

# Simulering för hållbar dimensionering av reningsverk



# Simulering för hållbar dimensionering av reningsverk

SIMDIM

Johanna Andersson, Sofia Lovisa Andersson, Diana Arvidsson, Linda Kanders, Petter Lind, Erik U. Lindblom, Beatrice Marsilius, Max Mohlander, Lovisa Olofsson, Tove Rappmann, Oscar Samuelsson, Robert Sehlén

IVL Rapportnummer: C876  
ISBN nummer: 978-91-7883-642-0

Med stöd från

**VINNOVA**  
Sveriges innovationsmyndighet

 **Energimyndigheten**

**FORMAS** 

**Strategiska  
innovations-  
program**

# Förord

Smart Built Environment är ett strategiskt innovationsprogram för hur samhällsbyggnadssektorn kan bidra till Sveriges resa mot att bli ett globalt föregångsland som realiserar de nya möjligheter som digitaliseringen för med sig. Smart Built Environment är ett av 17 strategiska innovationsprogram som har fått stöd inom ramen för Strategiska innovationsområden, en gemensam satsning mellan Vinnova, Energimyndigheten och Formas. Syftet med satsningen är att skapa förutsättningar för Sveriges internationella konkurrenskraft och bidra till hållbara lösningar på globala samhällsutmaningar.

Samhällsbyggnadssektorn är Sveriges enskilt största sektor som påverkar hela vår byggda miljö, men den är fragmenterad med många aktörer och processer. Att förändra samhällsbyggandet med digitaliseringen som drivkraft kräver därför samverkan mellan många olika aktörer. Smart Built Environment tar ett samlat grepp över de möjligheter som digitaliseringen innebär och blir en katalysator för spridningen av nya möjligheter och affärsmodeller.

## **Programmets mål är att till 2030 uppnå:**

- 40 % minskad miljöpåverkan i ett livscykelperspektiv för nybyggnad och renovering
- 33 % minskning av total tid från planering till färdigställande för nybyggnad och renovering
- 33 % minskning av de totala byggkostnaderna
- flera nya värdekedjor och affärsmodeller baserade på livscykelperspektiv, plattformar samt nya konstellationer av aktörer

I programmet samverkar programparter från näringsliv, kommuner, myndigheter, bransch- och intresseorganisationer, institut och akademi. Tillsammans nyttiggör vi den kunskap som tas fram i programmet.

Simulering för hållbar dimensionering av reningsverk är ett av projekten som har genomförts i programmet. Det har letts av IVL Svenska Miljöinstitutet och har genomförts i samverkan med Tekniska verken, Uppsala vatten och avfall, Envidan, Stockholm vatten och avfall, Gryaab, Lunds tekniska högskola samt Telia.

Projektet syftar till att utveckla metoder för modellbaserad dimensionering av avloppsreningsverk och som stöds av nya datakällor. Projektet ämnar också bidra till ett kunskapslyft inom processmodellering för ett kritiskt antal yrkesverksamma processingenjörer. Dessa mål adresserar två av Smart Built Environments temaområden, nämligen 1) Kunskap och kompetens samt 2) Innovationer och nya tillämpningar.

Malmö, 31 oktober 2024

Linda Kanders, projektledare

IVL Svenska Miljöinstitutet

## Sammanfattning

Under de kommande åren står den svenska branschen för vatten och avlopp inför investeringar i storleksordningen 9 miljarder kronor årligen för att bygga om och bygga nya reningsverk. Samtidigt som vi ser en stor befolkningstillväxt ställs allt högre krav på vattnets reningsgrad, resurs- och kostnadseffektivitet kombinerat med krav på en minskad klimatpåverkan.

Dimensioneringen av dagens reningsverk baseras ofta på generella tumregler där de inbyggda säkerhetsfaktorerna inte är transparenta. Dimensioneringen blir därför ofta subjektiv och svår att överblicka vilket kan öka risken för att de nya reningsverken blir onödigt resurskrävande och felaktigt dimensionerade.

Projektet syftar till att utveckla metoder för modellbaserad dimensionering av avloppsreningsverk som stöds av nya datakällor. Projektet ämnar också bidra till ett kunskapslyft inom processmodellering för ett kritiskt antal yrkesverksamma processingenjörer.

Metoden för modellbaserad dimensionering innebär att en processmodell simuleras med olika dimensionerande scenarier tills alla bivillkor är uppfyllda. Varje scenario genererar nödvändiga värden för dimensionerande storheter, som processvolym och kapacitet. Bivillkoren omfattar krav på processfunktionen, inklusive utsläppsvillkor och resursförbrukning. Dimensionerna justeras iterativt för att möta dessa krav. Då ett referensscenario jämförs med alternativa scenarion kan säkerhetsmarginaler definieras för olika dimensioner.

Vidare diskuteras en ny typ av datakälla i form rörelsedata från mobilkommunikation. Detta ger en mer dynamisk bild av befolkningen inom reningsverkets upptagningsområde. Data från Uppsalaregionen visar att befolkningen varierar kraftigt under året, samt över veckan vilket därmed påverkar belastningen på avloppsreningsverket. Rörelsedata möjliggör en mer exakt uppskattning av personspecifik belastning inom ett område och helgbelastning är särskilt relevant för dessa beräkningar. En dynamisk befolkningsuppskattning kan i förlängningen ha en betydande påverkan på den dimensionerande kapaciteten på reningsverket.

Genom att samla VA-branschens föregångare gällande modellering har olika teman diskuterats under sex workshoppar. Den röda tråden för de olika frågeställningarna har varit dimensionering och upphandling av reningsverk, där varje deltagare har bidragit med var sin egen fallstudie taget direkt från vardagen.

Projektet har demonstrerat de praktiska möjligheterna med processmodeller som dimensioneringsverktyg genom att de har nyttjats vid praktiskt relevanta tillämpningar av flera VA-organisationer och en konsult. Metodiken har skapat intresse i konsultledet, vilket är den grupp där kompetensuppbyggnad behöver ske när beställarorganisationerna efterfrågar modellstödda tjänster.

## Summary

In the coming years, the Swedish water and wastewater industry faces investments of approximately 9 billion SEK annually to upgrade and build new treatment plants. While we are witnessing significant population growth, there are increasing demands for water treatment efficiency, resource and cost-effectiveness, combined with requirements to reduce climate impact.

The sizing of today's treatment plants is often based on general rules of thumb, where the built-in safety factors are not transparent. This often makes the sizing subjective and difficult to overview, which can increase the risk that the new treatment plants will be unnecessarily resource-intensive and will not meet the requirements throughout their entire lifecycle.

The project aims to develop methods for model-based sizing of wastewater treatment plants, supported by new data sources. It also intends to contribute to a knowledge boost in process modelling for a critical number of practicing process engineers.

The model-based sizing method involves simulating a process model with various dimensioning scenarios until all constraints are met. Each scenario generates necessary values for dimensioning variables, such as process volumes and capacities. The constraints include requirements for process functionality, including discharge conditions and resource consumption. The dimensions are iteratively adjusted to meet these requirements. By comparing a reference scenario with alternative scenarios, safety margins can be defined for different dimensions.

Furthermore, a new type of data source is discussed in the form of mobility data from mobile communication. This provides a more dynamic picture of the population within the treatment plant's catchment area. Data from the Uppsala region shows that the population varies significantly throughout the year and week, thus affecting the load on the wastewater treatment plant. Mobility data enables a more accurate estimation of per capita load in an area, and weekend load is particularly relevant for these calculations. A dynamic population estimate can ultimately have a significant impact on the dimensioning capacity of the treatment plant.

By gathering the pioneers of the water and wastewater industry regarding modelling, various themes have been discussed during six workshops. The common thread for the different questions has been the sizing and procurement of treatment plants, where each participant has contributed their own case study drawn directly from everyday life.

The project has demonstrated the practical possibilities of process models as sizing tools, as the developed sizing methodology has been applied by several water and wastewater organizations and one consultant. The methodology has generated interest among consultants, which is the group where capacity building needs to occur as client organizations request model-supported services.

# Innehållsförteckning

<b>1 INLEDNING</b>	<b>7</b>
1.1 BAKGRUND	7
1.2 SYFTE OCH MÅL	8
1.3 LÄSANVISNINGAR	9
<b>2 GENOMFÖRANDE</b>	<b>9</b>
<b>3 MODELLBASERAD DIMENSIONERING</b>	<b>10</b>
3.1 METODIK FÖR MODELLBASERAD DIMENSIONERING	10
3.2 INNOVATIV DATAANALYS AV EN DYNAMISK BEFOLKNING	21
3.3 TRANSPARENT RESILIENS MOT STÖRNINGAR	24
<b>4 FALLSTUDIER</b>	<b>29</b>
4.1 FALLSTUDIE 1 – KUNGSÄNGSVERKET I UPPSALA	29
4.2 FALLSTUDIE 2 – DIMENSIONERING AV EN DEOXVOLYM PÅ HENRIKSDALS RENINGSVERK	31
4.3 FALLSTUDIE 3 – BIOLOGISK FOSFORRENING VID HENRIKSDALS RENINGSVERK	35
4.4 FALLSTUDIE 4 – NYKVARNSVERKET I LINKÖPING	37
4.5 FALLSTUDIE 5 – RYAVERKET I GÖTEBORG	40
4.6 FALLSTUDIE 6 – ETT AVLOPPSRENINGSVÄRK I MELLANSVERIGE	41
<b>5 INSIKTER OCH SLUTSATSER</b>	<b>50</b>
<b>6 REFERENSER</b>	<b>53</b>
<b>7 BILAGOR</b>	<b>55</b>

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Sveriges VA-bransch står inför stora investeringar om 9 miljarder kronor per år för ny- eller ombyggnationer av avloppsreningsverk (Svensk Vatten, 2023). Kraven på de nya reningsverken är dessutom högre än tidigare; utgående koncentrationer av både traditionella föroreningar (organiskt material, kväve, fosfor) och nya fokusämnen såsom läkemedelsrester behöver kontinuerligt hållas allt lägre, miljöpåverkan genom resursförbrukning (t.ex. energi- och kemikalieförbrukning) och växthusgasutsläpp ska minimeras.

Det är under de tidiga projektskeendena (tillstånd, planering, förstudie) som påverkanen för reningsverkets utformning är som störst. Dagens dimensioneringsmetodik får alltså ett stort genomslag på den slutliga effektiviteten som består decennier framöver.

I Sverige saknas dock formella riktlinjer för hur reningsverk ska dimensioneras och det är inte ovanligt att riktlinjer från 1990-talet (ATV, 2000) nyttjas trots att utsläppskrav och processteknik ändrats signifikant sedan dess. I många fall sker också dimensionering utifrån den individuella konsultens eller entreprenörens kompetens och erfarenhet. Detta arbetsätt innebär flera nackdelar som får större betydelse i takt med att högre krav leder till tekniskt mer komplexa reningsverk:

- Det är tidskrävande att analysera olika osäkerheter och scenarier, vilket begränsar analysen av dessa.
- Det är krångligt att dokumentera de antaganden som görs i dessa icke-transparenta uträkningar. Detta kan leda till överlagrade säkerhetsfaktorer och en disproportionerlig design. Det begränsar även kunskapsöverföring av anläggningens tänkta drift till anläggningsägaren.
- Det finns en överhängande risk att mänskliga fel oavsiktligt introduceras.

Ett möjligt alternativ till riktlinjer är att i stället nyttja den processförståelse som har formaliserats som processmodeller. Simulering av reningsverk med processmodeller är en mogen digital teknik som tillämpas i flera delar av reningsverkets livscykel. En processmodell är en digital representation av den fysiska verkligheten som beskriver de viktiga processer (fysikaliska, biologiska, kemiska och hydrauliska) som sker i ett reningsverk. Processmodeller har använts för olika syften såsom

- analys av miljö- och klimatpåverkan givet olika processval och utsläppsvillkor (Åmand et al., 2016)
- utveckling och test av styrstrategier (Jeppsson et al., 2007)
- verifiering av styrsystemkod (Lindblom & Samuelsson, 2021)
- optimering av driftparametrar (Rivas et al., 2008)
- utbildning (Hugg et al., 2012).

Trots den höga mognadsgraden är det dock ovanligt att processmodeller används för dimensionering. Den viktigaste orsaken till detta är att processmodeller är utvecklade för att beskriva verkligheten utan säkerhetsfaktorer, men redundans behövs i det dimensionerade reningsverket (Belia et al., 2013). En annan utmaning är att de

dimensionerande förutsättningarna måste uttryckas i form av tidsserier och scenarier, vilket det idag saknas en systematisk metod för. Exempel på dimensionerande förutsättningar är, förutom reningskrav, den dimensionerande belastningen och flöden som reningsverket skall kunna behandla samt krav på resiliens mot diverse externa (t.ex. industriutsläpp) och interna (t.ex. havererad utrustning) störningar samt krav på hållbarhet (t.ex. driftkostnad och CO<sub>2</sub>-avtryck).

Men även om de rent modell- och dimensioneringstekniska utmaningarna kan lösas så kommer nyttiggörandet begränsas av två faktorer: beställarkompetens och datatillgång.

Beställarkompetens kräver en grundläggande förståelse för processmodeller och hur de kan tillämpas för dimensionering i praktiken. Detta är en förutsättning för att modellbaserad dimensionering ska efterfrågas och i förlängningen erbjudas av entreprenörer och konsulter. Brist på kunskap har identifierats som det största hindret för användningen av processmodeller generellt (även för andra syften än dimensionering) hos VA-verksamheter och konsulter i Sverige (Wärff et al., 2020).

Processmodeller, och därmed dimensionering med stöd av processmodeller, kräver mer data än traditionell dimensionering. I vissa fall kan kompletterande mätkampanjer genomföras, men ibland behöver okända förutsättningar simuleras för att helt enkelt kvantifiera inverkan av dem.

Med en ökad grad av digitalisering skapas möjligheter att samla in, lagra och bearbeta stora mängder nya data vilket kan och bör nyttjas för effektivare dimensionering. På samma sätt sker ett generationsskifte i VA-branschen där digitala tekniker såsom processmodellering kan nå en högre acceptans hos den yngre generationen.

Detta projekt syftar till att möta dessa tre nyckelutmaningar: digital mognadsgrad hos beställare, ett brutet och begränsat dataflöde samt bristen på en handgriplig metodik för att tillämpa processmodeller vid dimensionering.

## 1.2 Syfte och mål

Projektets syfte är att bidra till VA-branschens digitala transformation genom att:

- Utveckla metoder för modellbaserad dimensionering som stöds av nya datakällor.
- Bidra till ett kunskapslyft inom processmodellering för ett kritiskt antal yrkesverksamma processingenjörer.

Dessa mål adresserar två av Smart Built Environments temaområden:

- 1) Kunskap och kompetens.
- 2) Innovationer och nya tillämpningar.

Den långsiktiga målsättningen är att beställarorganisationerna i större utsträckning efterfrågar och upphandlar olika former av digitala lösningarna i samband med ombyggnad och nybyggnation av reningsverk. Förhoppningen är att detta påverkar entreprenörer och konsulter så att de erbjuder digitala lösningar som en del av sitt normala tjänsteutbud. Projektets effektlogik bifogas som Bilaga A.



### 1.3 Läsanvisningar

Projektets upplägg och arbetsmetodik beskrivs i Kapitel 2 – Genomförande, som följs av en summering av de resultat och metoder som tagits fram inom projektet (Kapitel 3 – Modellbaserad dimensionering). Kapitel 3 ger en övergripande summering av projektets resultat och ytterligare detaljer beskrivs i de refererade publikationerna. Varje resultatdel inleds med en motivering till varför de olika metoderna är viktiga vid dimensionering av reningsverk för att orientera läsaren. Resultatens tillämpbarhet exemplifieras i Kapitel 4 – Fallstudier, där VA-branschens föregångare beskriver hur de själva har tillämpat resultaten och nyttjat modeller som stöd vid dimensionering. Rapporten avslutas med en diskussion om hur projektets resultat kan bidra till VA-branschens digitala transformation och vilka framtida aktiviteter som kan stödja detta.

## 2 Genomförande

Projektet har formerats utifrån Smart Built Environments fem effektmål: Digital transformation, Kunskapsutveckling och förnyelse, Klimatperspektiv, Effektivisering, samt Förbättrat informationsflöde. Detta har resulterat i fyra arbetspaket:

- AP1. VA-branschens föregångare i den digitala transformationen
- AP2. Modellbaserad dimensionering av hållbara och resilienta reningsverk
- AP3. Innovativ dataanalys av ett samhälle i förändring
- AP4. Projektledning och dissemination.

Den fullständiga projektlogiken kopplat mot utlysningens effektmål redovisas i Bilaga A.

Nyttiggörandet av processmodeller är högst begränsat inom den svenska VA-branschen. Detta beror på att det är få personer som besitter modelleringskompetens och samtidigt nyttjar modellerna för kontinuerligt beslutsstöd. De personer som ändå besitter denna unika kompetens är utspridda geografiskt och med små möjligheter till branschgemensam kompetensutveckling. Detta projekt har därför samlat ett kritiskt antal yrkesverksamma processingenjörer i **AP1** för att stärka deras kompetens inom modellering - vi kallar dem branschföregångare. Under projektet har sex workshoppar genomförts, där branschföregångarna har presenterat sina lösningar på praktiska frågeställningar som rör olika aspekter av modellering. Den röda tråden för de olika frågeställningarna har varit dimensionering och upphandling av reningsverk, där varje deltagare har bidragit med var sin egen fallstudie taget direkt från vardagen (Avsnitt 0 beskriver fallstudierna översiktligt). Workshopparna har både bidragit med ny kunskap och fungerat som ett forum för kunskapsutbyte och diskussion för den modellbaserade metodiken som arbetats fram i **AP2**.

Fallstudie 1, Kungsängsverket i Uppsala, har haft en framträdande roll i projektet och agerat demonstrator och pilot för den metodutveckling av modellbaserad dimensionering som genomförts i projektet. Därigenom har processdata kunnat analyseras tillsammans med s.k. rörelsedata från mobiltelefonkommunikation, vilket visat sig vara viktigt vid dimensionering och prognostisering av det belastande avloppsvattnet (Avsnitt 3.2). Denna innovativa dataanalys har ingått i **AP3**.

En annan kritisk aspekt är att dimensionera med lagom stor säkerhetsmarginal så att förväntade störningar kan hanteras inom utsläppskraven. Det har därför varit viktigt att utveckla en metodik för hur olika störningsscenarion kan användas för att precisera nödvändig säkerhetsmarginal. Vad som är nödvändigt är dock subjektivt och beror på de förväntningar och krav som anläggningsägare har. Av den anledningen genomfördes två workshoppar utanför projektgruppen, en nationell och en internationell workshop, för att identifiera branschens konsensus kring störningar och scenarier som alltid bör ingå i en dimensionering (Avsnitt 3.3). Dessa workshoppar ingick i **AP2**.

