,24	3576,96	m3/d
Flöde Örupsån nerströms	11610,2	7650,6	m3/d	10022,4	4959,36	m3/d

Jämförelse med S-Hype-modellen

Modelldata för vattenföringar i olika avrinningsområden finns tillgängliga att ladda ner i Excelformat på [SMHIs vattenwebb](#). I vårt fall zoomar vi in på kartan i trakterna av Tomelilla, i Skåne. Vi klickar därefter på Örupsån, och får upp en dialogruta med en länk till en excel-fil innehållande samtliga modelldata. För beskrivning av vattenföringen i vårt område och jämförelse med vår modell behöver vi S-Hype-data från tre delavrinningsområden; nerströms Örupsån och Välabäcken, samt uppströms Örupsån.



Figur 9. Avrinningsområden i anslutning till Välabäcken och Örupsån.

Vattenföringsdata för det aktuella datumet i de tre punkterna finns under fliken dygnsuppdaterade värden och presenteras i enheten m³/s. De angivna värdena i excel-arken återfinns i kolumn fyra i Tabell 1. Flödet under det aktuella dygnet kan därmed beräknas, här exemplifierat med Örupsån uppströms;

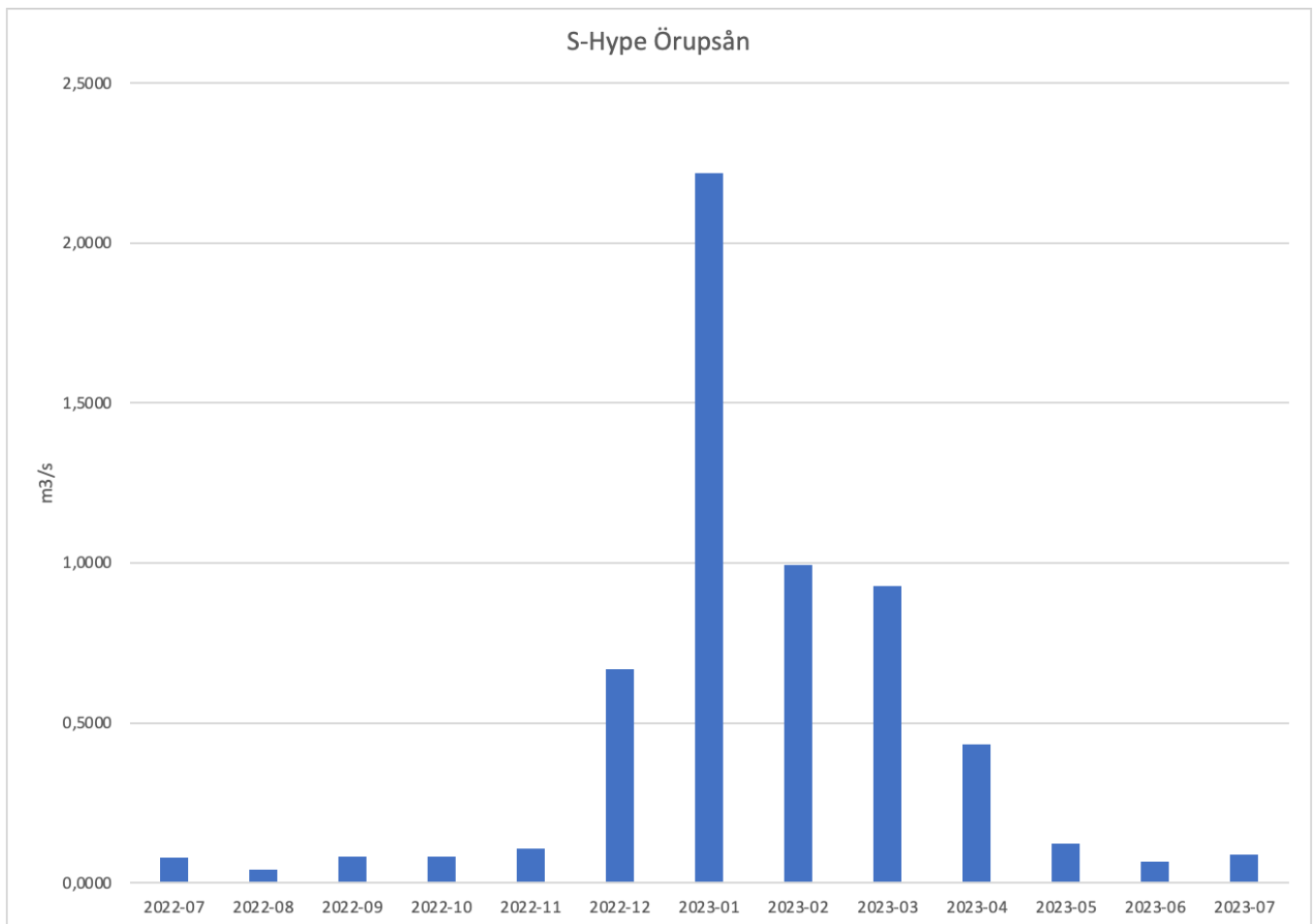
$$\text{Flöde} = 0,0641 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 24 \text{ h}$$

$$\text{Flöde} = 5538,3 \text{ m}^3/\text{d}$$

Detta värde kan jämföras med ”vår” modell som ger flödet 5552 m³/d, dvs en mycket god överensstämmelse. Vidare, ner mot Välabäcken; vår modell säger 6058 m³/d medan S-Hype landar i 3827 m³/d, dvs. en påtaglig skillnad. Man kan undra varför? En tanke är att S-Hype-modellen inte tar hänsyn fullt ut till det stora vattenbidraget (3154 m³/d) som kommer från

reningsverket. På SMHIs hemsida står att läsa att modellen främst tar in data gällande nederbörd och grundvatten. Enligt S-Hype skulle andelen avloppsvatten utgöra 82%, Tabell 1, vår modell säger 52%. I punkten nerströms Örupsån säger vår modell 11610 m³/d och S-Hype 10022 m³/d. SMHI skattar osäkerheten till mellan 35-40 % för de aktuella data. I vår modell kan vi identifiera osäkerhet på grund av att vi tar stickprov av karbamazepin. Alternativet hade varit att samla vatten över dygnet, vilket komplicerar och fördyrar mätningarna avsevärt.

Nedan redovisas månadsvis vattenföringsdata enligt S-Hype i vattenförekomsten Örupsån för de månader som projektet pågick. Modellen pekar tydligt ut att flödena var högst från december 2022 till april 2023. Vidare att lågflöden under perioden är påfallande samstämmigt låga över resterande delar året, vilket är värt att ha i åtanke när föroreningar i recipienten monitoreras. Trots underskattningen av flödet, är S-Hype ett kraftfullt verktyg vid flödesanalys i recipienter tack vare tillgången och enkelheten med vilken modelldata kan tas fram.



Figur 10. S-Hype modellens angivna flöden i Örupsån för månaderna som projektet pågick.

Den europeiska gröna given – utökad ämneslista

Den 26 oktober 2022 föreslog EU-kommissionen skärpta regler gällande förorening av luft, ytvatten och grundvatten, samt om rening av avloppsvatten från tätbebyggelse. I förslaget sägs att ”kommissionen har dragit lärdom av den nuvarande lagstiftningen och föreslår att de tillåtna gränsvärdena för föroreningar ska sänkas och att genomförandet ska förbättras, för att säkerställa att målen om minskade föroreningar oftare nås i praktiken”. Vidare att förslaget är ett viktigt steg mot nollföroreningsmålet i den [europeiska gröna given](#), där det slås fast att miljön senast 2050 ska vara fri från skadliga föroreningar. På grundval av aktuella vetenskapliga rön föreslår kommissionen en uppdatering av förteckningarna över vattenföroreningar som ska kontrolleras strängare i ytvatten och grundvatten. 25 ämnen med väldokumenterade problematiska effekter på naturen och människors hälsa kommer att läggas till i förteckningarna. Bland bekämpningsmedel, och nedbrytningsprodukter från bekämpningsmedel, har neonicotinoider identifierats som särskilt problematiska av EU, och har kommit att förbjudas i växtskyddsmedel då de innebär oacceptabla risker för pollinerande insekter som till exempel bin. Ämnena ingår dock i några biocidprodukter, Figur 11, som är godkända i Sverige, varför de kan utgöra potentiella spridningskällor till reningsverk och recipient. Dessa produkter berörs inte av EU-förbudet. Vidare uppmärksammas PFAS, en stor grupp långlivade kemikalier som bland annat används i stekpannor, kläder och möbler, brandsläckningsskum och kroppsvårdsprodukter samt bisfenol A, som används som mjukgörare och komponent i förpackningsplast. I de nya reglerna uppmärksammas också kumulativa och kombinerade effekter av blandningar, vilket breddar den nuvarande inriktningen på enskilda ämnen.



0,05 vikt-%
Imidaklopid

Figur 11 Biocidprodukter får fortfarande innehålla neonicotinoider

Det nu uppdaterade EU-förslaget för ämnena som ska kontrolleras strängare i ytvatten och grundvatten innefattar för första gången läkemedel, vilka är det här projektets huvudsakliga fokus. Flera av de föreslagna läkemedlen har inkluderats på EUs sk bevakningslistor, som infördes 2015. Diklofenak har figurerat länge i miljösammanhang, och förekom tidigt på EUs bevakningslista. Läkemedlet receptbelades i juni 2020, dock inte av miljöskäl. Ibuprofen är ett mycket vanligt smärtstillande läkemedel och konsumeras i hög utsträckning vilket höga inkommande halter till reningsverk vittnar om. Karbamazepin har undersökts länge i miljösammanhang, kanske ibland som en konsekvens av att det är relativt enkelt att analysera. Ämnet används vid epilepsi samt mot alkoholabstinens. Tre antibiotika finns upptagna på listan – makroliderna som föreslås kontrolleras är azitromycin, erytromycin och klaritromycin. Hormonerna E1, E2 och EE2 har också förekommit på EUs bevakningslista, och samtliga ingår på den uppdaterade listan. I Tabell 2 nedan redovisas samtliga 39 ämnen som ingått i undersökningen tillsammans med kvantifieringsgräns och mätosäkerhet. Vidare har de nu föreslagna årsmedelvärdena i ytvatten för de ovan nämnda läkemedlen angetts.

Tabell 2. De ämnen som analyseras i projektet³, med tillhörande kvantifieringsgräns (LOQ), och som också ingår på EUs föreslagna uppdaterade förteckning. De ämnen som utgör indikatorer för utvärdering av avancerad rening tillhör två olika kategorier. AA-EQS avser EUs föreslagna miljökvalitetsnorms årsmedelvärde. Kursiverade värden anger svensk miljökvalitetsnorm.

Ämne	CAS nr.	LOQ (ng/L)	RSD (%)	Indikatorer Avancerad rening	AA-EQS Inland ytvatten (ng/L)
17 alpha-ethinylestradio	57-63-6	0,1	3,8		0,017
17 beta-estradiol (E2)	50-28-2	0,1	2,3		0,18
Acetamidiprid	135410-20-7	0,1	1		37
Amisulprid	71675-85-9	1	2,6	Kategori 1	
Atenolol	29122-68-7	0,1	0,5		
Azithromycin	83905-01-5	1	2,7		19
Bensotriazole	95-14-7	1	2,5	Kategori 2	
Bisphenol-A (BPA)	1980-05-07	10	3,4		0,034
Carbamazepine	298-46-4	0,5	0,7	Kategori 1	2500
Ciprofloxacin	85721-33-1	5	3,3		10
Citalopram	59729-33-8	1	1,8	Kategori 1	
Clarithromycin	81103-11-9	1	3,6	Kategori 1	130
Clothianidin	210880-92-5				10
Diclofenac	15307-86-5	1	3	Kategori 1	40/100
Erythromycin	114-08-8	1	3,6		500
Estrone (E1)	53-16-7	0,05	1,2		0,36
Fluconazole	86386-73-4	0,6	1,2		
Furosemide	54-31-9	10	18		
Hydrochlorothiazide	58-93-5	10	15,3	Kategori 1	
Ibuprofen	15687-27-1	100	4,3		220
Imidacloprid	138261-41-3	0,1	2,5		6,8
Irbesartan	138402-11-6	2	4,8	Kategori 2	
Ketokonazol	65277-42-1	5	10,2		
Losartan	114798-26-4	0,1	3,2		
Metoprolol	37350-58-6	0,1	1,6	Kategori 1	
Metotrexat	59-05-2	5	5,4		
Naproxen	22204-53-1	25	3,9		
Oxazepam	604-75-1	0,6	1,6		
Paracetamol	103-90-2	1	6		
PFAS (sum of 24)		3	3,2		4,4
Propranolol	525-66-6	0,1	3,5		
Sertraline	79617-96-2	0,5	3,6		
Sulfamethoxazole	723-46-6	0,1	2,4		
Thiachloprid	111988-49-9	1	5,5		10
Thiametoxam	153719-23-4	0,1	1,3		40
Tramadol	27203-92-5	2	2,5		
Trimethoprim	738-70-5	1	1,4		
Venlafaxine	93413-69-5	1	6,3	Kategori 1	
Zolpidem	82626-48-0	1	2,9		

³ Av PFAS-24 analyserades endast PFOS och PFOA.

Den europeiska gröna given – utvärdering av avancerad rening

Schweiz har som första land i Europa lagstiftat om införande av avancerad rening från mikroföroreningar (Benstoem m.fl., 2017). För att utvärdera den avancerade reningen finns ett tröskelvärde definierat i lag som säger att ett 80 %-igt avlägsnande i genomsnitt av minst sex mikroföroreningar valda från en lista med 12 potentiella indikatorer för mikroföroreningar bör uppnås. Det ska betonas att den schweiziska modellen tar hänsyn till hela reningsverksprocessen; från inlopp till utlopp i reningsverket. I EUs förslag från den 26 oktober 2022 presenteras en snarlik modell angående nya EU-regler för rening av avloppsvatten från tätbebyggelse, med samma tillvägagångssätt, uppsättning indikatorer och regler för reduktion.

