

**Förstudie
läkemedelsrening vid
Lindholmens
avloppsreningsverk i
Norrtälje**



**Slutrapport
Norrtälje Vatten och Avfall AB
VA-avdelningen**

Oktober 2022



Recipientpåverkan, behov av avancerad rening och integrering i Lindholmens framtida avloppsvattenhantering

Författare: Jennie Åberg Norrtälje Vatten och Avfall, Berndt Björlenius B2 Processteknik, Stefan Örn och Gunnar Carlsson SLU, Anders Ullman, Treatcon, Emma Gunnerblad Norrtälje Vatten och Avfall

Fotograf: Jennie Åberg

Upplaga: Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

Förord

I juli 2021 beviljades Norrtälje Vatten och Avfall AB (då Norrtälje kommun) 5 642 057 kr i bidrag från Naturvårdsverket (NV-21-006483) för att genomföra en förstudie avseende avancerad rening av läkemedel vid Lindholmens avloppsreningsverk i Norrtälje. Bidraget är en del av de medel Naturvårdsverket har att fördela fram till 2023 för att genomföra åtgärder som syftar till att förbättra vattenmiljön.

Målet med förstudien var att ta fram en teknisk lösning för en avancerad rening av läkemedel vid Lindholmens ARV som skulle vara möjlig att applicera till den planerade utbyggnaden av verket. Detta har gjorts genom ett samarbete mellan förstudieprojektet och projekteringen av planerad utbyggnad.

Förstudien bestod av en litteraturstudie över de senaste rönen om implementerbara reningstekniker, 21 veckors pilotförsök med PAC/GAC och ozon, tre veckors biologiska tester med fisk och snäcka, utvärdering och fastställande av dimensioneringsparametrar, design- och layoutförslag, investerings- och driftkostnader, samt beräkningar av läkemedelskoncentrationer i recipienten utan och med läkemedelsrening.

Projektgruppen har jobbat tillsammans och haft en tät dialog och uppföljning av framkomna resultat och tidplan.

Denna sammanfattande slutrapport har arbetats fram under ledning av projektledare Jennie Åberg, NVAA tillsammans med Berndt Björleinius, B² Processteknik, Stefan Örn och Gunnar Carlsson, SLU, Anders Ullman, Treatcon och Emma Gunnerblad, NVAA och Richard Grähs, NVAA.

Innehållsförteckning

.....	1
Förord.....	2
Sammanfattning	5
1. Inledning	7
1.1. Syfte	7
1.2. Projektöversikt.....	8
1.3. Organisation	8
1.4. Genomförande	9
1.5. Lindholmen idag, process och reduktion.....	10
1.5.1 Lindholmens Reningsverk idag	10
1.5.2 Reduktion av läkemedelsrester i verket.....	11
1.6. Pilotförsöken.....	14
1.7. Ekotoxikologiska tester.....	14
1.8. Recipientprovtagning och modellering	14
1.9. Multikriterieanalys.....	15
1.10. Principförslag	15
2. Pilotförsök med aktiverat kol och ozonering	15
2.1 Beskrivning pilotanläggning.....	15
2.2 Försöksupplägg.....	16
2.3 Drift och observationer	17
2.4 Mät- och analysresultat	18
2.5 Aktiverat kol – PAC	19
2.6 Aktiverat kol – GAC	21
2.7 Ozonering.....	23
2.8 Sammanfattning av pilotförsöken	25
3. Ekotoxikologiska tester – Exponeringsförsök i fält.....	26
3.1. Upplägg/beskrivning.....	26
3.2. Exponeringsfaciliteten	27
3.3. Zebrafisk (<i>Danio rerio</i>).....	28
3.4. Dammsnäcka (<i>Lymnaea stagnalis</i>).....	30
3.5. Celltester	31
3.6. Sammanfattning	33
4. Recipientprovtagning och modellering.....	34
4.1 Norrtäljeviken	34
4.2 Provtagningsprogram	35

4.3	PEC, MEC och PNEC-värden	35
4.4	Modellering av Norrtäljeviken	38
4.5	Bedömning av risker och erforderlig reningsgrad.....	39
4.6	Sammanfattning	41
5.	Multikriterieanalys – Processval.....	42
5.1	Metodik.....	42
5.2	Parametrar	42
5.3	Viktning.....	43
5.4	Syntes	43
6.	Principförslag	44
6.1	Förutsättningar	44
6.2	Analyser av läkemedelsrester i befintligt reningsverk - profiler	44
6.3	Designparametrar.....	46
6.4.	Beskrivning.....	47
6.5.	Resursbehov	49
6.6.	Kostnader	49
6.7.	Tidplan.....	50
7.	Information och kunskapsspridning	50
7.1	Upplägg	50
7.2	Informationsinsatser – loggbok	51
7.3	Slutseminarium.....	52
8.	Diskussion.....	52
9.	Slutsatser	54
Bilagor	55	
	Bilaga 1 B ² Processteknik - Pilotförsöken	55
	Bilaga 2 SLU, Ekotoxikologiska tester – Exponeringsförsök i fält	55
	Bilaga 3 B ² Processteknik – Recipientmodellering	55
	Bilaga 4 Treatcon och B ² Processteknik – Principförslag	55
	Bilaga 5 NVAA – Sammanställning projektekonomi	55

Sammanfattning

Dagens reningsverk är inte utformade för att ta hand om rester från läkemedel, dock reduceras generellt närmare 50% utan mer avancerad teknik.

Norrtälje Vatten och Avfall redovisar i denna rapport sina resultat från utförd förstudie vilken Naturvårdsverket beviljade bidrag för i juli 2021.

Förstudien hjälper oss att förstå hur nuläget ser ut gällande dessa föroreningar vid Norrtäljes största reningsverk, vilken den bästa tekniken är med hänseende till reduktionsgrad samt driftsäkerhet och arbetsmiljö, investerings- och driftkostnader för det framtagna förslaget och hur det idag ser ut i mottagande recipient för utgående renat avloppsvatten, Norrtäljeviken.

Lindholmens ARV har med åren byggts om- och till ett flertal gånger för att öka kapaciteten samt efterleva nya reningskrav. Inledningsvis fanns inget krav på kväverening, vilket byggdes till först 1998 efter nytt miljötillstånd som erhöles 1997.

För att etablera en kunskap om vad verket tar emot och släpper ut, utfördes fyra veckoprovtagningar med analys av inkommande och utgående halter av läkemedel. Även två profilprovtagningar gjordes där läkemedelshalter vid fyra provpunkter i verket mättes. Den genomsnittliga reduktionen uppmättes till 34% ligger något under den förväntade reduktionsgraden

Pilotförsök med avancerad rening för att ta bort läkemedelsrester utfördes på plats på Lindholmens reningsverk för att kartlägga förekomsten av läkemedelsrester och hur de på bästa sätt kan renas bort från dagens utgående avloppsvatten. Reningsteknikerna ozonering, filtrering genom granulerat aktiverat kol (GAC) och tillsats av pulveriserat aktiverat kol (PAC) utvärderades genom kontinuerlig drift, kompletterad med satsvisa dos-respons bestämningar av dimensionerande data. Försök med desinfektion av utgående avloppsvatten genomfördes med ozonering, ultrafilter och UV-ljus för att utröna möjligheterna att återvinna renat avloppsvatten. En multikriterieanalys genomfördes av processgruppen för att vaska fram den mest lämpade avancerade reningsteknik för Lindholmens reningsverk som underlag till ett principförslag för reningssteget.

Norrtäljeviken utgör recipient för det renade avloppsvattnet från Lindholmens reningsverk och är en del av Östersjön med stor utspädning av det renade avloppsvattnet. Recipientprover har tagits från olika delar av Norrtäljeviken för att kartlägga eventuell förekomst av läkemedelsrester i kustvattnet. Resultaten användes för att jämföra med modellerade värden som också tagits fram för att bedöma ekotoxikologiska risker för vattenlevande organismer i Norrtäljeviken. Genom den redan idag naturligt förekommande utspädningen av renat avloppsvatten med åvatten och vattenutbytet i Norrtäljeviken är koncentrationerna av läkemedelsrester i mycket låga vilket gör att den ekotoxikologiska risken mätt som PEC/PNEC är i princip försumbar, förutom mycket lokalt, nära avloppsanläggningar.

Under tre av de veckor pilotanläggningen var i drift utfördes biologiska tester med zebrafisk och dammsnäcka på plats vid Lindholmen. Fisk och snäckor exponerades för fyra olika försöksvatten, innehållande utgående avloppsvatten, ozonbehandlat utgående avloppsvatten, utgående avloppsvatten filtrerat genom granulerat aktivt kol, samt kranvatten som referensvatten. Den biologiska utvärderingen inkluderade effekter på gennivå, beteende, samt reproduktion. Generellt sågs ingen betydande förbättring med avancerad rening. Resultaten indikerade viss förbättring av reproduktionsförmågan hos fisk, men även avvikande effekter på beteende av ozonbehandlat avloppsvatten. Ingående celltester utförda på lab av de olika försöksvattnen påvisade inte heller dessa någon betydande förbättring av avancerad rening, där förekomst av biologiskt aktiva ämnen uppmättes även efter avancerad rening.

Utifrån genomförda försök i pilotskala och en multikriterieanalys med möjliga tekniker, utarbetades ett principförslag för framtida läkemedelsrening vid Lindholmens reningsverk.

Framtida läkemedelsrening kommer att utformas som en kolfilteranläggning med granulerat aktiverat kol (GAC).

Anläggningen, som är dimensionerad för ett maximalt flöde om 1 800 m³/h eller 16 650 m³/d, inryms i ett hus på ca 750 m².

Investeringskostnaden för den föreslagna anläggningen har uppskattats till 120 MSEK. Driftkostnaden, som till 90% utgörs av aktivt kol, har uppskattats till drygt 8 MSEK.

Med angivna investerings- och driftkostnader skulle det kosta ca 2,2 kr att rena en kubikmeter avloppsvatten.

1. Inledning

Lindholmens avloppsreningsverk byggdes på 1960-talet och har sedan dess byggts om och till vid ett antal tillfällen för att efterleva nya reningskrav och klara en högre kapacitet vartefter staden vuxit.

Till Lindholmen leds spillavloppsvatten från Norrtälje stad och Bergshamra samhälle. Avloppsvattnet utgörs av spillavlopp från hushåll och verksamheter samt septiskt slam från slambrunnar och slutna tankar från enskilda anläggningar. Verket tar även emot slam från flera omkringliggande mindre reningsverk för avvattning.

1997 fick Lindholmen sitt nuvarande miljötillstånd på 34 000 personekvivalenter (pe). Då Norrtälje kommun, framför allt Norrtälje stad, växer kraftigt sökte VA-avdelningen på Norrtälje kommun i maj 2019 nytt miljötillstånd om 50 000 pe vilket erhöles och vann laga kraft i mars 2021.

Ett av villkoren som sattes avser att följa utvecklingen av avancerad rening.

Under det senaste året har projektering av en om- och tillbyggnad av Lindholmen pågått och ett principförslag för anläggningen finns framtaget där det är anpassat för möjlig anslutning av ett läkemedelsreningssteg.

1.1. Syfte

Då det nya miljötillståndet erhöles i februari 2021 påbörjades projekteringen för utbyggnad av Lindholmen. För att säkra upp utrymme inom anläggningen genom att ta fram ett principförslag även för ett reningssteg avseende läkemedelsrester samt för att efterleva det villkor som erhöles gällande just läkemedelsrening ansåg projektgruppen för projekteringen på VA-avdelningen i Norrtälje att det var ett alldeles utmärkt tillfälle att genomföra denna förstudie. På detta sätt erhöles kunskap inom området samt om det vatten som går igenom Lindholmen i dag. Dessutom tas det fram ett färdigt koncept, en teknisk lösning, som kan appliceras på anläggningen vid behov och om skärpta krav ställs framöver.

Villkor 17 i miljödomen från 2021 lyder:

”Kommunen ska fortlöpande följa utvecklingen av teknik för rening av läkemedelsrester och mikroplaster samt arbeta för att ny teknik i verksamheten kan införas så att utsläppen reduceras. Arbetet ska ske i samråd med tillsynsmyndigheten och redovisas i den årliga

miljörapporten.”

1.2. Projektöversikt

Ansökan skickades in i mars 2021 till Naturvårdsverket och beslutades om i juli samma år.

Norrtälje Vatten och Avfall tog då fram en projektorganisation för att genomföra förstudien enligt ansökningshandling.

Förstudien har bestått av flera delmoment: litteraturstudie, pilotförsök med kemiska analyser, biologiska tester där zebrafisk och dammsnäcka exponerats på plats samt cellexponering in vitro, recipientprovtagning och modellering. Till sist utvärderades de olika reningsteknikerna och detta resulterade i ett färdigt principförslag inkluderande uppskattad investerings- och driftkostnad för anläggningsdelen, som är applicerbart på det framtida utbyggda Lindholmen.

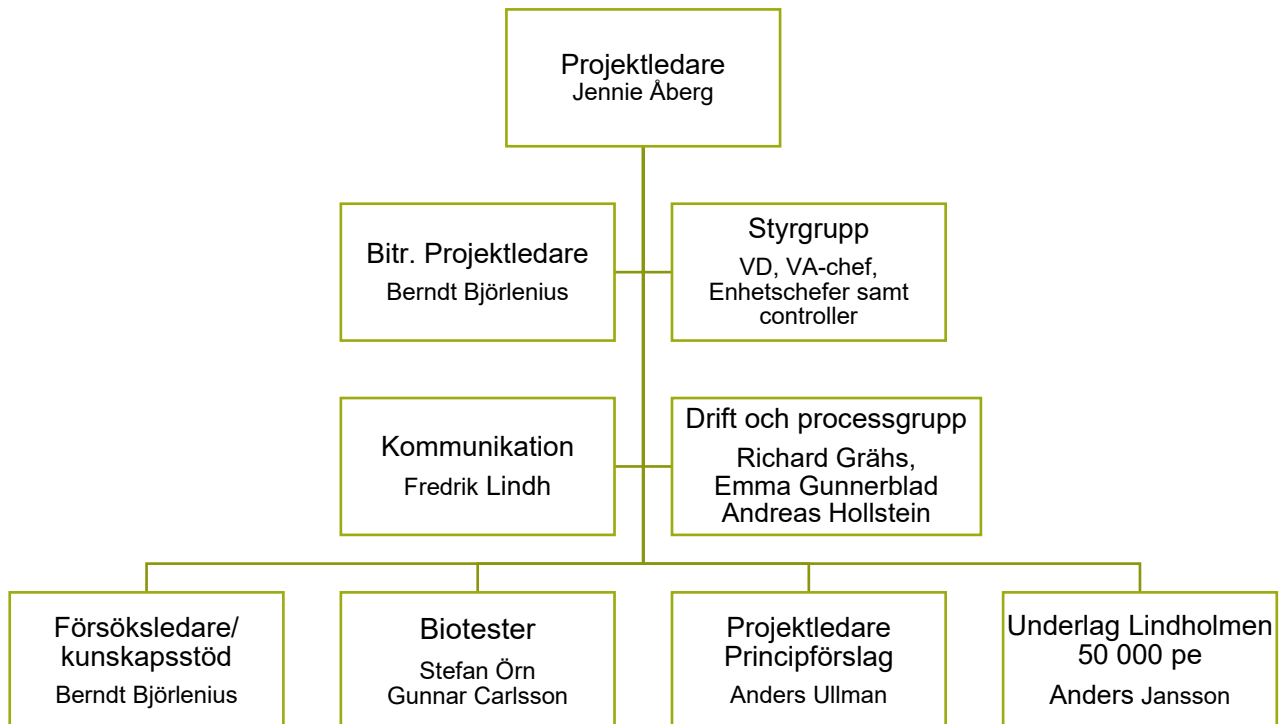
1.3. Organisation

För att uppnå syftet med att inkludera det framtagna konceptet av läkemedelssteget i den pågående projekteringen av planerad utbyggnad av Lindholmen på ett smidigt sätt, tillsattes Jennie Åberg från NVAA som projektledare för de båda projekten.

Till hjälp avropades Berndt Björlenius, B² Processteknik som biträdande projektledare, försöksledare och kunskapsstöd, samt Sveriges lantbruksuniversitet, Stefan Örn och Gunnar Carlsson, för att utföra de planerade biologiska testerna.

Anders Ullman, Treatcon, har varit projektledare för framtagandet av principförslaget samt kostnader.

Resurser från NVAA:s driftorganisation har bistått förstudien med sin kompetens, genomförande av provtagningar och skrivelser om dagens reningsverk.



Figur 1 Övergripande projektorganisation för förstudieprojektet.

1.4. Genomförande

Inledningsvis startades planering av projektet upp. Avrop av konsultstöd samt laboratorier gjordes samt viss anpassning på Lindholmen genomfördes för att möjliggöra anslutning av pilotanläggningen.

Projektgruppen har löpande, varannan vecka, haft möten för att stämma av mot tidplan samt planera de olika aktiviteterna. Pilotförsöken pågick under ca 21 veckor och exponeringen av zebrafiskar och dammsnäckor pågick under tre av dessa veckor. Sammanställning och analys av resultat av provtagningar har skett löpande. Provtagning och modellering av Norrtäljeviken har utförts avseende läkemedelsrester och för att beräkna ekotoxikologiska risker. En multikriterianalys genomfördes för att utifrån ett antal viktade kriterier komma fram till lämpligaste reningsteknik. Efter val av teknik arbetades det fram ett principförslag med tillhörande investerings- och driftkostnad.

