



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 22024

Examensarbete 30 hp

Augusti 2022

Pilotstudie av källsorterande avloppslösning

Identifiering av systemlösning för källsorterat
avloppsavfall i Sydöstra staden i Uppsala

Linnea Ekblad

Referat

Pilotstudie av källsorterande avloppslösning

Linnea Ekblad

Utanför Uppsalas stadskärna planeras det att bygga en ny stadsdel till år 2050, kallad Sydöstra staden. Uppsala kommun vill vara i framkant gällande hållbar stadsplanering och är därför intresserade av att utreda möjligheter till att tillvarata resurser i avloppsvattnet, som ett alternativ till konventionell rening. I dagsläget står hanteringen av avloppsvatten inför nya typer av utmaningar som rör utsläpp av växthusgaser, bristande resursåtervinning och energieffektivitet samtidigt som kraven på rening ökar. Ett tillvägagångssätt som skulle kunna möjliggöra hantering av dessa utmaningar är genom implementering av källsorterande system. Ett källsorterande avloppssystem separerar vattenfraktionerna för enskild behandling, vilket möjliggör att resurser såsom energi och näringsämnen kan återvinnas. Syftet med arbetet var att kartlägga drivkrafter och utifrån dessa identifiera systemlösningar för källsorterat avloppsavfall i Sydöstra staden i Uppsala.

Genom studie gällande drivkrafter samt efterföljande workshop med en referensgrupp från Uppsala Vatten kunde möjliga drivkrafter för Uppsala identifieras: *Vattenbesparing, Uppfyllande av höga reningskrav, Resurseffektivitet vad gäller energi och näring, Kunskapsgivande samt Klimatneutralitet*. Identifiering av drivkrafter resulterade i litteraturstudie för att identifiera anläggningar med liknande drivkrafter som referensgruppen. Studien visade att drivkrafter likt de ovan nämnda resulterade i teknik såsom membranbioreaktor för rötning av källsorterat avloppsavfall.

Därefter, genomfördes intervjuer med personer som varit/är delaktiga i pilotprojekt i Sverige för att specificera vad som krävs för ett genomförande. I nuläget har det visat sig vara svårt att kräva implementering av ett källsorterande system med huvudsyfte att återföra produkter, då kretsloppsaspekten inte har varit ett tillräckligt juridisk motiv för genomförande. I Helsingborg underlättades genomförandet av en hög ambitionsnivå samt en tydlig målbild från kommunen.

Slutsats från arbetet är att systemlösningen som bäst lämpar sig för de identifierade drivkrafterna inkluderar rötning av källsorterat avfall i membranbioreaktor (AnMBR), samt urinsortering med efterföljande torkning. Beräkningar gällande en potentiell implementering resulterade i att pilotanläggningen i Sydöstra staden ska dimensioneras för 900 personer. Gällande systemet för behandling av urin, resulterade den dagliga urinproduktionen i att torkningsbädden bör ha en area motsvarande 30 m² alternativt 23 m² (beroende på torkningshastighet). För behandling av fekalier, fastställdes mått på membranreaktorn till radien 5 meter och höjden 11 meter, med volymen spolvatten som huvudsaklig orsak till den stora volymen.

Nyckelord: källsorterande avloppssystem, urinsortering, rötning, reningsverk

*Institutionen för energi och teknik, Sveriges Lantbruksuniversitet
Lennart Hjelmns väg 9, SE-75007 Uppsala*

Abstract

Pilot study of source separation sewage system

Linnea Ekblad

Outside the city center of Uppsala, a new district called "the Southeastern city" will be built by 2050. Uppsala municipality wants to be at the forefront of sustainable planning and is therefore interested in investigating opportunities to utilize resources found in wastewater, as an alternative to conventional treatment of wastewater. Wastewater management is facing new types of problems related to greenhouse gas emissions, resource recycling and energy efficiency. One approach that enables management of these challenges is through the implementation of source separation sewer systems, that separates the household wastewater into different fractions. This enables resources such as energy and nutrients to be recycled. The purpose of the work was to identify drivers and from these drivers identify a solution for source separated sewage fractions in the southeastern city of Uppsala.

Through a literature study followed by a workshop with Uppsala Vatten, possible drivers for Uppsala were determined to be *Water Saving*, *Fulfillment of purification requirements*, *Resource efficiency regarding energy and nutrition*, *Obtaining knowledge* and *Climate neutrality*. The determination of possible drivers resulted in further literature study, to identify facilities with similar drivers as Uppsala. The study showed that drivers as the ones identified for Uppsala have resulted in technology such as membrane bioreactor for digestion of source separated wastewater.

Interviews were also conducted with people who have been or are involved in pilot projects in Sweden to specify what is required for implementation of a source separation system. It is currently difficult to require the implementation of such system with the main argument of recycling products, as the recycle aspect has not been a motive enough juridically for implementation. In Helsingborg, the ambition and a clear vision from the municipality was crucial for the implementation.

In conclusion, the system best suited to the identified drivers include anaerobic digestion of source separated waste water in membrane bioreactor (AnMBR), as well as urine dehydration. Calculations were performed regarding a potential implementation resulted in that the treatment plant should treat wastewater from 900 people. For the treatment of urine, the daily urine production resulted in an area of the drying bed of 30 m² or 23 m² for varying drying rates. For treatment of faeces, dimensions of the membrane reactor were determined to radius 5 meters and 11 meters height, where the volume of flush water was the main reason for the large reactor.

Keywords: source separating sewage system, urine diversion, anaerobic digestion, wastewater treatment plant

Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences

Lennart Hjelm's väg 9, SE-75007 Uppsala, Sweden

ISSN 1401-5765

Förord

Detta examensarbete om 30 hp avslutar Civilingenjörsutbildningen i Miljö- och Vattenteknik vid Uppsala Universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet.Handledare har varit Jennifer McConville, forskare vid Institutionen för Energi och Teknik, Sveriges Lantbruksuniversitet. Annika Nordin, forskare vid Institutionen för Energi och Teknik vid Sveriges Lantbruksuniversitet, har varit ämnesgranskare. Fritjof Fagerlund, professor vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet, har varit examinator.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare, Jennifer McConville, för engagemang, råd och vägledning under arbetets gång. Ett tack även till min ämnesgranskare, Annika Nordin, för värdefull hjälp i arbetets slutfas. Jag vill även tacka Emma Björnberg, Anna Maria Sundin samt Lisa Fernius från Uppsala Vatten för ert intresse och deltagande under möten.

