



Nr B 2387
Juni 2020

Utvärdering av framtida inflödesscenarier för svenska reningsverk

– Vilken effekt har tillskottsvatten på miljöpåverkan och driftskostnad?

Sofia Lovisa Andersson, Magnus Rahmberg, Åsa Nilsson, Catharina Grundestam, Ramesh Saagi, Sara Nilsson



I samarbete med: Stockholm Vatten och Avfall,
Käppalaförbundet och Mälarenergi

Författare: Sofia Lovisa Andersson, Magnus Rahmberg, Åsa Nilsson, Catharina Grundestam, Sara Nilsson (IVL Svenska Miljöinstitutet) och Ramesh Saagi (Lunds Universitet)

Medel från: Stockholm Vatten, Käppalaförbundet, Mälarenergi, Stiftelsen IVL

Fotograf: Mälarenergi AB

Rapportnummer B 2387

ISBN 978-91-7883-184-5

Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© **IVL Svenska Miljöinstitutet 2020**

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // Fax 010-788 65 90 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Detta arbete har möjliggjorts tack vare stöd från Mälarenergi, Käppalaförbundet, Stockholm Vatten och Avfall och Stiftelsen IVL. Vi vill tacka för det samarbete vi haft med framförallt Andreas Nilsson, Mälarenergi, Stefan Erikstam, Käppalaförbundet och Erik Lindblom, Stockholm Vatten och Avfall.

Projektet vill också tacka Ulf Jeppsson, Lunds Universitet, med samarbetspartners, för att vi kunnat arbeta med simuleringsmodellerna BSM2G och BSM-UWS.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	6
Summary.....	8
1 Bakgrund.....	10
2 Syfte och mål	11
3 Rapportstruktur	11
4 Metod	11
4.1 De tre fallstudierna.....	13
4.2 Effekter av tillskottsvatten	14
4.2.1 Inflödesmodellering.....	14
4.2.2 Processmodellering.....	16
4.2.3 LCA	17
4.3 Kostnadsberäkning	18
4.4 Avgränsningar.....	19
5 Resultat och diskussion	21
5.1 Inflödesmodellering	21
5.2 Processmodellering – hur påverkas reningen av förändrat inflöde	24
5.3 LCA – hur ändras miljöpåverkan av förändrat inflöde.....	35
5.4 Kostnadsberäkning – hur påverkas löpande kostnader av förändrat inflöde	47
6 Slutsatser	49
7 Referenser.....	51
Bilaga 1: BSM-UWS - Inflödesmodell.....	53
Bilaga 2: Fallstudie Henriksdals reningsverk.....	55
Inflödesmodellering	55
Processmodellering.....	59
Ingående data till LCA-modellering.....	64
Bilaga 3: Fallstudie Käppalaverket.....	65
Inflödesmodellering	65
Processmodellering.....	70
Ingående data till LCA-modellering.....	72
Bilaga 4: Fallstudie Kungsängens reningsverk	74
Inflödesmodellering	74
Processmodellering.....	81
Ingående data till LCA-modellering.....	84

Bilaga 5: Excel-verktyget	85
Bilaga 6: Fullständiga resultat från livscykelanalysen	89

Sammanfattning

Svenska avloppsreningsverk tar idag emot betydande mängder tillskottsvatten genom avrinning av dagvatten och infiltration i ledningsnäten. Samtidigt kan stadsutvecklingen innebära att mer hårdgjorda ytor anläggs vilket kan öka dagvattenavrinningen än mer. I framtiden förväntas även nederbörden öka till följd av klimatförändringar och högre flödestoppar vid regn är väntade. Detta projekt har haft som uppgift att studera drift av avloppsreningsverk vid olika framtida inflödesscenarier och hur dessa scenarier påverkar reningsverkens miljöpåverkan och driftkostnader.

Projektet bygger vidare på det tidigare projektet "Nya utsläppskrav för svenska reningsverk – effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan" (Åmand et al, 2016) där miljöpåverkan vid skärpta utsläppskrav studerades med hjälp av matematiska processmodeller och livscykelanalys (LCA). Käppalaverket i Lidingö, Henriksdals reningsverk i Stockholm och Kungsängsverket i Västerås var fallstudier i det föregående projektet liksom i detta projekt. De modeller som togs fram och kalibrerades i föregående projekt har nu kompletterats med modeller för generering av inflödesscenarier.

För att simulera olika scenarier för hur tillskottsvatten till de tre avloppsreningsverken kan komma att ändras framöver användes en modell som beskriver avrinningsområde och ledningsnät. De inflöden som modellen genererade användes sedan som indata till processmodellerna för respektive reningsverk, och som anpassats för att motsvara förväntade framtida förhållanden med avseende på verkens belastning, processkonfiguration och utsläppskrav. Resultaten från processmodellerna användes sedan i sin tur som indata i livscykelanalysmodeller, för att kunna beräkna och jämföra miljöpåverkan. Fem olika kategorier för miljöpåverkan studerades; klimatpåverkan, övergödningspotential, försurningspotential, förbrukning av fossila resurser (energi) och förbrukning av ändliga materialresurser.

Resultaten visar att infiltrationen har större inverkan på hur miljöpåverkan förändras till följd av ett förändrat inflöde än ökade flödestoppar. Vid minskad infiltration minskade samtliga studerade miljöpåverkanskategorier för alla tre verken, beräknat per kg kväve som avskilt i reningsprocesserna i verket. Det omvända gällde vid ökad infiltration.

Minskad infiltration, som resulterade i minskat totalflöde mellan 7 och 20 %, gav en minskning i övergödningspotential per kg avskilt kväve med 9-18 % jämfört med basfallet för de tre fallstudierna. Motsvarande minskning för övriga miljöpåverkanskategorier var 3-6 % minskad klimatpåverkan, 1-8 % minskad förbrukning av fossila resurser, 4-10 % minskad förbrukning materialresurser och 1-5% minskad försurningspotential.

Minskad infiltration minskade kostnaden per kg avskilt N i processerna med 2,3 % vid 7 % minskat totalflöde för Käppala, med 5,9 % vid 14 % minskat totalflöde för Henriksdal och för Kungsängsverket minskade kostnaden med 7,1 % vid 20 % minskat totalflöde.

De processmodeller som användes har begränsad möjlighet att beskriva driftstörningar i sedimenteringsbassänger till följd av höga flöden. Modellerna har inte heller inkluderat någon



minskning av temperaturen på inkommande vatten i samband med ökad infiltration i åldrande ledningsnät. Dessa båda faktorer gör att effekten av förändrat inflöde i verkligheten kan vara större än vad resultaten visar.

Utöver att studera miljöpåverkan och kostnader för olika inflödesscenarier har projektet även tagit fram ett Excelbaserat verktyg där verken själva kan testa hur olika val av kemikalier och typ av el påverkar miljöpåverkan och kostnader.

Metoden som använts lämpar sig för att studera många andra scenarier som till exempel förändrad nederbörd, förändrad belastning eller utvärdering av verkens processkonfiguration och styrstrategier.

Summary

Swedish wastewater treatment plants (WWTPs) often receive large volumes of stormwater runoff and infiltration water that has leaked into the sewer networks. At the same time, urban development can lead to more impervious areas being constructed, which could lead to increased stormwater runoff. In the future, increased precipitation (due to climate change) is also expected to result in higher peak flows at the WWTPs. This project has studied the operation of WWTPs at different future influent scenarios and how the environmental impact and operational costs of operating the WWTP is affected.

This study is further development of the work presented in Åmand *et al* (2016), where the environmental impact of stricter effluent requirements for nitrogen and phosphorus was studied using calibrated dynamic process models and life cycle assessment (LCA). Three Swedish WWTPs were used as case studies: Käppala WWTP in Lidingö, Henriksdal WWTP in Stockholm and Kungsängen WWTP in Västerås. The models that were build and calibrated in the previous study have been reused and influent generation models have been added to analyse the impact of potential future scenarios.

Scenarios with changing amount of infiltration and stormwater runoff were generated and the process models were adapted to expected future pollutant load, process configuration and effluent requirements. The results from simulation of the process models were used as input to the LCA models to calculate and compare environmental impact. Five different environmental impact categories were used; climate impact, eutrophication potential, acidification potential, fossil resource consumption (energy) and material resource consumption.

The results indicate that for the studied scenarios, the infiltration affected the environmental impact to a greater extent than the stormwater runoff. When infiltration was reduced, the environmental impact, per kg nitrogen removed in the process, was reduced in all five environmental impact categories for all three case studies. The opposite was true if infiltration increased.

A reduction of infiltration that resulted in a total influent reduction by 7 to 20% gave a reduction in eutrophication potential per kg nitrogen removed in the process by 9-18% compared to the base case for the three case studies. The corresponding reduction for the other categories were 3-5% reduced climate impact, 1-8% reduced consumption of fossil resources, 4-10% reduced consumption of material resources and 1-5% reduced acidification potential.

The reduced infiltration also resulted in reduced operational costs per kg nitrogen removed. For Käppala WWTP reduced influent by 7% resulted in 2.3% reduced costs. For Henriksdal WWTP reduced influent by 14% resulted in 5,9% reduces costs and for Kungsängen WWTP the cost was reduced by 7,1% when influent was reduced by 20%.

This result shows that the processes are more efficient if infiltration is reduced. The category that changed the most when using the functional unit kg nitrogen removed in the scenarios was the eutrophication potential.



The process models used have uncertain prediction of limited settler performance during elevated flow rates and sludge bulking during snowmelt or heavy rain events and decreased temperature when infiltration increases are not included in the models. This implies that negative environmental impact of such events might be underestimated in the evaluation.

The method presented is suitable for many other scenario evaluations such as scenarios with changed precipitation, changes load or evaluation of the process configuration and control strategies of the WWTPs.

1 Bakgrund

Svenska avloppsreningsverk tar idag emot betydande mängder tillskottsvatten på grund av tillströmmande dagvatten och infiltration i ledningsnäten. När ytavrinning av regnvatten, snösmältning eller inträngande grundvatten når avloppsledningarna späds spillvattnet ut och kyls ner, vilket påverkar verkens reningsprocesser. Ökat inflöde till verken leder till kortare hydraulisk uppehållstid vilket kan försämra avskiljningen och öka sannolikheten för slamflykt från biosteget, vilket i sin tur kan öka mängden föroreningar ut från verket. Den lägre temperaturen kan påverka framförallt det biologiska reningssteget negativt. Ökat inflöde kan också medföra bräddning där orenat, eller delvis renat avloppsvatten släpps ut.

Arbete pågår kontinuerligt med att minska inläckage till ledningsnätet, men det är kostsamt och tar lång tid. Samtidigt förändras markanvändningen och med ny bebyggelse ökar andelen hårdgjorda ytor vilka kan bidra till snabbare avrinning och därigenom högre flödestoppar vid regn. Med ett förändrat klimat kan även ökad nederbörd vara att vänta med högre maxflöden än vad man har idag.

Samtidigt har många svenska reningsverk fått, eller är på gång att få, skärpta utsläppskrav för kväve och fosfor, vilket kräver ombyggnationer och processanpassningar. De skärpta utsläppskraven gör att de ekonomiska marginalkostnaderna för att rena kväve och fosfor ökar, och det har också visats att marginaleffekterna på koldioxidavtrycket stiger vid hårdare utsläppskrav (Thunberg *et al.*, 2013). De skärpta kraven leder till exempel till att många verk måste införa tillsats av extern kolkälla, vilket i sig innebär ökade kostnader och ökad negativ miljöpåverkan.

Ett användbart verktyg för att ge en bild av vilken effekt nya utsläppskrav och förändrad mängd tillskottsvatten får är dynamisk processmodellering. Med denna typ av modellering går det att uppskatta resursåtgång för reningsprocesserna och även simulera olika utsläppsnivåer vid olika processkonfigurationer och inflöden. Fördelen med en dynamisk modell är att den kan följa årsvariationer i inflöde och temperatur. Kombinerat sedan resultaten från de dynamiska modellerna med en systemanalys över vald reningsprocess kan en total miljöpåverkan från processen beräknas. En vanlig metod för att utföra systemanalyser är livscykelanalys (LCA).

I projektet SIMFRAM (Åmand *et al.*, 2016) undersökte IVL Svenska Miljöinstitutet och SP hur skärpta utsläppskrav kan bidra till förändrad miljöpåverkan från reningsverkens processer. Käppalaverket i Lidingö, Henriksdals reningsverk i Stockholm och Kungsängsverket i Västerås var projektets tre fallstudier. Miljöpåverkan undersöktes genom att resultaten från dynamiska processmodeller användes för att göra livscykelanalyser (LCA). I detta projekt, SIMFRAM 2, har vi vidareutvecklat metoden från SIMFRAM för att ta reda på vilken effekt ett förändrat inflöde till reningsverken kan få på reningsverkens totala miljöpåverkan i framtiden.

Metodiken har även utvecklats genom att inkludera kostnader i tillägg till miljöpåverkan och ett Excelbaserat verktyg har skapats för att verken själva ska kunna testa hur val av kemikalier, elmix och sätt att beräkna lustgasavgång påverkar miljöbelastning och kostnader.

2 Syfte och mål

Det huvudsakliga syftet med projektet är att öka kunskapen om vilken effekt mängden tillskottsvatten har på miljöpåverkan och driftkostnad för tre svenska avloppsreningsverk; Käppalaverket, Henriksdals reningsverk och Kungsängsverket i Västerås.

Målet med studien av tillskottsvatten har varit att komplettera tidigare metodik bestående av processmodellering och livscykelanalys, med kalibrerade modeller för skapande av olika inflödesscenarier till respektive reningsverk samt komplettera livscykelanalysen med kostnadsberäkningar.

I tillägg till detta har ytterligare ett syfte varit att öka förståelsen kring hur avloppsreningsverk kan minimera sin miljöpåverkan från reningsprocesserna. För att åstadkomma detta har målet varit att skapa ett Excel-baserat verktyg utifrån LCA-data där reningsverkens personal själva kan studera olika scenarier.

3 Rapportstruktur

I denna rapport beskrivs arbetet med utvärdering av scenarier för tillskottsvatten. De delar som rör framtagande av ett Excel-baserat verktyg för beslutsstöd presenteras separat i en egen bilaga.

Projektets metod presenteras i kapitel 4. Komplexa modeller har använts i detta arbete och en sammanfattning av modelleringsmetoderna presenteras i kapitel 4.2. Metodiken bygger vidare på det arbete som gjorts i tidigare projekt. För detaljer om de modeller som återanvänts hänvisas till rapporten för föregående projekt, se Åmand *et al.* (2016). Den nya modell för avrinningsområde och ledningsnät som tillkommit i detta arbete beskrivs i detalj i Bilaga 1.

En nyckel för att förstå rapportens resultat är att ha en bild av de scenarier som använts i arbetet. Rapporten utgår från tre fallstudier med ett basfall och fyra scenarier vardera. Totalt 15 olika scenarier. För att kunna tolka resultaten är det bra att ha satt sig in i kapitel 4.1, 4.2 och 4.5.

Resultaten presenteras och diskuteras i kapitel 5. De olika inflödesscenarier som studeras presenteras i kapitel 5.1. Utifrån dessa har sedan processsimuleringar gjorts vilket redovisas i kapitel 5.2. Här presenteras hur utsläppen varierar över året vid de olika inflödena. I kapitel 5.3 presenteras först miljöpåverkan för respektive scenario för de tre fallstudierna. Därefter normeras miljöpåverkan mot basfallet för att se den relativa effekten av ett förändrat inflöde.

4 Metod

Alla reningsverk är unika med olika processkonfiguration, inkommande vatten och driftförhållanden. Det är därför en utmaning att dra generella slutsatser för svenska reningsverk när variationen mellan dem är stor. I denna studie har tre fallstudier använts för att

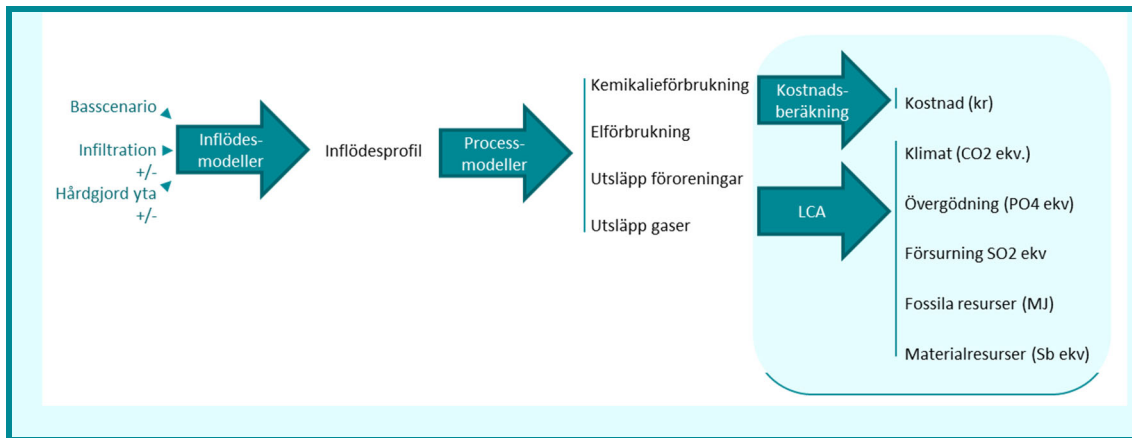
kunna jämföra dem med varandra: Henriksdals reningsverk i Stockholm, Käppalaverket på Lidingö i Stockholm och Kungsängens reningsverk i Västerås. Det är verkens förutspådda framtida processkonfiguration, belastning och krav som är utgångspunkt i detta projekt.

För att kunna studera effekter av tillskottsvatten på reningsverkens miljöpåverkan har olika inflöden tagits fram med hjälp av en inflödesmodell. Dessa inflöden har sedan använts som indata till en processmodell som simulerar driften och processerna i ett reningsverk. Genom dynamisk processmodellering går det att uppskatta resursåtgång för reningsprocesserna och även simulera olika utsläppsnivåer vid olika processkonfigurationer. Fördelen med en dynamisk modell är att den kan följa såväl årsvariationer i inflöde och temperatur, som effekten av kortare flödetoppar i samband med regn eller snösmältning.

Resultaten från de dynamiska modellerna har kombinerats med en systemanalys över reningsprocessen för att beräkna en total miljöpåverkan från processen. Miljöpåverkan från ett valt basfall har jämförts med hur miljöpåverkan blir om inflödet förändras. Den metod för att utföra systemanalyser som valts är Livscykelanalys (LCA). Även motsvarande driftkostnader har beräknats för att undersöka vilken ekonomisk effekt olika inflödesscenarier medför. All utvärdering har gjorts utifrån ett års drift av reningsverket.

ÖVERSIKTLIG ARBETSGÅNG

1. **Inflödesmodellering** – för att få data för hur mängden tillskottsvatten i inflödet kan ändras över tid beroende på hur mycket infiltration man har in till ledningsnätet och hur mycket hårdgjorda ytor som finns i avrinningsområdet. Modellen för respektive fallstudie kördes för fem olika scenarion.
 - Basfall (motsvarande framtida antal anslutna och dagens grad av infiltration och avrinning)
 - Fyra framtidsscenarier där mängden tillskottsvatten (infiltration och avrinning) varierar.
2. **Processmodellering** – för att för de olika inflödesscenarierna ovan generera data för förbrukning av el, kemikalier, utsläpp av föroreningar, klimatpåverkande gaser etc. Modellerna reflekterade framtida förhållanden för antal anslutna, utsläppskrav och processkonfiguration.
3. **LCA** – för att få data för reningsprocessens miljöpåverkan i de olika scenarierna. Baseras på data från processmodellerna. .
4. **Kostnadsberäkning** – för att få driftskostnaden för respektive scenario. Baseras på data från processmodellerna samt kostnadsdata för dessa.



I det här kapitlet beskriver vi mer ingående hur vi gick tillväga. Mer detaljerad information finns i tillhörande bilagor.

4.1 De tre fallstudierna

Detta projekt återanvänder kalibrerade processmodeller och fallstudier från ett tidigare projekt där utgångspunkten var reningsverkens drift under 2012. För kalibrering av inflödesmodellerna i detta projekt har utgångspunkten därför fortsatt varit 2012.

Henriksdals reningsverk är ett av Sveriges största avloppsreningsverk med 782 600 anslutna personer och ett medelflöde på 284 000 m³/d (2012). Andelen tillskottsvatten in till Henriksdal ligger runt 40 %. Reningsverket betjänar centrala och södra Stockholm. Anläggningen ligger till stora delar insprängd i Henriksdalsberget, strax sydost om centrala Stockholm. Idag har Henriksdals reningsverk förfällning och simultanfällning med järnsulfat och en klassisk fördenitrifikationsprocess samt dosering av järnsulfat på sandfilter. Dagens anläggning har två inlopp: ett i Sickla som tar emot ca 70 % av vattnet och ett i Henriksdal. Henriksdals reningsverk ägs och driftas av Stockholm Vatten och Avfall AB.

Enligt Henriksdalsverkets framtidsanalys kommer drygt 1,6 miljoner personer vara anslutna till verket år 2040, Bromma reningsverk kommer att läggas ner och det vatten som nu går till Bromma kommer ledas om till Henriksdals reningsverk. Processen kommer byggas om till en membranbioreaktor (MBR).

Käppalaverket på Lidingö hade ca 455 000 anslutna personer 2012 (Käppalaförbundet, 2012) och behandlar avloppsvatten från kommuner i nordvästra Stockholm. Inkommande medelflöde var 163 500 m³/d 2012. Andelen tillskottsvatten till ledningsnätet ligger omkring 30 % av inkommande vatten vid torrvädersflöde och var 2012 46 % som årsmedel. Även Käppalaverket ligger i berg, men har relativt gott om utrymme för sina reningsprocesser. Kväverening sker genom fördenitrifikation och simultanfällning sker med järnsulfat. Reningsverket har två parallella processdelar kallade gamla och nya verket (GV respektive NV) som byggts under olika årtionden. Käppalaförbundet äger Käppalaverket.

År 2040 förutspår man att 900 000 personer kommer vara anslutna till Käppalaverket. Processen kommer att kompletteras med förfällning, högflödesrening, efterdenitrifikation och rejektivattenrening för att möta skärpta reningskrav.

Kungsängens reningsverk ligger vid Mälarens strand strax utanför Västerås stadskärna. 2012 var antalet anslutna 128 000 och medelflödet var 47 000 m³/d. Idag är mängden tillskottsvatten till ledningsnätet omkring 40 % av inkommande vatten, varav 95 % är långsam infiltration. Under en 20 års period har man sett en minskande trend av infiltration. Även Kungsängens reningsverk har idag fördenitrifikation och förfällning med järnsulfat. Till skillnad från de andra två fallstudierna använder verket kolkälla till sin fördenitrifikation. Kungsängens reningsverk har idag en betydande industribelastning från Westinghouse som släpper på nitrat- och ammoniumrikt vatten på verket. Reningsverket ägs av Mälarenergi AB.

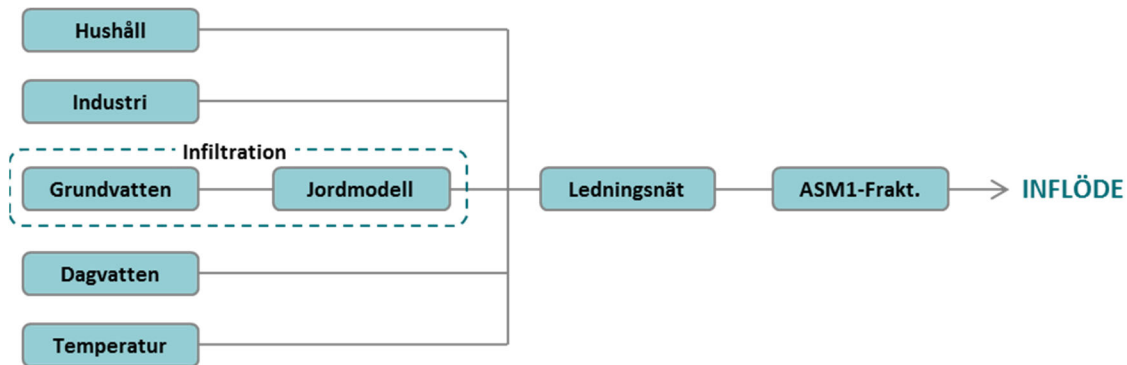
2022 tror man att Kungsängsverkets processkonfiguration är oförändrad, men att antalet anslutna har ökat till 140 00 personer. I framtiden kommer verket även sluta ta emot viss betydande industribelastning.

4.2 Effekter av tillskottsvatten

4.2.1 Inflödesmodellering

För att simulera avloppsreningsverk med processmodeller krävs dynamisk indata med hög upplösning, vilket inte brukar finnas tillgängligt för inkommande flöde (Martin & Vanrolleghem, 2014). I detta projekt användes därför en modell för att generera inflödesdata för ett års tid med 15 minuters upplösning till de tre fallstudieverken. Fördelen med en dynamisk modell är att den kan följa såväl årsvariationer i inflöde och temperatur, som effekten av kortare flödetoppar i samband med regn eller snösmältning.

Modellen som användes var en modifierad version av en inflödesgenerator (Gernaey *et al.*, 2011) som baseras på Benchmark Simulation Model for Urban Wastewater Systems (BSM-UWS) (Saagi *et al.*, 2016). Inflödesmodellen beskriver fyra olika ursprung till det vatten som når reningsverket, hushållspillvatten, industriellt avloppsvatten, dagvatten och infiltration till ledningsnätet. En grafisk beskrivning av inflödesmodellen visas i Figur 1.



Figur 1. Schematisk bild över inflödesmodellen.

För de fyra olika ursprungena modellerades flöde, kemisk syreförbrukning (COD), uppdelat på en partikulär fraktion (COD_{part}) och en löst fraktion (COD_{sol}), ammonium (NH₄-N), totalt Kjeldahl kväve (TKN), totalfosfor (TP) och temperatur. Inflödesmodellen beskrivs mer i detalj i Bilaga 1.

Dagvatten och infiltration till ledningsnätet räknas som tillskottsvatten och flödet från dessa har därför varierats.

För att kunna jämföra miljöpåverkan för olika inflödesscenarier har fem olika inflöden modellerats. Ett basfall som motsvarar uppskattat inflöde år 2040 för Käppala och Henriksdal, respektive år 2022 för Kungsängsverket. Utifrån basfallet har sedan fyra scenarier för inflödet till respektive verk modellerats:

1. *Åldrande av ledningsnät* – ökad infiltration till följd av försämrade ledningar vilket leder till mer inläckage.
2. *Reparation av ledningsnät* – minskad infiltration tack vare underhåll av ledningsnät och minskat inläckage.
3. *Asfaltering* – ökad snabb avrinning till följd av att andelen hårdgjorda ytor i staden ökar.
4. *Reparation av felaktiga anslutningar* – minskad snabb avrinning tack vare att felaktiga nätanslutningar åtgärdas.

För att ta fram inflödet för basfallet har inflödesmodellerna kalibrerats utifrån data från ett referensår för respektive verk och sedan har belastningen ökat motsvarande de antal tillkommande personekvivalenter (pe) som förväntas vara anslutna enligt respektive verks framtidsscenario.

För inflödesscenarioerna har för varje fallstudie två olika modellparametrar ökat respektive minskats med 50 %. Den ena var grundvatteninfiltration till ledningsnät (gw_bias) för att representera scenarierna *Åldrande av ledningsnät* respektive *Reparation av ledningsnät*. Den andra var andel hårdgjord yta (imp_frac) i avrinningsområdet vilket representerade scenarierna *Asfaltering* respektive *Reparation av felaktiga anslutningar*. Detaljer om inflödesmodelleringen och kalibrering av inflöde för de olika fallstudierna återfinns i Bilaga 2, 3 och 4 för Henriksdals reningsverk, Käppalaverket och Kungsängens reningsverk.

4.2.2 Processmodellering

Precis som i det föregående projektet SIMFRAM användes dynamisk processmodellering. En dynamisk modell kan simulera ett system (i vårt fall ett avloppsreningsverk) dynamiskt, d.v.s. följa hur systemet förändras över tid. Detta modelleras matematiskt med hjälp av differentialekvationer. I många fall kan även statiska modeller användas när det antas att ingenting i modellen varierar över tid. Fördelen med en statisk modell är att den är enklare och tar kortare tid att simulera. Nackdelen är att det inte går att följa exempelvis belastnings- eller årstidsvariationer i modellen. För denna rapports syfte är en dynamisk modell att föredra, just eftersom modellen då kan beskriva hur ett reningsverk fungerar vid olika tider på dagen (belastningsvariationer) eller på året (säsongvariationer).

I detta arbete har processsimuleringar utförts i MATLAB®/Simulink® med modellen Benchmark Simulation Model No. 2 Greenhouse gas, BSM2G (Flores-Alsina *et al.*, 2014). BSM2G är en kombination av flera delmodeller och täcker in ett avloppsreningsverk från försedimentering till slamlagring. De två viktigaste delmodellerna är ASMN vilket är en utökad version av Activated Sludge Model No. 1, ASM1 (Henze *et al.*, 2000) och Anaerobic Digestion Model No. 1, ADM1 (Batstone *et al.*, 2002). ASM1 beskriver oxidation av kol samt nitrifikation och denitrifikation av kväve från ammonium (NH_4^+) via nitrat (NO_3^-) till kvävgas (N_2). ASMN är utöver detta kombinerad med en dynamisk modell över lustgasavgång från aktivslamprocessen (Flores-Alsina *et al.*, 2014). ADM1 är en dynamisk modell över en rötningsprocess. Förutom ASMN med lustgasmodell och ADM1 inbegriper BSM2G modeller över sedimentering, avvattning och lagring av slam.

De processmodeller som använts i detta projekt togs fram och kalibrerades i SIMFRAM för respektive fallstudie. För mer information om processmodelleringen, se rapporten för SIMFRAM (Åmand *et al.*, 2016). För samtliga tre verk motsvarade modellerna förväntade framtida processkonfiguration och simulerades med förväntade framtida belastning och utsläppskrav, se Tabell 1. Dessa avspeglar antaganden som respektive VA-organisation gjort i sina framtidsanalyser. Antaganden om förändrad belastning är baserat på prognoser om inflyttning och påkopplingar. Idag vet reningsverken inte exakt vilka utsläppskrav de har att vänta, de krav som använts i modelleringen baseras på de krav som respektive verk förutspår att de kommer att ha. Läs mer om respektive fallstudie i Bilaga 4-6 där de olika processmodellerna beskrivs och eventuella förändringar från föregående projekt redovisas.

Tabell 1. Sammanfattning av belastning, processkonfiguration och utsläppskrav för de tre fallstudierna. DF = direktfällning, SF = simultanfällning, FF = förfällning, EDN = efterdenitrifikation, HFLR = högflödesrening, MBR = membranbioreaktor. Utsläppskrav angivna som halter i mg/L. Tot-N = totalkväve, Tot-P = totalfosfor.

	Henriksdal	Käppala	Kungsängen
Belastning	1 621 000 personer	900 000 personer	140 000 personer och minskad industri
Process	Process 2012 +MBR + HFLR + EDN + DF	Process 2012 -SF + HFLR + FF + EDN + Anammox	Process 2013-2014
Krav	6 Tot-N (år), 0,2 Tot-P (år)	6 Tot-N (år), 0,2 Tot-P (år)	10 Tot-N (år), 0,2 Tot-P (kvartal)

Processmodellerna har simulerats med det modellerade inflödet för basfallet (motsvarande Scenario 3 i SIMFRAM) samt de inflödesscenarier som presenterades i avsnittet ovan. Inga förändringar i processmodelleringen eller styrning har gjorts mellan dessa scenarier.

4.2.3 LCA

LCA är en metod som används för att skapa en helhetsbild över miljöpåverkan från en produkts livscykel – från vaggan till graven. I en LCA inkluderas resursåtgång, avfallsproduktion, energianvändning och transporter för alla mellanled. I denna studie studeras en process, d.v.s. reningsprocessen, snarare än en produkt, och ett års drift av processen har studerats. Konstruktion och rivning av reningsverket inkluderas därmed inte.

För att utföra LCA-modelleringen har programmet GaBi Professional 8.6 använts. GaBi Professional är en av världens mest använda mjukvaror inom LCA. Den har utvecklats i mer än 20 år och innehåller en robust intern databas med mer än 7 000 profiler med livscykelinventeringar (LCI) som är färdiga att använda.

LCA:n i denna studie omfattar aktiviteter som är direkt kopplade till, eller ett resultat av, reningen av avloppsvatten. Produktion och transport av kemikalier till reningsprocessen, samt produktion av den el som köps in, ingår också. I denna studie, till skillnad från SIMFRAM, studerar vi inte användningsfasen av biprodukter från reningsprocessen såsom rötgas och slam. Alla scenarier har modellerats som bokförings-LCA:er för att fristående vara kompletta, då de skiljer sig mycket åt, men kan jämföras med varandra för att studera skillnader mellan fallen. I en bokförings-LCA, till skillnad från en konsekvens-LCA, studerar man inte effekten av att biprodukter kan användas för att ersätta andra resurser i ett utökat systemperspektiv.

Livscykelanalysen utfördes enligt ISO 14044.

För att kvantifiera den potentiella miljöpåverkan från reningsverkens processer valdes ett antal miljöpåverkanskategorier ut, se Tabell 2. Dessa är framtagna av CML (Centrum voor Milieukunde –Universiteit Leiden, 2002) och inom LCA generella och gängse använda (Guinée *et al.*, 2002). Metoderna är vetenskapligt baserade på kemiska och biologiska reaktioner i luft, vatten och mark, samt uppskattade resurstillgångar på jorden. Kategorierna analyserar potentiella miljöeffekter.

Enheterna är referensenheter där alla utsläpp normaliserats till referensenheten med hjälp av karaktäriseringsfaktorer. Lustgas är till exempel normaliserad till koldioxidekvivalenter genom att mängden lustgasutsläpp multiplicerats med faktorn 298, då lustgas har en 298 gånger kraftigare påverkan på global uppvärmning jämfört med koldioxid, per kg utsläpp av respektive gas (i ett 100-årigt perspektiv).

Tabell 2. Lista över miljöpåverkanskategorier som analyseras i studien. Med fossila resurser menas energiinnehållande fossila tillgångar såsom kol, olja och naturgas, extraerade ur geosfären. Uran är inte inräknat. Materialresurser är icke energiinnehållande naturresurser såsom metaller och fosfor, extraerade ur geosfären. Även uran räknas hit.

Miljöpåverkanskategorier (CML2002)		
Svenskt kortnamn	Engelsk långt namn	Enhet (eng)
Klimat (ej biogent kol)	CML2001 - Jan. 2016, Global Warming Potential, excl biogenic carbon (GWP 100 years)	kg CO ₂ -Equiv.
Övergödning	CML2001 - Jan. 2016, Eutrophication Potential (EP)	kg PO ₄ -Equiv.
Försurning	CML2001 - Jan. 2016, Acidification Potential (AP)	kg SO ₂ -Equiv.
Fossila resurser	CML2001 - Jan. 2016, Abiotic Depletion Potential (ADP fossil)	MJ
Materialresurser	CML2001 - Jan. 2016, Abiotic Depletion Potential (ADP elements)	kg Sb-Equiv.

Den *funktionella enheten* är den räknebas på vilken livscykelanalysen utförs. Detta kan till exempel vara en viss funktion eller en viss mängd (kg, m³) av något. I denna studie har valts att studera resultatet i ljuset av två funktionella enheter: 1 m³ behandlat avloppsvatten och 1 kg avskilt Tot-N. Båda dessa enheter är av intresse för att belysa skillnader mellan de olika scenarierna då utsläppskrav kan vara kopplade både till halter (per m³ behandlat vatten) och totala mängder (kg utsläpp per tid).

I samtliga scenarier för de tre verken har svensk elmix antagits för beräkning av miljöpåverkan från användning av elenergi.

4.3 Kostnadsberäkning

SIMFRAM-metodiken har kompletterats med kostnader för energi och resurser (d.v.s. de kemikalier som förbrukas i reningsprocessen). I kostnadsberäkningen användes schablonpriser för energi och resurser. Dessa togs fram i samråd med de tre fallstudierna. De gemensamma schablonpriserna applicerades på modellerat energi och resursbehov för respektive reningsverk och scenario. Använda schablonpriser återfinns i Tabell 3.

Tabell 3. Schablonpriser i kostnadsberäkningen.

Resurs	Pris	Enhet
El	0,9	kr/kWh
Fjärrvärme	0,4	kr/kWh
Eldningsolja	1,2	kr/kWh
Kolkälla	5,5	kr/kg
Järnklorid	1,7	kr/kg
Järnsulfat	0,55	kr/kg
Polyaluminiumklorid	2,3	kr/kg
Slam	0,7	kr/kg
Polymer	25	kr/kg
Natriumhypoklorit	2,5	kr/kg
Citronsyra	6,95	kr/kg

Kostnadsberäkningen har även inkluderats i beslutsstödsverktyget där priser på olika kemikalier och olika typer av energislag kan justeras av användaren.

4.4 Avgränsningar

I projektet har vissa metodval gjorts vilket lett till ett antal avgränsningar. De viktigaste finns sammanfattade nedan.

Alla miljöpåverkanskategorier i livscykelanalysen har ej redovisats utan endast de fem som rapportförfattarna sett som viktigast: klimatpåverkan, övergödning, försurning samt förbrukning av fossila och materiella resurser.