Projektgruppen redogjorde i september 2022 framkomna resultat för inbjudna representanter från kommuner, organisationer och myndigheter.

Under hela förstudieperioden har Covid-19, Coronapandemin, pågått. Dels har det påverkat projektet genom försenade leveranser, dels möjligheten till studiebesök på plats då verksamheten, liksom andra haft restriktioner att förhålla sig till.

1.5. Lindholmen idag, process och reduktion

1.5.1 Lindholmens Reningsverk idag

Idag består processen i Lindholmens reningsverk av mekanisk, biologisk och kemisk rening. Processen är av konventionellt upplägg men den biologiska reningen i en s.k. OCO-reaktor är en ovanlig lösning i Sverige.

Inkommande vatten består till största delen av hushållspillvatten men septiskt slam från enskilda anläggningar står för en relativt stor del av belastningen verket tar emot. Det septiska slammets tas emot och rensas i en egen mottagning och sparas sedan i utjämningsstankar. Under natten, då belastningen i verket är lägre, tas septikslammet in i reningsverkets process.

Det första steget i verket är den mekaniska reningen med rensilar som eliminerar trasor och annat skräp som kommer med inkommande vatten. Efter detta steg finns ett luftat sandfång och fyra parallella försedimenteringsbassänger som avskiljer mindre partiklar.

Det biologiska steget är, som tidigare nämnts, en OCO- reaktor i vilken luftade, anoxiska och anaeroba zoner skapas med hjälp av avbalkningar, omrörare och intermitterent luftning. I denna bassäng sker både konventionell biologisk rening, fördenitrifikation, nitrifikation och Bio-P processer. Efter detta steg avskiljs bioslammet i två parallella mellansedimenteringsbassänger varifrån det klarnade vattnet fortsätter till det kemiska reningssteget som består av PIX-dosering, intensivomrörare, flockningskammare och en slutsedimentering med fyra parallella linjer.

Vid höga flöden passerar flöden över 1000 m³/h förbi biosteg och mellansedimentering för att undvika slamflykt. Flödena från biologisk rening och förbilet vatten, leds ihop innan det kemiska reningssteget. Vid höga flöden är utgående vatten således en blandning av färdigbehandlat vatten och vatten som behandlats mekaniskt och kemiskt.

1.5.2 Reduktion av läkemedelsrester i verket

Även om våra reningsverk idag är utformade för att reducera halterna av lättnedbrutet organiskt material samt fosfor och, för större verk i södra Sverige, kväve så kan bakterierna som bryter ned kolföreningar även i viss mån bryta ned läkemedel. Hur effektivt detta sker beror på läkemedlets molekylära struktur som påverkar hur lätt det är för bakteriernas enzym att komma åt att bryta upp bindningarna i molekylen. Reduktionen varierar mellan verk beroende på att halterna av läkemedel och förutsättningarna för bakteriefloran varierar. Läkemedelsrester kan även adsorbera till slampartiklar och på så sätt avlägsnas ur flödet.

Inom ramen för detta projekt har det undersökts hur reduktionen på Lindholmens reningsverk ser ut för ett antal läkemedel såsom vanliga smärtstillare, ofta föreskrivna blodtrycksmediciner samt ett urval av övriga substanser. Även undersökningar på hur reduktionen i de olika reningsstegen ser ut utfördes.

Provtagning

Provtagning på inkommande och utgående flöden skedde flödesproportionerligt. Inkommande flöde provtogs efter rensilarna och bestod av spillvatten, tvättvatten från renstvättar samt det septiska slam som samlas in från omkringliggande enskilda avloppsanläggningar. Inga internflöden från verket var inkopplade innan provtagningspunkten.

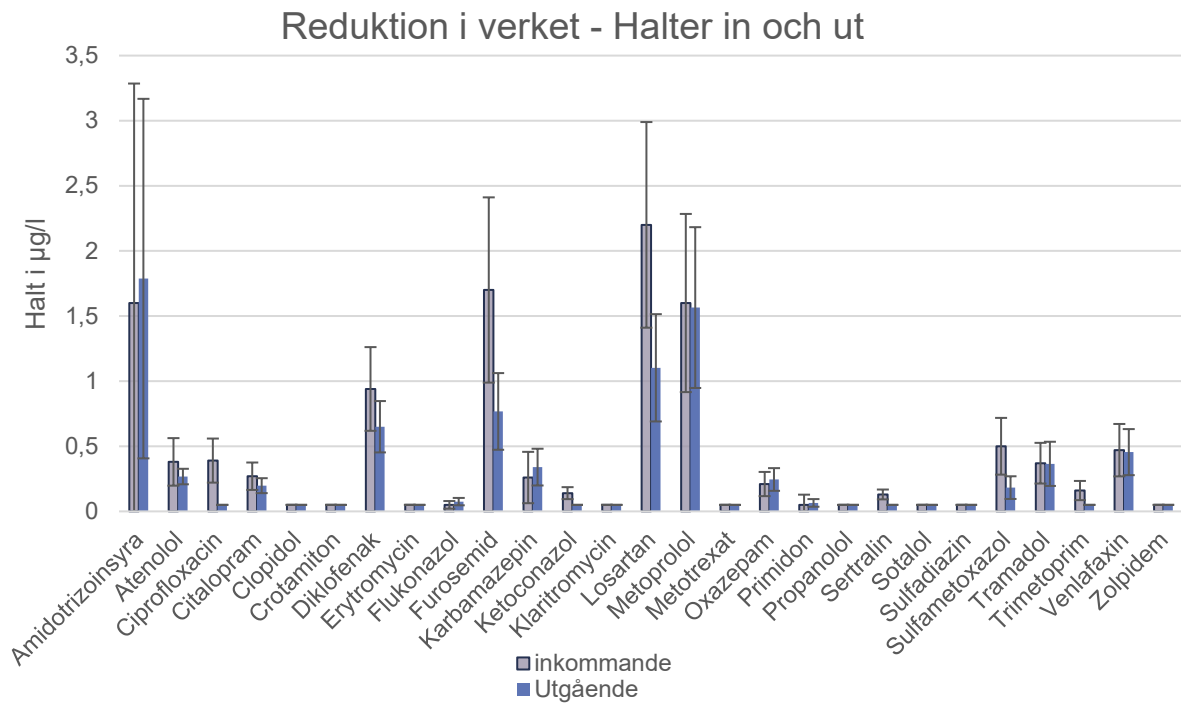
Reduktion av läkemedel - skillnader mellan inkommande och utgående vatten

För att undersöka hur reduktionen av läkemedelsrest ser ut över verket togs flödesproportionerliga veckoprover på inkommande och utgående vatten vid fyra tillfällen under vår/sommar 2021.

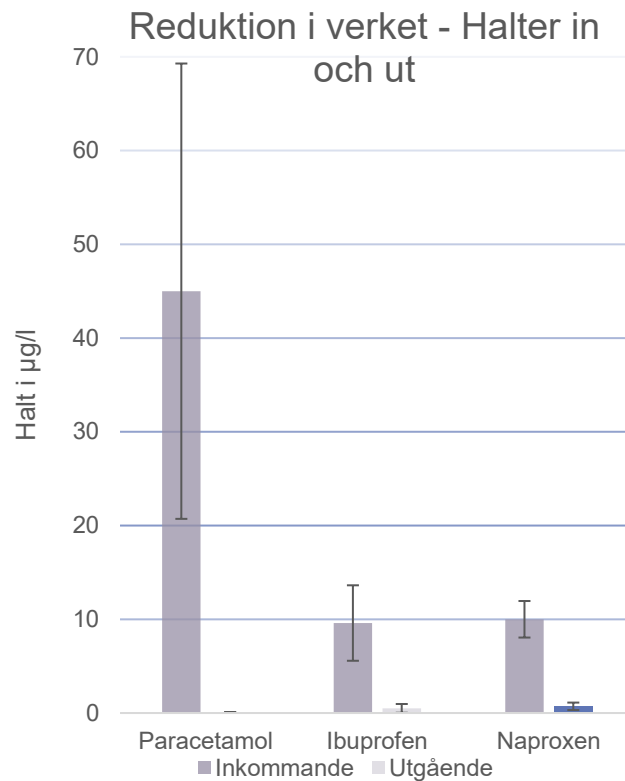
Dessa prover analyserades sedan av SGS Laboratories AB med avseende på 30 olika läkemedelssubstanser, vilket är detsamma som för senare prov under pilotprojektets gång.

Resultaten avvek inte så stort från det väntade utfallet. De substanser som återfanns i högst halt är receptfria smärtstillare och vanliga mediciner som ofta föreskrivs vid högt blodtryck och hjärtproblem. En något oväntad substans som uppmättes i relativt höga koncentrationer var amidotrizoinsyra, en substans som används som kontrastvätska vid röntgen av mag/tarmkanal. Denna

substans finns på EU:s bevakningslista för ämnen i grundvatten då det är svårnedbrytbart.



Figur 2 Inkommande och utgående halter. Diagrammet visar de ämnen som förekommer i lägre halt.



Figur 3 Inkommande och utgående Diagrammet visar de ämnen som förekommer i högre halter.

I diagrammen ovan visas de genomsnittliga halterna i inkommande och utgående vatten tillsammans med konfidensintervall (95%) för dessa medelvärden. Som man kan se finns det för de flesta ämnen en ganska stor variation i halterna. Då halter låg under detektionsgränsen antogs en halt på LOQ/2. Beräkningar av reduktionsgrad behandlas vidare i avsnitt 6.2.

Profilprovtagningar

Vid två tillfällen togs profilprovtagningar i verket. Dygnsprov togs då ut i fyra provpunkter. Förutom inkommande och utgående som beskrivits tidigare så togs även prov efter försedimenteringen samt efter biosteget. Här försköts provuttaget med ett dygn mellan de första två provpunkterna och de sista för att försöka få prov på "samma" vatten i så stor utsträckning som möjligt. Dock blandas vattnet om i biosteget så det var inte möjligt att få data från ett och samma pluggflöde.

Då det bara rörde sig om två tillfällen med provtagning så är det svårt att dra några långtgående slutsatser utifrån dessa värden då resultaten kan variera kraftigt mellan provtagningarna. Till exempel

var inkommande värden för paracetamol liknande, men halterna efter försedimentering skiljer sig med en faktor 10. Det man kan ta med sig från undersökningen är att reduktionen till största delen sker i biosteget.

1.6. Pilotförsöken

Pilotförsök med avancerad rening utfördes på plats på Lindholmens reningsverk för att kartlägga förekomsten av läkemedelsrester och hur de på bästa sätt kan renas bort från dagens utgående avloppsvatten. De numera alltmer beprövade teknikerna ozonering, filtrering genom granulerat aktiverat kol och tillsats av pulveriserat aktiverat kol kunde alla användas var för sig för att i medeltal ta bort 80% av de analyserade läkemedelsresterna från utgående avloppsvatten. God desinfektion av utgående avloppsvatten kunde uppnås med ozonering, ultrafilter och UV-ljus i fallande resultatordning.

1.7. Ekotoxikologiska tester

Biologiska tester utfördes i samband med pilotförsöken för att komplettera kemiska analyser och på så sätt fånga upp bristen på fullständig kemisk analys av samtliga kemiska ämnen både i dagens utgående och i avancerat renat avloppsvatten, där den avancerade reningen utgjordes av ozonering respektive granulerat aktiverat kol.

De biologiska testerna med zebrafisk och större dammsnäcka genomfördes under tre veckor på plats vid Lindholmens reningsverk och inkluderade studier av effekter på gennivå, beteende, samt reproduktion. Generellt sett sågs ingen betydande förbättring med avancerad rening. Kompletterande celltester utförda på lab påvisade inte heller någon betydande förbättring av avancerad rening, där förekomst av biologiskt aktiva ämnen kunde uppmätas även efter avancerad rening.

1.8. Recipientprovtagning och modellering

Norrtäljeviken utgör recipient för det renade avloppsvattnet från Lindholmens reningsverk. Norrtäljeviken är en del av Östersjön och genomströmmas framförallt av utgående vatten från Norrtäljeån och utbytesströmmar med Östersjön. Utspädningen av det renade avloppsvattnet är stor och vid fyra olika provtagningar kunde bara ett par ämnen detekteras och det i en punkt nära utsläppet.

Recipientmodelleringen visar att det är i några lokala vatten som belastas med enskilda avlopp och som sedan rinner till Norrtäljeviken som den största risken föreligger att uppnå effektkoncentrationer av läkemedelsrester.

1.9. Multikriterieanalys

Med syftet att utröna vilken läkemedelsreningsteknik som är den mest fördelaktiga lösningen för Lindholmens reningsverk genomfördes en multikriterieanalys. Utvalda och betydelsefulla parametrar för funktion, implementering och drift kompletterades och värderades av projektgruppen som även använde inarbetade lab- och pilotdata från försöken på Lindholmen. Dessutom gjordes kostnadsbedömningar av förutsättningarna på Lindholmen. GAC föll ut som huvudalternativ för Lindholmens reningsverk, tätt följd av ozonering.

1.10. Principförslag

Utifrån genomförda försök i pilotskala och en multikriterieanalys där passande tekniker jämfört har ett principförslag för framtida läkemedelsrening vid Lindholmens reningsverk utarbetats. Framtida läkemedelsrening kommer att utformas som en kolfilteranläggning med granulerat aktiverat kol (GAC).

Inom arbetet med principförslaget har underlagsdata tagits fram och en dimensionering utförts som grund till ett förslag till utformning av reningssteget, likväl har beräkningar av drift-, investerings- och totalkostnader utförts och redovisats.

2. Pilotförsök med aktiverat kol och ozonering

Syftet med pilotförsöken var att på plats i Norrtälje undersöka hur de främsta kandidaterna till reningstekniker för läkemedelsrester i avloppsvatten fungerar på utgående avloppsvatten. Resultaten användes för att tillsammans med andra förutsättningar och kriterier användas i en multikriterieanalys som syftade till att sälla fram den mest lämpade reningsteknik för implementering på Lindholmens reningsverk och bli föremål för utredning i ett principförslag.

2.1 Beskrivning pilotanläggning

En pilotanläggning med behandlingsenheter i form av förbehandling, läkemedelavskiljning med aktiverat kol respektive ozonering, samt olika efterbehandlingsåtgärder för ozonerat vatten sattes upp på Lindholmens reningsverk i september 2021 varefter försöken pågick i olika omfattningar t. o. m. 1 mars 2022.

Pilotanläggningen beskickades med ordinarie utgående, efterfållt avloppsvatten från reningsverket. Det i pilotanläggningen behandlade avloppsvattnet återfördes till utgående vatten, efter ordinarie provtagningspunkt.

Försöken kompletterades med ett nitrifikationssteg för att i första hand oxidera kvarvarande ammoniumkväve i utgående vatten från Lindholmens reningsverk och därmed säkra att de planerade exponeringsförsöken med zebrafisk och dammsnäckor, för att utvärdera de extra rena avloppsvattnets kvalitet, inte skulle störas av höga ammoniumhalter.

Fem parallella labfilter med granulerade aktiverade kol (GAC) installerades för att kunna utvärdera olika produkters kapacitet. Pilotanläggningen kompletterades med ultrafilter och UV-enhet för att utvärdera några olika desinfektionsmetoder för avloppsvatten. Därutöver utvärderades en tidig version av enzymfilter som potentiellt kommande alternativ för läkemedelsrening.

Pilotanläggningarna var till största delen inrymda i en isolerad 20-fots container, men vissa delar av ozoneringen placerades utomhus av plats- och säkerhetsskäl, figur 4.



Figur 4 Pilotanläggningen med nitrifikationstankar på taket och 5 m höga ozonkontaktkolonner. Akvariecontainern för fiskeexponering i förgrunden, eftersedimentering och Norrtäljeviken i bakgrunden.

2.2 Försöksupplägg

Pilotförsök med läkemedelsrening och tillhörande fisk- och snäckexponering genomfördes på Lindholmens reningsverk under hösten och vintern 2021-2022. De traditionella metoderna

ozonering och aktiverat kol samt en nykomling, enzymfilter, kördes kontinuerligt dygnet runt. Försöken förlöpte i stort sett bra, men fördröjdes och förlängdes pga leveransproblem av komponenter och aktiverat kol, huvudsakligen som en följd av Corona-pandemin. Pilotlinjerna drevs kontinuerligt med samma inställningar åtminstone för hela kalenderveckor. Kontinuerlig insamling av provvatten gjordes med slangpumpar, till förvaring i kylskåp. Ett urval från de insamlade veckoproven sändes till externt laboratorium för analys av läkemedelsrester. Veckoproven analyserades internt med avseende på TOC och DOC. Utöver detta gjordes mätningar av temperatur, konduktivitet, pH och UV-ljusabsorbans vid 254 nm, Hydrauliska flöden och nivåer mättes och registrerades för att bestämma uppehållstider, belastningar, doser och igensättningshastigheter mm. Resultaten utvärderades både löpande men framför allt efter avslutade försök.