*Linnea Ekblad,
Uppsala 2022*

Populärvetenskaplig sammanfattning

Ett fungerande system för insamling och behandling av avloppsvatten från hushåll är en väsentlig funktion för ett samhälle. Majoriteten av de ämnen som finns i avloppsvattnet finns redan i vår omgivning på naturlig väg. Ett exempel på ämne som förekommer i avloppsvatten och har en negativ påverkan på miljön är organiskt material. För höga utsläpp av organiskt material kan resultera i att de närliggande vattendragen drabbas av övergödning och syrebrist. Idag står hanteringen av avloppsvatten inför nya typer av problem, som exempelvis rör växthusgasutsläpp och resursbrist (exempelvis gällande kemikalier). Ett sätt att hantera utmaningarna är att införa ett källsorterande avloppssystem, ett nytänkande alternativ till de konventionella systemen. Ett källsorterande avloppssystem innebär att avloppsvattnet från hushållen källsorteras i olika strömmar, exempelvis sorteras toalettvattnet från vattnet från bad, dusch och tvätt, men det är även möjligt att källsortera urin från fekalier. Detta möjliggör en mer effektiv rening av vattnet, då vatten från toalett kräver mer rening i jämförelse med exempelvis vattnet från dusch.

Utanför Uppsalas stadskärna kommer en ny stadsdel att byggas till år 2050 som kallas Sydöstra staden. Uppsala kommun är intresserade av att utreda om det finns nya möjligheter till att ta tillvara på ämnen som återfinns i avloppsvattnet från sydöstra stadsdelarna, exempelvis kväve och fosfor. Ett tillvägagångssätt att uppnå detta skulle kunna vara att installera ett källsorterande avloppssystem i Sydöstra staden, då detta möjliggör återvinning av resurser såsom näringsämnen och värme. I detta arbete undersöktes hur en pilotanläggning för ett källsorterande system i ett kvarter i Sydöstra staden skulle kunna se ut.

Först studerades vanligt förekommande drivkrafter till pilotanläggningar i andra städer i Europa. I en workshop med en referensgrupp från Uppsala Vatten diskuterades sedan möjliga drivkrafter till en eventuell implementering i Uppsala. Möjliga drivkrafter till Uppsala identifierades som: *Vattenbesparing, Uppfyllande av höga reningskrav, Resurseffektivitet vad gäller energi och näring, Kunskapsgivande samt Klimatneutralitet.*

Därefter följde ytterligare en litteraturstudie, men i denna studie identifierades i stället anläggningar vilka hade liknande drivkrafter som de ovan nämnda vid implementering. Två anläggningar, med liknade drivkrafter som Uppsala, valdes för djupare studier. Exempel på teknik som finns i dessa anläggningar är biogasreaktor med membranfiltrering.

Intervjuer med personer som varit och är delaktiga i projekt med källsorterande avloppssystem i Sverige intervjuades för att utreda vad som krävs för ett genomförande. I Helsingborg underlättades implementeringen av ett källsorterande system av att kommunen hade en hög ambitionsnivå samt att det fanns en tydlig vision under planeringsfasen. Det var även viktigt att besluta om det källsorterande systemet på politisk nivå, vilket uppfylldes genom kontakt med stadens politiker.

En systemlösning som överensstämmer med drivkrafterna som identifierats för Uppsala inkluderar sortering av urin med efterföljande torkning som behandlingsmetod, samt rötning av källsorterat toalettavfall exklusive urinen i en membranreaktor.

Som sista del i arbetet genomfördes beräkningar gällande den potentiella anläggningen i Uppsala. Angående skala på systemet, resulterade beräkningarna i att anläggningen ska dimensioneras för 900 personer. Vidare, beräknades det även att en yta motsvarande 30 m² alternativt 23 m² (beroende på tid för torkning av urinen) kommer att krävas för behandling av urin från ett kvarter av denna storlek. Gällande fekalier, krävdes det att bioreaktorn för behandling av det resterande vattnet från toalett (alltså exklusive urinen) hade 5 meters radie samt 11 meters höjd. Anledningen till den stora volymen av reaktor beror på spolvattnet, då toalettmodellen som valdes till beräkningarna inte är snålspolande.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	2
1.2	Frågeställningar	2
1.3	Avgränsningar	2
2	Bakgrund	3
2.1	Källsorterande avloppssystem	3
2.2	Juridiska aspekter	4
2.3	Uppsala	5
2.3.1	Utsläppskrav för Kungsängsverket	5
2.3.2	Sydöstra staden	6
2.4	Tidigare studie	8
3	Arbetsgång	9
4	Drivkrafter till källsorterande anläggningar	10
4.1	Metod	10
4.1.1	Framtagande av underlag till Workshop 1	10
4.1.2	Workshop 1	10
4.2	Resultat - Underlag till Workshop 1	11
4.3	Resultat Workshop 1	13
5	Systemlösningar och teknik i källsorterande anläggningar	15
5.1	Metod	15
5.1.1	Framtagande av underlag till Workshop 2	15
5.1.2	Workshop 2	15
5.2	Resultat - Underlag till Workshop 2	16
5.2.1	Sammanställning av teknik i anläggningarna	16
5.2.2	Biogasprocessen	17
5.2.3	Biogasreaktorer	18
5.2.4	Rötning av brunvattenfraktionen	20
5.2.5	Urinsortering	22
5.2.6	Nanofiltrering för behandling av grävatten	24
5.3	Resultat Workshop 2	25
5.4	Resultat - Teknikernas uppfyllande av drivkrafter	26
6	Intervjuer	27
6.1	Metod	27
6.1.1	Intervju 1	28
6.1.2	Intervju 2	28
6.2	Resultat	28
6.2.1	Sammanställning av resultat från intervjuer	28