I denna rapport görs ingen sammanvägning av de fem miljöpåverkanskategorierna. Det finns metoder för att vikta samman en "total" miljöpåverkan från flera kategorier, men alla sådana försök är alltid avhängiga av subjektiva antaganden. Vi lämnar därför åt läsaren att göra en kvalitativ bedömning av hur viktigt det t.ex. är att undvika en ökad klimatpåverkan när övergödningspotentialen minskar.

Projektet har undersökt miljöpåverkan från ett års drift av reningsverken i fallstudierna. Därmed har inte miljöpåverkan som uppkommer till följd av bygg- eller rivarbeten tagits med i beräkningarna.

Användning av reningsverkens biprodukter, slam och biogas, ingår inte i denna studie. För den intresserade hänvisar vi till rapporten från SIMFRAM, se Åmand et al. (2016).

Den biologiska processmodell som använts för denna studie, ASMN, inkluderar ingen beskrivning av omvandling av fosfor. Modellen valdes för att det ansågs viktigt att få en beskrivning av avgången av lustgas från processen. Valet av modell innebär att fosfor inte har simulerats dynamiskt utan att det för varje fallstudie skett ett antagande om hur fosforkoncentrationen ska modelleras.



Eftersom fosfor inte modelleras dynamiskt finns det ingen direkt korrelation mellan utgående fosfor och resursförbrukning, t.ex. mängden fällningskemikalie i modellen.

Fosforkoncentrationerna och förbrukad mängd fällningskemikalier redovisade i denna rapport ska därför tolkas med största försiktighet.

Modellerna har simulerat reningsprocesserna i projektets tre fallstudier utan störningar på processerna. Det innebär att de utsläppsvärden som redovisas motsvarar en lägsta uppskattning av verkliga koncentrationer. Detta gäller särskilt fosfor, där en liten störning kan påverka utgående koncentrationer i stor omfattning.

5 Resultat och diskussion

5.1 Inflödesmodellering

Inflödesmodelleringen resulterade i fem inflöden för respektive fallstudie där mängden vatten som infiltrerar ledningsnätet och den snabba avrinningen varierades. En ändring av grundvatteninfiltrationen med 50 % motsvarade inte en ändring av den totala infiltrationen med lika stor andel eftersom även nederbörden påverkar den totala infiltrationen. Därför är scenarierna som rör infiltration olika för de olika fallstudierna. Däremot påverkar andel hårdgjord yta direkt den snabba avrinningen som i de olika scenarierna för samtliga fallstudier ökats respektive minskats med 50 % från basfallet.

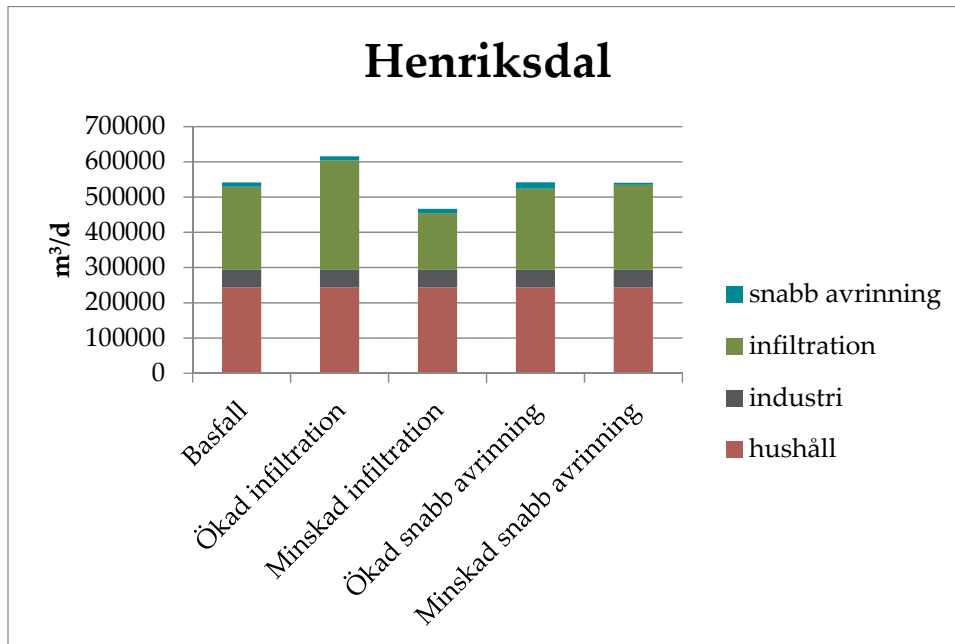
Skillnaderna i flöde mellan de olika scenarierna var störst för Kungsängsverket och minst för Käppalaverket. Nedan kommer en sammanfattning av de modellerade inflödena för respektive fallstudie. Detaljer om själva inflödesmodellen finns i Bilaga 1 och detaljer kring kalibreringen finns i Bilaga 2-4 för respektive verk. Resultaten som presenteras i detta avsnitt är resultat från simulering med kalibrerade modeller för inflöde.

Henriksdal

För Henriksdals basfall var det totala inflödet 541 000 m³/d, varav 44 % var infiltration och 2,2 % snabb avrinning. Inflödet modellerades som fyra delflöden; Henriksdal, Sickla, Bromma och Eolshäll. Även den framtida tunneln in till verket modellerades. De nederbördsdata som användes var från 2012 och hade en total nederbörd på 681 mm/år. Mer detaljer om inflödesmodelleringen och kalibrering av inflöde redovisas i Bilaga 2 Fallstudie Henriksdals reningsverk.

I scenarierna varierade infiltrationen mellan 35 % som lägst och 50 % som högst och den snabba avrinningen varierade mellan 1,1 % och 3,4 %.

Totalt inflöde till Henriksdal uppdelat på bidrag från hushåll, industri, infiltration och snabb avrinning visas för basfallet och de fyra scenarierna i Figur 2.



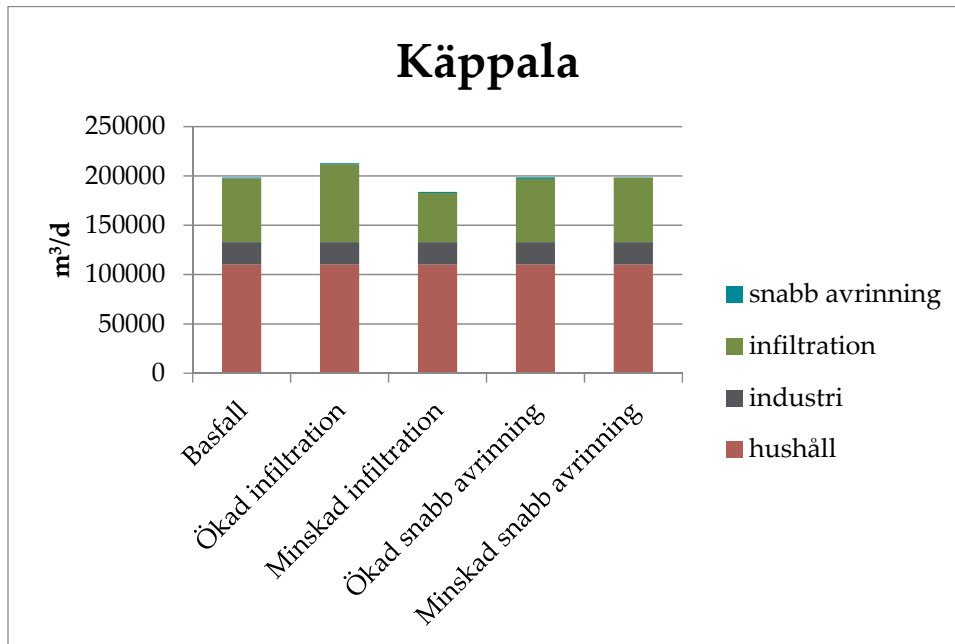
Figur 2. Modellerat inflöde till Henriksdal för basfallet och de fyra scenarierna.

Käppala

För Käppalaverkets basfall var det totala inflödet 198 000 m³/d, varav 33 % var infiltration och endast 0,5 % snabb avrinning. Anledningen till att den snabba avrinningen är att inflödet till Käppalaverket uppvisade få höga flödestoppar i samband med nederbörd. Detta kan bero på större andel icke-hårdgjord yta och mindre andel kombinerade system i avrinningsområdet jämfört med övrigt verk. Stora förenklingar gjordes dessutom vid modellering av Käppalas inflöde. Verket tar emot vatten från 11 kommuner men modellerades som ett enda avrinningsområde och endast en nederbördsdata, placerad i Tullinge (som inte är en del av Käppalas upptagningsområde), användes vid modelleringen. Käppala har även en tunnel där de har möjlighet att buffra viss volym genom att operatörerna styr nivån i tunneln vilket bidrar till dämpning av höga flödestoppar. Varken tunnel eller styrning av flödet har modellerats. Trots dessa förenklingar var överensstämmelsen mellan modellerad flödesprofil och mätdata vid kalibreringen fullt acceptabel för syftet med detta projekt. De nederbördsdata som användes var från 2012 och hade en total nederbörd på 783 mm/år. Mer detaljer om inflödesmodelleringen och kalibrering av inflöde redovisas i Bilaga 3 Fallstudie Käppalaverket.

I scenarierna varierade infiltrationen mellan 27 % som lägst och 37 % som högst och den snabba avrinningen varierade mellan 0,26 % och 0,77 %. Käppala var den fallstudie med minst variation i totalt inflöde mellan de olika scenarierna. Detta på grund av att mängden tillskottsvatten till verket var lägst redan i basfallet.

Totalt inflöde till Käppala uppdelat på bidrag från hushåll, industri, infiltration och snabb avrinning visas för basfallet och de fyra scenarierna i Figur 3.



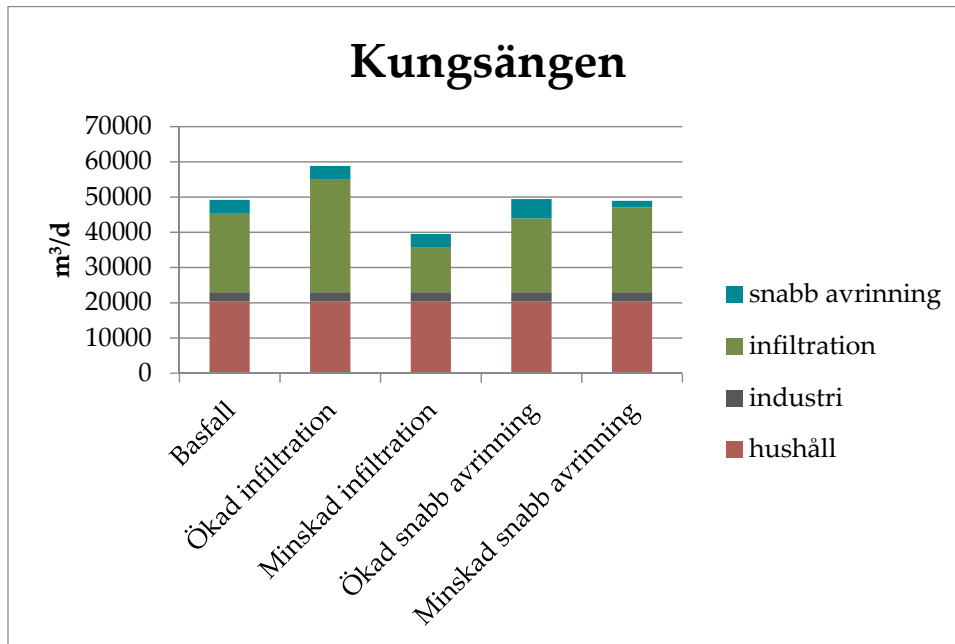
Figur 3. Modellerat inflöde till Käppala för basfallet och de fyra scenarierna.

Kungsängsverket

För Kungsängsverkets basfall var det totala inflödet 49 000 m³/d, varav 46 % var infiltration och 7,5 % snabb avrinning. De nederbördsdata som användes var från september 2013 till och med augusti 2014 och hade en total nederbörd på 352 mm/år. Jämfört med efterföljande år (september 2014 till och med augusti 2015 som hade total nederbörd 407 mm/år) var detta ett något torrare år. Trots detta gav kalibreringen något högre infiltration och snabb avrinning än uppgifter från Kungsängsverket. Mer detaljer om inflödesmodelleringen och kalibrering av inflöde redovisas i Bilaga 4 Fallstudie Kungsängsverket.

I scenarierna varierade infiltrationen mellan 32 % som lägst och 55 % som högst och den snabba avrinningen varierade mellan 3,8 % och 11,2 %.

Totalt inflöde uppdelat på bidrag från hushåll, industri, infiltration och snabb avrinning visas för basfallet och de fyra scenarierna i Figur 4.



Figur 4. Modellerat inflöde till Kungsängsverket för basfallet och de fyra scenarierna.

5.2 Processmodellering – hur påverkas reningen av förändrat inflöde

Den kalibrerade processmodellen för respektive verk simulerades med de fem olika inflödesscenarierna från inflödesmodelleringen. I detta avsnitt presenteras de övergripande resultaten från processmodelleringarna, mer detaljerade resultat finns i Bilaga 2-4 för respektive fallstudie.

Eftersom variation av tillskottsvatten inte påverkar föroreningsmängden har föroreningsbelastningen varit densamma i samtliga scenarier för respektive verk. Skillnaden har varit hur höga flödestoppar som nått verket och den totala volymen vatten som behöver behandlas.

Generella resultat för samtliga fallstudier är att skillnaderna mellan scenarierna är små för båda funktionella enheterna. Vid tolkning av resultaten bör man ha i åtanke att vid ett högre flöde divideras miljöpåverkan med ett större värde när funktionell enhet per m³ används. Detta innebär att högre resursförbrukning, t.ex. mer pumpning vid ökat inflöde inte ger något extra utslag i miljöpåverkan, även om total energiförbrukning de facto varit högre.

Scenariot *Åldrande av ledningsnät* som innehöll ökad infiltration medförde att en mindre mängd föroreningar behöver renas bort för att nå samma utgående halt. Detta medförde i sin tur att den årliga resursförbrukningen minskade, dock åtgick mer resurser per avskild mängd kväve. Bidraget från ökad pumpning vid högre inflöde fördelas på färre kg kväve som avskilt, men

det är mindre resurskrävande i form av t.ex. kolkälla att rena färre kg kväve och således blir skillnaderna mellan scenarierna små.

Det omvända gällde för scenariot *Reparation av ledningsnät* som motsvarade minskad mängd tillskottsvatten.

För samtliga fallstudier var bidraget från den snabba avrinningen som studerades i scenarierna *Asfaltering* och *Reparation av felaktiga anslutningar* så låg för att det endast påverkade utgående halter och resursförbrukning marginellt sett till årsmedelvärden. Reningskraven överskreds inte i något scenario för något av de tre reningsverken.

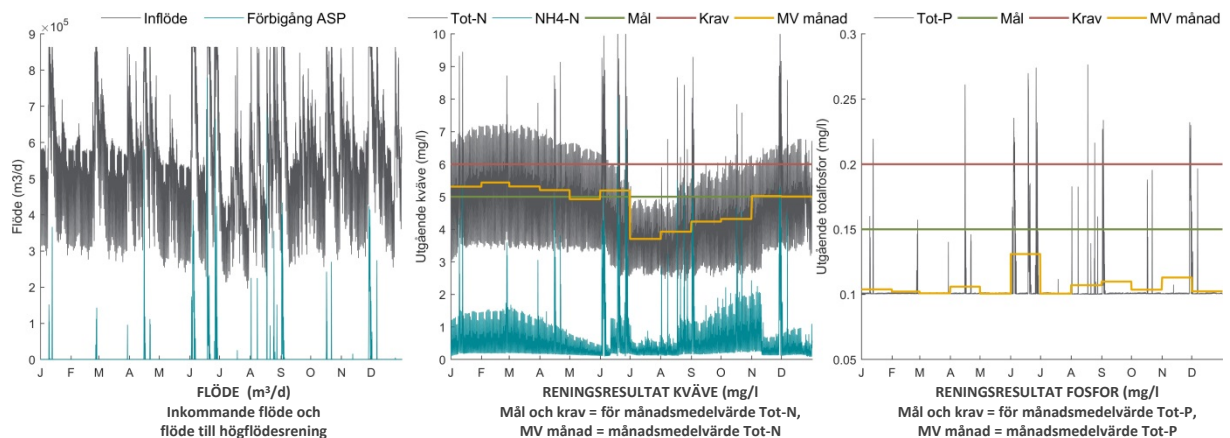
Henriksdal

Henriksdals reningsverk har sedan SIMFRAM genomfördes fått nya tillståndskrav. Kraven har ännu inte börjat gälla, men för simuleringar av framtidsscenarioet (2040) som studeras i detta projekt har gränsvärdena uppdaterats. Gränsvärde för utgående totalkväve är satt till 6 mg/l, ammoniumkväve 2 mg/l, totalfosfor 0,2 mg/l, och utgående BOD till 6 mg/l. Gränsvärdena gäller som kalenderårsmedelvärde utom för ammoniumhalten som gäller under perioden 1:a juni till 31:a oktober. Produktionsmålen för totalkväve och totalfosfor är satta till 5,0 mg/l respektive 0,15 mg/l. I simuleringarna är föroreningsbelastningen in till reningsverket densamma för samtliga scenarier. Flödet skiljer sig dock mellan de olika fallen vilket gör att inkommande koncentrationer varierar.

För samtliga scenarier (inklusive basfallet) kommer en del av det förbehandlade vattnet att behöva förbiledas biosteget vid höglödestillfällen. I scenarierna med ökad infiltration, samt större hårdgjord yta, ökar både de förbiledade mängderna samt antalet förbiledningstillfällen. Ökad infiltration var det scenario som hade störst påverkan på både mängder och förbiledningstillfällen. Även större andel hårdgjord yta resulterade i en ökning av de förbiledade mängderna, men antalet förbiledningstillfällen ökade bara med några enstaka tillfällen.

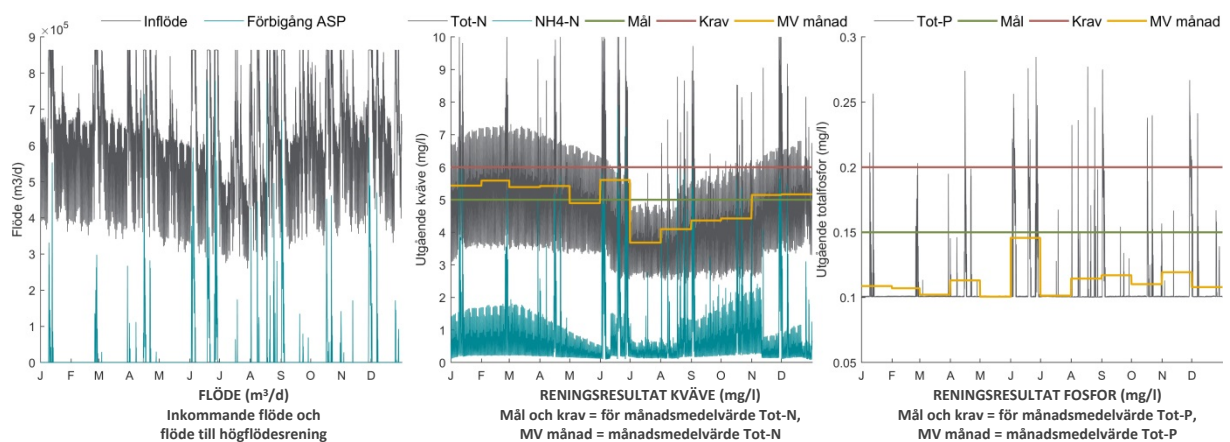
Minskad infiltration gav både färre förbiledningstillfällen samt mindre mängder som förbiledades vid varje tillfälle. Minskad andel hårdgjord yta gav något mindre mängder men antalet förbiledningstillfällen var i princip oförändrat.

I samtliga scenarier underskreds utgående gränsvärden för BOD, kväve och fosfor. När det gäller produktionsmålet för totalkväve så överskreds halterna något under årets första 6 månader medan de ligger under produktionsmålet under resten av året. Detta gäller för samtliga scenarier utom för scenariot med ökad infiltration där utgående totalkväve överskrider produktionsmålet även under årets två sista månader. För totalfosfor ligger halterna under produktionsmålet under hela året för samtliga fall. Nedan visas figurer över inflöde, förbilet vatten samt utgående halter av kväve och fosfor (se Figur 5 till och med Figur 9 nedan).



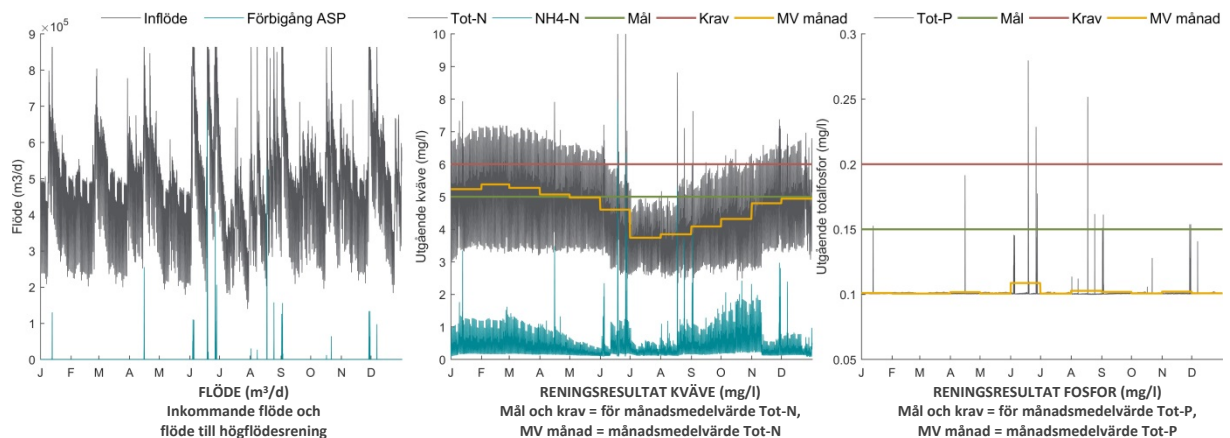
Figur 5. Henriksdal Basfall.

En viktig skillnad vid simulering av Henriksdals basfall jämfört med scenario 3 i tidigare SIMFRAM-projektet är att inkommande belastning har justerats vilket medfört en lägre kvävebelastning och förändrad kol-kvävekvot. Förändringarna har framförallt påverkat kolkälleförbrukningen, som minskat markant jämfört med i SIMFRAM. I detta projekt har även en styrstrategi, för luftningen av flexzoner, som prioriterar att minska kolkälleförbrukningen framför nitrifikationen använts. I Figur 5 syns resultatet av varierat antal luftade zoner på utgående totalkvävehalt som större hopp i kurvan mellan juni-juli och oktober-november.



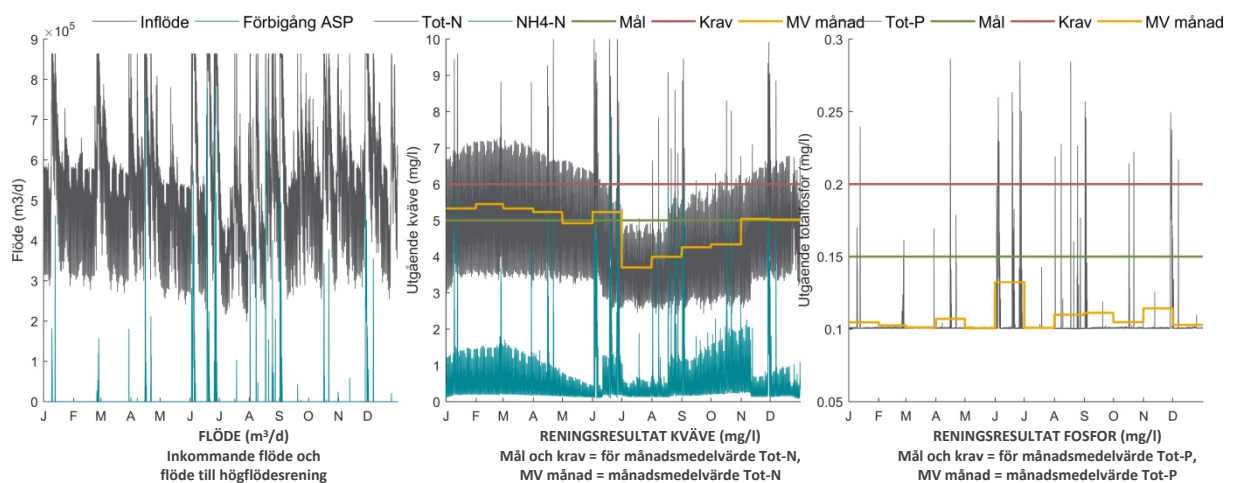
Figur 6. Henriksdal scenario 1 - ökad infiltration.

Flöden och reningsresultat för scenario 1, ökad infiltration, visas i Figur 6. Vid ökad infiltration ökar antalet tillfällen då vatten förbileds biosteget. Även de förbileda mängderna ökar i detta scenario. Halten utgående totalkväve ökar något jämfört med basfallet. Utgående totalfosforhalt ligger som månadsmedelvärde under produktionsmålet med toppar i samband med höglödestillfällena.



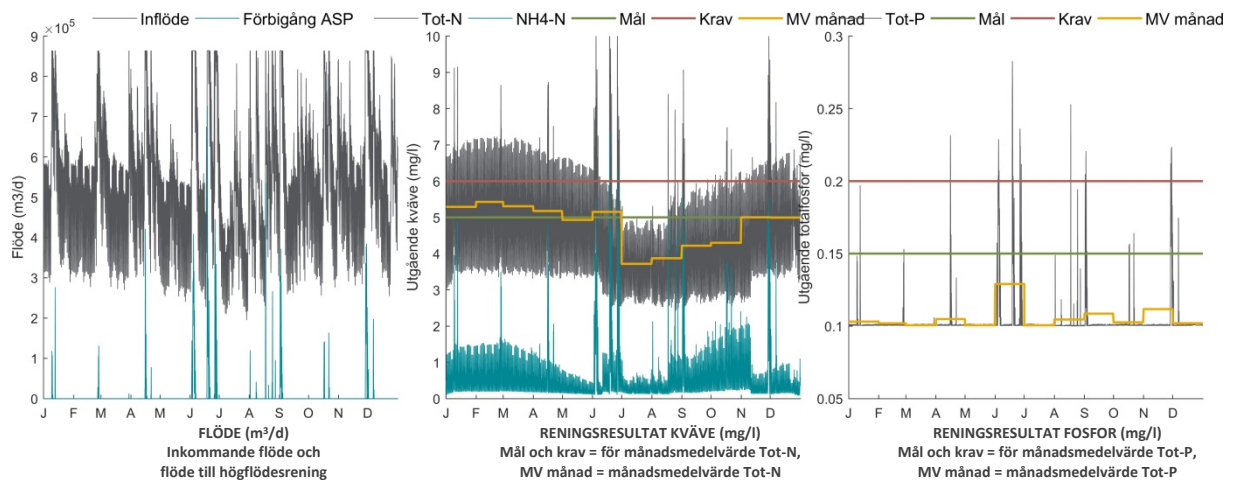
Figur 7. Henriksdal scenario 2 - minskad infiltration.

Figur 7 visar reningsresultat och flöden för scenario 2, minskad infiltration. Vid detta scenario minskar antalet tillfällen då vatten förbileds biosteget. Även de förbileda vattenmängderna minskar. Utgående halt av totalkväve blir också lägre jämfört med basfallet. Med färre förbiledningstillfällen minskar också antalet fosfortoppar och månadsmedelvärdena för utgående totalfosfor blir lägre jämfört med basfallet.



Figur 8. Henriksdal scenario 3 - ökad andel hårdgjord yta/snabb avrinning.

I Figur 8 visas resultaten för scenario 3, ökad andel hårdgjord yta/snabb avrinning. Jämfört med basfallet är antalet förbiledningstillfällen några enstaka fler. De förbileda mängderna är också något större än i basfallet medan de utgående halterna av totalkväve och totalfosfor ligger på i stort sett samma nivå som för basfallet. Jämförs scenario 3 med scenario 1, ökad infiltration, ses att förbileda mängder är större i scenario 1 och att även utgående halter är högre för scenario 1. Detta tyder på att infiltrationen har en större påverkan på utsläppshalterna än den snabba avrinningen.



Figur 9. Henriksdal scenario 4 - minskad andel hårdgjord yta/snabb avrinning.

Vid minskad andel hårdgjord yta, scenario 4, är antalet förbiledningstillfällen lika många som i basfallet men mindre mängder förbileds, se Figur 9.

En jämförelse av utgående vattenkvalitet som årsmedel och total volym vatten som förbiletts biosteget visas för de olika scenarierna i Tabell 4. Totalkvävehalten i utgående vatten varierade mellan 4,7 mg/L och 5,0 mg/L som årsmedel för de olika scenarierna. I scenario 2 minskad infiltration, minskade mängden förbilet vatten till omkring 20 % av mängden i basfallet. Med ökad infiltration mer än fördubblades volymen förbilet vatten. Förändringar i hårdgjord yta/snabb avrinning påverkade endast mängden förbilet vatten i storleksordningen 15 % från mängden i basfallet. Mer detaljerade resultat från simuleringarna återfinns i Bilaga 2 Fallstudie Henriksdal.

Tabell 4. Jämförelse av utgående vattenkvalitet för de olika scenarierna vid Henriksdals reningsverk.

	Basfall	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Totalkväve (mg N/L)	4,8	5,0	4,7	4,8	4,8
Ammoniumkväve (mg N/L)	0,7	1,0	0,5	0,8	0,7
Nitratkväve (mg N/L)	3,5	3,4	3,7	3,5	3,6
Totalfosfor (mg P/L)	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11
Total volym förbilet bio (m³/år)	3 458 300	7 362 800	661 080	3 995 800	2 959 500

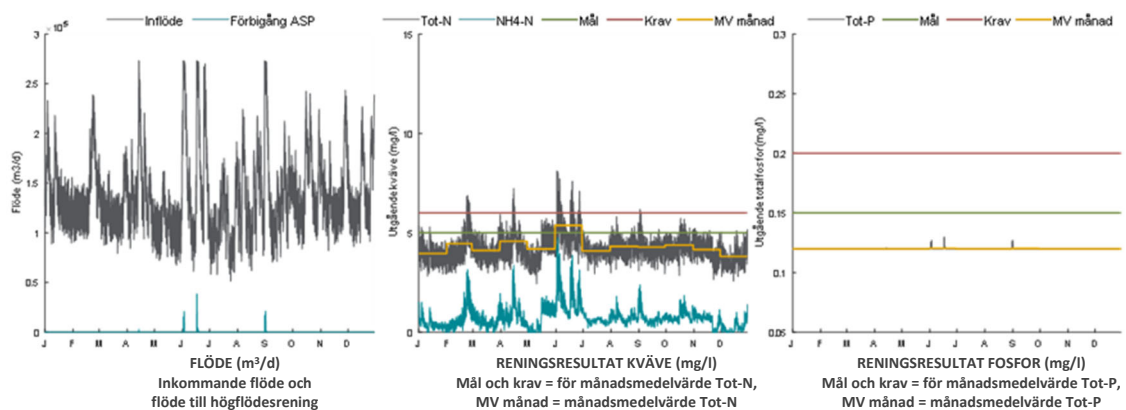
För Henriksdals reningsverk gjordes en känslighetsanalys avseende temperatur för scenariot med ökad infiltration. Scenario 1 simulerades ytterligare en gång och temperaturen på inkommande vatten minskades med två grader, från i medel 15,7 grader till 13,7 grader. Utgående data från processimuleringarna jämfördes mot de från Scenario 1.

Jämförelsen visade att de mest betydande förändringarna till följd av två grader kallare temperatur på inkommande vatten var att kolkälledoseringen ökade med 139 %, lustgasavgången från biosteget minskade med 15 % och utgående totalkväve ökade med 8 % (från 4,96 till 5,34 mg/L).

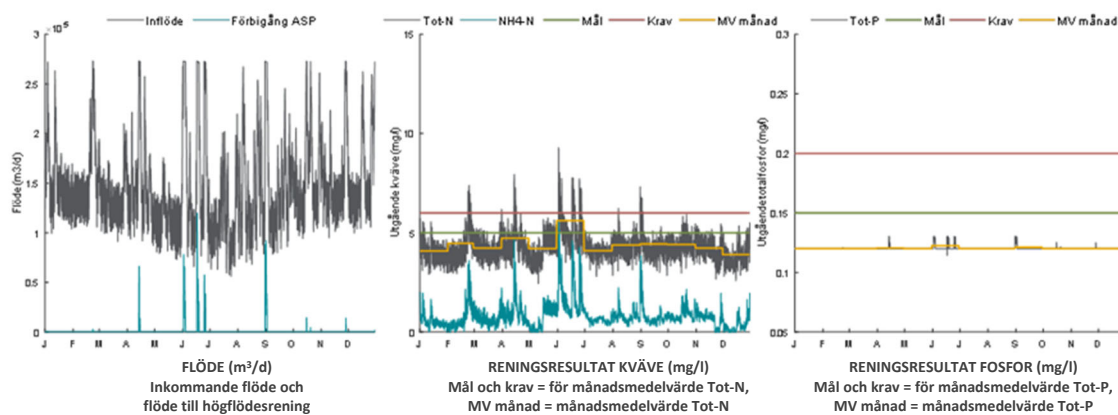
Överskottslamproduktionen, och därigenom pumpning och polymer för förtjockning av överskottslam ökade med i storleksordningen 4 %. Totala slamproduktionen ökade med i storleksordningen 1 %.

Käppala

Belastningen in till reningsverket avseende föroreningsmängder var densamma för samtliga scenarier, men eftersom inflödet var olika mellan scenarierna har inkommande koncentrationer varierat. Sammanställning av flöden och reningsresultat för samtliga scenarier finns i Bilaga 3. För Käppalaverket blev det inte någon nämnvärd skillnad i resultat när man jämför basfallet med de två scenarierna med ändrad andel hårdgjord yta, utom det som tas upp om högflödesreningen nedan. Detta är inte förvånande eftersom modellerad mängd tillskottsvatten från snabb avrinning utgjorde så liten del av det totala inflödet till verket (ca 0,5 %). Detta är ett resultat av kalibreringen av inflödesmodellen, där effekten av nederbörd kalibrerades mot ett styrt inflöde till verket där styrningen innebär en buffring i tunnelsystemet. Troligen underskattas därmed effekterna av förändrade flödestoppar i samband med regn. Scenarierna med ändrad infiltration gav däremot genomslag i resultaten. Inflöde, vatten till högflödesrening och utgående halter av kväve och fosfor visas i Figur 10 till Figur 14 nedan.

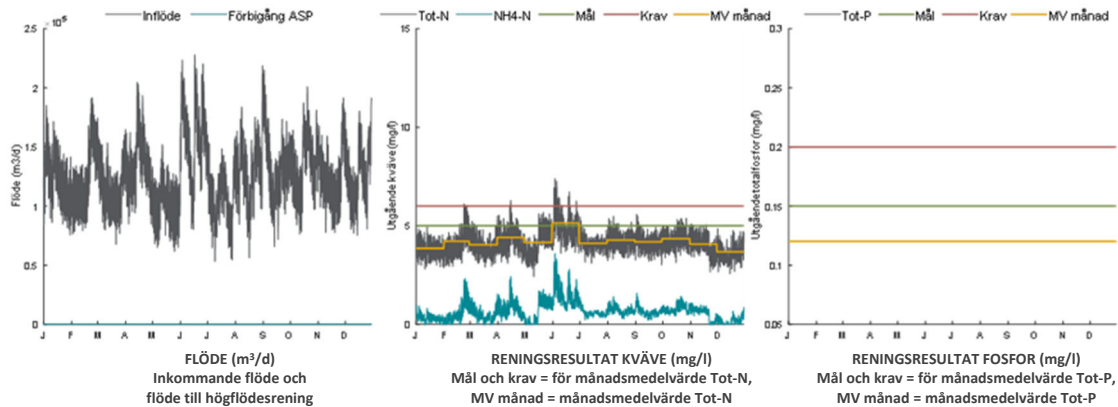


Figur 10. Käppalaverket basfall.



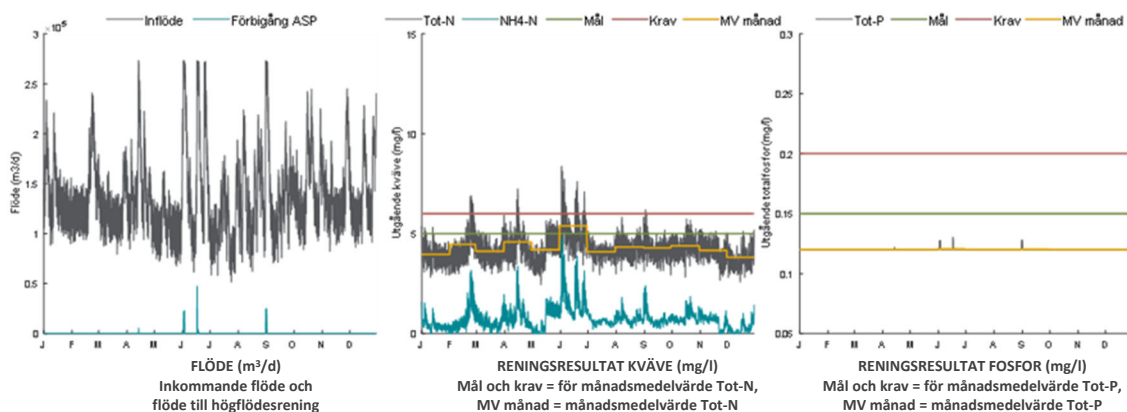
Figur 11. Käppalaverket Scenario 1, ökad infiltration.