Procentandelen av avlägsnande ska beräknas för minst sex ämnen, valda från kategori 1 och kategori 2 i förhållandet 2:1. Förslaget säger att; "Genomsnittet av procentandelen av avlägsnande av alla ämnen som används i beräkningen ska användas för att bedöma om den erforderliga 80% minsta procentandelen av avlägsnande har uppnåtts" (Europeiska kommissionen, 2022). De mikroföroreningar från Schweiz och EU-listan som ingår i denna undersökning är markerade i Tabell 2 som Kategori 1 eller Kategori 2 beroende på tillhörighet. Diklofenak, karbamazepin och klaritromycin förekommer således både på den utökade ämneslistan och på listan för avancerad rening.

Vi går till verket - mätning i september 2022

Totalt har, som tidigare nämnts, 39 ämnen analyserats i förstudien. 35 av 39 ämnen kunde kvantifieras i det inkommande avloppsvattnet i september. Varken amisulpride, det syntetiska hormonet EE2 eller de båda neonikotiderna thiamethoxam och thiachloprid kunde detekteras i inkommande avloppsvatten. Överlägset högst var halterna av de båda smärtstillande preparaten ibuprofen och paracetamol i det inkommande avloppsvattnet, som mättes upp i över 10 ug/L. Ibuprofen är upptaget på EUs uppdaterade förteckning. De sju därefter följande ämnena förekom i halter över 1 ug/l. Tre av dessa ämnen ingår på EUs lista över indikatorsubstanser (blåmarkerade i Tabell 3) för utvärdering av avancerad rening; metoprolol, bensotriazol och diklofenak. Samtliga tre borde av den anledningen lämpa sig väl för utvärdering av avancerad rening. Men även venlafaxin, också en föreslagen indikator, som följer därefter finns också i hög halt. I haltintervallet 0,1 ug/L till 1 ug/L återfinns 15 ämnen. Här hittar vi bl.a fyra antibiotika; ciprofloxacin, azithromycin, sulfametoxazol och trimetoprim. Azithromycin finns med på den av EU föreslagna uppdaterade listan över ämnena som vattenföroreningar som ska kontrolleras strängare i ytvatten och grundvatten. Ciprofloxacin har sedan tidigare identifierats och inkluderats på EUs bevakningslista, och antibiotikan har fått miljökvalitetsnormer i Sverige enligt HVMFS 2019:25. Ytterligare två föreslagna indikatorämnen finns också i detta koncentrationsintervall; citalopram och karbamazepin. Båda förekommer i sådana halter att också de är lämpliga indikatorer för avancerad rening. Resterande 11 ämnen av de kvantifierade fanns i intervallet 1 ng/L till 100 ng/l. Här hittar vi ytterligare tre indikatorer för avancerad rening; irbesertan, hydrochlortiazide och clarithromycin. Att döma av halterna är irbersartan förstavalet, vilken dessutom ingår i kategori 2, som är färre till antalet på den totala listan om 12 tolv indikatorer. De båda PFAS-ämnena PFOS och PFOA har låga inkommande halter till Rosendal, vilket förstås är positivt. De två neonikotinoiderna imidakloprid och acetamiprid kunde kvantifieras i inkommande vatten.

Reduktionsgraden i medeltal sett till samtliga kvantifierade ämnen var i september 67%. Indikatorsubstanserna visar i medeltal en reduktionsgrad på 45% i reningsverket. Det inerta ämnet karbamazepin reduceras t.ex till 43%, diklofenak till 60% och metoprolol till 65%. Kommande analyser, samt eventuell förekomst i slam, får utröna om detta är bestående eller en engångsförekomst i september.

Tabell 3. Analyser från september i inkommande och utgående vatten (ng/L), samt beräknad reduktion (%). Ämnena är sorterade efter reduktionsgrad.

Ämne	Ink sep (ng/L)	Utg sep (ng/L)	Reduktion (%)
Amisulpride	nd	nd	-
Thiamethoxam	nd	0,5	-
Thiachloprid	nd	nd	-
Etinyestardiol (EE2)	nd	nd	-
Erythromycin	5,4	nd	100
Methotrexate	6,6	nd	100
Ketoconazole	215,2	<LOQ	100
Paracetamol	>50000	303,5	100
Estradiol (E2)	142,0	nd	100
Ibuprofen	16871,7	nd	100
Ciprofloxacin	862,8	18,7	98
Estrone (E1)	74,4	1,7	98
Naproxen	4516,3	122,4	97
Azithromycin	480,2	27,0	94
Losartan	4389,6	260,9	94
Bisphenol A	274,0	17,5	94
Trimetoprim	132,0	9,5	93
Furosemide	5742,5	445,5	92
Sertraline	238,4	28,2	88
PFOS	10,7	<LOQ	86
Atenolol	1280,4	233,4	82
Benzotriazole	1118,4	231,9	79
Citalopram	321,6	68,4	79
Propranolol	165,1	35,2	79
Zolpidem	4,2	1,0	76
Sulfametoxazole	285,8	81,0	72
Metoprolol	2516,0	904,5	64
Diclofenac	1117,3	448,8	60
Venlafaxine	872,8	409,2	53
Oxazepam	485,4	270,4	44
Carbamazepine	316,5	180,7	43
Tramadol	566,5	345,3	39
Irbesartan	83,1	54,1	35
Fluconazole	182,6	125,6	31
Clarithromycin	2,0	1,6	20
Acetamiprid	1,2	1,2	3
Imidakloprid	6,9	6,9	0
PFOA	6,0	7,1	-19
Hydrochlorthiazide	14,5	18,2	-25

Heltäckande screening i oktober 2022

I oktober 2022 gjordes en screening som innefattade prover både från recipient och reningsverk.



Figur 12. Rosendals reningsverk med slutsedimenteringen i förgrunden.

Inkommande halter var även i oktober högst för ämnena paracetamol och ibuprofen, och halterna i övrigt i paritet med septembermätningen. I Tabell 4, i de tre sista kolumnerna, har reduktionen beräknats över de olika delstegen i reningsverket. I kolumnen Red PRT03 finns reduktionen för PRT02 till PRT03 presenterad, dvs. steget inkluderande försedimenteringen. I den följande kolumnen, Red PRT05, finns reduktionsresultat över steget PRT03 till PRT05. Detta steg inkluderar verkets biologi. Slutligen i Red. In-Ut redovisats reduktionen över verket totalt sett. Ämnena har sorterats från högst till lägst avseende reduktionen över hela verket enligt denna kolumn. Det är tydligt att ämnen som ketokonazol, ciprofloxacin, ibuprofen, furosemid och citalopram reduceras i hög utsträckning redan i försedimenteringen. Vi kommer att beröra innehållet i slammet lite längre fram, och just dessa ämnen hittas också i högst utsträckning i slammet, med undantag för ibuprofen. En viss stegring av vissa värden, vilket visas som negativ reduktion kan noteras för 19 ämnen efter försedimenteringen. I nästa steg; i biologin, reduceras de höga halterna av paracetamol fundamentalt, detsamma gäller för ibuprofen och naproxen. Rosendal är att döma av den första undersökningen ett väl fungerande verk sett till dess biologiska funktion då en hög reduktion av ämnena paracetamol, ibuprofen och naproxen kunde påvisas. Ibuprofen är som nämnts upptagen på EUs utökade ämneslista. Andra ämnen som också påtagligt reduceras här är bisfenol A, östrogen (E1) och losartan. För de ämnen som binder till slam fortsätter reduktionen, som t.ex för ciprofloxacin, furosemid, ketokonazol och sertralin. Reduktionsgrader över nära 50% och däröver i biologin kan noteras för samtliga hjärtmediciner; atenolol, propranolol och metoprolol samt indikatorämnet bensotriazol. I det sista steget, vid slutsedimenteringen, reduceras flera ämnen ytterligare och t.ex antibiotikan ciprofloxacin kommer att ha mycket låga utgående halter, lägre än vad lagkraven säger efter utspädning i recipienten. Men det är förstås tydligt att flertalet av ämnenas reduktion är alltigenom otillräcklig i reningsverket så fort man tar steget ut i recipienten.

I medeltal var reduktionen 51%. Medelreduktionen för indikatorämnena var 54%, om chlaritromycin undantogs, som vid mättillfället hade mycket hög negativ utgående halt. Det intressanta är att inkommande halter av chlaritromycin är låga, sedan ökar de efter försedimenteringen. Det kan vara så att chlaritromycin anländer verket partikelbundet.

Noterbart är att den är en av EU föreslagen indikator för avancerad rening, men sett till den negativa massbalansen försvårar dess användning som indikator på Rosendal.

Tabell 4. Screening av de undersökta ämnena vid fyra punkter i reningsverket samt beräknad reduktionsgrad.

Ämne	Reningsverksprover				Red PRT03	Red PRT05	Red PRT04	Red. In-Ut
	INK PRT02	PRT03	PRT05	UTG PRT04				
Amisulpride	nd	nd	nd	nd	-	-	-	-
Thiacloprid	nd	2,1	nd	nd	-	-	-	-
Etinyestardiol (EE2)	nd	nd	nd	nd	-	-	-	-
Thiamethoxam	nd	nd	nd	0,4	-	-	-	-
Estradiol (E2)	98,4	nd	nd	nd	100	-	-	100
Ketoconazole	454,9	68,8	<LOQ	<LOQ	85	100	-	100
Ibuprofen	22853,9	7066,5	nd	nd	69	100	-	100
Methotrexate	10,7	11,5	nd	nd	-7	100	-	100
Paracetamol	>50000	>50000	405,8	262,0	-	100	35	100
Naproxen	3288,6	6096,0	48,5	25,6	-85	99	47	99
Ciprofloxacin	1275,7	381,5	63,3	15,5	70	83	76	99
Bisphenol A	673,8	486,4	11,1	<LOQ	28	98	100	99
Estrone (E1)	67,3	49,8	3,0	2,1	26	94	32	97
Losartan	5029,7	4383,0	371,1	258,4	13	92	30	95
Furosemide	8835,4	3861,0	950,7	542,8	56	75	43	94
Sertraline	419,8	239,7	42,8	29,5	43	82	31	93
Trimethoprim	131,8	143,0	22,5	15,5	-9	84	31	88
Propranolol	172,9	113,3	46,7	31,9	34	59	32	82
Citalopram	281,2	125,2	78,2	58,5	55	38	25	79
Atenolol	1320,0	1532,0	394,1	281,5	-16	74	29	79
Azithromycin	177,1	129,4	59,7	38,6	27	54	35	78
Zolpidem	4,8	4,2	1,5	1,1	13	64	28	78
Benzotriazole	1064,6	1248,8	361,7	252,4	-17	71	30	76
Sulfamethoxazole	637,5	482,8	249,7	186,1	24	48	25	71
PFOS	10,4	nd	3,1	4,1	100	-	-30	61
Fluconazole	179,2	208,3	117,2	72,4	-16	44	38	60
Metoprolol	2415,2	2819,9	1480,1	992,3	-17	48	33	59
Oxazepam	573,3	616,3	376,6	249,9	-7	39	34	56
Acetamiprid	2,8	5,5	0,8	1,4	-101	85	-70	48
Carbamazepine	344,7	376,0	266,4	181,8	-9	29	32	47
Venlafaxine	653,3	733,7	528,9	353,7	-12	28	33	46
Diclofenac	917,7	1074,1	834,8	548,7	-17	22	34	40
Irbesartan	80,7	108,0	83,0	56,5	-34	23	32	30
Tramadol	592,2	877,8	833,8	604,9	-48	5	27	-2
Imidacloprid	2,7	4,5	4,4	3,2	-67	2	28	-19
PFOA	4,6	7,6	9,4	5,9	-64	-24	37	-29
Hydrochlorothiazide	14,8	36,9	51,8	19,3	-149	-40	63	-31
Erythromycin	37,0	63,3	63,0	59,9	-71	0	5	-62
Clarithromycin	2,5	11,8	11,6	10,2	-380	2	12	-312

Recipientsituationen i oktober

Enligt SMHI och S-Hypemodellen var flödet i Välabäcken vid det aktuella provtillfället i oktober 1/3 av julivärdet, dvs. 1028 m³/d, Tabell 1. Men vid det aktuella oktoberdatumet flödar det ut 2877 m³/d enbart från reningsverket. Enligt vår utvecklade modell var flödet 3023 m³/d nerströms Välabäcken. Om vi tittar på karbamazepin-halterna för det aktuella datumet skiljer det inte så mycket mellan utgående halt från reningsverket och den i recipienten (Tabell 4 och Tabell 5), vilket resulterar i ett mycket lågt flöde uppströms Välabäcken, Tabell 1. Det framtagna låga flödet stöds av SMHIs modell som visar att flödet var 1028 m³/d, vilket t.o.m. är lägre än reningsverkets utgående flöde.

Sammanfattningsvis visar SMHIs modell ett halverat flöde nerströms Örupån vid oktoberdatumet jämfört med datumet i juli, Tabell 1, medan vår modell ger ca 2/3-flöde i oktober jämfört med det i juli nerströms Örupån. Sett till hela månaden var flödena ungefär desamma, Figur 10.