7	Framtagande av förslag till pilotanläggning	29
7.1	Metod	30
7.1.1	Skala	30
7.1.2	Beräkningar - Urin	31
7.1.3	Beräkningar - Fekalier	33
7.1.4	Känslighetsanalys	35
7.2	Resultat	35
7.2.1	Skala	35
7.2.2	Sammanställning av beräknade parametrar för urin och fekalier	37
7.2.3	Känslighetsanalys	38
8	Diskussion	38
9	Slutsats	44
A	Appendix	I
A.1	Presentation - Workshop 1	I
A.2	Komplett underlag - Workshop 2	IV
A.2.1	Tekniker i befintliga anläggningar med drivkrafter likt Uppsala	IV
A.2.2	Tekniker för rötning av källsorterat avloppsavfall	VI
A.2.3	Tekniker för behandling av gråvatten	X
A.3	Intervjufrågor	XIII
A.4	Intervju 1	XIV
A.5	Intervju 2	XVI
A.6	Beräkning av biogaspotential	XVII
A.7	Sammanställning av parametrar	XIX

Ordförklaring

- Brunvatten: avloppsfraktion från toalett exklusive urin
- COD: syre som krävs för kemisk oxidation av organiska föreningar i avloppsvattnet
- Gråvatten/BDT-vatten: avloppsvatten från bad, disk och tvätt
- Personekvivalenter, pe: föroreningsbelastningen för en person (används vid dimensionering)
- Svartvatten: avloppsvatten från toalett

1 Inledning

Ett fungerande system för insamling och hantering av avloppsvatten är en väsentlig funktion för ett samhälle. Det finns över 2000 kommunala avloppsanläggningar i Sverige med syfte att rena vattnet (Naturvårdsverket n.d.[a]). Sveriges avloppshantering kan kopplas till ett antal av de nationella miljömålen, exempelvis god grundvattenkvalitet, levande vattendrag och sjöar samt ingen övergödning. Miljömålen motsvarar utgångspunkter för hur det nationella arbetet gällande hantering av avloppsvatten ska ske (Naturvårdsverket n.d.[b]).

Utöver mål på nationell nivå, måste Sverige även förhålla sig till strategier och regler på internationell nivå. För att nå social, miljömässig och ekonomisk hållbar utveckling antog FN år 2015 en agenda med globala mål, vilken fick namnet Agenda 2030. Det är särskilt två mål som direkt kan kopplas till avloppshantering i Agenda 2030. Mål nummer 11, som handlar om hållbara städer och samhällen, beskrivs som att städer ska sträva mot att bli säkra och motståndskraftiga, inkluderande samt hållbara (Wiklander et al. 2021). Vidare finns även mål nummer 6, som rör sanitet och rent vatten. Detta mål innefattar att en förvaltning av vatten samt sanitet ska finnas tillgänglig för alla och ske på ett hållbart sätt (UNDP 2021).

Majoriteten av de ämnen som återfinns i avloppsvattnet finns redan i vår omgivning naturligt. De kan dock komma att bli föroreningar då de förekommer på fel plats, eller i för stor mängd. Ett exempel är organiskt material, som förekommer i avloppsvatten och har en negativ påverkan på miljön. För höga utsläpp av organiskt material kan bidra till övergödning samt syrebrist i recipient. En otillräcklig hantering av avloppsvattnet kan ge upphov till sjukdomsspridning. Avloppsvattnet innehåller dock även organiska ämnen som kan nyttjas som resurser, exempelvis kväve, fosfor samt kalium (Naturvårdsverket n.d.[c]).

I dagsläget står hanteringen av avloppsvatten inför strängare krav som rör utsläpp av växthusgaser, brist på resurser såsom kemikalier och energieffektivitet, i kombination med långtgående krav på rening. Ett tillvägagångssätt som skulle kunna möjliggöra hantering av dessa utmaningar är implementering av källsorterande system. Dessa typer av system innebär att avloppsvattnet från hushåll fraktioneras i enskilda strömmar, vilket möjliggör en mer effektiv näringsåterförsl i jämförelse med det konventionella systemet exempelvis på grund av att strömmarna blir mer koncentrerade. Vanligtvis fokuserar dessa system på separat insamling av svartvatten, gråvatten och i vissa fall även matavfall. Dessa källsorterande strömmar ökar potentialen för återanvändning av vatten, återvinning av näringsämnen och utvinning av energi (Kjerstadius, Haghigatafshar & Davidsson 2015).

Utanför Uppsalas stadskärna planeras det att bygga en ny stadsdel, kallad Sydöstra staden, till år 2050. Uppsala kommun vill ligga i framkant gällande hållbar framtidsplanering och är därför intresserade av att utreda möjligheter till att tillvarata resurser som återfinns i avloppsvattnet från bland annat Sydöstra staden (Uppsala kommun 2021). Ett alternativt angreppssätt till konventionell rening är att urin samt fekalier i avloppsvattnet hanteras som resurser (Langergraber & Günter 2004). Detta resulterar exempelvis i minskad mängd handelsgödsel producerat på syntetiskt vis. Framställning av gödselmedel från urin samt fekalier kan genomföras på ett mer skonsamt vis för miljön i jämförelse med framställningen av konstgödsel och resulterar även i ökad potential till ett cirkulärt samhälle (Karlsson 2019).