I scenario 1 – *Åldrande av ledningsnät*, med ökad infiltration från 33 % till 37 % av totala inflödet, är kvävereduktionen något lägre än i basfallet och mängden vatten till höglödesrening signifikant högre.



Figur 12. Käppalaverket Scenario 2, minskad infiltration.

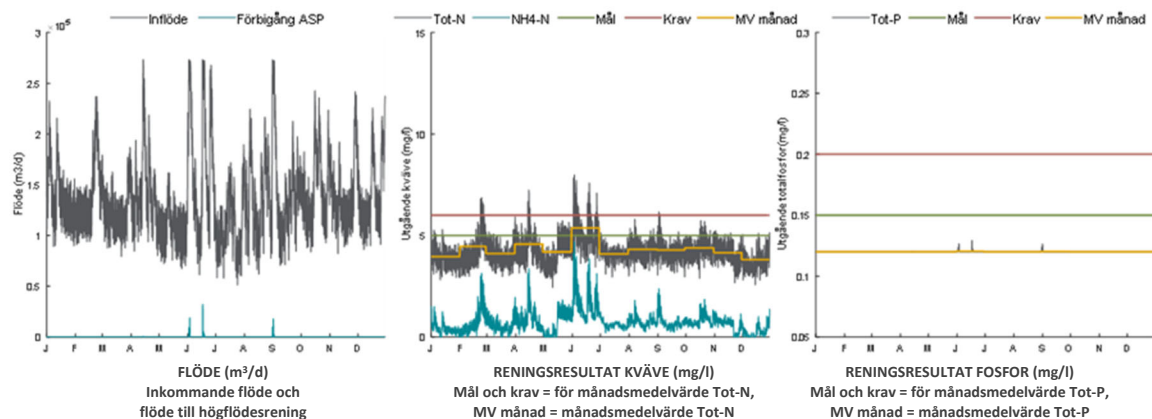
I scenario 2 – *Reparation av ledningsnät*, med minskad infiltration från 33 % till 27 % av totala inflödet, är kvävereduktionen något högre (92 %) jämfört med basfallet (91 %) och inget vatten går till höglödesrening.



Figur 13. Käppalaverket Scenario 3, ökad andel hårdjord yta/snabb avrinning.

I scenario 3 – *Asfaltering*, med ökad snabb avrinning, är flöden och reduktionsgrader mycket lika basfallet. I scenario 4 – *Reparation av felaktiga anslutningar*, med minskad snabb avrinning, förbileds mindre mängd vatten biosteget jämfört med i basfallet.

I samtliga scenarier underskreds utgående gränsvärden för kväve och fosfor, 6 respektive 0,2 mg/l som månadsmedelvärde. Jämfört med basfallet blev kvävereduktionen något mindre i fallet med ökad infiltration samt något högre i fallet med minskad infiltration. I dessa scenarier blev det således även en högre respektive lägre mängd kväve ut till recipienten.



Figur 14. Källalaverket Scenario 4, minskad andel hårdgjord yta/snabb avrinning.

Mängden vatten som går till höghödesrening varierade i de olika scenarierna, se Tabell 5. Mest vatten förbiledes biosteget i scenariot med ökad infiltration. Jämfört med basfallet får man en ökning med ca 371 000 $m^3/år$, vilket även medför en ökning av den totala kemikalieförbrukningen i höghödesreningen. I fallet med minskad infiltration gick inget vatten alls till höghödesrening. För scenarier för snabb avrinning, där andelen hårdgjord yta varierats, är det endast vid en minskad snabb avrinning som man ser en effekt på mängden vatten till höghödesrening. Då får man en minskning motsvarande ca 40 %.

Tabell 5. Totalt flöde per år till höghödesrening i respektive scenario för Källalaverket.

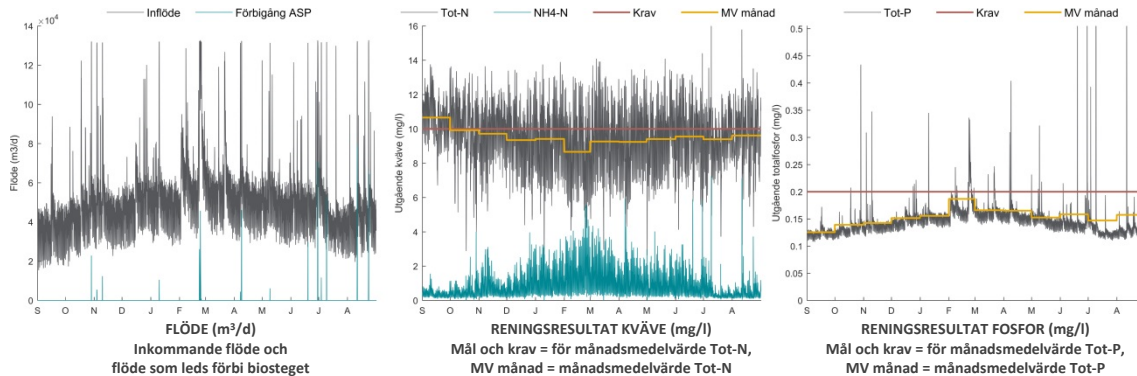
	Basfall	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Q till höghödesrening ($m^3/år$)	48 525	419 850	0	48 525	29 449

Mer detaljer kring processmodelleringen av Källalaverket återfinns i Bilaga 3.

Kungsängsverket

Kungsängsverket klarar enligt simuleringarna att hålla utgående totalkväve under 10 mg/L i samtliga scenarier. Med en ökad utspädning orsakat av ökad infiltration (scenario 1 - *Åldrande av ledningsnät*) behöver inte lika stor mängd kväve renas för att nå samma haltkrav som basfallet, dock är den utsläppta mängden totalkväve högre. På motsvarande sätt fast omvänt måste reningsverket avskilja större mängd totalkväve då inflödet är med koncentrerat (scenario 2 - *Reparation av ledningsnät*), dock blir verket mer effektivt avseende resursförbrukning per kg avskilt N vid mer koncentrerat inflöde. Inget av scenarierna hade så höga flödestoppar att det krävdes förbiledning av hela reningsprocessen, däremot påverkades mängden vatten som förbiledes biosteget.

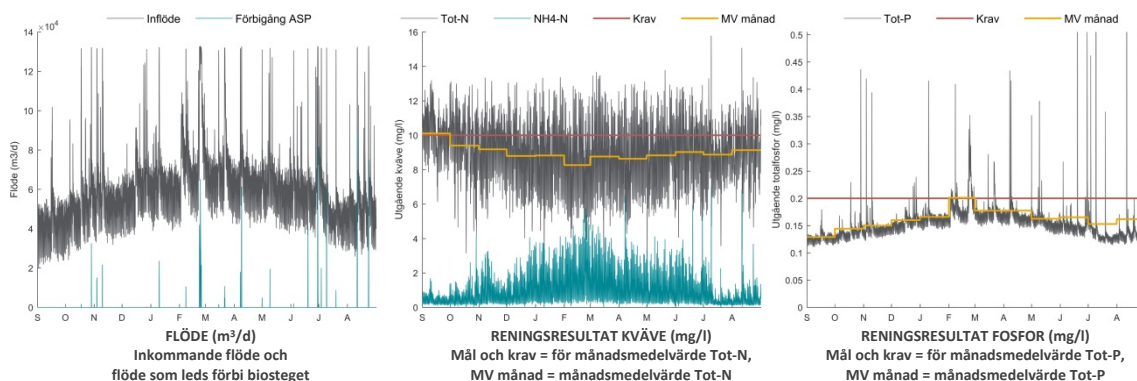
Flöde och reningsresultat för basfallet visas i Figur 15. Högst flödestoppar inträffade i samband med snösmältningstillfällena i februari och mars.



Figur 15. Kungsängsverket basfall.

Något som utmärker resultatet för basfallet är att modellerat utgående totalkväve var relativt jämt över året och att det lägsta värdet inföll under februari. Detta är ovanligt för Kungsängsverket som normalt har svårast att rena totalkväve under våren då snösmältningen sker. Förklaringen till de modellerade värdena är delvis att inkommande totalkväve var som lägst i februari men även en fråga om hur processen styrs i modellen. Ett exempel på hur resultatet från basfallet förändrades med en annan styrning återges i slutet av detta kapitel (Figur 20). Andelen förbilet vatten av årstotalen var 0,6 % och reduktionen av totalkväve var 75 % av inkommande kväve.

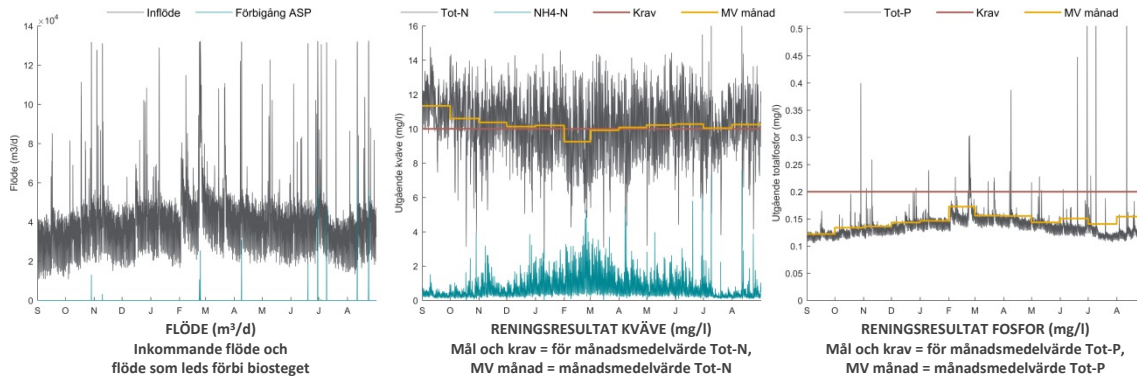
Flöde och reningsresultat för scenario 1, *Åldrande av ledningsnät*, visas i Figur 16. Med ökad infiltration kan ses att hela flödesprofilen var högre jämfört med basfallet och antalet tillfällen då vatten förbiledes biosteget var fler. Även utgående ammonium ökade något. Av månadsmedelvärden framgår dock att för utgående totalkvävehalt var lägre än basfallet under hela året vilket hänger samman med att inkommande vatten var mer utspätt. Reduktionen av totalkväve var 71 % av inkommande kväve.



Figur 16. Kungsängens reningsverk scenario 1, ökad infiltration.

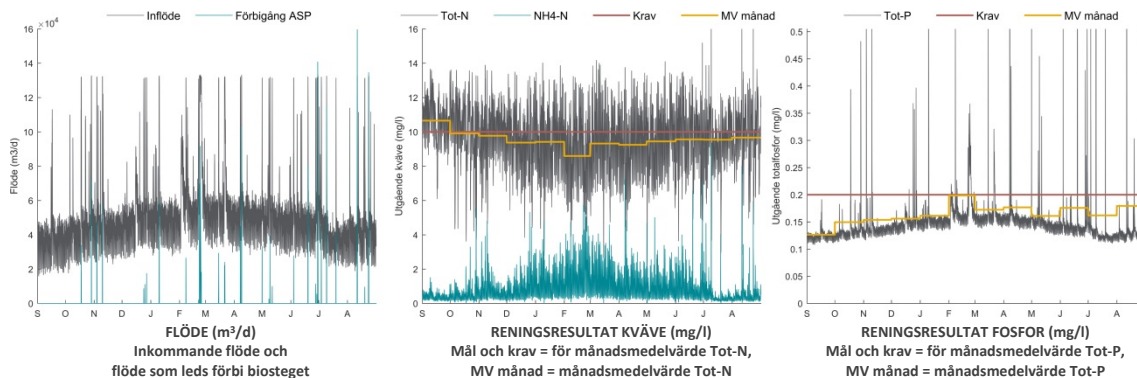
Flöde och reningsresultat för scenario 2, *Reparation av ledningsnät*, visas i Figur 17. Med minskad infiltration blir resultatet det omvända jämfört med scenario 1. Antalet förbiledningar av biosteget minskade jämfört med basfallet och utgående totalkvävehalt var generellt högre på grund av det mer koncentrerade inflödet. Reduktionen av totalkväve var högst för detta scenario, 78 % av inkommande kväve reducerades i processen. Majoriteten av månadsmedelvärdena för utgående totalkvävehalt låg över gränsen på 10 mg/L dock var

medelvärdet 10,2 mg/L vilket i praktiken skulle avrundas till 10 mg/L. Således anses inte att gränsvärdet överskridits, men scenariot är på gränsen till vad processen klarar av med denna styrning.



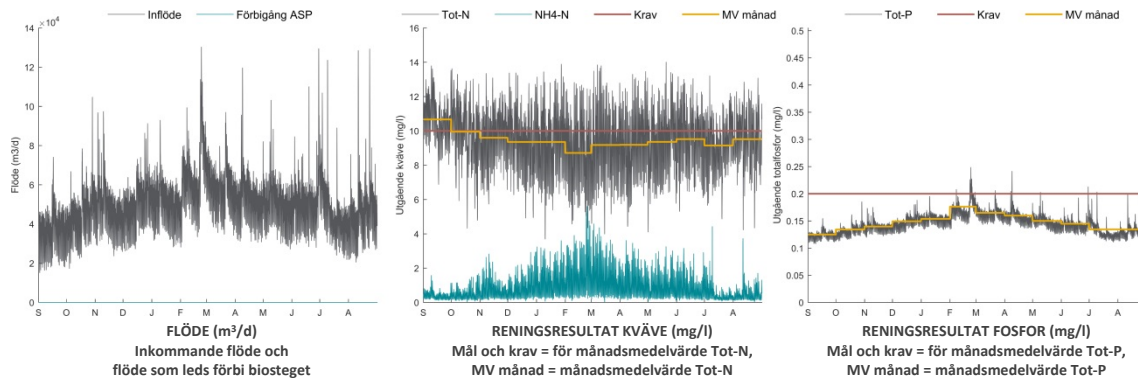
Figur 17. Kungsängens reningsverk, scenario 2, minskad infiltration.

Flöde och reningsresultat för scenario 3, *Asfaltering*, visas i Figur 18. Med ökad hårdgjord yta och snabbare avrinning blev flödestopparna vid nederbörd högre och antalet förbiledningar av biosteget fler än i något av de övriga scenarierna. Förbiledningen bidrog med 2 % av den totala mängden utgående kväve.



Figur 18. Kungsängens reningsverk, scenario 3, ökad snabb avrinning.

Flöde och reningsresultat för scenario 4, *Reparation av felaktiga anslutningar*, visas i Figur 19. Med minskad hårdgjord yta blev inga flödestoppar så höga att det krävdes förbiledning av biosteget. Utgående halter av kväve och fosfor varierade mindre jämfört med övriga scenarier, vilket tydligast kan ses för totalfosfor. Detta scenario hade lägst utgående årsmedelhalter för samtliga parametrar (BOD₅, COD, TSS, Tot-N, NH₄-N, Tot-P) utom för nitratkväve som ökade något.



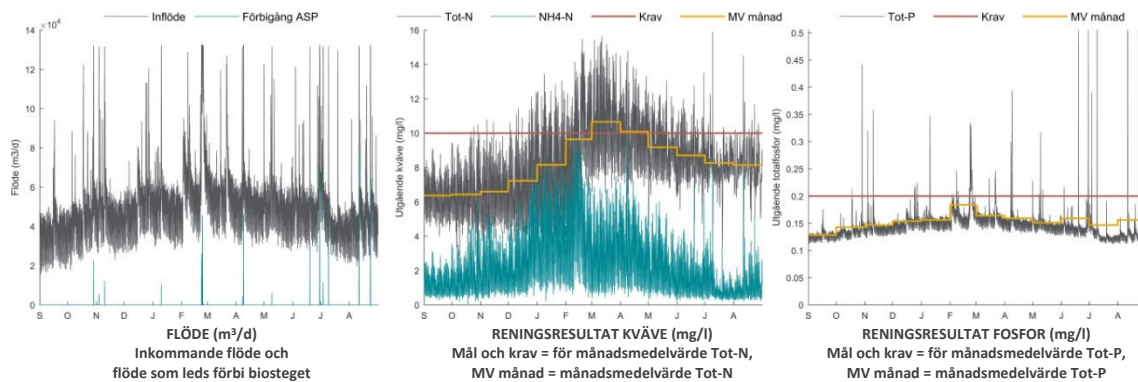
Figur 19. Kungängens reningsverk, scenario 4, minskad snabb avrinning.

En sammanställning av utgående årsmedelvärden för kväve och fosfor samt total volym som förbiletts biosteget visas i Tabell 6.

Tabell 6. Jämförelse av utgående vattenkvalitet och mängd vatten som förbiletts mellan de olika scenarierna för Kungängens reningsverk (årsmedelvärden).

	Basfall	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Totalkväve (mg/L)	9,5	8,9	10,2	9,5	9,4
Ammoniumkväve (mg/L)	1,01	1,12	0,89	1,08	0,93
Nitratkväve (mg/L)	7,6	7,0	8,5	7,6	7,7
Totalfosfor (mg/L)	0,16	0,16	0,15	0,17	0,15
Total volym förbilet bio (m³/år)	73 000	131 000	42 000	288 00	0

För att illustrera hur styrningen påverkar utgående halter har en simulering körts med en alternativ styrning. Med denna styrning justerades syrebörvärden (mellan 1 och 2 mg/L) under året och flexzonen luftades endast två korta perioder istället för konstant luftning mot syrehalt 2 mg/L i samtliga zoner inklusive flexzonen. Börvärdet för nitrat (som styrde kolkälledoseringen) varierades mellan 1,5 mg/L och 4,5 mg/L istället för att hållas fast vid 2,0 mg/L. Värden och tidpunkter för ändringar i styrning hämtades från driftdata från 2013-2014. Utöver detta ökades även nitratrecirkulationen från 1,4 Qin till 4 Qin. Resultaten från simulering med denna styrning gav lägre medelhalt av utgående kväve och det högsta månadsmedelvärdet inträffade under våren då flöden var höga och temperaturen låg på grund av snösmältning, se Figur 20.



Figur 20. Exempel på alternativ styrning för Kungsängsverkets basfall.

Med den förändrade styrningen blev utgående totalkväve 8,4 mg/L, utgående ammonium 2,6 mg/L och utgående nitrat 5 mg/L. Jämfört med basfallet blev utgående ammonium betydligt högre medan nitrat är lägre i scenariot med alternativ styrning. Kolkälledoseringen var 13 % högre och energin för pumpning 86 % högre medan luftningen var 8 % lägre än i basfallet. Anledningen till att denna styrning inte användes till basfallen var dels för att målet var att uppnå en jämn utgående halt kväve som inte hade allt för stor marginal till gränsvärdet med tanke på resursförbrukningen. Den alternativa styrningen hade större marginal till utgående gränsvärde för kväve, men på bekostnad av högre total förbrukning av elenergi och lika eller högre förbrukning av de olika kemikalierna.

Mer detaljerade resultat från simuleringarna återfinns i Bilaga 4 Fallstudie Kungsängsverket.

5.3 LCA – hur ändras miljöpåverkan av förändrat inflöde

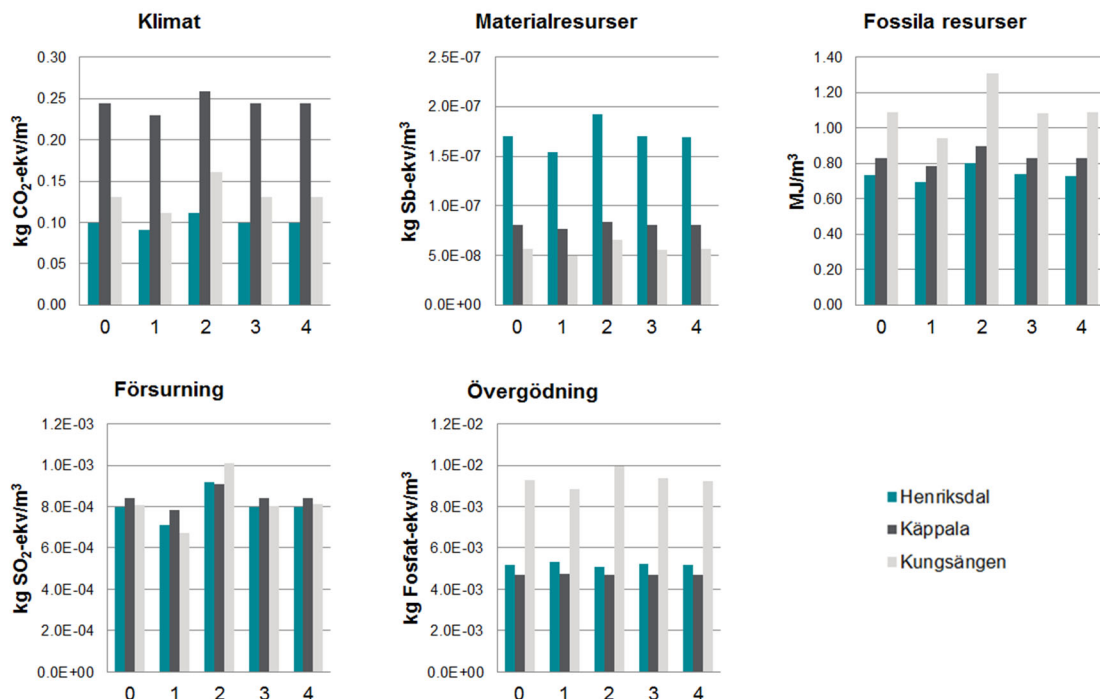
I detta kapitel presenteras hur miljöpåverkan förändras vid de olika scenarierna för tillskottsvatten i inflödet. Först presenteras övergripande resultat för alla tre fallstudierna följt av mer detaljerade resultat specifikt för varje studerat verk. Genomgående presenteras först resultat med funktionell enhet 1 m³ behandlat vatten (d.v.s. miljöpåverkan per m³ behandlat vatten) följt av motsvarande resultat när miljöpåverkan per kg avskilt kväve istället studerats.

Miljöpåverkan per m³ behandlat vatten ökade mest från basfallet när infiltrationen minskade och inflödet blev mer koncentrerat (scenario 2 - *Reparation av ledningsnät*). Detta gäller samtliga fallstudier, se Figur 21, och beror på att den totala miljöpåverkan divideras med färre kubikmeter behandlat vatten. Det framgår att förändringarna mellan scenarierna är desamma för alla tre fallstudierna i alla miljöpåverkanskategorier utom övergödning, där Kungsängsverket uppvisar ett motsatt beteende jämfört med de två andra reningsverken. Skillnaderna mellan verken är betydligt större än skillnaderna mellan scenarierna. När man tittar på resultaten per m³ behandlat avloppsvatten är det viktigt att känna till att simuleringarna uppnår olika reningsgrad för de tre olika verken och även olika reduktioner vid samma utgående halt för de fem scenarierna för respektive verk.

Avseende försurning, med det dominerande bidraget från NH_3 -avgång från slamlagret, är skillnaderna som minst mellan verken. Avseende övergödningen är påverkan högre från Kungsängen vilket beror på att det verket simulerades med krav på 10 mg Tot-N/L i utgående medan Käppala och Henriksdal hade krav 6 mg Tot-N/L.

Precis som resultaten från SIMFRAM-projektet visade har Henriksdal höst bidrag till materialresursförbrukningen (p.g.a. membranen) och Käppalaverket högst bidrag till klimatpåverkan på grund av hög avgång av lustgas från processen. Viktigt att veta i detta sammanhang är att lustgasavgången från Käppalamodellen kalibrerats mot mätdata från Käppala, medan ingen sådan kalibrering av lustgasavgång gjorts för Henriksdal och Kungsängsverket då data för detta saknats. Henriksdal och Kungsängsverket har alltså simulerats med modellens grundinställningar avseende lustgasavgång.

Avseende fossila resurser visar resultaten att Kungsängsverket har högre bidrag per m^3 behandlat vatten än de övriga två verken. Så var inte fallet i föregående projekt där Henriksdal hade högst miljöpåverkan i form av förbrukning av fossila resurser. Orsaken till detta är främst att Henriksdals kolkälförbrukning minskat till cirka en tiondel av vad den var i SIMFRAM. Denitrifikationen i de processmodeller som använts är känslig för variationer i temperatur och inkommande belastning, vilket innebär att en liten ändring i inflöde kan ge stor skillnad i kolkälförbrukning.

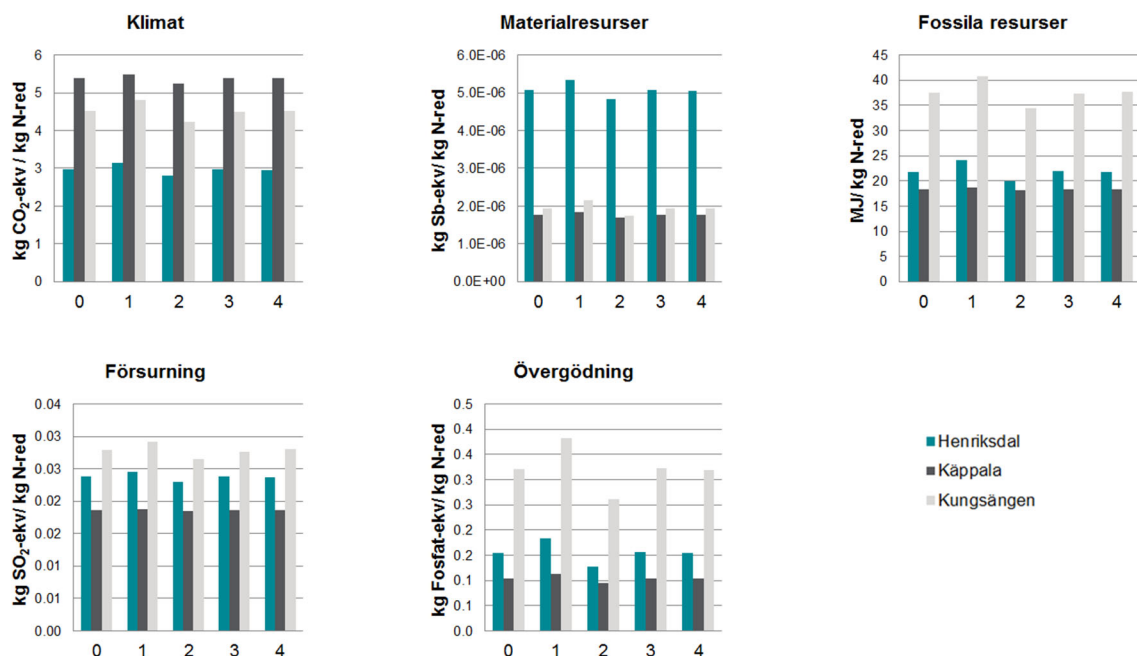


Figur 21. Sammanfattning över miljöpåverkan från Basfall (scenario 0), ökad infiltration (scenario 1), minskad infiltration (scenario 2), ökad snabb avrinning (scenario 3) och minskad snabb avrinning (scenario 4) för de tre studerade reningsverken. Funktionen enhet är 1 m^3 renat vatten.

Miljöpåverkan per kg avskilt kväve uppvisar överlag ett motsatt resultatmönster för variationer över scenarier jämfört med resultatet per kubikmeter. Här blir därmed den största minskningen

från basfallet när infiltrationen minskade och inflödet blev mer koncentrerat (scenario 2 - *Reparation av ledningsnät*). Detta gäller samtliga fallstudier se Figur 22. Den här funktionella enheten är mer relevant för tolkning av resultaten än per m³ renat vatten, eftersom den inte är baserad på en parameter som aktivt varierats mellan scenarierna (mängd avloppsvatten). Mängden kväve som avskilts är förstås olika för de olika verken, liksom den procentuella kväveavskiljningen, men det ger ändå en jämförelse av reningsverkens prestanda. Vidare kan eventuella framtida mängdkrav bli aktuella och då är miljöpåverkan per kg avskilt kväve ett lämpligt nyckeltal.

Reningsverkens storlek och processkonfigurationen resulterar i en variation inom de olika miljöpåverkanskategorierna, dock är variationerna mellan scenarierna mindre.



Figur 22. Sammanfattning över miljöpåverkan från Basfall (scenario 0), ökad infiltration (scenario 1), minskad infiltration (scenario 2), ökad snabb avrinning (scenario 3) och minskad snabb avrinning (scenario 4) för de tre studerade reningsverken. Funktionell enhet är 1 kg avskilt kväve.

Även per kg avskilt kväve har Henriksdal höst bidrag till materialresursförbrukningen (p.g.a. membranen) och Käppalaverket högst bidrag till klimatpåverkan på grund av högre avgång av lustgas från processen.

Som framgår av Tabell 7 har Kungsängsverket en lägre procentuell totalkvävereduktion än Henriksdal och Käppala, till följd av högre tillåten halt totalkväve i utgående vatten. Detta ger utslag på miljöpåverkan (Figur 22) framförallt i kategorierna övergödning och förbrukning fossila resurser.

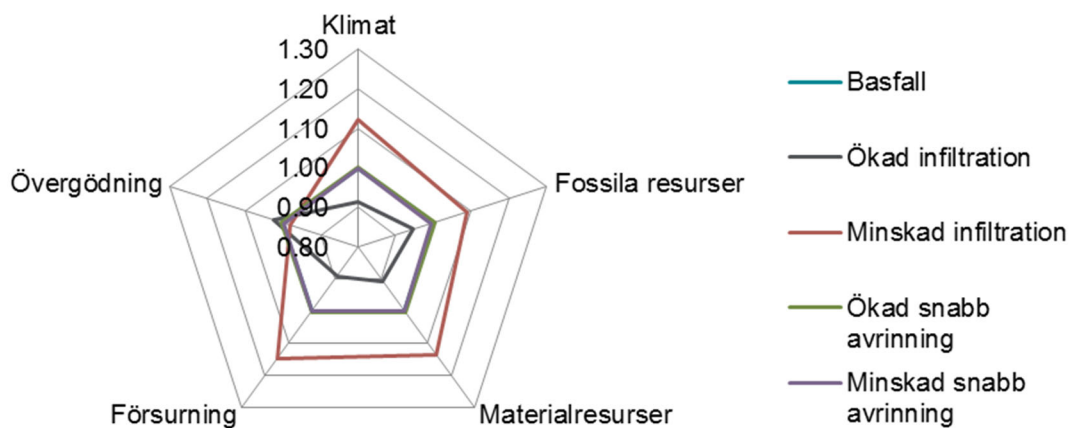
Tabell 7. Jämförelse mellan verkens simulerade avskiljning av kväve i basfallet.

	Henriksdal	Käppala	Kungsängsverket
Reduktion, kg N /d	18 185	6 274	1 369
Reduktion, Tot-N (%)	87 %	91 %	75 %

Henriksdal

Miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten för Henriksdals reningsverk för de fem miljöpåverkanskategorierna visas i Figur 23. Samtliga resultat är normerade mot basfallet. Det framgår tydligt att den sammantagna miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten ökade för Scenario 2 - *Reparation av ledningsnät* där infiltrationen minskades. Mest ökade försurningen och materialresurser följt av klimatpåverkan och fossila resurser. Ökningen av dessa ligger i storleksordningen 9-15 %. Till skillnad från övriga kategorier så minskade övergödningen i Scenario 2. Minskningen var i storleksordning 2 %.

Scenario 1 – *Åldrande av ledningsnät* med ökad infiltration gav minskad miljöpåverkan i storleksordningen 5-11 % per kubikmeter vatten för samtliga miljöpåverkanskategorier utom övergödning där det blev en ökning på ca 2 %. Scenario 3 och 4 (*Asfaltering* och *Reparation av felaktiga anslutningar*) där den snabba avrinningen ökade respektive minskade ytterst liten förändring av miljöpåverkan för Henriksdal.



Figur 23. Miljöpåverkan från Henriksdals reningsverk för fem miljöpåverkanskategorier normerade mot basfallet. Funktionell enhet 1 m³ renat vatten.

De viktigaste orsakerna till förändringar i miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten vid förändrat inflöde visas i Tabell 8. Det var i stort sett samma bidragande orsak mellan scenarierna i avseende av vad som var av betydelse för respektive kategori. Direkta emissioner av lustgas från processen och kemikalieförbrukningen i MBR var de avgörande orsakerna till förändring i klimatpåverkan. Kemikalieförbrukning i förfällning och MBR bidrog båda till förbrukningen av materialresurser och fossila resurser. Till förbrukning av materialresurser bidrog även biostegets elförbrukning (i Scenario 2) och till förbrukningen av fossila resurser bidrog även polymer. När det gäller försurningen var det huvudsakligen ammoniakavgång

från slamlagring som var av betydelse och för övergödningen dominerade utgående halt totalkväve.

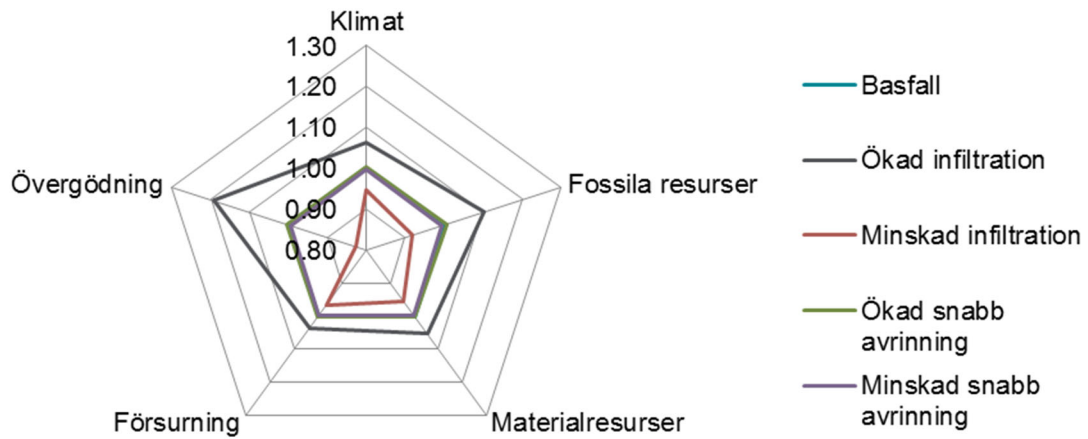
Tabell 8. Viktigaste orsaker till förändringar i miljöpåverkan som resultat av förändrat inflöde till Henriksdals reningsverk. Funktionell enhet 1 m³ renat vatten.

Kategori	Ökad infiltration		Minskad infiltration		Ökad snabb avrinning		Minskad snabb avrinning	
	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak
Klimat	↓	↓ Direkt N ₂ O ↓ Kemikalier MBR	↑↑	↑ Direkt N ₂ O ↑ Kemikalier MBR	-		-	
Material-resurser	↓	↑ Kemikalier förf. ↓ Kemikalier MBR	↑↑	↓ Kemikalier förf. ↑ El biosteg ↑ Kemikalier MBR	-		-	
Fossila resurser	↓	↑ Kemikalier förf. ↓ Polymer ↓ Kemikalier MBR	↑	↓ Kemikalier förf. ↑ Polymer ↑ Kemikalier MBR	-		-	
Försurning	↓↓	↓ NH ₃ -avgång från slamlager	↑↑	↑↑ NH ₃ -avgång från slamlager	-		-	
Övergödning	↑	↑ Utg. Tot-N	↓	↓ Utg. Tot-N	-		-	

* Förändring mot total påverkan i basfallet enligt följande: Större än 10% visas med dubbelpilar, 1 till 10 % visas med enkelpil, 0,5 till 1 % visas med pil i parentes, mindre än 0,5 % visas med streck (inom felmarginal).

Ser man istället på miljöpåverkan per kg avskilt kväve var huvuddragen omvända jämfört med per kubikmeter behandlat vatten (med undantag för övergödning). Miljöpåverkan minskade för Scenario 2 - *Reparation av ledningsnät* medan de ökade jämfört med basfallet för Scenario 1 – *Åldrande av ledningsnät* (Figur 24). Den kategori som ökade mest när infiltrationen ökade var övergödning (ca 20 %) följt av fossila resurser, klimatpåverkan och materialresurser (i storleksordningen 5-10 %). Försurning var den kategori som påverkades minst av de olika inflödesscenarierna sett till per mängd avskilt kväve (ca 3 %).

Scenario 3 och 4 (*Asfaltering och Reparation av felaktiga anslutningar*) där den snabba avrinningen ökade respektive minskade gav som tidigare nästan ingen förändring av miljöpåverkan för Henriksdal.



Figur 24. Miljöpåverkan från Henriksdals reningsverk för fem miljöpåverkanskategorier normerade mot basfallet. Funktionell enhet 1 kg avskilt kväve.

De viktigaste orsakerna till förändringar i miljöpåverkan per kg avskilt kväve vid förändrat inflöde visas i Tabell 11 Tabell 9. Det var i stort sett ingen skillnad mellan scenarierna avseende vilka processer som är av mest betydelse för de olika kategorierna. För klimatpåverkan var det de direkta emissionerna av lustgas samt kemikalier till förfällningen som bidrog mest. Kemikalier till förfällningen var även bidragande orsak till materialresurser, fossila resurser och försurning (endast Scenario 1). Det huvudsakliga bidraget till försurning kommer dock från ammoniakavgång från slamlagring. Kemikalieförbrukningen i MBR var en ytterligare orsak till förändring i materialresurser. Övergödningen påverkas som tidigare av utgående halt kväve.