2.3 Drift och observationer

Pilotanläggningen installerades och togs i drift under september 2021 och drevs med omfattande provtagning och analys fr o m vecka 38 år 2021 till vecka 9 år 2022. Försöksperioden representerade typiska driftveckor vid Lindholmens reningsverk, med en period med lite högre flöden, vilken inföll i slutet av försöken.

Förbehandlingsens sandfilter rullade på och backspolades för hand vid behov, upp till tre gånger per vecka. Trumfiltren gick kontinuerligt med automatisk spolning vid behov. Avskiljningen av suspenderad substans var 19% respektive 13% från en halt av i medeltal 12 respektive 14 mg/l.

Nitrifikationsfiltret kom snabbt igång och levererade ett utgående avloppsvatten med mindre än 1 mg ammoniumkväve per liter. I samband med dagar med en utetemperatur av -18°C frös tillloppsledningen, trots värmekabel och nitrifikationsfiltret togs ur bruk.

PAC-linjen beskickades kontinuerligt med en slangpump utan driftavbrott. PAC-slurryn som doserades kontinuerligt med slangpump satte igen ett par gånger under försöken pga ovanligt stora kolpartiklar. Dosen av PAC varierades mellan veckorna för att utvärdera erforderlig dos för att nå minst 80% avskiljning av utvalda läkemedelsrester.

GAC-filtret kördes kontinuerligt under totalt 26 veckor och backspolades med vatten under 30 minuter varannan till var tredje dag. Backspolhastigheten var låg, ca 13 m/h vatten, för att undvika förlust av GAC-korn till spolavloppet. Gångtiden var relativt lång mellan erforderliga backspolningar och kunde i GAC-filtret uppgå till 5 dagar. Ytbelastningen på filtret under nedströmsdrift var i snitt 2,3 m/h.

Ozoneringslinjen drabbades av ett ozongeneratorhaveri redan dag 2 av de skarpa försöken. När väl generatoren renoverats fungerade ozoneringen bra med kontinuerlig drift utan avbrott under försöksveckorna. Inga ozonläckor noterades och anläggningen slogs inte heller av automatiskt av ozondetektorerna i anläggningen. Ingen nämnvärd skumning förekom i ozoneringen, vare sig i gasuttaget i toppen av kontaktkolonnen eller i utgående vatten. Begränsad skumning noterades dock i samband med dos-responsförsöken och då i testerna med höga doser, 12 och 16 g O₃/m³.

2.4 Mät- och analysresultat

Utvärderingen av pilotförsöken gjordes huvudsakligen baserat på interna analyser av fysikalisk/kemiska parametrar och externa läkemedelsanalyser. Totalt analyserade tre olika lab 140 prover med avseende på läkemedelsanalyser. Internt analyserades 1175 prover från försöken med avseende på fysikalisk/kemiska parametrar och 350 TOC eller DOC analyser.

Avskiljningen av läkemedelsrester, eller reningsgraden, var i allmänhet god, mer än 80%, med aktiverat kol i antingen granulerad form (GAC) eller pulverform (PAC) respektive ozonering följt av sandfiltrering. Klassiska undantag var flukonazol som inte avskiljs så bra med ozonering respektive sulfametoxazol som inte avskiljs väl med aktiverat kol.

Antalet prover med detekterade halter av nonylfenol var för lågt för att dra några egentliga slutsatser. Med mycket hög ozondos reducerades nonylfenol med knappt 60%. Det enda provet med detekterade halter för nonylfenol för vid GAC-filtrering visade negativ avskiljning.

Elva utvalda PFAS substanser reducerades med ca 30% med GAC-filtrering, men med ozonering ökade halterna upp till 150%, speciellt pga ökning av 6:2 FTS, (fluortelomer-sulfonsyra).

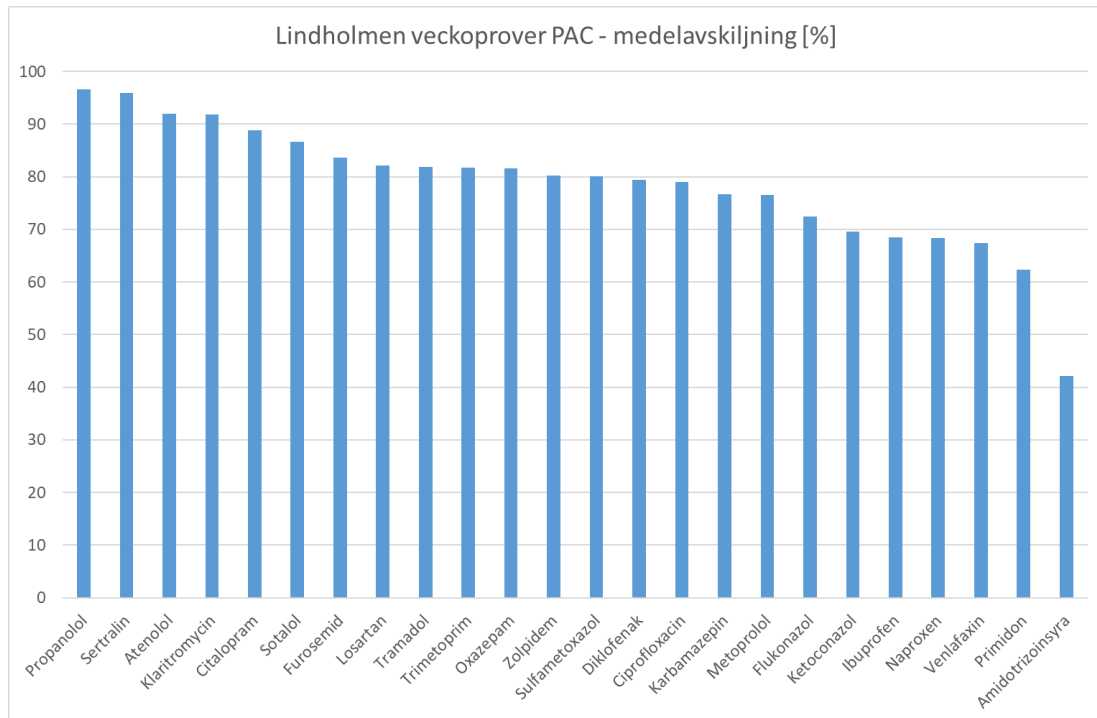
PFOS ökade 25-45 % efter ozonering, men minskade med 80 % efter GAC-filtrering. PFOA påverkades inte av ozonering och reducerades med knappt 70 % med GAC.

Bromidhalten var låg, under detektionsgränsen 1 mg/l i samtliga prov. Bromathalten låg som förväntat under detektionsgränsen för reguljärt utgående avloppsvatten, men i ett av de tagna proven på ozonerat vatten var bromathalten 40 µg/l, vilket är högre än gränsvärdet för bromat i dricksvatten. Värdet understiger dock rekommendationen/föreslag till miljö kvalitetsnormen 50 µg bromat/l. Orsaken till det höga värdet var en stresstest i samband med ett dos-responsförsök, där ozondosen var så hög, 16 gO₃/m³, så att medelavskiljningen av läkemedelsrester nådde 94%.

2.5 Aktiverat kol – PAC

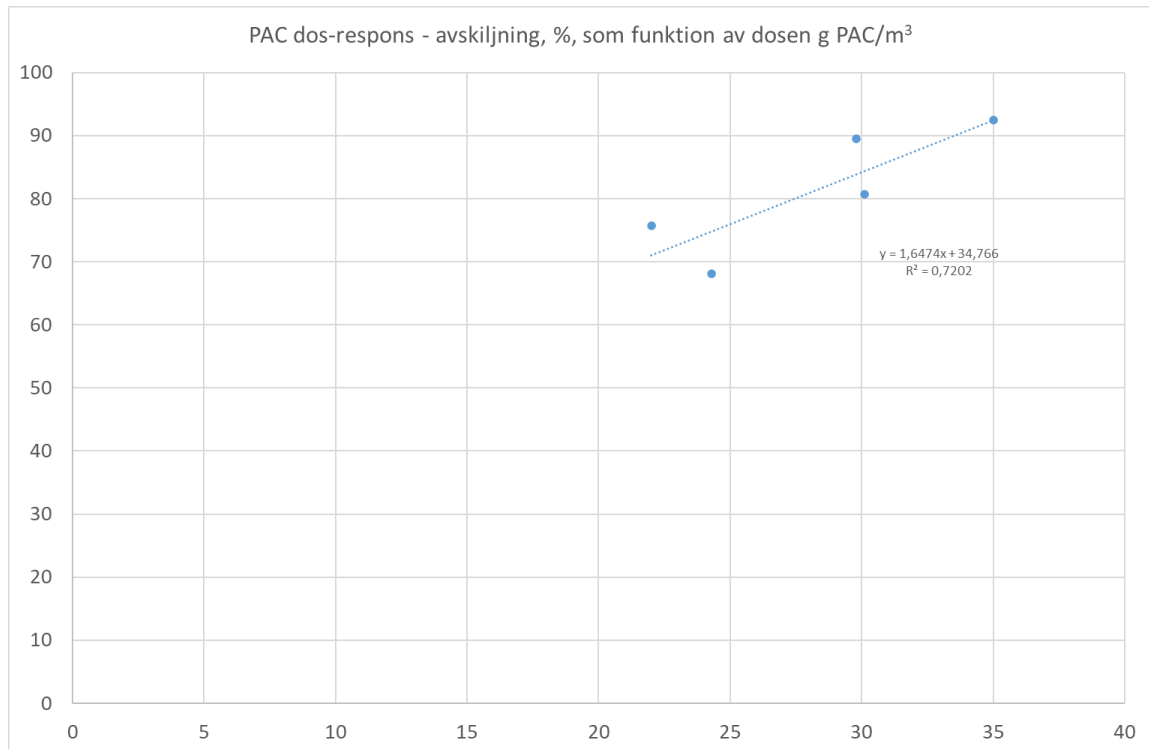
Det aktiva kol som föll bäst ut i satsvisa labtester var Jacobi Aquasorb 5000P som sedan testades i pilotlinjen.

Den genomsnittliga avskiljningen under de kontinuerliga pilotkörningarna låg på 79%, undantaget amidotrizoinsyra, som avskiljs till 42% i medeltal, var den genomsnittliga avskiljningen 80% i PAC-linjen. Den genomsnittliga reduktionsgraden för varje detekterad läkemedelssubstans varierade, mellan 97% och 42%, figur 5.



Figur 5 Lindholmen, veckoprover från PAC-linjen dvs PAC-behandlat vatten efter sandfilter - medelavskiljning (%)

Under försöken kördes PAC-linjen kontinuerlig genom att pumpa förbehandlat utgående avloppsvatten till linjen dygnet runt. En kolslurry bereddes och fylldes på så att den alltid doserades kontinuerligt till avloppsvattnet i PAC-linjen. PAC-dosen varierade något mellan veckorna så att en dimensionerade PAC-dos för en viss avskiljningsgrad skulle kunna fastställas, figur 6.



Figur 6 Avskiljning av läkemedelsrester på Lindholmen vid olika dosering av PAC under kontinuerliga försök – medelvärde av 30 ämnen i veckoprover.

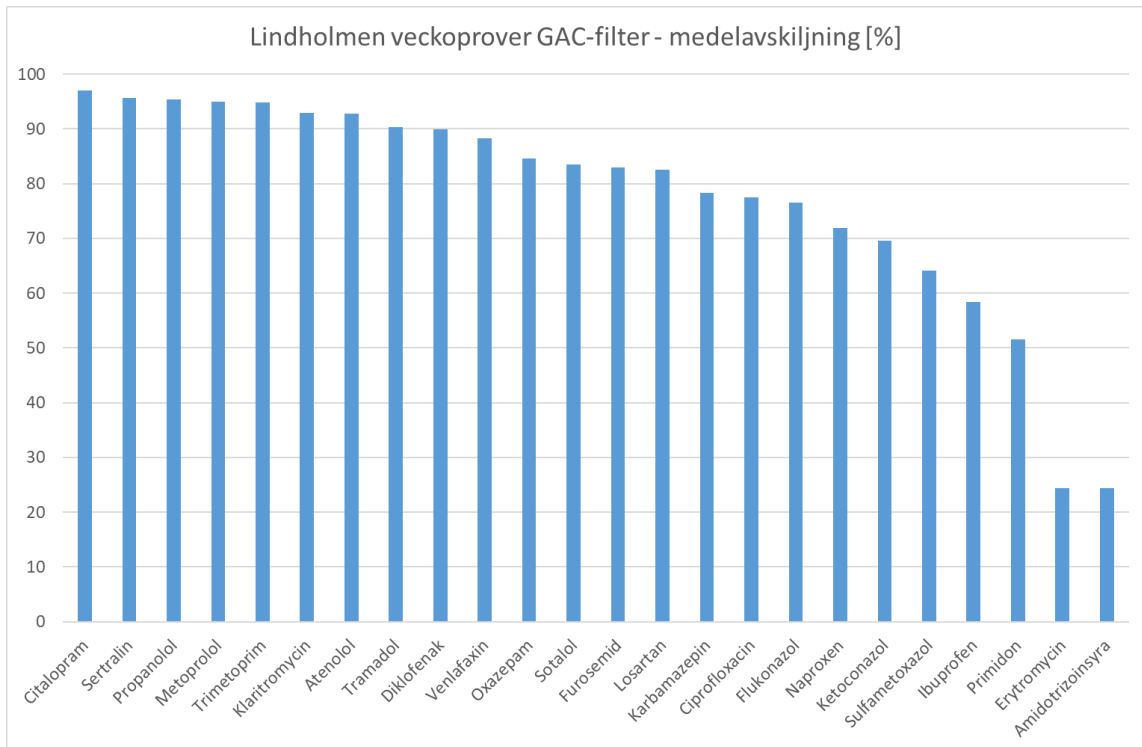
Försöken med pulveriserat aktiverat kol, PAC, visade att en PAC-dos av 27 g/m³ erfordrades för att uppnå 80 % avskiljning medan 33 g/m³ var tvunget att doseras för att uppnå 90 % avskiljning.

PAC-linjen sänkte TOC-halten med ca 3 mg C/l genom adsorption av organiskt material till kolet och partikelavskiljning i sandfiltret i PAC-linjen.

2.6 Aktiverat kol – GAC

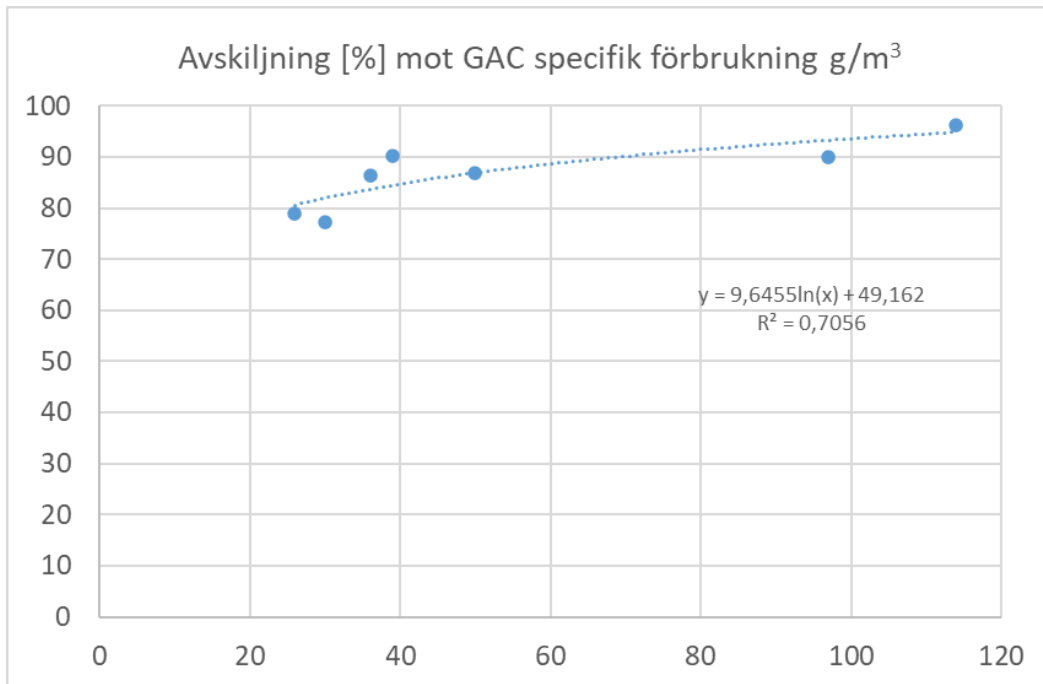
Det aktiva kol som föll bäst ut i både satsvisa och kontinuerliga labtester var Jacobi Aquasorb 5000 och det var den typen som testades i piloten för GAC och som också rekommenderas för fullskala.

Den genomsnittliga avskiljningen under de kontinuerliga pilotkörningarna låg på 80%, undantaget amidotrizoinsyra, som avskiljs till 24% i medeltal, var den genomsnittliga avskiljningen 82% i GAC-filtret. Den genomsnittliga reduktionsgraden för varje detekterad läkemedelssubstans varierade, mellan 97% och 24%, figur 7.