Utvecklingsarbetet i Uppsala kommun ska alltså uppfylla mål på regional, nationell samt europeisk nivå, och säkerställa att utvecklingen av staden kommer att ske i linje med de globala målen för Agenda 2030. Uppsala kommun har som regionalt mål att år 2030 vara en kommun med fossilfri välfärd för att sedan bli klimatpositivt år 2050. För att kommunen ska kunna uppfylla dessa mål krävs det att en omställning sker i snabbare takt än nuvarande. För att öka takten krävs förändringar dels gällande hur kommunen och dess invånare producerar och konsumerar, men även hur invånarna bor. De sydöstra stadsdelarna kommer därför utgöra en betydande del i Uppsalas strävan mot att år 2050 vara en klimatpositiv stad. Byggnationen av den nya stadsdelen kommer även ge möjlighet till att undersöka och eventuellt utveckla nya typer av lösningar som därefter kan skalas upp och implementeras exempelvis i andra delar av Uppsala kommun (Wiklander et al. 2021).

Ett möjligt första steg mot att uppfylla kommunens framtida mål skulle kunna vara att installera en pilotanläggning för behandling av källsorterat avloppsavfall i Sydöstra staden för att undersöka systemet. Mot bakgrund av detta, var målet med projektet att ta fram ett förslag till hur en pilotanläggning i Uppsalas sydöstra delar skulle kunna se ut.

1.1 Syfte

Syftet med arbetet var att kartlägga drivkrafter och utifrån dessa identifiera systemlösningar för källsorterat avloppsavfall i Sydöstra staden i Uppsala.

1.2 Frågeställningar

Syftet med arbetet uppfylldes genom att besvara fem frågeställningar som listas nedan.

- Vilka drivkrafter förekommer vid implementering av källsorterande anläggningar?
- Vilka drivkrafter har Uppsala för eventuell pilotanläggning i Sydöstra staden?
- Vilken typ av källsorterande system överensstämmer med Uppsalas drivkrafter?
- Vad krävs för ett genomförande av en pilotanläggning? Exempelvis tillstånd, resurser och organisation.
- Hur skulle en pilotanläggning för Sydöstra staden dimensioneras?

1.3 Avgränsningar

VA-systemet som utreds och föreslås i detta arbete kommer att behöva kompletteras, exempelvis gällande lösningar för insamling av dagvatten. För en grundlig studie av de olika tekniska lösningarna för behandling av avloppsvatten, under den givna tidsramen, utelämnades sådana lösningar som inte direkt rör avloppssystemet i hushållen. Systemet innefattar alltså endast hushållen samt efterbehandling av fraktionerna. Under dimensionering exkluderades ledningsdragning från fastigheten till rening i beräkningarna. Anledningen till detta är att företaget Ramböll har fått i uppdrag av Uppsala kommun att undersöka detta. Vidare utelämnades även eventuell transport samt hantering av avfall hos lantbrukare i arbetet.

2 Bakgrund

I avsnittet redovisas information om källsorterande avloppssystem samt juridiska aspekter som kan hindra implementering. Utöver detta presenteras ett avsnitt om Uppsala och Sydöstra staden samt tidigare studie som gjorts för Uppsala kommun gällande den framtida avloppshantering.

2.1 Källsorterande avloppssystem

I Sverige finns ett antal källsorterande avloppssystem i drift (Kärrman et al. 2017). I Helsingborg finns ett källsorterande avloppssystem implementerat i stadsdelen Oceanhamnen som kallas ”Tre rör ut”, där insamling av svartvatten, gråvatten samt matavfall sker separat. Därefter, skickas dessa fraktioner via ledningar till en utvecklingsanläggning kallad ”Reco Lab” för behandling av de separata strömmarna (NSVA 2019). Vidare, finns ett system implementerat i Munga, Västerås, med två separata ledningar, en för svartvatten och en för gråvatten. Svartvattnet transporteras till tankar för hygienisering och därefter lagring, medan gråvattnet renas i markbädd för att sedan släppas ut i närliggande recipient (MälarEnergi 2018). Liknande system finns även i Hölö, Södertälje, där insamling av svart- och gråvatten sker separat. Gråvatten behandlas sedan genom markinfiltration. Gällande svartvattnet, sker insamling genom slamsugningsbil som sedan transporterar vattnet till en lokal behandlingsanläggning där det renas genom våtkompostering (Telge 2022). Det planeras dessutom för implementering av ett källsorterande avloppssystem i de etapper av Norra Djurgårdsstaden som kvarstår, som beräknas att vara färdigställt år 2025 (Stockholms stad 2020).

Intresset för källsorterande system i urban miljö i norra Europa var stort redan på 90-talet, men under 2010-talet har intresset ökat ytterligare. Antalet pilotanläggningar med innovativa avloppssystem i urbana områden har ökat i norra Europa. Dessutom, finns det fler områden planerade och även under byggnation. De nya pilotanläggningarna är inriktade på källsortering av svartvatten från gråvatten, för att sedan hantera strömmarna i ett lokalt reningsverk vilket resulterar i bättre resursåtervinning. Dessutom, kan även matavfall från hushållen samlas in genom att matavfallskvarnar installeras i hushållen. Detta resulterar exempelvis i lägre utsläpp av växthusgaser då hanteringen av avfall som sker med lastbilar minskar (Skambraks et al. 2016). Det har länge varit en självklarhet att vatten används som det primära transportmedlet för att hantera avloppsavfall. Källsorterande system, till skillnad från de konventionella, resulterar bland annat i minskad vattenanvändning, möjlig återföring av värdefulla näringsämnen, minskade utsläpp av växthusgaser samt ökad biogaspotential. Att ersätta dagens konventionella avloppssystem med källsorterande sådana ökar potentialen att återanvända vatten, utvinningen av biogas kan ökas med 50 %, återvinning av värme kan ökas med 70 % samt att renare restprodukter med återföringssyfte erhålles. Dessutom kan utsläppen av växthusgaser per person och år minskas med 250 kg (MACRO n.d.). Dessa argument är endast ett urval av fördelar som följer med implementering av ett källsorterande system.

Gällande metod för källsortering av svartvatten är vakuumenteknik en av de vanligast förekommande i urbana områden för att transportera fraktionen. En av fördelarna med vakuumsystemet är att uppsamlingen av svartvatten sker utan vatten som det primära transportmediet. Detta resulterar i att den lokala sötvattenförbrukningen minskar då systemen övergår till mindre vattenintensiva system för att transportera avloppsfraktioner (Skambraks et al. 2016).