Tabell 9. Viktigaste orsaker till förändringar i miljöpåverkan som resultat av förändrat inflöde till Henriksdals reningsverk. Funktionell enhet 1 kg avskilt kväve.

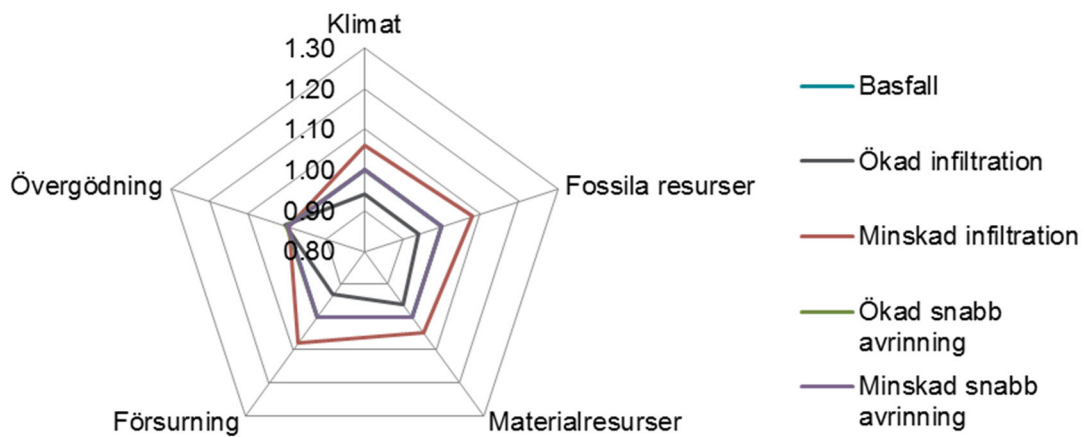
Kategori	Ökad infiltration		Minskad infiltration		Ökad snabb avrinning		Minskad snabb avrinning	
	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak
Klimat	↑	↑ Direkt N ₂ O ↑ Kemikalier förf.	↓	↓ Direkt N ₂ O ↓ Kemikalier förf.	-		-	
Material-resurser	↑	↑ Kemikalier förf. ↑ Kemikalier MBR	↓	↓ Kemikalier förf. ↓ Kemikalier MBR	-		-	
Fossila resurser	↑	↑ Kemikalier förf.	↓	↓ Kemikalier förf.	(↑)	(↑) Kemikalier förf.	(↓)	(↓) Kemikalier förf.
Försurning	↑	↑ Kemikalier förf. ↑ NH ₃ -avgång från slamlager	↓	↓ NH ₃ -avgång från slamlager	-		-	
Övergödning	↑↑	↑↑ Utg. Tot-N	↓↓	↓↓ Utg. Tot-N	(↑)	(↑) Utg. Tot-N	(↓)	(↓) Utg. Tot-N

* Förändring mot total påverkan i basfallet enligt följande: Större än 10% visas med dubbelpilar, 1 till 10 % visas med enkelpil, 0,5 till 1 % visas med pil i parentes, mindre än 0,5 % visas med streck (inom felmarginal).

Käppala

Miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten för Käppalaverket för de fem miljöpåverkanskategorierna visas i Figur 25. Samtliga resultat är normerade mot basfallet. Det framgår tydligt att miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten ökade för Scenario 2 - *Reparation av ledningsnät* där infiltrationen minskades. Detta beror på att miljöpåverkan divideras med färre antal m³ vatten som renats eftersom inflödet minskat men föroreningsbelastningen var densamma. Mest ökade försurningen och fossila resurser följt av klimatpåverkan och materialresurser (se röd linje i Figur 25). Ökningen av dessa var i storleksordningen 5-8 % jämfört med basfallet.

Scenario 1 – *Åldrande av ledningsnät* med ökad infiltration gav minskad miljöpåverkan i storleksordningen 4-7 % per kubikmeter vatten för samtliga miljöpåverkanskategorier utom övergödning där det blev en marginell ökning. Scenario 3 och 4 (*Asfaltering* och *Reparation av felaktiga anslutningar*) där den snabba avrinningen ökade respektive minskade gav ingen förändring av miljöpåverkan för Käppalaverket.



Figur 25. Miljöpåverkan från Käppalaverket för fem miljöpåverkanskategorier normerade mot basfallet. Funktionenhet 1 m³ behandlat vatten.

De viktigaste orsakerna till förändringar i miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten vid förändrat inflöde visas i Tabell 10. Det var ingen skillnad mellan scenarierna avseende vilka processer som var av mest betydelse för de olika kategorierna. Direkta emissioner av lustgas från processen var det avgörande bidraget till klimatpåverkan. Mängderna kolkälla och polymer bidrog till förbrukningen av materialresurser och fossila resurser. Till förbrukning av materialresurser bidrog även biostegets elförbrukning. När det gäller försurningen var det huvudsakligen ammoniakavgång från slamlagering som var av betydelse och för övergödningen dominerade utgående halt totalkväve.

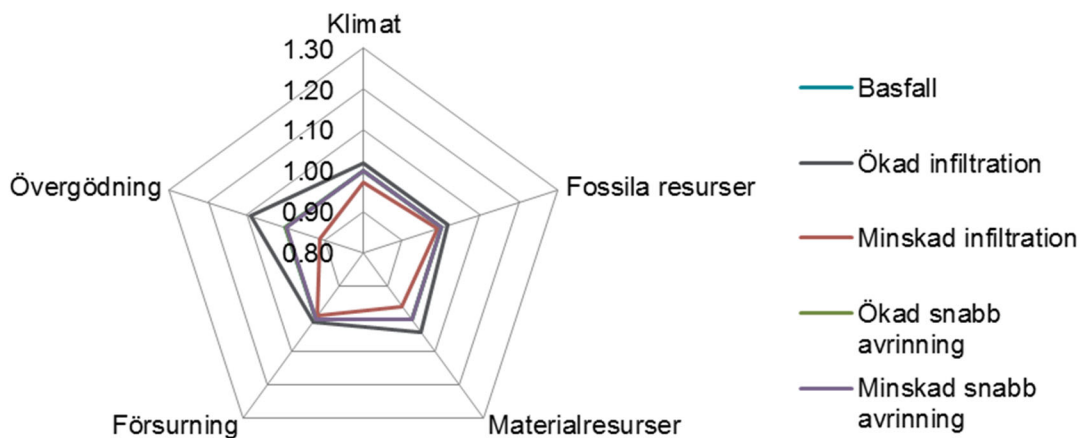
Tabell 10. Viktigste orsaker till förändringar i miljöpåverkan som resultat av förändrat inflöde till Käppalaverket. Funktionenhet 1 m³ renat vatten.

Kategori	Ökad infiltration		Minskad infiltration		Ökad snabb avrinning		Minskad snabb avrinning	
	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak
Klimat	↓	↓ Direkt N ₂ O	↑	↑ Direkt N ₂ O	-		-	
Material-resurser	↓	↓ Polymer avv. ↓ Kolkälla ↓ El biosteg	↑	↑ Polymer avv. ↑ Kolkälla ↑ El biosteg	-		-	
Fossila resurser	↓	↓ Polymer avv. ↓ Kolkälla	↑	↑ Polymer avv. ↑ Kolkälla	-		-	
Försurning	↓	↓ NH ₃ -avgång från slamlager	↑	↑ NH ₃ -avgång från slamlager	-		-	
Övergödning	↑	↑ Utg. Tot-N	↓	↓ Utg. Tot-N	-		-	

* Förändring mot total påverkan i basfallet enligt följande: Större än 10% visas med dubbelpilar, 1 till 10 % visas med enkelpil, 0,5 till 1 % visas med pil i parentes, mindre än 0,5 % visas med streck (inom felmarginal).

Ser man istället på miljöpåverkan per kg avskilt kväve var huvuddragen omvända jämfört med per kubikmeter behandlat vatten. Detta på grund av att fler kilo kväve behöver avskiljas när flödet är lägre (mer koncentrerat) för att underskrida utsläppsgränsvärdet, medan miljöpåverkan per m³ vatten dividerades med färre antal m³ som genomgått rening vid lägre flöde och samma belastning. Miljöpåverkan minskade för Scenario 2 - *Reparation av ledningsnät* medan de ökade jämfört med basfallet för Scenario 1 - *Åldrande av ledningsnät* (Figur 26). Den kategori som ökade mest när infiltrationen ökade var övergödning (ca 9 %) följt av materialresurser, fossila resurser och klimatpåverkan (i storleksordningen 2-4 %). Försurning var den kategori som påverkades minst av de olika inflödesscenarierna sett till per mängd avskilt kväve.

Scenario 3 och 4 (*Asfaltering* och *Reparation av felaktiga anslutningar*) där den snabba avrinningen ökade respektive minskade gav som tidigare ingen förändring av miljöpåverkan för Käppalaverket.



Figur 26. Miljöpåverkan från Käppala reningsverk för fem miljöpåverkanskategorier normerade mot basfallet. Funktionell enhet 1 kg avskilt kväve.

De viktigaste orsakerna till förändringar i miljöpåverkan per kg avskilt kväve vid förändrat inflöde visas i Tabell 11. Det var ingen skillnad mellan scenarierna avseende vilka processer som är av mest betydelse för de olika kategorierna. För klimatpåverkan var det de direkta emissionerna av lustgas som bidrog mest. Med ökad infiltration ökade avgången av lustgas totalt samtidigt som mängden avskilt kväve minskade vilket bidrog till ökningen av klimatpåverkan. Det omvända gäller för minskad infiltration. Mängd fällningskemikalie bidrog till tre kategorier; förbrukning av materialresurser, fossila resurser och försurning. Användningen av fällningskemikalier ökar något vid ökad infiltration samt minskar när infiltrationen minskar. Till förbrukning av materialresurser bidrog även inloppspumpning medan kolkälla bidrog till förbrukning av fossila resurser. Vid ökad infiltration behöver inte lika stor mängd kväve avskiljas för att nå haltkravet för totalkväve vilket gör att förbrukningen av kolkälla minskar. För övergödning var det återigen utgående mängd kväve som var av störst betydelse för skillnader mellan scenarier.

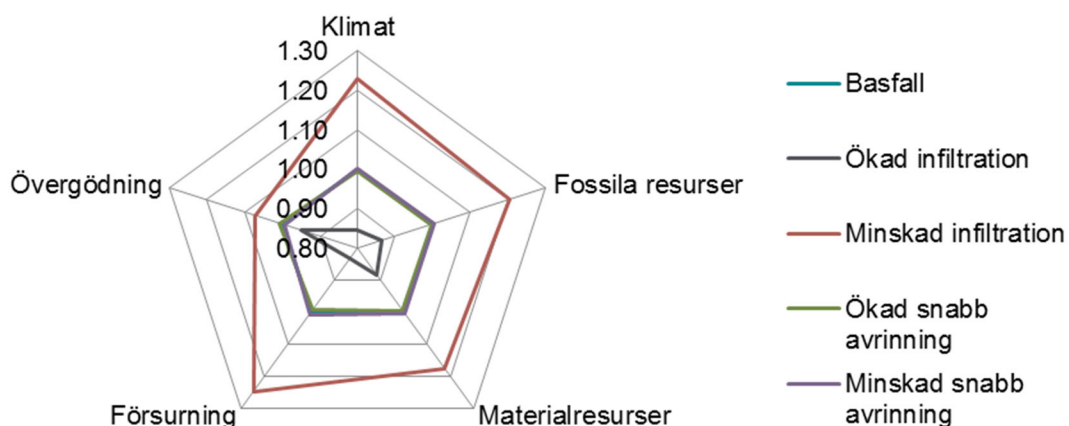
Tabell 11. Viktigaste orsaker till förändringar i miljöpåverkan som resultat av förändrat inflöde till Käppalaverket. Funktionell enhet 1 kg avskilt kväve. Ökad infiltration gav färre kilo avskilt kväve och Minskad infiltration gav fler kilo avskilt kväve jämfört med basfallet.

Kategori	Ökad infiltration		Minskad infiltration		Ökad snabb avrinning		Minskad snabb avrinning	
	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak
Klimat	↑	↑ Direkt N ₂ O	↓	↓ Direkt N ₂ O	-		-	
Material-resurser	↑	↑ Järnklorid ↑ Inloppspumpar	↓	↓ Järnklorid ↓ Inloppspumpar	-		-	
Fossila resurser	↑	↓ Kolkälla ↑ Järnklorid	↓	↑ Kolkälla ↓ Järnklorid	-		-	
Försurning	↑	↑ Järnklorid	↓	↓ Järnklorid	-		-	
Över-gödning	↑	↑ Utg. Tot-N	↓	↓ Utg. Tot-N	-		-	

* Förändring mot total påverkan i basfallet enligt följande: Större än 10% visas med dubbelpilar, 1 till 10 % visas med enkelpil, 0,5 till 1 % visas med pil i parentes, mindre än 0,5 % visas med streck (inom felmarginal).

Kungsängsverket

Miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten för Kungsängsverket för de fem miljöpåverkanskategorierna visas i Figur 27. Samtliga resultat är normerade mot basfallet. Det framgår tydligt att miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten ökade för Scenario 2 - *Reparation av ledningsnät* där infiltrationen minskades. Mest ökade försurningen följt av klimatpåverkan, fossila resurser och materialresurser som alla ökade i storleksordningen 20-30 %.



Figur 27. Miljöpåverkan från Kungsängsverket för fem miljöpåverkanskategorier normerade mot basfallet. Funktionell enhet 1 m³ behandlat vatten.

Scenario 1 – *Åldrande av ledningsnät* med ökad infiltration gav minskad miljöpåverkan per kubikmeter vatten för samtliga miljöpåverkanskategorier. För Scenario 3 och 4 (*Asfaltering* och

Reparation av felaktiga anslutningar) där den snabba avrinningen ökade respektive minskade gav mycket liten förändring av miljöpåverkan.

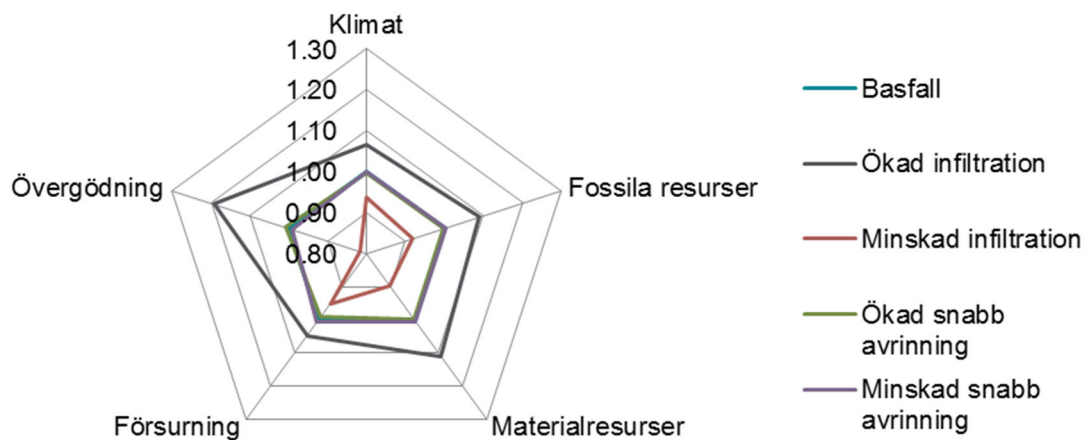
De viktigaste orsakerna till förändringar i miljöpåverkan per kubikmeter behandlat vatten vid förändrat inflöde visas i Tabell 12. Det var ingen skillnad mellan scenarierna avseende vilka processer som var av mest betydelse för de olika kategorierna. För klimatpåverkan var det huvudsakligen de direkta emissionerna av lustgas från processerna men även fjärrvärmens för uppvärmning av rötkammaren som bidrog. Fjärrvärmeanvändningen bidrog även till förbrukningen av fossila resurser. Mängden kolkälla bidrog starkt till både materialresursförbrukning tillsammans med elanvändningen i biostegen, men även till förbrukning av fossila resurser. När det gäller försurningen var det huvudsakligen ammoniakavgång från slamlagring som var av betydelse och för övergödningen dominerade utgående halt totalkväve.

Tabell 12. Viktigste orsaker till förändringar i miljöpåverkan som resultat av förändrat inflöde till Kungsängsverket. Funktionell enhet 1 m³ behandlat vatten.

Kategori	Ökad infiltration		Minskad infiltration		Ökad snabb avrinning		Minskad snabb avrinning	
	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak
Klimat	↓↓	↓ Direkt N ₂ O ↓ Fjärrvärme rötk.	↑↑	↑↑ Direkt N ₂ O ↑ Fjärrvärme rötk.	-		-	
Material-resurser	↓↓	↓ Kolkälla ↓ El biosteg	↑↑	↑ Kolkälla ↑ El biosteg	-		-	
Fossila resurser	↓↓	↓ Kolkälla ↓ Fjärrvärme rötk.	↑↑	↑ Kolkälla ↑ Fjärrvärme rötk.	-		-	
Försurning	↓↓	↓↓ NH ₃ -avgång från slamlager	↑↑	↑↑ NH ₃ -avgång från slamlager	(↓)	(↓) NH ₃ -avgång från slamlager	(↑)	(↑) NH ₃ -avgång från slamlager
Övergödning	↓	↓ Utg. Tot-N	↑	↑ Utg. Tot-N	(↑)	(↑) Utg. Tot-N	(↓)	(↓) Utg. Tot-N

* Förändring mot total påverkan i basfallet enligt följande: Större än 10% visas med dubbelpilar, 1 till 10 % visas med enkelpil, 0,5 till 1 % visas med pil i parentes, mindre än 0,5 % visas med streck (inom felmarginal).

Ser man istället på miljöpåverkan per kg avskilt kväve var huvuddragen omvända jämfört med per kubikmeter behandlat vatten. Miljöpåverkan minskade för Scenario 2 - *Reparation av ledningsnät* medan de ökade jämfört med basfallet för Scenario 1 - *Åldrande av ledningsnät* (Figur 28). Förändringarna procentuellt var dock mindre mellan de olika scenarierna jämfört med när en kubikmeter behandlat vatten studerades. Den kategori som ökade mest när infiltrationen ökade var övergödning (ca 20 %) följt av materialresurser, fossila resurser och klimatpåverkan (i storleksordningen 10 %). Försurning var den kategori som påverkades minst av de olika inflödesscenarierna sett till per mängd avskilt kväve.



Figur 28. Miljöpåverkan från Kungsängsverket för fem miljöpåverkanskategorier normerade mot basfallet. Funktionell enhet 1 kg avskilt kväve.

De viktigaste orsakerna till förändringar i miljöpåverkan per kg avskilt kväve vid förändrat inflöde visas i Tabell 13. Det var ingen skillnad mellan scenarierna avseende vilka processer som är av mest betydelse för de olika kategorierna. För klimatpåverkan var det de direkta emissionerna av lustgas som bidrog mest. Inloppspumpning tillsammans med elanvändning i biosteget bidrog mest till förbrukning av materialresurser. Andra bidrag till förbrukning av materialresurser var användning av kolkälla och polymer i mellansedimenteringen vilket även var de största bidragen till förändringar i förbrukning av fossila resurser. För övergödning och försurning var det utgående halt kväve respektive ammoniakavgång från slamlagring som var av störst betydelse.

Tabell 13. Viktigaste orsaker till förändringar i miljöpåverkan som resultat av förändrat inflöde till Kungsängsverket. Funktionell enhet 1 kg avskilt kväve.

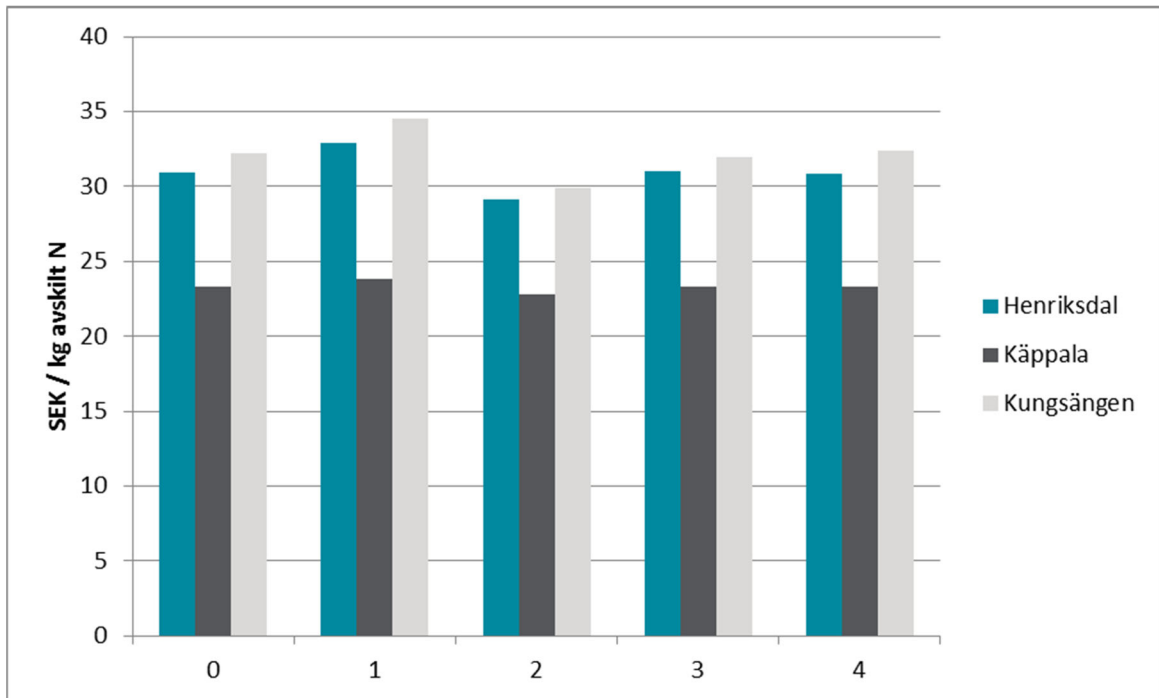
Kategori	Ökad infiltration		Minskad infiltration		Ökad snabb avrinning		Minskad snabb avrinning	
	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak	Förändr.	Viktigaste orsak
Klimat	↑	↑ Direkt N ₂ O	↓	↓ Direkt N ₂ O	-		-	
Material-resurser	↑↑	↑ Inl.pumpar ↑ El biosteg ↑ Kolkälla ↑ Polymer mellansed	↓	↓ Inl.pumpar ↓ El biosteg Kolkälla ↓ ↓ Polymer mellansed	-		-	
Fossila resurser	↑	↑ Kolkälla ↑ Polymer mellansed	↓	↓ Kolkälla ↓ Polymer mellansed	-		-	
Försurning	↑	↑ NH ₃ -avgång från slamlager	↓	↓ NH ₃ -avgång från slamlager	(↓)	(↓) NH ₃ -avgång från slamlager	(↑)	(↑) NH ₃ -avgång från slamlager
Övergödning	↑↑	↑↑ Utg. Tot-N	↓↓	↓↓ Utg. Tot-N	(↑)	(↑) Utg. Tot-N	(↓)	(↓) Utg. Tot-N

* Förändring mot total påverkan i basfallet enligt följande: Större än 10% visas med dubbelpilar, 1 till 10 % visas med enkelpil, 0,5 till 1 % visas med pil i parentes, mindre än 0,5 % visas med streck (inom felmarginal).

5.4 Kostnadsberäkning – hur påverkas löpande kostnader av förändrat inflöde

El och avyttring av slam står för det största bidraget till de löpande kostnaderna för de tre reningsverken. Det är också variationer i elförbrukning och producerad mängd slam som leder till de skillnader man ser i kostnadsberäkningen för de olika scenarierna. Kostnader för slamhantering per kg avskilt N var ca 30 % högre för Henriksdal och Kungsängen jämfört med Käppala, främst på grund av att Käppala hade en högre avskiljning av kväve per m³. Elförbrukningen per kg avskilt N var likvärdig för Kungsängen och Käppala medan den var nästan 70 % högre för Henriksdal.

Vid kostnadsberäkning per avskild mängd kväve ligger resultatet i storleksordningen 23-34 SEK/kg avskilt N, se Figur 29. Här framgår att resultatet för Käppalaverket ligger ganska stabilt över de studerade scenarierna, medan Henriksdal och Kungsängsverket har lite större variation i resultatet. Scenario 1, *Åldrande av ledningsnät*, leder till högre löpande kostnader per kg avskilt kväve medan scenario 2, *Reparation av ledningsnät*, leder till lägre löpande kostnader per kg avskilt kväve. Det är ingen större inverkan på kostnadsberäkningen för scenario 3, *Asfaltering*, eller scenario 4, *Reparation av felaktiga anslutningar*.



Figur 29. Kostnad per kg avskilt kväve.

6 Slutsatser

Tre svenska avloppsreningsverk – Henriksdals reningsverk, Käppalaverket och Kungsängens reningsverk i Västerås – har använts som fallstudier för att studera hur drift av reningsverken vid olika framtida inflödesscenarier påverkar reningsverkens totala miljöpåverkan och driftskostnad.

När ytavrinning av regnvatten, snösmältning eller inträngande grundvatten når avloppsledningarna späds spillvattnet ut och kyls ner, vilket påverkar verkens reningsprocesser. Scenarier med förändringar i infiltration av grundvatten till ledningsnätet (vilket ger en konstant högre flödesbelastning) och förändringar i snabb ytavrinning av dagvatten i samband med nederbörd (vilket ger högre flödestoppar) har studerats.

Fem miljöpåverkanskategorier (klimatpåverkan, övergödningspotential, försurningspotential, förbrukning av fossila resurser i form av energi och i forma av material har beaktats.

En generell slutsats är att vid minskad mängd tillskottsvatten minskade miljöpåverkan i samtliga kategorier och kostnaden per kg avskilt kväve i processen för alla de tre verken. Reningsverksprocesserna blir således mer effektiva vid minskad mängd tillskottsvatten.

De tre fallstudierna har så pass olika grundförutsättningar i inkommande flöde (profil, belastning och mängd tillskottsvatten), processutformning och storlek att övriga resultat avseende vilka miljöpåverkanskategorier som påverkas mest av mängden tillskottsvatten och hur stor påverkan blir varierar mellan verken.

För Käppalaverket gav en minskning av infiltrationen från 33 % till 27 % en minskning av totalflödet till verket med 7 %. Detta medförde minskad övergödningspotential med 9 %, minskad klimatpåverkan med 3 % och minskad förbrukning av materialresurser med 4 % per kg avskilt N i processerna. Förbrukningen av fossila resurser (energi) och försurningspotentialen minskade med 1 % jämfört med basfallet.

För Henriksdals reningsverk gav en minskning av infiltrationen från 44 % till 35 % en minskning av totalflödet till verket med 14 %. Detta medförde minskad övergödningspotential med 17 %, minskning i förbrukning av fossila resurser (energi) med 8 %, minskad klimatpåverkan med 5 % och minskad förbrukning av materialresurser med 5 % per kg avskilt N i processerna. Försurningspotentialen minskade med 3 % jämfört med basfallet.

För Kungsängsverket gav en minskning av infiltrationen från 46 % till 32 % en minskning av totalflödet med 20 %. Detta medförde minskad övergödningspotential med 18 %, minskad förbrukning av materialresurser med 10 %, minskad förbrukning av fossila resurser (energi) med 8 % och minskad klimatpåverkan med 6 % per kg avskilt N i processerna. Försurningspotentialen minskade med 5 % jämfört med basfallet.

För scenariot med minskat infiltration minskade kostnaden per kg avskilt N i processerna med 2,3 % vid 7 % minskat totalflöde för Käppala, med 5,9 % vid 14 % minskat totalflöde för Henriksdal och för Kungsängsverket minskade kostnaden med 7,1 % vid 20 % minskat totalflöde.

Vid ökad infiltration var resultaten i princip de omvända, att samtliga kategorier miljöpåverkan och kostnader ökade per kg avskilt N i processerna i samma storleksordning som de minskade vid minskad infiltration. Även kostnaden per kg avskilt N ökade i samma storleksordning.

Resultaten har visat att även om 1 m³ behandlat vatten är en vanligt förekommande funktionell enhet i LCA kopplat till avloppsreningsverk kan den vara missvisande i vissa fall. Till exempel i detta fall när utspädningseffekter studeras.

Jämförelse mellan snabb avrinning och infiltration visade att scenarierna med varierad infiltration gav större effekt på resultaten än den snabba avrinningen. Anledningen till detta var att flödet och utspädningsgraden förändrades mer i dessa scenarier.

Förändringar av den snabba avrinningen som ger högre flödestoppar vid regn hade endast en liten påverkan på utvärderingen (mindre än 1 % jämfört med basfallet för samtliga miljöpåverkanskategorier). Anledningen till detta är att den metod som användes för att påverka den snabba avrinningen resulterade i relativt små förändringar av inflödet.

De processmodeller som användes har begränsad möjlighet att beskriva driftstörningar i sedimenteringsbassänger till följd av höga flöden. Modellerna har inte heller inkluderat någon minskning av temperaturen på inkommande vatten i samband med ökad infiltration i åldrande ledningsnät, vilket ofta är en faktisk effekt av stor infiltration. Dessa båda faktorer gör att effekten av förändrat inflöde i verkligheter kan vara större än vad resultaten visar.

En känslighetsanalys av minskad temperatur med 2 grader på grund av ökad infiltration resulterade i minskad kväverening och en stor ökning av behovet av extern kolkälla. Detta är betydelsefullt för förbrukningen av fossila resurser och framtida arbete bör därför överväga att implementera temperaturmodeller för infiltration i inflödesmodellen.

Metoden som använts lämpar sig för många andra scenarier som till exempel förändrad nederbörd och belastning liksom utvärdering av processkonfiguration och styrstrategier.

7 Referenser

- Balmér, P. (2015) Parametrar för organiskt material i avloppsvatten och slam och något om deras användning. SVU 2015-11.
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H. & Vavilin, V. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM 1). *Water Science & Technology* **45**(10), 65–74.
- Flores-Alsina, X., Arnell, M., Amerlinck, Y., Corominas, L., Gernaey, K. V., Guo, L., Lindblom, E., Nopens, I., Porro, J., Shaw, A., Snip, L., Vanrolleghem, P. A. & Jeppsson, U. (2014). Balancing effluent quality, economic cost and greenhouse gas emissions during the evaluation of (plant-wide) control/operational strategies in WWTPs. *The Science of the total environment* **466-467**, 616–24.
- Gannholm, C. (2013). Rejektvattenbehandling – inventering av tillgängliga tekniker. Käppalaförbundet.
- Gernaey, K. V., Flores-Alsina, X., Rosen, C., Benedetti, L. & Jeppsson, U. (2011) Dynamic influent pollutant disturbance scenario generation using a phenomenological modelling approach. *Environmental Modelling & Software* **26**(11), 1255–1267.
- Gernaey, K.V., Jeppsson, U., Vanrolleghem, P.A. & Copp, J.B. (2014). Benchmarking of Control Strategies for Wastewater Treatment Plants. IWA Scientific and Technical Report No. 23, ISBN 9781843391463, IWA Publishing, London, UK.
- Guinée, J.B., Gorrae, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. de, Duin, R. van & Huijbregts, M.A.J. (2002). Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T. & Loosdrecht, M. C. M. van. (2000). Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Publishing, London, UK.
- Käppalaförbundet (2012). Miljörapport 2012. Käppalaförbundet. Lidingö.
- Martin, C. and Vanrolleghem, P.A. (2014). Analysing, completing, and generating influent data for WWTP modelling: A critical review. *Environmental Modelling & Software*, **60**, 188-201.
- Saagi, R., Flores-Alsina, X., Fu, G., Butler, D., Gernaey, K. V. & Jeppsson, U. (2016) Catchment & sewer network simulation model to benchmark control strategies within urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software* **78**, 16–30.
- Saagi R., Lindblom E., Grundestam C., Andersson S., Åmand L. & Jeppsson U. (2018) Model-based evaluation of a full-scale wastewater treatment plant for future influent and operational



scenarios. IWA World Water Congress & Exhibition (WWC&E2018), 16-21 September 2018, Tokyo, Japan.

Thunberg, A., Erikstam, S. & Åmand, L. (2013). Modelling the effect of more stringent discharge limits on the carbon footprint at Käppala WWTP. 13th Nordic Wastewater Conference 2013, 8-10 October 2013, Malmö, Sweden.

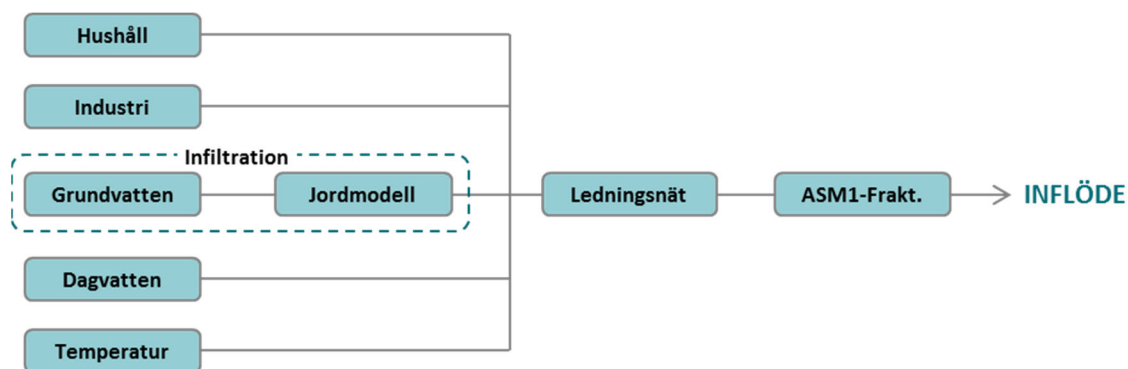
Thunberg, A. (2014). Processdimensionering för nya utsläppsvillkor beräkningsunderlag, 2014-08-06. Käppalaförbundet, Lidingö.

Åmand, L., Andersson, S., Oliveira, F., Rahmberg, M., Junestedt, C. & Arnell, M. (2016). Nya utsläppskrav för svenska reningsverk – effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan. SVU-rapport 2016-12.

Bilaga 1: BSM-UWS - Inflödesmodell

En modifierad version av en inflödesgenerator (Gernaey *et al.*, 2011) vilken baseras på Benchmark Simulation Model for Urban Wastewater Systems (BSM-UWS) (Saagi *et al.*, 2016) har använts i studien. Inflödesmodellen beskriver fyra olika källor till det vatten som når reningsverket. Dessa är vatten från hushåll, vatten från industri, dagvatten och infiltration till ledningsnätet. För de fyra olika källorna modelleras flöde, kemisk syreförbrukning (COD) uppdelat på partikulärt (COD_{part}) och löst (COD_{sol}), ammonium (NH₄-N), totalt Kjeldahl kväve (TKN) och totalfosfor (TP). Utöver dessa modelleras även vattnets temperatur.

Ledningsnätet modelleras som tankar i serie. För Henriksdals fallstudie har även en tunnelmodell (Blomstrand & Jemander, 2017) används. För att konvertera föroreningarna till de fraktioner som används i processmodellen (Activated Sludge Model No. 1 (ASM1) (Henze *et al.*, 2000)) används en fraktioneringsmodell. En översiktlig bild över modellen återges i Figur 30.



Figur 30. Översiktlig bild över inflödesgeneratormodellen med olika modellblock.

Hushåll: Normaliserade profiler för variation av avloppsvattnet, både avseende flöde och föroreningar, över dygn, vecka och år ligger till grund för hushållens bidrag. Profilerna multipliceras med antalet anslutna personekvivalenter (pe) och ett dygnsmedelflöde eller föroreningsmängd per pe och dag (m³/PE.d, kg/PE.d) för att generera belastningen från hushåll.

Industri: Normaliserade profiler för vecko- och årsvariationer ligger till grund för att generera industriellt vatten. Syftet med dessa profiler är att fånga om anslutna industrier har någon variation under olika skift eller underhåll som sker på veckobasis och för att göra så att mängden industriellt vatten minskar under sommarsemestern. Den kombinerade profilen multipliceras med dygnsmedelflöde eller föroreningsmängd per dag (m³/d, kg/d) för att skapa den industriella belastningen. Både hushållsbelastningen och industribelastningen använder en slumpgenerator för att skapa ett vitt brus så att exakt korrelation mellan olika tillståndsvariabler undviks.

Dagvatten: Modellen beskriver avrinning från nederbörd i form av regn och snösmältning. Förluster genom avdunstning dras av från nederbördsintensiteten innan avrinningen beräknas. Avrinning från hårdgjorda ytor respektive infiltrerbara ytor hanteras separat. Avrinning från hårdgjorda ytor leder direkt till bildande av dagvatten som når det kombinerade ledningssystemet. Avrinning från infiltrerbara ytor går till infiltrationsmodellen från vilken en

delström kommer att bidra till infiltration i ledningsnätet. Nederbörd som faller när temperaturen är under 0 °C räknas som snö. Denna nederbörd lagras som vattendjup i en konceptuell tank och konverteras till avrinning (snösmältning) när utomhustemperaturen är över 0 °C. Generering av föroreningar i samband med nederbörd modelleras genom två approacher. För partikulära föroreningar (COD_{part}) används en ackumulering och sköljmodell ("washoff"). Modellen beskriver hur partikulärt material ackumuleras i ledningsnätet under torrväder och efterföljande ursköljning av partikulärt material i samband med regn. Denna approach är viktigt för att simulera hög belastning av föroreningar i början av regnväder (first flush effect), det är dock generellt svårt att kalibrera modellen för denna first flush effekt på grund av brist på data. För lösta föroreningar används en konstant medelkoncentration under hela regntillfället.