Figur 7 Lindholmen veckoprover från GAC-filtret dvs ozonerat vatten efter sandfilter - medelavskiljning (%)

Under försöken kördes GAC-filtret kontinuerlig genom att pumpa förbehandlat utgående avloppsvatten till filtret dygnet runt. I takt med att filtret behandlat allt mer avloppsvatten sjunker den beräknade specifika förbrukningen av det i filter en gång laddade kolet. Genom att jämföra behandlingsresultatet med den beräknade specifika kolbelastningen, dvs hur mycket kol som kommer ha förbrukats per behandlad kubikmeter avloppsvatten, kan den successiva mättnaden på kolytorna indirekt följas och därmed den minskande avskiljningen av läkemedelsrester, figur 8. Den slutliga förbrukningssiffran av kol kan beräknas när kolet byts ut.



Figur 8 Avskiljning av läkemedelsrester på Lindholmen vid olika kolförbrukning – medelvärde av 30 ämnen.

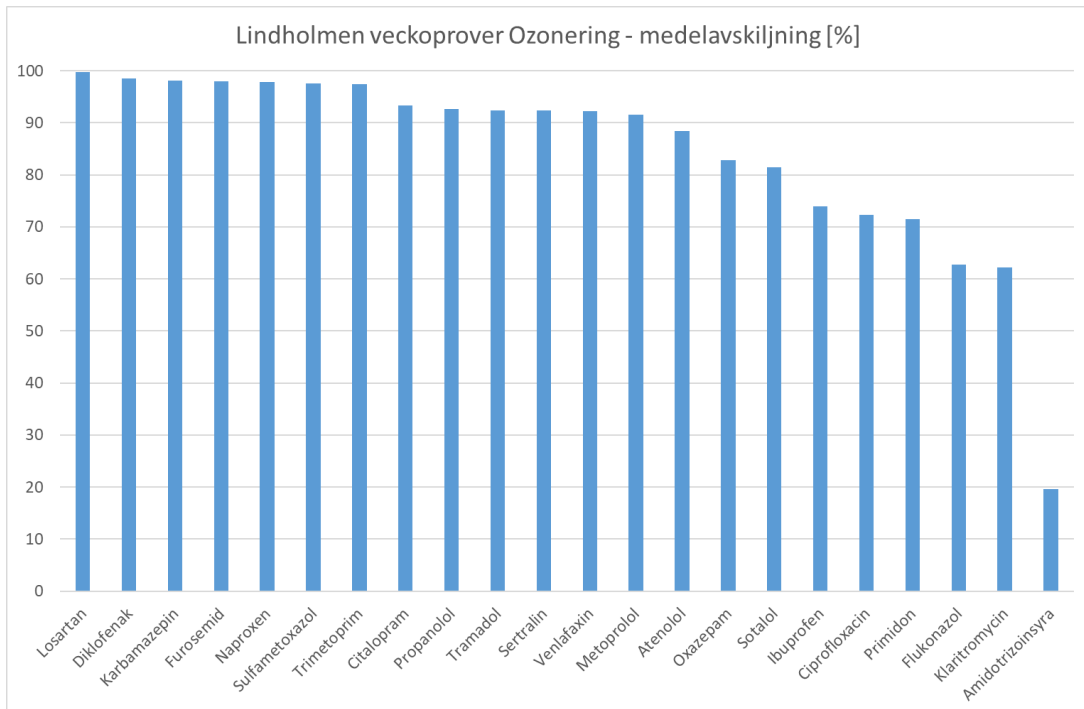
Avskiljningen av TOC över GAC-filtret sjönk från 8 mg/l till 2 mg/l efter sex veckors drift, motsvarade 2900 bäddvolymmer (BV).

Förbrukningen av GAC för att uppnå 80% avskiljning uppgick till (25)-30 g/m³, för att nå 90% avskiljning måste kolet bytas efter motsvarande 67 g/m³.

2.7 Ozonering

På Lindholmen utfördes både kontinuerliga försök i lab- och pilotskala samt satsvisa försök i pilotskala för att i den senare fallet studera dos-respons för läkemedelsavskiljning och desinfektion.

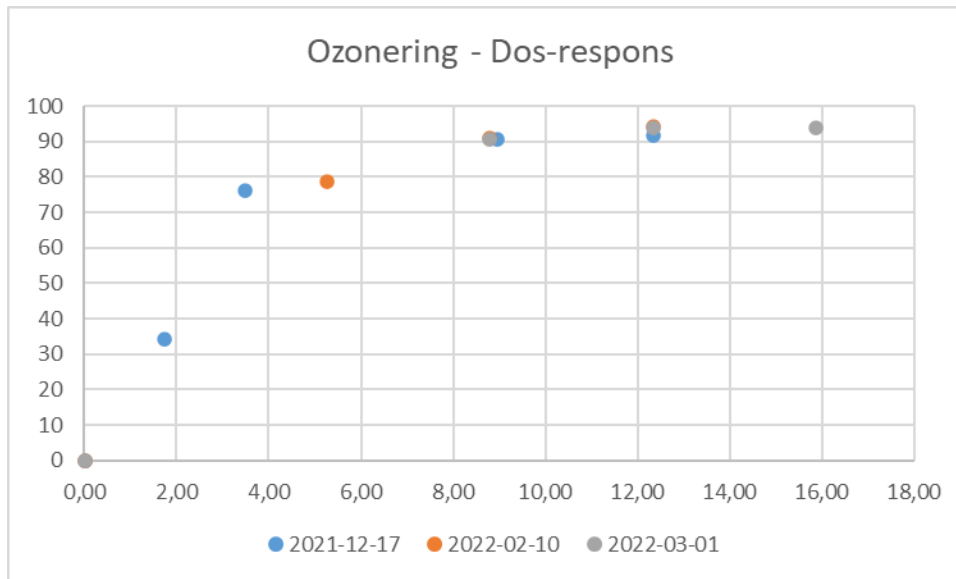
Den genomsnittliga avskiljningen under de kontinuerliga pilotkörningarna låg på 84%, undantaget amidotrizoinsyra, som avskiljs till 20% i medeltal, var den genomsnittliga avskiljningen 87% i ozoneringslinjen. Den genomsnittliga reduktionsgraden för varje detekterad läkemedelssubstans varierade, mellan 99,8% och 20%, figur 9.



Figur 9 Lindholmen veckoprover från ozoneringslinjen dvs ozonerat vatten efter sandfilter - medelavskiljning (%)

Dos-responsförsök genomfördes genom att variera den tillförda mängden ozon till ett konstant avloppsvattenflöde för att hålla en konstant uppehållstid av 20 minuter i kontaktkolonnen.

Avskiljningsgraden ökar inte linjärt med en ökad dos utan dosen behöver i princip tredubblas för att gå från 80% till 90% reduktion figur 10.



Figur 10 Dos-responsförsök genomsnittlig avskiljningsgrad vid olika ozondoser i Lindholmen.

Dos-responsförsöken visade att statistiskt sett erfordras en ozondos av 7 g O₃/m³ motsvarande 0,73 g O₃/g DOC, vilket bekräftas av de kontinuerliga körningarna.

Ozoneringens påverkan på TOC-halten varierade, men minskningen låg i genomsnitt på 1,5 mg C/l under alla försöksveckor.

2.8 Sammanfattning av pilotförsöken

Resultaten bedöms vara relevanta för dimensionering av ett läkemedelsreningssteg som det presenteras i ett principförslag. Utvärderingen visar att avskiljningen av kvarvarande läkemedelsrester i reguljärt utgående vatten kan uppgå till 95% med granulerat aktiverat kol (GAC) och 90 % med ozonering. Ett framtida reningskrav för läkemedelsrester kan formuleras på många sätt såsom att kräva att en grupp utvalde och relevanta läkemedelsrester avskiljs till 80%. Förbrukningen av GAC för att uppnå denna avskiljning uppgick till 30 g/m³, medan ozonering kräver en ozondos av 7 g O₃/m³ motsvarande 0,73 g O₃/g DOC. Nitrifikationssteget av typen MBBR hade begränsad avskiljning av läkemedelsrester, ca 17 %, men steget var i första hand installerat för att nitrifiera utgående vatten och effekten på läkemedelsrester mättes som en bonus.

Försöken med pulveriserat aktiverat kol, PAC, visade att en PAC-dos av 27 g/m³ erfordrades för att uppnå 80 % avskiljning medan 33 g/m³ var tvunget att doseras för att uppnå 90 % avskiljning.

Utvärderingen av ozoneringen med sina två olika parallella efterbehandlingssteg visade att förlängd efterreaktionstid i uppehållsvolymer med 5 timmar, gav mindre reningseffekt än sandfiltrering mätt som UV 254 nm.

Enzymfiltren nådde som bäst 50% avskiljning och behöver utvecklas vidare, vilket den slutliga och sent tillfrågade leverantören påtalade redan vid överenskommelsen om att få testa enzymfiltren.

Desinfektionsförsöken visade på lovande resultat där god desinfektion är fullt möjlig för en rad mikrobiella indikatororganismer. Ozonering uppvisade bäst resultat och störst bredd att ta bort virus, bakterier, svampar och patogener. Ozon följdes av ultrafilter och därefter UV-ljus. Ett desinficerat avloppsvatten möjliggör återbruk och kan fungera bra för att skapa en periodvis uppdämd gäddfabrik vilken andra perioder också skulle fungera som betesmark!

3. Ekotoxikologiska tester – Exponeringsförsök i fält

3.1. Upplägg/beskrivning

Syftet med denna studie var att med biologiska tester utvärdera dagens situation samt två olika reningsmetoder för läkemedelsrening vid Lindholmens reningsverk, Norrtälje. De biologiska tester som ingick i denna studie baserades på ekotoxikologiska tester från två olika trofiska nivåer för att representera vattenlevande organismer i det mottagande akvatiska ekosystemet, samt ett batteri av cellbaserade in vitro-tester som detekterar specifika biologiska receptorbindningsaktiviteter. De ekotoxikologiska testerna bestod av in vivo-tester med zebrafisk och dammsnäcka, där effekter på gen-, organism- och populationsnivå utvärderades. Zebrafisk (*Danio rerio*) är en av de vanligaste arterna av fiskar som används för toxikologiska tester. Till skillnad från inhemska svenska fiskarter som reproducerar sig en gång per år reproducerar sig zebrafisk flera gånger i veckan. Från grupper av lekande zebrafisk kan därmed reproduktionsutfallet studeras dagligen. Större dammsnäcka (*Lymnaea stagnalis*) är ett

ryggradslöst blötdjur (mollusk) som är vanligt förekommande i vattensystem i Europa, Asien och Amerika, dvs en väldigt relevant ekologisk art för svenska vattenmiljöer där den förekommer framförallt i södra och mellersta Sverige. In vivo-testerna med zebrafisk och dammsnäcka utfördes på Lindholmens reningsverk i en labutrustad försökscontainer och cell-testerna utfördes på lab vid Institutionen för biomedicin och veterinär folkhälsovetenskap (BVF), SLU, Uppsala.

3.2. Exponeringsfaciliteten

Fisk- och snäckexponeringar utfördes i en inredd 10 fots container (Fig.11). Fyra parallella linjer förbereddes och belastades kontinuerligt med fyra olika försöksvatten: referensvatten som utgjordes av utgående avloppsvatten från Lindholmens reningsverk (UT); UT-vatten behandlat med granulerat aktivt kol (GAC), respektive UT-vatten behandlat med ozon + sandfiltrering (OZ), samt aktivkolfilterat kranvatten (KV) som utgjorde kontrollvatten. Alla försöksvatten tillfördes var sin 60-l fördelningstunna som fungerade som utjämningsstankar i containern. Luft tillfördes de behandlade vattnen i fördelningstunnorna för att dels driva av eventuellt restozon och övermättnad av syrgas, dels för att lufta upp utgående respektive kolfilterat avloppsvatten för att säkerställa att syrebrist inte påverkade organismer i försöken. Anläggningen var värmeisolerad och möjlighet fanns till uppvärmning, kylning och hög luftomsättning. Temperaturen loggades i inom- och utomhusluft, i fördelningstankarna för akvarierna och i varje enskilt akvarium.



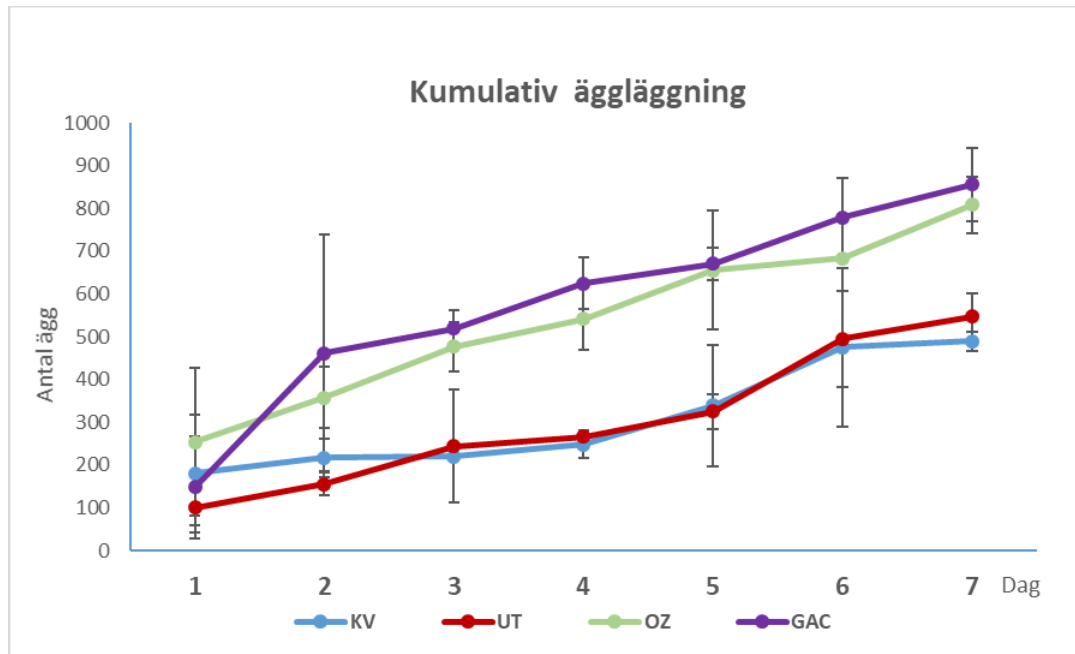
Figur 11 Foton visande försöksanläggning för zebrafisk och dammsnäckor. Försöken utfördes i inredd exponeringscontainer (vänster). Fördelningstunnor för försöksvatten med fiskakvarier under (mitten). Glaskärl för exponering av dammsnäckor (höger).

3.3. Zebrafisk (*Danio rerio*)

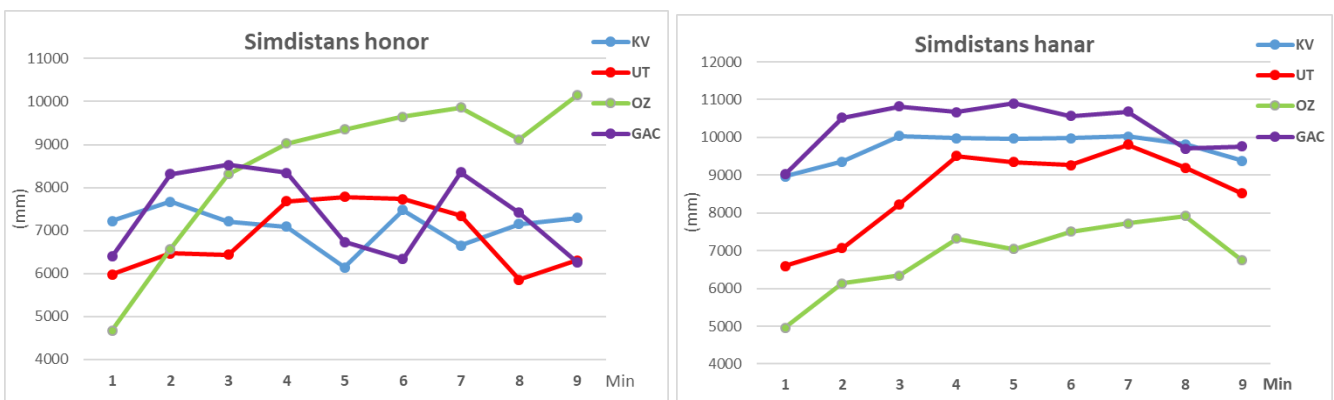
Den experimentella designen utgjordes av fyra försöksvatten med tre 60-l replikat-akvarier vardera, där grupper av vuxen zebrafisk exponerades kontinuerligt under tre veckor i december 2021. Försöksuppställningen bestod sammanlagt av 12 akvarier med 10 zebrafiskar (5 honor+5 hanar) vardera vid start. Försöksvatten från de fyra fördelningsplasttunnorna leddes genom självtryck till akvarierna med en omsättning av totalvolymen i akvarierna av 2,5-3 ggr/dygn. Vid start av tredje exponeringsveckan placerades zebrafiskarna i rostfria nätburar för studier av reproduktionsutfall. Under nätburarna placerades glasformar för att samla upp äggen. Reproduktionsutfallet studerades dagligen under en vecka. Äggen räknades och undersöktes i stereomikroskop och klassificerades som befruktade eller obefruktade. Reproduktionsförsöket med zebrafisk utfördes med utgångspunkt från en standardiserad metod (OECD TG 229). Efter tre veckors exponering i försöksvatten videofilmades fiskarna för studier av simbeteende innan de provtogs. Simbeteende utvärderades hos alla enskilda fiskar under 10 minuter. Efter videofilmning provtogs fiskarna avseende vikt och längd, med beräkning av kroppsindex (Body Condition Factor - BCF; $\text{vikt (g)} / (\text{längd (cm)}^3) * 100$). Lever provtogs för analys av genuttryck. Kroppen fixerades sedan i formalin för histologiska studier av reproduktiv mognadsgrad av gonader.