Utöver vakuumpoletter, förekommer även urinsorterande vattentoaletter som möjliggör insamling av urin samt fekalier separat (Petersens & Granath 2015). En av anledningarna till installation av den urinsorterande toalettmodellen är minskningen av näringsämnen som släpps ut i recipient (Avloppsguiden n.d.).

Kunskap gällande det avfall som transporteras i ledningssystem till reningsanläggning är en grundläggande förutsättning för att utveckla och designa ett lämpligt reningssystem. Den kemiska sammansättningen av urin och fekalier är exempel på nyckelfaktorer som bör undersökas vid implementering av en reningsanläggning (Rose et al. 2015).

2.2 Juridiska aspekter

Miljöbalkens huvudsyfte är att främja hållbar utveckling som resulterar i att nuvarande samt kommande generationer försäkras en god och hälsosam miljö (Riksdagsförvaltningen 1998). Främjandet av hållbar utveckling innebär alltså att mark, vatten och fysisk miljö ska förvaltas för de kommande generationerna. I Miljöbalken 2 kap. redovisas de *Allmänna hänsynsreglerna*, vilka fungerar som vägledning och reglerar samtlig verksamhet och samtliga åtgärder som kan strida mot målen som beskrivs i Miljöbalken 1 kap. Exempelvis har alla som bedriver en verksamhet skyldighet att skaffa kunskap som behövs för att avgöra hur miljön och människors hälsa kan påverkas och skyddas, använda bästa möjliga teknik för att minska och förebygga skador samt hushålla med energi och råvaror (Folkhälsomyndigheten 2020).

Enligt Miljöbalken definieras utsläpp av avloppsvatten enligt följande:

9 kap. Miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd

1 § Med miljöfarlig verksamhet avses

1. utsläpp av avloppsvatten, fasta ämnen eller gas från mark, byggnader eller anläggningar i mark, vattenområden eller grundvatten (Riksdagsförvaltningen 1998).

Definitionen av avloppsvatten återfinns i samma kapitel:

2 § Med avloppsvatten avses

1. spillvatten eller annan flytande orenlighet (ibid.).

De tre mest centrala lagar, som hantering av avloppsvatten regleras av, är miljöbalken (MB), plan- och bygglagen (PBL), samt lagen om allmänna vattentjänster (LAV). Eftersom skillnaderna mellan ett konventionellt och ett källsorterande avlopp är många, kan även de juridiska förutsättningarna skilja sig mellan dessa. Enligt LAV, är kommunen skyldig att organisera en försörjning av vatten samt avlopp om det krävs för att skydda människors hälsa eller miljö. Det är inte helt tydligt att det mot bakgrund av detta går att motivera en eventuell implementering av ett källsorterande avloppssystem. Däremot ska en allmän anläggning för hantering av avloppsvatten ordnas och drivas på ett sätt så att de krav som ställs för att skydda människors hälsa och miljön uppfylls samt avseende en god hushållning av naturresurser (10 § LAV samt 2 kap. 5 § MB) (Riksdagsförvaltningen 1998, 2006). Dessa krav skulle kunna styra valet mot ett källsorterande avloppssystem (Kärrman et al. 2017).

I Mark- och miljödomstolen har två rättsfall gällande urinsortering diskuterats i Vänersborgs tingsrätt. I det ena rättsfallet, mål M 245-11, accepterades kravet på urinsortering från kommunens sida av Mark- och miljödomstolen, men med anledning av att reningsmetoden minskar risken för utsläpp av näringsämnen till recipient och alltså inte på grund av aspekten med resurshushållning. I det andra rättsfallet, mål M 487-11, hade kommunen ett väl fungerande återföringssystem för urin och en fastighetsägare förelades implementering av ett urinsorterande system. Mark- och miljödomstolen beslutade i detta fall att det inte är allmänt förekommande med krav på urinsortering, som även medför en väsentlig ökning av kostnader för verksamhetsutövaren. Det krävs att de lokala förhållandena är särskilt lämpade för en sådan åtgärd för att dessa krav ska kunna anses rimliga. En hänvisning till kretsloppsaspekten utgör inte ett tillräckligt underlag för detta (Havs- och Vattenmyndigheten 2017). Budskapet från dessa två domslut indikerar att det i nuläget inte går att kräva implementering av ett källsorterande avloppssystem i syfte att återföra avloppsprodukter. En av de främsta faktorerna till detta är att tekniken fortfarande inte är tillräckligt etablerad. Enligt Miljöbalken kategoriseras källsorterande avloppsfraktioner som hushållsavfall. Mot bakgrund av detta, har kommunen skyldighet att omhänderta dessa. Det finns dock kommuner i Sverige som inte har ett hanteringssystem för källsorterande fraktioner ännu, alternativt att kommunerna förlitar sig på att urinflaktionen från urinsorterande hushåll omhändertas på tomten hos den enskilde fastighetsägaren. Sammanfattningsvis, är det betydelsefullt att inrätta system för att kunna omhänderta och dra nytta av de källsorterande avloppsfraktionerna. Detta kommer att resultera i kompletta källsorterande system, både i praktiken samt även i lagstiftning (Kärroman et al. 2017).

En tydlig ansvarsfördelning vid implementeringen av ett källsorterande system kan underlätta processen. I fallet för H+, Helsingborg, diskuterades detta kontinuerligt mellan NSVA (VA-bolaget) samt NSR (avfallsbolaget). Juridiska aspekter såsom taxor, förbindelsepunkter och verksamhetsområde är inte självklara gällande ansvarsfördelning. I Helsingborg är det staden som äger ledningarna samt behandlingsanläggningen. Dock äger NSR matavfallsledningen från bostadsområdet. NSVA har ansvaret gällande drift och underhåll för de tre ledningarna, men fakturerar NSR för kostnaden som genereras vid drift och hantering av matavfallet. Denna ansvarsfördelning ordnades mellan NSVA och NSR i ett avtal dem emellan (ibid.).