Tolv ämnen noterades ha halter överstigande 100 ng/L nerströms Välabäcken. Av de undersökta ämnena kunde sju ej detekteras, och fyra ej kvantifieras. Halterna sjunker sedan vidare nerströms, vilket nämndes tidigare, som en konsekvens av den utspädning som sker i Örupsån. Högst värden i recipienten Välabäcken noterades för hjärtmedicinen metoprolol. I dagsläget finns gränsvärden för två läkemedel med avseende på recipienthalt i Sverige enligt HVMFS 2019:25; diklofenak och ciprofloxacin. Gränsvärdet 100 ng/L för diklofenak överstegs både nerströms Välabäcken och Örupsån, Tabell 5. I Välabäcken uppgick halten diklofenak till 426 ng/L och i Örupsån hade den sjunkit till 159 ng/L som en konsekvens av utspädning. Ciprofloxacin kunde inte kvantifieras (<5 ng/L), men väl detekteras vid bägge provplatserna. Noterbart är att hormonet Östrogen (E1) tydligt ökar nerströms både i Välabäcken och Örupsån som en direkt konsekvens av utsläppen från reningsverket. Enligt EUs uppdaterade förslagslista får det årliga medelvärdet vara 0,36 ng/L, vilket överstigs i båda recipienterna. Antibiotikan azithromycin visar halter som överskrider gränsvärdet i Välabäcken, men inte i Örupsån. Samtliga makrolider; azithromycin, erythromycin och clarithromycin, kunde mätas upp i båda vattendagen, vilket är intressant med tanke på EUs ambition i de nya reglerna, att ta hänsyn till kumulativa och kombinerade effekter av blandningar.

Tabell 5. Halter uppmätta i recipienten nerströms Välabäcken och nerströms Örupsån i oktober.

Ämne	Recipientprover		
	Upp Örupsån	Ned Örupsån	Ned Välabäcken
Amisulpride	nd	nd	nd
Thiacloprid	<LOQ	nd	nd
Etinyestardiol (EE2)	nd	nd	nd
Estradiol (E2)	nd	nd	nd
Ketoconazole	nd	nd	nd
Ibuprofen	nd	nd	nd
Methotrexate	nd	nd	nd
Ciprofloxacin	nd	<LOQ	<LOQ
Bisphenol A	<LOQ	<LOQ	<LOQ
PFOS	nd	<LOQ	<LOQ
PFOA	<LOQ	<LOQ	<LOQ
Metoprolol	0,1	279,9	699,1
Tramadol	nd	192,3	476,1
Benzotriazole	2,0	98,4	433,9
Diclofenac	1,0	158,5	425,6
Losartan	0,9	92,3	288,3
Venlafaxine	0,4	102,8	284,1
Oxazepam	nd	99,1	249,1
Furosemide	nd	85,4	233,4
Sulfamethoxazole	1,4	77,4	205,4
Carbamazepine	0,7	68,8	173,1
Atenolol	nd	45,9	145,2
Erythromycin	nd	37,8	115,9
Citalopram	<LOQ	17,0	59,2
Irbesartan	nd	21,1	57,2
Azithromycin	nd	11,5	56,6
Paracetamol	28,2	42,4	55,3
Fluconazole	nd	20,8	55,1
Propranolol	nd	10,4	32,4
Sertraline	<LOQ	5,1	26,7
Clarithromycin	nd	5,7	16,1
Naproxen	nd	6,6	11,9
Hydrochlorothiazide	nd	5,0	8,8
Trimethoprim	nd	2,2	8,0
Estrone (E1)	0,1	0,7	2,0
Imidacloprid	0,1	0,9	1,9
Zolpidem	nd	0,4	1,3
Acetamidiprid	nd	0,4	1,2
Thiamethoxam	<LOQ	0,2	0,4

Slam från plattan i oktober

I Tabell 6 har ämnena sorterats efter förekomst i slam från oktober taget från plattan där slammet förvaras. Slammets halt anges i enheten $\mu\text{g}/\text{kg}$, våtvikt. Åtta av de analyserade ämnena kunde inte påvisas i slam. 14 ämnen kunde kvantifieras i intervallet 0,3-10 $\mu\text{g}/\text{g}$ VV. Nio ämnen återfanns i halter mellan 10-100 $\mu\text{g}/\text{g}$ VV. Sex ämnen återfanns i halter som översteg 100 $\mu\text{g}/\text{g}$ VV. Högst halt hade sertralin följt av ketokonazol. Båda ämnena uppvisar kraftig reduktion i reningsverket. Antibiotikan ciprofloxacin, som nämndes ovan, förekommer i höga halter i slammet, liksom furosemid. Noterbart är att dessa ämnen reducerades redan i försedimenteringen. Även hormonet estradiol förekom vid mättillfället i kvantifierbara halter i slammet. Estradiol reducerades i försedimenteringen, liksom citalopram. Båda hjärtmedicinerna metoprolol och propranolol återfinns i slammet, men medan propranolol reduceras under försedimenteringen så försvinner inte metoprolol förrän längre ner i reningsprocessen. Naproxen, paracetamol och ibuprofen uppvisade hög reduktion i kombination med icke detekterbarhet i slammet. De tre ämnena, som samtliga återfinns i höga koncentrationer i inkommande avloppsvatten, utgör, precis som tidigare nämnts, goda indikatorer på en väl fungerande aktiv slamprocess. En intressant jämförelse kan också göras mellan de båda inerta PFAS-ämnena PFOS och PFOA, där PFOS sett till resultaten förefaller ha högre förmåga att binda till slam jämfört med PFOA. PFOS reduktionsresultat i reningsverket kan förklaras genom dess adsorption i slam. För att få en uppfattning om hur stor andel av inkommande mängder av respektive ämne som hamnar i slammet gjordes en enkel överslagsberäkning baserad på oktober månad. Enligt beräkningarna adsorberar och stannar sertralin opåverkad i slammet under lagringen på plattan då hela 95% av ämnet återfinns. Även ketokonazol och citalopram återfinns till stor del i slammet, 53% respektive 56%. I medeltal hamnar 13 % av mängden ämnen i slammet. Förekomsten av ämnen och proportioner i Rosendals slam liknar de som uppvisas i andra reningsverk.

Tabell 6. Slammets innehåll av de undersökta ämnena.

Ämne	Halt ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	(%) i slam
Acetamidrid	nd	nd
Amisulpride	nd	nd
Etinyestardiol (EE2)	nd	nd
Ibuprofen	nd	nd
Methotrexate	nd	nd
Paracetamol	nd	nd
PFOA	nd	nd
Thiamethoxam	nd	nd
Thiaclopid	<LOQ	nd
Furosemide	638,0	6,2
Sertraline	466,5	95,2
Ketoconazole	282,5	53,2
Citalopram	184,0	56,1
Ciprofloxacin	143,6	9,6
Losartan	109,6	1,9
Venlafaxine	109,2	14,3
Metoprolol	99,1	3,5
Propranolol	53,4	26,5
Azithromycin	50,8	24,6
Estradiol (E2)	39,8	34,6
Bisphenol A	38,0	4,8
Atenolol	29,6	1,9
Tramadol	18,3	2,6
Diclofenac	13,3	1,2
Oxazepam	12,4	1,9
Trimethoprim	7,4	4,8
Carbamazepine	7,3	1,8
Benzotriazole	6,6	0,5
Clarithromycin	6,3	219,5
Irbesartan	3,6	3,8
PFOS	2,1	17,3
Erythromycin	2,0	4,5
Estrone (E1)	1,6	2,1
Fluconazole	0,9	0,4
Zolpidem	0,8	14,5
Imidaclopid	0,4	14,1
Sulfamethoxazole	0,3	0,0
Hydrochlorothiazide	0,3	1,9
Naproxen	0,3	0,0

Årlig omsättning av läkemedel på Rosendal

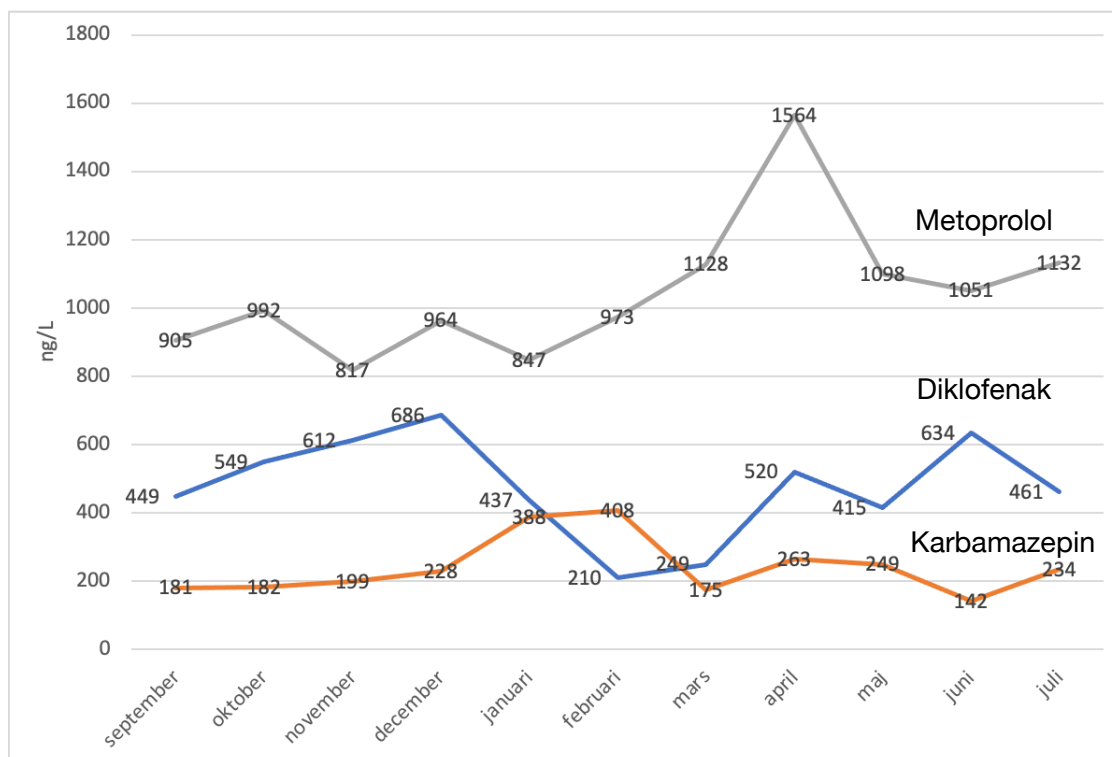
I Tabell 7 har en sammanställning gjorts av årliga inkommande- och utgående mängder läkemedel baserad på de månatliga mätningarna under projektperioden. Beräkningen gjordes som en summering av respektive månads bidrag, vilket innebar att den aktuella dagens mätvärden fått representera hela månadsens bidrag. Nästan 28 kg läkemedel når Rosendal årligen, paracetamol och ibuprofen undantaget. Den generella bilden av vilka de läkemedel är som står för den högsta belastningen har inte förändrats, utan det är fortsatt så att de båda värkmedicinerna paracetamol och ibuprofen ligger i topp, följt av hjärtmedicinen metoprolol. Följaktligen är det också dessa mediciner som återfinns i störst mängd i utgående vatten. Resultaten är i överensstämmelse med andra undersökningars resultat när det kommer till halter och mängder i inkommande vatten till reningsverk. Totalt sett släpps det ut ca 8,9 kg per år av de undersökta ämnena. Det betyder att genomsnittet uttryckt i totalmassa är ca 30% medan medelvärdet av alla reduktioner är betydligt högre (40-50%). Verkets biologiska funktion förefaller också vara i gott skick över hela året sett till att mängderna av paracetamol, ibuprofen och naproxen i utgående vatten är så låga. Bilden av valet av indikatorsubstanser kvarstår också; mängderna ut av samtliga ämnen, blåmarkerade i tabellen, är tillräckligt höga och stabila. En rekommendation att använda detta urval av ämnen vid utvärdering av avancerad rening kan därför göras.

Tabell 7. Årlig inkommande- och utgående mängd av de undersökta ämnena.

Ämne	Rosendal ARV Tomelilla		
	Inkommande (g/år)	Utsläpp (g/år)	Reduktion (%)
Acetamidiprid	3,2	3,7	-15,0
Amisulpride	nd	nd	nd
Atenolol	1696,4	430,8	74,6
Carbamazepine	356,1	342,8	3,7
Clarithromycin	12,9	19,5	-51,1
Diclofenac	971,2	660,2	32,0
Erythromycin	4,2	5,8	-39,9
Fluconazole	216,0	141,9	34,3
Hydrochlorothiazide	265,6	331,1	-24,7
Imidacloprid	7,1	7,4	-3,5
Losartan	5307,8	1078,2	79,7
Methotrexate	24,8	nd	100,0
Metoprolol	3241,5	1484,9	54,2
Naproxen	4084,6	149,6	96,3
Oxazepam	554,2	484,7	12,5
Sertraline	569,3	82,8	85,5
Thiamethoxam	nd	0,1	0,0
Trimethoprim	296,9	64,9	78,1
Azithromycin	870,5	135,3	84,5
Benzotriazole	1030,1	419,6	59,3
Ciprofloxacin	1794,1	5,6	99,7
Citalopram	542,2	221,2	59,2
Irbesartan	115,8	150,6	-30,1
Ketoconazole	502,2	nd	100,0
Paracetamol	>50000	57,6	100,0
Propranolol	237,8	101,3	57,4
Sulfamethoxazole	329,3	171,7	47,9
Thiacloprid	nd	nd	nd
Tramadol	561,6	604,7	-7,7
Venlafaxine	663,6	588,5	11,3
Zolpidem	6,4	1,2	81,1
Bisphenol A	109,2	9,0	91,8
Estrone (E1)	65,4	5,8	91,2
Estradiol (E2)	24,6	nd	100,0
Etinyestadiol (EE2)	nd	nd	nd
Furosemide	3213,0	1219,5	62,0
Ibuprofen	>10000	nd	100,0
PFOS	12,3	0,4	96,8
PFOA	3,1	1,3	56,7
Summa (g):	27693	8982	Medel: 45%

Av de fjorton ämnen som har en reduktionsgrad på över 80% återfinns sju till stor del i slamfasen, Tabell 6. Endast fem ämnen uppvisar en sammantagen negativ reduktion, hit hör de båda makroliderna erythromycin och clarithromycin. Det inerta ämnet karbamzepin uppvisar en årlig reduktion på ca 4 %.