Resultaten från studien med zebrafisk visade att alla honor och hanar var fullt köns mogna. Ingen mortalitet förekom i försöket. Ingen skillnad förelåg gällande kroppsvikt, kroppslängd eller beräknat kroppsindex (vikt-längd-förhållande). Reproduktionsstudien under tredje exponeringsveckan visade på fler lagda ägg per hona i OZ och GAC jämfört med UT och KV, men utan statistisk skillnad (Fig. 12). Ingen skillnad avseende uppmätt total simdistans förelåg mellan försöksgrupperna. Simbeteende över försökstid hos OZ skiljde sig från de andra försöksgrupperna, där även honor och hanar uppvisade olika simbeteende i denna

grupp (Fig. 13). Gällande genutryck sågs skillnad i metallmetabolism (metallotionein) hos KV jämfört de andra grupperna.



Figur 12 Kumulativ äggläggning av befruktade ägg hos zebrafisk kontinuerligt exponerade för olika försöksvatten under tre veckor. Data visar medelvärde + standardavvikelse av kumulativ äggläggning hos tre replikat per försöksvatten över sju dagars reproduktion. KV= Kranvatten, UT= Utgående avloppsvatten, OZ= Ozonbehandlat UT, GAC= UT filtrerat genom granulerat aktivt kol.

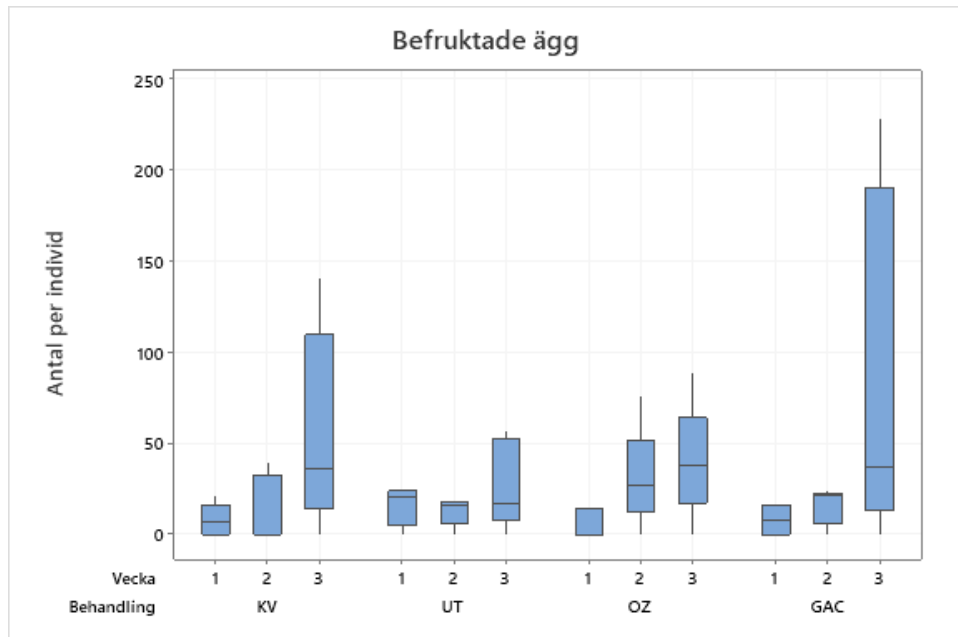


Figur 13 Simbetende hos honor (vänster) och hanar (höger) av zebrafisk exponerade för olika försöksvatten. Data visar medelvärden av simdistans (punkter) under nio minuters beteendestudie efter tre veckors kontinuerlig exponering. KV=Kranvatten, UT= Utgående avloppsvatten, OZ=ozonbehandlat UT, GAC= UT filtrerat genom granulerat aktivt kol.

3.4. Dammsnäcka (*Lymnaea stagnalis*)

Reproduktionsförsöket med snäckor utfördes med utgångspunkt från en standardiserad metod (OECD TG243) med vuxna snäckor av arten stor dammsnäcka. Vatten pumpades kontinuerligt från de respektive fördelningstunnorna via en peristaltisk slangpump med 20 separata slangar till vardera av 20st 1-l glaskärl med en vattenvolym av 0,7 l och dygnsomsättning av ca. 3 ggr/dygn. För varje försöksvatten (KV, UT, OZ och GAC) pumpades vatten till fem kärl innehållande fem snäckor vardera. Snäckorna exponerades under tre veckor. Dag 7, 14 och 21 samlades lagda äggkokonger in i Petriskålar. Antal äggkokonger från vardera kärl, samt antal bra och defekta ägg i varje äggkokong räknades med hjälp av en stereolupp. Reproduktionsutfallet normaliserades och uttrycktes per antal levande individer vid lektillfället. Vid dag 21 sövdes snäckorna varpå de vägdes och mättes och beräknades BCF. Lever provtogs för analys av genuttryck.

Resultaten från studien med dammsnäcka visade mortalitet i alla exponeringsgrupper, med statistiskt högre mortalitet i GAC jämfört med KV, däremot inte jämfört med UT och OZ. Ingen skillnad förelåg gällande kroppsvikt, kroppslängd eller BCF. Det förelåg inga skillnader i antalet lagda ägg, antal befruktade ägg eller antalet lagda kokonger mellan grupperna (Fig. 14). Det var heller ingen skillnad i andel defekta ägg. Däremot ökade äggläggningen i alla grupper ju längre försöket pågick. Cyp3a som indikerar avgiftningsmetabolism var signifikant lägre uttryckt i GAC-gruppen jämfört med de andra grupperna. Nr3d som indikerar uttryck för en hormonreceptor var lägre uttryckt i alla de olika avloppsvattnen jämfört med i kranvattengruppen. Gpx som är ett enzym som är involverat vid oxidativ stress hade högre uttryck i snäckor i OZ-gruppen än i GAC-gruppen. Däremot skiljde de sig inte från snäckor i KV- eller UT-grupperna.



Figur 14 Antal befruktade ägg/individ per vecka hos dammsnäckor under tre veckors kontinuerlig exponering för olika försöksvatten. Data visar spridningen inom fem replikat av de vardera behandlingsgrupperna. KV=Kranvatten, UT=Utgående avloppsvatten, OZ= Ozonbehandlat UT, GAC= UT filtrerat genom granulerat aktivt kol.

3.5. Celltester

Vattenprover tagna som samlingsprov under en vecka från de fyra försöksvattnen KV, UT, OZ och GAC, samt även PAC (pulvriserat aktivt kol) analyserades med effektbaserade metoder baserade på odlade celler som modifierats så att specifika toxiska effekter kan mätas. Vatten från UT och KV analyserades även vid senare tillfälle beroende på aktivitet i kranvatten. I denna studie studerades förekomsten av ämnen som kan aktivera östrogenreceptorn (ER), androgenreceptorn (AR), arylhydrokarbonreceptorn (AhR) samt orsaka oxidativ stress (Nrf2). Försöksvattnen koncentrerades 5000 gånger med hjälp av fastfasextraktion och späddes sedan 100 gånger eller mer med cellmedium vid den effektbaserade analysen. Den slutliga koncentrationsfaktor som testats var som högst 50 gånger högre än ett okoncentrerat vattenprov. Provet analyserades därefter i spädningsserier om minst fyra koncentrationer för respektive analys. Resultaten användes för att beräkna bioekvivalenta koncentrationer (bioequivalent concentrations, BEQ). BEQ-värdet beskriver den observerade effekten uttryckt som en koncentration motsvarande en referenskemikalie, som analyserades samtidigt. Referenskemikalierna som användes var 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxin (TCDD) för att mäta AhR-aktivitet, 17 β -estradiol (E2) för ER-aktivitet, dihydrotestosteron (DHT) för AR-

aktivitet, hydroxyflutamid (OHF) för anti-AR-aktivitet och tertiär butylhydrokinon (tBHQ) för Nrf2 (oxidativ stress).

Resultaten från celltesterna av vattenprover tagna under försöksperioden för fisk och snäckor visade på relativt hög AR-aktivitet i samtliga prover utom KV, och de olika behandlingarna av vattnet verkade inte påverka AR-aktiviteten (Tabell 1). Blockering av androgenreceptorn (anti-AR-aktivitet) uppmättes endast i UT vid den upprepade provtagningen och då mycket nära detektionsgränsen. Nrf2-aktivitet (oxidativ stress) uppmättes i samtliga prover, förutom efter GAC-behandling. Aktivering av Ah-receptorn uppmättes i samtliga prover i relativt hög omfattning. För östrogen aktivitet (ER-aktivitet) uppmättes relativt låga aktiviteter vid första provtagningen, medan upprepat prov av UT hade en högre ER-aktivitet om 1810 pg östradiolekvivalenter per liter. Analyserna indikerar, medräknat utspädningsfaktor till recipienten, att östrogeniciteten i UT kan resultera i överskriden åtgärdsnivå för östradiol till recipienten.

Tabell 1 Uppmätta aktiviteter i celltester av olika försöksvatten. Översta tabellvärden analyserade i vattenprover tagna under försöksperioden för fisk och snäckor. Nedre tabell, extra provtagning vid senare tillfälle.

	AR	anti-AR	ER	Nrf2	AhR
Prov	DHT-ekv. pg/L	OHF-ekv. µg/L	E2-ekv. pg/L	tBHQ-ekv. µg/L	TCDD-ekv. pg/L
KV	inaktiv	inaktiv	156	22	1763
UT	1053	inaktiv	155	16	11823
OZ	1812	inaktiv	325	13	7739
GAC	1792	inaktiv	200	inaktiv	6313
PAC	1929	inaktiv	478	4	4555
LOD	247	0,007	17	4	518
	(pg DHT/L)	(µg OHF/L)	(pg E2/L)	µg tBHQ/L)	(pg TCDD/L)

	AR	anti-AR	ER	Nrf2	AhR
Prov	DHT-ekv. pg/L	OHF-ekv. µg/L	E2-ekv. pg/L	tBHQ-ekv. µg/L	TCDD-ekv. pg/L
KV	inaktiv	inaktiv	100	11	378
UT	inaktiv	0,069	1810	22	2280
LOD	29	0,069	12	5	117
	(pg DHT/L)	(µg OHF/L)	(pg E2/L)	µg tBHQ/L)	(pg TCDD/L)

3.6. Sammanfattning

- De biologiska undersökningarna visade att både fiskar och snäckor generellt uppvisade god hälsa och normal reproduktion i UT och att detta inte förändrades med avancerad rening i form av OZ eller GAC. Det fanns dock tendenser till förhöjd reproduktion hos zebrafiskar både i OZ- och GAC-grupperna.
- Hos zebrafisk exponerade för OZ observerades påverkan på simbeteende hos både honor och hanar. Orsaken är okänd. Givet utspädningsfaktorn till recipienten är det troligt att detta inte kommer att påverka organismer i recipienten.
- Med celltesterna kunde ingen tydlig förbättring påvisas av avancerad rening av UT, snarare tvärtom gällande östrogen- och androgen aktivitet. De uppmätta läkemedlen reduceras med avancerad rening varför orsaken till detta troligen är andra icke-analyserade ämnen.
- Hos zebrafisk påvisades ett högre uttryck av metallmetabolism i KV. Även celltesterna påvisade att kranvattnet innehåller östrogena-, dioxinliknande-, samt reaktiva ämnen. Fortsatta undersökningar av kranvatten rekommenderas för att säkerställa orsaksämnen.
- För flertalet läkemedel uppmätta i nuvarande utgående avloppsvatten (UT) indikerar PNEC-värdet inberäknat utspädningsfaktorn att det kan föreligga risk för negativ påverkan på vattenlevande organismer i recipienten.

Sammantaget ses generellt svaga resultat avseende biologiska effekter i denna studie, både gällande negativa och positiva effekter i alla av de tre olika biologiska modellerna som användes. Givet den relativt höga utspädningsfaktorn kan det antas att även den akuta miljörisken för vattenlevande organismer i recipienten är låg, med undantag för vissa uppmätta läkemedel. I denna studie ges inga svar på långtidseffekter av kronisk exponering för blandningar av läkemedel och andra kemikalier i avloppsvatten. Populationer av vattenlevande organismer som lever hela eller delar av sitt liv i recipienten till reningsverket är kroniskt exponerade varför långtidseffekter är högst relevanta. Vissa läkemedel och andra kemikalier kan bioackumuleras i vävnad hos organismer vilket kan ge negativa hälsoeffekter senare i livet. Återkommande studier av läkemedelsinnehåll, både i vatten och vattenlevande organismer,

tillsammans med mätning av hälsoparametrar i vattenlevande organismer från recipienten är av hög relevans. Detta är av speciell vikt vid införande av avancerade reningstekniker för läkemedelsreducering vid Lindholmens reningsverk för att kunna följa upp vattenförbättrande åtgärder.

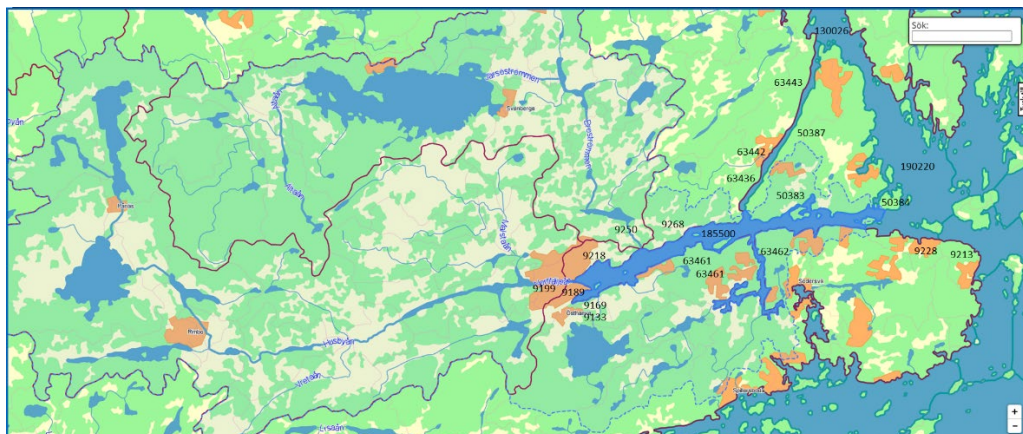
4. Recipientprovtagning och modellering

4.1 Norrtäljeviken

Norrtäljeviken utgör recipient för det renade avloppsvattnet från Lindholmens reningsverk och den är en del av Östersjön som dessutom genomströmmas av utgående vatten från Norrtäljeån, Broströmmen och några andra mindre vattendrag. Flera andra, mindre reningsverk släpper ut sitt renade avloppsvatten till Norrtäljeviken som också belastas renat avloppsvatten från enskilda avloppsanläggningar – enskilda avlopp.

Utspädningen av det renade avloppsvattnet är stor, beräkningsmässigt mellan 6-1200 gånger beroende på flödet i Norrtäljeån, vattenutbytet med Östersjön och den lokal avrinningen från land.

Data från SMHI användes för att räkna med de flöden som förekommer i Norrtäljevikens avrinningsområden, figur 15.



Figur 15 Avrinningsområden till Norrtäljeviken

Avrinningsområdena till Norrtäljeån, där flera av NVAA:s reningsverk ligger, summerades till ett stort avrinningsområde och utflödet från Norrtäljeån betraktas som en punktkälla, precis som utloppet från Lindholmens reningsverk och Broströmmen.

4.2 Provtagningsprogram

Ett provtagningsprogram sattes samman för att täcka de olika yt- och i vissa fall bottenvatten i Norrtäljeviken, men även de största tillflödena: Norrtäljeån, Broströmmen och utgående avloppsvatten från Lindholmens reningsverk, figur 16.



Figur 16 Provtagningspunkter i Norrtäljeviken

Provtagning utfördes vid fyra tillfällen av Naturvatten i Roslagen AB. Proverna analyserades internt i projektet med avseende på konduktivitet och pH samt externt med avseende på 30 utvalda läkemedelsrester enligt SGS Analytic:s recipientpaket FARMNS.

4.3 PEC, MEC och PNEC-värden

Ett sätt att bedöma risken för påverkan av läkemedelsrester och andra ämnen på vatten-levande organismer är att beräkna kvoten mellan antingen beräknad eller uppmätt läkemedelshalt i vattnet och den maximala koncentration av samma substans som i vetenskapliga studier inte visat sig ha effekter på någon av de testade organismerna. Den beräknade kvoten betecknas PEC/PNEC i det fall en beräknad läkemedelskoncentration har använts och MEC/PNEC i det fall uppmätt koncentration funnits tillgänglig för det aktuella vattnet. En säkrare bedömning av den toxikologiska risken i vatten kan göras om analysresultat av ämnet finns tillgängligt så att riskkvoten MEC/PNEC kan beräknas.