Metodutvecklingen genomfördes med traditionella metoder genom iterativ hypotesställning och testning med processmodeller men där både behov och möjliga lösningar diskuterades under workshopparna med branschföregångarna. Syftet med detta var att succesivt utveckla en metodik för modellbaserad dimensionering med praktisk förankring. Delar av den framtagna dimensioneringsmetodiken replikerades slutligen i de olika fallstudierna (Avsnitt 0), vilket kombinerade branschföregångarna i **AP1** med framtagna metodik i **AP2**.

Slutligen hölls ett öppet slutseminarium inom ramen för **AP4** där metodiken för modellbaserad dimensionering presenterades och granskades av en extern referensgrupp. Även ett par av de fallstudier som tagits fram av branschföregångarna redovisades.

## 3 Modellbaserad dimensionering

Detta kapitel sammanfattar de resultat och metoder som projektet tagit fram. Grunden i projektet har varit att utveckla en arbetsmetodik för hur processmodeller kan, på ett systematiskt sätt, användas för dimensionering av reningsverk (Avsnitt 3.1). En central komponent vid dimensionering av reningsverk är att kartlägga och prediktera den belastning (föroreningsmängd) som ska renas. I Avsnitt 3.2 beskrivs hur rörelsedata från mobiltelefoner kan förbättra data- och beslutsunderlaget vid dimensionering. Avsnitt 3.3 beskriver slutligen en metod för hur störningar kan simuleras och användas för att kvantifiera vilka säkerhetsmarginaler som krävs för en resilient dimensionering.

### 3.1 Metodik för modellbaserad dimensionering

I detta avsnitt beskrivs i generella termer den metodik för modellbaserad dimensionering som utvecklats och testats inom projektet. Metoden är tänkt att användas för en på förhand vald processkonfiguration. Med dimensionering avses:

*”Att fastställa en kombination av inkommande belastning (flöde och föroreningshalter) och dimensioner på processutrustning (exempelvis volym och area) som givet en processkonfiguration och bivillkor (säkerhetsmarginal, energi- och resurseffektivitet), ger ett renat vatten som uppfyller ställda vattenkvalitetskrav”*

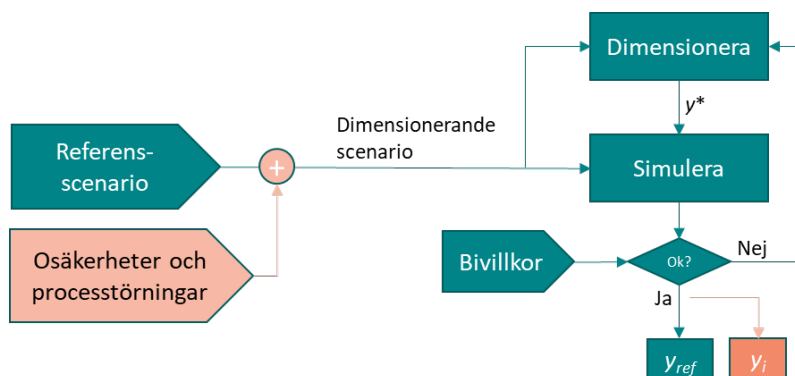
### 3.1.1 Vision

Följande punkter sammanfattar den vision som legat till grund för metodutvecklingen:

- Dimensionering baseras på bästa tillgänglig kunskap i form av processmodeller, vilka är grundstommen i metodiken.
- Vilka störningar och osäkerheter som dimensioneringen ska kunna hantera beskrivs och väljs subjektivt där statistiska metoder används som beslutsstöd.
- Säkerhetsfaktorer och säkerhetsmarginal adderas på ett transparent och spårbart sätt.
- Dimensioneringen ger en optimal resiliens mot valda störningar och osäkerheter. Optimal innebär i detta fall att de dimensionerande storheterna *precis* uppfyller villkoren när störningarna inträffar. Resiliens innebär då att dimensionering kan motverka och hantera valda störningar.

### 3.1.2 Metodöverblick

Metoden bygger på att en processmodell (Avsnitt 3.1.3) av den studerade konfigurationen simuleras med olika kombinationer av indata, de s.k. dimensionerande scenarierna, till dess att alla bivillkor är uppfyllda, se Figur 1. Varje scenario ger slutligen upphov till en uppsättning nödvändiga värden på de dimensionerande storheterna ( $y_i$ ), t.ex. processvolym och kapacitet på diverse processutrustning.



Figur 1 Överblick modellbaserad dimensionering.

*Bivillkoren* (Avsnitt 3.1.4) inkluderar information om, och krav på, den önskade processfunktionen, t.ex. utsläppsvillkor, processautomation, resursförbrukning och villkor som säkerställer att modellvariabler hålls inom realistiska intervall.

För varje dimensionerande scenario justeras dimensionerna i modellen till dess att bivillkoren är uppfyllda. Detta illustreras i Figur 1 med "dimensioneraloopen" som genererar ett förslag på dimensioner  $y^*$  att testa i processmodellen. Den övergripande metodiken tillåter att fastställandet av dimensioner görs på olika sätt (manuellt, optimeringsalgoritmer) men i detta projekt har en lösning med

simuleringsmjukvarornas inbyggda regulatorblock nyttjats (Avsnitt 3.1.5 och Avsnitt 3.1.6).

De *dimensionerande scenarierna* (Avsnitt 3.1.7) beskriver de externa påfrestningar för vilka processen skall klara att uppfylla bivillkoren. Det mest grundläggande dimensionerande scenariot är det s.k. *referensscenariot*. Detta inkluderar data som med säkerhet skall ingå i dimensioneringen. I traditionell dimensioneringsmetodik är dessa en del av de s.k. *dimensionerande förutsättningarna*, d.v.s. klart utskrivna processkrav som dimensionerande flöden, koncentration och temperatur.

När dynamiska processtörningar och/eller statistiska osäkerheter adderas till referensscenariot skapas ytterligare dimensionerande scenarier. Genom att jämföra de nödvändiga dimensioner som krävs för att hantera dessa scenarier ( $y_i$ ) med de som resulterar från referensscenariot ( $y_{ref}$ ) fås ett mått ( $y_i/y_{ref}$ ) på vilken *säkerhetsmarginal* som krävs för varje individuellt dimensionerande scenario. Detta används som underlag då de slutliga dimensionerna fastställs. Ett exempel på detta ges i Avsnitt 3.1.8.

### 3.1.3 Processmodell

I ett första steg implementeras den processkonfiguration som skall dimensioneras i någon av flera kommersiellt tillgängliga simuleringsmjukvaror. Med dessa kan de flesta vanligt förekommande reningsprocesserna simuleras såsom sedimentering, biologisk kväverening och kemisk avskiljning av fosfor.

Modellparameternas grundvärden kan behöva justeras om det finns information som motiverar det, exempelvis från mätningar av befintlig process. Vid dimensionering är det dock nästan alltid en ny och framtida process som studeras och därför finns det en begränsad mängd användbara historiska data. Mätningar och modellparametrar som är relaterade till det inkommande vattnet *antas* ibland vara karakteristisk för reningsverkets avrinningsområde och dimensionering kan göras under förutsättningen att denna kommer förbli relativt oförändrad vilket kan motivera att modellparametrar justeras efter historiska mätdata. Generellt kan sägas att det är projektspecifikt när det är befogat att ändra på modellens grundinställningar.

### 3.1.4 Bivillkor

Som tidigare nämnts så är syftet med en dimensionering att uppfylla ett antal krav eller bivillkor på ett så bra sätt som möjligt. Utmaningen är förstås att dessa bivillkor kan vara motstridiga och därför behöver balanseras mot varandra. I följande stycken beskrivs de viktigaste bivillkoren som behöver hanteras inom metodiken.

#### 3.1.4.1 Utsläppskrav

Utsläppskraven styr vilka koncentrationer i utgående vatten som behöver upprätthållas. Utsläppskrav är generellt, och i Sverige i synnerhet, ofta formulerade som medelvärden under en längre tid (ofta flödesviktade årsmedelvärden).

Vissa anläggningar använder sig även av så kallade produktionsmål för utgående koncentrationer som är lägre än själva villkoret, för att ha en extra säkerhetsmarginal till utsläppsvillkoret. I projektet har det framkommit att utsläppskrav snarare än produktionsmål skall ingå som grundläggande bivillkor vid modellbaserad dimensionering. Idag är produktionsmål ett otransparent sätt att införa säkerhetsmarginal i processen medan det med modellbaserad dimensionering går att

få ett mått på vilka produktionsmål som kan förväntas. Produktionsmålen blir de koncentrationer som simuleras med referensscenariot men med de slutligt valda dimensionerna (som har resiliens mot valda störningar).

### 3.1.4.2 Processvillkor

Processbivillkor inkluderar krav på hur processen skall och får styras. Dessa kan vara externa skarpa villkor som är omöjliga att påverka eller interna som är mer eller mindre flexibla att variera under dimensioneringens fortskridande.

Ett exempel på ett externt processkrav är den maximalt tillåtna slamhalten i membrantanken i en MBR-process (*eng.* membrane bioreactor). Detta kan ställas av leverantören och vara en förutsättning för att processgarantin skall gälla. Ett annat exempel är att dimensioneringen skall göras inom vissa bestämda volymer (vanligen befintliga volymer).

Interna processkrav kan vara önskemål från beställaren såsom att man inte önskar ha allt för avancerad styrning, t. ex. endast syrerreglering utan ammoniumåterkoppling.

Andra exempel på interna processkrav är diverse förenklingar som görs för att begränsa antalet frihetsgrader i dimensioneringen. Ett exempel är att vid dimensioneringen bestämma sig för att recirkulationsströmmar styrs proportionellt mot inkommande flöde. Detta innebär inte nödvändigtvis att den slutliga processen måste styras på detta sätt men att en förenkling görs under dimensioneringen. I detta fall ökar kravet på processkompetens hos den som gör förenklingen.

I visionen (Avsnitt 3.1.1) framgår att den bästa möjliga kunskapen skall användas vid dimensioneringen (okontroversiellt!) men också att denna finns inbyggd i processmodellen. I realiteten är detta en sanning med modifikation. Modellerna kan inte beskriva alla delar i processen med hög noggrannhet. Därför behövs bivillkor som korrigerar för processmodellens svagheter. Även om det inte är önskvärt enligt visionen är det då fullt möjligt att lägga till subjektivt valda bivillkor så länge de redovisas på ett transparent sätt. Två exempel är:

- Erfarenhet visar att drift av en mellansedimentering över en viss belastningsgräns X ökar risken för slamflykt och driftproblem signifikant. Det är då inte nödvändigt att modellera och kvantifiera problematiken utan gränsen X kan anges som bivillkor. Detta gjordes i (Lindblom & Samuelsson, 2023) där maximalt tillåtet inkommande flöde vid en viss slamhalt sattes som bivillkor.
- Den modell för hydrolys av slam som är implementerad i de flesta kommersiella reningsverkssimulatorerna är förenklad och modellens parametervärden har (bl.a.) därför visat sig variera mycket från verk till verk. Vid dimensioneringen av en fördenitrifikationsvolym kan det då införas ett erfarenhetsbaserat realistiskt villkor för hur mycket kväve som bedöms som realistiskt att fördenitrifiera, se (manuskriptreferens – 2).

Här blir det tydligt att den föreslagna metodiken på inget sätt gör den erfarna processingenjören/konsulten överflödigt och ersatt av modellen. I båda dessa exempel, oavsett hur begränsningen görs, krävs erfarenhet och hög teknisk kompetens både från verklig drift och modellering.

### 3.1.4.3 Hållbarhetskriterier

I kategorin Hållbarhetskriterier listas bivillkor av optimeringskaraktär. De är snarlika de krav som ställs på processstyrningen. Skillnaden är att de baseras på ett önskemål om processen och kan ofta vara kopplade mot parametrar såsom energianvändning (kWh) eller insatsmedels koldioxidavtryck (CO<sub>2</sub>-ekv).

Som exempel kan nämnas en utmaning då både en för- och en efterdenitrifikationsvolym skall dimensioneras. Givet en viss karaktär på inkommande vatten kan dessa göras olika stora beroende på hur mycket extern kolkälla som doseras. Ett hållbarhetskriterium kan då vara att beställaren eller konsulten inför en maximalt tillåten mängd extern kolkälla som införs som begränsning under dimensioneringen. Ett alternativt kriterium är att "minimera mängden extern kolkälla".

För hållbarhetskriterier är det extra viktigt med motivering eftersom det ofta sker på bekostnad av något annat bivillkor eller kriterium. I fallen ovan kan det vara en önskan om att minska reningsverkets klimatpåverkan (minimera extern kolkälla och energieffektiv luftning).

### 3.1.5 Implementering av bivillkor i modellen

Enligt metodiken (Figur 1) är en dimensionering för ett visst dimensionerande scenario klar först när alla bivillkor är uppfyllda. Därför är det praktiskt att implementera modellen så att bivillkoren i så hög grad som möjligt kan uppnås automatiskt. Målet skall vara att minimera behovet av manuell iterering så att det blir smidigt att bestämma nödvändiga dimensioner för ett stort antal scenarier.

Det går inte att säga generellt *hur* bivillkor implementeras då detta beror på hur de är formulerade. Det går dock att skilja på bivillkor som kan anges som direkt *indata* till modellen, t.ex. maximalt tillåtet flöde till biosteget och bivillkor som bedöms utifrån modellens *utdata*. Ett sådant bivillkor kan t.ex. vara att slamhalten i processen skall vara 3 000 mg/l. Detta värde kan inte anges som indata till processmodellen utan processen behöver justeras så att den modellerade slamhalten blir det önskade värdet. Det gäller då att välja vilka variabler som skall justeras för att värdet skall uppnås och sedan göra justeringen. Detta kan ske manuellt, med en optimeringsalgoritm eller genom att utnyttja de regulatorer som finns tillgängliga i de kommersiella simuleringsmjukvarorna (se exempel i Avsnitt 3.1.6.1). I detta projekt har vi använt metoden med regulatorer. En fördel med denna metod är att det arbete som behövs för att utveckla regulatorerna för bivillkor till stor del kan återanvändas i modellens vidare livscykel (alltså även efter att dimensioneringsfasen klar).

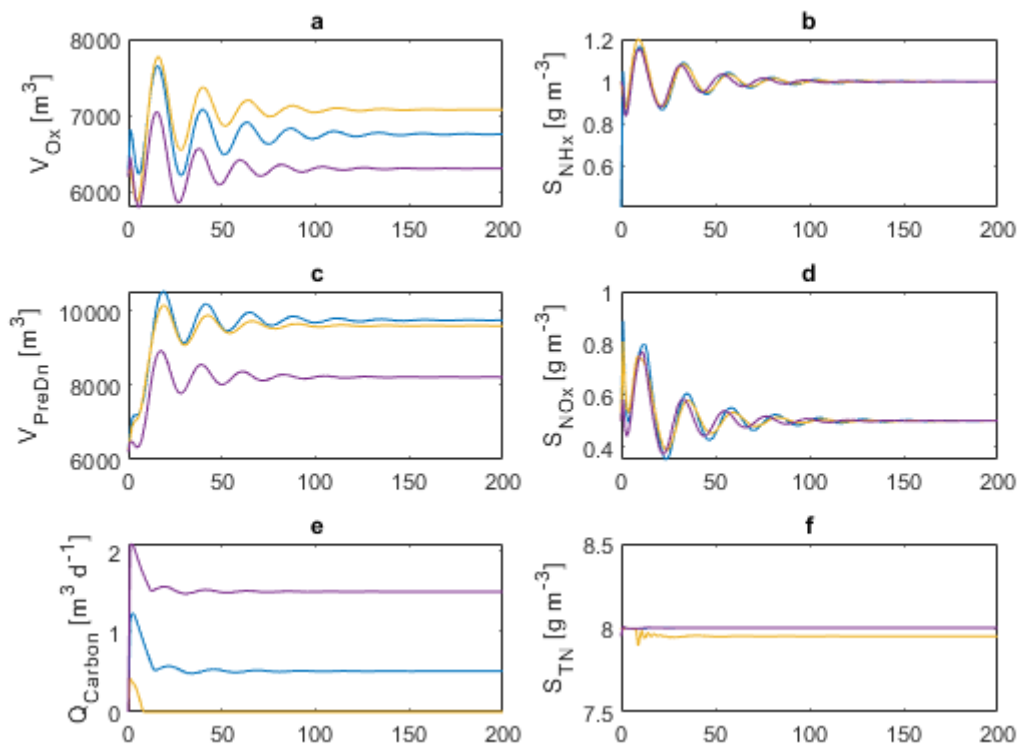
### 3.1.6 Val av dimensioner

När en processmodell används för att verifiera en dimensionering simuleras modellen med värden på volymer och det kontrolleras att reningskravet uppnås. När, som i detta projekt, modellen används för att dimensionera ökar komplexiteten. Det räcker då inte att konstatera att dimensionerna är tillräckliga utan *precis* de dimensioner som krävs, för att de önskade reningsresultaten skall uppnås, behöver bestämmas. Justeringen av dimensioner kan göras automatiskt med en optimeringsalgoritm eller manuellt genom "trial and error". I detta projekt har vi testat ett nytt sätt att automatiskt iterera fram optimala dimensioner vilket beskrivs nedan.

### 3.1.6.1 Dimensionering med PI-regulatorer

Metoden bygger på att PI-regulatorer (proportionell och integrerande regulator) används för att bestämma de nödvändiga dimensionerade storheterna. PI-regulatorn är standardregulatorn inom all processindustri. I korthet så fungerar regleringen genom att styrsignalen justeras för att mätvärdet skall uppnå ett önskat börvärde. Vid en dimensionering så väljs den dimensionerande storheten till styrsignal (exempelvis processvolymen) och ett relaterat bivillkor till mätsignal med ett börvärde motsvarande dimensioneringskravet (exempelvis utsläppshalten).

Figur 2 illustrerar ett exempel där volymer för nitrifikation (Figur 2a), fördenitrifikation (Figur 2c) samt doseringsflöde av extern kolkälla (Figur 2e) till en, i detta fall, given volym för efterdenitrifikation, dimensioneras för tre olika scenarier. Dessa är identiska förutom att den dimensionerande COD-halten ändras med  $\pm 10\%$  jämfört med referensscenariot. Detta gör att BOD<sub>5</sub>-halten in till biosteget blir 114 mg/l (blå linje – referensscenariot), 125 mg/l (gul linje) och 102 mg/l (lila linje).



Figur 2 Exempel på dimensionering med hjälp av PI-regulatorer. Blå linje – referensscenariot, gul linje – hög organisk belastning, lila linje – låg organisk belastning. X-axeln visar tid i dagar. a) Luftad volym, b) ammoniumhalt, c) volym för fördenitrifikation, d) nitrat halt, e) kolkälledosering, f) totalkvävehalt.

De tre dimensionerande storheterna till vänster i figuren regleras och svänger in till konstanta värden efter en längre tid. I detta fall har modellen simulerats i 200 dagar vilket är enheten på x-axeln. Panelerna till höger i figuren (Figur 2b,d,f) visar några av de bivillkor som används i dimensioneringen. Notera att det är slutvärdena i simuleringarna (vid  $t = 200\ d$ ) då bivillkoren är uppfyllda som är av intresse.