I Figur 13 har vi plottat koncentrationen av metoprolol, diklofenak och karbamazepin i utgående avloppsvatten från september 2022 till juli 2023. I medeltal var halterna 1043 ng/L för metoprolol, 475 ng/L för diklofenak och 241 ng/L för karbamazepin. Halterna för diklofenak var lägst i februari och mars, vilka också är månader med höga flöden i reningsverket, men hit hör också månaderna december och januari. Å andra sidan var halterna högst för karbamazepin i januari och februari, men i övrigt mycket stabilt, vilket åter pekar ut ämnet som lämplig indikator. Metoprolol visade en något uppåtgående trend under perioden. Det går således inte att utläsa något entydigt utsläppsmönster av de utgående halterna till recipienten. För att mer noggrant förstå situationen i recipienten som utsläppen orsakar är det bästa alternativet att representativt mäta och analysera prover från recipienten. Några viktiga resultat från projektets monitorering som innefattade prover från hela året redovisas i nästa avsnitt.



Figur 13. Koncentrationen metoprolol, diklofenak och karbamazepin i utgående avloppsvatten från Rosendals ARV under de undersökta månaderna september 2022 till juli 2023. Medelvärden har markerats med en streckad linje.

Recipienten i fokus - monitorering och bedömning

Ett urval av fyra ämnen och fem månader har gjorts för att bedöma recipientsituationen som uppkommer i samband med den nuvarande reningsförmågan på Rosendal. Med projektperiodens flödessituation i minnet, Figur 10, kommer vi ihåg att perioden präglades av mycket högt flöde i januari samt av perioder med låga till mycket låga flöden ömse sidor om januari. De fyra utvalda ämnena var; azithromycin, karbamazepin, diklofenak och östrogen (E1). Samtliga finns upptagna på EUs föreslagna uppdaterade ämneslista, dessutom har diklofenak en svensk miljökvalitetsnorm enligt HVMFS 2019:25. Antibiotikan azithromycin har fått ett föreslaget värde av EU i inlandssötvatten på 19 ng/L (streckad linje), vilket avser det årliga medelvärdet, Figur 14. I Välabäcken överstigs det värdet vid tre tillfällen; oktober, maj och juni (årsmedelvärde 38 ng/L). Karbamazepin, som vi berört tidigare, finns också med

på EUs utökade förteckning, med ett årligt gränsvärde som är betydligt högre än det för azithromycin – 2500 ng/L. I Figur 14 kan vi se att gränsvärdet inte överskrids vid något tillfälle, detsamma gäller ibuprofen med ett föreslaget gränsvärde till 220 ng/L. Den väl fungerande biologin i reningsverket klarar i det här fallet kravet. Diklofenak har som nämnts både ett svenskt gränsvärde och ett värde på förslag från EU. Det svenska är 100 ng/L medan EU har kommit fram till 40 ng/L. I figuren för diklofenak har båda gränsvärdena lagts till. I Örupsån överskrids EUs föreslagna gränsvärde vid tre tillfällen (årsmedelvärde 65 ng/L) och i Välabäcken vid samtliga tillfällen (årsmedelvärde 176 ng/L). På EU-nivå har även det naturliga könshormonet östrogen (E1) fått ett gränsvärde. I Sverige finns miljö kvalitetsnormer för E2 och EE2 sedan tidigare. Det föreslagna gränsvärdet på 0,36 ng/L överskrids vid samtliga mättillfällen utom i januari i båda vattendragen.



Figur 14. Uppmätta halter av azithromycin, karbamazepin, diklofenak och östrogen, E1.

Årsmedelvärdet av neonicotinoiden imidakloprid, som nämndes tidigare, var 1,9 ng/L, och EUs gränsvärde i ytvatten är föreslaget till 6,8 ng/L. Utspädningen i recipienterna ser till att underskrida miljö kvalitetsnormen. Förekomsten av imidakloprid, Figur 11, vittnar om den mångfacetterade spridningsproblematik av föroreningar som vårt kemikaliesamhälle orsakar.

I Länsstyrelsen rapport från 2021 (Pirzadeh m.fl. 2021) finns värden uppmätta för samma substanser i Välabäcken på samma provplatser som i denna förstudie. Det utgående provet från verket i det projektet togs konsekvent efter dammarna, dvs vid reningsverkets egentliga utsläppspunkt. Förekomsten av diklofenak nerströms Välabäcken 2020 visar på högst

förekomst i juni och augusti under lågvattenföring, Tabell 8. Medelkoncentrationen under året var 262 ng/L dvs mer än dubbelt så högt mot vad miljö kvalitetsnormen (100 ng/L) säger och mer än 6 gånger högre än EUs föreslagna gränsvärde på 40 ng/L. Karbamazepinhalterna ut från reningsverket 2021 motsvarar de som mätts upp i denna förstudie, se Tabell 3 och 4. Med hjälp av reningsverkets flöden och halterna av karbamazepin kunde vi med hjälp av vår utvecklade modell åter bestämma flödet i Välabäcken, både uppströms och nerströms.

Tabell 8. Halter av karbamazepin och diklofenak är hämtade från Länsstyrelsens undersökning 2020. Flöden beräknade enligt projektets modell, samt enligt SMHIs S-Hype modell vid aktuella provtillfällena.

Provplats	Karbamazepin					S-Hype				
	2020	Mars	Juni	Augusti		November	Mars	Juni	Augusti	November
Uppströms Välabäcken	0,0	0,0	0,0	0,0	ng/L					
Nerströms Välabäcken	59,6	213,4	253,3	67,9	ng/L	0,146	0,009	0,005	0,082	m3/s
Utgående verket	138,5	344,7	443,5	162	ng/L					
Flöde reningsverk (m3/d)	5208,0	2967,0	2816	3286	m3/d					
Flöde Välabäcken uppströms	6894	1826	2115	4554	m3/d					
Flöde Välabäcken nerströms	12102	4793	4931	7840	m3/d	12614	778	432	7085	m3/d
		Diklofenak								
Nerströms Välabäcken	157,2	337,0	387,7	166,1						
Utgående verket	514,4	581,0	983,1	415,5						

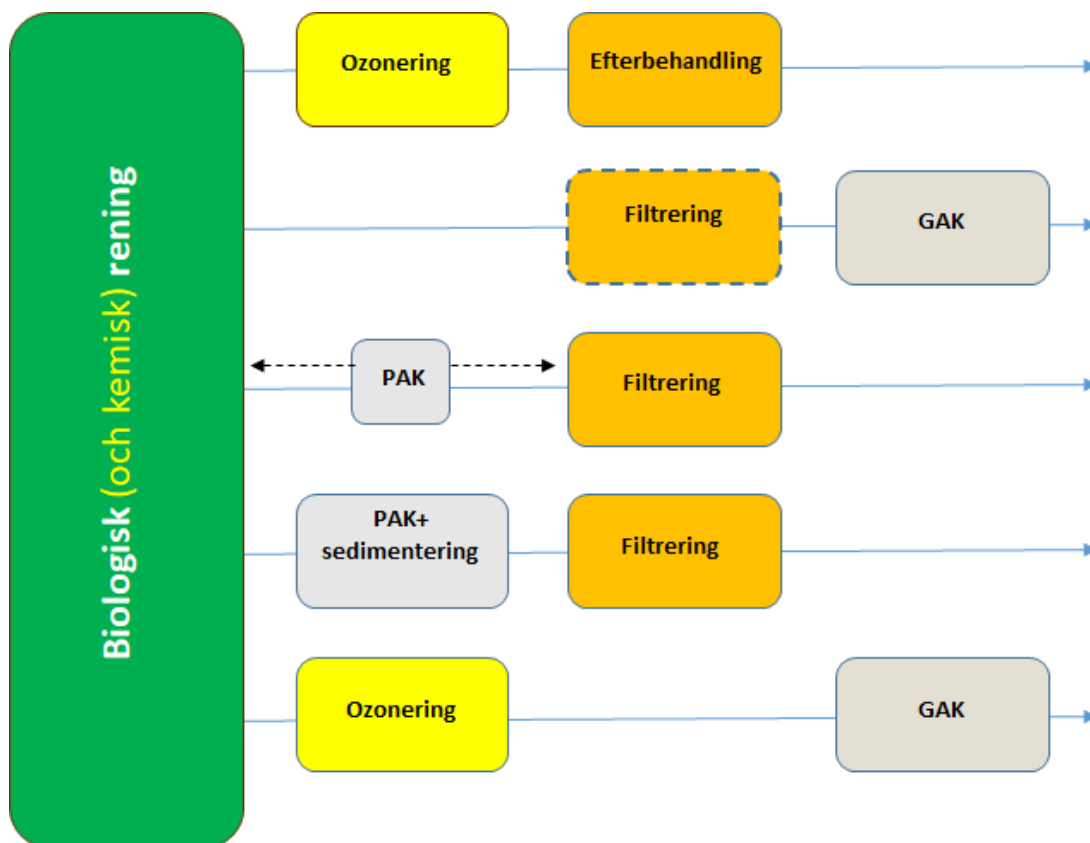
Det är tydligt att flödena i juni och augusti var mycket lägre, ca 1/3 jämfört med mars och ca hälften jämfört med november. Tillskottet av reningsverkets vatten till Välabäcken är ca 50% i juni och augusti, vilket gör att flödet är ca 5000 m³/d vid dessa mättillfällen. Enligt SMHIs Hypemodell är flödet 778 m³/d i juni och 432 m³/d i augusti, vilket åter igen pekar mot en kraftig underskattning av vattenföringen i torrperioder på grund av att hänsyn inte tas till reningsverkets tillskott av vatten. I månaderna mars och november är de båda modellerna däremot samstämmiga. Reningsverkets bidrag av vatten till Välabäcken har det positiva med sig att trygga vattensituationen, men det innebär också att halterna av föroreningar dramatiskt stiger vid lågvattenflöden, så länge som avancerad rening inte finns på plats.

Det fjärde reningssteget vid Rosendals ARV

Sverige tillhör det fåtal länder där rening från organiska mikroföroreningar införts på kommunala avloppsreningsverk. Huvudsyftena är skydd av känsliga recipienter och dricksvattentäkter, men med denna typ av rening begränsas även spridningen av persistenta ämnen till vår miljö. Samtidigt tas ett stort kliv mot återanvändning av renat avloppsvatten för olika ändamål. Anläggningarna i östra Skåne är de bland de första i sitt slag och kolfiltren i S:t Olof, Kivik och Degeberga utgör i skrivande stund unika referensobjekt och följs med stort intresse, inte minst för att kunna beskriva driftkostnader med bättre precision än tidigare. I det följande beskrivs processval, preliminär dimensionering och kostnadsuppskattningar för olika reningsalternativ vid Rosendals ARV.

Principiella reningsalternativ

Figur 15 visar de processkonfigurationer som tillämpas i full skala vid kommunala avloppsreningsverk, företrädesvis i Schweiz, Tyskland och Sverige, och som kan betraktas som "state-of-the-art". Processlösningarna klarar avskiljning motsvarande >80% av ett brett spektrum av ämnen.



Figur 15. Möjliga konfigurationer för avancerad rening för avskiljning av olika organiska mikroföroreningar. PAK = Pulveriserat Aktivt Kol, GAK = Granulerat Aktivt Kol.

Processkonfigurationerna baserade på PAK har inte fått genomslag i Sverige på samma sätt som i Tyskland och i Schweiz eftersom PAK i dessa länder, efter recirkulation eller direkt dosering till den biologiska reningen, tas ut med det biologiska överskottsslammet för efterföljande behandling och förbränning. Detta försvårar eller omöjliggör i sin tur slamspridning på åkermark. Huvudalternativen är därför ozonering och/eller GAK-filtrering vilka i regel föregås av biologisk och kemisk rening.

Biologisk rening och kemisk rening

Med biologisk rening avses oftast en aktivslam- eller biofilmsprocess i syfte att avskilja i första hand organiskt material men även kväve och fosfor. En väl fungerande biologisk rening är en förutsättning för kostnadseffektiv avskiljning av organiska mikroföroreningar, eftersom varken ozonering eller adsorption till aktivt kol är selektiva processer. Både ozon dos och livslängd på aktivt kol bestäms av det organiska innehållet, i regel uttryckt som DOC (dissolved organic carbon). De organiska mikroföroreningarna utgör bara en bråkdel av mängden DOC. För att avskilja diklofenak doseras inte en viss mängd ozon per massenhet diklofenak utan en given mängd ozon per massenhet DOC, eftersom ozon reagerar med alla (reaktiva) organiska ämnen i vattenmatrisen. På samma sätt konkurrerar en mängd olika organiska ämnen om adsorptionsplatserna på kol. Det är därför viktigt att halten DOC är så låg som möjligt före ozonering och kolfiltrering.

Kemisk rening tillämpas i första hand för att avskilja fosfor men beroende på processutformning kan även organiskt material avskiljas. Vid en efterfällning (kemisk rening efter den biologiska reningen) kan exempelvis både partikelhalt (uttryckt som mängden suspenderad substans, SS) och organiskt innehåll sänkas, vilket är fördelaktigt för att exempelvis kunna minimera ozon doseringen (Ekblad m.fl., 2022).

Ozonering

Med ozon bryts organiska mikroföroreningar ner till olika *transformationsprodukter* som i regel betraktas som mindre toxiska än sina modersubstanser. I vattnet finns också andra ämnen som oundvikligen kommer att reagera med ozon och de hydroxylradikaler som bildas vid ozonering. Det betyder att det kommer att bildas en rad olika *biprodukter*, kända och okända. Vissa bi- och transformationsprodukter kan brytas ner biologiskt medan andra är persistenta. Flera studier har visat att biologisk efterbehandling alltid bör kopplas till ozonering för att sänka toxiciteten (Prasse m.fl., 2015). En sådan efterbehandling kan ordnas på flera vis men utformningen och effekter av både ozonering och efterbehandling är i skrivande stund föremål för olika studier både nationellt och internationellt.