PEC är en förkortning för engelskans Predicted Environmental Concentration och PNEC utläses Predicted No Effect Concentration. MEC står för Measured Environmental Concentration.

Den känsligaste organismens respons i olika vetenskapliga standardtester för toxicitet sätter PNEC-värdet för substansen och en säkerhetsfaktor mellan 10 och 1000 används beroende på vilket typ av vatten som avses och hur många organismer som har studerats.

PNEC-värdena hämtades från litteratursökningar. Det är svårt att hitta PNEC för alla substanser trots allt fler tillgängliga databaser. I vissa fall har PNEC-värdet skattats via NOEC - No Observed Effect Concentration -och då användes en säkerhetsfaktor 1000 för marint vatten.

I vissa fall finns en stor spridning i PNEC-värden mellan olika studier. Det mest bekymmersamma ämnet i vår lista kan vara citalopram som redovisas med stor spridning och där det lägsta PNEC-värdet är i nivå med PNEC för könshormoner. I denna utvärdering väljer vi att räkna på mer konservativa värden i väntan på fler studier av citalopram.

Tabell 2 Beräknade riskkvoter, PEC/PNEC, medelvärden för dagens utgående avloppsvatten (MEC/PNEC), ett framtida avancerat renat avloppsvatten, dagens utgående avloppsvatten utspätt i recipienten med enbart åvatten eller utspätt med åvatten och vattenutbyte i Norrtäljeviken.

PEC/PNEC	Dagens utgående	Utgående med läkemedelsrening	Utspädning av dagens utgående med åvatten	Utspädning av dagens utgående med åvatten och utbyte Norrtäljeviken
Amidotrizoinsyra	0,025	0,019	0,001	0,000
Atenolol	0,011	0,001	0,001	0,000
Ciprofloxacin	0,752	0,169	0,037	0,001
Citalopram	0,150	0,005	0,008	0,000
Clopidol	0,001	0,001	0,000	0,000
Crotamiton	0,010	0,010	0,000	0,000
Diklofenak	0,016	0,002	0,001	0,000
Erytromycin	0,001	0,001	0,000	0,000
Flukonazol	0,419	0,098	0,021	0,000
Furosemid	12,240	2,091	0,610	0,009
Ibuprofen	0,320	0,133	0,016	0,000
Karbamazepin	0,151	0,033	0,008	0,000
Ketoconazol	0,624	0,190	0,031	0,000
Klaritromycin	0,315	0,022	0,016	0,000
Losartan	0,002	0,000	0,000	0,000
Metoprolol	0,228	0,012	0,011	0,000
Metotrexat	0,000	0,000	0,000	0,000
Naproxen	0,034	0,010	0,002	0,000
Oxazepam	44	6,686	2,173	0,033
Paracetamol	1,246	1,246	0,062	0,001
Primidon	0,950	0,460	0,047	0,001
Propanolol	0,372	0,017	0,019	0,000
Sertralin	7,7	0,335	0,386	0,006
Sotalol	0,000	0,064	0,019	0,000
Sulfadiazin	0,011	0,011	0,001	0,000
Sulfametoxazol	2,3	0,836	0,116	0,002
Tramadol	0,005	0,001	0,000	0,000
Trimetoprim	0,208	0,011	0,010	0,000
Venlafaxin	13	1,552	0,661	0,010
Zolpidem	0,016	0,016	0,001	0,000
Medel	2,8	0,468	0,142	0,002

Riskkvoterna sjunker från vänster till höger dvs avloppsvattnet blir antingen renare som med avancerad rening, i den andra sifferkolumnen eller spädes ut allt mer. Den naturligt förekommande

utspädningen av renat avloppsvatten med åvatten och vattenutbytet i Norrtäljeviken är den ekotoxikologisk risken i princip försumbar förutom mycket lokalt, nära utsläppen från avloppsanläggningar. En översiktlig redovisning av alla beräknade riskkvoter görs i tabell 3.

De kommersiella analyspaket som erbjuds förefaller inte ha tillräckligt låga kvantifieringsgränser, LOQ för att analysera vattnet i Norrtäljeviken, baserat på en jämförelse med beräknade koncentrationer i vattnet. Kvantifieringsgränsen skulle behöva sänkas 10-1000 gånger om halterna skall kunna verifieras, vilket de kanske inte alla gånger behöver göras om effektkoncentrationen är så mycket högre.

Vid fyra olika recipientprovtagningar kunde bara ett par ämnen detekteras i Norrtäljeviken och det i en punkt nära utsläppet från Lindholmens reningsverk.

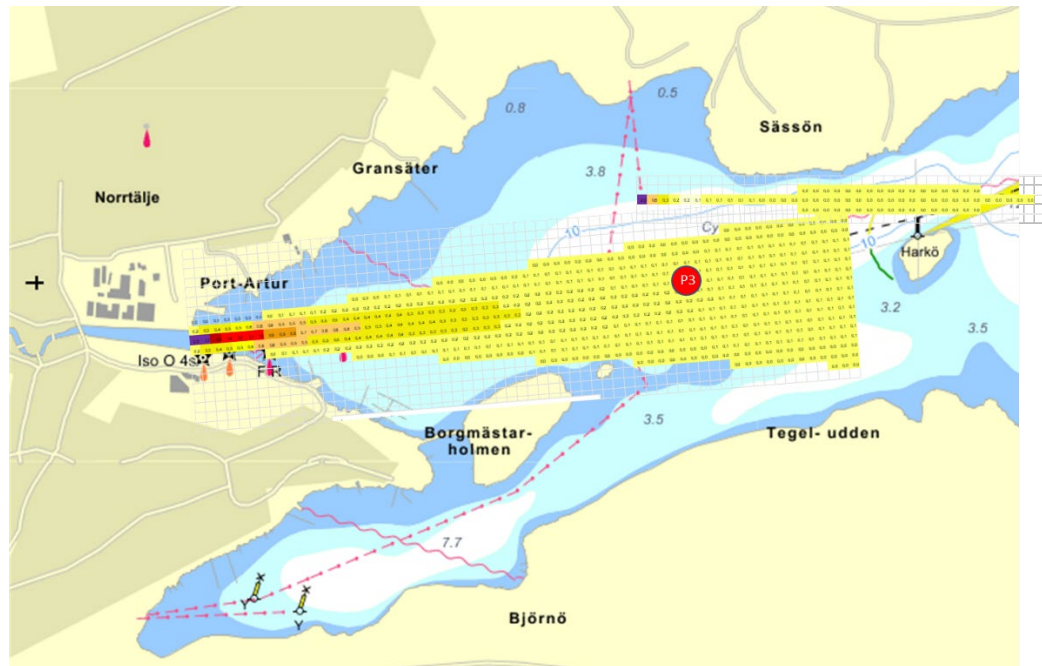
Recipientmodelleringen visar att det är i några lokala vatten som belastas med enskilda avlopp och som sedan rinner till Norrtäljeviken som den största risken föreligger att uppnå effektkoncentrationer av läkemedelsrester. Även i själva utsläppspunkten från Lindholmens reningsverk och dess omedelbara närhet finns en hög risk-kvot.

4.4 Modellering av Norrtäljeviken

Vattenkvaliteten modellerades i Norrtäljevikens vattenområden och i dess tillrinningsområden genom massflödesberäkningar baserade på modellerade vattenflöden och teoretisk tillförsel av läkemedelsrester från olika kommunala och enskilda avloppsanläggningar. De beräknade koncentrationerna av läkemedelsrester benämns PEC-värden och används för riskbedömningen.

Utspädningen av det renade avloppsvattnet är stor, beräkningsmässigt mellan 6–1200 gånger beroende på flödet i Norrtäljeån, vattenutbytet med Östersjön och den lokal avrinningen från land.

Punktutsläppen från Norrtäljeån och Lindholmens reningsverk beräknades för att se hur spridning ser ut i den inre delen av viken. I scenariot med ett begränsat vattenutbyte i viken syns plymerna tydligt, figur 17.



Figur 17 Punktutsläpp i Norrtäljeviken

Norrtäljeviken modellerades för olika provtagningsdagar, med flödesdata från SMHI och analysdata från projektet. Modellen bedöms ha en god översiktlig förmåga att prediktera genomsnittliga koncentrationer av läkemedelsrester, men kan förfinas genom bättre tidsupplösning med avseende på vattenutbytet i Norrtäljeviken.

4.5 Bedömning av risker och erforderlig reningsgrad

Koncentrationerna av läkemedelsrester i Norrtäljeviken är dock generellt mycket låga, i princip under detektionsgränsen. Vidare har modelleringen visat att koncentrationerna är låga så det är i de lokala vattenmiljöerna som risken är som störst, om än låg.

Risikkvoten PEC/PNEC beräknades i dagens utgående avloppsvatten, ett framtida avancerat renat avloppsvatten, dagens utgående avloppsvatten utspätt i recipienten med enbart åvatten eller åvatten och vattenutbyte i Norrtäljeviken. Den redovisade avancerade reningen utgörs av aktiverat kol – GAC.

Resultatet för varje risikkvot färgkodades i översiktstabeller för de olika typerna av behandlingar och utspädningar, tabell 3. Endast tabellens färgmönster skall läsas för att ge en bild av risknivåerna under olika förutsättningar.

Tabell 3 Riskkvoter, PEC/PNEC, för olika provtagningsdagar, horisontalt och ämnen, vertikalt, i dagens utgående avloppsvatten, ett framtida avancerat renat avloppsvatten, dagens utgående avloppsvatten utspätt i recipienten med enbart åvatten eller utspätt med åvatten eller utspätt med åvatten och vattenutbyte i Norrtäljeviken.

a) Dagens utgående från Lindholmen		2021-12-02	2021-12-09	2022-01-27	2021-12-16	2021-12-17	2021-10-14	2021-11-08	2021-11-04	2021-09-30	2022-02-10	2022-03-01	2022-06-15	2022-08-17	2021-09-02	2021-07-11	2021-05-27	2021-04-24	2021-12-06	2021-11-01	Medel
PEC/PNEC	Amidocrotonsyra	0,002	0,018	0,016	0,020	0,020	0,001	0,011	0,002	0,002	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001	0,002	0,013	0,025
	Atenolol	0,012	0,013	0,013	0,014	0,013	0,009	0,011	0,010	0,013	0,013	0,008	0,006	0,010	0,008	0,009	0,006	0,011	0,014	0,012	0,011
	Ciprofloxac	0,516	0,281	1,078	0,344	2,656	0,234	0,672	0,188	0,018	0,72	0,688	0,422	0,406	0,781	0,781	0,781	0,781	1,475	0,938	0,752
	Clotrimazol	0,296	0,296	0,268	0,175	0,175	0,181	0,181	0,014	0,113	0,094	0,136	0,131	0,144	0,143	0,081	0,106	0,264	0,206	0,126	0,126
	Crotamolon	0,013	0,007	0,020	0,004	0,010	0,002	0,014	0,023	0,041	0,012	0,010	0,016	0,013	0,019	0,023	0,012	0,027	0,021	0,018	0,018
	Epinyronsyra	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Floksoazol	0,588	0,882	0,588	0,654	0,621	0,589	0,490	0,088	0,187	0,392	0,193	0,556	0,327	0,327	0,143	0,143	0,143	0,021	0,458	0,419
	Furosemid	0,799	0,799	1,736	0,799	1,972	1,972	1,972	1,972	1,972	1,972	2,428	5,440	10,956	12,821	4,447	6,410	2,172	6,410	2,900	20,811
	Ingredien	0,024	0,220	1,090	0,096	0,180	0,130	0,545	0,480	0,220	0,178	0,210	0,180	0,094	0,220	0,130	2,200	0,120	0,200	0,160	0,120
	Karbamazepin	0,212	0,190	0,176	0,148	0,172	0,140	0,280	0,008	0,068	0,096	0,080	0,184	0,180	0,140	0,200	0,060	0,140	0,220	0,176	0,151
	Ketocozonol	0,292	0,709	0,613	0,235	0,288	0,300	0,400	0,280	0,280	0,280	0,280	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,040	0,600	0,624
	Klartromycyn	0,002	0,000	0,001	0,002	0,001	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,002
	Laxaret	0,397	0,356	0,342	0,274	0,356	0,047	0,274	0,007	0,048	0,192	0,134	0,274	0,205	0,219	0,313	0,104	0,219	0,288	0,288	0,228
	Metoprolol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Metosazol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Naproxen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Osaxepam	1,3	5,6	5,7	4,2	3,3	5,1	4,5	4,7	3,9	3,4	3,0	3,4	4,2	2,9	4,1	4,2	2,4	5,4	4,2	4,4
	Paracetamol	1,4	1,8	0,31	0,3	0,2	1,00	1,74	1,38	1,14	0,28	0,28	0,449	0,855	1,251	0,720	0,720	1,058	1,058	1,058	1,240
	Propofol	0,61	0,48	0,48	0,29	0,48	0,43	0,43	0,25	0,22	0,33	0,33	0,33	0,278	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219	0,219
	Serralin	18,8	9,3	10,4	7,4	10,1	4,7	10,3	10,6	5,0	7,0	10,3	8,8	3,7	5,3	5,3	5,3	5,3	7,4	5,3	7,7
	Setol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Sulfadiazin	4,00	1,6	3,1	1,6	1,2	0,2	3,6	2,3	3,1	4,3	2,1	2,8	1,5	1,9	1,9	0,4	2,0	4,1	1,9	2,3
	Sulfamoxazol	0,007	0,005	0,006	0,006	0,006	0,004	0,004	0,001	0,004	0,005	0,008	0,008	0,009	0,005	0,008	0,002	0,005	0,007	0,006	0,003
	Trimetoprim	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Vendetan	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Zidovudin	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Zidovudin	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023

b) Avancerat renat avloppsvatten från ett framtida Lindholmen

b) Avancerat renat avloppsvatten från ett framtida Lindholmen		2021-12-02	2021-12-09	2022-01-27	2021-12-16	2021-12-17	2021-10-14	2021-11-08	2021-11-04	2021-09-30	2022-02-10	2022-03-01	2022-06-15	2022-08-17	2021-09-02	2021-07-11	2021-05-27	2021-04-24	2021-12-06	2021-11-01	Medel
PEC/PNEC	Amidocrotonsyra	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Atenolol	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Ciprofloxac	0,116	0,063	0,242	0,077	0,597	0,053	0,153	0,042	0,042	0,153	0,155	0,095	0,091	0,176	0,176	0,176	0,176	0,422	0,211	0,169
	Clotrimazol	0,008	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Crotamolon	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Epinyronsyra	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Floksoazol	0,138	0,207	0,138	0,153	0,146	0,084	0,115	0,221	0,039	0,092	0,045	0,130	0,077	0,077	0,038	0,038	0,146	0,146	0,207	0,098
	Furosemid	0,131	0,131	1,721	0,131	1,395	1,395	1,395	1,395	1,395	1,395	1,752	1,752	2,190	0,767	1,095	0,405	1,095	4,271	3,044	2,091
	Ingredien	0,022	0,117	0,485	0,040	0,075	0,096	0,225	0,183	0,092	0,071	0,046	0,070	0,062	0,139	0,062	0,139	0,043	0,139	0,139	0,139
	Karbamazepin	0,046	0,042	0,038	0,032	0,037	0,037	0,063	0,002	0,015	0,021	0,017	0,040	0,035	0,049	0,043	0,031	0,031	0,048	0,038	0,033
	Ketocozonol	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Klartromycyn	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Laxaret	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Metoprolol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Metosazol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Naproxen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Osaxepam	8,760	8,592	8,746	6,905	8,132	7,825	6,905	7,211	6,903	5,217	4,603	5,217	6,444	4,143	5,063	1,941	3,989	8,899	5,000	6,686
	Paracetamol	0,695	0,561	0,246	0,316	0,302	0,484	0,842	0,667	0,554	0,133	0,135	0,217	0,414	0,772	0,351	0,351	0,512	0,642	0,462	0,469
	Propofol	0,028	0,022	0,022	0,013	0,022	0,021	0,021	0,021	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Serralin	0,460	0,400	0,451	0,322	0,456	0,203	0,456	0,460	0,391	0,364	0,446	0,382	0,161	0,230	0,230	0,230	0,230	0,322	0,230	0,335
	Setol	0,066	0,120	0,053	0,062	0,064	0,038	0,038	0,077												

I tabell 3 framgår hur färgmönstret förändras till det bättre där rött kodar för en hög risk, gult för medelhög, grönt för låg och blått för försumbar risk.

I dagens utgående avloppsvatten är riskkvoten hög för furosemid, oxazepam, sertralin och venlafaxin.

I de fyra recipientprovtagningarna kunde endast två ämnen, amidotrizoinsyra och metoprolol, kvantifieras i ett prov från P3, 0,5 m under ytan, nära utsläppspunkten taget den 26 april 2022. Riskkvoterna MEC/PNEC uppgick till 0,0002 respektive 0,0015 dvs de uppmätta koncentrationerna utgjorde en försumbar ekotoxikologisk risk. Utspädningen från Norrtäljeviken var begränsad under denna period med ett nettoutflöde från Norrtäljeån, reningsverk och lokal avrinning.