(Nästan) fullständig nitrifikation erhålls genom att den aeroba volymen ( $V_{Ox}$ , Figur 2a) regleras så att koncentrationen av ammoniumkväve i volymen ( $S_{NHx}$ , Figur 2b) blir 1 mg/l (bivillkor process). Den nödvändiga volymen är i intervallet 6 300 – 7 100 m<sup>3</sup> med större volymbehov när den organiska belastningen är hög.

Fördenitrifikationsvolymen ( $V_{PreDn}$ , Figur 2c) regleras så att koncentrationen av nitratkväve ( $S_{NOx}$ , Figur 2d) blir 0,5 mg/l i den reglerade volymen (bivillkor). I scenariot med låg organisk belastning (lila linje) krävs en lägre volym (8 100 m<sup>3</sup>) vilket beror på ett bivillkor (bivillkor process, Avsnitt 3.1.4.2) som begränsar hur mycket kväve som kan fördenitrifieras, givet den organiska belastningen. Volymen blir alltså lägre men samtidigt måste mer kväve efterdenitrifieras.

Nödvändig mängd efterdenitrifierat kväve och doseringsflöde av extern kolkälla ( $Q_{Carbon}$ , Figur 2e) regleras så att utgående koncentration av totalkväve ( $S_{TN}$ , Figur 2f) blir 8 mg/l (bivillkor utsläppskrav). Endast för det scenario som har högst organisk belastning klarar den studerade konfigurationen att nå utsläppskravet utan extern kolkälla.

I exemplet som använts för att generera resultaten i Figur 2 ingår vidare ett flertal dimensionerande storheter och bivillkor som inte visas, t.ex.:

- De nödvändiga volymerna är kraftigt avhängig slamhalten vilken regleras till sitt maximalt tillåtna värde (bivillkor) av en separat PI-reglering av överskottsslamuttaget.
- Förutom dosering av extern kolkälla styrs nitratrecirkulationsgraden för att  $S_{TN}$  skall uppnås.
- Som bivillkor för returslamflödet används flödesproportionell styrning (100 % av inkommande flöde).
- Syrebörvärdet i luftade zoner är satt till 2 mg/l.
- En konstant dos av koagulant (järn) definieras för att ge en låg utgående koncentration av fosfor.

### 3.1.6.2 Dimensionering med konstanta och dynamiska indata

Metoden med PI-reglering av dimensionerande storheter har tillämpats för så kallade steady state-simuleringar. I en steady state-simulering drivs processmodellen med konstanta indata (flöde, koncentrationer och temperatur). Steady state-resultaten är slutvärdena av simuleringen som görs för en så lång tid att systemet är i jämvikt och utdata är konstanta.

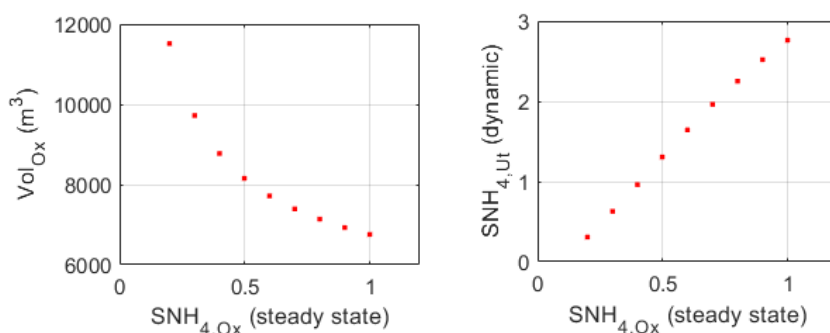
Det finns flera fördelar med steady-state-simulering:

- Enbart de sista värdena från simuleringen behöver sparas vilket rent tekniskt underlättar hantering av simuleringsresultat.
- Simuleringen går snabbare då den numeriska lösaren kan ta allt längre tidssteg i takt med att lösningen närmar sig konstanta värden.
- Dynamiska indataprofiler behöver inte definieras.
- Det är mycket enklare att trimma in regulatorer som används i modellen när indata inte är dynamiska.

En nackdel med steady state-simulering är att det inte är självklart hur resultaten skall tolkas och användas eftersom ett kommunalt reningsverk i verkligheten aldrig tar



emot ett avloppsvatten med konstanta koncentrationer och flöde. Resultat från projektet visar tydligt att dimensioneringsresultat baserat på steady-state-simuleringar avviker från de som fås från dynamiska simuleringar. Ett exempel på detta visas i Figur 3.



Figur 3 Vänster: Dimensionerad aerob volym vid olika börvärden på NH<sub>4</sub>-N i reaktorn. Höger: Utgående medelkoncentration av NH<sub>4</sub>-N vid dynamisk simulering och jämfört med bör värdena på NH<sub>4</sub>-N i reaktorn. Enheten på alla koncentrationer är g N m<sup>-3</sup>.

I figuren till vänster visas på y-axeln vilken aerob volym som krävs för att uppnå olika koncentrationer av ammonium (x-axeln) i volymen med konstanta indata. Till höger visas vilka (flödesviktade) utgående ammoniumkoncentrationer (y-axeln) som uppnås med samma volymer vid dynamisk simulering. I dimensioneringsexemplet i Figur 2 användes ett börvärde för NH<sub>4</sub>-N på 1 mg/l vilket kräver en volym på 6 800 m<sup>3</sup>. När denna volym simuleras med dynamiska indata fås dock en mycket högre medelkoncentration av NH<sub>4</sub>-N (2,8 mg/l). Om bivillkoret för ammonium är en utgående koncentration på 1 mg/l krävs att börvärdet vid steady state minskas till 0,4 mg/l vid simulering med konstant belastning vilket ger en volym 8 800 m<sup>3</sup>.

I praktiken kan i nuläget metodiken med PI-regulatorer användas för att ta fram en dimensionering där bivillkoren uppfylls med konstanta indata. Om bivillkoren sedan inte uppfylls vid dynamisk simulering (som i Figur 3) behöver dimensioneringen uppdateras. Detta kan göras manuellt och/eller genom att justera börvärdena för steady state-dimensioneringen automatiskt.

### 3.1.7 Dimensionerande scenarier

Den modellbaserade dimensioneringsmetodiken bygger på att simulering av diverse händelser används för att härleda dimensioner och kvantifiera vad den dimensionerade processen klarar. Händelserna introduceras i metodiken som olika kombinationer av indata vilka kallas för *dimensionerande scenarier*. Indata kategoriseras i följande tre grupper

- inkommande vatten (flöde, koncentrationer och temperatur)
- värden på modellparametrar (utbyteskoefficienter, reaktionshastigheter)
- driftparametrar (maximal kapacitet för pumpar, mätfel i sensorer).

Enligt den övergripande metodiken (Figur 1) är det grundläggande dimensionerande scenariot det s.k. referensscenariot (Avsnitt 3.1.7.1). Genom att addera dynamiska processtörningar (Avsnitt 3.1.7.2) och/eller statistiska osäkerheter (Avsnitt 3.1.7.3) till

referensscenariot kan ett oändligt antal dimensionerande scenarier skapas. I Avsnitt 3.3 ges rekommendationer på vilka scenarier som alltid bör beaktas vid modellbaserad dimensionering av reningsverk.

### 3.1.7.1 Referensscenario

Ett syfte med att införa de olika scenarierna i metodiken är att det blir möjligt att mäta vilken påverkan olika osäkerheter och processtörningar har på det som dimensioneras. För detta krävs ett *referensscenario* vilket bör utformas så att det innehåller indata som med säkerhet skall ingå som dimensionerande scenario. Eftersom bivillkor ofta ges som medelvärden över en lång tidsperiod (t.ex. utsläppskrav, krav på kemikalieförbrukning) är det lämpligt att i referensscenariot simulera fenomen som kan kategoriseras som "normal drift", d.v.s. driftförhållanden som är representativa för en stor del av drifttiden. Det inkluderar därför delar av de dimensionerande förutsättningarna

- inkommande belastning av organiskt material, kväve och fosfor
- ytterligare specifikation av inkommande vatten om sådan är angiven
- torrvädersflöde
- medeltemperatur.

Som diskuterats i Avsnitt 3.1.6.2 är det viktigt att dimensioneringen i slutändan görs med dynamiska indata och detta gäller även referensscenariot. Det finns flera möjliga sätt att ta fram representativa tidsserier med flöden och koncentration under torrvädersförhållanden som antingen baseras på historiska data eller på s.k. inflödesgeneratorer. Om de använda profilerna bedöms ha en stor påverkan på dimensioneringsresultaten kan dessa varieras som en driftstörning eller osäkerhet i dimensioneringen, se nedan.

### 3.1.7.2 Processtörningar

Störningar i processen inkluderas genom avvikelser från referensscenariot som sker under en begränsad tid. Dessa kan vara relaterade till förändringar i inkommande vatten, tillfälliga förändringar av värden på modellparametrar eller till driftstörningar inne på reningsverket.

Processtörningar som är angivna som dimensionerande förutsättningar har högsta prioritet och måste tas hänsyn till i dimensioneringsarbetet. Två typiska exempel på sådana är *låg temperatur* och *högt/lågt flöde*. Ibland ingår krav på redundans som dimensionerande förutsättning t.ex. krav på att reningsverket skall fungera med en linje tagen ur drift (det s.k. N-1-fallet). Detta är också en processtörning som då behöver ingå i de dimensionerande scenarierna.

*Hur* denna typ av störningar formuleras som scenario beror på den typ av process som dimensioneras och bivillkoren. Om det till exempel är tydligt uttryckt att processen skall klara kväverenkingskravet vid en viss minimum-temperatur kan referensscenariot enkelt uppdateras med det lägre temperaturvärdet och volymerna uppdateras. Ett mer realistiskt bivillkor är att högre utgående koncentrationer accepteras periodvis (så länge årsmedelvärdet kan hållas) men att processen är resilient mot störningen, d.v.s. att den kan återhämta sig när störningen upphör.

### 3.1.7.3 Osäkerheter

I kategorin osäkerheter inkluderas avvikelser från referensscenariot som främst relaterar till inkommande vatten och till modellosäkerhet.

Analys av osäkerheter i inkommande vatten bör fokusera på de variabler som inte är angivna som dimensionerande förutsättningar. Ett vanligt exempel är att endast BOD anges som värde på den dimensionerande belastningen av organiskt material. Detta värde ger endast en indikation på vad vattnet innehåller. I processmodellen (och i verkligheten) finns ett oändligt antal tänkbara "recept" på inkommande avloppsvatten som alla motsvarar det angivna BOD-värdet. Denna rymd av tänkbara sammansättningar på avloppsvattnet kan avgränsas genom litteraturstudier (realistiska intervall), genom mätkampanjer och genom modellkalibrering. Det är dock ett faktum att osäkerhet kommer att kvarstå vilket behöver beskrivas som scenarier under dimensioneringen.

Simuleringsmodeller för reningsverk inkluderar förenklade beskrivningar av de komplexa verkliga skeendena och även modellosäkerhet behöver därför hanteras i metodiken. Ett sätt att analysera effekten av modellosäkerhet på dimensioneringsresultaten är att variera värden på modellparametrar i de dimensionerande scenarierna. Ett annat sätt är att införa begränsningar genom bivillkor vilket diskuterats tidigare (Avsnitt 3.1.4.2).

### 3.1.8 Exempel på resultat från metoden

I Tabell 1 visas ett exempel hur resultat från den föreslagna metodiken kan se ut i praktiken. I detta fall har nitrifikations- och fördenitrifikationsvolymen ( $V_{Ox}$  resp.  $V_{PreDn}$ ) i en MBR-process med möjlighet till efterdenitrifikation dimensionerats för temperaturen 16 °C.

Tabell 1. Exempel på resultat från modellbaserad dimensionering av en MBR-process.

Scenarier, 16 °C		$V_{Ox}$		$V_{PreDn}$		$Q_{carbon}$
Id	Beskrivning	$m^3$	$y_i/y_{ref}$	$m^3$	$y_i/y_{ref}$	$m^3/d$
0	Referens	5 400	-	9 300	-	0.00
U1	Högre N-belastning, 10%	6 200	1.15	14 400	1.55	0.60
U1_D1	U1+reducerad pumpkapacitet	7 130	1.32	14 400	1.55	0.60
U1_D2	U1+1 av 7 linjer ur drift	7 230	1.34	14 400	1.55	0.75

#### 3.1.8.1 Metodik och resultat

I denna förenklade dimensionering ingick, förutom referensscenariot (*Scenario 0*), analys av en osäkerhet (*U1*) och två processtörningar (*D1* och *D2*) som kortfattat beskrivs som:

- *U1*: Ändrade levnadsvanor gör att kvävebelastningen ökar med 10 % jämfört med referensscenariot.
- *D1*: Kapaciteten i pumpstationen för returslam reduceras med 50 % under 14 dagar.
- *D2*: Endast 6/7 processlinjer är i drift en längre tid (2 månader).

*Scenario U1* innebär att inkommande kvävekoncentration ökas med 10 % i referensscenariot. Resultatet blir att fördenitrifikationsvolymen ( $V_{\text{PreDn}}$ ) behöver ökas med 55 % jämfört med referensscenariot för att mer kväve skall kunna denitrifieras med samma mängd inkommande BOD (mer svårnedbrytbart organiskt material behöver utnyttjas). Det blir också nödvändigt att dosera extern kolkälla till processen. Notera att ett alternativ till större fördenitrifikationsvolym hade varit att dosera mer extern kolkälla. För att detta ska vara aktuellt skulle ett bivillkor behövt justeras (det som i detta exempel säger att så mycket inkommande BOD som möjligt skall användas för denitrifikation). Även den luftade volymen ( $V_{\text{Ox}}$ ) behöver ökas givet osäkerheten i *U1*, dock inte lika mycket (15 %).

Scenariot innebär en stor avvikelse från referensscenariot och det behöver bestämmas om osäkerheten i kvävebelastning skall ingå som dimensionerande scenario. I detta exempel bestämdes att volymer skall dimensioneras för osäkerheten i kvävebelastning och driftstörningarna i *D1* och *D2* adderas därför till *Scenario U1* och ger två ytterligare dimensionerande scenarier *Scenario U1\_D1* och *Scenario U1\_D2*.

Med den reducerade kapaciteten i returslampumpningen (*Scenario U1\_D1*) under 14 dagar måste överskottslamuttaget ökas för att inte den maximala slamhalten (bivillkor) skall överskridas. Detta gör att slamhalten i biobassängerna minskar och att nitrifikationskapaciteten minskar. Bivillkoret för utgående ammoniumkoncentration är 1 mg/l och enligt modellen behöver den luftade volymen ökas med 32 % jämfört med referensscenariot. Fördenitrifikationsvolymen och doseringen av kolkälla behöver inte justeras för detta dimensionerande scenario.

Med en linje tagen ur drift ökar flödet och belastningen på processen med 17 % (*Scenario U1\_D2*). Den luftade volymen behöver i detta fall ökas med 34 % jämfört med referensscenariot. Fördenitrifikationsvolymen behöver inte justeras om det tillåts att mer extern kolkälla tillsätts under tiden för processtörningen.

### 3.1.8.2 Slutsatser och diskussion

Med den information som ges i Tabell 1 fås nu ett stöd i valet av volymer och säkerhetsfaktorer. Ett rimligt val enligt den modellbaserade dimensioneringsmetodiken kan vara att välja en säkerhetsfaktor på 34 % för luftad volym och 55 % för fördenitrifikationszonen. Med denna dimensionering klarar processen att hantera osäkerheten i framtida kvävebelastning i kombination med någon av de två processtörningarna. Dock är dimensioneringen inte gjord för att pumpstationen skall ha reducerad kapacitet samtidigt som en linje är ur drift (*Scenarie U1+ Scenarie D1+ Scenarie D2*).

Om den dimensionerade processen ( $V_{\text{Ox}} = 7\,230\text{ m}^3$ ;  $V_{\text{PreDn}} = 1\,440\text{ m}^3$ ) simuleras med referensscenariot (resultat visas ej) som indata kommer utgående koncentrationer sannolikt bli lägre än vad som anges i bivillkoren för utsläppskrav. Dessa lägre koncentrationer kan jämföras med de produktionsmål som anges som indata vid

traditionell dimensionering och är en uppskattning om vilka utgående koncentrationer som är möjliga att uppnå vid normal drift.

I exemplet adderades extra säkerhetsmarginal till den luftade volymen för att processen skulle få kapacitet att hantera de två studerade processtörningarna. I samband med detta identifierades två utmaningar som den modellbaserade dimensioneringsmetodikern behöver kunna hantera och som är viktiga att beakta vid den vidare metodutvecklingen.

Den första utmaningen är att utsläppskrav ofta är formulerade som medelvärden över lång tid (kvartals- eller årsmedelvärde). För processtörningen *D1*, som endast pågår i 14 d, är det då inte självklart hur ett bivillkor för nödvändig processprestanda skall ställas. I exemplet var bivillkoret att dygnsmedelvärdet av utgående ammoniumkväve inte fick överskrida 1 mg/l men i ett verkligt fall kanske detta är kan tillåtas så länge de ökade utsläppskoncentrationerna under störningen kan kompenseras av lägre koncentrationer under resten av perioden för medelvärdesbildning. Frågan är alltså om det går och i så fall hur processbivillkor kan ställas för tidsbegränsade processtörningar. Ett förslag på detta ges och diskuteras i Lindblom och Samuelsson (2024).

Den andra utmaningen handlar om vilken processtyrning som i realiteten kan förväntas på reningsverket och som då bör implementeras i processmodellen. I exemplet ovan hade det t.ex. varit möjligt att kompensera för processtörningarna genom processtyrning istället för ökade volymer. Om rätt teknisk utrustning är projekterad och installerad är det fullt möjligt att i verkligheten öka syrehalten (genom ökad luftning) om nitrifikationskapaciteten skulle minska. Om sådan styrning är ett önskemål för processen som skall dimensioneras är det viktigt att detta framkommer i ett tidigt skede så att styrningen kan implementeras i den modell som används för dimensioneringen; annars finns en risk att onödigt säkerhetsmarginal läggs till volymer och dimensioner.

---

### 3.2 Innovativ dataanalys av en dynamisk befolkning

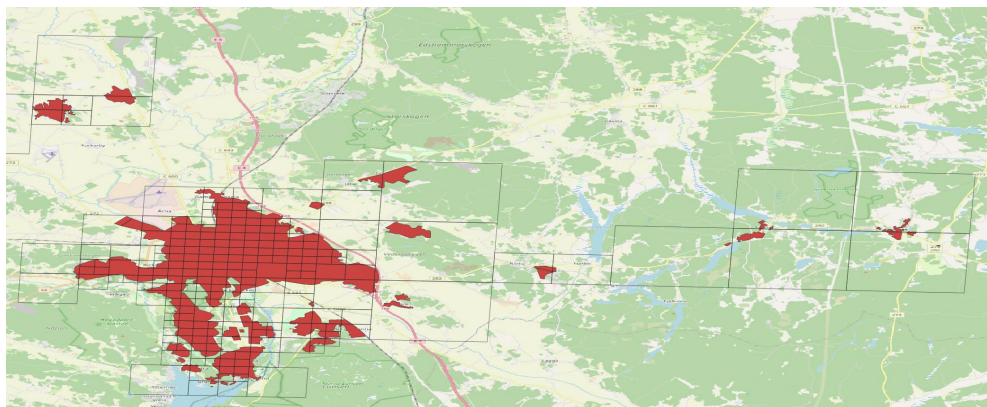
En grundläggande förutsättning för dimensionering är en god förståelse för den framtida belastningen. Belastningen delas typiskt upp i två delar, en del som produceras av befolkningen, och en basbelastning som inte påverkas av befolkningen (industrier och andra källor). Denna uppdelning är viktig för att en framtida belastning ska kunna beräknas. Den framtida belastning baseras nämligen på den nuvarande belastningen, fast där befolkningsandelen skalas upp med förväntad befolkningsutveckling. Genom att separera dessa två delar, blir det möjligt att exempelvis prediktera en ökande befolkning med en bibehållen industriell belastning.