2.3 Uppsala

I avsnittet presenteras lagstiftning gällande utsläppskrav som Kungsängsverket i Uppsala måste förhålla sig till. Dessutom redovisas bakgrundinformation om Sydöstra staden i Uppsala.

2.3.1 Utsläppskrav för Kungsängsverket

Eftersom utsläpp av avloppsvatten betraktas som en miljöfarlig verksamhet finns Naturvårdsverkets föreskrifter gällande rening av avloppsvatten med ursprung i tätbebyggelse. Dessa föreskrifter redovisar de begränsningsvärden som anläggningar med mer än 2000 personekvivalenter (pe), måste förhålla sig till (Abrahamsson & Ljunggren 2008).

Kungsängsverket är ett avloppsreningsverk beläget i sydöstra delen av Uppsala, i området Kungsängen och nära Fyrisån (Uppsala Vatten och Avfall AB 2019). Spillvatten från 200 000 personer renas innan det släpps ut i Fyrisån (Uppsala Vatten och Avfall AB n.d.).

Reningskraven omfattar kväve, fosfor och organiskt material där villkoren beskrivs i verksamhetens miljötillstånd (Uppsala Vatten och Avfall AB n.d.). Från en miljösynpunkt bidrar verksamheten exempelvis till utsläpp av luftföroreningar (metan, lustgas och lukt), utsläpp av avloppsvatten, transporter och förbrukning av energi samt råvaror. Den viktigaste påverkansaspekten att kontrollera är utsläpp till recipient (i fallet för Uppsala motsvarar detta Fyrisån), då reningen inte avlägsnar alla föroreningar fullständigt (Uppsala Vatten och Avfall AB 2019). År 2004 fastställde länsstyrelsen i Uppsala villkor gällande utsläpp av fosfor till recipient, vilket motsvarar 0,25 mg/liter. Vidare, får det sammanslagna utsläppet av avloppsvatten per år maximalt motsvara ett utsläpp av 5 ton fosfor/år. Angående kväve, är det Naturvårdsverkets föreskrifter gällande kontroll och rening av avloppsvattenutsläpp från tätbebyggelse som måste uppfyllas (NFS 2016:6). För Kungsängsverkets fall motsvarar detta att den högsta koncentrationen av kväve till recipient får vara 10 mg/liter. Alternativt att kvävereningen på Kungsängsverket åtminstone uppnår 70 % reduktion (ibid.). Att uppfylla dessa reningskrav och tillhandahålla en hög reningskapacitet med uppfyllande av miljökrav på en sådan typ av verksamhet är en primär aspekt för Uppsala Vatten (Carlén et al. 2019). En omfattande om- och tillbyggnation av Kungsängsverket pågår för att möta behovet av rening av spillvatten i en växande stad, där belastningen förväntas öka till 330 000 pe år 2050. Reningsverket kommer i samband med utbyggnationen bland annat kompletteras med ett nytt reningssteg för avskiljning av mikroföroreningar. En tillståndsansökan för den utökade verksamheten är inskickad i maj 2020 och tillståndsprocessen pågår (Miljöförvaltningen Uppsala kommun 2021). En pilotanläggning för behandling av källsorterat avloppsavfall skulle omfattas av krav på en egen anmälan enligt Miljöbalken, där det exempelvis skulle ställas krav på rening av de olika fraktionerna innan utsläpp. Det är inte självklart att reningskraven för den eventuella pilotanläggningen kommer att vara desamma som för Kungsängsverket eftersom pilotanläggningens anmälan kommer prövas separat utifrån den sökta verksamhetens miljöpåverkan och utsläpp¹.

2.3.2 Sydöstra staden

Sydöstra staden utgör en drivande kraft dels i utvecklingen av Uppsala stad, men även till att bidra till en mer hållbar utveckling av både staden och regionen i stort. I området är det planerat för utbyggnad av cirka 25 000 bostäder med gröna lösningar för bland annat infrastrukturen (Johansson & Albinsson 2020).

Uppsala är Sveriges fjärde största kommun med över 230 000 invånare, inklusive cirka 50 000 invånare på landsbygden. Kommunen ligger i den snabbt expanderande huvudstadsregionen och har höga ambitioner vad gäller låg klimatpåverkan, hållbarhet samt en inkluderande stadsutveckling. Ett flertal nytänkande projekt är under planering. Huvudsyftet i många av dessa projekt är att under planeringsfasen identifiera innovativa lösningar med global hållbarhet som fokus som kan tillämpas i ett senare skede. Ett av dessa pågående projekt är utformningen av Sydöstra staden i Uppsala, se Figur 1. Uppsala kommuns målsättning med sydöstra stadsdelen är att utvecklingen även ska skapa mervärden för befintliga stadsdelarna omkring. Detta, för att skapa förutsättningar för ett mer integrerat och sammanlänkat Uppsala (Wiklander et al. 2021).

¹Emma Björnberg, Utredningsingenjör, Uppsala Vatten och Avfall AB, mail, 2022-06-10



Figur 1: Approximativ kartbild över området Sydöstra staden i Uppsala. De bredare blå linjerna avgränsar området (Lantmäteriet 2022).

Sydöstra staden ligger mellan Arlanda och de centrala delarna av Uppsala (drygt 5 km från stadskärnan). Planområdet avgränsas i norr och nordost av Sävjaån, i öster av E4:an, i söder och sydost av Knivsta kommungräns samt Norra Lunsen naturreservat och i väster i huvudsak mot Årike Fyris naturreservat (Wiklander et al. 2021).