Infiltration: Modellen beskriver infiltration både under torrväder och vid regnväder. Grundvattennivån (som modelleras som en sinuskurva med årsperiodicitet) och den långsamma avrinningen (genom icke-hårdgjorda ytor/infiltrerbara ytor) vid regntillfällen är inflöden till en jordmodell. Jordmodellen är en konceptuell tank med två utflöden; infiltration till ledningsnätet och flöde till nedströms akvifär. Infiltrationsmodellen genererar en långsam respons efter regn, det vill säga att inflödet fortsätter att vara högt även en tid efter att det slutat regna. I modellen antas att inga föroreningsmängder genereras från infiltration till ledningsnätet. Avdunstningsförluster från marken är inkluderade i modellen.

Temperatur: Avloppsvattentemperaturen modelleras baserat på dygns- och säsongsvariation med hjälp av sinuskurvor. Temperaturen sjunker också i samband med nederbörd eller snösmältning. Hur mycket temperaturen sjunker är korrelerat med regnintensitet genom en temperaturkorrektionsfaktor. Detta innebär att inkommande vattentemperatur till reningsverket påverkas vid tillkomst av regn- eller snösmältning. Dock modelleras inte förändringar i inkommande vattentemperatur till följd av ökad eller minskad infiltration av grundvatten till ledningsnätet då denna temperatur kalibrerats efter årsvariationen i inkommande vatten.

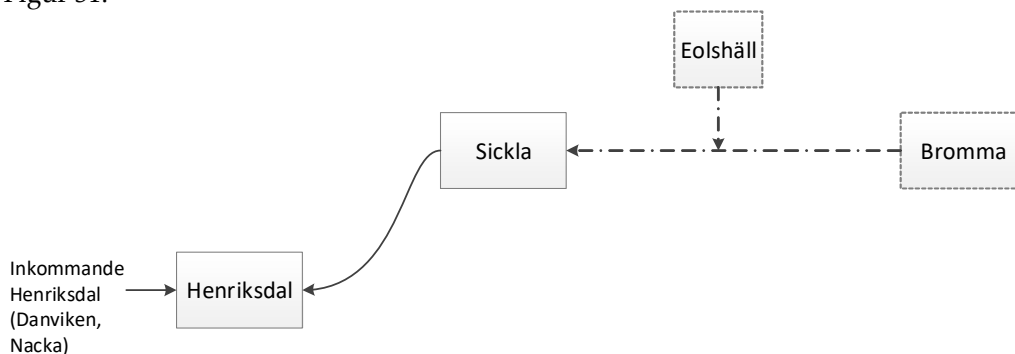
Ledningsnät: Ledningsnätet simuleras genom konceptuella modeller bestående av tankar i serie. Det totala inflödet, kombinerat från hushåll, industri, dagvatten och infiltration till ledningsnät, är inflöde till ledningsnätsmodellen. För att representera ett system med flera avrinningsområden finns en modellparameter (subareas) som delar upp flöde och belastning. Varje avrinningsområde består av ett antal reservoarmodeller i serie som möts i en huvudledning.

ASM1-fraktionering: Löst COD fraktioneras upp i inert (SI) och tillgängligt lättnedbrytbart substrat (SS). Partikulärt COD delas upp i inert (XI), långsamt nedbrytbart substrat (XS) och heterotrof biomassa (XBH) baserat på fördefinierade fraktioner. Autotrof biomassa (XA) och partikulärt substrat (XP) antas vara 0 i inflödet. Ammonium är direkt fördelat till SNH (NH₄⁺ och NH₃). Organiskt kväve delas upp i löst (SND) och partikulärt (XND) organiskt kväve med konstanta fraktioner. Alkaliniteten (Salk) antas vara konstant (7 g/m³). Organisk suspenderad substans (VSS) beräknas som en konstant fraktion av partikulärt COD och inert suspenderad substans (ISS) som en fraktion av VSS. Övriga tillståndsvariabler, nitrat (SNO), kvävgas (SN₂) etc. antas vara noll i inflödet.

Bilaga 2: Fallstudie Henriksdals reningsverk

Inflödesmodellering

Det framtida inflödet till Henriksdals reningsverk kommer att inkludera avloppsvatten från både Bromma och Eolshäll utöver de två inlopp som finns idag (Henriksdalsinloppet (HIN) och Sicklainloppet (SIN)). Det tillkommande avloppsvattnet från de båda nya upptagningsområdena kommer att ledas, via en ny lång tunnel, till Sickla. Därefter leds vattnet vidare till Henriksdal. En översikt över framtida inflöde till Henriksdals reningsverk visas i Figur 31.



Figur 31. Framtida inflöde med nytt tunnelsystem till Henriksdal.

Översiktlig karaktäristik för de olika upptagningsområdena ges i Tabell 14.

Tabell 14. Flödesdata för Henriksdal, Eolshäll och Bromma år 2012 (Saagi, 2018).

Upptagningsområde	Inkommande flöde (m ³ /d)	Antal anslutna (pe)	Industrianslutning (m ³ /d)	Total upptagningsyta (ha)
Henriksdal (inklusive Sickla)	283 000	784 000	28 000	19 200
Bromma	141 000	328 000	14 000	9 900
Eolshäll	40 800	119 000	0	2 000

Inflödesmodelleringen för Henriksdals reningsverk utgick från data för 2012 för Henriksdal (som har två inflöden HIN=Henriksdal in och SIN=Sickla in) och Bromma reningsverk (BIN), se Tabell 15. Från upptagningsområdet för Eolshäll fanns inte kalibreringsdata men i och med att det är ett så pass litet upptagningsområde (endast 7 %) så anses det inte vara ett problem.

För kalibreringen användes 15-minutersvärden på inflöde och temperatur samt vecko- och dygnssamlingsprov för TOC, kväve, fosfor. TOC konverterades till COD genom inflödesspecifika omvandlingsfaktorer (HIN – 3,83, SIN – 3,73 och BIN, 3,3). Andra nödvändiga data var regnintensitet (mm/h), avdunstning (månadsvariation) och omgivande lufttemperatur. Den partikulära andelen av COD har antagits vara 80 % vilket är samma som i SIMFRAM.

Antalet anslutna förväntas öka med ca 837 000 pe (32 %) till år 2040 som är det simulerade framtidsscenariet.

Tabell 15. Belastningsdata för Henriksdals reningsverk 2012. Henriksdal N = Nackainflödet och Henriksdal S = Sicklainflödet.

	Henriksdal N (HIN)	Henriksdal S (SIN)	Bromma (BIN)
Inkluderat avrinningsområde (ha)	4 500	14 700	9 900
Personekvivalenter (pe)	389 000	395 000	328 000
Inflöde (m ³ /d)	124 000	160 000	142 000
COD (g/m ³ , kg/d)	149/21 300	117/20 600	80/11 100
BOD ₇ * (g/ m ³ , kg/d)	208/25 500	146/21 800	100/13 500
NH ₄ -N (g/m ³ , kg/d)	29/3 600	18/2 700	18/2 500
Tot-N (g/m ³ , kg/d)	44/5 400	32/4 900	27/ 3 700
Tot-P (g/m ³ , kg/d)	5.5/680	5/770	3/ 370
TSS* (g/m ³ , kg/d)	266/ 33 200	267/41 100	192/ 26 300

*) Dygnsprover tagna 1 ggr/vecka.

Nyckelparametrar för kalibrering visas för inflödet Henriksdal S i Tabell 16 som exempel.

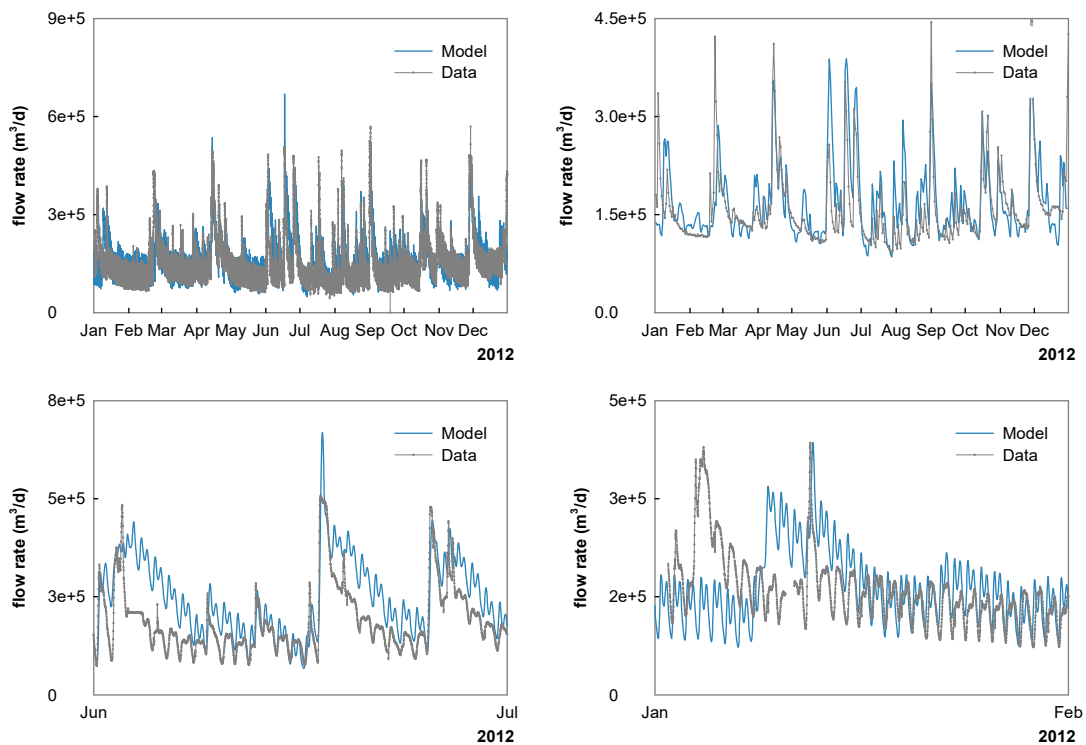
Tabell 16. Nyckelparametrar för kalibrering av inflödesmodellen för Henriksdal S.

Modellavsnitt	Parameter	Värde	Enhet (eng.)	Kommentar (eng.)
Huhållsspillvatten	<i>Q_{perPE}</i>	0,15	m ³ /PE.d	Domestic wastewater flow rate per population equivalent
	<i>PE</i>	395 000	PE	Population equivalents
	<i>domestic_avg</i>	0,032	(kg	Average daily pollutant loads per
		0,126	poll/PE.d)	PE for COD _{sol} , COD _{part} , NH ₄ -N,
		0,007		TKN, Tot-P
0,012				
0,002				
Industri	<i>Q_{ind_daily}</i>	15 930	m ³ /d	Daily average wastewater flow rate from industry.
	<i>industry_avg</i>	1 385	kg poll/d	Average daily industrial pollutant
		539		loads for COD _{sol} , COD _{part} , NH ₄ -N,
		290		TKN, Tot-P
		513		
79				
Dagvatten	<i>rrc</i>	1	-	Rainfall runoff coefficient
	<i>imp_area</i>	192,5	ha	Impervious area
	<i>perv_area</i>	2 400	ha	Pervious area
	<i>Kacc</i>	5	kg/ha.d	Surface accumulation rate (accumulation and washoff model)
	<i>kdecay</i>	0,2	1/d	Decay rate constant (accumulation and washoff model)
	<i>Kwashoff</i>	0,3	1/mm	Wash-off constant (accumulation and washoff model)
	<i>emc_codsol</i>	9	g/m ³	EMC for COD _{sol}

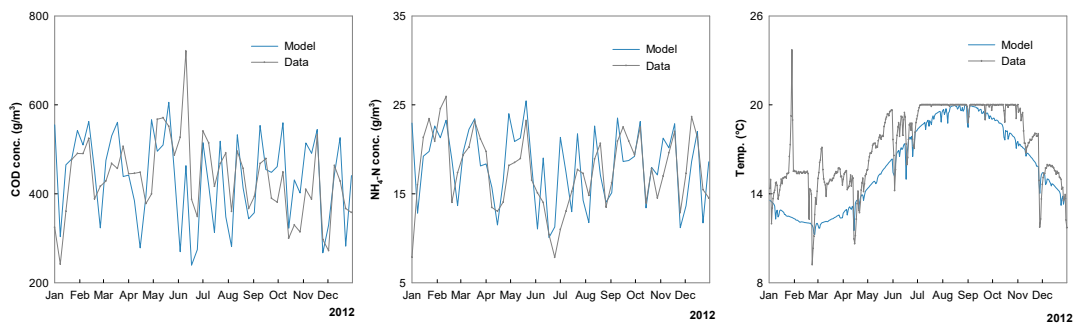


	<i>emc_nh4</i>	0,56	g/m ³	EMC for NH ₄ -N
	<i>kreservoir</i>	6	min	Reservoir time constant for surface runoff model
Infiltration	<i>gwbias</i>	80 000	m ³ /d	Mean yearly groundwater flow rate
	<i>amp</i>	0,05	%	Amplitude of groundwater flow rate variation (annual)
	<i>freq</i>	$2\pi/365$	rad/d	Frequency of the sine wave (1 year)
	<i>phase</i>	$-3\pi/2$	rad	Phase shift
	<i>A</i>	4 800	ha	Area (soil model)
	<i>K</i>	0,6	m/d	Soil permeability (soil model)
	<i>Kinf</i>	2 400 000		Tuning parameter for infiltration (soil model)
	<i>Kdown</i>	16 000		Tuning parameter for flow to aquifers (soil model)
	<i>Kevap</i>	0,05		Parameter for evaporation of water from soil (soil model)
Ledningsnät	<i>subareas</i>	9	-	Number of sub-areas in the sewer system
	<i>ksewer</i>	6	min	Time constant for each sewer tank
Temperatur	<i>TAmp</i>	4	°C	Amplitude of temperature variation (annual)
	<i>TBias</i>	16	°C	Mean annual temperature
	<i>TFreq</i>	$2\cdot\pi/365$	rad/d	Frequency of temperature model (yearly)
	<i>TPhase</i>	$-0,8\pi$	rad	Phase shift for yearly temperature model
	<i>TdAmp</i>	0,7	°C	Amplitude of daily temperature variation
	<i>TdBias</i>	0	°C	Bias for daily temperature model
	<i>TdFreq</i>	2π	rad/d	Frequency of daily temperature model
	<i>TdPhase</i>	$0,25\pi$	rad	Phase shift for daily temperature model
	<i>temp_correction</i>	2	-	Temperature correction factor for precipitation
ASM1	<i>SALK_cst</i>	7		ASM1 fractionation parameters
fraktionering	<i>SI_cst</i>	30		
	<i>XI_fr</i>	0,23		
	<i>XS_fr</i>	0,62		
	<i>XBH_fr</i>	0,15		
	<i>XBA_fr</i>	0		
	<i>XP_fr</i>	0		
	<i>SNO_fr</i>	0		
	<i>SNH_fr</i>	1		
	<i>SND_fr</i>	0,247		
	<i>XND_fr</i>	0,753		

Resultat från kalibreringen av flödet till Henriksdal visas i Figur 32 och Figur 33.



Figur 32. Kalibreringsresultat för inflöde till Henriksdal vid 15 min intervall (a) och dygnsmedel (b). Flödesdynamik under juni (c) och januari (d).



Figur 33. Inkommande COD (a), $\text{NH}_4\text{-N}$ (b) och temperatur (c) för modellerade värden (blå) och data från Henriksdal (grå).

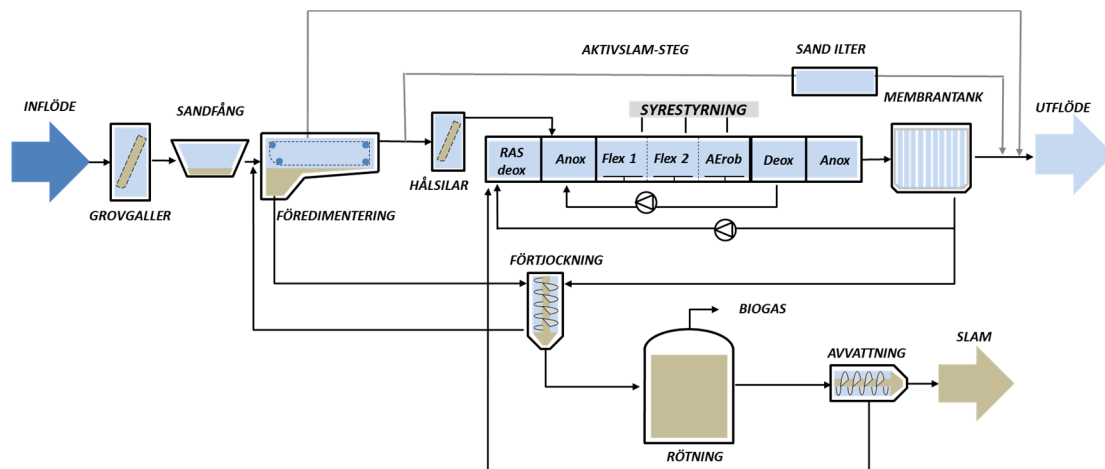
Modellering av inflöde – skillnader jämfört med SIMFRAM

Jämfört med SIMFRAM är flödesprofilen något ändrad vilket syns i att variansen i dygnsflödet har ökat och att flödestopparna är något annorlunda fördelade än i SIMFRAM. I processmodellen medför detta att bräddning vid Sickla eller förbi Henriksdal sker mer sällan i SIMFRAM 2. Däremot passerar en större andel av flödet högflödesreningen i sandfiltren. Den större andelen av flödet som passerar via sandfiltren ger högre halter av utgående TSS och BOD_7 samt en högre förbrukning av fällningskemikalier. Den större variationen av dygnsflödet ger också högre toppar på ammonium och nitrat än i SIMFRAM. Bräddning vid Sickla sker vid $11 \text{ m}^3/\text{s}$ och vid Henriksdal då flödet överstiger $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Jämfört med SIMFRAM har tillkommande COD från nya anslutningar justerats ner. I SIMFRAM var mängden 186 g COD/p,d. I SIMFRAM 2 är denna siffra 157 g COD/p,d, vilket motsvarar 2,25 g COD/g BOD. Andelen löst respektive partikulärt biologiskt nedbrytbart organiskt kväve har justerats jämfört med SIMFRAM för att minska totalkvävereduktionen över försedimenteringen något. I SIMFRAM 2 har också en nedjustering av inkommande kväve gjorts jämfört med SIMFRAM. Orsaken är att labdata för Sickla-inloppet även innehåller internbelastning från rejektivattnet. Detta drogs inte bort i SIMFRAM eftersom det då inte var känt. I SIMFRAM 2 är detta korrigerat.

Processmodellering

Henriksdals reningsverk är nedsprängt i berg och den framtida utbyggnaden påverkas av tre avgörande faktorer: tillgängligt utrymme i befintlig bergsanläggning, ökad belastning på grund av nedläggningen av Bromma reningsverk samt hårdare reningskrav. Med anledning av dessa tre faktorer kommer Henriksdals reningsverk att uppgraderas med hjälp av membranteknik som gör att den befintliga tillgängliga volymen kan utnyttjas bättre och utan behov av att expandera bergutrymmet. Figur 34 visar en översiktlig bild av en av de framtida linjerna vid Henriksdal.

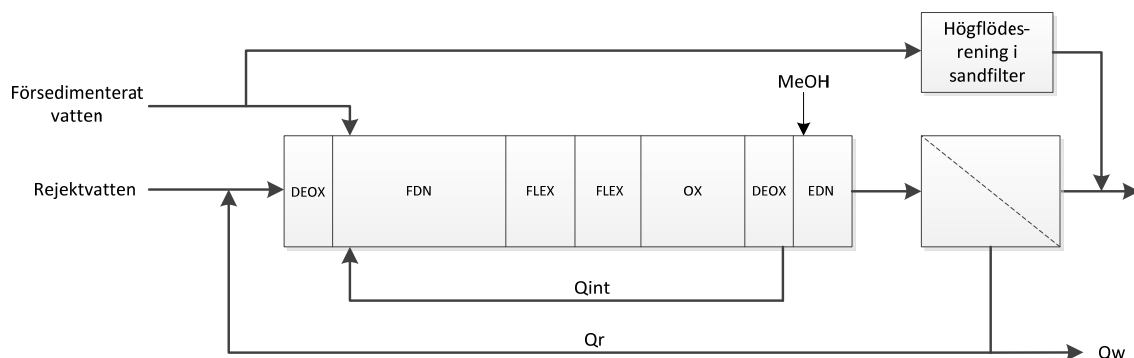


Figur 34. Processkonfiguration framtida Henriksdal (från Saagi et Al, 2018).

För Henriksdalsverkets processmodellering användes den modell som kalibrerades upp för Scenario 3 i SIMFRAM och som är den planerade utformningen för år 2040. Den framtida reningsprocessen på Henriksdals reningsverk kommer att bestå av grovrening, sandfång, förfällning med järnsulfat, försedimentering, samt biosteg och membran. För att skydda membranerna från hår och fibrer kommer finmaskiga hålsilar installerats mellan försedimenteringen och membransteget. Vid höga flöden sker förbiledning till sandfilter där högflödesrening sker.

Biosteget består av fördenitrifikation, nitrifikation och därefter även efterdenitrifikation med tillsats av extern kolkälla. Med de nya strängare kraven på utgående totalkväve (6 mg/L) kommer inte enbart fördenitrifikation att räcka för att komma ner i de låga utsläppshalterna.

Före biosteget behövs också en RAS-deox för att driva av löst syre som annars kan föras tillbaka till fördenitrifikationen via returslammet på grund av den intensiva luftningen i membransteget. Fördenitrifikationszonen följs av två flexzoner (flexzon 1 och flexzon 2). Dessa två zoner kan drifas som antingen anoxiska eller aeroba beroende på temperaturen i avloppsvattnet. Kolkälla tillsätts efter efterdenitrifikationszonen och för samtliga framtidsscenarioer antas metanol användas. Omräkning till andra kolkällor kan göras i det framtagna excelverktyget. Biosteget på Henriksdals reningsverk består av 7 parallella linjer. I modellen simuleras dessa som en enda linje. En översikt över biostegets processkonfiguration visas i Figur 35.



Figur 35. Biosteget på Henriksdals reningsverk, bestående av för- och efterdenitrifikation med internrecirkulation och tillsats av metanol. I simuleringarna styrs flexluftningen av temperaturen i inflödet.

I det efterföljande membransteget avskiljs det aktiva slammet och pumpas tillbaka till RAS-deoxen som returslam. Överskottsslammet pumpas till slambehandlingen där termofil rötning sker. Rejektvatten från slamavvattningen förs tillbaka till RAS-deoxen i biosteget.

När flödet till biosteget överstiger 10 m³/s införs så kallad högflödesdrift, eftersom membranerna har en högsta tillåten kapacitet på flödet. Vid högflödesdrift kompletteras förfällningen med direktfällning med järnklorid och polymer. Flöden överstigande 10 m³/s leds förbi biosteget till högflödesrening i sandfilter där fällning sker med järnsulfat.

Designparametrar för den framtida anläggningen presenteras i Tabell 17 nedan. Den framtida anläggningen dimensioneras för 1 621 000 pe. Den framtida processdesignen är beräknad utifrån en framtida BOD-belastning in till Henriksdal. BOD är dock en parameter med stora osäkerheter i labanalyserna varför processmodellerna istället beräknas utifrån COD. Vid Henriksdal mäts inte COD utan istället mäts TOC vilket gör att en omräkning mellan COD och TOC måste göras för att kunna jämföra modell och processdesign. Omräkningsfaktorerna har varit 3,3 g COD/g TOC från uppmätta TOC-data på verket, samt 2,25 g COD/g BOD₇. Detta är enligt Balmér (2015) rimliga värden.

Tabell 17. Designparametrar för Henriksdal 2040.

Parameter	Enhet	Värde
Belastning	pe	1 621 000
Medelinflöde	m ³ /d	542 000
Max inflöde till biologi	m ³ /d	864 000
Slamhalt biologi	g/m ³	8 000
Slamhalt membrantankar	g/m ³	10 000
Total volym biosteg	m ³	204 000
Total volym membrantankar	m ³	40 000
Installerad membranyta	m ²	1 600 000
Rötkammarvolym	m ³	39 000
Total slamålder	d	28

Följande styrning har använts för samtliga fall:

- Högflödesrening (förbiledning av biosteg) sker vid flöden större än 10 m³/h.
- Returslamflödet styrs för att hålla en slamhaltskoncentration på 8 000 mg/l i biosteget och 10 000 mg/l i membrantanken.
- Nitratreturflödet är 3,2 ggr högre än designflödet på 1 702 000 m³/d.
- Flexzon 1 luftas då temperaturen i det inkommande avloppsvattnet < 10 °C.
- Flexzon 2 luftas då temperaturen i det inkommande avloppsvattnet < 17 °C.

Denna styrning premierar denitrifikationen och således minimering av förbrukning extern kolkälla.

De scenarier som simulerats är följande

1. Basfall (1 621 000 pe år 2040)
2. Ökad infiltration (mer infiltration från grundvatten)
3. Minskad infiltration (mindre infiltration från grundvatten)
4. Ökad hårdgjord yta (ger mer snabb avrinning)
5. Minskad hårdgjord yta (ger mindre snabb avrinning)

Ingen egentlig kalibrering har gjorts inom detta projekt, men eftersom tillkommande COD från nya anslutningar justerats ner från föregående projekt redovisas modellresultaten från basfallet tillsammans med designvärden i Tabell 18.

Tabell 18. Modellresultat för Henriksdals reningsverk och motsvarande värden som verket är designat för.

	Modell basfall	Design	Enhet
Belastning till verket ¹⁾			
SS	144 512	145 903	kg/d
COD	254 899	255 404	kg/d
Totalkväve	20 798	19 434	kg/d
NH ₄ -N	13 308	15 000	kg/d
Belastning till biosteget			
SS ²⁾	78 425	60 000	kg/d
COD	133 959	130 669	kg/d
Totalkväve	16 874	17 700	kg/d
NH ₄ -N	13 250	15 000	kg/d
Utgående halter			
Totalkväve	4,8	5	g/m ³
NO ₃ -N	3,5	-	g/m ³
NH ₄ -N	0,5	<2	g/m ³
Slam och biogas			
Slamhalt biosteget	3 424	3 437	g/m ³
Slamhalt membran	7 998	8 000	g/m ³
% VS biosteget	79	77	%
Primärslamproduktion	116 838	116 734	kgTS/d
Överskottslamproduktion	57 842	58 917	kgTS/d
Slam från avvattning ³⁾	105 601	139 800	kgTS/d
Producerad mängd rågas ⁴⁾	60 040	86 400	Nm ³ /d

¹⁾ In till försed.

²⁾ Jämfört med designvärdena är SS-belastningen in till biosteget högre i det simulerade basfallet.

³⁾ Inget externt organiskt material tas emot.

⁴⁾ 2015 antogs att externt material skulle tas emot.

Resultat från simuleringar av basfall och de fyra inflödesscenarierna visas i Tabell 19.

Tabell 19. Sammanställning av de fem scenarierna för Henriksdals reningsverk (årsmedelvärden om inget annat anges).

	Enhet	Scenario				
		Basfall	1	2	3	4
Q _{in} tot	m ³ /d	541 445	616 190	466 921	542 529	541 163
Q _{in} infiltration	m ³ /d	235 797	310 097	160 936	230 412	241 209
Q _{snabb} avrinning	m ³ /d	10 800	12 3000	14 000	16 300	5 400
Andel infiltration	%	44	50	34	42	45
Andel snabb avrinning	%	2	2	3	3	1
Q förbilet AS	m ³ /år	3 458 300	7 362 800	661 080	3 995 800	2 959 500



Rapport B 2387 – Utvärdering av framtida inflödesscenarier för svenska reningsverk-effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan

COD in	mg/L	471	414	546	470	470
TSS in	mg/L	267	235	310	267	267
Tot-N in	mg/L	38	34	45	38	38
NH ₄ -N in	mg/L	25	22	29	25	25
Tot-P in	mg/L	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
Temp in	°C					
Energi pumpning (El)	kWh/d	36 861	39 161	34 314	36 821	36 895
Energi luftning ASP (El)	kWh/d	61 925	60 729	63 014	61 878	61 973
Förbrukning kolkälla	kg COD/d	3 266	3 580	3 131	3 216	3 329
Förbrukning fällningskemikalie	m ³ /d					
Förbrukning Polymer (3 st)	kg TS/d	1 772	1 799	1 740	1 773	1 770
BOD ₅ ut	mg/L	1,0	1,5	0,6	1,1	0,9
COD ut	mg/L	33,0	33,8	32,4	33,2	32,8
TSS ut	mg/L	0,6	1,3	0,2	0,8	0,5
Tot-N ut	mg/L	4,8	5,0	4,7	4,8	4,8
NH ₄ -N ut	mg/L	0,7	1,0	0,5	0,8	0,7
NO ₃ -N ut	mg/L	3,5	3,4	3,7	3,5	3,6
Tot-P ut	mg/L	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11
PO ₄ -P ut	mg/L	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Tot-N ut	kg/d	2 609	3 057	2 186	2 624	2 595
Tot-N red	kg N-red/d	18 185	17 772	18 603	18 184	18 192
Tot-N red	%	87	85	89	87	88
Tot-N förbilet AS	kg/år	131 415	250 335	29 749	151 840	112 461
Tot-N förbilet AS	%	1,98	3,86	0,44	2,29	1,69
Energi pumpning (El)	kWh/kg N-red	2,03	2,20	1,84	2,02	2,03
Energi luftning ASP (El)	kWh/kg N-red	3,41	3,42	3,39	3,40	3,41
Förbrukning kolkälla	kg COD/kg N-red	0,18	0,20	0,17	0,18	0,18
Energi pumpning (El)	kWh/m ³	0,068	0,064	0,073	0,068	0,068
Energi luftning ASP (El)	kWh/m ³	0,114	0,099	0,135	0,114	0,115
Förbrukning kolkälla	kg COD/m ³	0,006	0,006	0,007	0,006	0,006

Ingående data till LCA-modellering

Resursförbrukningen för Henriksdals fallstudie visas i Tabell 20. Dataunderlaget har tagits fram av Stockholm Vatten, baserat på driftkostnadskalkyler för framtida Henriksdal. Inga värden har ändrats från föregående projekt.

Tabell 20. Antaganden för beräkning av resursförbrukning för Henriksdals fallstudie.

Resurs	Värde	Enhet
Mekanisk rening – energi		
Energi, sandfång (Sickla + Henriksdal)	4 313	kWh/d
Mekanisk rening – kemikalier		
Järnsulfat, förfällning	67	g/m ³
Järnklorid, vid direktfällning	121	g/m ³
Polymer, vid direktfällning	0,3	g/m ³
Biosteget - energi		
Energi, luftning aktivslam + membran		
Energi, omrörning	354	kW, 7 linjer
Pumpenergi, pumpning till biosteget	0,0115	kWh/m ³
Pumpenergi, internrecirkulation	0,0028	kWh/m ³
Pumpenergi, returslam	0,006	kWh/m ³
Pumpenergi, överskottslam	0*	kWh/m ³
Pumpenergi, permeat MBR	0,0079	kWh/m ³
Biosteget – kemikalier		
Järnsulfat, simultanfällning	2,8	g Fe/g utfälld P
Järnsulfat, högflödesrening	28	g/m ³ förbilet vatten
Natriumhypoklorit, membrantvätt	1,2	m ³ /d
Citronsyra, membrantvätt	1,4	m ³ /d
Polyaluminiumklorid (PIX), polering på membranen	694	kg/d
Slambehandling – energi		
Pumpenergi, förtjockat primärslam	1,92	kWh/m ³ primärslam
Pumpenergi, förtjockat överskottslam	8,23	kWh/m ³ överskottslam
Uppvärmning rötkammare (el till värmepump)	20,4	kWh/m ³
Uppvärmning rötkammare (uppvärmningsolja)	0,83	kWh/m ³
Övrig energi rötkammare (pump, omrörning, fläkt m.m.)	2,64	kWh/m ³
Energi avvattning (inkl. centrifuger, polymerinblandning)	1,77	kWh/m ³
Energi rötslamlager och hygienisering i hålltank	1,77	kWh/m ³
Slambehandling – kemikalier		
Polymer, förtjockning primärslam	251,6	g/m ³
Polymer, förtjockning överskottslam	381,5	g/m ³
Polymer, avvattning av slam	222	g/m ³ icke avvattnat slam

* Ingår i energibehovet för förtjockning av överskottslam

Bilaga 3: Fallstudie Käppalaverket

Inflödesmodellering

Käppalas upptagningsområde består av 11 kommuner och ett långt tunnelsystem. I modellen förenklades detta och modellerades som ett enda upptagningsområde, vilket är en grov förenkling av verkligheten. Inte heller deras tunnel modellerades. Det kan dock motiveras genom att modellerade flöden trots detta stämde bra överens med uppmätta värden samt att det hade krävts mycket mer arbete och dataunderlag från varje kommun för att simulera upptagningsområdet i mer detalj.

Data för inflödesmodelleringen för Käppala utgick från år 2012. Högupplöst data för vattenflöde och temperatur fanns att tillgå, dock fanns ingen data för nederbörd tillgänglig från Käppalas upptagningsområde. Istället användes högupplöst nederbördsdata från Tullinge, söder om Stockholm.

Kalibreringen fokuserade på att fånga flödesvariationerna på korrekt sätt. Parametrar avseende flöde från hushåll och dess sammansättning ändrades från kalibrering mot 2012 års inflöde till det framtida inflödet vid 900 000 pe med resonemanget att även belastningen från befintliga anlutningar förväntas förändras till framtidsscenarioet. Målvärden för flöde, COD och totalkväve för det framtida scenarierna har hämtats från Thunberg (2014) och sammanfattas i Tabell 21.

Tabell 21. Data för inflödet till Käppala reningsverk 2012 och i framtida scenario med 900 000 pe.

	Käppala 2012	Käppala 900
Inkluderat avrinningsområde (ha)	12 200	12 200
Personekvivalenter (pe)	429 000	900 000
Inflöde (m ³ /d)	164 000	198 000
COD (g/m ³ , kg/d)	473/77 500	590/117 000
NH ₄ -N (g/m ³ , kg/d)	26/4 270	
Tot-N (g/m ³ , kg/d)	41/6 800	50/9 900
Tot-P (g/m ³ , kg/d)	4,7/770	4,5/900

Fraktionering av ASM1-variabler har hämtats från kalibrering gjord i SIMFRAM och 70 % av det framtida flödet har ansatts gå till nya verket (NV) som är den del av verket som processmodellen är byggt för. Detta flöde har fått genom att helt enkelt ta 0,7 gånger det genererade inflödet från inflödesmodellen.

Följande ändringar i asm1-fraktioneringen har gjorts från ursprungsversionen av inflödesmodellen:

- SI var inte konstant utan angavs som en fraktion (15,36 %) av löst COD.
- SS var således kvarstående del (84,64 %) av löst COD.
- VSS beräknades som 75 % av partikulärt COD.
- ISS beräknades som 16 % av VSS.

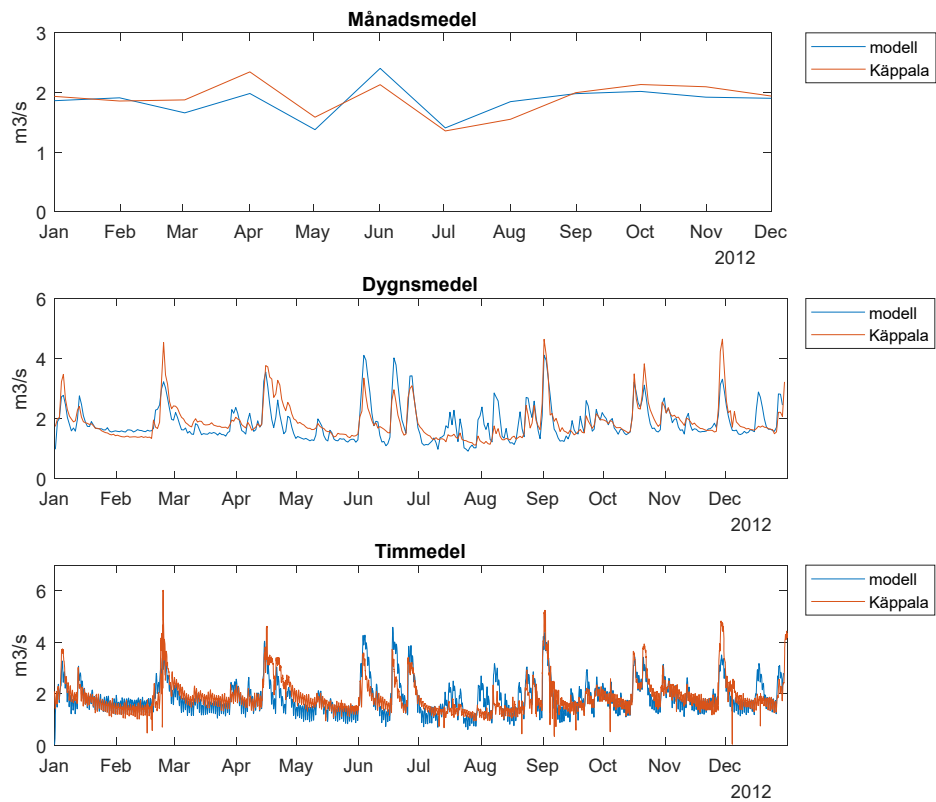
Nyckelparametrar för kalibreringen av Käppalas inflödesmodell presenteras i Tabell 22.