En nyckelberäkning vid dimensionering är därför att normalisera nuvarande belastning, med antalet personer som producerat densamma för att få en s.k. personspecifik belastning. Idag nyttjas befolkningsstatistik från Statistiska centralbyrån (SCB) som beskriver antalet folkbokförda inom olika områden. Tyvärr ger denna statistik ingen information om hur stor andel av befolkningens som faktiskt befinner sig inom ett givet område, vid en given tidpunkt. Exempelvis så påverkar in-

och utpendling av både fastboende och tillresande befolkningen, som i sin tur påverkar belastningen till reningsverket. Eftersom det alltså saknas data på befolkningsvariationer så blir uppskattningen av den personspecifika belastningen osäker, vilket direkt återspeglas i dimensioneringen av det framtida reningsverkets kapacitet.

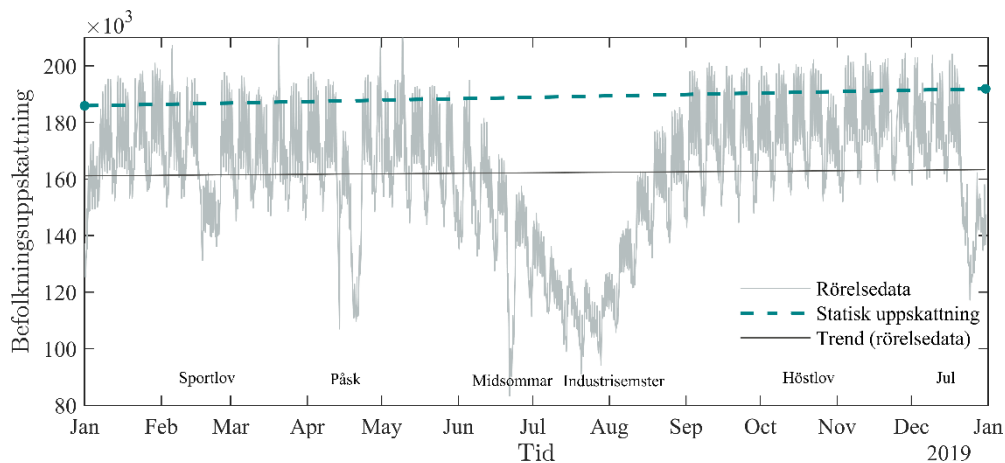
*Rörelsedata* är en ny datakälla som produceras utifrån den kommunikation som sker mellan mobiltelefon och mobilmast. Rörelsedata ger en uppskattning om hur många personer som befinner sig inom olika geografiska områden, även om det inte är möjligt att spåra individuella individer av anonymitetsskäl. En konsekvens av kravet på anonymitet är att de geografiska områdena behöver vara större i gleset befolkade områden, jämfört med tätortsnära områden.

I detta projekt kombinerades det geografiska området för rörelsedata med reningsverkets geografiska uppsamlingsområde, för att identifiera den yta som innehåller de personer som belastar reningsverket (Figur 4). När väl denna beskärning är gjord, ger rörelsedata en dynamisk och högupplöst information (ned till 20 minuter samplingstid) om befolkningsvariationer inom reningsverkets upptagningsområden.



Figur 4. Illustration över reningsverkets upptagningsområde (röda ytor) samt rutnät med högupplösta rörelsedata. Notera att rutorna med rörelsedata är större utanför stadskärnan där befolkningstätheten är som högst.

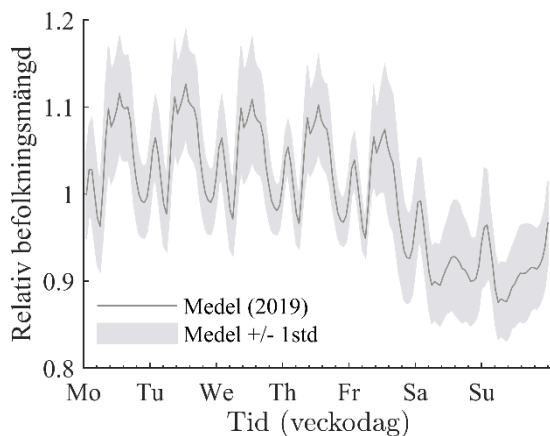
Skillnaden mellan en dynamisk befolkningsuppskattning från rörelsedata, och en statisk motsvarighet är tydlig (Figur 5). Rörelsedata indikerar en betydande befolkningsminskning under sommaren, storhelger och lov, samt en lägre medelbefolkning (cirka 25 000 färre jämfört än antalet folkbokförda). Dessa skillnader resulterar i sin tur i en 15 procent högre personspecifik belastning när belastningen normaliserats med rörelsedata, jämfört med den statistiska befolkningsuppskattningen (78 g/p, d respektive 68 g/p, d mätt som syreförbrukande material, BOD). En förklaring till skillnaden är att modellen för rörelsedata exkluderar personer under 5 år av den enkla anledningen att de inte nyttjar mobiltelefoner i samma utsträckning som resterande befolkning. En insikt utifrån detta är att denna åldersgrupp troligtvis inte heller belastar reningsverket i samma omfattning som övriga befolkning. Demografiska data är något som idag inte analyseras vid dimensionering, men som bör studeras vidare.



Figur 5. Skillnaden mellan två datakällor för befolkning inom reningsverkets uppsamlingsområde. Grön streckad linje visar den statistiska uppskattningen från SCB medan den grå linjen visar rörelsedata för motsvarande område.

Men befolkningsprognoser rör mer än enbart den totala framtida befolkningen. Variationen under året kan ha stor påverkan på vilken marginal som reningsverket behöver dimensioneras för. Exempelvis så kan skillnaden mellan lågbelastade veckodagar och storhelger vara kritiska belastningsfall att ta hänsyn till i populära turist- och semesterområden. På samma sätt kan betydande utpendlingen minska belastningstoppar och därmed den nödvändiga reningskapaciteten. Genom rörelsedata fås en bättre förståelse för drivkrafterna bakom befolkningsvariationerna, vilket kan bidra till bättre prediktioner om de framtida belastningsvariationerna.

Ett exempel som studerats inom projektet är hur rörelsedata kan användas för att skilja på belastningsvariationer från industrin, från belastning från befolkningsvariationer. Helgerna är den period då industribelastningen är som lägst, vilket gör att den personspecifika belastningen borde vara som mest representativ under denna period. Samtidigt visar rörelsedata en minskad befolkning under helgerna (Figur 6), vilket gör det extra viktigt att normalisera helgbelastningen med rätt antal personer.



Figur 6. Befolkningsvariation under en vecka där värdena normaliserats till en medelvecka.

Den analys av historiska belastningsdata som gjordes inom projektet styrker hypotesen att korrelationen mellan befolkningsvariation och mängden BOD är högre under just helgperioden jämfört med övriga veckodagar (korrelationskoefficienter 0,40 respektive 0,10, där 1,0 indikerar maximal korrelation). Den personspecifika belastningen (g BOD/p, d) verkar alltså uppskattas bäst utifrån helgbelastningen. Om vi dessutom förutsätter att den personspecifika belastningen inte förändras mellan helg- och andra veckodagar så innebär det att basbelastningen från industrin därefter kan uppskattas som resterande belastning under arbetsdagarna (ej helgdagar).

Nyttan med rörelsedata för dimensionering kan sammanfattas som att den nyttiggör de befintliga belastningsdata på så sätt att belastningsdata kan analyseras utifrån sin provtagningsfrekvens (dygn) och inte behöver analyseras i termer av årsmedelvärden. Detta har i sin tur lett till följande resultat och slutsatser:

- En dynamisk befolkningsuppskattning kan ha en betydande påverkan på den uppskattade personspecifika belastningen, och i förlängningen den dimensionerande kapaciteten på reningsverket.
- Belastning under helgen bör användas för att uppskatta den personspecifika belastningen av BOD.
- Avloppsvattnets sammansättning och den personspecifika belastningen har en tydlig korrelation som kan beskrivas som ett linjärt samband.

Mer detaljer och resultat om hur rörelsedata kan användas vid dimensionering beskrivs i (Samuelsson et al., 2024).

### 3.3 Transparent resiliens mot störningar

Säkerhetsfaktorer används vid dimensionering för att reningsprocessen ska ha marginal att kunna hantera störningar utöver normal drift. Ett vanligt exempel är risken för att ett toxiskt ämne ska följa med det inkommande avloppsvattnet och minska den biologiska aktivitet och reningskapaciteten i reningsverket. Ett annat exempel är att teknisk utrustning går sönder eller behöver underhållas, vilket då kräver att en del av reningsverket tillfälligt behöver stängas ned. Även under normal drift krävs extrakapacitet för att hantera stor flödes- och belastningsvariationer,



framför allt när dimensioneringen baseras på beräkningar med en statisk belastning. En vanlig strategi är att använda säkerhetsfaktorer som representerar olika maximala belastningsfall (*eng. peak factors*), som används för att skala upp kapaciteten i olika anläggningsdelar.

Denna metodik med säkerhetsfaktorer leder dock till två problem:

- 1) Mycket data och historisk erfarenhet krävs för att kunna generalisera vilka säkerhetsfaktorer som krävs för olika stora reningsverk. Detta gör att det blir svårt att dimensionera nya processer med gamla säkerhetsfaktorer och framför allt i de fall där reningskraven förändrats (vanligtvis till lägre utsläppskoncentration och för ett kortare tidsintervall).
- 2) Det krävs många säkerhetsfaktorer, som dessutom adderas i olika steg, vid dimensionering av ett helt reningsverk. Detta kan leda till en otydlighet i hur stor den totala extrakapaciteten är. Risken är stor att säkerhetsfaktorer oavsiktligt överlagras med en överkapacitet som konsekvens, som då inte kan nyttjas på ett bra sätt.

En modellbaserad dimensionering kan underlätta dessa svårigheter eftersom modellen inte har några säkerhetsfaktorer alls och därmed inte döljer någon överkapacitet. Det är även möjligt att simulera effekter av godtycklig dynamik, vilket då enbart kräver data om det specifika systemet som ska dimensioneras.

Men även modellbaserad dimensionering har sina begränsningar. Den anledning som nämns i litteraturen till att modeller inte tillämpas för dimensionering i praktiken är att en metodik för att addera säkerhetsfaktorer saknas. En viktig aktivitet i detta projekt har därför varit att förstå hur extrakapacitet kan adderas på ett systematiskt sätt - med en bibehållen transparens. Den metodik som beskrevs i avsnitt 3.1 nyttjar olika scenarier för att säkerställa att lagom säkerhetsmarginal tillämpas, där valfria reningskrav och belastningsfall kan simuleras.

*Den anledning som nämns i litteraturen till att modeller inte tillämpas för dimensionering i praktiken är att en metodik för att addera säkerhetsfaktorer saknas.*

En följd effekt av den stora flexibiliteten med att kunna simulera valfria scenarier är dock att det inte är uppenbart *vilka* scenarier som behöver simuleras. Det blir alltså en praktisk utmaning i att göra ett urval av vilka störningar och dynamiska belastningsfall som dimensioneringen ska inkludera. Många beslut vid dimensionering är dessutom subjektiva och påverkas av hur mycket säkerhetsmarginal som beställaren vill investera in direkt i anläggningen, alternativt hantera med utökade driftkostnader. Även särskilda prioriteringar av exempelvis energianvändning, resurseffektivitet eller enkel drift har stor påverkan på dimensioneringen och som enbart kan bestämmas av anläggningsägaren. En modellbaserad dimensionering behöver alltså balansera behovet av subjektiva beslut med standardiserade simuleringsscenarioer. I projektet har vi därför genomfört två workshoppar med anläggningsägare, konsulter och forskare för att identifiera vilka typscenarier som alltid bör ingå i en modellbaserad dimensionering. Detta för att standardisera och underlätta

dimensioneringsförfarandet, utan att för den skull begränsa konsult eller beställare från att göra platsspecifika anpassningar.

Båda workshopparna genomfördes på samma sätt där deltagarna fick identifiera de driftfall och scenarier som de ansåg vara kritiska för ett välfungerande reningsverk och som dimensioneringen därför behöver ta hänsyn till. Själva workshoparbetet genomfördes på traditionellt vis med post-IT lappar och blädderblock i smågrupper, som slutligen grupperades utifrån gemensamma kategorier. Workshopdeltagarna hade olika yrkesroller såsom processingenjörer, forskare, konsulter och chefer med VA-kompetens. Workshop 1 (nationell grupp) genomfördes i Uppsala under forsknings- och innovationskonferensen över VA-klustrens gränser med cirka 25 workshopdeltagare. Workshop 2 (internationell grupp) genomfördes på konferensen Water Resource Recovery Modelling Seminar (WRRmod) vid University of Notre Dame, South Bend, USA med knappt 20 workshopdeltagare. På workshop 2 var majoriteten av deltagarna från Nordamerika, men även från Europa, till skillnad från workshop 1 som enbart bestod av svenska deltagare. Workshopparnas utfall sammanställs i Tabell 2, där de tre högst prioriterade driftfallen redovisas i turordning, medan resterande driftfall redovisas utan inbördes prioritering.

Tabell 2. Sammanfattning av workshop 1 och 2 och prioriterade driftfall att simulera vid modellbaserad dimensionering.

Prioritet	Nationell grupp	Internationell grupp
1	Dimensionering för tillräcklig resiliens under reningsverkets livstid (hantera en succesivt ökande belastning)	Driftsstörningar (maskinella och processrelaterade)
2	Osäkerheter i belastningsdata och prognoser (temperatur, flöde, inläckage, belastning och utsläppskrav)	Väderberoende belastningsvariationer (flöde och temperatur)
3	Optimerad processdesign (miljönytta, kostnad drift/investering, känslighetsanalys av förändrade driftkostnader)	Normala belastningsvariationer (toppbelastning och nuvarande belastning)
Driftsstörningar	Driftsstörningar (maskinella, processrelaterade, elavbrott, sabotage)	
Hållbar drift		Drift och underhållskostnader (energi och kemikalier)
Osäker framtid	Kemikaliebrist, extremväder, industribelastning	Befolkning, utsläppskrav
Modellosäkerheter	Parametervärden (sedimentering och nya processer), propagering av worst case-modell	Karakterisering av inkommande avloppsvattens sammansättning

Båda grupperna var överens om att osäkerheter kopplat till belastningsvariationer och väder är viktigt att ta höjd för vid dimensionering (prioritet 2 och 3). Just flödesvariationer är den faktorn som det finns flest standardiserade begrepp för i traditionella dimensioneringsriktlinjer. Vedertagna begrepp såsom  $Q_{max}$ ,  $Q_{dim}$  och  $Q_{max,dim}$  indikerar deras betydelse vid dimensionering av olika driftfall. Motsvarande begrepp kan behöva utvecklas eller anpassas till modellbaserad dimensionering.

Även driftstörningar rankades högt i både den nationella och internationella workshopen. Driftstörningar ingår till viss del i dimensioneringsriktlinjer, exempelvis genom krav på viss redundans i antalet process- eller sedimenteringsbassänger. Det är dock troligt att de olika anläggningsägarna har vitt skilda krav och behov vad gäller just redundans utifrån underhållsstrategi och organisation och att detta behöver anpassas till de specifika förutsättningarna. Underhållsnivån påverkar troligtvis även sannolikheten för att olika maskinella driftstörningar sker, vilket kan vara svårt att kvantifiera även om det är rättfram att simulera konsekvenserna av en sådana driftstörningar.

Det scenario som den nationella gruppen rankade som viktigast saknas intressant nog i dagens dimensioneringsriktlinjer, nämligen att utvärdera hur den färdiga dimensioneringen hanterar befintlig belastning. Detta scenario undersöker om den sammanlagda effekten av alla säkerhetsmarginaler försämrar driften under de initiala åren då belastningen är som lägst (i förhållande till den dimensionerande belastningen). Det är också intressant att den nationella gruppen rankar "Optimerad processdesign" som tredje viktigaste driftfallet, eftersom även detta saknas i dagens dimensioneringsriktlinjer (som primärt fokuserar på att säkerställa en tillräcklig reningsfunktion). Även om det är väl optimistiskt att tro att modellbaserad dimensionering direkt leder till en optimerad anläggning så finns goda förutsättningar att balansera processkonfiguration mot exempelvis kemikalieförbrukning redan under dimensioneringsförfarandet.

Utifrån resultaten i Tabell 3 och diskussioner under workshopparna så har vi slutligen sammanställt en lista med basscenarier vilka representerar de driftfall som alltid bör ingå i en dimensionering. Denna diskuteras vidare i Lindblom och Samuelsson (2024).

Tabell 3: Sammanställning över föreslagna basscenarier för att bestämma säkerhetsmarginal vid dimensionering

Scenario	Flöde	Belastning	Syfte
Biologisk kapacitet	Torrväder	Maxbelastning	Säkerhetsfaktor för processvolymen
Hydraulisk kapacitet	Maxflöde	Normalbelastning	Maximal flödeskapacitet
Hållbarhet	Torrväder	Normalbelastning	Utvärdera resursförbrukning vid normal drift och reglering
Driftsäkerhet	-	-	Utvärdera resiliens mot störningar vid olika flödes- och belastningsfall med begränsad kapacitet
Belastningsspann (nutid – framtid)	Torrväder	Normalbelastning vid olika tidpunkter såsom nuvarande och dimensionerande år	Säkerställa reningsfunktion vid låg och hög belastning

## 4 Fallstudier

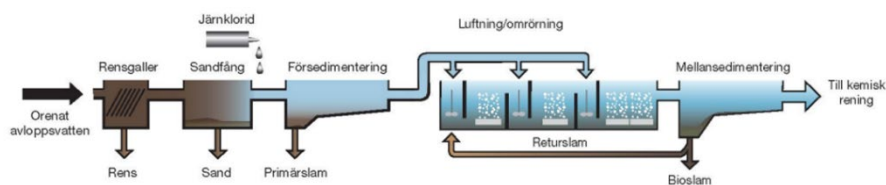
Under framtagandet av metodiken i Kapitel 3, arbetade *branschföregångarna* med varsitt modelleringsfall. Dessa olika fallstudier, tagna direkt från verksamheten, gav värdefull input till den av projektet framtagna dimensioneringsmetodiken. Fallstudierna omsätter de delar av metodiken som var praktiskt relevant för de olika verksamheterna. Detta innebär att de skiljer sig åt vad gäller dimensioneringstillämpning. I vissa fall har simuleringar genomförts för att få ett bättre beslutsunderlag för framtida dimensioneringar, medan andra fallstudier genomför en direkt dimensionering. Oavsett tillämpning så ger fallstudierna en inblick i hur modeller kan nyttjas som stöd i verksamheten, och av verksamheten. Ambitionsnivån har varit att presentera de olika fallstudierna på ett likartat sätt för att underlätta för läsaren med följande gemensamma innehåll:

- Beskrivning av det så kallade referensscenariot (se avsnitt 3.1.7.1) som innehåller en beskrivning av den simulerade processen och dess indata.
- En konceptuell figur av typen blockschema som visualiserar den simulerade processen.
- En tabell med dimensionerande data (i de fall det är tillämpligt).
- En beskrivning av de scenarier som simulerades för att undersöka hur osäkerheter eller störningar påverkar processen. Insikterna från dessa simuleringar användes sedan för att dimensionera eller få en bättre förståelse för hur framtida dimensioneringar bör ske.