Det förefaller som en avancerad rening ger i stort sett samma resultat som utspädningen med Norrtäljeåns vatten. Genom den redan idag naturligt förekommande utspädningen av renat avloppsvatten med åvatten och vattenutbytet i Norrtäljeviken är den ekotoxikologisk risken i princip försumbar förutom mycket lokalt, nära utsläppen från avloppsanläggningar.

4.6 Sammanfattning

Prover har tagits från olika delar av Norrtäljeviken för att kartlägga eventuell förekomst av läkemedelsrester i kustvattnet. Resultaten användes för att jämföra med modellerade värde och bedöma hur bra den framtagna modellen är för Norrtäljeviken. Modellen har en god översiktlig förmåga att prediktera genomsnittliga koncentrationer men kan förfinas genom bättre tidsupplösning med avseende på vattenutbytet i Norrtäljeviken.

Förekomsten av läkemedelsrester idag och i framtiden har beräknats för Norrtäljeviken och dess tillrinningsområde, Generellt är halterna mycket låga, men i områden med enskilda avlopp, som ibland kan fungera dåligt, kan halterna bli så höga att koncentrationerna för att få effekt på vattenlevande organismer inte är så långt borta. Koncentrationerna av läkemedelsrester i Norrtäljeviken är dock generellt mycket låga, i princip under detektionsgränsen hos kommersiella lab.

Genom den redan idag naturligt förekommande utspädningen av renat avloppsvatten med åvatten och vattenutbytet i Norrtäljeviken är

den ekotoxikologisk risken mätt som PEC/PNEC i princip försumbar, förutom mycket lokalt, nära avloppsanläggningar.

De ämnen som bör följas vidare har de flesta mycket låga effektkoncentrationer: citalpram och venlafaxin. Därutöver bör diklofenak, furosemid, oxazepam och sertralin följas noggrant.

5. Multikriterieanalys – Processval

5.1 Metodik

I syfte att utröna vilken läkemedelsreningsteknik som är den mest fördelaktiga lösningen för Lindholmens reningsverk har en multikriterieanalys genomförts av projektgruppen

Multikriterieanalysen baserades på utvalda och betydelsefulla parametrar för implementering och drift. Projektmedlemmarna i Lindholmens läkemedelsreningssprojekt kompletterade och värderade parametrarna och kriterierna samt genomförde multikriterieanalysen under ledning av Berndt Björleinius. Preliminära data från labförsöken var inarbetade i faktaunderlaget till varje parametrar. Kostnadsbedömningar var anpassade till Lindholmen, men baserades på nyligen genomgångna projekt för läkemedelsrening i Sverige.

5.2 Parametrar

I multikriterieanalysen användes 21 parametrar inom olika områden som effekt och ekonomi. Parametrarna värderades var för sig men räknades samman i huvudgrupper enligt tabell 4.

Tabell 4 Grupperade parametrar i multikriterieanalysen för Lindholmens reningsverk

Parameter	Viktning (%)
Favorit av process sedan tidigare som funkar för organisationen (om relevant)	0,0 %
Ytbehov	7,5 %
Kostnader (6 parametrar uppdelade och värderade var för sig)	51,5%
Reningsgrad och biprodukter (6 parametrar uppdelade och värderade var för sig)	15,0 %
Klimatpåverkan	5,0 %
Elenergi	5,0 %
Personalrelaterat (3 parametrar uppdelade och värderade var för sig)	15,0 %
Referenser, antal	1,0 %
Summa	100 %

5.3 Viktning

De olika parametrarna eller kriterierna viktades sinsemellan genom diskussioner i projektgruppen.

De tekniker som jämfördes var teknik var ozonering med sandfilter, granulerat aktiverat kol och pulveriserat aktiverat kol (PAC) med sandfilter. Förbehandling före läkemedelsreningen förutsattes vara lika för alla alternativ och planeras att ingå som avslutande partikelavskiljningssteg i Lindholmens reningsverk för att klara tuffa utsläppskrav på fosfor. Bedömningen gjordes i en 5 gradig skala som relaterades till vad jämförande teknik: Mycket bättre +2, Bättre +1, Lika 0, Sämre -1, Mycket sämre -2.

5.4 Syntes

Resultatet av multikriterieanalysen blev att granulerat aktiverat kol, GAC, bedömdes som mest relevant för implementering som läkemedelsreningssteg vid Lindholmens reningsverk. Skillnaden mot ozonering var dock marginell, men GAC föll ut som något mer lämplig än ozonering (referensalternativet), som i sin tur föll bättre ut än PAC. De relativa och viktade bedömningssiffrorna var GAC 0,1; ozonering 0,0; PAC -0,4. Utfallet var något oväntat och berodde på bl a höga poäng för arbetsrelaterade frågor och energibehov vid drift.

NVAA:s medarbetare sammanfattade, efter en kontemplationstid efter multikriterieanalysen, ställningstagandet för GAC som, "Ozon är/känns onaturligt men är utvecklingsbart, risk för osäkra biprodukter, stor elkonsumtion, risker i arbetsmiljön. GAC känns säkrare och det

borde kunna bli mindre miljöpåverkan med tiden då det finns stora möjligheter att i framtiden kunna korta transporter, byta råämne, hitta återanvändningsområden, återvinna värme och el vid förbränning. GAC är också okänsligare för störningar och är därmed säkrare och ger dessutom bättre rening så länge kolet byts vid behov.”

Utvecklingen i världen sedan multikriterieanalysen gjordes i början av mars 2022 har visat på en hög inflation och kraftigt stigande priser på el och speciellt granulerat kol, vilket det senare stigit med 75% under året. Det fortsatta kriget i Ukraina med sanktioner mm gör det framtida kostnadsläget mycket osäkert. En grov känslighetsanalys gjord i september 2022 med justerade poäng för drift- och totalkostnader för GAC och PAC visar att utfallet av multikriterieanalysen skulle blivit annorlunda i dagsläget, ozonering hade varit mest fördelaktigt följt av GAC och sist PAC med indikativa siffrorna 0; -0,2; -0,5.

I principförslaget redovisas ändå en anläggning för GAC eftersom beslutet togs under delvis andra förutsättningar och en omarbetning i rapporteringsläget inte inryms av tids- och kostnadsskäl. En översiktlig dimensionering för Lindholmens reningsverk gjordes dock för huvudalternativen GAC respektive ozonering i juni 2021 av B² Processteknik.

6. Principförslag

6.1 Förutsättningar

Ett principförslag för ett avslutande steg med läkemedelsrening har utarbetats för Lindholmens reningsverk i Norrtälje. Förslaget ansluter till förutsättningarna med ett utbyggt reningsverk för 50 000 personekvivalenter (pe). Reningen bygger på nedströmsfiltrering genom granulerat aktiverat kol (GAC), vilken valdes som metod efter pilotkörningar och en multi-kriterieanalys utförd av projektmedlemmar från NVAA och konsulter.

6.2 Analyser av läkemedelsrester i befintligt reningsverk - profiler

Koncentrationerna av analyserade läkemedelsrester i inkommande och utgående avloppsvatten på Lindholmens reningsverk varierade mycket från substans till substans, men även för varje enskild substans mellan olika prover. De genomsnittliga koncentrationerna i

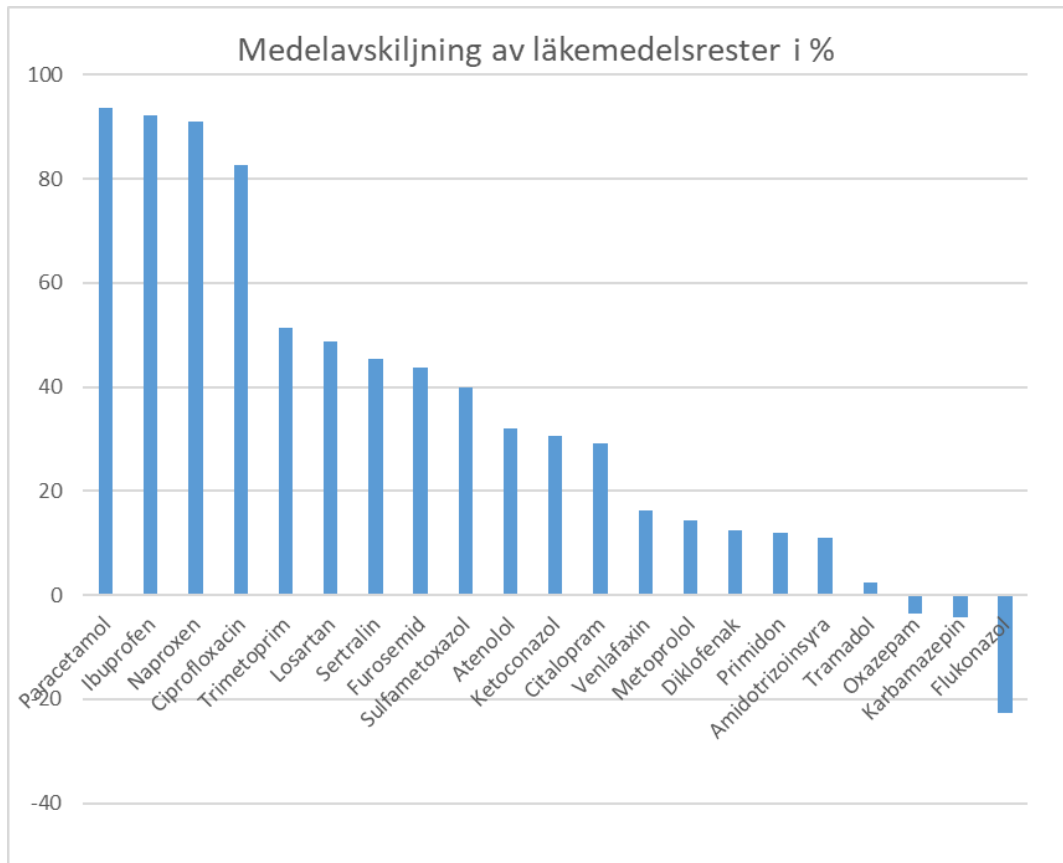
inkommande och utgående vatten vid Lindholmens reningsverk under försöken framgår av tabell 5.

Tabell 5 Koncentrationerna av analyserade läkemedelsrester, både inkommande och utgående avloppsvatten.

Koncentrationer Ämne ng/l	Lindholmen INK Medel (min-max)	Lindholmen UTG Medel (min-max)
Amidotriozinsyra	1775 (50-3900)	2476 (50-12000)
Atenolol	528 (220-790)	348 (190-480)
Ciprofloxacin	753 (150-2700)	48 (12-170)
Citalopram	340 (150-530)	241 (23-390)
Clopidol	50 (50-50)	35 (5-50)
Crotamiton	50 (50-50)	35 (5-50)
Diklofenak	970 (340-1300)	511 (53-1300)
Erytromycin	51 (50-50)	46 (5-120)
Flukonazol	112 (50-290)	128 (27-270)
Furosemid	2297 (480-4100)	1909 (120-3900)
Ibuprofen	12750 (4900-21000)	320 (34-1200)
Karbamasepin	353 (140-610)	377 (19-700)
Ketoconzol	252 (50-910)	31 (2-50)
Klaritrimycin	60 (50-100)	82 (39-200)
Losartan	3000 (1100-4900)	1573 (83-3100)
Metoprolol	2162 (970-2900)	1667 (51-2900)
Metotrexat	50 (50-50)	35 (5-50)
Naproxen	11667 (6400-18000)	511 (36-1800)
Oxazempam	365 (120-670)	436 (120-620)
Paracetamol	34573 (440-190000)	45 (5-110)
Primidon	82 (50-210)	66 (19-120)
Propanolol	98 (50-290)	85 (50-160)
Sertralin	248 (60-840)	73 (35-100)
Sotalol	50 (50-50)	39 (19-73)
Sulfadiazin	50 (50-50)	50 (50-50)
Sulfametoxazol	475 (50-940)	275 (19-550)
Tramadol	403 (160-520)	391 (41-660)
Trimetoprim	138 (50-230)	125 (10-270)
Venlafaxin	592 (300-780)	504 (21-900)
Zolpiedem	50 (50-50)	35 (5-50)
Summa	124343	12497
Summa exkl. 3 stora	15353	11620

De underliggande antalet prover är olika mellan inkommande (sex prover) och utgående (19 prover) i tabellen ovan, vilket försvårar direkta, beräkningsmässiga jämförelser av medelvärden mellan inkommande och utgående prover. Beräkningar skall alltid utföras med korresponderande prover, vilket görs nedan.

Reningsgraden är högst för de ämnen som förekommer i högst koncentrationer i inkommande avloppsvatten dvs ämnena paracetamol, ibuprofen och naproxen, som alla är smärtlindrande och inflammationsdämpande. I Lindholmen är den genomsnittliga reningsgraden av analyserade ämnen 38% över befintligt reningsverk, vilket framgår av figur 18.



Figur 18 Reningsgrad över Lindholmens reningsverk baserat på inkommande och utgående halter i dygns- och veckoprov.

6.3 Designparametrar

Läkemedelsreningssteget är dimensionerat för att klara en anslutning av 50 000 pe. Dimensionerande värden har tagits fram baserat på pilotförsöken samt interna och externa erfarenheter. I tabellen nedan presenteras vilka designparametrar som använts vid utformningen av framtida läkemedelsrening.

Tabell 6 Designparametrar för utformning av framtida läkemedelsrening.

Designparameter	Enhet	Värde
Dimensionerande flöde, q_{dim}	m ³ /h	900
Maxflöde, $q_{max} = 2 \cdot q_{dim}$	m ³ /h	1 800
Dygnsflöde, Q_{dygn}	m ³ /d	16 650
Inkommande susphalt	mg/l	≤ 10
Ytbelastning kolfilter vid q_{dim}	m/h	3,0
Bäddhöjd kolfilter	m	1,25
Spolhastighet vatten, kolfilter	m/h	10 - 15
Backspolningstid vatten, kolfilter	min	15
Spolhastighet luft, kolfilter	m/h	3 - 7
Backspolningstid vatten, kolfilter	min	15

6.4. Beskrivning

Utformningen av framtida GAC-anläggning, som framgår av figuren nedan, innefattar följande huvuddelar:

- Pumpstation
- Kolfilter, 10 filter á 30 m² d v s totalt 300 m²
- Spolvattenbassäng, 130 m³
- Spolavloppsvattenbassäng, 120 m³
- Bassäng för förbrukat kol, 50 m³

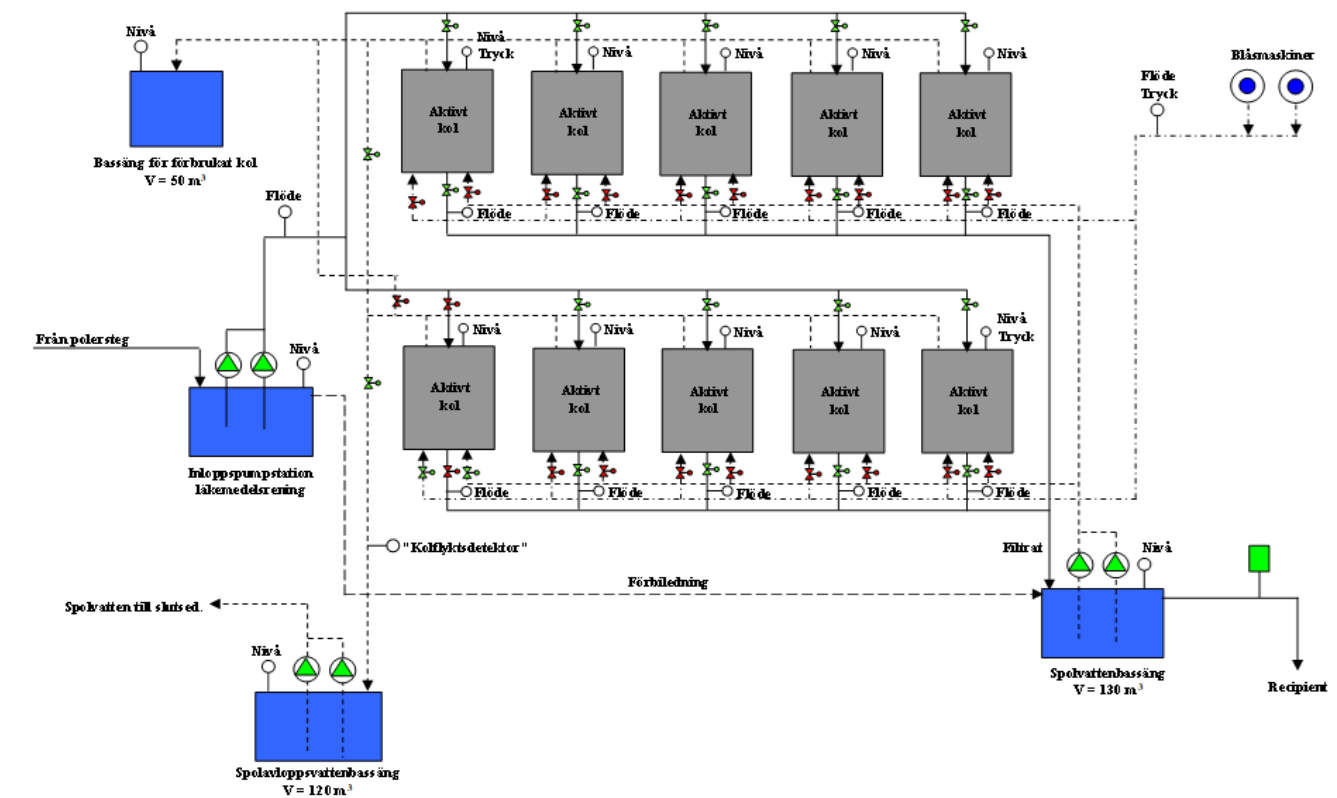
Renat vatten från Lindholmens reningsverk avleds till läkemedelsreningsstegets Från pumpstationen pumpas vattnet till GAC-anläggningen där det fördelas på två filterlinjer, som vardera innefattande fem parallella kolfilter. Ingen förfiltrering eller annan partikelavskiljning behövs innan vattnet leds till kolfiltren då Lindholmens reningsverk kommer att förses med skivfilter eller motsvarande partikelavskiljning vid kommande ombyggnation.