Uppsala kommun upprättade 2016 en översiktsplan vilken är utgångspunkten för utvecklingen av de sydöstra stadsdelarna (ibid.). I översiktsplanen beskrivs de fysiska förutsättningar som finns för utbyggnad och ramar in vad som kan tänkas vara möjligt och lämpligt att bygga. Det beskrivs även hur staden, samt omkringliggande tätorter, kan fortsätta expandera på kort- samt lång sikt, fram till 2050. Målbilden för år 2050 gällande vatten och avlopp är att Uppsala ska ha en ”sammankopplad vatten- och grönstruktur” samt att ”systemen för distribution av el, vatten, avlopp, avfall och värme hänger ihop”. Gällande de tekniska försörjningssystemen, är målen enligt översiktsplanen för de sydöstra stadsdelarna följande (ibid.):

- En klimatpositiv stadsmiljö som stöds av nytänkande tekniska försörjningssystem
- En resurseffektiv teknisk försörjning som skapar cirkulära flöden
- Flexibla försörjningssystem som möjliggör utveckling av framtida tekniska lösningar.

Vidare, beskrivs planeringsinriktningarna för vatten och avlopp enligt nedanstående punkter (Wiklander et al. 2021):

- System för avlopp och avfall ska sammankopplas med energiproduktion och materialåtervinning
- System för vatten och avlopp ska hushålla med rent vatten, samt ge bidrag till näringsämnesutvinning
- Eftersträvan att samarbeta med närliggande lantbrukare för ett cirkulärt flöde.

Försörjningssystemen ska, som punkterna ovan beskriver, vara cirkulära, där lösningar för energilagring och -produktion, sopsortering samt avloppshantering gemensamt ska ingå i ett kretslopp, som ett sätt att nå klimatmålen i Agenda 2030. I det tänkta kretsloppssystemet ska restströmmarna omvandlas, genom den cirkulära hanteringen av avlopp och avfall, till exempelvis rent vatten, gödsel och näringsämnen för återföring till jordbruket, el och värme till energisystemet samt nytt material och nya produkter. Väsentligt är, för att kunna nyttja de potentiella synergier mellan de tekniska försörjningssystemen, att planeringsprocesser samordnas i ett tidigt skede. Därmed är ett beslut från kommunen gällande implementering av dessa tekniska system avgörande för hur väl utformningen av sydöstra stadsdelarna kommer att stämma överens med Uppsala kommuns målbild (ibid.).

2.4 Tidigare studie

Företaget Ecoloop har genomfört en förstudie gällande den framtida avloppsförsörjningen i sydöstra Uppsala samt Knivsta innehållande underlag till framtida vägval vid implementering. I studien beskrivs dels hur den nuvarande avloppsförsörjningen ser ut i kommunerna, men det presenteras även ett antal alternativa lösningar för de kommande stadsdelarna som listas nedan (Johansson & Albinsson 2020):

Alternativ 1: Källsortering av svartvatten samt hygienisering med lokal rening av gråvatten

Alternativ 2: Källsortering av svartvatten och gråvatten med behandling likt H+ i Helsingborg

Alternativ 3: Avancerad rening av blandat spillvatten samt produktion av vatten med återvinningskvalitet

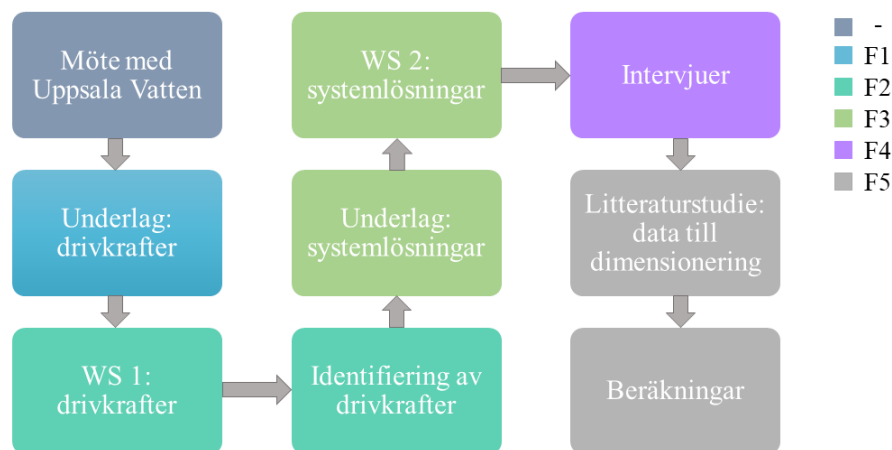
Alternativ 4: Rening av blandat spillvatten i syfte att producera gödsel samt renat vatten.

De alternativa avloppslösningarna i studien uppfyller de krav som ställdes i studien, nämligen att lösningen ska vara hållbar, robust, realiserbar, skalbar, tillräckligt beprövad samt innovativ om så möjligt. Hos både VA-bolag och Knivsta respektive Uppsala kommun finns en ambition och ett intresse gällande hållbarhetsaspekterna för en framtida rening av avloppsvatten. Kommunerna står i nuläget inför komplexa beslut i vilka nyttan av de källsorterande avloppslösningarna måste vägas mot utmaningen att hur den nya avloppslösningen kommer att se ut är ännu inte bestämt i vare sig Uppsala eller Knivsta kommun (ibid.).

Samtliga av de ovan nämnda alternativen till konventionell avloppsvattenrening har potential att kunna bli framgångsrika, särskilt vad gäller hushållning av resurser. Samtidigt finns det fortfarande en brist på kunskap och erfarenhet gällande de alternativa systemlösningarna vilket tyder på att en pilotanläggning är väsentlig för att utreda dessa obesvarade frågor och erhålla ett tydligare beslutsunderlag. Som fortsatt arbete gavs kunskapshöjande förslag. Exempel på ett sådant förslag är att anordna workshops med tekniklösningar (ibid.), vilket inspirerade till detta arbete och fastställde metodens upplägg.