GAK-filtrering

I ett GAK-filter avskiljs organiska mikroföroreningar i huvudsak genom adsorption, dvs. genom separation från vattenfasen. I takt med att organiska ämnen adsorberar till kolet utvecklas olika adsorptionsprofiler (Edefell m.fl., 2022) och vid olika tidpunkter, ofta uttryckt som antal bäddvolym, kommer olika ämnen, efter mättnad, att bryta igenom och återfinnas i utgående vatten. Ett kolfilter kommer med tiden också att utvecklas till ett biologiskt aktivt kolfilter (BAK-filter) (Svahn & Borg, 2024). Sammantaget betyder detta att GAK-filtrering är en komplex och dynamisk process som även medger nedbrytning av vissa organiska mikroföroreningar.

Ozonering och GAK-filtrering

GAK-filtrering har i flera studier visat sig fungera bra tillsammans med ozonering (Bourgin m.fl., 2018; Gulde m.fl., 2021). Dels kan kombinationen av oxidation och adsorption möjliggöra avskiljning av ämnen som annars lämpar sig mer för den ena eller den andra metoden, dels kan ozonering betraktas som en förbehandlingsmetod i syfte att optimera driften av den efterföljande kolfiltreringen. Genom ozonering vid en låg dos kan adsorptionen av olika modersubstanser förbättras och livslängden på kolet förlängas. I praktiken betyder det att ett GAK-filter kan drivas betydligt längre innan kolet måste regenereras, vilket leder till betydligt lägre driftkostnader för både ozonering och GAK-filtrering (Hubner m.fl., 2023).

Samtidigt bör det noteras att adsorption av transformationsprodukter inte nödvändigtvis blir bättre (Betsholtz m.fl., 2022).

Filtrering som för- eller efterbehandling

Filtrering motsvaras i Figur 15 i princip av sandfilter, men kan beroende på önskad funktion också utgöras av andra filtertyper, exempelvis olika membranfilter eller mikrosilar. Ett sandfilter har fördelen att kunna medge biologisk efterbehandling till ozonering genom den biofilm som etableras vid drift. Detsamma gäller ett GAK-filter. Studier har visat att både sand- och GAK-filter, med utvecklad biofilm, fungerar för efterbehandling (Hollender m.fl., 2009; Bourgin m.fl., 2018).

Vid GAK-filtrering är god förbehandling viktig för att säkerställa låg partikelhalt och låga halter av organiskt material, vilket i sin tur begränsar backspolningsfrekvensen och förlänger kolets livslängd. Förbehandling i form av filtrering direkt före GAK-filtrering rekommenderas också i litteraturen för stabil drift (Fundneider m.fl., 2021) även om det också finns exempel på dimensioneringsriktlinjer där förfiltrering beskrivs som valfri. Anläggningarna i Degeberga och i S:t Olof drivs med sandfilter som förbehandling och anläggningen i Kivik består av en membranbioreaktor med ultrafiltrering för separation av biomassa. Båda varianterna tycks fungera mycket väl i kombination med efterföljande GAK-filtrering.

Andra tekniker

Det pågår en teknikutveckling inom området och med förväntningar om nya reningskrav, exempelvis genom förslaget till nytt avloppsdirektiv, önskemål om återanvändning av vatten så kommer vi säkert att se nya och förfinade metoder. Det kommer exempelvis nya varianter och kombinationer av avancerade oxidationsprocesser (AOP) och nya adsorbenter men i skrivande stund bedöms i de allra flesta studier ozon och aktivt kol som mest kostnadseffektiva och ändamålsenliga för den komplexa matris som kommunala avloppsvatten utgör (Pistocchi m.fl., 2022).

Avskiljning av olika ämnen

Med förslaget till nytt avloppsvattendirektiv förväntas rening från organiska mikroföroreningar införas vid ett stort antal europeiska avloppsreningsverk. Förslaget föreskriver att alla anläggningar större än 100 000 pe ska utrustas med teknik för avskiljning av organiska mikroföroreningar. Anläggningar dimensionerade för 10 000 – 100 000 ska behövsprövas utifrån ett recipientperspektiv. I princip bygger förslaget på den schweiziska modellen vilken innebär att rening motsvarande 80% ska uppnås för ett antal nyckelsubstanser som tidigare nämnts, se Tabell 2.

Tabell 9 visar en sammanställning över vilken avskiljning som kan förväntas med ozon respektive aktivt kol för de ämnen som ingår i denna förstudie. Med ozon kan doseringen ökas för att förbättra avskiljningen. I ett GAK-filter kommer avskiljningen att variera med tiden och för de flesta ämnen att avta med tiden (ökande antal bäddvolymer). Vissa ämnen (exempelvis sulfametoxazol och flukonazol) uppvisar förvisso god avskiljning i ett GAK-filter men tillhör de ämnen som kan förväntas gå till genombrott före flera andra ämnen på listan. Olika studier visar följaktligen lite olika avskiljningsförmåga. Siffrorna i tabellen bör därför ses som indikationer på förväntad reduktion vid rimlig ozondos och fungerande kolfilter.

Tabell 9. Avskiljning av olika substanser. I kolumnen Biologisk nedbrytning har de substanser som typiskt uppvisar hög nedbrytning (>75%) markerats med **grönt**. Fler substanser kan uppvisa relativt hög nedbrytning. Substanser markerade med **brunt** i kolumnen *Till slam* kan förväntas binda in till slam. I kolumnen *Avancerad rening* avser "hög" i princip >80% avskiljning. **Blåmarkerade** ämnen utgör indikatorämnena enligt det nya avloppsvattendirektivet.

Substans	Typ	Avskiljning		
		Biologisk nedbrytning	Till slam	Avancerad rening*
Benzotriazol	Korrosionsinhibitor			Hög med både aktivt kol och ozon
Metoprolol	Blodtryckssänkande			Hög med både aktivt kol och ozon
Tramadol	Smärtstillande			Hög med både aktivt kol och ozon
Losartan	Blodtryckssänkande			Hög med både aktivt kol och ozon
Diklofenak	Inflammationshämmande			Hög med både aktivt kol och ozon
Naproxen	Inflammationshämmande			Hög med både aktivt kol och ozon
Furosemid	Diuretika			Hög med aktivt kol
Atenolol	Blodtryckssänkande			Hög med både aktivt kol och ozon
Oxazepam	Lugnande			Hög med både aktivt kol och ozon
Karbamazepin	Lugnande			Hög med både aktivt kol och ozon
Venlafaxin	Antidepressiv			Högre med ozon
Ibuprofen	Inflammationshämmande			Högre med aktivt kol
Citalopram	Antidepressiva			Hög med både aktivt kol och ozon
Erytromycin	Antibiotika			Hög med aktivt kol. Låg med ozon
Sulfamethoxazol	Antibiotika			Hög med både aktivt kol och ozon
Ciprofloxacin	Antibiotika			Högre med aktivt kol
Azitromycin	Antibiotika			Högre med aktivt kol
Flukonazol	Biocid			Varierande uppgifter. Hög med aktivt kol
Bisfenol A	Kemikalie (plast)			Hög med ozon. Låg med aktivt kol
Trimetoprim	Antibiotika			Hög med både aktivt kol och ozon
Klaritromycin	Antibiotika			Hög med aktivt kol. Låg med ozon
Paracetamol	Smärtstillande			Hög med ozon
Propranolol	Blodtryckssänkande			Hög med både aktivt kol och ozon
Sertralin	Antidepressiva			Högre med aktivt kol
PFOS (PFOA)				Hög med aktivt kol. Låg med ozon
Östron (E1)	Könshormon			Hög med både aktivt kol och ozon
Ketokonazol	Biocid			Hög med aktivt kol.
Zolpidem	Sömnmedel			Hög med aktivt kol

*Altmann m.fl., (2014), Baresel m.fl., (2017), Bourgin m.fl., (2018), Edefell m.fl., (2019), Hollender m.fl., (2009), Margot m.fl., (2013)

Avancerad rening vid Rosendals ARV

Förutsättningarna för att införa rening från organiska mikroföroreningar är goda vid Rosendals ARV. Den biologiska reningen är utformad för kväveavskiljning med långtgående nitrifikation vilket i sig ger god nedbrytning av vissa ämnen men framför allt god nedbrytning av organiskt material. Med efterföljande kemisk fällning kan både SS- och DOC-halter minimeras. Det finns dock inget filtreringssteg vilket betyder att detta bör räknas med i olika scenarier, antingen som ett förbehandlings- eller ett efterbehandlingssteg, beroende på teknikval.

Teknikval

Ozonering och GAK utgör, var för sig och i kombination, möjliga utgångspunkter för framtida processlösningar. Val av teknik kan göras utifrån olika parametrar. Kostnad är en viktig sådan. Specifika kostnader, uttryckta per m³ eller per person har oftast beskrivits som lägre för ozonering än för filtrering genom GAK. Kostnadsbilden för GAK är emellertid mycket beroende av antalet bäddvolymeter som kan processas mellan regenereringar av det aktiva kolet, men också, naturligtvis, av energi- och kolpriser. De kolfilter som finns i drift, inom Österlen VA, visar att livslängden är längre än vad som tidigare ofta antagits i olika studier (Björleinius & Cimbritz, 2021). Flera kostnadsbedömningar i både vetenskaplig litteratur och olika förstudier lider av relativt stor osäkerhet eftersom det finns få fullskaliga exempel som tydligt visar livslängd för filtermedia kopplad till avskiljning av relevanta ämnen. Mot bakgrund av de goda erfarenheter som finns och den kunskap som byggts upp omkring GAK-filtrering i Skåne och inom Österlen VA bedöms GAK-filtrering vara ett gångbart alternativ även för Rosendals ARV. Det finns nu också dokumentation, från anläggningar i närområdet, som stödjer antaganden om lång livslängd för GAK (Takman m.fl., 2023), (Svahn & Borg, 2024).

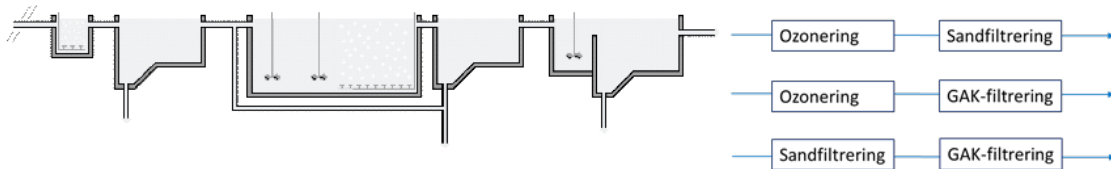
De goda erfarenheterna av kolfiltrering och uppfattningen om att processen är förhållandevis enkel att hålla i drift med låga krav på övervakning talar för att den skulle passa väl även vid Rosendals ARV. Det finns även möjlighet att gå vidare med en ozonering, vilken också kan kombineras med GAK-filtrering. Det finns i organisationen erfarenheter av att driva också en ozonanläggning.

Livscykelanalyser har använts för att jämföra olika enhetsprocesser. Senare studier visar att GAK har ett betydligt lägre klodioxidavtryck än PAK men högre än ozon (Meyer & Remy, 2020). Resultaten bygger på scenarier med reaktiverat kol. Kan icke-fossilt kol användas sjunker avtrycket för GAK ytterligare.

Det finns ytterligare faktorer att väga in, där platsbehov naturligtvis är en sådan. Andra faktorer kan vara mer fundamentala överväganden och önskemål. Efter ozonering uppstår ingen restprodukt som behöver hanteras, däremot bygger reningen på nedbrytning och transformation av ämnen snarare än separation (och senare regenerering eller destruktion). Utifrån de principiella alternativ som finns och de erfarenheter och önskemål som finns inom Österlen VA har följande moduler dimensionerats:

- GAK-filtrering
- Sandfiltrering
- Ozonering

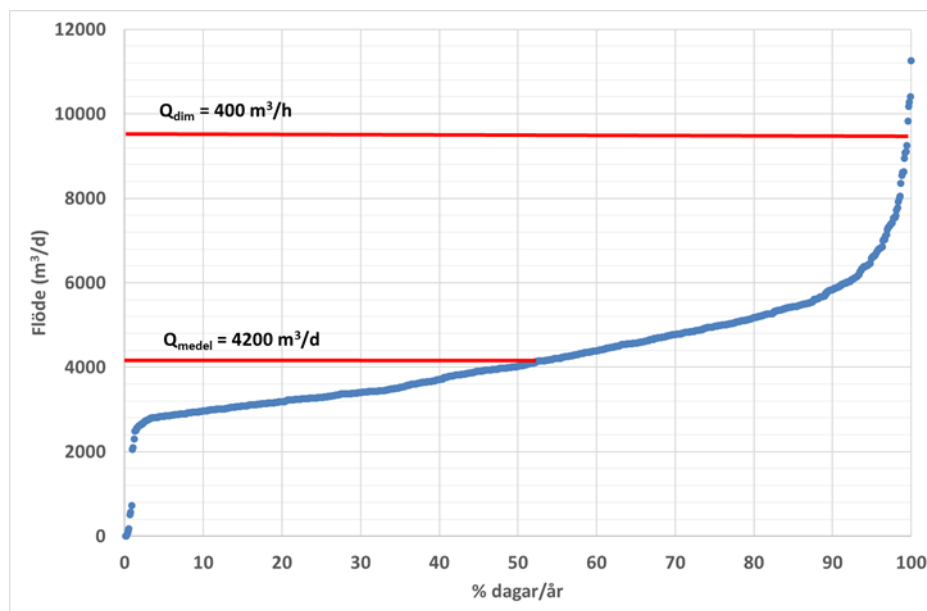
Dessa kan kombineras till olika processlösningar. GAK-filtrering kan kombineras med sandfiltrering som förbehandling och ozonering kan kombineras med sandfilter som efterbehandling. Alternativt kan ozonering kombineras med GAK-filtrering. I detta fall förväntas GAK-filtret få en betydligt längre livslängd än i fallet med enbart GAK-filtrering. Ozondoseringen kan i detta fall hållas relativt låg. Det har i samråd bedömts rimligt att dimensionera GAK-filter med sandfilter som förbehandling. Figur 16 visar de tänka processalternativen.