Tabell 22. Nyckelparametrar för kalibrering av inflödesmodellen för Käppala.

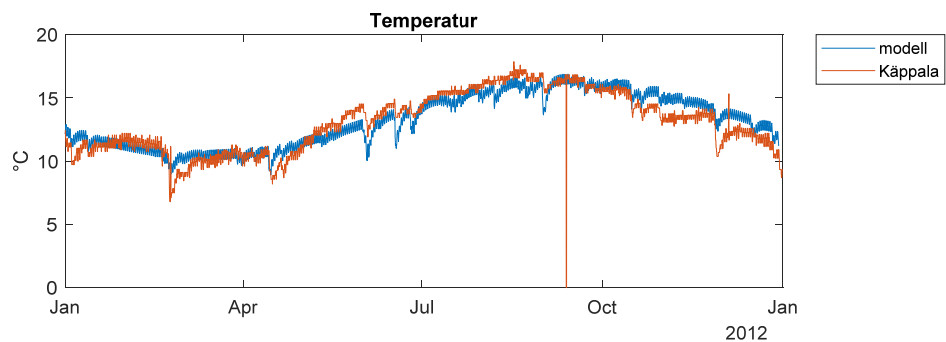
Modellavsnitt	Parameter	Värde	Enhet (eng.)	Kommentar (eng.)
Hushållspillvatten	<i>QperPE</i>	0,123	m ³ /PE.d	Domestic wastewater flow rate per population equivalent
	<i>PE</i>	900 000	PE	Population equivalents
	<i>domestic_avg</i>	0,0256	(kg poll/PE.d)	Average daily pollutant loads per PE for COD _{sol} , COD _{part} , NH ₄ -N, TKN, Tot-P
		0,0880		
		0,00613		
		0,0104		
0,0017				
Industri	<i>Qind_daily</i>	22 500	m ³ /d	Daily average wastewater flow rate from industry.
	<i>industry_avg</i>	2 110	kg poll/d	Average daily industrial pollutant loads for COD _{sol} , COD _{part} , NH ₄ -N, TKN, Tot-P
		9 233		
		257		
		438		
37,23				
Dagvatten	<i>rrc</i>	1	-	Rainfall runoff coefficient
	<i>imp_area</i>	52,5	ha	Impervious area
	<i>perv_area</i>	2 048	ha	Pervious area
	<i>Kacc</i>	5	kg/ha.d	Surface accumulation rate (accumulation and washoff model)
	<i>kdecay</i>	0,2	1/d	Decay rate constant (accumulation and washoff model)
	<i>Kwashoff</i>	0,3	1/mm	Wash-off constant (accumulation and washoff model)
	<i>emc_codsol</i>	9	g/m ³	EMC for COD _{sol}
	<i>emc_nh4</i>	0,56	g/m ³	EMC for NH ₄ -N
<i>kreservoir</i>	N/A	min	Reservoir time constant for surface runoff model	
Infiltration	<i>gwbias</i>	35 500	m ³ /d	Mean yearly groundwater flow rate
	<i>amp</i>	0,4	%	Amplitude of groundwater flow rate variation (annual)
	<i>freq</i>	2 π /364	rad/d	Frequency of the sine wave (1 year)
	<i>phase</i>	-3 π /2	rad	Phase shift
	<i>A</i>	4 095	ha	Area (soil model)
	<i>K</i>	0,9	m/d	Soil permeability (soil model)
	<i>Kinf</i>	2 130 000		Tuning parameter for infiltration (soil model)
	<i>Kdown</i>	3 550		Tuning parameter for flow to aquifers (soil model)
	<i>Kevap</i>	0,05		Parameter for evaporation of water from soil (soil model)
Ledningsnät	<i>subareas</i>	6+9	-	Number of sub-areas in the sewer system

	<i>ksewer</i>	0,0139	min	Time constant for each sewer tank
Temperatur	<i>TAmp</i>	3	°C	Amplitude of temperature variation (annual)
	<i>TBias</i>	13,5	°C	Mean annual temperature
	<i>TFreq</i>	$2 \cdot \pi / 364$	rad/d	Frequency of temperature model (yearly)
	<i>TPhase</i>	$-1,1042\pi$	rad	Phase shift for yearly temperature model
	<i>TdAmp</i>	0,4	°C	Amplitude of daily temperature variation
	<i>TdBias</i>	0	°C	Bias for daily temperature model
	<i>TdFreq</i>	2π	rad/d	Frequency of daily temperature model
	<i>TdPhase</i>	$1,5 \cdot \pi$	rad	Phase shift for daily temperature model
		<i>temp_correction</i>	4	-
ASM1 fraktionering	<i>SALK_cst</i>	7		ASM1 fractionation parameters
	<i>SI_cst</i>	0,1536		Fraction of sol COD
	<i>XI_fr</i>	0,192		
	<i>XS_fr</i>	0,681		
	<i>XBH_fr</i>	0,105		
	<i>XBA_fr</i>	0,018		
	<i>XP_fr</i>	0		
	<i>SNO_fr</i>	0		
	<i>SNH_fr</i>	1		
	<i>SND_fr</i>	0,219		
	<i>XND_fr</i>	0,781		

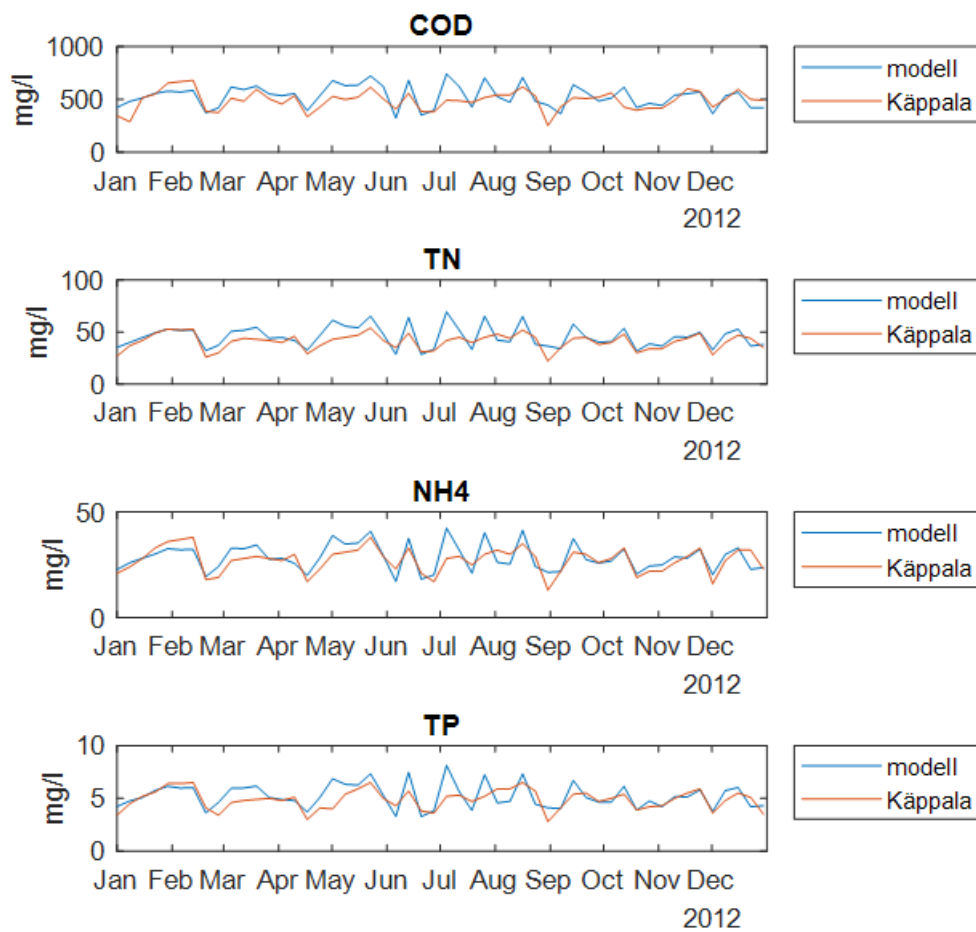
Resultat från flödeskalibreringen visas i Figur 36, från temperaturkalibreringen visas i Figur 37 och resultat för inkommande föroreningshalter visas i Figur 38.



Figur 36. Modellerat flöde (blå) och uppmätta värden på Käppala (röd) som månadsmedel, dygnsmedel och timmedelvärden.



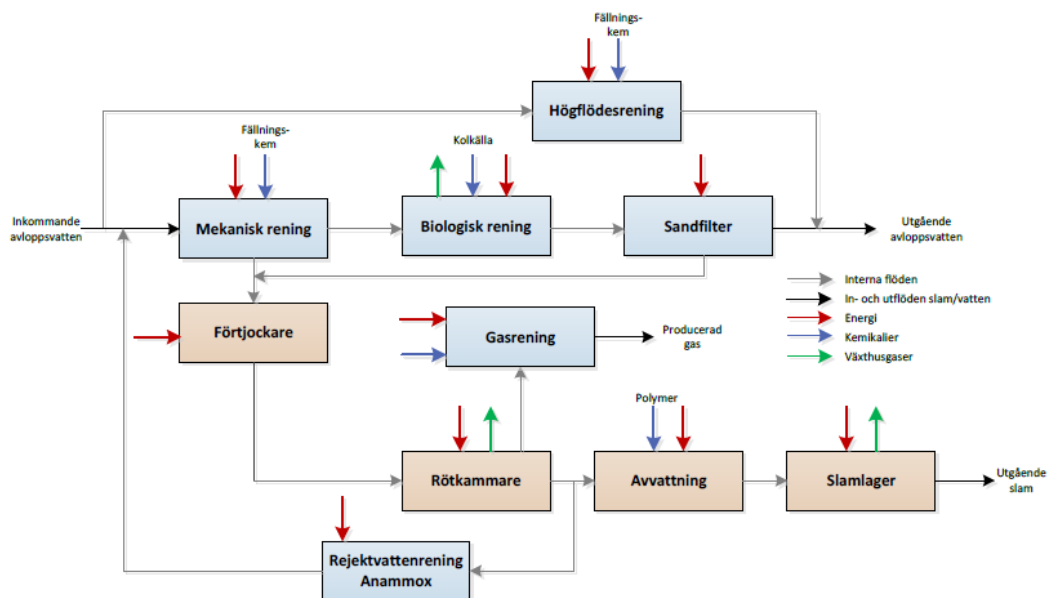
Figur 37. Modellerad temperatur (blå) och uppmätt temperatur på Käppala (röd).



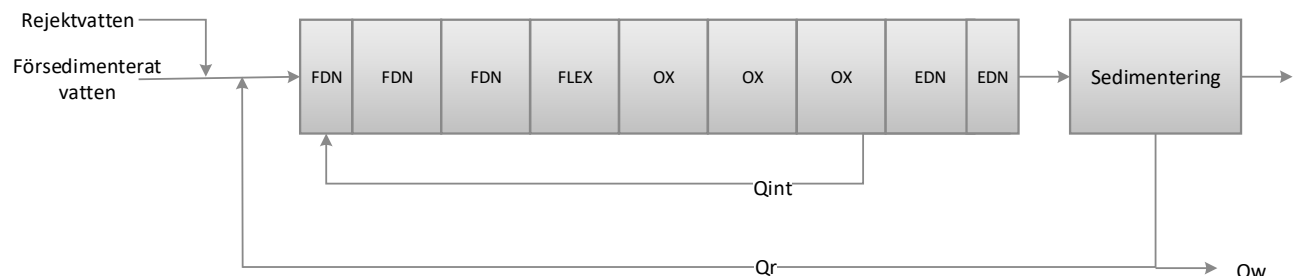
Figur 38. Modellerade (blå) och uppmätta (röd) föroreningshalter som veckovärden för Käppalaverket.

Processmodellering

För Käppala har det inte skett några förändringar avseende förväntad framtida processlösning och framtida utsläppskrav jämfört med vad som studerades i det första SIMFRAM-projektet. För simuleringarna i SIMFRAM 2 projekt används en processkonfiguration motsvarande Scenario 3 från SIMFRAM, se Figur 39 och Figur 40. Det motsvarar en belastning på 900 000 pe samt följande processförändringar jämfört med dagens reningsverk: Införandet av rektvattenrening med en anammoxprocess och höglödesrening samt omställning från simultanfällning och enbart fördenitrifikation till förfällning och kompletterande efterdenitrifikation.



Figur 39. Förenklat processschema för Käppalaverket, inklusive framtida anpassning med höglödesrening och Anammox.



Figur 40. Biosteget på Käppalaverket, bestående av fördenitrifikationsprocess och kolkälledosering i efterdenitrifikationen. I simuleringarna är flexzonen luftad under perioden 22 Nov till 14 Maj.

Modellering av utgående fosfor följer samma upplägg som i SIMFRAM, dvs ut från sandfiltren antas ett konstant värde på 0,12 mg/l medan utgående fosfor från högflödesreningen är flödesproportionell.

Följande styrning har använts för samtliga fall:

- Högflödesrening sker vid flöden större än 13 680 m³/h
- Dosering av fällningskemikalie är flödesproportionell: 15 g Fe/m³ i högflödesreningen, 10 g Fe/m³ i försedimenteringen och 3 g Fe/m³ i sandfilter.
- Luftningen i luftade zoner styrdes mot ett konstant börvärde baserat på utgående syrehalt från respektive zon. Börvärdet för zon 4, 5, 6 och 7 var 2 mg/l.
- Flexzonen (zon 4) styrs som luftad zon under perioden 22 Nov till 14 Maj.
- Doseringen av kolkälla till zon 8 har styrts mot utgående nitrat. Börvärdet på nitrat är satt till 2,75 mg/l.
- Internrecirkulationen från slutet av OX till zon 1 var satt till ett konstant flöde på 4,3 gånger medelvärdet på inkommande vatten.
- Returslamflödet är satt till ett fast värde på 60 000 m³/d.
- Uttaget av överskottsslam har styrts för att hålla slamhalt på 2800 mg SS/L i biosteget.

De scenarier som simulerats är följande

6. Basfall (900 000 pe år 2021)
7. Ökad infiltration (22 % mer infiltration från grundvatten)
8. Minskad infiltration (22 % mindre infiltration från grundvatten)
9. Ökad hårdgjord yta (ger mer snabb avrinning)
10. Minskad hårdgjord yta (ger mindre snabb avrinning)

Resultat från simuleringar av basfall och de fyra inflödesscenarierna visas i Tabell 23.

Tabell 23. Sammanställning av de fem scenarierna för Käppalaverket (årsmedelvärden om inget annat anges).

Medelvärden	Enhet	Scenario				
		Basfall	1	2	3	4
Inflöde	m ³ /d	198 360	212 780	183 720	198 410	198 300
Infiltrationsflöde	m ³ /d	64 613	79 058	49 940	64 157	65 069
Flöde från snabb avrinning	m ³ /d	1 031	1 021	1 029	1 548	516
Andel infiltration	%	33	37	27	32	33
Andel snabb avrinning	%	0,52	0,48	0,56	0,78	0,26
Inflöde till modellen*	m ³ /d	138 846	148 944	128 601	138 885	138 807
Q förbilet AS (högflödesrening)	m ³ /år	48 525	419 850	0	48 525	29 449
Q förbilet AS (högflödesrening)	%	0,10%	0,77%	0,00%	0,10%	0,06%

COD in	mg/L	590	550	637	590	590
TSS in	mg/L	347	323	374	347	347
Tot-N in	mg/L	50	46	53	50	50
NH ₄ -N in	mg/L	29	27	31	29	29
Temp in	°C	13,1	13,0	13,1	13,1	13,1
Energi inloppspumpar (El)	kWh/d	11 108	11 915	10 288	11 111	11 105
Energi pumpning (El)	kWh/d	5 309	5 288	5 321	5 309	5 309
Energi luftning ASP (El)	kWh/d	9 481	9 503	9 424	9 480	9 481
Förbrukning kolkälla	kg COD/d	2 164	2 078	2 305	2 162	2 165
Förbrukning fällningskemikalie, högflödesrening	kg PIX/d	11	117	0	14	9
Förbrukning fällningskemikalie, försedimentering	kg PIX/d	10 061	10 062	10 061	10 061	10 061
Förbrukning fällningskemikalie, sandfilter	kg PIX/d	3 032	3 031	3 032	3 010	3 035
Förbrukning Polymer	kg TS/d	298	277	321	298	298
BOD ₅ ut	mg/L	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0
COD ut	mg/L	28,0	27,2	29,7	28,0	28,0
TSS ut	mg/L	4,9	5,1	4,9	4,9	4,9
Tot-N ut	mg/L	4,3	4,4	4,2	4,3	4,3
NH ₄ -N ut	mg/L	0,8	1,0	0,7	0,8	0,8
NO ₃ -N ut	mg/L	2,7	2,7	2,8	2,7	2,7
Tot-P ut	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
PO ₄ -P ut	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Tot-N ut	kg N/d	602	658	544	602	601
Tot-N red	kg N-red/d	6 274	6 218	6 332	6 274	6 275
Tot-N red	%	91%	90%	92%	91%	91%

* Endast nya verket, som hanterar 70% av inkommande vatten, ingår i simuleringssmodellen.

Ingående data till LCA-modellering

Resursförbrukningen för Käppalaverkets fallstudie visas i Tabell 24. Underlaget baseras på skriftliga och muntliga referenser från reningsverket och andra källor vilket specificeras i Tabell 24. Inga förändringar har gjorts från föregående projekt.

Tabell 24. Antaganden för beräkning av resursförbrukning för Käppalaverkets fallstudie. För poster markerade med (*) har belastnings eller tidsberoende uttryck från Erikstam (2013) använts.

Resurs	Värde	Enhet	Kommentar/Referens
Elförbrukning			
Mekanisk rening total inkl. primärslampumpning	1 691*	kWh/d	Erikstam (2013)
Omrörning – biosteg och högflödesrening	0,004	kWh/m ³ /d	Erikstam (2013)
Luftning – biosteg	0,025	kWh/ m ³ luft	Erikstam (2013)
Returslampumpning	0,013	kWh/ m ³	Käppala (2015). Pers. kom.
Pumpning nitratretur	0,0077	kWh/ m ³	Erikstam (2013)
Överskottsslampumpning	0,134	kWh/ m ³	Erikstam (2013)
Förtjockning	1 169*	kWh/d	Erikstam (2013)
Omrörning – röt-kammare	0,005	kWh/ m ³ /h	Gernaey <i>et al.</i> (2014)
Uppvärmning – röt-kammare (värmepump)	3 316*	kWh/d	Käppala (2015). Pers. kom.
Slamavvattning	1 680*	kWh/d	Erikstam (2013)
Gasrening	3 680*	kWh/d	Erikstam (2013)
Anammox	0,5	kWh/kg N-red	Gannholm (2013)
Kemikalier			
Fällningskem. – simultanfällning	9,5	g/m ³	Käppalaförbundet (2012)
Fällningskem. – förfällning	10	g Fe/m ³	Thunberg (2014)
Fällningskem. – högflödesrening	15	g Fe/m ³	Thunberg (2014)
Fällningskem. – sandfilter	3	g Fe/m ³	Thunberg (2014)
Polymer – förtjockning	10	g polymer/kg TS	Käppalaförbundet (2012)
Polymer - avvattning	12	g polymer/kg TS	Käppalaförbundet (2012)

Bilaga 4: Fallstudie Kungsängens reningsverk

Inflödesmodellering

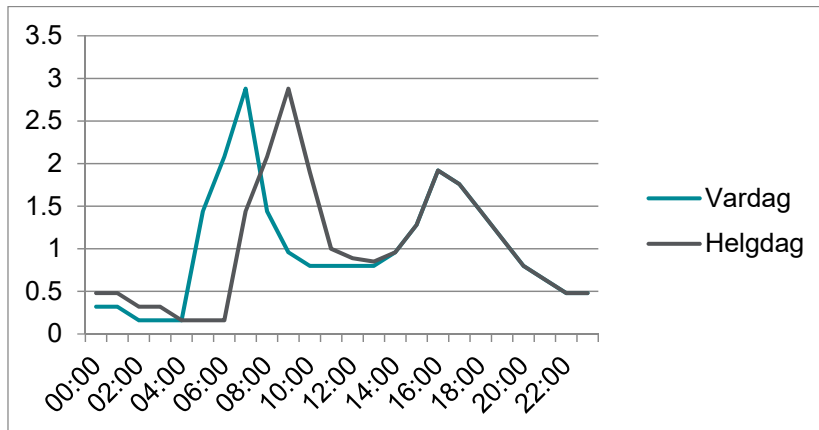
Inflödet till Kungsängsverket utgick från data från september 2013 till och med augusti 2014 för kalibrering. 15 minuters värden på inflöde och temperatur samt vecko- och dygnssamlingsprov (ett per vecka, utom för ammonium där det funnits ett värde per månad) har använts för kalibreringen. Karakteristik för Kungsängens inflöde 2013-2014 återfinns i Tabell 25.

Nederbördsdata med 10 minuters upplösning och lufttemperatur med timupplösning har funnits tillgänglig från Kungsängsverket och använts som indata till modellen. En ökning i antalet anslutna motsvarande 12 000 pe förväntas till år 2021 vilket är det framtidsscenario som simulerats för Kungsängsverket.

Tabell 25. Data för Kungsängsverket 2013-2014.

Kungsängsverket 2013-2014	
Inkluderat avrinningsområde (ha)	400
Personekvivalenter (pe)	128 000
Inflöde (m ³ /d)	46 700
COD (g/m ³ , kg/d)	38217 700
BOD ₇ * (g/ m ³ , kg/d)	155/7 200
NH ₄ -N (g/m ³ , kg/d)	23/1 100
Tot-N (g/m ³ , kg/d)	35/1 600
Tot-P (g/m ³ , kg/d)	3,9/182
TSS* (g/m ³ , kg/d)	241/11 200

Kalibreringen gjordes systematiskt med utgångspunkt från torrvädersflöde följt av att modellera nederbördsfenomen. De viktigaste kalibreringsparametrarna återfinns i Tabell 26. För Kungsängsverket kunde en tydlig helgeffekt synas i inflödesdata. Dyngsprofilen för lördagar och söndagar justerades så att morgontoppen uppstod senare än under vardagar för att bättre passa uppmätt flödesprofil. Se flödesprofil för vardag respektive helgdag för hushållspillvatten i Figur 41. Även en veckoprofil med lägre flöden under fredagar och lördagar (faktor 0,92 fredagar och 0,88 lördagar) användes. Semestereffekt på årsprofilen sattes mellan 10 juli och 1 augusti då belastningen från hushåll antogs vara i genomsnitt 80 % av den normala.



Figur 41. Modellerad dygnsprofil för flöde vardag och helgdag. Morgontoppen kommer 2 timmar senare på helger. Y-axeln visar fraktion, medelvärdet av profilen är lika med 1.

Industribelastningen har antagits vara 7,5 % av flöde, total COD och $\text{NH}_4\text{-N}$. Övriga parametrar har antagits vara 0 från industri. Kungsängsverket hade 2013-2014 industribelastning från både Westinghouse och lakvattendeponi som betydande bidrag till den totala belastningen. Dock kommer vattnet från dessa industrier inte anslutas till verket i framtidsscenariet. Industriell belastning som användes för kalibrering var 3500 m^3/d , löst COD 3849 kg/d, partikulärt COD 9897 kg/d och $\text{NH}_4\text{-N}$ 143 kg/d. På samma sätt som för hushållspillvattnet multiplicerades industribelastningen med en vecko- och en årsprofil. Dock antogs ingen variation i industribelastning vare sig mellan veckodagar eller över året.

Föroreningsmängden per pe har beräknats för att matcha årlig belastning på verket. Själva fraktioneringen av inkommande belastning har baserats på den kalibrering som gjordes i SIMFRAM. Förändringar från SIMFRAM är dock att ISS (inert suspenderad substans) inte är konstant utan en antagen fraktion av TSS (total suspenderad substans) samt att alkaliniteten har antagits vara 7 mol HCO_3/m^3 istället för 4,1.

De viktigaste kalibreringsparametrarna för dagvattnet (snabb avrinning) var den hårdgjorda ytan (200 ha) och icke hårdgjord yta (200 ha). Då ingen uppgift fanns om bidragande avrinningsyta har en uppskattning gjorts för att få rimligt bidrag av långsam infiltration och snabb avrinning. Avvikelser från verklig yta kan bero på att modellen endast tar hänsyn till kombinerade system.

Tabell 26. Modellparametrar för kalibrering av inflödesmodellen för Kungsängsverket.

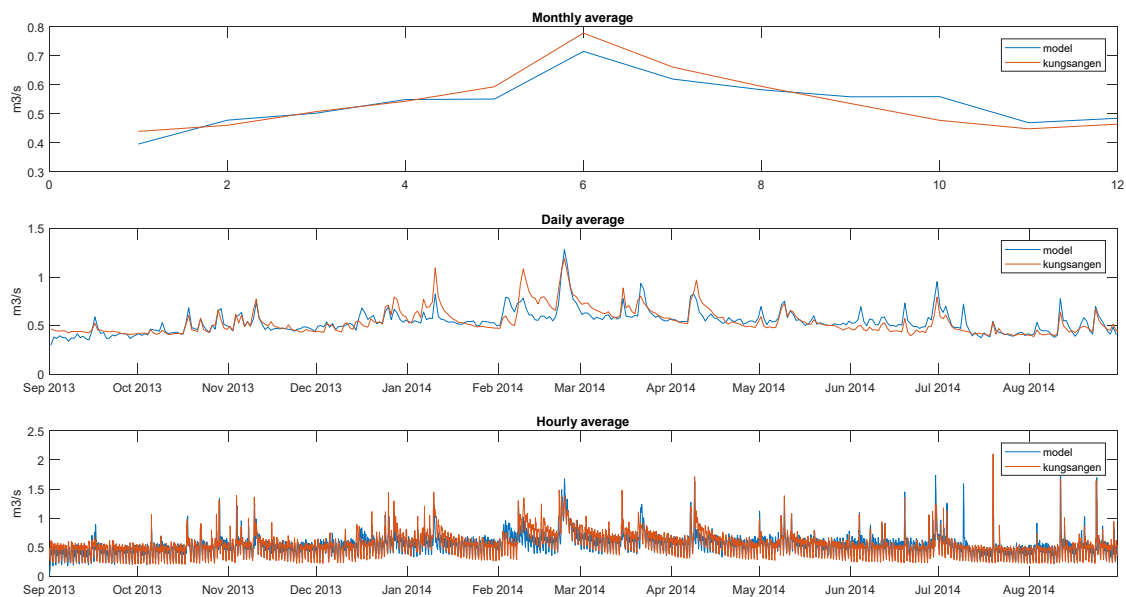
Modellavsnitt	Parameter	Värde	Enhet (eng.)	Kommentar (eng.)
Hushållspillvattnet	Q_{perPE}	0,15	$\text{m}^3/\text{PE.d}$	Domestic wastewater flow rate per population equivalent
	PE	128 000	PE	Population equivalents
	$domestic_avg$	0,0493	(kg poll/PE.d)	Average daily pollutant loads per PE for COD_{sol} , COD_{part} , $\text{NH}_4\text{-N}$, TKN, Tot-P
		0,074		
		0,0081		
		0,0131		
		0,0015		

Industri	<i>Qind_daily</i>	2 620	m ³ /d	Daily average wastewater flow rate from industry.	
	<i>industry_avg</i>	516	kg/d	Average daily industrial pollutant loads for COD _{sol} ,	
		1330		COD _{part} , NH ₄ -N, TKN, Tot-P	
		83			
		0			
0					
Dagvatten	<i>rrc</i>	1	-	Rainfall runoff coefficient	
	<i>imp_area</i>	200	ha	Impervious area	
	<i>perv_area</i>	200	ha	Pervious area	
	<i>Kacc</i>	5		kg/ha.d	Surface accumulation rate (accumulation and washoff model)
	<i>kdecay</i>	0,2	1/d	Decay rate constant (accumulation and washoff model)	
	<i>Kwashoff</i>	0,3	1/mm	Wash-off constant (accumulation and washoff model)	
	<i>emc_codsol</i>	9	g/m ³	EMC for COD _{sol}	
<i>emc_nh4</i>	0,56	g/m ³	EMC for NH ₄ -N		
Infiltration	<i>gwbias</i>	20 500	m ³ /d	Mean yearly groundwater flow rate	
	<i>amp</i>	0,4	%	Amplitude of groundwater flow rate variation (annual)	
	<i>freq</i>	2π/464	rad/d	Frequency of the sine wave (1 year)	
	<i>phase</i>	-π/3	rad	Phase shift	
	<i>A</i>	400	ha	Area (soil model)	
	<i>K</i>	0,9	m/d	Soil permeability (soil model)	
	<i>Kinf</i>	307 500			Tuning parameter for infiltration (soil model)
	<i>Kdown</i>	1 640			Tuning parameter for flow to aquifers (soil model)
<i>Kevap</i>	0,05			Parameter for evaporation of water from soil (soil model)	
Ledningsnät	<i>subareas</i>	4	-	Number of sub-areas in the sewer system	
	<i>ksewer</i>	20	min	Time constant for each sewer tank	
Temperatur	<i>TAmp</i>	4,04	°C	Amplitude of temperature variation (annual)	
	<i>TBias</i>	15,4	°C	Mean annual temperature	
	<i>TFreq</i>	2·π/364	rad/d	Frequency of temperature model (yearly)	
	<i>TPhase</i>	-3π/2	rad	Phase shift for yearly temperature model	
	<i>TdAmp</i>	0,25	°C	Amplitude of daily temperature variation	
	<i>TdBias</i>	0	°C	Bias for daily temperature model	

	<i>TdFreq</i>	2 π rad/d	Frequency of daily temperature model
	<i>TdPhase</i>	$\pi/8$ rad	Phase shift for daily temperature model
	<i>temp_correction</i>	2 -	Temperature correction factor for precipitation
ASM1 fraktionering	<i>SALK_cst</i>	7	ASM1 fractionation parameters
	<i>SI_cst</i>	30	
	<i>XI_fr</i>	0,21	
	<i>XS_fr</i>	0,63	
	<i>XBH_fr</i>	0,17	
	<i>XBA_fr</i>	0	
	<i>XP_fr</i>	0	
	<i>SNO_fr</i>	0	
	<i>SNH_fr</i>	1	
	<i>SND_fr</i>	0,247	
	<i>XND_fr</i>	0,753	

Resultat kalibrering

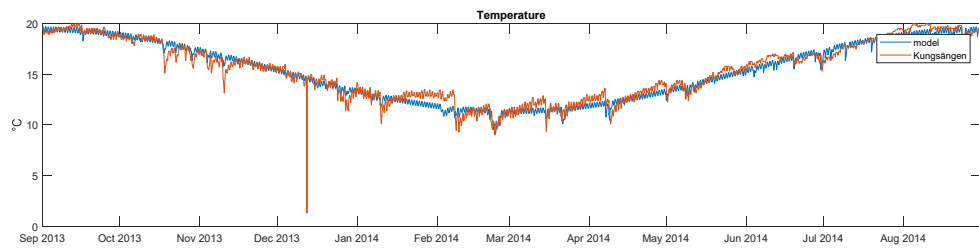
Inkommande flödesprofil som månadsmedel, dygnsmedel och timmedel för modellerat och uppmätt flöde visas i Figur 42.



Figur 42. Modellerat (blå linje) och uppmätt (röd linje) flöde för Kungsängsverket som månadsmedelvärden (överst), dygnsmedelvärden (mitten) samt timmedelvärden (nederst).

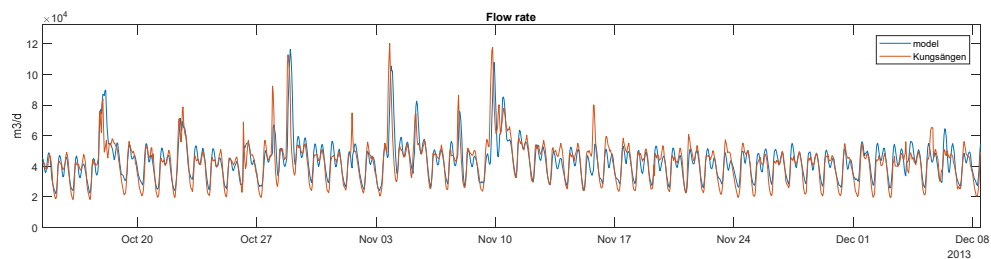
Simulerat medelflöde var 46 441 m³/d, vilket motsvarar 99,5 % av medelflödet enligt mätdata för perioden (46 656 m³/d).

Modellerad och uppmätt temperatur visas i Figur 43.

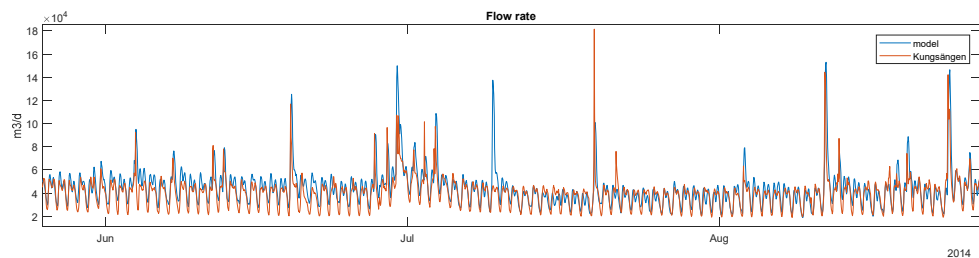
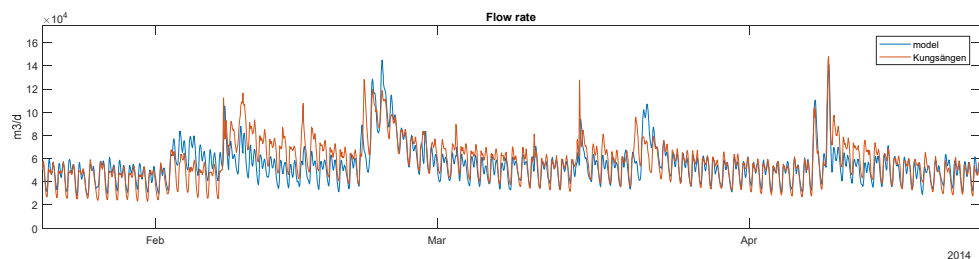


Figur 43. Modellerad (blå linje) och uppmätt (röd linje) temperatur för Kungsängen 2013-2014.

Modellerat inflöde gav ibland aningen högt lägsta flöde i dygnsprofilen, se exempel i Figur 44. Effekten av regn/snösmältning fångades olika bra vid olika tillfällen under året, huvudsakligen beroende på ingående regndata, se exempel i Figur 45.

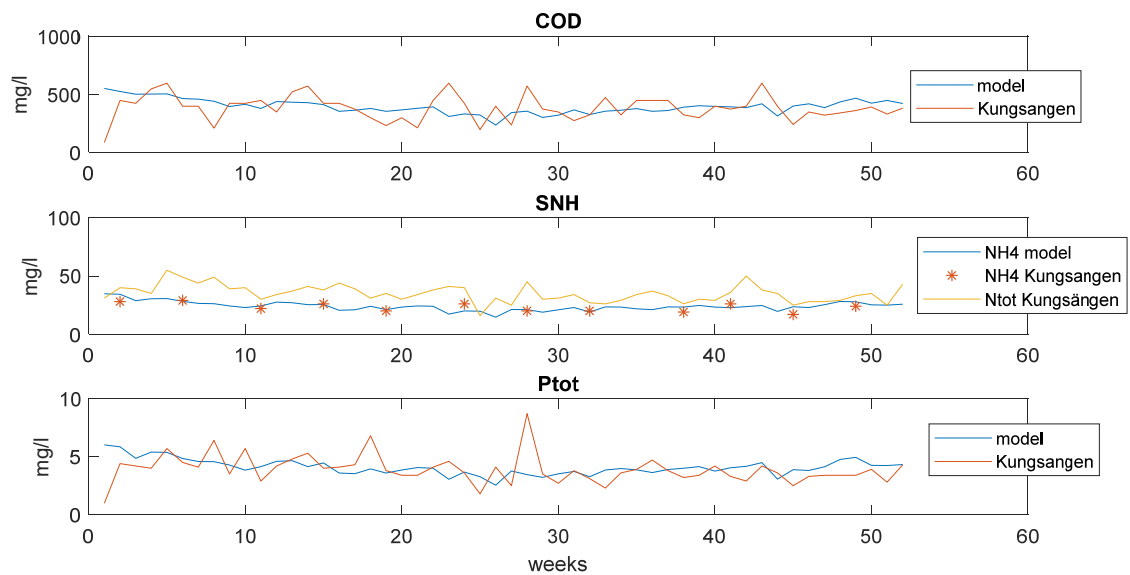


Figur 44. Modellen fångar korta toppar i regn men ligger aningen högre än mätdata vid dygnets lägsta flöde.