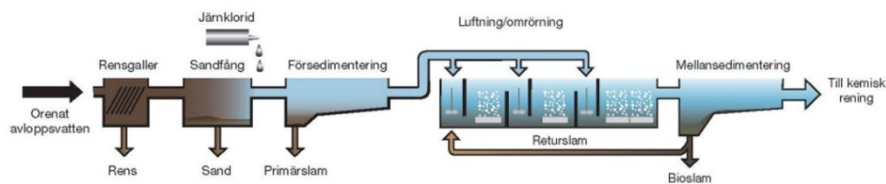
Varje fallstudie avslutas med en kort sammanfattning av de insikter och praktiska resultat som simuleringarna gett.

### 4.1 Fallstudie 1 – Kungsängsverket i Uppsala

I denna fallstudie har Kungsängsverkets bioblock C (C-blocket) modellerats. Modellen, som består av förfällning, försedimentering, aktivslam-bassäng i tre kaskader med fördenitrifikation samt mellansedimentering. Denna modell har använts för att simulera och dimensionera framtida dosering av kolkälla, vilket är en viktig delkomponent för att dimensionera den framtida reningsprocessen. En schematisk bild över C-blocket som det ser ut idag illustreras i



Figur 7. Mer detaljer gällande denna fallstudie finns dokumenterad som en intern rapport hos UVAB (Resultat – Modellering av C-blocket i SUMO, UVA-2022-00878-1).



Figur 7. Schematisk bild över bioblock-C på Kungsängsverket i Uppsala.

Den dimensionerande data som har använts ges i Tabell 4.

Tabell 4: Dimensionerande data för Case 2 - Kungsängsverket i Uppsala

Parameter	Värde	Enhet
Inkommande flöde	29 000	m <sup>3</sup> /d
Inkommande temperatur	15	°C
Inkommande COD	20 000	kg COD/d
Inkommande totalkväve	1730	kg N/d
Inkommande totalfosfor	820	kg P/d

*Modellen har använts för att simulera och dimensionera framtida dosering av kolkälla.*

I denna fallstudie finns ett referensscenario (scenario 0) i vilken ingen kolkälla doserats, detta för att kunna jämföra övriga scenarier med dagens utformning av C-blocket. Vidare finns fyra scenarier relaterade till osäkerheter:

- Scenario U1 innebär att inkommande kvävebelastning ökas med 10 %. Det är intressant att simulera eftersom inkommande kvävebelastning kan komma att öka i framtiden men det finns också risk att kvävebelastningen är felkattad i referensscenariot.
- Scenario U2 innebär att inkommande COD-belastning är 15 % lägre jämfört med referensscenariot. Detta för att ta höjd för att en närliggande industri kanske lägger ner eller för att inkommande COD-halt skulle kunna vara felkattad alternativt ändras i framtiden.
- I scenario U3 är RAS-flödet 33 % lägre än referensscenariot (minskat med en tredjedel) för att säkerställa att utsläppskraven nås även om sedimenteringsegenskaperna försämras.
- Scenario U4 innebär att COD-innehållet i kolkällan är 20 % lägre för att simulera ett fall där COD-innehållet i kolkällan skulle vara lägre i framtiden. Målet är att komma ner till utgående totalkvävehalter på antingen 8 mg/l eller 6 mg/l. Anledningen till att två halter har undersökts är för att se hur stor

skillnaden skulle bli ifall framtida kvävekrav blir 8 respektive 6 mg N-tot/l. Resultat för detta case presenteras i Tabell 5.

Tabell 5: Resultat från Case 2 - Kungsängsverket i Uppsala.

	Ingen kolkälla	8 mg/l	6 mg/l
Scenario 0	12,3 mg N-tot/l ut	Dos: 36 l/h = 0,86 m <sup>3</sup> /d Total volym: 17,3 m <sup>3</sup>	Dos: 110 l/h = 2,6 m <sup>3</sup> /d Total volym: 52,8 m <sup>3</sup>
Scenario U1	15,9 mg N-tot/l ut	Dos: 63 l/h = 1,5 m <sup>3</sup> /d Total volym: 30,2 m <sup>3</sup>	Dos: 160 l/h = 3,8 m <sup>3</sup> /d Total volym: 76,8 m <sup>3</sup>
Högre N			
Scenario U2	17,4 mg N-tot/l ut	Dos: 67,5 l/h = 1,6 m <sup>3</sup> /d Total volym: 32,4 m <sup>3</sup>	Dos: 130 l/h = 3,1 m <sup>3</sup> /d Total volym: 62,4 m <sup>3</sup>
Lägre COD		Faktor: 1,87	
Scenario U3	12,2 mg N-tot/l ut	Dos: 55 l/h = 1,3 m <sup>3</sup> /d Total volym: 26,4 m <sup>3</sup>	Dos: 180 l/h = 4,3 m <sup>3</sup> /d Total volym: 86,4 m <sup>3</sup>
Lägre RAS			Faktor: 1,64
Scenario U4	12,3 mg N-tot/l ut	Dos: 45 l/h = 1,1 m <sup>3</sup> /d Total volym: 21,6 m <sup>3</sup>	Dos: 135 l/h = 3,2 m <sup>3</sup> /d Total volym: 64,8 m <sup>3</sup>
Lägre COD kolkälla			

Sammanfattningsvis kan konstateras att för att vara resilient mot störningarna i scenario 1–4 skulle en dos om 1,6 m<sup>3</sup>/d behövas för att komma ner på en utgående totalkvävehalt på 8 mg/l och volymen på tanken för kolkälla skulle behöva vara 32,4 m<sup>3</sup> vilket motsvarar 20 dygns dosering. Om kvävekravet istället är 6 mg N-tot/l skulle en dos om 4,3 m<sup>3</sup>/d behövas, med en totalvolym om 86,4 m<sup>3</sup> för 20 dygns dosering. I det första fallet, med 8 mg N-tot/l, är säkerhetsfaktorn 1,87, alltså behövs 87 % större volym jämfört med scenario 0. I det andra fallet, med 6 mg N-tot/l, är säkerhetsfaktorn 1,64, alltså skulle volymen behöva vara 64 % större jämfört med scenario 0.

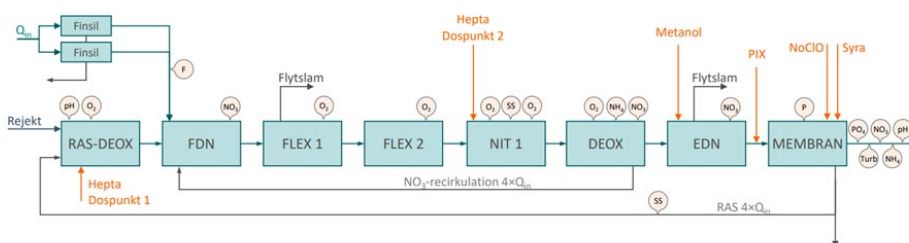
En insikt från denna fallstudie är att mängden kolkälla som krävs för att komma ner till 6 mg N-tot/l är 166 % större än den mängd som behövs för att komma ner till 8 mg N-tot/l. En annan insikt är att samtliga scenarier resulterar i en större volym på anläggningen för kolkälla jämförelse med referensscenariot. Det beror på att förutsättningarna i scenarierna U1–U4 gör det svårt att klara reningskraven utan att öka kapaciteten i anläggningen. Scenarierna är troliga och det är därför rimligt att ha höjd för dem i den framtida anläggningen.

## 4.2 Fallstudie 2 – Dimensionering av en deoxvolym på Henriksdals reningsverk

I detta fall har en modell över den första MBR-linjen (biolinje 1) i Henriksdals reningsverk analyserats. Modellen består av en aktivslamprocess med för- och

efterdenitrifikation, fördelat på åtta olika zoner (Figur 8). Det finns ett antal regulatorer som styr pumpning, luftning och dosering av fällningskemikalie.

Det modellverktyg som använts är Matlab/Simulink. Bioreaktorerna är baserade på *asm2d* (Henze et al., 1999). De olika zonerna i biosteget benämns. RAS-DEOX, FDN (fördenitrifikation), FLEX 1, FLEX 2, NIT 1, DEOX, EDN (efterdenitrifikation) och MEMBRAN. NIT1 benämns även Ox. Flex1, flex2 och ox är zoner som kan luftas. Ox luftas alltid, men i båda flex-zoner luftas det endast vid behov. En schematisk bild över biolinje 1 presenteras i Figur 8.



Figur 8. Schematisk bild över biolinje 1 vid Henriksdals reningsverk. NIT1= luftad zon, även kallas Ox.

Dimensioneringsutmaningen i detta fall var att dimensionera volymen på den så kallade deoxzonen efter de luftade zonerna. Syftet med deoxzonen är att syre ska förbrukas så att utgående syrehalt är så nära 0 mg/l som möjligt, vilket annars påverkar kvävereningen negativt. Volymbehovet är beroende av mängden syre. Aktuell volym har därför varierats automatiskt med hjälp av en regulator, där målet var att volymen skulle öka om syrehalten ut var större än önskad halt eller minska om syrehalten ut var mindre än önskad halt. Syftet har varit att undersöka hur volymen står sig givet dagens förutsättningar och hur störningar påverkar den behövda volymen.

*Dimensioneringsutmaningen i detta fall var att dimensionera volymen för deoxzonen efter de luftade zonerna*

Till att börja med lades en extra insignal, volymen för zonen, in till deox-zonen. Denna volym styrdes med hjälp av en vanlig PI-regulator baserat på syrehalten ut från deox-zonen. I koden byttes parametern för volymen ut mot insignalen för volymen. Inställningar för parametrar i regulatorn var  $K_P = 3$ ,  $T_i = 4/(60 \times 24)$  och "offset" sattes till 2 000 m<sup>3</sup>.

I detta fall testades två olika börvärden för utgående syrehalt från deoxzonen. Dessa var 0,1 mg/l respektive 0,05 mg/l.

Två störningar användes för denna fallstudie. Det första var en höjning av syrehalten från ox-zonen till deox-zonen för att se vilken syrehalt dagens deox-zon skulle klara av.



Det andra var en ökning av nitratrecirkulationsflödet, vilket ökar belastningen på deox-zonen.

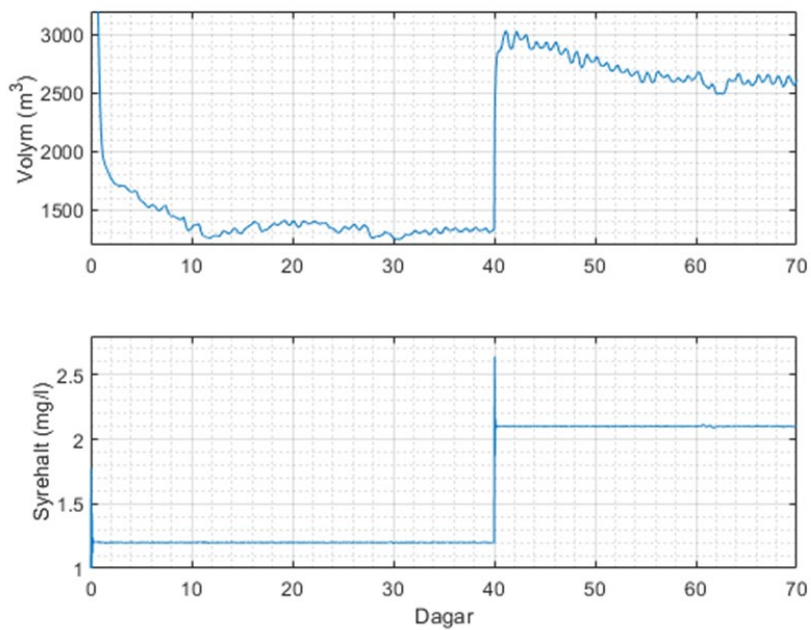
- Scenario D1 Ökad syrehalt från ox-zonen till deox-zonen från normala 1,2 mg/l till 2,1 mg/l, se Figur 9.
- Scenario D2 Ökat nitratrecirkulationsflöde, från faktor 4 till en faktor 5 gånger inkommande flöde, se Figur 10.

Den faktiska volymen på deox-zonen är 2 600 m<sup>3</sup>. Vid ökad syrehalt ökar belastningen med 75 % och vid ökat nitratrecirkulationsflöde, som beskrivet nedan, ökar belastningen med cirka 12 %, d.v.s. att det totala flödet in till deox-zonen blir 12 % större. Tabell 6 sammanfattar resultaten från simuleringar med referensscenariet (scenario 0), de två störningarna (scenario 1 och 2), samt en kombination av dessa störningar (scenario 3) givet de två olika börvärdena.

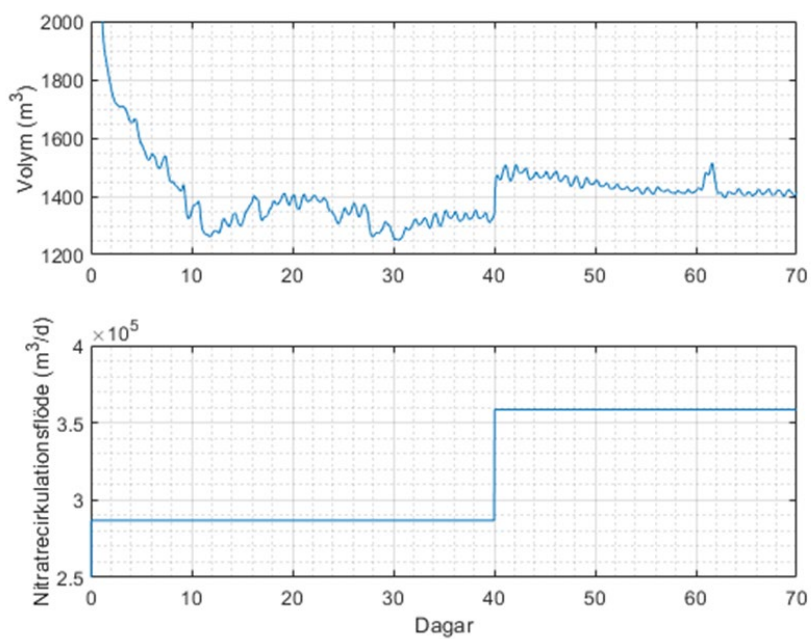
Resultatet visar att den befintliga volymen på deox-zonen är tillräcklig för att klara att hålla båda börvärdena, 0,1 mg/l och 0,05 mg/l, med god marginal i referensscenariot (scenario 0), men om börvärdet halveras (0,05 mg/l) krävs en betydligt större volym. Vid simulering av höjd syrehalt (scenario D1) behövs större volym än vad som finns i dagens design, för börvärdet 0,05 mg/l, men den är tillräcklig för 0,1 mg/l. Med ett ökat nitratrecirkulationsflöde (scenario D2) klarar sig befintlig volym precis. Som väntat behövs betydligt större volymer när båda scenarierna kombineras.

Tabell 6: Volymbehov för deox-zonen för att nå önskade börvärden för de simulerade scenarierna med olika störningar.

Scenario	Deox-zonens volym (m <sup>3</sup> )	
	Börvärde 0,1 mg/l	Börvärde 0,05 mg/l
Scenario 0 (Ingen störning)	1 320	2 300
Scenario D1 (Höjd syrehalt)	2 600	4 400
Scenario D2 (Ökat nitratrecirkulationsflöde)	1 450	2 600
Scenario D3 (D1 & D2 samtidigt)	2 950	5 000



Figur 9 Volymen av deox-zonen och syrehalten i till deox-zonen för de simulerade dagarna. Dag 40 ökas syrehalten från 1,2 mg/l till 2,1 mg/l.



Figur 10. Volymen av deox-zonen och nitratrecirkulationsflödet för de simulerade dagarna.

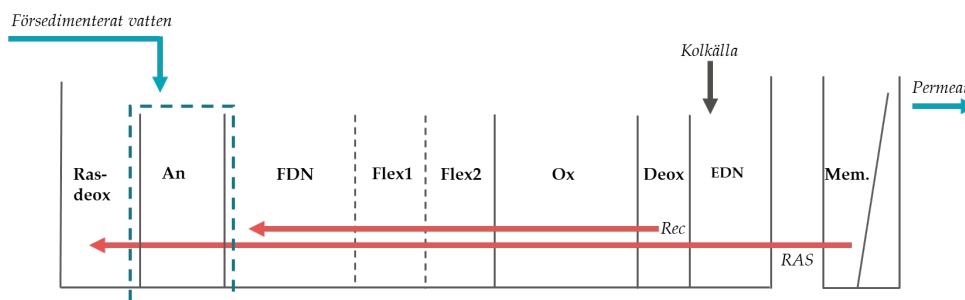
Vid börvärde 0,1 mg/l blir reduktionsgraden av syre i zonen 95,2 % och ett börvärde på 0,05 mg/l ger reduktionsgraden 97,6 %. Det motsvarar en ökning med 2,4 procentenheter i reduktionsgrad av syre. För att klara utgående syrehalt från deox-zonen på 0,05 mg/l istället för 0,1 mg/l skulle volymen behöva vara ca 70 % större i referensscenariot. Jämfört med att precis klara kraven med befintlig volym i scenario 0 ökar volymsbehovet i scenario D1 till ungefär det dubbla för att kunna hantera en störning med ökad syrehalt och fortfarande nå börvärdena.

Den procentuella ökningen av volymen vid ökat nitratrecirkulationsflöde är ungefär 10 % för båda scenarierna jämfört med referensscenariot. Med ett börvärde på 0,05 mg/l istället för 0,1 mg/l ökar volymsbehovet med 80 % (från 1 450 m<sup>3</sup> till 2 600 m<sup>3</sup>). Att ha en säkerhetsmarginal med ett börvärde på 0,05 mg/l innebär att en störning av syrehalten skulle kräva stora extravolymer för att klara av att hålla önskad syrehalt. Vid ett ökat nitratrecirkulationsflöde skulle volymen precis räcka till, men utan marginal.