Figur 16. Reningsalternativ för Rosendals ARV.

Dimensioneringsförutsättningar

Den biologiska reningen vid Rosendal är dimensionerad för att klara maximalt $400 \text{ m}^3/\text{h}$. Detta flöde är en rimlig utgångspunkt även för dimensionering av reningen från organiska mikroföroreningar. Vatten som leds till den avancerade reningen bör ha genomgått biologisk behandling för att säkerställa lågt innehåll av löst organiskt material. Samtidigt bör onödigt höga flöden undvikas eftersom det kräver onödigt stora volymer och/eller leder till (för) låga reaktions- och kontakttider. Flöden över $400 \text{ m}^3/\text{h}$ förbileds i dagsläget den biologiska reningen och går direkt till kemisk rening. Maximalt flöde genom verket är $800 \text{ m}^3/\text{h}$. Vid flöden högre än $600 \text{ m}^3/\text{h}$ leds vattnet till verkets regnvädersbassäng. Figur 17 visar flödesfördelningen vid Rosendals ARV.



Figur 17 . Dygnsflöden vid Rosendals ARV baserat på uppgifter från 2021 till och med sommaren 2023.

Data från Rosendals ARV visar att den biologiska reningen förbileds mycket sällan och att denna andel endast utgör i storleksordningen 0,5 % av årsflödet. Dimensionering för 400 m³/h kan således i dagsläget bedömas som ganska säker. Om 90% av flödet leds genom en avancerad rening och en reningsgrad på 80% eftersträvas måste en ozonanläggning eller ett kolfilter ge ca 90% reningsgrad för att det totala reningsresultatet ska bli över 80%. Ett sådant betraktelsesätt är naturligtvis en förenkling och tar inte hänsyn till utspädning vid högflöden, men visar i alla fall att en relativt hög andel av flödet måste behandlas i ett nytt reningssteg. I takt med att ledningsnätet förbättras kan andelen ovidkommande vatten komma att minska vilket också sänker inflödet. Sammantaget finns det således anledning att vid en mer detaljerad dimensionering se över flödesförhållandena och kanske justera dimensionerande flöde något. Avloppsvatten från Spjutstorp ARV kan komma att överföras till Rosendals ARV men tillskottet från denna anläggning är i storleksordningen endast 10 m³/h. Medelflödet uppgår till ca 4 200 m³/d. Närmare hälften av flödet vid torrväder beräknas vid tillståndsgiven belastning komma från Österlenmejeriet, men är i verkligheten något lägre.

Den avancerade reningen dimensioneras för ett framtida flöde motsvarande:

- Q_{design} : 400 m³/h
- Q_{medel} : 4 200 m³/d

Designflödet används för dimensionering av de olika anläggningsdelarna och medelflödet för bedömning av driftkostnader och vissa nyckeltal.

Verket är dimensionerat för att klara utsläppsvärden motsvarande:

- BOD: 7 mg/L
- Tot-N: 12 mg/L
- Tot-P: 0,3 mg/L

Med dessa grundkrav är förutsättningarna mycket goda för att införa avancerad rening. En följd av de uppfyllda kraven är låga halter av SS och DOC. Trots detta rekommenderas förfiltrering innan GAK-filtrering men däremot behövs ingen förfiltrering innan ozonering. Det finns ett flertal ozonanläggningar som drivs utan förfiltrering och betydelsen av suspenderad substans är väl undersökt (Juarez m.fl., 2021). Vid Rosendals ARV finns dessutom efterfällningssteget som garanterar för att SS-halterna kan hållas låga in till en ozoneringsanläggning.

Utgående värden uppgår idag till 15 mg COD och ca 2 mg BOD/L vilket tyder på mycket god rening av organiskt material. Utgående Tot-N uppgår till 5 mg/L vilket analogt tyder på god nitrifikation och denitrifikation. Sammantaget är det därför rimligt att utgå från att utgående DOC är ≤ 10 mg/L.

Dimensionering

Dimensionering av de olika modulerna för GAK- och ozonering har gjorts utifrån en sammanvägning av olika riktlinjer (Abegglen & Siegrist, 2012; VSA 2020; Stapf m.fl., 2020; Fundneider m.fl., 2021). Det bör noteras att fältet är under utveckling och data och erfarenheter från bland andra Österlen VA kan komma att påverka gällande praxis. I det följande har det använts nyckeltal som kan förväntas ge en relativt säker dimensionering. Vid en framtida detaljprojektering bör dimensionering, både i form av nyckeltal och flöden, ses över. Ozonanläggningen har i sin helhet byggts in medan sand- och GAK-filter har utformats som öppna betongkonstruktioner.

GAK

GAK-filtren har dimensionerats utifrån en kontakttid (EBCT – Empty Bed Contact Time) motsvarande 20 minuter vid maxflöde, vilket ger minst 40 minuter vid medelflöde. Ytbelastningen kommer att uppgå till knappt 3 m/h vid medelflöde och 6 m/h vid dimensionerande maxflöde. Bäddjupet har satts till 2 m och därtill kommer ungefär lika mycket för bäddexpansion och frihöjd. Kolfiltren utformas som öppna betongkonstruktioner och byggs ovan mark. Total filterarea uppgår till 69 m² fördelat på 3 filter(celler) vilket möjliggör separata kolutbyten, dvs. hela kolmängden behöver inte bytas på en gång. Rörgalleriet med spolvattentankar, pumpsump och pumpar förläggs i direkt anslutning och utmed filteranläggningens långsida och kräver ytterligare 25 m². Totalt ytbehov uppgår således till ca 105 m². Till anläggningen hör även pumpar för att lyfta in vatten i anläggningen. Anläggningen byggs med Tritonbotten och de olika cellerna utrustas med separata givare för tryck och flöden för att möjliggöra driftoptimeringar. Ingående delar i anläggningen redovisas i bilaga.

Ozon

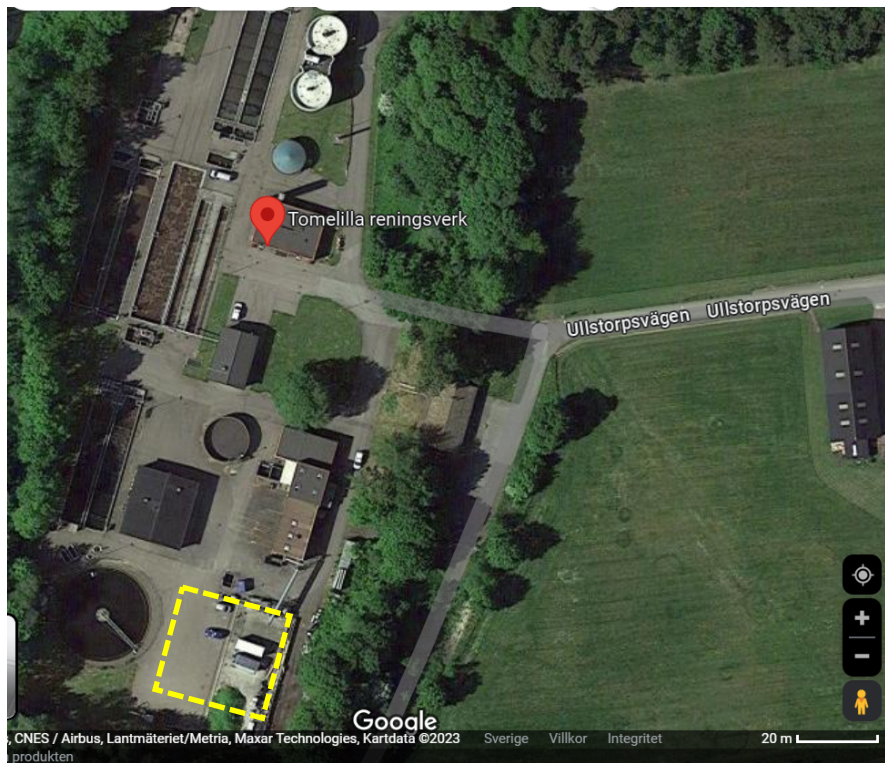
Ozonanläggningen har dimensionerats för en minsta kontakttid motsvarande 10 minuter vid dimensionerande maxflöde, vilket ger en volym på 66 m³. Vid medelflöde blir kontakttiden mer än den dubbla. Bassängdjupet har satts till 5,5 m. Arealen uppgår därmed till 12 m². Maskinhall på 100 m² byggs intill kontaktbassängen. Det totala ytbehovet uppgår till ca 110 m². Syreproduktion kan ske på plats (PSA – pressure swing adsorption) alternativt levereras syrgas i flytande form (LOX – liquid oxygen). LOX är relativt sett vanligare och oftast mer kostnadseffektivt på lite större anläggningar. Samtidigt ger syreproduktion på plats ett visst oberoende och mindre känslighet för leveranser och elkostnader. Till anläggningen hör förutom kontaktreaktor med inlösningssystem även ozongeneratorer, kylsystem med filter, styr- och reglersystem samt gasalarm och utrustning för ozondestruktion (off-gas). Renat avloppsvatten kan användas för kylning. Till anläggningen hör även pumpar för att lyfta in vatten i anläggningen. Ingående delar redovisas i bilaga.

Sandfilter

Sandfilter har tagits med i beräkningarna för att möjliggöra förbehandling till GAK-filtrering och efterbehandling till ozonering. Sandfiltrering före GAK-filtrering är ett utmärkt sätt att säkerställa god partikelavskiljning men filtreringen ger även viss biologisk nedbrytning av organiskt material. Vid ozonering finns det inget omedelbart behov av förfiltrering efter en aktivslamanläggning med väl fungerande mellansedimentering och som i fallet Rosendal med efterfällning och slutsedimentering. Däremot krävs biologisk efterbehandling. Den kan tillgodoses genom efterföljande sandfiltrering, alternativt genom GAK filtrering. Sandfiltren dimensioneras för en ytbelastning på 10 m/h, vilket ger ett ytbehov på 46 m². Till filtren hör backspolningspumpar, blåsmaskin och spolvattenrännor. Spolmagasin kan delas med GAK-filtren.

Ytbehov

Figur 18 visar en flygbild av reningsverket.



Figur 18. Tänkt placering för avancerad rening vid Rosendals avloppsreningsverk. Det gulstreckade området motsvarar ca 30m * 30 m och ligger i anslutning till efterfällningsanläggningen och utloppet till poleringsdammarna (strax under bildkant).

Ozon och GAK-filtrering upptar ca 215 m² medan sand- och GAK-filtrering i kombination liksom ozon och sandfiltrering i kombination upptar ungefär samma yta och i storleksordningen ca 150 m². Det finns således relativt gott om plats för de olika alternativen även om det tillkommer ett antal kvadratmeter för gång- och serviceytor runt de olika konstruktionerna. Om ozonering med LOX skulle väljas som alternativ tillkommer körytor och uppställning och lagring av en syretank.

Kostnadskalkyl

Investerings- och driftskostnader har uppskattats för de olika alternativen. Specifika årskostnader (per m³ och ansluten person) bedöms även för de olika alternativen.

Investeringskostnader

Investeringskostnader för de olika delarna sammanfattas i tabell 10 nedan. Kostnadskalkylen med ingående delar redovisas i bilaga. Investeringskalkylerna har tagits fram i samarbete med Sweco.

Tabell 10. Kostnadsuppskattningar för investering i ozonering, GAK-filtrering och sandfiltrering.

Kostnadsdel (MSEK)	Ozon	GAK-filter	Sandfilter
Mark och betongarbete	0,91	5,19	2,43
Bygg	2,94		
VVS	0,70		
Maskin	7,30	9,60	4,80
El & Automation	1,46	3,36	1,68
Oförutsett (20%)	2,66	3,63	1,79
Summa entreprenadkostnad	15,97	21,78	10,70
Byggherrekostnad	3,20	5,01	2,47
Anläggningskostnad	19,2	26,8	13,2

Investeringskostnaderna baseras på erfarenhet från liknande projekt och på uppgifter från leverantörer. Investeringsbehoven omfattar kostnader för mark- och betongarbete, byggnadstekniska arbeten (ventilation och VS-installation ingår), maskinell utrustning, el- & automationsarbeten. Anläggningsdelarna förutsätts byggas ovan mark.

Kostnadsbedömningarna för maskiner omfattar kostnader för frakt, montage samt entreprenörsarvoden med 40%. I entreprenörsarvodet ingår kostnader för etablering, städning, bodar, ställningar, byggel, försäkringar och bankgaranti. Vidare ingår installationsentreprenörens arbeten med konstruktion och monteritningar. I entreprenörsarvodena ingår även projektledning, tester, provningar, besiktningar, centraladministration och vinst. 20% påslag har gjorts för oförutsedda utgifter och finns med i entreprenadkostnaden.

Byggherrekostnader för projektledning, projektering, upphandling, byggledning, kontroll, CE märkning, slutdokumentation och igångkörning ingår. Byggherrekostnaderna har beräknats som ett schablonpåslag på entreprenadkostnaderna, med i storleksordningen 20 %. Kostnadsnivån är från juni 2023. Moms ingår ej.

Investeringskostnaden är högst för GAK-filtrering och uppgår till närmare 27 MSEK. Kostnaderna för ozonanläggningen uppskattas till 19 MSEK. Sandfiltren kostar ca 13 MSEK, dvs. ungefär halva kostnaden jämfört med GAK-filtren. Anläggningsstorleken är också mindre.