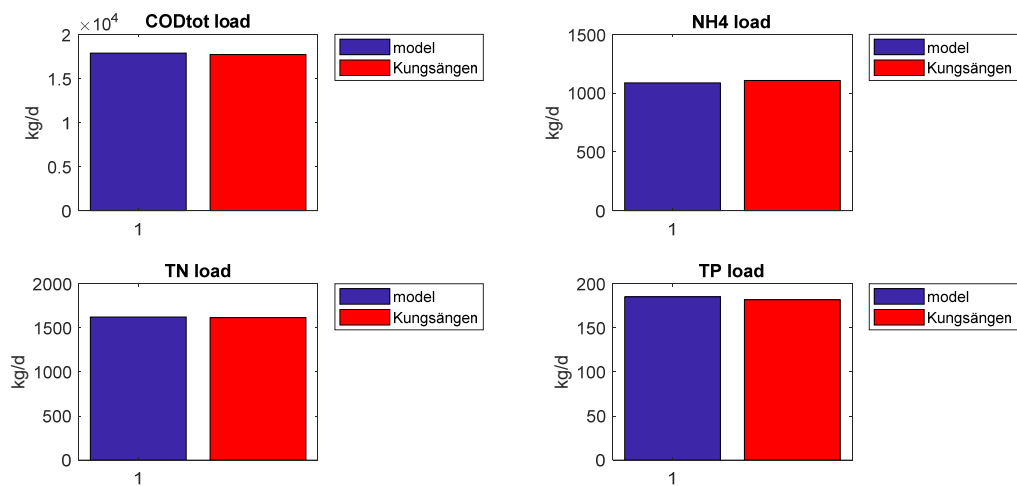
Figur 45. Exempel på snösmältning i februari (överst) samt regn under sommarmånaderna. Blå linje är modellerat inflöde och röd linje uppmätt flöde under 2013-2014.

Koncentrationer i inkommande som veckomedel jämfört med mätdata från Kungsängsverket visas i Figur 46.



Figur 46. Modellerad belastning av COD, NH₄-N (SNH) och totalfosfor tillsammans med mätdata från Kungsängsverket 2013-2014.

Total belastning i kg/d visas i Figur 47.



Figur 47. Total belastning av COD, NH₄-N, totalkväve (TN) och totalfosfor (TP) för Kungsängsverket 2013-2014. Blå=modellerad, Röd=uppmätt.

Skapande av framtida flöde

För det framtida inflödet antas antalet anslutna öka med 12 000 pe.

För nyanslutningar antogs i SIMFRAM nedanstående belastning per pe (Tabell 27). Dessa värden avviker något från kalibrerade mängder enligt Tabell 26.

Tabell 27. Antagna värden för framtida ansluta i SIMFRAM.

Parameter	Värde	Enhet
Flöde	0,15	m ³ /pe,d
COD	126,5	g/pe,d
Tot-N	12	g/pe,d
Tot-P	1,3	g/pe,d

Sammanställning av modellerat flöde (Tabell 28) och belastning (Tabell 29) för framtidsscenarioet jämfört med 2013-2014 visas nedan. Inflödets ursprung (uppdelat på hushåll, industri, snabb avrinning och infiltration) visas i Tabell 28 tillsammans med total mängd vatten som överskrider flödesgränser för förbiledning (gränser enligt den processmodell som användes i SIMFRAM där flöde in anges i m³/d med 15 minutersupplösning).

Det inflöde som användes för basfallet i SIMFRAM var totalt 17 030 037 m³/år och i processmodellen förbiledades totalt 10 919 m³ vilket motsvarar 0,06 % av det totala flödet. Modellerat flöde för 2013-2014 motsvarade i total mängd 99,3 % av det som användes i SIMFRAM men den volym som överskred kapaciteten för biosteget var ungefär tre gånger så stor (0,18 % av det totala flödet).

Tabell 28. Sammanställning av modellerat flöde för 2013-2014 samt för framtidsscenarioet.

Flöde	Modellerat 2013-2014	Modellerat framtid	Enhet	Andel av totala inflödet 2013-2014	Andel av totala inflödet framtid
Q totalt in	46 441	48 184	m ³ /d		
Q hushåll	18 594	20 337	m ³ /d	40 %	42,2 %
Q industri	3 514	3 514	m ³ /d	7,6 %	7,3 %
Q snabb avrinning	2 531	2 531	m ³ /d	5,5 %	5,25 %
Q infiltration	21 804	21 804	m ³ /d	46,9 %	45,25 %
Qtot in	16 905 000	17 539 000	m ³ /år		
Q > 115 200 m ³ /d (förbiledning biosteg)	29 709	34 524	m ³ /år	0,18 %	0,20 %
Q > 362 880 m ³ /d (förbiledning verket)	0	0	m ³ /år	0	0

Tabell 29. Belastningsdata för jämförelse modell och uppmätta data.

Parameter	Inkommande Kungsängsverket 2013-2014	Modell 2013-2014	Modell framtid	Enhet
Flöde	46 656	46 441	48 184	m ³ /d
COD	17 703	17 878	19 304	kg/d
Tot-N	1 615	1 623	1 775	kg/d
NH ₄ -N	1 107	1 087	1 180	kg/d
Tot-P	182	185,2	202,6	kg/d

Processmodellering

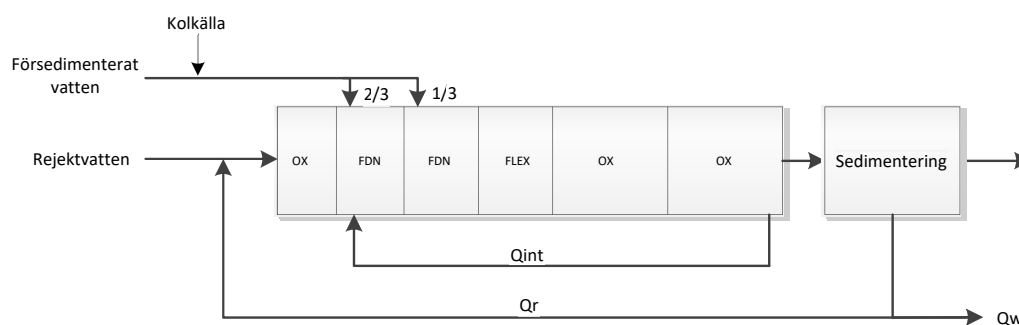
Den modell som användes för processmodelleringen var kalibrerad för att motsvara förväntade förhållanden år 2022. Reningsprocessen på Kungsängsverket består idag av grovrening, sandfång, förfällning, försedimentering, fördenitrifikation och mellansedimentering. Kolkälla tillsätts till inkommande försedimenterat vatten till biosteget. Kungsängsverket tar idag emot kväverikt vatten från en industri och lakvatten från en deponi men precis som i föregående projekt kommer verket inte att ta emot detta industrivatten i framtiden.

I föregående projekt antogs villkor för utgående kvävehalt på 6 mg/L för samtliga reningsverk. Då det bedöms osannolikt att Kungsängsverket kommer få villkor på totalkvävehalt som understiger 10 mg/L har det beslutats att för detta projekt inte göra några processförändringar för framtidsscenariet. Kungsängsverket har alltså simulerats med den processlösning de har idag och mål för utgående halt totalkväve har satts till <10 mg N/L.

Utgående fosfor från Kungsängsverket är redan idag så lågt att de bedöms klara även framtida krav för fosfor (<0,2 mg/L) utan något extra poleringssteg efter mellansedimenteringen. Därför har detta inte modellerats för något av de framtida scenarierna.

Gränsen för vad biosteget klarar har satts till 5400 m³/h, flöden överstigande detta förbileds biosteget. Flöden överstigande 15 120 m³/h förbileds hela verket.

En översikt över biostegets processkonfiguration visas i Figur 48. Inflödet fördelas så att 2/3 går till första delen av fördenitrifikationen och 1/3 till följande zon. Biosteget på Kungsängens reningsverk består av 6 parallella linjer uppdelade i två block med varsin sedimenteringsbassäng. I modellen simuleras dessa som två linjer; Block A och Block B.



Figur 48. Biosteget på Kungsängsverket, bestående av fördenitrifikationsprocess och kolkälledosering till försedimenterat vatten. I simuleringarna är flexzonen luftad hela året.

Följande styrning har använts för samtliga grundscenarier (basfall och scenario 1-4):

- Syre i samtliga luftade zoner (inklusive flexzon) har styrts mot börvärde 2 mg/L under hela året.
- Kolkälledoseringen har styrts mot uppmätt nitrathalt ut från fördenitrifikationen i Block A med börvärde 2 mg/L.

- Internrecirkulationen har varit fast flöde 1350 m³/h per block, vilket i basfallet motsvarar ungefär 1,4 gånger inflödet till respektive block.
- Returslamflödet har styrts för att hålla samma slamhalt i returslammet som under som referensåret 2013-2014.
- Uttaget av överskottsslam har styrts för att hålla samma slamhalt i biosteget som under referensåret 2013-2014 (medel 2650 mg SS/L).
- Fällningskemikalie har doserats med fast flöde 5.5 L/min.

Ytterligare ett par simuleringar har gjorts som inte analyserats med hjälp av LCA. Den första en simulering av basfallet med alternativ styrning som mer efterliknar den styrning som användes på Kungsängsverket. De förändringar i styrning som då gjordes var:

- Syrebörvärden justerades mellan 1 och 2 mg/L under året,
- Flexzonen luftades endast två korta perioder
- Börvärdet för nitrat (som styrde kolkälledoseringen) varierades mellan 1,5 mg/L och 4,5 mg/L.
- Nitratrecirkulationen ökades till 4 Q_{in}

Värden och tidpunkter för ändringar i styrning hämtades från driftdata från 2013-2014 förutom för nitratrecirkulationsflödet där Kungsängsverket har begränsningar i pumpkapacitet och inte kan hålla 4 Q_{in} på nitratreturflödet.

Den andra simuleringen som gjordes för Kungsängsverket var en känslighetsanalys för temperatur. Eftersom en ökning av infiltrationen skulle medföra en temperatursänkning av vattnet som inte modelleras i inflödesmodellen valdes att istället göra en separat simulering med ökad infiltration (scenario 1) och sänka temperaturen i inkommande vatten med 2 grader över hela året.

Resultat från simuleringar av basfall och de fyra inflödesscenarierna visas i Tabell 30.

Tabell 30. Resultatsammanställning för Kungsängsverket. Scenario 1 - Åldrande av ledningsnät – Ökad infiltration, Scenario 2 - Reparation av ledningsnät – Minskad infiltration, Scenario 3 – Asfaltering – Ökad snabb avrinning och Scenario 4 - Reparation av felaktiga anslutningar – minskad snabb avrinning. Resursförbrukning per kubikmeter avser volym behandlat vatten.

	Enhet	Scenario				
		Basfall	1	2	3	4
Q _{in} tot	m ³ /d	49 180	58 820	39 505	49 423	48 914
Q _{infiltration}	m ³ /d	22 499	32 139	12 825	20 887	24 089
Q _{snabb avrinning}	m ³ /d	3 700	3 700	3 700	5 550	1 850
Q _{hushåll+industri}	m ³ /d	22 975	22 975	22 975	22 975	22 975
Andel infiltration	%	46	55	32	42	49
Andel snabb avrinning	%	8	6	9	11	4
COD in	mg/L	428	358	531	426	429
TSS in	mg/L	244	204	303	242	245



Rapport B 2387 – Utvärdering av framtida inflödesscenarier för svenska reningsverk-effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan

Tot-N in	mg/L	37	31	46	37	37
NH ₄ -N in	mg/L	24	20	30	24	24
Tot-P in	mg/L	4,1	3,4	5,1	4,1	4,1
Temp in	°C	14,9	14,8	14,9	14,8	14,9
Energi pumpning (El)	kWh/d	2 163	2 409	1 913	2 155	2 162
Energi luftning ASP (El)	kWh/d	4 315	4 320	4 294	4 308	4 313
Förbrukning kolkälla	kg COD/d	1 213	1 254	1 179	1 221	1 209
Förbrukning fällningskemikalie	m ³ /d	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92
Förbrukning Polymer (3 st)	kg TS/d	153	165	139	152	152
BOD ₅ ut	mg/L	1,1	1,2	1,0	1,4	0,9
COD ut	mg/L	36,6	37,2	36,2	38,0	35,8
TSS ut	mg/L	4,6	5,2	4,0	5,6	3,9
Tot-N ut	mg/L	9,5	8,9	10,2	9,5	9,4
NH ₄ -N ut	mg/L	1,01	1,12	0,89	1,08	0,93
NO ₃ -N ut	mg/L	7,6	7,0	8,5	7,6	7,7
Tot-P ut	mg/L	0,16	0,16	0,15	0,17	0,15
PO ₄ -P ut	mg/L	0,081	0,081	0,080	0,082	0,080
Tot-N ut	kg/d	465	525	402	468	460
Tot-N red	kg N-red/d	1 369	1 310	1 430	1 369	1 368
Tot-N red	%	74,6	71,4	78,1	74,5	74,8
Tot-N förbilett AS	kg/år	1 073	1 731	691	3 360	0
Tot-N förbilett AS	%	0,6	0,9	0,5	2,0	0
Energi pumpning (El)	kWh/kg N-red	1,58	1,84	1,34	1,57	1,58
Energi luftning ASP (El)	kWh/kg N-red	3,15	3,30	3,00	3,15	3,15
Förbrukning kolkälla	kg COD/kg N-red	0,89	0,96	0,82	0,89	0,88
Energi pumpning (El)	kWh/m ³	0,044	0,041	0,048	0,044	0,044
Energi luftning ASP (El)	kWh/m ³	0,088	0,073	0,109	0,087	0,088
Förbrukning kolkälla	kg COD/kg N-red	0,886	0,957	0,824	0,892	0,883
Förbrukning kolkälla	kg COD/m ³	0,025	0,021	0,030	0,025	0,025

Ingående data till LCA-modellering

Tabell 31. Antaganden för beräkning av resursförbrukning för Kungsängsverkets fallstudie.

Resurs	Värde	Enhet
Mekanisk rening – energi		
Energi, sandfång	313	kWh/d
Pumpenergi, primärslam	0,075*	kWh/d
Mekanisk rening – kemikalier		
Järnsulfat, förfällning	7,92	m ³ lösning/d
Biosteget – energi		
Energi, luftning aktivslam	3846**	kWh/d
Energi, omrörning	530	kWh/d, 6 linjer
Pumpenergi, pumpning till biosteget	0,0082	kWh/m ³
Pumpenergi, internrecirkulation	0,0136	kWh/m ³
Pumpenergi, returslam	0,0202	kWh/m ³
Pumpenergi, överskottslam	0,0510	kWh/m ³
Biosteget – kemikalier		
Polymer	63,2	kgTS/d
Kolkälla	911**	kg COD/år
Slambehandling – energi		
Pumpenergi, förtjockat primärslam	0,06*	kWh/m ³ primärslam
Pumpenergi, förtjockat överskottslam	0,06*	kWh/m ³ överskottslam
Uppvärmning röt-kammare	9970	kWh/d
Omrörning röt-kammare	240	kWh/d
Energi centrifuger	700	kWh/d
Slambehandling – kemikalier		
Polymer, förtjockning överskottslam	43,6	g/m ³
Polymer, avvattning av slam	202	g/m ³

* Antagande, BSM2G-default

** Modellerade värden från SIMFRAM (Åmand *et al.*, 2016).

Bilaga 5: Excel-verktyget

I projektet har en Excel-mall tagits fram för att skapa ett beräkningsverktyg för miljöpåverkan och kostnad som möjliggör att enkelt studera effekten av

- a. val av fällningskemikalie
- b. val av kolkälla

men även undersöka hur metodval påverkar resultaten genom att inkludera

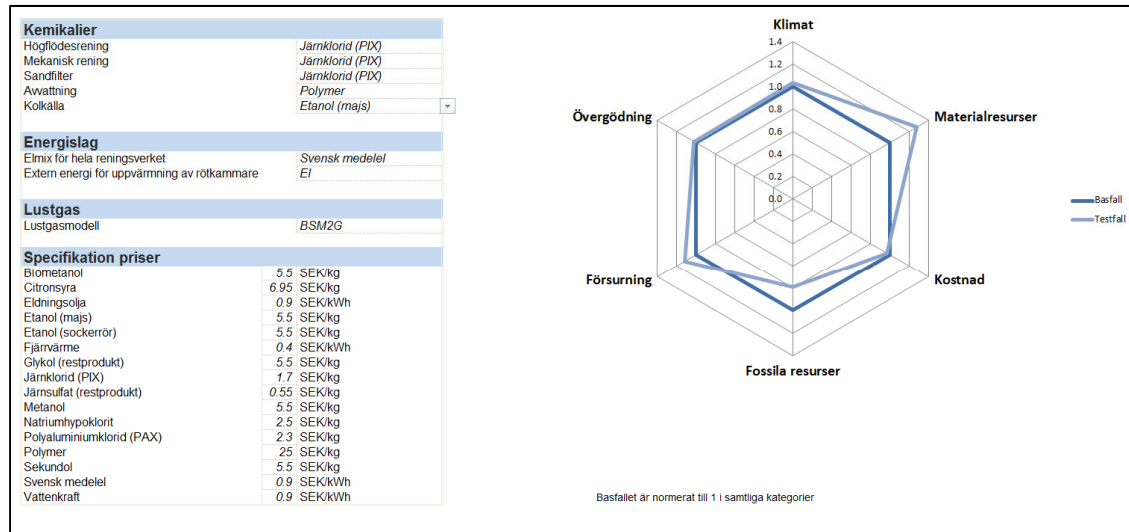
- c. val av typ av el
- d. val av metod för beräkning av lustgasavgång (schablonvärden eller processmodellens värden)

Mallen har sedan använts för att skapa ett specifikt verktyg för vart och ett av de tre reningsverken som ingår i projektet.

Basfallet i respektive verktyg motsvarar resultatet av simulerat basfall från processmodell, miljöpåverkansberäkning och kostnadsberäkning för detta projekt, det vill säga för respektive fallstudiers framtidsscenario utan någon förändring av tillskottsvatten. Användaren skapar sitt eget Testfall genom sitt val av fördefinierade alternativ inom ovan listade punkter a-d. Det finns även möjlighet för användaren att justera vilka priser som ska användas i beräkningen. Verktygen utgår från samma mall men med anpassningar till de olika verkens processteg och vilka resurser som förbrukades i Basfallet. Energi- och resursförbrukningen är också reningsverksspecifik och motsvarar verkets resultat från processmodelleringen av Basfallet.

Resultatet visas i form av ett spindeldiagram för de fem miljöpåverkanskategorierna och kostnad, där Basfall och Testfall är normerat mot Basfallet (dvs Basfallet har värdet 1 inom samtliga kategorier).

Ett exempel på användarsidan från verktyget visas i Figur 49. På den vänstra delen gör användaren sina inställningar för vad man vill studera i Testfallet. Man kan ange vilken typ av kemikalie som används i de olika processtegen, vilken typ av el som används i reningsverket och vilken typ av energi som används för uppvärmning av röt-kammaren. Det går även att studera skillnaden i resultat mellan den lustgasmodell som ingår i processmodellen (BSM2G) och den enklare emissionsfaktormodellen med schablonvärde. Användaren har även möjlighet att lägga in egna prisuppgifter på de resurser som ingår i beräkningarna.



Figur 49. Beräkningsverktygets användarsida.

Den högra delen av verktyget visar resultatet av användarens val (Testfall) i relation till Basfallet. Basfallet är normerat så att alla kategorier har värde 1.

Specifik miljöpåverkan från lustgasemission och resurser som ingår i det Excel-baserade beräkningsverktyget redovisas i Tabell 32. Järnsulfaten har i denna studie räknats som en restprodukt (ett avfall) från en annan process. Därav har miljöpåverkan för denna nollats i vår studie. Samma antagande gäller för glykol.

Tabell 32. Specifik miljöpåverkan (per kg respektive per kWh) från lustgasemission och resurser i beräkningsverktyget.

Emission/Resurs	<i>Materialresurser [kg Sb-Eqv.]</i>	<i>Fossila resurser [MJ]</i>	<i>Försurning [kg SO₂- Eqv.]</i>	<i>Övergödning [kg Phosphate- Eqv.]</i>	<i>Klimat [kg CO₂- Eqv.]</i>	<i>GaBi-referens</i>
Lustgas	0	0	0	2.70E-01	2.65E+02	CML quantity, GWP, excluding biogenic. Faktor för N ₂ O, lustgas.
Biometanol	1.57E-06	1.56E+01	4.53E-03	2.31E-03	1.53E+00	Methanol production, from biogas <LC>
Citronsyra	1.61E-05	3.57E+01	1.83E-02	8.32E-03	3.05E+00	RER: citric acid productionecoinvent
Eldningsolja	1.19E-08	4.17E+00	3.17E-04	5.04E-05	3.03E-01	SE: Thermal energy from light fuel oil (LFO) ts
Etanol (majs)	3.79E-06	1.97E+01	1.32E-02	1.44E-02	1.98E+00	Ethanol, from US <LC>
Etanol (sockerrör)	2.48E-06	4.01E+00	6.92E-03	2.16E-03	4.71E-01	Ethanol, from BR <LC>
Fjärrvärme	6.20E-09	1.78E-01	9.85E-05	1.89E-05	2.31E-02	District heating, Swedish average <LC>
Glykol (restprodukt)	0	0	0	0	0	Nollad restprodukt
Järnklorid	2.49E-07	1.66E+00	3.13E-04	7.31E-05	1.06E-01	Ferric chloride 40 % oxidation with oxygen <LC>
Järnsulfat (restprodukt)	0	0	0	0	0	Nollad restprodukt
Metanol	5.53E-07	3.11E+01	4.30E-04	2.00E-04	5.75E-01	Methanol, SE <LC>
Natriumhypoklorit	1.43E-05	1.05E+01	4.14E-03	2.67E-03	8.90E-01	RER: sodium hypochlorite, 15% in H ₂ O, at plant
Polyaluminiumklorid	5.37E-07	3.99E+00	1.22E-03	5.20E-04	2.79E-01	PAC (Polyaluminium chloride) <LC>
Polymer	4.45E-06	6.66E+01	9.45E-03	6.05E-03	2.68E+00	Polyelectrolyte, flocculation aid <LC>
Sekundol	3.81E-06	5.30E+01	9.83E-03	2.97E-03	2.10E+00	Sekundol, production <LC>
Svensk medelel	1.13E-07	2.85E-01	1.44E-04	2.69E-05	4.28E-02	SE: Electricity grid mix 1kV-60kV ts
Vattenkraft	1.27E-07	1.30E-02	5.09E-06	6.26E-07	1.43E-02	SE: Electricity from hydro power ts

För omräkning mellan olika alternativ av kolkälla har vi utgått från respektive kolkällas COD-innehåll, se Tabell 33.

Tabell 33. Kg COD per kg kolkälla.

Kolkälla	Kg COD / kg
Metanol	1,50
Etanol	2,09
Glykol (etylenglykol)	1,29
Sekundol	1,60

För omräkning mellan olika alternativ av fällningskemikalier har vi utgått från respektive kemikalies järn- eller aluminium-innehåll, se Tabell 34.

Tabell 34. Järn- respektive aluminiuminnehåll i beräkningsverktygets fällningskemikalier.

Fällningkemikalie	%Fe el. %Al	Referens
Järnklorid	13,8	Produktblad PIX11
Järnsulfat	19,0	Järn(II)sulfatlösning som oxideras fullständig till trevärt järn
Polyaluminiumklorid	8,0	Produktblad, medelvärde av PAX-21, PAX-60, PAX-100



Bilaga 6: Fullständiga resultat från livscykelanalysen

I tabellerna nedan presenteras de enskilda resultaten av de studerade miljöpåverkanskategorierna per processteg. Både resultat för de två studerade funktionella enheterna (per kubikmeter behandlat vatten respektive per kg avskilt kväve) och den totala påverkan under ett års drift redovisas.



Henriksdals reningsverk, per m³ behandlat vatten

Kategori	Scen.	Inlopps-pumpar	Mekanisk rening	Höglödes-rening	Biologisk ASP	Membran	Förtjockare	Rötkammare	Biogas fackling	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO ₂ -ekv]	0	1.16E-03	6.64E-03	2.81E-05	2.23E-02	1.87E-02	6.29E-03	1.79E-02	1.08E-06	1.29E-03	4.33E-03	2.04E-02	6.02E-04	9.97E-02
	1	1.15E-03	8.42E-03	5.26E-05	2.03E-02	1.65E-02	5.64E-03	1.56E-02	9.30E-07	1.11E-03	3.85E-03	1.78E-02	6.20E-04	9.11E-02
	2	1.16E-03	5.07E-03	6.23E-06	2.50E-02	2.17E-02	7.14E-03	2.10E-02	1.28E-06	1.53E-03	4.97E-03	2.38E-02	5.85E-04	1.12E-01
	3	1.16E-03	6.96E-03	3.24E-05	2.22E-02	1.87E-02	6.29E-03	1.79E-02	1.08E-06	1.29E-03	4.33E-03	2.04E-02	6.04E-04	9.99E-02
	4	1.16E-03	6.33E-03	2.41E-05	2.24E-02	1.87E-02	6.30E-03	1.79E-02	1.08E-06	1.29E-03	4.34E-03	2.04E-02	5.99E-04	9.95E-02
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	7.27E-07	6.12E-06	2.89E-08	1.79E-05	4.38E-05	1.22E-05	3.74E-06	1.02E-08	8.10E-07	8.88E-06	1.34E-04	4.96E-03	5.19E-03
	1	7.25E-07	7.58E-06	5.42E-08	1.63E-05	3.85E-05	1.09E-05	3.32E-06	8.82E-09	6.97E-07	7.89E-06	1.17E-04	5.11E-03	5.31E-03
	2	7.27E-07	4.83E-06	6.42E-09	2.00E-05	5.08E-05	1.38E-05	4.28E-06	1.22E-08	9.60E-07	1.02E-05	1.56E-04	4.83E-03	5.09E-03
	3	7.27E-07	6.39E-06	3.34E-08	1.79E-05	4.37E-05	1.21E-05	3.74E-06	1.02E-08	8.10E-07	8.87E-06	1.34E-04	4.98E-03	5.21E-03
	4	7.27E-07	5.87E-06	2.48E-08	1.80E-05	4.38E-05	1.22E-05	3.74E-06	1.02E-08	8.10E-07	8.88E-06	1.34E-04	4.94E-03	5.17E-03
Försurning [kg SO ₂ -ekv]	0	3.89E-06	2.49E-05	1.14E-07	3.68E-05	9.97E-05	2.21E-05	2.02E-05	3.85E-08	4.33E-06	1.52E-05	5.71E-04	0.00E+00	7.98E-04
	1	3.88E-06	3.08E-05	2.13E-07	3.36E-05	8.76E-05	1.98E-05	1.80E-05	3.32E-08	3.73E-06	1.35E-05	4.99E-04	0.00E+00	7.10E-04
	2	3.89E-06	1.97E-05	2.52E-08	4.09E-05	1.16E-04	2.50E-05	2.32E-05	4.57E-08	5.14E-06	1.74E-05	6.66E-04	0.00E+00	9.17E-04
	3	3.89E-06	2.60E-05	1.31E-07	3.67E-05	9.95E-05	2.21E-05	2.02E-05	3.85E-08	4.33E-06	1.52E-05	5.71E-04	0.00E+00	7.99E-04
	4	3.89E-06	2.39E-05	9.73E-08	3.69E-05	9.98E-05	2.21E-05	2.02E-05	3.85E-08	4.33E-06	1.52E-05	5.71E-04	0.00E+00	7.98E-04
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	3.05E-09	5.37E-09	2.32E-12	2.03E-08	1.04E-07	1.12E-08	1.46E-08	0.00E+00	3.40E-09	7.51E-09	1.30E-10	0.00E+00	1.70E-07
	1	3.04E-09	8.12E-09	4.34E-12	1.81E-08	9.18E-08	1.00E-08	1.30E-08	0.00E+00	2.92E-09	6.67E-09	1.17E-10	0.00E+00	1.54E-07
	2	3.05E-09	3.00E-09	5.14E-13	2.33E-08	1.21E-07	1.26E-08	1.68E-08	0.00E+00	4.03E-09	8.61E-09	1.46E-10	0.00E+00	1.93E-07
	3	3.05E-09	5.89E-09	2.67E-12	2.03E-08	1.04E-07	1.12E-08	1.46E-08	0.00E+00	3.39E-09	7.51E-09	1.30E-10	0.00E+00	1.70E-07
	4	3.05E-09	4.89E-09	1.98E-12	2.04E-08	1.05E-07	1.12E-08	1.46E-08	0.00E+00	3.39E-09	7.51E-09	1.30E-10	0.00E+00	1.70E-07
Fossila resurser [MJ]	0	7.69E-03	8.86E-02	3.80E-04	1.22E-01	2.16E-01	1.34E-01	5.87E-02	0.00E+00	8.57E-03	9.79E-02	3.28E-04	0.00E+00	7.34E-01
	1	7.67E-03	1.16E-01	7.12E-04	1.14E-01	1.89E-01	1.20E-01	5.21E-02	0.00E+00	7.37E-03	8.70E-02	2.96E-04	0.00E+00	6.94E-01
	2	7.70E-03	6.43E-02	8.44E-05	1.34E-01	2.50E-01	1.53E-01	6.73E-02	0.00E+00	1.02E-02	1.12E-01	3.68E-04	0.00E+00	7.99E-01
	3	7.69E-03	9.35E-02	4.39E-04	1.21E-01	2.15E-01	1.34E-01	5.87E-02	0.00E+00	8.57E-03	9.78E-02	3.27E-04	0.00E+00	7.37E-01
	4	7.69E-03	8.40E-02	3.26E-04	1.23E-01	2.16E-01	1.34E-01	5.87E-02	0.00E+00	8.57E-03	9.79E-02	3.28E-04	0.00E+00	7.30E-01



Rapport B 2387 – Utvärdering av framtida inflödesscenarier för svenska reningsverk–effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan

Henriksdals reningsverk, per kg avskild kväve

Kategori	Scen.	Inlopps-pumpar	Mekanisk rening	Högflödes-rening	Biologisk ASP	Membran	Förtjockare	Rötkammare	Biogas fackling	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO2-ekv]	0	3.45E-02	1.98E-01	8.36E-04	6.65E-01	5.57E-01	1.87E-01	5.34E-01	3.22E-05	3.84E-02	1.29E-01	6.07E-01	1.79E-02	2.97E+00
	1	4.00E-02	2.92E-01	1.82E-03	7.05E-01	5.70E-01	1.95E-01	5.42E-01	3.22E-05	3.84E-02	1.33E-01	6.16E-01	2.15E-02	3.16E+00
	2	2.90E-02	1.27E-01	1.56E-04	6.27E-01	5.45E-01	1.79E-01	5.27E-01	3.21E-05	3.83E-02	1.25E-01	5.96E-01	1.47E-02	2.81E+00
	3	3.45E-02	2.08E-01	9.67E-04	6.63E-01	5.57E-01	1.87E-01	5.35E-01	3.22E-05	3.84E-02	1.29E-01	6.07E-01	1.80E-02	2.98E+00
	4	3.44E-02	1.88E-01	7.16E-04	6.66E-01	5.57E-01	1.87E-01	5.33E-01	3.21E-05	3.83E-02	1.29E-01	6.06E-01	1.78E-02	2.96E+00
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	2.17E-05	1.82E-04	8.62E-07	5.34E-04	1.30E-03	3.62E-04	1.11E-04	3.05E-07	2.41E-05	2.64E-04	4.00E-03	1.48E-01	1.55E-01
	1	2.51E-05	2.63E-04	1.88E-06	5.65E-04	1.33E-03	3.77E-04	1.15E-04	3.06E-07	2.42E-05	2.73E-04	4.06E-03	1.77E-01	1.84E-01
	2	1.82E-05	1.21E-04	1.61E-07	5.01E-04	1.27E-03	3.47E-04	1.07E-04	3.05E-07	2.41E-05	2.55E-04	3.93E-03	1.21E-01	1.28E-01
	3	2.17E-05	1.90E-04	9.96E-07	5.33E-04	1.30E-03	3.62E-04	1.11E-04	3.06E-07	2.41E-05	2.65E-04	4.00E-03	1.49E-01	1.55E-01
	4	2.16E-05	1.75E-04	7.37E-07	5.34E-04	1.30E-03	3.62E-04	1.11E-04	3.05E-07	2.41E-05	2.64E-04	3.99E-03	1.47E-01	1.54E-01
Försurning [kg SO2-ekv]	0	1.16E-04	7.40E-04	3.38E-06	1.10E-03	2.97E-03	6.57E-04	6.03E-04	1.15E-06	1.29E-04	4.53E-04	1.70E-02	0.00E+00	2.38E-02
	1	1.34E-04	1.07E-03	7.37E-06	1.17E-03	3.04E-03	6.85E-04	6.23E-04	1.15E-06	1.29E-04	4.69E-04	1.73E-02	0.00E+00	2.46E-02
	2	9.76E-05	4.93E-04	6.32E-07	1.03E-03	2.90E-03	6.28E-04	5.82E-04	1.15E-06	1.29E-04	4.38E-04	1.67E-02	0.00E+00	2.30E-02
	3	1.16E-04	7.74E-04	3.91E-06	1.09E-03	2.97E-03	6.58E-04	6.03E-04	1.15E-06	1.29E-04	4.54E-04	1.70E-02	0.00E+00	2.38E-02
	4	1.16E-04	7.09E-04	2.89E-06	1.10E-03	2.97E-03	6.57E-04	6.02E-04	1.15E-06	1.29E-04	4.53E-04	1.70E-02	0.00E+00	2.37E-02
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	9.08E-08	1.60E-07	6.90E-11	6.06E-07	3.11E-06	3.32E-07	4.35E-07	0.00E+00	1.01E-07	2.24E-07	3.87E-09	0.00E+00	5.06E-06
	1	1.05E-07	2.81E-07	1.50E-10	6.27E-07	3.18E-06	3.47E-07	4.50E-07	0.00E+00	1.01E-07	2.31E-07	4.07E-09	0.00E+00	5.33E-06
	2	7.65E-08	7.52E-08	1.29E-11	5.85E-07	3.04E-06	3.17E-07	4.20E-07	0.00E+00	1.01E-07	2.16E-07	3.66E-09	0.00E+00	4.83E-06
	3	9.08E-08	1.76E-07	7.97E-11	6.05E-07	3.11E-06	3.32E-07	4.36E-07	0.00E+00	1.01E-07	2.24E-07	3.87E-09	0.00E+00	5.08E-06
	4	9.07E-08	1.45E-07	5.90E-11	6.06E-07	3.11E-06	3.32E-07	4.35E-07	0.00E+00	1.01E-07	2.23E-07	3.86E-09	0.00E+00	5.05E-06
Fossila resurser [MJ]	0	2.29E-01	2.64E+00	1.13E-02	3.63E+00	6.42E+00	3.99E+00	1.75E+00	0.00E+00	2.55E-01	2.92E+00	9.76E-03	0.00E+00	2.18E+01
	1	2.66E-01	4.02E+00	2.47E-02	3.95E+00	6.57E+00	4.16E+00	1.81E+00	0.00E+00	2.56E-01	3.01E+00	1.03E-02	0.00E+00	2.41E+01
	2	1.93E-01	1.61E+00	2.12E-03	3.37E+00	6.27E+00	3.83E+00	1.69E+00	0.00E+00	2.55E-01	2.81E+00	9.23E-03	0.00E+00	2.00E+01
	3	2.29E-01	2.79E+00	1.31E-02	3.61E+00	6.42E+00	4.00E+00	1.75E+00	0.00E+00	2.55E-01	2.92E+00	9.76E-03	0.00E+00	2.20E+01
	4	2.29E-01	2.50E+00	9.69E-03	3.65E+00	6.41E+00	3.99E+00	1.75E+00	0.00E+00	2.55E-01	2.91E+00	9.75E-03	0.00E+00	2.17E+01