Sammanfattningsvis bedöms att nuvarande volym på knappt 2 600 m<sup>3</sup> är välavvägd för att kunna hantera rimliga störningar i form av ökad syrehalt och ökat recirkulationsflöde. I det fall flera störningar inträffar samtidigt (som i Scenario 3) måste dock en förhöjd syrehalt (>0.1 mg/l) accepteras.

### 4.3 Fallstudie 3 – Biologisk fosforering vid Henriksdals reningsverk

I denna fallstudie undersöktes om biologisk fosforering (Bio-P) kan inrymmas i Henriksdals reningsverks befintliga membranbioreaktor (MBR)-process. Detta genom att förflytta utloppet för nitratrecirkulationen nedströms i befintlig processkonfiguration. En sådan förflyttning skulle skapa en anaerob delvolym (An) uppströms fördenitrifikationen (FDN), se Figur 11 nedan, där ingen tillsats av nitratrikt vatten sker. Hypotesen är att en anaerob delvolym skulle gynna tillväxt av bio-P-bakterier. Utmaningen i denna fallstudie var att dimensionera den nödvändiga storleken på den anaeroba zonen. Ett bivillkor är att volymen tas från den nuvarande FDN-volymen och att det alltså finns en begränsning i hur stor volym som kan nyttjas. Den kvarvarande FDN-volymen måste vara tillräckligt stor för att uppnå fullständig denitrifikation. Förutom den tänkta An-zonen visar Figur 11 den verkliga nuvarande processkonfigurationen för biolinje 1 (BB01) på Henriksdal. Hela fallstudien beskrivs i Lindblom (2024).



Figur 11. Schematisk bild över den studerade processkonfigurationen för BB01 på Henriksdals reningsverk. Den inrutade anaeroba delvolymen ( $V_{An}$ ) är ny och finns inte i verkligheten men studerades i fallstudien.

*Utmaningen i denna fallstudie var att dimensionera den nödvändiga storleken på den anaeroba zonen*

Studien genomfördes i simulatören Sumo (processmodell Sumo1) genom att den befintliga modellen i Matlab (se 4.2) migrerades till denna mjukvara.

Tanken med den processförändring som studerades var att den skulle kunna införas i den befintliga processen. Som dimensionerande inflöde valdes uppmätta koncentrationer och flöden från en period då den befintliga processen prestandatestades. Dessa dimensionerande förutsättningar var grund för alla scenarier som sedan utvärderades.

Den nödvändiga anaeroba volymen ( $V_{An}$ ,  $m^3$ ) för att bio-P-aktivitet skulle uppnås analyserades genom att dimensionera för referensscenariot och tre ytterligare scenarier där värden på dimensioneringsparametrar varierades enligt följande:

- Scenario D1 - lägre temperatur: Det fanns inget krav på att den nya biologiska fosforeringen skulle vara signifikant året runt och medeltemperaturen ( $T$ , °C) 15 °C valdes därför i referensscenariot. Dock är det av intresse att studera hur stor påverkan temperaturen har då det är nödvändigt att säkerställa att processen som helhet fungerar året runt även efter den dimensionerade processförändringen. I Scenario D1 gjordes därför dimensioneringen för en ansatt lägsta-temperatur (10 °C).
- Scenario U1 – högre luftflöde för membranrengöring: Det luftflöde som behövs för att hålla membranerna rena påverkar kväveringsprocessen och hur mycket av kolkällan i inkommande vatten som kan användas för bio-P. Det fanns ingen säker information om detta luftflöde och ett scenario med 50 % högre luftflöde som ger en högre syrehalt i returslamflödet användes för dimensionering i Scenario U1.
- Scenario U2 – lägre hydrolyshastighet: Resultat från litteraturen visar att modellparametern för hydrolyshastighet kan ha en stor påverkan på den modellerade bio-P-aktiviteten. Därför inkluderades detta scenario (U2) där hastigheten ( $q_{Hyd}$ ,  $d^{-1}$ ) halverades jämfört med referensscenariot.

I simuleringarna användes metoden med PI-regulatorer (Avsnitt 3.1.6) för bl.a. kolkälledosering, nitratrecirkulation och överskottsslamuttag så att uppsatta bivillkor för dimensioneringen uppfylldes.

Inledande simuleringar med referensscenariot visade att bio-P-aktivitet kunde uppnås för olika dimensioner på anaerob-volymen men att ju större den kan väljas, desto lägre blir behovet av extern kolkälla. Det är välkänt att vissa typer av extern kolkälla kan bidra signifikant till ett reningsverks klimatpåverkan vilket tillsammans med ekonomiska incitament gör att minimering av behovet är ett vanligt bivillkor vilket också ingick i denna fallstudie.

När dimensioneringen upprepades för Scenario D1 (lägre temperatur) insågs dock att den maximala volymen som kunde väljas var 6 500  $m^3$ , annars blev den kvarvarande

volymen för fördenitrifikation ( $V_{FDN}$ ) för liten. I detta fall fanns alltså två motstridiga bivillkor; bibehållen fördenitrifikation och minimering av kolkällebehov.

Utifrån dessa togs beslutet att dimensionen på An-volymen skulle vara 6 500 m<sup>3</sup> då denna innebär att bio-P erhålls med ett minimalt behov av extern kolkälla samtidigt som att den befintliga kvävereningen bibehålls.

I Tabell 7 ges en sammanfattning av de fyra scenarierna och det dimensionerade behovet av extern kolkälla för den valda anaerob-volymen 6 500 m<sup>3</sup>. Resultaten kan användas som underlag vid val av dimensioner för koldoseringsanläggningen.

Tabell 7: Jämförelse av dimensionerat behov av extern kolkälla i de fyra scenarierna när An-volymen dimensionerats till 6 500 m<sup>3</sup>.

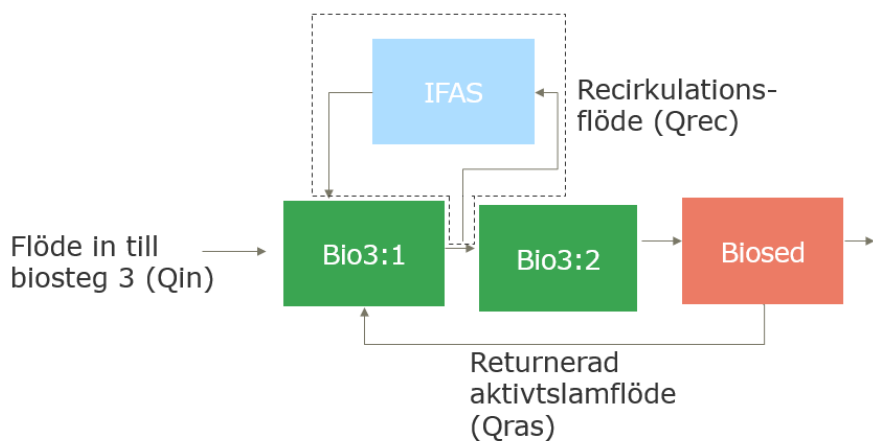
Scenario	T (°C)	QLuft (m <sup>3</sup> /d)	qHyd (d)	VAn (m <sup>3</sup> )	VFDN (m <sup>3</sup> )	QCarbon (m <sup>3</sup> /d)
0: Referensscenario	15	260 000	2,0	6 500	3 000	1,36
D1: Lägre temperatur	10	260 000	2,0	6 500	3 000	2,24
U1: Högre DO i RAS	15	390 000	2,0	6 500	3 000	2,05
U2: Lägre hydrolyshastighet	15	260 000	1,0	6 500	3 000	1,93

#### 4.4 Fallstudie 4 – Nykvarnsverket i Linköping

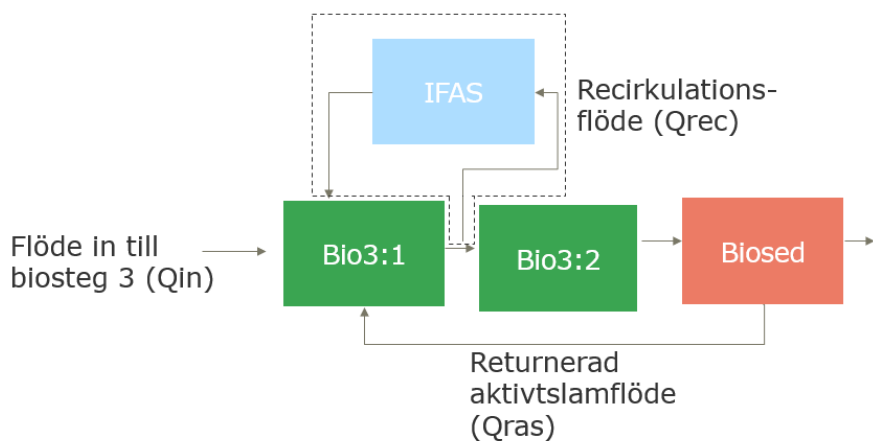
På Nykvarnsverket i Linköping pågår ett projekt där anläggningen anpassas efter framtida behov. Ett behov som identifierats är att öka nitrifikationskapaciteten för nuvarande belastning och för en trolig belastning år 2035. För att hantera denna ökade belastning har en s.k. IFAS-tank byggts (*eng.* integrated fixed-film activated sludge) i sidoström till ett befintligt biosteg (AS).

*Ett behov som identifierats är att öka nitrifikationskapaciteten för nuvarande belastning och för en trolig belastning år 2035*

I denna fallstudie har en befintlig modell över Nykvarnsverket kompletterats med en IFAS-tank som anslutits i en sidoström till ett befintligt biosteg som luftas intermittent. Modellen är implementerad i Matlab, Simulink.



Figur 12 visar en schematisk bild över befintlig och planerad IFAS-process inritad med systemgränsen för entreprenaden.



Figur 12 Schematisk bild över befintlig process med IFAS-processen inritad med systemgränsen för entreprenaden

Modellen har använts för att simulera effekten av olika anslutningspunkter till och från befintlig process, cirkulationsflöden, fyllnadsgrad och reaktorvolym. Två stycken scenarior har utvärderats. Fall A med nuvarande belastning, där IFAS-processen ska klara att nitrifiera 300 kg ammonium per dag alternativt 50 % av inkommande ammoniumbelastning vilket gäller då mängden inkommande ammonium < 600 kg/d. Fall B gäller för en framtida belastning motsvarande år 2035. I fall B ska IFAS-processen kunna nitrifiera 500 kg ammonium/dag eller 50 % av inkommande belastning om mängden in < 1 000 kg/d. Dessa sammanfattas i Tabell 8 nedan.

Tabell 8: Dimensionerande data och typiska dygnmedelbelastning till biosteg 3 vid nuvarande (Fall A) och prognostiserade framtida förhållanden (Fall B).

Parameter	Enhet	Fall A	Fall B
		Nuvarande	År 2035*
Flöde, max	m <sup>3</sup> /h	1 250	1 250
Flöde, medel	m <sup>3</sup> /h	755	1 030
Flöde, min	m <sup>3</sup> /h	500	500
COD	mg/l	280	336
COD	kg/d	5 074	8 302
BOD	mg/l	175	210
BOD	kg/d	3 171	5 189
TSS	mg/l	140	140
TSS	kg/d	2 537	3 459
TN	mg/l	48	58
TN	kg/d	870	1 433
NH <sub>4</sub> -N	mg/l	34	41
NH <sub>4</sub> -N	kg/d	616	1 013
TP	mg/l	3	3
TP	kg/d	45	75
Temperatur	°C	12	12

\*Antaget för framtida förhållanden år 2035

Modellen har använts för att undersöka följande tre driftfall:

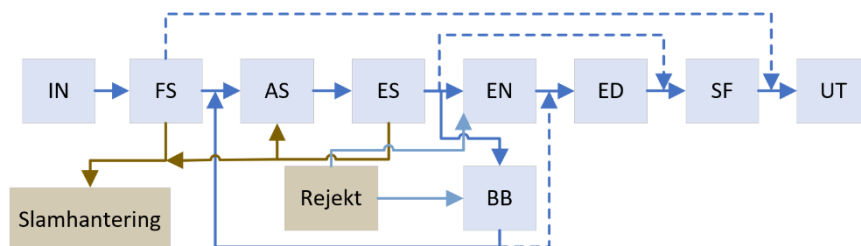
1. Scenario U1 Osäkerhet gällande framtida flöde och belastning. Det maximala flödet till biosteg 3 begränsas av kapaciteten i sedimenteringsbassängerna, vilket ger ett maximalt flöde på 1 250 m<sup>3</sup>/h. Den totala mängden ammonium kommer dock att variera beroende på hur koncentrerat eller utspätt vattnet är. Vid framtida klimatförändringar kan både långa perioder med kraftig nederbörd och torrväder förekomma i större utsträckning. Belastningsökning p.g.a. ökat antal anslutna personer och industrier är också en osäkerhetsfaktor.
2. Scenario U2 Osäkerhet gällande placering av pumpar till och retur från IFAS-tanken samt cirkulationsflödet till och från IFAS-tanken. IFAS-tanken är en nitrifikationsvolym. En del av befintlig AS-volym ska användas som anox-zon och fördenitrifiera nitratreturen från IFAS-tanken. En osäkerhet är var inflödet till IFAS-tanken ska placeras för bästa effekt. Flödet till IFAS-tanken påverkar energiförbrukningen för både pumpar och blåsmaskiner. Returen från IFAS späder ut inkommande flöde till bio 3, vilket i sin tur påverkar ammoniumkoncentrationen i inloppsflödet till IFAS.

3. Scenario U3 Osäkerhet gällande reaktorvolym och fyllnadsgrad av bärare vid nuvarande och framtida belastning. Mängden ammonium som kan nitrifieras beror på flera faktorer såsom temperatur, hydraulisk uppehållstid (HRT), slamhalt, slamålder, fyllnadsgrad och syrehalt. Hur IFAS-reaktorn ska dimensioneras innebär en osäkerhet då processen påverkas av processen i AS och påverkar i sin tur AS-processen.

Sammanfattningsvis har processmodellen med sidoströms-IFAS varit ett användbart verktyg för att förstå nuvarande nitrifikationskapacitet, vilket underlättar dimensionering för framtida behov år 2035.

## 4.5 Fallstudie 5 – Ryaverket i Göteborg

I denna fallstudie har hela processen på Ryaverket modellerats. Modellen består av försedimentering, aktivslam med simultanfällning utan nitrifikation, mellansedimentering, nitrifierande biobäddar, efternitrifikation och efterdenitrifikation i MBBR (*eng.* moving bed biofilm reactor) samt skivfilter (Figur 13).



Figur 13 Processflödesschema för vattenreningen på Ryaverket. Inkommande (IN), försedimentering (FS), aktiv slam (AS), biobäddar (BB), eftersedimenteringen (ES), efternitrifikation MBBR (EN), efterdenitrifikation MBBR (ED), skivfilter (SF). Dessutom rejecktatten från slamhanteringen

Modellen har använts för att simulera tänkbara framtidsscenarioer för att ta reda på reningsverkets kapacitet. Resultatet ska användas för att beräkna reningsverkets kapacitet, vilket används för att dimensionera det framtida parallella reningsverk som planeras att drifas år 2036. Referensscenariot har baserats på vad som anses vara trolig specifik belastning, flödesserie för ett blött år och befolkningens mängd år 2036. Modelleringsverktyget som använts är GPS-X.

*Modellen har använts för att simulera tänkbara framtidsscenarioer för att ta reda på reningsverkets kapacitet.*

Utifrån referensscenariot har två osäkerheter definierats. Utöver de två osäkerheterna har möjligheten att ta en efterdenitrifikationslinje ur drift även undersökts.

1. Scenario U1 Osäkerhet gällande flöde. Data baserat på ägarkommunernas prognoser har resulterat i ett antal scenarier avseende flöden. Två av dessa simulerades, den som benämns som trolig (referensscenario) och den som benämns som maximal. Osäkerheten kring framtida flöden är stor, samtidigt



har den stor påverkan på reningsresultaten, framför allt för utsläppsmängderna.

2. Scenario U2 Osäkerhet gällande sedimenteringskapaciteten. Sedimenteringskapaciteten är vad som begränsar flödeskapaciteten på den biologiska reningen och har stor inverkan på reningsresultatet. Två olika flöden för sedimenteringskapacitet har modellerats, trolig (referensscenario) och konservativ, och baseras på driftdata från tidigare år. I och med att det baseras på driftdata finns säkerhetsfaktor redan inbyggd i det troliga scenariot. Det representerar medelkapacitet över ett år.
3. Scenario U3 Möjlighet att ta en efterdenitrifikationslinje (ED) ur drift. Till följd av att det är nitrifikationskapaciteten som är begränsande för kvävereningen på Ryaverket har det undersökts hur det påverkar att ta en av sex linjer för efterdenitrifikation ur drift. Volymen skulle i så fall kunna användas som en demonstrationsanläggning av en ny reningsteknik. Scenariot har modellerats genom att minska volymen och maximala flödeskapaciteten över reningssteget med en sjättedel.

Tabell 11 visar en sammanfattning av resultaten.

Tabell 9: Dimensionerande parametrar i referensscenario och parametrar som påverkas av de tre störningarna som presenterats ovan

	Referensscenari o	Störning	
Flöde	141 782 021	157 329 215	m <sup>3</sup>
Sedimenteringskapacitet	8,5	8,2	m <sup>3</sup> /s
Flödeskapacitet ED	4,5	3,75	m <sup>3</sup> /s

Resultatet visar att en ED-linje mindre inte gör någon större skillnad, då nitrifikationskapaciteten är begränsande. Däremot har belastningen stor påverkan, vilket också är den största osäkerhetsfaktorn. Alla kombinationer av de studerade störningarna kan inträffa, vilket kräver en riskanalys för att bedöma vilken säkerhet som behövs och vilken risk som är villig att tas. Riskanalysen baseras på sannolikheten och konsekvensen av att de olika störningarna inträffar samtidigt. Resultaten från denna fallstudie utgör ett underlag för en sådan riskanalys som är planerade att genomföras utanför detta projekt.

## 4.6 Fallstudie 6 – Ett avloppsreningsverk i Mellansverige

I detta fall beskrivs hur modellbaserad dimensionering med modelleringsverktyget BioWin har använts i samband med framtagandet av ett anbud för ombyggnation av ett mindre kommunalt reningsverk. Reningsverket skulle byggas om för att utöka kapaciteten i den biologiska reningen med 7 000 pe genom att komplettera befintlig biolinje med en ny parallell linje. Simulering användes för att ta fram bassängvolymerna och andra dimensionerande storheter som underlag för kalkylering i anbudsarbetet. Utbyggnaden skulle motsvara ungefär en fördubbling av kapaciteten i den biologiska reningen. Underlag för dimensionering fanns tillgängligt i förfrågningsunderlaget vilket inkluderade dels dimensionerande data, dels övriga krav och förutsättningar för

utformning av processen. En grundläggande förutsättning var att beställaren avsåg att testa den nya biolinjen med den befintliga biolinjen ur drift vilket även låg till grund för hur dimensionerande data tagits fram.