Varje kolfilter har en yta på ca 30 m², vilket ger en total yta av ca 300 m². Vattnet filtreras genom den 1,25 meter höga kolbädden innan det renade vattnet avleds till recipienten via en spolvattenbassäng.

Allt eftersom filtren sätts igen av partiklar öppnar filtrens utloppsventiler. När utloppsventilen till ett filter är fullt öppen, alternativt när den inställda gångtiden löpt ut, backspolas filtret med utgående vatten som samlats upp i spolvattenbassängen. För optimal backspolningseffekt, samt för att minimera åtgången av spolvatten så backspolas även filtren med luft. Vid backspolning stoppas tillflödet till filtret som ska backspolas genom att inloppsluckorna stängs. För att undvika att stora mängder kol följer med spolavloppsvattnet vid backspolning är anläggningen försedd med en "kolflykts-detektor".

Använt spolvatten, s k spolavloppsvatten, samlas upp i en spolavloppsvattenbassäng där det utjämnas innan det pumpas vidare till reningsverket.

Då kolet har förbrukats, vilket beräknas ta ca 1-2 års drift, kommer det att pumpas till en förvaringsbassäng, kolfilterbassängen, innan det transporteras bort för regenerering alternativt deponering.



Figur 19 Läkemedelsanläggning utformad som en GAC-anläggning för Lindholmens ARV

6.5. Resursbehov

Föreslagen anläggning kommer att förbruka:

- Aktivt kol, ca 30 gram kol/m³ filtrerat vatten
- Energi, ca 200 – 250 kWh/dygn motsvarande 0,015 kWh/m³ filtrerat vatten vid ett dygnsflöde motsvarande 16 650 m³

Som framgår ovan är energiförbrukningen för föreslagen väldigt låg. Vidare åtgår inga kemikalier för att driften. Personalbehovet har antagits uppgå till en halvtidstjänst. Normalt underhålls krävs för instrument och maskiner, vilket normalt brukar innebära en kostnad motsvarande ca 2% av maskininvesteringen.

6.6. Kostnader

Kostnaderna för föreslagen anläggning har uppskattats. Då ingen detaljprojektering har genomförts i detta läge måste redovisade kostnader ses som indikativa uppskattningar snarare än kalkylerade kostnader.

Investeringskostnaderna för anläggande av framtida läkemedelsrening har bedömts uppgå till totalt **ca 120 MSEK**. Kostnaden är baserad på inhämtning av uppgifter från leverantörer under sommaren 2022, samt tillämpande av schabloner och erfarenhetsmässiga å-priser för installations-, mark- och byggnadsarbeten. Då ingen detaljerad projektering genomförts i detta skede, har oförutsedda kostnader motsvarande ca 20% av uppskattad kostnad påförts. I redovisade investeringskostnader ingår byggherreomkostnader, d v s kostnader för projektering, upphandling samt projekt- och byggledning, kontroller och besiktningar, med ca 20% av uppskattad investeringskostnad.

Driftkostnaderna för föreslagen läkemedelsrening har bedömts uppgå till **ca 8,1 MSEK**. Av uppskattade driftkostnader utgör förbrukningen av aktivt kol nästan 90%, eller ca 7,2 MSEK av den totala driftkostnaden. Kostnaderna för kol har beräknats utifrån en specifik kostnad på 40 kr/kg. Det höga kilopriset beror av omvärldsfaktorer, framför allt kriget i Ukraina, vilket fått kolpriset att rusa från 25 SEK/kg till 40 SEK/kg. Energipriset är också högre än normalt och har därför ansatts till en kostnad om 2 kr/kWh.

Årskostnaderna för föreslagen läkemedelsrening har beräknats utifrån en avskrivningstid på 15 år för maskin, el (d v s el, styr-och regler) och VVS samt 50 års avskrivningstid för bygg. Internräntan

har ansatts till 2,0%. Vid dessa förutsättningar uppgår årskostnaden till **13,2 MSEK**. Omräknat till kronor per kubikmeter renat vatten blir kostnaden 2,2 kr/m³ vid ett dygnsflöde på 16 650 m³. En ekonomisk analys visar att i det fall priset för det aktiverade kolet skulle sjunka tillbaka till 25 SEK/kg sjunker totalkostnaden till motsvarande 1,7 kr/m³, vilket visar att det aktiva kolet står för en stor del av totalkostnaden.

6.7. Tidplan

Framtida projekt indelas i tre huvudfaser; projektering, entreprenadupphandling och anläggningsfas. Tiden för respektive fas har uppskattats under förutsättning att man ej gör någon systemprojektering först utan genomför en detaljprojektering baserat på detta principförslag.

- *Projektering*
Tiden för detaljprojektering samt upprättande av förfrågningsunderlag bedöms uppgå till ca 10-12 månader.
En kostnadsbedömning är inkluderad i angiven tid.
- *Entreprenadupphandling*
Upphandling av entreprenader bedöms ta ca 4–5 månader från publicering av förfrågningsunderlag fram till kontraktstecknade.
- *Anläggningsfas*
Total tid för utförande av entreprenadarbetena uppskattas till ca 18–24 månader.

Ovanstående tider innebär, med inkluderande av ställtider, att projektet i sin helhet bör kunna slutföras på ca 3,5-4 år räknat från tidpunkt för projekteringsstart. I uppskattad tidsåtgång har ingen hänsyn tagits till möjliga överklaganden av upphandling av de olika entreprenadkontrakten.

7. Information och kunskapsspridning

7.1 Upplägg

Till ansökningshandlingarna för bidraget togs det fram en kommunikationsplan vilken låg till grund för vad och hur information kring projektet skulle gå till.

För att skapa ett intresse och en förståelighet hos den som tar emot informationen har nivån/detaljerna anpassats för respektive informationstillfälle.

7.2 Informationsinsatser – loggbok

NVAA och samarbetspartner har informerat om pågående arbete för att sprida den kunskap förstudien medfört. Information och redovisning har skett både på lokal och regional nivå. Nedan listas samtliga informationstillfällen.

Tabell 7 Redovisning av informationstillfällen.

Datum	Informationsforum	
Juli 2021	Norrtälje Vatten och Avfall - Norrtälje Vatten och Avfall (nvaa.se) Projektsida	Information om den kommande förstudien.
Augusti 2021	Tidningen Cirkulation	Information om den kommande förstudien
November 2021	UtvecklingCentrum för Vatten, UCV samt studenter från Stockholms universitet, Miljöskyddsteknik	Projektet blev inbjudna för att dels berätta om Lindholmens planerade utbyggnad, dels om förstudiens läkemedelsrening.
December 2021	SVT lokalnyheterna 1 200 läkemedel i Stockholms avloppsvatten – nya metoder kan rena utsläppen SVT Nyheter	Inslag om förstudien med visning av Lindholmens ARV samt pilotanläggningen inkl. akvariecontainern.
September 2021	Seminarium i Norrtälje	Redovisning av resultat från förstudien för inbjudna intressenter från både kommuner, verksamheter och myndigheter.
Oktober 2021	Norrtälje Vatten och Avfall - Norrtälje Vatten och Avfall (nvaa.se) Både som extern nyhet samt på projektsidan (nvaa.se)	Information om resultat från förstudien samt seminariet.

7.3 Slutseminarium

Den 29 september höll projektmedlemmar ett seminarium i Norrtälje, vilket var mycket uppskattat.

Seminariet inleddes med att VA-chef, Per Hellström, berättade om VA-verksamheten i Norrtälje. Vidare berättade Richard Grähs och Jennie Åberg om Lindholmens historia, nyligen erhållna miljötillståndet och planerna för anläggningen framöver. Emma Gunnerblad redovisade för resultat av reduktionen av läkemedelsrester i dagens befintliga anläggning. Berndt Björleinius redovisade resultat från pilotanläggningens olika reningstekniker samt recipientprovtagning och modellering. SLU redovisade resultat av de biologiska testerna av Zebrafisk och Dammsnäcka och Anders Ullman redovisade det framtagna principförslaget samt investerings- och driftkostnader. Kommuner, organisationer och myndigheter bjöds in och totalt närvarade närmare 25 personer av 30 anmälda.

Seminariet avslutades med studiebesök till pilotanläggningen som vid tillfället stod vid Rimbo avloppsreningsverk.

Representant från Svenskt Vatten fanns med bland deltagarna vid seminariet och kunde informera kort, under avslutande diskussion, om det kommande EU förslag till nytt vattendirektiv vilket uppskattades.

8. Diskussion

Det erhållna statliga stödet till en förstudie av avancerad rening för Lindholmens reningsverk möjliggjorde att utföra arbete med att på plats ta ett helhetsgrepp kring avancerad rening och dess förutsättningar och utformning på reningsverket. Projektet drevs som ett inspirerande och lärorikt multidisciplinärt samarbete mellan reningsverk, projektenhet, konsulter och universitet.

Pilotförsök var en viktig del av förstudien som fokuserade på implementerbara reningstekniker med en utblick till kandidater där enzymfilter föll ut som mest lovande, men som trots löften inte kunde levereras av tilltänkt leverantör. Ett ersättningssystem under utveckling hos en annan leverantör visade att de testade enzysystemen idag inte uppnår de höga genomsnittliga avskiljningsgrader av minst 80%, som de redan beprövade teknikerna levererar, utan stannade på 50%.

Pandemin med covid-19 ledde till leveransförseningar, vilket tvingade fram förlängda försök. Även ett haveri av befintlig ozongenerator bidrog till merarbete och senareläggning av de biologiska testerna.

De utförda desinfektionsförsöken med ozonering, ultrafilter och UV-ljus visade på olika alternativ för att uppnå en god reduktion av ett flera olika

mikroorganismer, virus, bakterier och mikrosvampar. Desinfektion i kombination med avancerad rening för att ta bort läkemedelsrester öppnar upp för goda möjligheter att återanvända renat avloppsvatten till t.ex. gäddfabrik med efterföljande sommarbete. Förekomst av antibiotikaresistens analyserade inte utan minskningen av antalet bakterier visar indirekt minskningen av eventuell antibiotikaresistens.

Utvärderingen av pilotförsöken baserades på både kemiska analyser av läkemedelsrester och biologiska tester. De biologiska testerna användes för att utvärdera kombinationseffekter av alla förekommande ämnen i avloppsvattnet, eftersom det är omöjligt att analysera och detektera alla tänkbara ämnen.

De utvalda biotesterna inkluderade korttidstest med fisk och snäcka, där viktiga delar av organismernas fysiologi studerades, såsom beteende och reproduktion. Generellt sågs ingen betydande förbättring med avancerad rening. De ingående celltesterna indikerade förekomst av biologiskt aktiva ämnen även efter avancerad rening. Inför framtida studier efterlyses biologiska långtidsstudier för att analysera och bedöma nuvarande och framtida alternativ för avancerat renat avloppsvatten – inte som idag enbart korttidstest. Biocelltester indikerade att även andra ämnen än läkemedelsrester kan förekomma även i de avancerat renade avloppsvattnen.

Recipientprovtagning och modellering av Norrtäljeviken visade att koncentrationerna av läkemedelsrester är mycket låga idag. Hög utspädning föreligger oftast i Norrtäljeviken. Det är beräkningsmässigt mer kritiskt i mindre vattendrag dit avloppsvatten från enskilda avlopp kan utgöra en större andel på sin väg till själva Norrtäljeviken. I avrinningsområdet för Norrtäljeån finns även Rimbo, Rånäs och Finsta reningsverk där möjligen lokal påverkan kan finnas. Det är dock inte detaljstuderat i modelleringen.

Den utförda multikriterieanalysen inför valet av teknik för avancerad rening vid Lindholmens reningsverk inbegrep projektgruppens gemensamma val av kriterier och dessa inbördes viktning baserat på platsens förutsättningar, organisationens erfarenhet och prioriteringar. Utfallet av multikriterieanalysen blev att välja granulerat aktiverat kol, GAC, som mest fördelaktiga teknik för avancerad rening på Lindholmens reningsverk. Principförslaget för det framtida reningssteget togs fram baserat på multikriterieanalysen, pilotförsöken inklusive de biologiska testerna och insamlade övriga erfarenheter, inklusive kostnader.

Under den sista veckan av projektet presenterade EU sina förslag till nytt vattendirektiv och nytt direktiv om särskilt förorenade ämnen. Beroende på

det slutligt utfallet, tillhörande formuleringar av EU:s uppdaterade direktiv samt den svenska tolkningen av direktiven kan valet av bäst lämpade teknik påverkas. I grunden är det miljö kvalitetsstandard, MKS, som skall avgöra om läkemedelsrening behövs vid de reningsverk som släpper ut renat avloppsvatten till berörd recipient. Reningsverkens storlek kan komma att påverka när utbyggnaden av den avancerade reningen skall vara klar.

9. Slutsatser

Projektet genomlyste de delar som ingår i ett ambitiöst underlag till ett nytt reningssteg, inklusive omfattande pilotförsök på aktuellt reningsverk.

Pilotförsöken gick bra att köra i fält, även under vintern, trots $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ utomhus under några dagar. Anläggningen rullade på stabilt efter initiala problem med en havererad ozongenerator och de biologiska testerna kunde genomföras under konstanta betingelser. Pandemin med covid-19 ledde till leveransförseningar, vilket tvingade fram förlängda försök under januari och februari 2022.

De utvärderade och numera tämligen väl studerade teknikerna ozonering och aktiverat kol i form av pulveriserat kol, PAC och granulerat kol GAC, kunde alla uppnå 80% avskiljning av läkemedelsrester med dimensioneringsvärdena $7\text{ g O}_3/\text{m}^3$, $27\text{ g PAC}/\text{m}^3$ respektive $30\text{ g}/\text{m}^3$.

Den nya och enligt en leverantör implementerbara tekniken med enzysystem kunde inte som utlovats levereras till försöken. Ett ersättningssystem under utveckling hos en annan leverantör visade att de testbara enzysystemen idag inte uppnår de höga genomsnittliga avskiljningsgrader som de redan beprövade levererar, utan stannade på 50%.

God desinfektion av utgående avloppsvatten visade sig vara fullt möjligt, vilket ger goda förutsättningar att återanvända avloppsvattnet för att t.ex. skapa gäddfabriker med efterföljande sommarbete.

Biologiska tester användes för att utvärdera kombinationseffekter av alla förekommande ämnen i avloppsvattnet och möjliggjorde prediktering av effekter hos vattenlevande organismer i recipienten.

De biologiska undersökningarna visade i stort att både fiskar och snäckor hade god hälsa och normal reproduktion i dagens utgående avloppsvatten och att detta inte förändrades med avancerad rening. Ozonering gav avvikande effekter på simbeteende hos både honor och hanar hos zebrafisk, men någon förklaringsmodell kan inte ges i dagsläget. Inte heller celltester utförda på lab kunde inte påvisa tydlig förbättring av avancerad rening, men inte heller någon försämring.

Recipientprovtagning och modellering av Norrtäljeviken visade att koncentrationerna av läkemedelsrester är mycket låga idag. Hög utspädning föreligger oftast i Norrtäljeviken. Det är beräkningsmässigt mer kritiskt i mindre vattendrag dit avloppsvatten från enskilda avlopp kan utgöra en större andel på sin väg till själva Norrtäljeviken.

En multikriterieanalys, där 21 kriterier såsom effekter, kostnader mm ingick, användes för att välja granulerat aktiverat kol, GAC, som mest fördelaktiga teknik för avancerad rening på Lindholmens reningsverk. Ett principförslag för det framtida reningssteget togs fram baserat på pilotförsöken och insamlade erfarenheter.

Projektet rönt intresse från branschen och allmänheten, vilken informerades via hemsida, tidningsartiklar, TV-inslag och ett avslutningsseminarium i Norrtälje.

Bilagor

Bilaga 1 B² Processteknik - Pilotförsöken

Bilaga 2 SLU, Ekotoxikologiska tester –
Exponeringsförsök i fält

Bilaga 3 B² Processteknik – Recipientmodellering

Bilaga 4 Treatcon och B² Processteknik –
Principförslag

Bilaga 5 NVAA – Sammanställning projektekonomi