Kapitalkostnader

Kapitalkostnader har beräknats för mark (grundläggning och betongarbete), byggnader samt för maskin, el, och automation. Enligt önskemål från Österlen VA väljs kalkylräntan till 2 % och avskrivningstiderna till 80 år för mark, 50 år för byggnader och 30 år för maskin, el och automation. Tabell 11 sammanfattar kapitalkostnaderna. Tabell 12 visar årliga kapitalkostnader med kortare avskrivningstider som jämförelse.

Tabell 11. Kapitalkostnader (beräknade enligt annuitetsmetoden) för de olika reningsalternativen.

	Avskrivningstid	Ozon	GAK-filter	Sandfilter
	(år)	(SEK/år)	(SEK/år)	(SEK/år)
Grundläggning och betongarbete	80	22 796	130 584	61 065
Byggnader	50	168 988		
VVS, Maskin, El & automation	30	563 232	854 107	427 053
Summa årlig kapitalkostnad		750 000	980 000	490 000

Tabell 12. Kapitalkostnader (beräknade enligt annuitetsmetoden) för de olika reningsalternativen.

	Avskrivningstid	Ozon	GAK-filter	Sandfilter
	(år)	(SEK/år)	(SEK/år)	(SEK/år)
Grundläggning och betongarbete	50	28 832	165 162	77 235
Byggnader	30	234 294		
VVS, Maskin, El & automation	15	981 722	1 488 720	744 360
Summa årlig kapitalkostnad		1 240 000	1 650 000	820 000

Driftkostnader

Följande poster har inkluderats i driftkostnads kalkylen:

- Syreproduktion (ozon)
- Energiförbrukning (ozongenerering)
- Byte av aktivt kol
- Pumpning
- Underhållskostnader
- Personalkostnader
- Analyskostnader

Driftkostnaderna redovisas i Tabell 13.

Tabell 13. Driftkostnader för de olika alternativen.

	Förbrukning/antal	Enhet	Specifik kostnad	Enhet	Årskostnad (SEK)
Ozon					
Syreproduktion ¹	75 546	kWh/år	1,5	SEK/kWh	113 319
Ozonproduktion ²	107 310	kWh/år	1,5	SEK/kWh	160 965
Pumpning	32 823	kWh/år	1,5	SEK/kWh	49 234
Underhåll ³					66 550
Personal	400	h/år	500	SEK/h	200 000
Analys	12	antal/år	7 500	SEK/analys	90 000
Totalt					680 000
GAK					
Utbyte av kol ⁴	18	ton/år	30 000	SEK/ton	540 000
Pumpning ⁵	23 871	kWh/år	1,5	SEK/kWh	35 807
Underhåll					90 750
Personal	200	h/år	500	SEK/h	100 000
Analys	12	antal/år	7 500	SEK/analys	90 000
Totalt					860 000
Sandfilter					
Pumpning	17 903	kWh/år	1,5	SEK/kWh	26 855
Underhåll					44 535
Personal	200	h/år	500	SEK/h	100 000
Totalt					170 000
Ozonering+GAK³					
Syreproduktion	21 585	kWh/år	1,5	SEK/kWh	32 737
Ozonproduktion ⁶	30 660	kWh/år	1,5	SEK/kWh	45 990
Utbyte av kol ⁷		ton/år	30 000	SEK/ton	420 000
Pumpning	32 823	kWh/år	1,5	SEK/kWh	49 234
Underhåll					157 300
Personal	600	h/år	500	SEK/h	300 000
Analys	12	antal/år	7 500	SEK/analys	90 000
Totalt					1 100 000

¹Syrebehovet beräknas utifrån 8 kg O₂/kg/0₃, där ozondosen antagits till 0,7 mg O₃/mg DOC. Energiåtgång för syreproduktion antas till 0,88 kWh/kg O₂.

²Energiförbrukningen beräknas utifrån 10 kWh/kg O₃

³0,5% av investeringskostnaden (ej oförutsett och byggherrekostnad)

⁴Byte av kol efter 30 000 bäddvolymeter – regenerering och transport

⁵Beräknat utifrån ett lyft om 4 m och 70% i verkningsgrad.

⁶0,2 mg O₃/mg DOC

⁷Byte av kol efter 45 000 bäddvolymeter – regenerering och transport

Driftkostnaderna utgör endast uppskattningar där framför allt antalet bäddvolymmer före byte eller regenerering av GAK-media utgör en avgörande faktor (se vidare nedan). För driftkostnader i övrigt kommer naturligtvis elpriser och andra enhetspriser att variera med tiden. Om alternativet med flytande syre väljs (LOX) ger driftkostnader i samma storleksordning, som PSA, men sådana jämförelser ger naturligtvis olika utslag med varierande el- och råvarupriser. För personalkostnader har det antagits att en ozonanläggning kräver tillsyn och uppföljning motsvarande en dag i veckan och för ett GAK- eller sandfilter en halv dag i veckan. Underhållskostnader är svåra att uppskatta och kan förväntas variera över tid. Ibland antas 1-2% av investeringskostnaden för maskininstallationen och ibland antas minde andelar på olika delar av investeringen. I detta projekt har en underhållskostnad motsvarande 0,5% av investeringskostnaden antagits.

Bäddvolymmer och kolbyte

Kostnaderna för aktivt kol utgör en stor del av drift- och totalkostnaderna för alternativen med GAK. Fortsatt uppföljning av anläggningarna i Kivik, S:t Olof och Degeberga kommer emellertid att ge ännu säkrare underlag för bedömning av livslängd och tillhörande kostnader för granulerat aktivt kol. Det kan mycket väl vara så att kostnaderna kan vara lägre än vad som presenteras här. Antalet bäddvolymmer är en nyckelparameter och ett annat sätt att uttrycka drifttid. Med kännedom om filtervolymen (V), flödet genom anläggningen (Q) och antalet bäddvolymmer (BV) kan antalet dagar (D) innan kolet behöver bytas eller regenereras beräknas enligt:

$$D = \frac{BV * V}{Q}$$

Med ett antagande om 30 000 bäddvolymmer, en total filtervolym för Rosendals ARV på 138 m³ och ett dygnsflöde motsvarande 4 200 m³/d kommer det att ta 986 dagar, dvs. lite mer än 2 år och 8 månader innan kolet behöver tas ut för regenerering. Med kännedom om kolets densitet kan sedan massan bestämmas för att beräkna kostnaden för aktivt kol. I Tabell 14 har kolpriset 30 000 SEK/ton använts och densiteten har satts till 400 kg/ton för att beräkna den årliga kostnaden för byte av kol, vilket landar i byte av kol i en cell om året. Årskostnaden kommer i verkligheten att bestämmas av det pris som gäller vart tredje år vilket skapar en viss osäkerhet. Det är av yttersta vikt, eftersom kolpriset är så avgörande för kostnaden, att en väl genomarbetad upphandling genomförs.

Antalet bäddvolymmer efter ozonering uppgår i schweiziska studier till minst det dubbla jämfört med filtrering utan föregående ozonering. Vi har inte motsvarande studier att tillgå i Sverige varför en försiktig bedömning gjorts där antalet bäddvolymmer antagits vara 50% högre efter ozonering.

Årskostnader

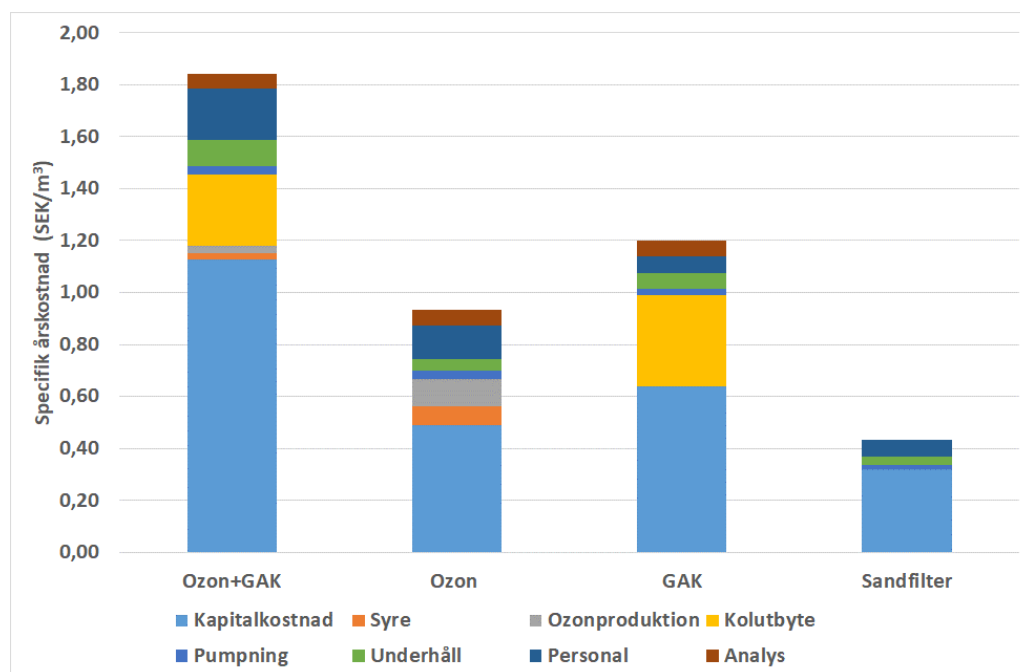
Kapitalkostnader och driftkostnader har summerats för att generera totalkostnader och specifika årskostnader, uttryckta per m³ och personekvivalent. Tabell 14 sammanfattar kostnaderna.

Tabell 14. Årskostnader för avancerad rening vid Rosendals ARV.

	Ozon + GAK	Ozon	GAK	Sandfilter
Kapitalkostnader (SEK/år)	1 730 000	750 000	980 000	490 000
Driftkostnader (SEK/år)	1 100 000	680 000	860 000	170 000
Totalkostnad (SEK/år)	2 920 000	1 430 000	1 840 000	660 000
Specifik årskostnad (SEK/m³)	1,84	0,93	1,20	0,43
Specifik årskostnad (SEK/personekvivalent)	172	87	112	40

Att beräkna specifika årskostnader per person har gjorts för den dimensionerande belastningen som uppgår till 16 500 pe. Antalet anslutna personer är relativt lågt i förhållande till det dimensionerande flödet eftersom en stor del av belastningen kommer från Österlenmejeriet. Att fördela kostnaderna på antalet anslutna personer kan därför bli missvisande.

Figur 19 illustrerar kostnadsdelarna för de olika alternativen.



Figur 19. Specifik årskostnad fördelad på kapitalkostnad samt olika driftkostnadsslag.

Figur 19 illustrerar det faktum att kapitalkostnaden är betydande för alla processlösningar och utgör i storleksordningen hälften av årskostnaden. Kostnaden för lösningarna med aktivt kol är känsliga för utbytestiden och kolkostnaden. Det bör noteras att antalet bäddvolymer som kan hanteras innan kolet måste tas ut för regenerering kommer att vara beroende av vilka ämnen som används som indikatorer för genombrott, se Tabell 3, och vilken avskiljning som

kommer att krävas. Med utgångspunkt i det nya direktivförslaget och de erfarenheter som finns från GAK-anläggningarna inom Österlen VA kan det konstateras att kostnaderna för GAK-filtrering blir allt lägre i jämförelse med vad som tidigare redovisats.

Ozonering (med efterbehandling i sandfilter) ger de lägsta specifika kostnaderna. Detta stämmer väl överens med andra studier, både nationella och internationella. Ozonering med efterföljande GAK-filtrering ger högst totalkostnader och något högre än GAK-filtrering med sandfiltrering som förbehandling. Komplexiteten i en anläggning med ozon och GAK-filtrering är emellertid betydligt högre och anläggningen kommer också att ta mer plats i anspråk.

De specifika årskostnaderna ligger i paritet med vad som rapporterats både nationellt (Björleinius & Cimbritz, 2021) och internationellt (Pistocchi m.fl., 2022).

Värt att nämna är att PFAS förekommer i flera diskussioner kopplade till skärpta krav och nya direktiv. Avskiljning av PFAS är inte möjlig med ozonering men med aktivt kol. Däremot förändras/förkortas livslängden för aktivt kol om hög avskiljning av PFAS-ämnena krävs. Förstudiens utförda analyser tyder på att Rosendals ARV inte har anmärkningsvärt höga av de PFAS-ämnena (PFOS och PFOA) som har analyserats, och att man i dagsläget inte behöver införa avancerad rening av den anledningen.

Slutligen bör det understrykas att byggkostnader och energipriser vid tiden för förstudiens genomförande är förhållandevis höga. Det råder således en viss osäkerhet.

Slutord till förstudien

Rosendals reningsverk i Tomelilla, beläget vid randen av ett naturreservat vid den lilla recipienten Välabäcken illustrerar tydligt den missanpassning som kan uppstå mellan samhälle och recipient. När samhället växer och utsläppens karaktär förändras så kan recipienten inte svara upp. I Välabäcken leder utsläppen av mikroföroreningar till att gränsvärden satta av Havs och Vattenmyndigheten och snart från EU överträds stora delar av året.

God biologisk funktion i det välfungerande reningsverket och hög rening av näringsämnen med befintlig teknik, ger tyvärr bara begränsad rening av de läkemedelsrester och andra mikroföroreningar som samhället bidrar med. För att åtgärda miljöproblemet bör om möjligt de tre befintliga reningsteknikerna på Rosendals ARV kompletteras med ett fjärde reningssteg.

Valet av teknik kan göras mot bakgrund av flera olika kriterier. I princip utgör både ozonering och filtrering genom granulerat aktivt kol möjliga lösningar i Tomelilla. Den biologiska och den kemiska reningen fungerar som sagt mycket bra vid verket, vilket ger goda förutsättningar både för ozonering och kolfiltrering. Såväl oxidation genom ozonering som adsorption till aktivt kol kan testas i laboratorie- och/eller pilotskala inför en mer detaljerad dimensionering och projektering. Båda alternativen kan installeras på den plats som finns tillgänglig och kommer i jämförelse med andra reningssteg inte att ta särskilt mycket plats i anspråk (<200 m²).