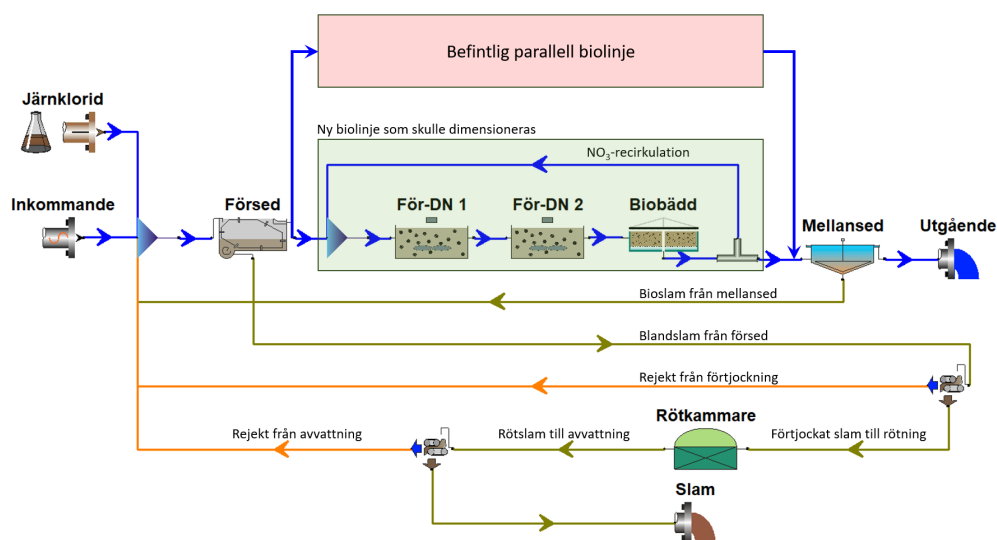
*Simuleringen användes för att ta fram bassängvolymer och andra dimensionerande storheter som underlag för kalkylering i anbudsarbetet.*

#### 4.6.1 Processbeskrivning

Enligt förfrågningsunderlaget skulle kapacitetsökningen ske genom att den befintliga biolinjen kompletterades med en ny parallell biolinje bestående av följande processteg:

- Pumpstation (för pumpning av försedimenterat vatten till fördenitrifikation)
- Fördenitrifikation i två steg baserat på MBBR-teknik
- Biobädd för nitrifikation
- Pumpstation för nitratrecirkulation

Den övergripande designen av den nya biolinjen var således redan fastslagen och i Figur 14 visas en översikt över hur reningsverket var tänkt utformas efter ombyggnationen. Befintlig biolinje har samma processupbyggnad som den nya biolinjen.



Figur 14: Processflödesschema över den nya biolinjen samt befintliga reningsprocesser

#### 4.6.2 Dimensionerande förutsättningar

För dimensionering av den nya biolinjen fanns angivet olika förutsättningar att förhålla sig till. Några viktiga förutsättningar som gällde för dimensioneringen var följande:

- Entreprenören skulle beräkna och ta hänsyn till internbelastning från förtjockning och slutavvattnings.
- Entreprenören skulle beräkna reduktionen över försedimenteringen.
- Garantikraven för utsläppshalter gällde filtrerade prover, således ingick inte ansvar för reduktionen över mellansedimenteringen i entreprenörens åtaganden.

Vidare fanns angivet ett antal förutsättningar som utgjorde begränsningar för dimensioneringen. Följande specifika krav var angivna gällande processens utformning för fördenitrifikationen:

- utformas i två seriekopplade delsteg
- maximal tillåten fyllnadsgrad 45 %
- maximal tillåten yta på bärrmaterial  $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$
- minsta tillåten bassängvolym  $300 \text{ m}^3$  (zon 1+zon 2 tillsammans).

Följande specifika krav var angivna gällande processens utformning för nitrifikationssteget:

- minsta tillåtna processvolym  $930 \text{ m}^3$
- minsta tillåtna yta på bärrmaterial  $120 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

Utöver ovan nämnda krav fanns ytterligare specifika krav angivna men dessa redovisas inte här då de är av mindre betydelse för dimensioneringen av den nya biolinjen.

I Tabell 10 redovisas dimensionerande flöden och föroreningsbelastningar. Alla parametrar var givna i förfrågningsunderlaget förutom COD och VSS som beräknades eftersom dessa parametrar krävdes för simuleringarna.

Tabell 10: Dimensionerande flöden och föroreningsbelastningar för den nya biolinjen

Parameter	Enhet	Värde	Kommentar
$Q_{dim, ARV}$	$\text{m}^3/\text{h}$	241	Dimensionerande flöde in till ARV
$Q_{dim, bio2}$	$\text{m}^3/\text{h}$	127	Dimensionerande flöde in till bio2
$Q_{medel, bio2}$	$\text{m}^3/\text{h}$	46	Förväntat medelflöde in till bio2
$Q_{max, bio2}$	$\text{m}^3/\text{h}$	500	Hydraulisk kapacitet bio2
BOD <sub>7</sub>	kg/d	490	
N-tot	kg/d	98	
NH <sub>4</sub> -N	kg/d	77	
P-tot	kg/d	17,5	
TSS	kg/d	616	
COD	kg/d	939	Kompletterande parameter
VSS	kg/d	427	Kompletterande parameter

I Tabell 11 och Tabell 12 visas de utsläppskrav som gäller för dimensionering av biolinje 2. Som framgår av tabellerna gäller olika krav under sommar (juni-augusti) och vinter (januari-februari). Vidare ställs olika krav beroende på inkommande belastning, i enlighet med vad som uppges i tabellerna. Kraven gäller för filtrerade prover.

Tabell 11: Krav på utgående halter (filtrerade prover) från biolinje 2 under sommaren (juni-augusti) givet uppmätt inkommande belastning.

Parameter	Kravställd halt, juni-augusti		
	< 6 000 pe	6 000–6 500 pe	6 500–7 000 pe
BOD <sub>7</sub> (mg/l)	< 3	< 4	< 4,5
N-tot (mg/l)	< 10	< 12	< 13
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	< 1	< 2	< 3

Tabell 12: Krav på utgående halter (filtrerade prover) från biolinje 2 under vintern (januari-februari) givet uppmätt inkommande belastning.

Parameter	Kravställd halt, januari-februari		
	< 6 000 pe	6 000–6 500 pe	6 500–7 000 pe
BOD <sub>7</sub> (mg/l)	< 3	< 4	< 4,5
N-tot (mg/l)	< 12	< 13	< 14

#### 4.6.3 Metodik och resultat

Referensscenariot är i det här fallet angiven belastning och angivna utsläppskrav samt de minimikrav som hade formulerats gällande bassängvolym och bärarmaterial.

En modell upprättades i BioWin där fraktioneringen av inkommande avloppsvatten gjordes bland annat utifrån olika nyckeltal samt med hjälp av det inbyggda fraktioneringsverktyget i BioWin. Modellen konfigurerades så att dimensionerna på befintliga anläggningsdelar stämde med verkligheten och nya bassängvolym och bärarmaterial ställdes in enligt minimikraven. Internrecirkulationen valdes initialt till 300 % av inkommande flöde.

Från beställaren fanns uppgifter gällande TS-halt på slam från försedimentering, mekaniskt förtjockat slam samt avvattnat slam. Modellen kalibrerades för att uppnå motsvarande TS-halter. Separationen i mekanisk förtjockare och avvattare justerades för att nå normala koncentrationer av suspenderat material i rejektvattnet.

Då den framtida förväntade vattensammansättningen som hade uppgetts i förfrågningsunderlaget hade vissa avvikelser mot den sammansättning som inkommande vatten har idag så ansågs det inte relevant att göra en kalibrering av modellen med avseende på modellparametrar såsom till exempel hastighetskonstanter och halvmättnadskonstanter mot mätdata från reningsverket. Mängden tillgängliga data var dessutom begränsad och det är osäkert om den hade varit tillräcklig för att göra en relevant kalibrering.

Initialt genomfördes simuleringar under statistiska förhållanden för att kontrollera om de minimiförutsättningar som angivits i förfrågningsunderlaget är tillräckliga för att nå

de utsläppskrav som ska garanteras. Den första simuleringen som gjordes var med exakt de bassängvolymerna som föreskrivits som minimikrav och vid full belastning samt vid sommartemperatur eftersom det då även finns ammoniumkrav.

Resultatet vad gäller ammoniumkväve ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) indikerar att kapaciteten i biobädden med föreslagen dimensionering är tillräcklig för nå utsläppskravet vid referensscenariot (Tabell 13). Resultatet avseende  $\text{BOD}_7$  från simuleringen ligger även det under det kravställda värdet. Däremot kravet vad gäller totalkväve överskrids på grund av för hög halt nitrat-/nitritkväve ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) i utgående avlopp. Detta visar sig bero på kapacitetsbrist i fördenitrifikationen vilket i sin tur beror på begränsad mängd  $\text{BOD}$  i förhållande till hur mycket kväve som ska denitrifieras vilket ger låga reaktionshastigheter. Eftersom fyllnadsgraden i fördenitrifikationen valdes till den högsta tillåtna, d.v.s. 45 %, så återstår bara att öka volymen i fördenitrifikationen för att öka kapaciteten. Två nya scenarier valdes därför ut för vidare simuleringar. Resultatet från dessa två scenarier redovisas i Tabell 14 och Tabell 15. För scenario 1 hade volymen på fördenitrifikationen, zon 1+zon 2, ökats från 150+150 till 225+225  $\text{m}^3$ . För scenario 2 hade volymen på fördenitrifikationen utökats ytterligare, till 300+300  $\text{m}^3$ . Med en fördenitrifikationsvolym om 225+225  $\text{m}^3$  uppfylls totalkvävekravet med en marginal om 1,0 mg/l. Med en fördenitrifikationsvolym om 300+300  $\text{m}^3$  uppfylls kravet med en marginal om 3,0 mg/l.

Tabell 13. Resultat från simulering av referensscenariot

Parameter	7 000 pe	Krav
$\text{BOD}_7$ (mg/l)	1,8	< 4,5
N-tot (mg/l)	14,6	< 13
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	0,28	< 3
$\text{NO}_x\text{-N}$ (mg/l)	13,0	

Tabell 14 Resultat från simulering av scenario 1

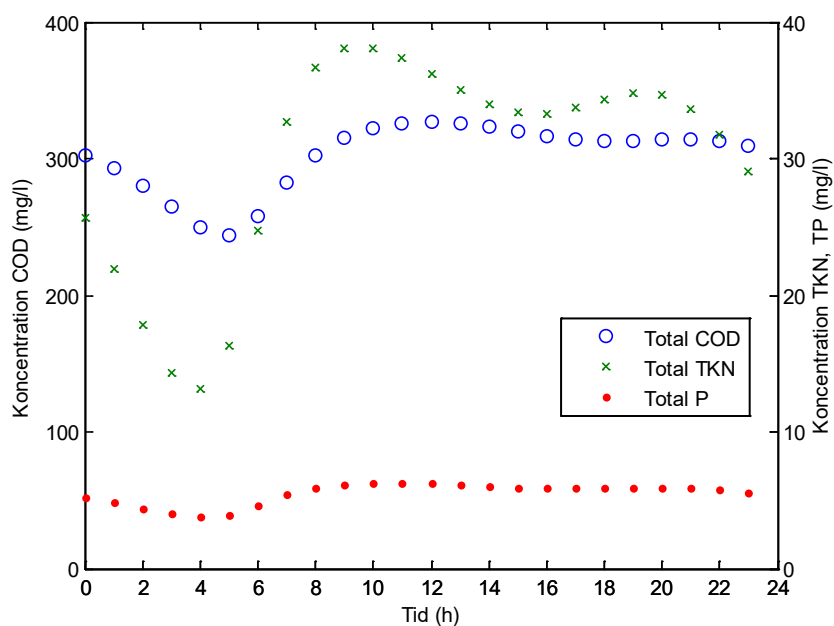
Parameter	7 000 pe	Krav
$\text{BOD}_7$ (mg/l)	1,6	< 4,5
N-tot (mg/l)	12,0	< 13
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	0,29	< 3
$\text{NO}_x\text{-N}$ (mg/l)	10,4	

Tabell 15 Resultat från simulering av scenario 2

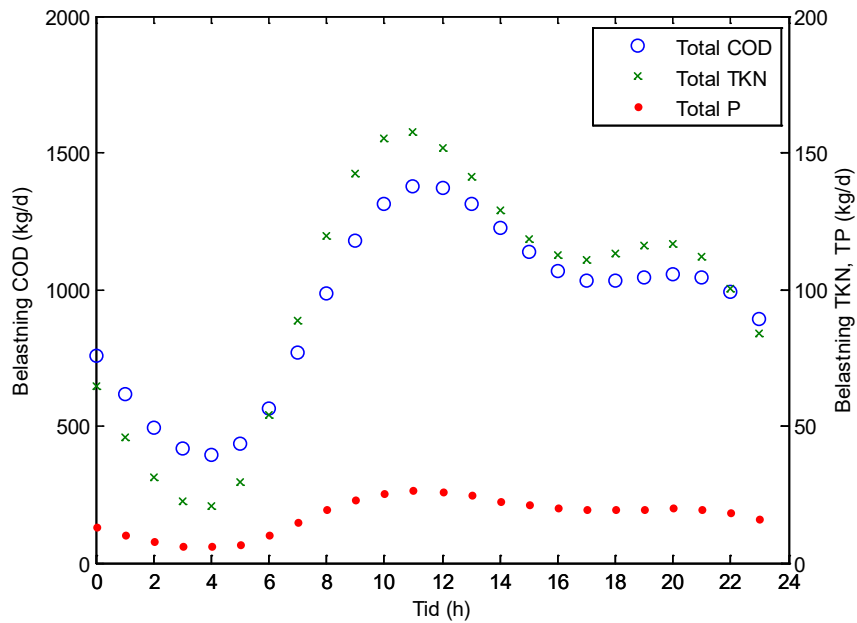
Parameter	7 000 pe	Krav
$\text{BOD}_7$ (mg/l)	1,5	< 4,5
N-tot (mg/l)	10,0	< 13
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	0,30	< 3
$\text{NO}_x\text{-N}$ (mg/l)	8,5	

För att studera processens prestanda under dynamiska förhållanden skapades 24-timmars dynamiska indata med hjälp av ett Excel-baserat verktyg (Langergraber et al., 2008). I Figur 15 visas inkommande föroreningskoncentrationer som användes vid dynamisk simulering och i Figur 16 visas den inkommande föroreningsbelastningen som det resulterade i med flödesdynamik (varierande flöde mellan ca 1 600–4 200 m<sup>3</sup>/d).

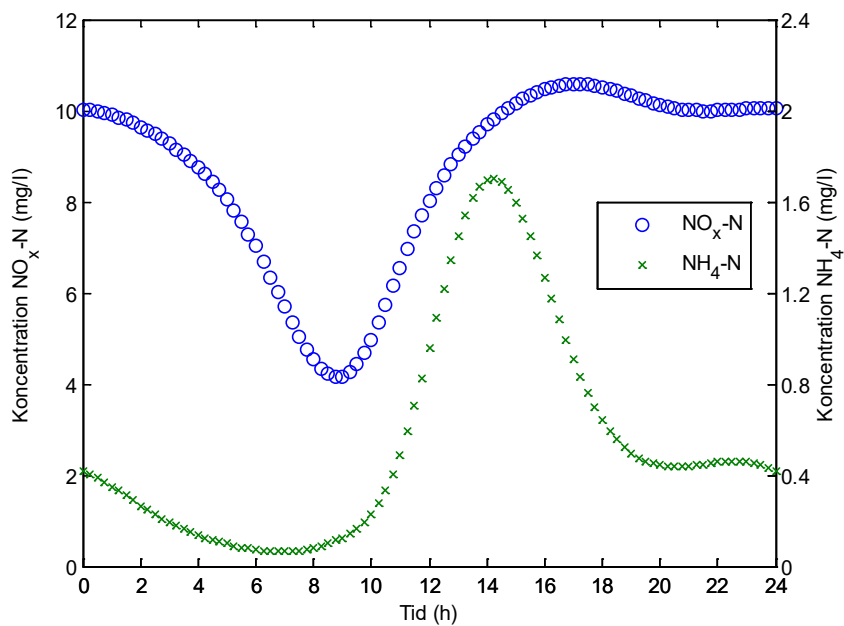
Resultatet från den dynamiska simuleringen med avseende på utgående NO<sub>x</sub>-N och NH<sub>4</sub>-N visas i Figur 17 där koncentrationen varierar över dygnet som en följd av varierande belastning. I Tabell 16 visas resultatet från den dynamiska simuleringen som flödesviktat dygnsprov efter 20 dygns simulering med dynamiska indata för att stabilisera processen. Det visar sig att utgående halter fortfarande ligger under de kravställda halterna men att marginalen till utgående ammoniumkväve och totalkväve minskar något.



Figur 15: Inkommande föroreningskoncentrationer vid dynamisk simulering



Figur 16: Inkommande föroreningsbelastningar vid dynamisk simulering



Figur 17: Utgående koncentrationer av NO<sub>x</sub>-N och NH<sub>4</sub>-N vid dynamisk simulering

Tabell 16: Resultat från dynamisk simulering, flödesviktade dygnsprover

Parameter	7 000 pe	Krav
BOD <sub>7</sub> (mg/l)	1,7	<4,5
N-tot (mg/l)	10,5	<13
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	0,64	<3
NO <sub>x</sub> -N (mg/l)	8,6	

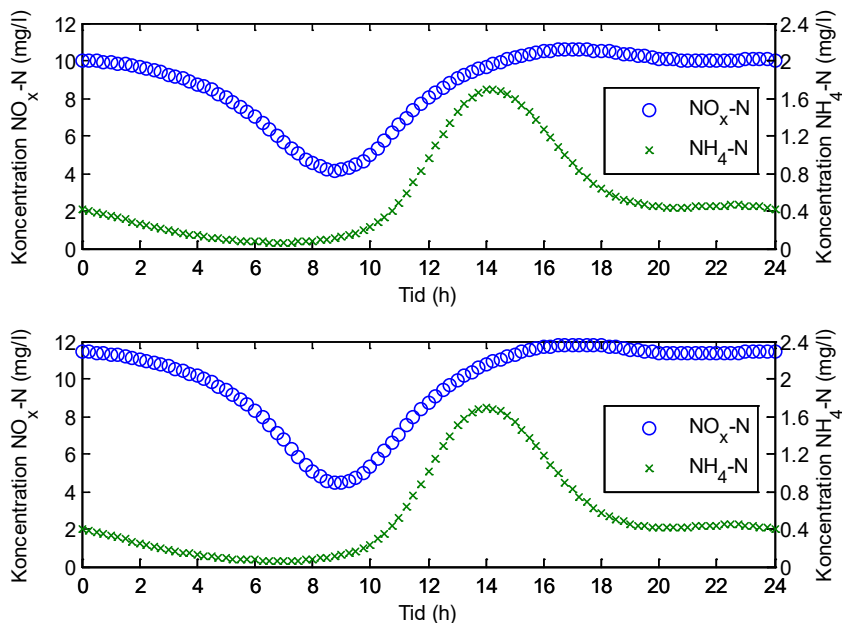
Eftersom olika utsläppskrav förelåg vinter respektive sommar samt vid olika belastningar så fanns ytterligare 5 scenarier som behövde simuleras. Det visade sig vid simulering av dessa att inkommande BOD-mängder var så begränsande att det blev svårt att klara totalkvävekraven vid de lägre belastningarna. Detta gjorde att totalkvävekravet togs bort som krav i upphandlingen för de lägre belastningsfallen. Vidare studerades även påverkan av andra processparametrar, exempelvis nitratrecirkulationsflödet.