Henriksdals reningsverk, total påverkan under ett års drift

Kategori	Scen.	Inlopps-pumpar	Mekanisk rening	Högflödes-rening	Biologisk ASP	Membran	Förtjockare	Rötkammare	Biogas fackling	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO2-ekv]	0	2.29E+05	1.31E+06	5.55E+03	4.41E+06	3.70E+06	1.24E+06	3.55E+06	2.14E+02	2.55E+05	8.57E+05	4.03E+06	1.19E+05	1.97E+07
	1	2.59E+05	1.89E+06	1.18E+04	4.57E+06	3.70E+06	1.27E+06	3.52E+06	2.09E+02	2.49E+05	8.65E+05	4.00E+06	1.39E+05	2.05E+07
	2	1.97E+05	8.63E+05	1.06E+03	4.26E+06	3.70E+06	1.22E+06	3.58E+06	2.18E+02	2.60E+05	8.46E+05	4.05E+06	9.97E+04	1.91E+07
	3	2.29E+05	1.38E+06	6.41E+03	4.40E+06	3.70E+06	1.24E+06	3.55E+06	2.14E+02	2.55E+05	8.57E+05	4.03E+06	1.20E+05	1.98E+07
	4	2.29E+05	1.25E+06	4.75E+03	4.42E+06	3.70E+06	1.24E+06	3.54E+06	2.13E+02	2.54E+05	8.56E+05	4.02E+06	1.18E+05	1.96E+07
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	1.44E+02	1.21E+03	5.72E+00	3.54E+03	8.65E+03	2.40E+03	7.39E+02	2.03E+00	1.60E+02	1.75E+03	2.65E+04	9.81E+05	1.03E+06
	1	1.63E+02	1.70E+03	1.22E+01	3.66E+03	8.65E+03	2.44E+03	7.46E+02	1.98E+00	1.57E+02	1.77E+03	2.63E+04	1.15E+06	1.19E+06
	2	1.24E+02	8.22E+02	1.09E+00	3.40E+03	8.65E+03	2.35E+03	7.30E+02	2.07E+00	1.64E+02	1.73E+03	2.67E+04	8.23E+05	8.67E+05
	3	1.44E+02	1.26E+03	6.61E+00	3.54E+03	8.65E+03	2.40E+03	7.39E+02	2.03E+00	1.60E+02	1.76E+03	2.65E+04	9.86E+05	1.03E+06
	4	1.44E+02	1.16E+03	4.90E+00	3.54E+03	8.65E+03	2.40E+03	7.38E+02	2.02E+00	1.60E+02	1.75E+03	2.65E+04	9.75E+05	1.02E+06
Försurning [kg SO2-ekv]	0	7.68E+02	4.91E+03	2.24E+01	7.28E+03	1.97E+04	4.36E+03	4.00E+03	7.62E+00	8.56E+02	3.01E+03	1.13E+05	0.00E+00	1.58E+05
	1	8.72E+02	6.92E+03	4.78E+01	7.56E+03	1.97E+04	4.45E+03	4.04E+03	7.46E+00	8.38E+02	3.04E+03	1.12E+05	0.00E+00	1.60E+05
	2	6.62E+02	3.35E+03	4.29E+00	6.97E+03	1.97E+04	4.27E+03	3.95E+03	7.78E+00	8.75E+02	2.97E+03	1.13E+05	0.00E+00	1.56E+05
	3	7.69E+02	5.14E+03	2.59E+01	7.27E+03	1.97E+04	4.36E+03	4.00E+03	7.63E+00	8.57E+02	3.01E+03	1.13E+05	0.00E+00	1.58E+05
	4	7.68E+02	4.71E+03	1.92E+01	7.29E+03	1.97E+04	4.36E+03	4.00E+03	7.61E+00	8.55E+02	3.01E+03	1.13E+05	0.00E+00	1.57E+05
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	6.02E-01	1.06E+00	4.58E-04	4.02E+00	2.06E+01	2.21E+00	2.89E+00	0.00E+00	6.71E-01	1.48E+00	2.57E-02	0.00E+00	3.36E+01
	1	6.83E-01	1.83E+00	9.75E-04	4.06E+00	2.06E+01	2.25E+00	2.92E+00	0.00E+00	6.57E-01	1.50E+00	2.64E-02	0.00E+00	3.46E+01
	2	5.19E-01	5.10E-01	8.75E-05	3.97E+00	2.06E+01	2.15E+00	2.85E+00	0.00E+00	6.86E-01	1.47E+00	2.48E-02	0.00E+00	3.28E+01
	3	6.03E-01	1.17E+00	5.29E-04	4.02E+00	2.06E+01	2.21E+00	2.89E+00	0.00E+00	6.72E-01	1.49E+00	2.57E-02	0.00E+00	3.37E+01
	4	6.02E-01	9.65E-01	3.92E-04	4.03E+00	2.06E+01	2.20E+00	2.89E+00	0.00E+00	6.70E-01	1.48E+00	2.57E-02	0.00E+00	3.35E+01
Fossila resurser [MJ]	0	1.52E+06	1.75E+07	7.52E+04	2.41E+07	4.26E+07	2.65E+07	1.16E+07	0.00E+00	1.69E+06	1.93E+07	6.48E+04	0.00E+00	1.45E+08
	1	1.72E+06	2.61E+07	1.60E+05	2.56E+07	4.26E+07	2.70E+07	1.17E+07	0.00E+00	1.66E+06	1.95E+07	6.66E+04	0.00E+00	1.56E+08
	2	1.31E+06	1.09E+07	1.44E+04	2.29E+07	4.26E+07	2.60E+07	1.15E+07	0.00E+00	1.73E+06	1.91E+07	6.27E+04	0.00E+00	1.36E+08
	3	1.52E+06	1.85E+07	8.68E+04	2.40E+07	4.26E+07	2.65E+07	1.16E+07	0.00E+00	1.70E+06	1.94E+07	6.48E+04	0.00E+00	1.46E+08
	4	1.52E+06	1.66E+07	6.43E+04	2.42E+07	4.26E+07	2.65E+07	1.16E+07	0.00E+00	1.69E+06	1.93E+07	6.47E+04	0.00E+00	1.44E+08



Käppalaverket, per m³ behandlat vatten

Kategori	Scen.	Inlopps-pumpar	Mekanisk rening	Höglödes-rening	Biologisk ASP	Sandfilter	Förtjockare	Rötkammare	Anammox	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO ₂ -ekv]	0	3.44E-03	1.23E-02	4.29E-05	1.37E-01	3.54E-03	3.84E-04	2.30E-02	1.76E-04	1.47E-03	6.52E-03	5.56E-02	5.42E-04	2.44E-01
	1	3.44E-03	1.22E-02	1.66E-04	1.29E-01	3.52E-03	3.22E-04	2.13E-02	1.64E-04	1.36E-03	6.06E-03	5.16E-02	5.52E-04	2.30E-01
	2	3.44E-03	1.23E-02	3.20E-05	1.45E-01	3.54E-03	4.42E-04	2.48E-02	1.89E-04	1.59E-03	7.01E-03	6.02E-02	5.29E-04	2.59E-01
	3	3.44E-03	1.23E-02	4.66E-05	1.37E-01	3.54E-03	3.84E-04	2.29E-02	1.76E-04	1.47E-03	6.51E-03	5.56E-02	5.42E-04	2.44E-01
	4	3.44E-03	1.23E-02	3.99E-05	1.37E-01	3.54E-03	3.84E-04	2.30E-02	1.76E-04	1.47E-03	6.52E-03	5.57E-02	5.42E-04	2.44E-01
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	2.16E-06	9.82E-06	2.93E-08	1.34E-04	2.86E-06	2.41E-07	2.10E-06	1.10E-07	9.21E-07	1.35E-05	1.55E-04	4.37E-03	4.69E-03
	1	2.16E-06	9.80E-06	1.29E-07	1.26E-04	2.84E-06	2.02E-07	2.04E-06	1.03E-07	8.55E-07	1.26E-05	1.44E-04	4.42E-03	4.72E-03
	2	2.16E-06	9.85E-06	2.01E-08	1.40E-04	2.86E-06	2.78E-07	2.16E-06	1.18E-07	9.99E-07	1.45E-05	1.69E-04	4.33E-03	4.67E-03
	3	2.16E-06	9.82E-06	3.23E-08	1.33E-04	2.86E-06	2.41E-07	2.10E-06	1.10E-07	9.21E-07	1.35E-05	1.55E-04	4.38E-03	4.70E-03
	4	2.16E-06	9.82E-06	2.69E-08	1.34E-04	2.86E-06	2.42E-07	2.10E-06	1.11E-07	9.21E-07	1.35E-05	1.55E-04	4.37E-03	4.69E-03
Försurning [kg SO ₂ -ekv]	0	1.16E-05	4.09E-05	1.44E-07	2.88E-05	1.18E-05	1.29E-06	1.01E-05	5.91E-07	4.93E-06	2.29E-05	7.09E-04	0	8.42E-04
	1	1.16E-05	4.08E-05	5.54E-07	2.66E-05	1.17E-05	1.08E-06	9.70E-06	5.51E-07	4.57E-06	2.13E-05	6.57E-04	0	7.85E-04
	2	1.16E-05	4.11E-05	1.08E-07	3.16E-05	1.18E-05	1.49E-06	1.04E-05	6.34E-07	5.34E-06	2.46E-05	7.72E-04	0	9.10E-04
	3	1.16E-05	4.09E-05	1.56E-07	2.88E-05	1.18E-05	1.29E-06	1.01E-05	5.91E-07	4.92E-06	2.29E-05	7.09E-04	0	8.42E-04
	4	1.16E-05	4.09E-05	1.34E-07	2.88E-05	1.18E-05	1.29E-06	1.01E-05	5.91E-07	4.93E-06	2.29E-05	7.10E-04	0	8.43E-04
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	9.06E-09	1.98E-08	9.88E-11	2.21E-08	5.54E-09	1.01E-09	7.33E-09	4.63E-10	3.86E-09	1.12E-08	0	0	8.04E-08
	1	9.06E-09	1.97E-08	2.91E-10	2.04E-08	5.50E-09	8.48E-10	7.05E-09	4.32E-10	3.58E-09	1.04E-08	0	0	7.72E-08
	2	9.06E-09	1.99E-08	8.43E-11	2.42E-08	5.54E-09	1.16E-09	7.58E-09	4.97E-10	4.19E-09	1.20E-08	0	0	8.42E-08
	3	9.06E-09	1.98E-08	1.05E-10	2.21E-08	5.54E-09	1.01E-09	7.33E-09	4.63E-10	3.86E-09	1.12E-08	0	0	8.04E-08
	4	9.06E-09	1.98E-08	9.40E-11	2.21E-08	5.54E-09	1.01E-09	7.33E-09	4.63E-10	3.86E-09	1.12E-08	0	0	8.04E-08
Fossila resurser [MJ]	0	2.29E-02	1.79E-01	3.95E-04	3.76E-01	5.29E-02	2.55E-03	3.72E-02	1.17E-03	9.74E-03	1.49E-01	0	0	8.31E-01
	1	2.29E-02	1.79E-01	2.23E-03	3.38E-01	5.25E-02	2.14E-03	3.65E-02	1.09E-03	9.04E-03	1.39E-01	0	0	7.82E-01
	2	2.29E-02	1.79E-01	2.13E-04	4.30E-01	5.29E-02	2.94E-03	3.78E-02	1.25E-03	1.06E-02	1.60E-01	0	0	8.98E-01
	3	2.29E-02	1.79E-01	4.50E-04	3.76E-01	5.29E-02	2.55E-03	3.72E-02	1.17E-03	9.74E-03	1.49E-01	0	0	8.31E-01
	4	2.29E-02	1.79E-01	3.50E-04	3.76E-01	5.29E-02	2.56E-03	3.72E-02	1.17E-03	9.75E-03	1.49E-01	0	0	8.31E-01



Käppalaverket, per kg avskild kväve

Kategori	Scen.	Inlopps-pumpar	Mekanisk rening	Höglödes-rening	Biologisk ASP	Sandfilter	Förtjockare	Rötkammare	Anammox	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO2-ekv]	0	7.59E-02	2.71E-01	9.46E-04	3.03E+00	7.81E-02	8.47E-03	5.06E-01	3.88E-03	3.23E-02	1.44E-01	1.23E+00	1.19E-02	5.39E+00
	1	8.21E-02	2.92E-01	3.96E-03	3.08E+00	8.39E-02	7.69E-03	5.09E-01	3.92E-03	3.25E-02	1.45E-01	1.23E+00	1.32E-02	5.49E+00
	2	6.96E-02	2.49E-01	6.48E-04	2.93E+00	7.17E-02	8.95E-03	5.01E-01	3.82E-03	3.22E-02	1.42E-01	1.22E+00	1.07E-02	5.24E+00
	3	7.59E-02	2.71E-01	1.03E-03	3.03E+00	7.81E-02	8.47E-03	5.06E-01	3.88E-03	3.23E-02	1.44E-01	1.23E+00	1.20E-02	5.39E+00
	4	7.58E-02	2.71E-01	8.79E-04	3.03E+00	7.81E-02	8.48E-03	5.06E-01	3.88E-03	3.23E-02	1.44E-01	1.23E+00	1.19E-02	5.39E+00
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	4.77E-05	2.17E-04	6.47E-07	2.94E-03	6.31E-05	5.32E-06	4.64E-05	2.44E-06	2.03E-05	2.98E-04	3.42E-03	9.64E-02	1.04E-01
	1	5.16E-05	2.34E-04	3.07E-06	3.00E-03	6.78E-05	4.83E-06	4.86E-05	2.46E-06	2.04E-05	3.00E-04	3.43E-03	1.06E-01	1.13E-01
	2	4.37E-05	1.99E-04	4.07E-07	2.84E-03	5.80E-05	5.62E-06	4.38E-05	2.40E-06	2.02E-05	2.94E-04	3.42E-03	8.76E-02	9.45E-02
	3	4.77E-05	2.17E-04	7.13E-07	2.95E-03	6.31E-05	5.32E-06	4.64E-05	2.44E-06	2.03E-05	2.98E-04	3.42E-03	9.65E-02	1.04E-01
	4	4.76E-05	2.16E-04	5.93E-07	2.94E-03	6.31E-05	5.32E-06	4.64E-05	2.44E-06	2.03E-05	2.98E-04	3.42E-03	9.64E-02	1.03E-01
Försurning [kg SO2-ekv]	0	2.55E-04	9.03E-04	3.17E-06	6.35E-04	2.60E-04	2.85E-05	2.22E-04	1.30E-05	1.09E-04	5.05E-04	1.56E-02	0	1.86E-02
	1	2.76E-04	9.75E-04	1.32E-05	6.34E-04	2.80E-04	2.58E-05	2.32E-04	1.32E-05	1.09E-04	5.09E-04	1.57E-02	0	1.87E-02
	2	2.34E-04	8.32E-04	2.18E-06	6.40E-04	2.39E-04	3.01E-05	2.10E-04	1.28E-05	1.08E-04	4.99E-04	1.56E-02	0	1.84E-02
	3	2.55E-04	9.03E-04	3.44E-06	6.35E-04	2.61E-04	2.84E-05	2.22E-04	1.30E-05	1.09E-04	5.05E-04	1.56E-02	0	1.86E-02
	4	2.55E-04	9.03E-04	2.95E-06	6.35E-04	2.60E-04	2.85E-05	2.22E-04	1.30E-05	1.09E-04	5.05E-04	1.56E-02	0	1.86E-02
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	2.00E-07	4.36E-07	2.18E-09	4.87E-07	1.22E-07	2.23E-08	1.62E-07	1.02E-08	8.52E-08	2.47E-07	0	0	1.77E-06
	1	2.16E-07	4.69E-07	6.94E-09	4.86E-07	1.31E-07	2.03E-08	1.68E-07	1.03E-08	8.55E-08	2.48E-07	0	0	1.84E-06
	2	1.83E-07	4.02E-07	1.71E-09	4.90E-07	1.12E-07	2.36E-08	1.53E-07	1.01E-08	8.47E-08	2.43E-07	0	0	1.70E-06
	3	2.00E-07	4.36E-07	2.31E-09	4.87E-07	1.22E-07	2.23E-08	1.62E-07	1.02E-08	8.52E-08	2.47E-07	0	0	1.77E-06
	4	2.00E-07	4.35E-07	2.07E-09	4.87E-07	1.22E-07	2.23E-08	1.62E-07	1.02E-08	8.52E-08	2.47E-07	0	0	1.77E-06
Fossila resurser [MJ]	0	5.04E-01	3.95E+00	8.71E-03	8.30E+00	1.17E+00	5.63E-02	8.20E-01	2.58E-02	2.15E-01	3.29E+00	0	0	1.83E+01
	1	5.46E-01	4.27E+00	5.33E-02	8.08E+00	1.25E+00	5.11E-02	8.70E-01	2.60E-02	2.16E-01	3.31E+00	0	0	1.87E+01
	2	4.63E-01	3.63E+00	4.31E-03	8.69E+00	1.07E+00	5.95E-02	7.65E-01	2.54E-02	2.14E-01	3.25E+00	0	0	1.82E+01
	3	5.04E-01	3.95E+00	9.93E-03	8.29E+00	1.17E+00	5.63E-02	8.20E-01	2.58E-02	2.15E-01	3.29E+00	0	0	1.83E+01
	4	5.04E-01	3.94E+00	7.72E-03	8.30E+00	1.17E+00	5.63E-02	8.20E-01	2.58E-02	2.15E-01	3.29E+00	0	0	1.83E+01



Käppalaverket, total påverkan under ett års drift

Kategori	Scen.	Inlopps-pumpar	Mekanisk rening	Höglödes-rening	Biologisk ASP	Sandfilter	Förtjockare	Rötkammare	Anamnox	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO2-ekv]	0	1.74E+05	6.20E+05	2.17E+03	6.94E+06	1.79E+05	1.94E+04	1.16E+06	8.88E+03	7.40E+04	3.29E+05	2.81E+06	2.74E+04	1.23E+07
	1	1.86E+05	6.63E+05	8.99E+03	6.99E+06	1.90E+05	1.74E+04	1.16E+06	8.89E+03	7.37E+04	3.28E+05	2.80E+06	2.99E+04	1.25E+07
	2	1.61E+05	5.76E+05	1.50E+03	6.77E+06	1.66E+05	2.07E+04	1.16E+06	8.82E+03	7.44E+04	3.28E+05	2.82E+06	2.47E+04	1.21E+07
	3	1.74E+05	6.20E+05	2.35E+03	6.94E+06	1.79E+05	1.94E+04	1.16E+06	8.88E+03	7.40E+04	3.29E+05	2.81E+06	2.74E+04	1.23E+07
	4	1.74E+05	6.20E+05	2.01E+03	6.93E+06	1.79E+05	1.94E+04	1.16E+06	8.88E+03	7.40E+04	3.29E+05	2.81E+06	2.73E+04	1.23E+07
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	1.09E+02	4.96E+02	1.48E+00	6.74E+03	1.44E+02	1.22E+01	1.06E+02	5.58E+00	4.65E+01	6.83E+02	7.84E+03	2.21E+05	2.37E+05
	1	1.17E+02	5.31E+02	6.97E+00	6.81E+03	1.54E+02	1.10E+01	1.10E+02	5.58E+00	4.63E+01	6.81E+02	7.78E+03	2.39E+05	2.56E+05
	2	1.01E+02	4.61E+02	9.41E-01	6.56E+03	1.34E+02	1.30E+01	1.01E+02	5.54E+00	4.67E+01	6.81E+02	7.90E+03	2.02E+05	2.18E+05
	3	1.09E+02	4.96E+02	1.63E+00	6.74E+03	1.44E+02	1.22E+01	1.06E+02	5.58E+00	4.65E+01	6.83E+02	7.84E+03	2.21E+05	2.37E+05
	4	1.09E+02	4.96E+02	1.36E+00	6.74E+03	1.44E+02	1.22E+01	1.06E+02	5.58E+00	4.65E+01	6.83E+02	7.84E+03	2.21E+05	2.37E+05
Försurning [kg SO2-ekv]	0	5.84E+02	2.07E+03	7.26E+00	1.46E+03	5.96E+02	6.52E+01	5.08E+02	2.98E+01	2.49E+02	1.16E+03	3.58E+04	0	4.26E+04
	1	6.26E+02	2.21E+03	3.00E+01	1.44E+03	6.35E+02	5.86E+01	5.26E+02	2.99E+01	2.48E+02	1.15E+03	3.56E+04	0	4.25E+04
	2	5.41E+02	1.92E+03	5.03E+00	1.48E+03	5.53E+02	6.95E+01	4.85E+02	2.96E+01	2.50E+02	1.15E+03	3.61E+04	0	4.26E+04
	3	5.84E+02	2.07E+03	7.89E+00	1.45E+03	5.97E+02	6.51E+01	5.08E+02	2.98E+01	2.49E+02	1.16E+03	3.58E+04	0	4.25E+04
	4	5.84E+02	2.07E+03	6.75E+00	1.46E+03	5.96E+02	6.52E+01	5.08E+02	2.98E+01	2.49E+02	1.16E+03	3.58E+04	0	4.26E+04
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	4.58E-01	9.98E-01	4.99E-03	1.12E+00	2.80E-01	5.11E-02	3.70E-01	2.34E-02	1.95E-01	5.65E-01	0	0	4.06E+00
	1	4.91E-01	1.07E+00	1.58E-02	1.10E+00	2.98E-01	4.60E-02	3.82E-01	2.34E-02	1.94E-01	5.64E-01	0	0	4.18E+00
	2	4.24E-01	9.29E-01	3.94E-03	1.13E+00	2.59E-01	5.45E-02	3.54E-01	2.32E-02	1.96E-01	5.62E-01	0	0	3.94E+00
	3	4.58E-01	9.98E-01	5.29E-03	1.12E+00	2.80E-01	5.11E-02	3.70E-01	2.34E-02	1.95E-01	5.65E-01	0	0	4.06E+00
	4	4.57E-01	9.97E-01	4.75E-03	1.12E+00	2.80E-01	5.11E-02	3.70E-01	2.34E-02	1.95E-01	5.65E-01	0	0	4.06E+00
Fossila resurser [MJ]	0	1.15E+06	9.04E+06	1.99E+04	1.90E+07	2.67E+06	1.29E+05	1.88E+06	5.90E+04	4.92E+05	7.53E+06	0	0	4.20E+07
	1	1.24E+06	9.68E+06	1.21E+05	1.83E+07	2.84E+06	1.16E+05	1.98E+06	5.91E+04	4.90E+05	7.51E+06	0	0	4.24E+07
	2	1.07E+06	8.38E+06	9.95E+03	2.01E+07	2.48E+06	1.37E+05	1.77E+06	5.86E+04	4.94E+05	7.51E+06	0	0	4.20E+07
	3	1.16E+06	9.04E+06	2.27E+04	1.90E+07	2.67E+06	1.29E+05	1.88E+06	5.90E+04	4.92E+05	7.53E+06	0	0	4.20E+07
	4	1.15E+06	9.03E+06	1.77E+04	1.90E+07	2.67E+06	1.29E+05	1.88E+06	5.90E+04	4.92E+05	7.53E+06	0	0	4.20E+07



Kungängens reningsverk, per m³ behandlat vatten

Kategori	Scen.	Inloppspumpar	Mekanisk rening	Biologisk ASP	Mellan-sedimentering	Förtjockare	Rötkammare	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO ₂ -ekv]	0	2.28E-03	8.09E-03	6.08E-02	3.97E-03	2.17E-03	3.10E-02	1.28E-03	3.62E-03	1.65E-02	1.18E-03	1.31E-01
	1	2.28E-03	6.87E-03	5.20E-02	3.97E-03	1.83E-03	2.53E-02	1.04E-03	2.98E-03	1.36E-02	1.12E-03	1.11E-01
	2	2.28E-03	9.92E-03	7.43E-02	3.97E-03	2.63E-03	3.96E-02	1.63E-03	4.59E-03	2.07E-02	1.27E-03	1.61E-01
	3	2.28E-03	8.06E-03	6.08E-02	3.97E-03	2.14E-03	3.07E-02	1.27E-03	3.59E-03	1.63E-02	1.18E-03	1.30E-01
	4	2.28E-03	8.14E-03	6.06E-02	3.97E-03	2.18E-03	3.12E-02	1.29E-03	3.65E-03	1.66E-02	1.18E-03	1.31E-01
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	1.43E-06	8.09E-06	3.04E-05	8.53E-06	4.49E-06	1.39E-05	8.02E-07	6.99E-06	1.44E-04	9.08E-03	9.30E-03
	1	1.43E-06	6.82E-06	2.57E-05	8.53E-06	3.79E-06	1.14E-05	6.54E-07	5.74E-06	1.19E-04	8.64E-03	8.82E-03
	2	1.44E-06	9.97E-06	3.75E-05	8.53E-06	5.45E-06	1.78E-05	1.03E-06	8.86E-06	1.81E-04	9.69E-03	9.96E-03
	3	1.43E-06	8.05E-06	3.04E-05	8.53E-06	4.43E-06	1.38E-05	7.95E-07	6.92E-06	1.43E-04	9.14E-03	9.36E-03
	4	1.43E-06	8.13E-06	3.01E-05	8.53E-06	4.51E-06	1.40E-05	8.08E-07	7.04E-06	1.45E-04	9.01E-03	9.23E-03
Försurning [kg SO ₂ -ekv]	0	7.67E-06	3.23E-05	4.23E-05	1.41E-05	7.77E-06	7.26E-05	4.29E-06	1.28E-05	6.15E-04	0	8.08E-04
	1	7.67E-06	2.73E-05	3.64E-05	1.41E-05	6.56E-06	5.92E-05	3.50E-06	1.05E-05	5.07E-04	0	6.72E-04
	2	7.67E-06	3.97E-05	5.11E-05	1.41E-05	9.44E-06	9.28E-05	5.48E-06	1.62E-05	7.72E-04	0	1.01E-03
	3	7.67E-06	3.21E-05	4.22E-05	1.41E-05	7.67E-06	7.20E-05	4.25E-06	1.27E-05	6.08E-04	0	8.01E-04
	4	7.67E-06	3.25E-05	4.24E-05	1.41E-05	7.81E-06	7.31E-05	4.32E-06	1.29E-05	6.18E-04	0	8.13E-04
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	6.02E-09	2.28E-09	2.42E-08	6.05E-09	3.13E-09	5.06E-09	3.36E-09	6.12E-09	0.00E+00	0.00E+00	5.63E-08
	1	6.02E-09	2.18E-09	2.09E-08	6.05E-09	2.64E-09	4.14E-09	2.74E-09	5.02E-09	0.00E+00	0	4.97E-08
	2	6.02E-09	2.43E-09	2.93E-08	6.05E-09	3.80E-09	6.46E-09	4.30E-09	7.75E-09	0.00E+00	0	6.61E-08
	3	6.02E-09	2.28E-09	2.41E-08	6.05E-09	3.09E-09	5.02E-09	3.33E-09	6.06E-09	0.00E+00	0	5.60E-08
	4	6.02E-09	2.29E-09	2.43E-08	6.05E-09	3.14E-09	5.10E-09	3.39E-09	6.16E-09	0.00E+00	0	5.65E-08
Fossila resurser [MJ]	0	1.52E-02	1.05E-01	6.03E-01	9.48E-02	5.01E-02	1.31E-01	8.48E-03	7.75E-02	0.00E+00	0	1.09E+00
	1	1.52E-02	8.87E-02	5.21E-01	9.48E-02	4.23E-02	1.07E-01	6.92E-03	6.36E-02	0.00E+00	0	9.40E-01
	2	1.52E-02	1.30E-01	7.30E-01	9.48E-02	6.09E-02	1.68E-01	1.08E-02	9.81E-02	0.00E+00	0	1.31E+00
	3	1.52E-02	1.05E-01	6.04E-01	9.48E-02	4.95E-02	1.30E-01	8.41E-03	7.67E-02	0.00E+00	0	1.08E+00
	4	1.52E-02	1.06E-01	6.04E-01	9.48E-02	5.04E-02	1.32E-01	8.55E-03	7.81E-02	0.00E+00	0	1.09E+00



Kungängens reningsverk, per kg avskild kväve

Kategori	Scen.	Inloppspumpar	Mekanisk rening	Biologisk ASP	Mellan-sedimentering	Förtjockare	Rötkammare	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO2-ekv]	0	7.88E-02	2.79E-01	2.10E+00	1.37E-01	7.48E-02	1.07E+00	4.41E-02	1.25E-01	5.69E-01	4.08E-02	4.52E+00
	1	9.92E-02	2.98E-01	2.26E+00	1.72E-01	7.94E-02	1.10E+00	4.52E-02	1.29E-01	5.90E-01	4.85E-02	4.82E+00
	2	6.01E-02	2.61E-01	1.95E+00	1.04E-01	6.92E-02	1.04E+00	4.29E-02	1.21E-01	5.44E-01	3.34E-02	4.23E+00
	3	7.89E-02	2.78E-01	2.10E+00	1.37E-01	7.39E-02	1.06E+00	4.37E-02	1.24E-01	5.63E-01	4.09E-02	4.50E+00
	4	7.89E-02	2.81E-01	2.09E+00	1.37E-01	7.52E-02	1.08E+00	4.44E-02	1.26E-01	5.73E-01	4.06E-02	4.53E+00
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	4.95E-05	2.79E-04	1.05E-03	2.95E-04	1.55E-04	4.80E-04	2.77E-05	2.41E-04	4.97E-03	3.13E-01	3.21E-01
	1	6.23E-05	2.96E-04	1.12E-03	3.71E-04	1.65E-04	4.93E-04	2.84E-05	2.49E-04	5.16E-03	3.75E-01	3.83E-01
	2	3.77E-05	2.62E-04	9.87E-04	2.24E-04	1.43E-04	4.68E-04	2.70E-05	2.33E-04	4.76E-03	2.55E-01	2.62E-01
	3	4.96E-05	2.78E-04	1.05E-03	2.95E-04	1.53E-04	4.76E-04	2.75E-05	2.39E-04	4.92E-03	3.16E-01	3.23E-01
	4	4.96E-05	2.81E-04	1.04E-03	2.95E-04	1.56E-04	4.84E-04	2.79E-05	2.43E-04	5.01E-03	3.11E-01	3.19E-01
Försurning [kg SO2-ekv]	0	2.65E-04	1.11E-03	1.46E-03	4.88E-04	2.68E-04	2.51E-03	1.48E-04	4.42E-04	2.12E-02	0	2.79E-02
	1	3.33E-04	1.19E-03	1.58E-03	6.14E-04	2.85E-04	2.57E-03	1.52E-04	4.57E-04	2.20E-02	0	2.92E-02
	2	2.02E-04	1.04E-03	1.34E-03	3.72E-04	2.48E-04	2.44E-03	1.44E-04	4.27E-04	2.03E-02	0	2.65E-02
	3	2.65E-04	1.11E-03	1.46E-03	4.88E-04	2.65E-04	2.49E-03	1.47E-04	4.38E-04	2.10E-02	0	2.77E-02
	4	2.65E-04	1.12E-03	1.46E-03	4.88E-04	2.70E-04	2.53E-03	1.49E-04	4.46E-04	2.14E-02	0	2.81E-02
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	2.08E-07	7.89E-08	8.37E-07	2.09E-07	1.08E-07	1.75E-07	1.16E-07	2.11E-07	0.00E+00	0.00E+00	1.94E-06
	1	2.61E-07	9.48E-08	9.06E-07	2.63E-07	1.15E-07	1.80E-07	1.19E-07	2.18E-07	0.00E+00	0	2.16E-06
	2	1.58E-07	6.40E-08	7.71E-07	1.59E-07	1.00E-07	1.70E-07	1.13E-07	2.04E-07	0.00E+00	0	1.74E-06
	3	2.08E-07	7.88E-08	8.34E-07	2.09E-07	1.07E-07	1.73E-07	1.15E-07	2.09E-07	0.00E+00	0	1.93E-06
	4	2.08E-07	7.90E-08	8.40E-07	2.09E-07	1.09E-07	1.76E-07	1.17E-07	2.13E-07	0.00E+00	0	1.95E-06
Fossila resurser [MJ]	0	5.24E-01	3.63E+00	2.08E+01	3.27E+00	1.73E+00	4.53E+00	2.93E-01	2.67E+00	0.00E+00	0	3.75E+01
	1	6.59E-01	3.85E+00	2.26E+01	4.12E+00	1.84E+00	4.65E+00	3.00E-01	2.76E+00	0.00E+00	0	4.08E+01
	2	3.99E-01	3.42E+00	1.92E+01	2.49E+00	1.60E+00	4.42E+00	2.85E-01	2.58E+00	0.00E+00	0	3.44E+01
	3	5.24E-01	3.62E+00	2.08E+01	3.27E+00	1.71E+00	4.50E+00	2.90E-01	2.65E+00	0.00E+00	0	3.74E+01
	4	5.24E-01	3.65E+00	2.09E+01	3.27E+00	1.74E+00	4.57E+00	2.95E-01	2.70E+00	0.00E+00	0	3.76E+01



Kungängens reningsverk, total påverkan under ett års drift

Kategori	Scen.	Inloppspumpar	Mekanisk rening	Biologisk ASP	Mellan-sedimentering	Förtjockare	Rötkammare	Gasrening	Avvattning	Slamlager	Utgående vatten	TOTAL
Klimat [kg CO2-ekv]	0	3.94E+04	1.40E+05	1.05E+06	6.84E+04	3.74E+04	5.35E+05	2.20E+04	6.25E+04	2.84E+05	2.04E+04	2.26E+06
	1	4.74E+04	1.43E+05	1.08E+06	8.24E+04	3.80E+04	5.25E+05	2.16E+04	6.18E+04	2.82E+05	2.32E+04	2.30E+06
	2	3.14E+04	1.36E+05	1.02E+06	5.45E+04	3.61E+04	5.44E+05	2.24E+04	6.30E+04	2.84E+05	1.75E+04	2.21E+06
	3	3.94E+04	1.39E+05	1.05E+06	6.85E+04	3.69E+04	5.30E+05	2.18E+04	6.19E+04	2.81E+05	2.04E+04	2.25E+06
	4	3.94E+04	1.40E+05	1.04E+06	6.84E+04	3.75E+04	5.39E+05	2.22E+04	6.30E+04	2.86E+05	2.03E+04	2.26E+06
Övergödning [kg fosfat-ekv]	0	2.48E+01	1.39E+02	5.24E+02	1.47E+02	7.74E+01	2.40E+02	1.38E+01	1.21E+02	2.49E+03	1.57E+05	1.60E+05
	1	2.98E+01	1.42E+02	5.34E+02	1.77E+02	7.87E+01	2.36E+02	1.36E+01	1.19E+02	2.47E+03	1.79E+05	1.83E+05
	2	1.97E+01	1.37E+02	5.15E+02	1.17E+02	7.49E+01	2.44E+02	1.41E+01	1.22E+02	2.48E+03	1.33E+05	1.37E+05
	3	2.48E+01	1.39E+02	5.25E+02	1.47E+02	7.64E+01	2.38E+02	1.37E+01	1.19E+02	2.46E+03	1.58E+05	1.62E+05
	4	2.47E+01	1.40E+02	5.19E+02	1.47E+02	7.78E+01	2.42E+02	1.39E+01	1.21E+02	2.50E+03	1.55E+05	1.59E+05
Försurning [kg SO2-ekv]	0	1.32E+02	5.57E+02	7.29E+02	2.44E+02	1.34E+02	1.25E+03	7.40E+01	2.21E+02	1.06E+04	0	1.39E+04
	1	1.59E+02	5.68E+02	7.57E+02	2.94E+02	1.36E+02	1.23E+03	7.26E+01	2.18E+02	1.05E+04	0	1.40E+04
	2	1.05E+02	5.45E+02	7.02E+02	1.94E+02	1.30E+02	1.27E+03	7.53E+01	2.23E+02	1.06E+04	0	1.38E+04
	3	1.32E+02	5.55E+02	7.27E+02	2.44E+02	1.32E+02	1.24E+03	7.33E+01	2.19E+02	1.05E+04	0	1.38E+04
	4	1.32E+02	5.60E+02	7.32E+02	2.44E+02	1.35E+02	1.26E+03	7.45E+01	2.23E+02	1.07E+04	0	1.40E+04
Material-resurser [kg Sb-ekv]	0	1.04E-01	3.94E-02	4.18E-01	1.04E-01	5.40E-02	8.73E-02	5.80E-02	1.06E-01	0.00E+00	0.00E+00	9.71E-01
	1	1.25E-01	4.53E-02	4.33E-01	1.26E-01	5.48E-02	8.60E-02	5.69E-02	1.04E-01	0.00E+00	0	1.03E+00
	2	8.26E-02	3.34E-02	4.02E-01	8.31E-02	5.22E-02	8.86E-02	5.90E-02	1.06E-01	0.00E+00	0	9.08E-01
	3	1.04E-01	3.94E-02	4.17E-01	1.04E-01	5.33E-02	8.66E-02	5.75E-02	1.05E-01	0.00E+00	0	9.66E-01
	4	1.04E-01	3.95E-02	4.20E-01	1.04E-01	5.42E-02	8.79E-02	5.84E-02	1.06E-01	0.00E+00	0	9.74E-01
Fossila resurser [MJ]	0	2.62E+05	1.82E+06	1.04E+07	1.64E+06	8.65E+05	2.27E+06	1.46E+05	1.34E+06	0.00E+00	0	1.87E+07
	1	3.15E+05	1.84E+06	1.08E+07	1.97E+06	8.79E+05	2.23E+06	1.44E+05	1.32E+06	0.00E+00	0	1.95E+07
	2	2.08E+05	1.78E+06	1.00E+07	1.30E+06	8.36E+05	2.31E+06	1.49E+05	1.35E+06	0.00E+00	0	1.80E+07
	3	2.62E+05	1.81E+06	1.04E+07	1.64E+06	8.54E+05	2.25E+06	1.45E+05	1.32E+06	0.00E+00	0	1.87E+07
	4	2.62E+05	1.82E+06	1.04E+07	1.63E+06	8.69E+05	2.28E+06	1.47E+05	1.35E+06	0.00E+00	0	1.88E+07





KÄPPALA

The logo for Käppala features a stylized blue wave above the word "KÄPPALA" in a bold, black, sans-serif font.

MälarenEnergi

The logo for MälarenEnergi features a stylized blue wave with an orange sun above it, positioned above the word "MälarenEnergi" in a black, serif font.

STOCKHOLM
Vatten

The logo for Stockholm Vatten features the word "STOCKHOLM" in a blue, sans-serif font above the word "Vatten" in a blue, serif font. To the right is a blue square containing a white crown above a white face, with a blue wave below.