Ozonering följt av sandfiltrering blir något billigare än sandfiltrering följt av GAK-filtrering. Alternativet med ozonering och GAK i kombination blir dyrast. De specifika årskostnaderna är i storleksordningen 1,5 SEK/m³ behandlat vatten, något mindre för ozonering och något mer för GAK-filtrering. De slutliga kostnaderna beror av en rad olika faktorer där el- och råvarupriser kommer att spela en stor roll. Kapitalkostnaden är betydande för alla processlösningar och utgör i storleksordningen hälften av årskostnaden. Kostnaden för anläggningar med aktivt kol är framför allt känsliga för antalet bäddvolymeter som kan filtreras innan kolet byts ut och naturligtvis för priset på aktivt kol medan en ozonanläggning kommer att vara känslig för elpriset. Fortsatt uppföljning av de anläggningar som finns inom Österlen VA kommer att ge en alltmer detaljerad och säker kostnadsuppfattning.

GAK-filtrering med förfiltrering är en enkel och stabil processlösning som kräver ett minimum av tillsyn. Det finns också goda erfarenheter inom organisationen av detta alternativ. En fördel med GAK-filtrering är också att ämnen i huvudsak avskiljs genom adsorption, dvs. separation från vattenfasen, vilket möjliggör efterföljande destruktion. I en ozonanläggning bygger avskiljningen på omvandling av ämnen, vilket betyder att nya ämnen, bi- och transformationsprodukter, bildas vid reningen. Vissa av dessa kan brytas ner i efterföljande sandfiltrering. De flesta studier tyder emellertid på att toxicitet, utifrån olika mått på olika nivåer, sänks vid ozonering följt av biologisk efterbehandling.

Efter installation av ett fjärde reningssteg behövs utvärdering vad gäller funktion och reningsgrad, och längre fram kunskap och erfarenhet för kommande rutiner kring tidpunkt för intervall av kolbyte alt. regenerering av kol. För att begränsa analyskostnaderna och samtidigt följa kommande EU-lagstiftningens rekommendationer har projektet visat att följande sju parametrar kan användas för att utvärdera det fjärde reningsstegets funktion; diklofenak, karbamazepin, irbesertan, metoprolol, bensotriazol, venlafaxine och citalopram.

Valet av analysparametrarna ovan är gjort med tanke på analyserbarhet, EU:s kategoriindelning, och att det är ämnen som återfinns i Rosendals avloppsvatten i stabila halter över hela året.

En tid efter uppstart, och när det bekräftats att det fjärde reningsverkets funktion är i ordning kan ett löpande provtagningsschema sättas upp i samråd med tillsynsmyndigheten, förslagsvis kvartalsvis. Värt att påpeka är att tillfälliga dippar i reningsgrad kan förekomma i ett GAK-filter, och att det sedan kan "återhämta sig". Denna kunskap är viktig för att man inte ska byta ut kolet för tidigt, utan dra välgrundade slutsatser över tid med "stabil" reduktion över hela reningsverket <80% innan kolbyte görs. Över åren kommer man kunna lära sig bäddens funktion och driftförhållanden kopplat till bäddvolym, och analystillfällena kommer troligtvis kunna glesas ut, när man känner funktionen och kolets livslängd väl. Provfrekvensen kan öka när man börjar närma sig genombrott. Uppåt 30 000 bäddvolym har visat sig vara en god hållpunkt vid kombinationen sand-GAK, och något mer för kombinationen ozon-GAK.

Utsläppet av avloppsvattnet från Rosendals ARV innebär ett betydande tillskott till recipienterna. För små vattendrag såsom både Välabäcken och Örupsån spelar tillskottsvattnet en viktig roll för flödet och mängden vatten. Detta innebär att ett avloppsvatten renat från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar är viktigt under torrperioder. Vid framtida klimatförändringar kommer därför det från läkemedelsrester och andra mikroföroreningar rena tillskottsvattnet innebära en viktig miljöförbättring även ur denna aspekt.

Referenser

- Abegglen, C. & Siegrist, H. (2012). Mikroverunreinigungen aus Kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. *Umwelt-Wissen 1214: 210*. S. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Altmann, J., Ruhl, A., Zietzschmann, F., & Jekel, M. (2014). Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment, *Water Research*, 55, pp. 185-193.
- Baresel, C., Ek, M., Ejhed, H., Allard, A.-S., Magnér, J., Dahlgren, L., Westling, K., Wahlberg, C., Fortkamp, U., Søhr, S. (2017 b). Handbok för rening av mikroföroreningar vid avloppsreningsverk – Planering och installation av reningstekniker för läkemedelsrester och andra mikroföroreningar. Slutrapport SystemLäk projekt. IVL Swedish Environmental Research Institute, Report B2288
- Benstoem, F., Nahrstedt, A., Boehler, M., Knopp, G., Montag, D., Siegrist, H., Pinnekamp, J., 2017. Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater—A meta-analysis of pilot- and large-scale studies. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.118>
- Betsholtz, A., Juárez, R., Svahn, O., Davidsson, Å., Cimbritz, M. & Falås, P. (2022). Ozonation of 14C-labeled micropollutants – mineralization of labeled moieties and adsorption of transformation products to activated carbon. *Water Research*, 221, 118738. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118738>
- Björleinius, B., Cimbritz, M. (2021). Konsultrapport – kostnadsbedömning. Bilaga 2 i Rapport R2021-05, December 2021. *Beställargrupp för minskade utsläpp av läkemedelsrester, mikroplaster och andra föroreningar via avloppsreningsverk*. Svenskt Vatten.
- Björleinius, B., Ripszám, M., Haglund, P., Lindberg, R.H., Tysklind, M., Fick, J., 2018. Pharmaceutical residues are widespread in Baltic Sea coastal and offshore waters – Screening for pharmaceuticals and modelling of environmental concentrations of carbamazepine. *Science of the Total Environment* 633, 1496–1509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.276>
- Bourgin, M., Beck, B., Boehler, M., Borowska, E., Fleiner, J., Salhi, E., Teichler, R., von Gunten, U., Siegrist, H., McArdell, C.S. (2018). Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatments: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products. *Water Res.* 129, 486–498. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.036>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.S., Abert-Vian, M., 2017. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrason Sonochem.* <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Edefell, E., Svahn, O., Falås, P., Bengtsson, E., Axelsson, M., Ullman, R., Cimbritz, M. (2022). Digging deep into a GAC filter – Temporal and spatial profiling of adsorbed organic micropollutants. *Water Res.* 218, 118477. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118477>
- Ekblad, M., Juárez, R., Falås, P., Bester, K., Hagman, M., **Cimbritz, M.** (2021). Influence of operational conditions and wastewater properties on the removal of organic micropollutants through ozonation. *Journal of Environmental Management*, 286. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/j.jenvman.2021.112205>
- Fundneider, T., Herrling, M. P., Kahl, E. P., Lackner, S. (2018). Identifying technical synergy effects for organic micro-pollutants removal. *Water Practice*. 13(2). <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.041>

- Fundneider, T., Acevedo Alonso, V., Abbt-Braun, G., Wick, A., Albrecht, D., Lackner, S. (2021). Empty bed contact time: The key for micropollutant removal in activated carbon filters. *Water Res.* 191, 116765. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116765>
- Gulde, R., Rutsch, M., Clerc, B., Schollée, J.E., von Gunten, U., McArdell, C.S. (2021). Formation of transformation products during ozonation of secondary wastewater effluent and their fate in post-treatment: From laboratory- to full-scale. *Water Res.* 200, 117200. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117200>
- Herbst, H., Antakyali, D., Sasse, R., Ante, S., Schulz, J. (2016): Kosten der Elimination von Mikroschadstoffen und mögliche Finanzierungsansätze, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Nr.2, s.124-130.
- Hollender, J., Zimmermann, S.G., Koepke, S., Krauss, M., Mcardell, C.S., Ort, C., Singer, H., Von Gunten, U., Siegrist, H. (2009). Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration. *Environ. Sci. Technol.* 43, 7862–7869. <https://doi.org/10.1021/es9014629>
- Hübner, U., Müller, J., Zech, T., Knoop, O., Daub, B., Keyzers, C., Metzger, S., Drewes, J. E. (2023). Herausforderungen bei der Bewertung der Spurenstoffelimination am Beispiel der Kläranlage Weißenburg. *Korrespondenz Abwasser, Abfall – 2023* (70). Nr. 9.
- Juárez, R., Karlsson, S., Falås, P., Davidsson, Å, Bester, K., Cimbritz, M. (2021). Integrating dissolved and particulate matter into a prediction tool for ozonation of organic micropollutants in wastewater, *Science of the Total Environment*, vol. 795. 14871. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2021>
- Loos, R., Carvalho, R., António, D.C., Comero, S., Locoro, G., Tavazzi, S., Paracchini, B., Ghiani, M., Lettieri, T., Blaha, L., Jarosova, B., Voorspoels, S., Servaes, K., Haglund, P., Fick, J., Lindberg, R.H., Schwesig, D., Gawlik, B.M., 2013. EU-wide monitoring survey on emerging polar organic contaminants in wastewater treatment plant effluents. *Water Res* 47, 6475–6487. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.08.024>
- Margot, J., Kienle, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., de Alencastro, L.F., Abegglen, C., Thonney, D., Chèvre, N., Schärer, M., Barry, D.A. (2013). Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Sci. Total Environ.* 461–462, 480–498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.034>
- Meier, A., Remy, C. (2020) Klimafreundlich Gewässer Schützen – Co2-Fussabdruck Verkleinern Bei Der Elimination Organischer Spurenstoffe Auf Kläranlagen. *Aqua & Gas*, No 2. [Klimafreundlich Gewässer schützen - CO2-Fussabdruck verkleinern bei der Elimination organischer Spurenstoffe auf Kläranlagen - VSA Micropoll](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116765)
- Oekotoxzentrum (2015). Environmental Quality Standard (EQS) – Vorschlag des Oekotoxzentrums für Bromat.
- Pardis Pirzadeh, Ola Svahn, Susann Milenkovski, 2021. Läkemedel i vattenrecipienter - Hur prioriterar vi framtidens rening? Länsstyrelsen Skåne, Malmö.
- Petrović, M., 2014. Methodological challenges of multi-residue analysis of pharmaceuticals in environmental samples. *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 1, e25–e33.
- Pistocchi, A., Andersen, H. R., Bertanza, G., Brander, A., Choubert, J. M., Cimbritz, M., Drewes, J. E., Koehler, C., Krampe, J., Launay, M., Nielsen, P. H., Obermaier, N., Stanev, S. & Thornberg, D. (2022). Treatment of micropollutants in wastewater: Balancing effectiveness, costs and implications. *Science of The Total Environment*, 850, 157593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157593>
- Prasse, C., Stalter, D., Schulte-Oehlmann, U., Oehlmann, J., Ternes, T. (2015). Review: Spoilt for choice: A critical review on the chemical and biological assessment of current wastewater treatment technologies, *Water Research*, 87. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/j.watres.2015.09.023>

- Stapf, M., Mieke, U., Bester, K. & Lukas, M. 2020. *Guideline for advanced API removal*. CWPharma Activity 3.4 output. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4305935>
- Svahn, O., Björklund, E., 2019a. Simple, fast and inexpensive large “whole water” volume sample SPE-loading using compressed air and finely ground sand. *Analytical Methods* 11. <https://doi.org/10.1039/c8ay02786b>
- Svahn, O., Björklund, E., 2019b. Extraction efficiency of a commercial Espresso machine compared to a stainless-steel column Pressurized Hot Water Extraction (PHWE) system for the determination of 23 pharmaceuticals, antibiotics and hormones in sewage sludge. *Applied Sciences (Switzerland)* 9. <https://doi.org/10.3390/APP9071509>
- Svahn, O., Björklund, E., 2016. Increased electrospray ionization intensities and expanded chromatographic possibilities for emerging contaminants using mobile phases of different pH. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci* 1033–1034, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2016.07.015>
- Svahn, O., 2023. Interkalibrering av läkemedelsanalys för utvärdering av avancerad rening. Högskolan Kristianstad, Kristianstad.
- Svahn, O., Borg, S., 2024. Assessment of full-scale 4th treatment step for micro pollutant removal in Sweden: Sand and GAC filter combo. *Science of The Total Environment* 906, 167424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167424>
- Takman, M., Svahn, O., Paul, C., Cimbritz, M., Blomqvist, S., Struckmann Poulsen, J., Lund Nielsen, J., & Davidsson, Å. (2023). Assessing the potential of a membrane bioreactor and granular activated carbon process for wastewater reuse – A full-scale WWTP operated over one year in Scania, Sweden. *Science of the Total Environment*, 895. <https://doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.1016/j.scitotenv.2023.165185>
- VSA (2019). Hinweise zur Planung und Auslegung von diskontinuierlich gespülten GAK-Filtern zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalen Abwasser. Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen. Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs. [Hinweise zur Planung und Auslegung von diskontinuierlich gespülten GAK-Filtern zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser - Konsenspapier zum Workshop vom 9.12.2019 an der EAWAG - VSA Micropoll](https://www.eawag.ch/dam/ocn-content/2019-09-12-Workshop-Mikroverunreinigungen-Hinweise-zur-Planung-und-Auslegung-von-diskontinuierlich-gespulnten-GAK-Filtern-zur-Elimination-organischer-Spurenstoffe-aus-kommunalem-Abwasser-Konsenspapier-zum-Workshop-vom-9.12.2019-an-der-EAWAG-VSA-Micropoll.pdf)
- Wickramasekara, S., Hernández-Ruiz, S., Abrell, L., Arnold, R., Chorover, J., 2012. Natural dissolved organic matter affects electrospray ionization during analysis of emerging contaminants by mass spectrometry. *Anal Chim Acta* 717, 77–84.