I nästa steg identifierades olika osäkerhets- och störningsscenarier, se exempel i punktlistan nedan:

- Biofilmens tjocklek avviker från den som modellerats.
  - Simulera med tunnare och tjockare biofilm.
- Syrehalten i recirkulationsflödet från biobädden blir högre än vad som modellerats (vilket förbrukar intern kolkälla).
  - Simulera med högre syrehalt ut från biobädden.
- Avskiljningen av BOD i försedimenteringen blir högre eller lägre än vad som modellerats vilket påverkar denitrifikationsprocessen.
  - Simulera med högre och lägre avskiljning i försedimenteringen.
- En störning i slamförtjockning eller avvattning leder till ökad suspbelastning till försed.
  - Modellera sämre avskiljning i slamförtjockning eller avvattning.

Som scenario 3 simulerades processen med ca 40 % tunnare biofilm i för-DN 1 och för-DN 2. Resultatet från simulering av ett dygn med tunnare biofilm (efter simulering av 28 dygn med de nya inställningarna för att stabilisera processen) visas jämfört med ett dygn från scenario 2 i Figur 18. Det kan konstateras att utgående NO<sub>x</sub>-N-halter blir högre vilket leder till att utgående flödesviktad totalkvävehalt (filtrerat prov) ökar till 11,6 mg/l. Risken för att biofilmen blir 40 % tunnare än den tjocklek som ursprungligen använts i simulering måste också värderas.





Figur 18: Resultat från simulering av scenario 2 (ursprunglig tjocklek på biofilm) och 3 (tunnare tjocklek på biofilm)

#### 4.6.4 Slutsater

Enligt den metodik som beskrivits här så modellerades de olika identifierade scenarier som ansågs vara relevanta vilket till slut ledde fram till en dimensionering av bassängvolym, bärlarmängder och yta på bärlarmaterial. Det kunde konstateras att vattnets sammansättning gjorde att fördenitrifikationsprocessen var begränsande för att klara totalkvävekravet med avseende på filtrerade prover i utgående avlopp från biologin. Således var det också kopplat till fördenitrifikationen som det krävdes mest arbete med simulering av olika scenarier för att få fram en resilient design av reningsverket givet de specificerade förutsättningarna. För att verifiera designen gjordes även traditionella dimensioneringsberäkningar i Excel som bekräftade dimensioneringen som gjordes i BioWin.

Att utföra dimensioneringen med hjälp av ett modelleringsverktyg gav möjlighet att studera många olika scenarier på ett strukturerat sätt. Det gav också en förbättrad möjlighet att studera en process i sin helhet inklusive exempelvis slamrötning, avvattning o.s.v. utan att behöva använda nyckeltalsberäkningar och uppskattningar i samma utsträckning som vid en dimensionering gjord i Excel.

## 5 Insikter och slutsatser

Rapporten avslutas med en diskussion om hur projektets resultat bidragit till VA-branschens digitala transformation och Smart Built Environments effektmål, samt vilka aktiviteter som fortsatt kan stödja detta.

Projektet genomförde två kunskapsbyggande arbetspaket som syftade till **kunskapsutveckling och förnyelse** genom att

- 1) utveckla en metodik för modellbaserad dimensionering
- 2) undersöka hur rörelsedata kan bidra till en modellbaserad dimensionering.

Delar av den dimensioneringsmetodik som togs fram i projektet tillämpades i olika omfattning i de sex fallstudierna. Detta visar på den praktiska tillämpbarheten med modellbaserad dimensionering, trots att inte hela metodiken kunnat replikeras i praktiken. I korthet så möjliggör den modellbaserade dimensioneringsmetodiken **ett förbättrat informationsflöde** genom att antagna osäkerheter och störningar direkt kan kvantifieras och dokumenteras. En förutsättning för valet av säkerhetsmarginal och resiliens är dock en aktiv och kravformulerande beställare, som i sin tur kräver en utökad samverkan mellan beställare och konsult eller entreprenören. Metodiken ställer alltså högre krav på beställaren. Men det är viktigt att ta detta ansvar, särskilt vad gäller en av de viktigaste utmaningarna vid dimensionering; nämligen att dimensioneringen inkluderar de olika driftfall uppstår under reningsverkets livslängd. Det vill säga, reningsverket ska dimensioneras för att, med bibehållen effektivitet, kunna hantera nutid, dimensionerande belastning om 30 år, och driftfallen däremellan. Detta identifierades som den viktigaste utmaningen att hantera vid dimensionering under den nationella externa workshopen.

Den modellbaserade metodiken skapar även bättre förutsättningar för att balansera hållbarhetsaspekter mot reningseffektivitet och investerings- och driftkostnader vilket är en förutsättning för **reducerad klimatpåverkan genom hela livscykeln**. På samma sätt som med de transparenta säkerhetsmarginalerna så kan klimatpåverkan för olika dimensioneringsfall dokumenteras automatiskt och digitalt. Fallstudie 3 är ett tydligt exempel på hur **klimatperspektivet kan inkluderas vid dimensionering** genom att balansera utformningen av processvolymerna för att minimera resursförbrukningen av fällningskemikalier och kolkälla med högt klimatavtryck.

De studerade rörelsedata bidrog till en djupare förståelse för uppdelning och orsaker till de belastningsvariationer som är utmanande att hantera vid dimensionering. En samverkan mellan GIS-experter från VA-organisationen och dataleverantören var nödvändig för att kunna genomföra själva analysen som i sig inte var inte avancerad och enkelt bör kunna inrymmas i en framtida tredje-partstjänst.

Ett av projektets huvudmål har varit att bidra till **VA-branschens digitala transformation** genom kompetensuppbyggnad för en kritisk massa processingenjörer. Denna kompetensuppbyggnad har primärt skett under arbete med vardagsnära dimensioneringsuppgifter som utförts parallellt med de fem workshoppar som fokuserade på olika aspekter av processmodellering, kravställning och hållbarhet.

Dimensioneringsuppgifterna genomfördes enskilt som hemuppgifter, med en tydlig deadline för att kunna redovisa lärdomar på nästkommande workshop. Att tillämpa deadlines och att arbeta med vardagsnära frågeställningar var, enligt deltagarna, motiverande och avgörande för att avsätta tid i vardagen för denna typ av utvecklingsprojekt.

För att även fortsättningsvis **utveckla sin digitala kompetens** och bidra till **hela organisationens lärande** identifierade branschföregångarna några viktiga utmaningar som behöver hanteras:

- En generell kunskaphöjning och kunskapsspridning inom modellering efterfrågas. Detta rör branschen som helhet inklusive beställare, konsulter och entreprenörer för kontinuerlig utveckling av nya såväl som avancerade användare.
- Examensarbeten identifierades som en kritisk aktivitet för att både attrahera nyutexaminerade, men också för att bygga tillräcklig erfarenhet av processmodellering för att fortsatt kunna arbeta självständigt. I nuläget attraherar och konkurrerar examensarbeten med inriktning på AI med processmodellering.
- Det är önskvärt att det finns fler än en enskild person med modelleringskompetens inom den egna organisationen, i alla fall i de större VA-organisationerna. Det är även viktigt att hela organisationen är nyfiken på att nyttiggöra processmodellen genom att kontinuerligt identifiera praktiska relevanta frågeställningar, som leder till aktivt simulerande.
- Ett branschforum för kunskapsutbyte och kunskapsuppbyggnad saknas, vilket främst är viktigt för nybörjare som behöver komma över instegströskeln. De introduktionskurser som mjukvaruföretagen erbjuder ses som en effektiv introduktion för just nybörjare och bör ingå som en del i kunskapsuppbyggnaden.
- Det är viktigt att beställarna efterfrågar modellbaserade tjänster för att bibehålla och utveckla konsulternas kompetens.
- Modellutveckling inom akademien och mjukvaruföretagen är nödvändig för att processmodellerna ska vara tillförlitliga och tillämpbara för svenska förhållanden. Avancerad rening för mikroföroreningar är ett exempel på område som behöver ingå i standardbiblioteket för att på sikt bibehålla modellernas relevans som stödverktyg.

Projektet har tydligt visat att **ny digital teknik kräver ett förändrat arbetssätt**, i detta fall då processmodeller används för dimensionering. Den i projektet framtagna metodiken för modellbaserad dimensionering utgår från en aktiv beställare, med god förståelse för den egna organisationens krav, men även förståelse för vad en processmodell är, och hur den kan användas. Även om inget helt byggprojekt genomförts under projekttiden så visade Fallstudie 6 att processmodeller redan idag kan vara ett bra verktyg vid kravställning och framtagande av anbud. I samma fallstudie ledde insikter från den modellbaserade dimensionering till att vissa processmässigt utmanande villkor justerades i förfrågningsunderlaget. Detta visar på styrkan med att nyttja **processmodeller som kommunikationsverktyg** som förklarar konsekvenserna av olika reningskrav på investering och resursförbrukning. Det är möjligt att metodiken för modellbaserad dimensionering på samma sätt skulle kunna förenkla dialogen med tillsynsmyndigheten som beslutar om reningskrav, och i

förlängningen **underlätta myndighetens beslutsprocess** genom bättre beslutsunderlag. På samma sätt föreslog en av referensgruppens dimensioneringskonsulter att rörelsedata bör nyttjas tidigt i byggprocessen, redan vid framtagande av den grundläggande befolkningsprognosen. Då skulle rörelsedata kunna underlätta både kommunikation och beslutsfattande kring den framtida belastningen, vilket är centralt för en väl genomförd dimensionering.

Intresset för modellbaserad dimensionering är stort, vilket återspeglas av det stora antal deltagare (50 personer) som deltog på projektets slutseminarium. Konsulter från Sverige, Norge, Finland och Danmark var representerade, i många fall flera deltagare från en och samma konsultfirma. Även VA-organisationerna beskrev ett stort intresse för att bli mer digitala, där modeller sågs som framtida verktyg för en rad tillämpningar såsom

- driftoptimering av befintlig process
- val av optimal processkonfiguration vid ut/ombyggnad
- förstå driftproblem såsom försämrade sjunkegenskaper
- optimering av styrning
- utvärdera och jämföra nya processalternativ, både interna och externa förslag.

Sammantaget så ses processmodeller som ett verktyg som kan bidra till **ökad produktivitet och effektivitet**.

En förutsättning för det nya arbetssättet är en hög digital mognadsgrad hos beställarorganisation. Behovet av kompetensuppbyggnad är en utmaning som återkommande angavs som begränsande faktor för att både tillämpa modeller in-house, men även för att beställa externa tjänster. Den kompetensuppbyggnad som genomfördes hos Uppsala Vatten och Fallstudie 1 gav dem en möjlighet att "komma närmare processmodellering", vilket i detta fall krävde upplärning av en person under 1,5 år vid minst 50 % arbetstid. Detta visar att det är fullt möjligt att bygga upp digital kompetens om rätt förutsättningar skapas.

Den konsult som deltog i workshopparna som en branschföregångare håller på att förankra modeller som arbetsverktyg internt, vilket kan bidra till en **ökad innovationskraft** hos företaget inom just modellbaserade tjänster.

Sammanfattningsvis har projektet demonstrerat de praktiska möjligheterna med processmodeller som dimensioneringsverktyg genom att den utvecklade dimensioneringsmetodiken tillämpats av flera VA-organisationer och en konsult. Metodiken har skapat intresse i konsultledet, vilket är den grupp där kompetensuppbyggnad behöver ske när beställarorganisationerna efterfrågar modellstödda tjänster. Projektet har visat att det är möjligt på kort tid (1,5 år) att bygga upp intern modelleringskompetens om rätt förutsättningar skapas, vilket visar på en framtidspotential för en mer digital och effektiv samhällsbyggnation och VA-bransch.

## 6 Referenser

ATV A-131 ATV-DVWK, 2000, A 131E. Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. German Association for Water, Wastewater and Waste. GFA Publishing Company of ATV-DVW, Hennef, Germany.

Belia, E., Johnson, B., Benedetti, L., Bott, C. B., Martin, C., Murthy, S., Neumann, M. B., Rieger, L., Weijers, S. & Vanrolleghem, P. A. (2013) Uncertainty evaluations in model based WRRF design for high level nutrient removal.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C., Marais, G.v.R. and van Loosdrecht, M.C.M. (1999) Activated Sludge Model No. 2d, ASM2d. *Wat. Sci. Technol.* 39 (1), 165–182.

Hug, T., Benedetti, L., Hall, E.R., Johnson, B.R., Morgenroth, E., Nopens, I., Rieger, L., Shaw, A. och Vanrolleghem, P.A. (2009). Wastewater treatment models in teaching and training: the mismatch between education and requirements for jobs. *Water Sci. Technol.* 59 (4), 745-753.

Jeppsson, U., Pons, M.N., Nopens, I., Alex, J., Copp, J.B., Gernaey, K.V., Rosen, C., Steyer, J.P., Vanrolleghem, P.A. (2007). Benchmark Simulation Model No 2 - general protocol and exploratory case studies. *Water Sci. Technol.* 56 (8), 287-295.

Langergraber, G., Alex, J., Weissenbacher, N., Woerner, D., Ahnert, M., Frehmann, T., Halft, N., Hobus, I., Plattes, M., Spering, V., Winkler, S., 2008. Generation of diurnal variation for influent data for dynamic simulation. *Water Sci. Technol.* 57, 1483–1486. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.228>

Lindblom, E. & Samuelsson, O. (2021). Virtuellt driftsättning av styrsystem på reningsverk. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2399.

Lindblom, E. & Samuelsson, O. (2023). Comparison of guideline- and model-based WWTP design for uncertain influent conditions. *Water Science and Technology.* 87(1), 218-227.

Lindblom, E (2024). Modellbaserad dimensionering av biologisk fosforering – En fallstudie från Henriksdals reningsverk. Rapport U 217861, IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Stockholm, Sverige.

Lindblom, E. & Samuelsson, O. (2024). Towards model-based sizing of wastewater resource recovery facilities with transparent safety factors [Manuskript under arbete]. IVL Svenska Miljöinstitutet och Lunds Universitet.

Rivas, A., Irizar, I., Ayesa, E.(2008). Model-based optimisation of wastewater treatment plants design. *Environ. Model. Softw.* 23 (4), 435-450.

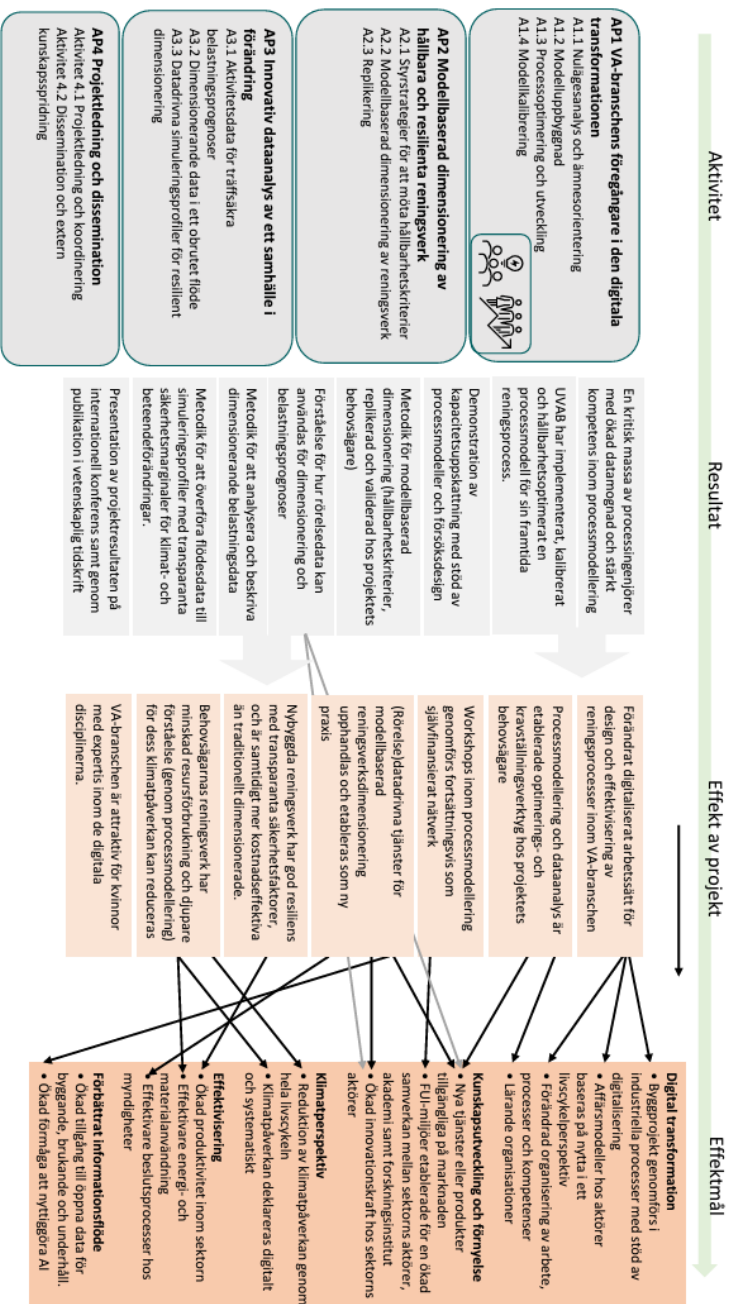
Samuelsson O., Lindblom E, Djupsjö K., Kanders L., and Corominas L. (2024) Mobility data for model-based plant design – [Opublicerat manuskript]. IVL Svenska Miljöinstitutet och Lunds Universitet.

Svenskt Vatten. (2023). Investeringsbehov och framtida kostnader för kommunalt vatten och avlopp - en analys av investeringsbehov 2022–2040. Rapport R2023-02, Svenskt Vatten AB, Stockholm, Sverige.

Wärff C., Ahlström M. and Arnell M. (2020). Processmodellering av avloppsreningsverk –Kunskapsspridning om ett kraftfullt verktyg för drift och design. Rapport SVU 2020-3, Svenskt Vatten AB, Stockholm, Sverige

Åmand, L., Andersson, S., Arnell, M., Oliveira, F., Rahmberg, M. och Junestedt, C. (2016). Nya utsläppskrav från svenska reningsverk - effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan. IVL Svenska Miljöinstitutet, Rapport B2246 samt SVU Rapport 2016-12 rev

# 7 Bilagor



Figur 2. Projektets effektlogik med aktiviteter och arbetspaket till vänster följer av resultat, direkta effekter av projektet, samt de kortsiktiga effektmål 2024 för Smart Built Environment som projektet bidrar till.







←  
**SMART BUILT  
ENVIRONMENT**  
→



Med stöd från



Strategiska  
innovations-  
program