3 Arbetsgång

Arbetet har inneburit en iterativ arbetsgång, där studien har utformats genom upprepade workshops och mailkonversationer med en referensgrupp från Uppsala Vatten. Arbetsgången illustrerades med hjälp av ett flödesschema, se Figur 2. Arbetet inleddes med ett avstämningsmöte med referensgruppen, där slutsats kunde dras att möjliga drivkrafter för Uppsala måste identifieras för fortsatt arbete. Detta resulterade i det första litteratursöket samt första workshopen, som svarade på den första frågeställningen (*Vilka drivkrafter förekommer vid implementering av källsorterande anläggningar?*) genom litteratursök, samt andra frågeställningen (*Vilka drivkrafter har Uppsala för eventuell pilotanläggning i Sydöstra staden?*) genom diskussion under workshopen. Efter den första workshopen med referensgruppen kunde möjliga drivkrafter för Uppsala identifieras. Detta resulterade i en litteraturstudie som i stället rörde systemlösningar i anläggningar med drivkrafter likt de som identifierats, som svar på den tredje frågeställningen (*Vilken typ av källsorterande system överensstämmer med Uppsalas drivkrafter?*). Under den andra workshopen presenterades olika systemlösningar samt tekniker som sedan följdes av diskussion. Därefter, genomfördes intervjuer med personer som varit/är delaktiga i pilotprojekt i Sverige, efter önskemål från referensgruppen, för att specificera vad som krävs för ett genomförande som svar på den fjärde frågeställningen (*Vad krävs för ett genomförande av en pilotanläggning?*). Avslutningsvis, genomfördes beräkningar gällande en potentiell implementering av en pilotanläggning för ett källsorterande system i ett kvarter i Sydöstra staden för att besvara den femte frågeställningen (*Hur skulle en pilotanläggning för Sydöstra staden dimensioneras?*).



Figur 2: Arbetsprocessens iterativa upplägg där blocken är färgade efter vilken frågeställning de svarar på. F1 är förkortning för den första frågeställningen (*Vilka drivkrafter förekommer vid implementering av källsorterande anläggningar?*), F2 för den andra frågeställningen (*Vilka drivkrafter har Uppsala för eventuell pilotanläggning i Sydöstra staden?*), F3 för den tredje frågeställningen (*Vilken typ av källsorterande system överensstämmer med Uppsalas drivkrafter?*), F4 för den fjärde frågeställningen (*Vad krävs för ett genomförande av en pilotanläggning?*) och F5 för den femte frågeställningen (*Hur skulle en pilotanläggning för Sydöstra staden dimensioneras?*).

I kommande avsnitt, 4 *Drivkrafter till källsorterande anläggningar*, 5 *Systemlösningar och teknik i källsorterande anläggningar*, 6 *Intervjuer* samt 7 *Framtagande av förslag till pilotanläggning*, presenteras metod och resultat utifrån denna arbetsgång.

4 Drivkrafter till källsorterande anläggningar

I nedanstående avsnitt presenteras metod och resultat för den första etappen i arbetet som innebar identifiering av drivkrafter för pilotanläggningar i Europa samt tänkbara drivkrafter för Uppsala.

4.1 Metod

För att identifiera drivkrafter till källsorterande anläggningar samt genomfördes en litteraturstudie. Dessutom hölls en efterföljande workshop med Uppsala Vatten för att identifiera drivkrafter för Uppsala utifrån de tre deltagarnas profession och kunskaper.

4.1.1 Framtagande av underlag till Workshop 1

Det inledande steget i arbetet gällde drivkrafter till implementering av källsorterande system. Som förberedelse inför workshopen studerades drivkrafter som varit grundläggande vid införandet av pilotanläggningar i Europa. Detta gjordes genom att utgå från en rapport av Skambraks et al. (2016), i vilken drivkrafter till fem anläggningar i Europa har undersökts. Utifrån denna rapport, återfanns drivkrafter för anläggningarna. Utöver detta, studerades de fem anläggningarnas systemlösningar för hantering av källsorterat avloppsavfall genom litteratursök (utöver rapporten av Skambraks et al.). Detta, för att undersöka vilken teknik för insamling av källsorterat avfall som drivkrafterna har resulterat i. Exempelvis studerades typ av system för uppsamling av avfall, vilka fraktioner som behandlas samt vilka produkter som erhålles efter behandling.

4.1.2 Workshop 1

Underlaget presenterades sedan under en workshop med Uppsala Vatten, med målet att identifiera möjliga drivkrafter för Uppsala. Medverkande under workshopen var tre personer från Uppsala Vatten, nämligen Emma Björnberg, Anna Maria Sundin samt Lisa Fernius, som hädanefter benämns "referensgrupp".

Inför workshopen förbereddes en PowerPoint-presentation med underlaget som tidigare tagits fram gällande drivkrafter, se Appendix A.1 för PowerPoint-presentationen. Presentationen innehöll en beskrivning av respektive anläggning, drivkrafter som erhållits från studien av Skambraks et al. (2016), samt en skiss av anläggningarnas systemlösning. Vidare, förbereddes frågor i röstningsverktyget "Menti" i syfte att föra en diskussion gällande drivkrafterna i Uppsala, se nedan.

- Vilka drivkrafter finns för Uppsala Vatten i stort? Specifika ledord eller nyckelord?
- Vad är visionen för Sydöstra staden?
- Vilka hinder kan finnas mot drivkrafterna?

Utöver dessa frågor identifierades, i samråd med handledare², fem potentiella drivkrafter som de tre deltagande från Uppsala Vatten fick poängsätta, se i punktform nedan. De deltagande fick poängsätta drivkrafterna mellan 1-5, där 5 poäng innebar att de ansåg drivkraften vara stark medan 1 poäng innebar att drivkraften ansågs vara svag.

- Vattenbesparing
- Energiproduktion
- Gödselproduktion
- Kunskaperhållande
- Ekonomi.

Utifrån diskussion under workshopen, dels gällande frågorna som förberetts samt poängsättningen, kunde fem möjliga drivkrafter prioriteras. Detta gjordes genom att utgå från de starkaste drivkrafterna enligt resultatet från poängsättningen, samt ytterligare två aspekter som fångades upp under workshopens gång som ansågs viktiga för referensgruppen. Dessa två aspekter var inte med i poängsättningen utan uppkom under diskussion av de förberedda frågorna. De föreslagna drivkrafterna stämde sedan av med referensgruppen.

4.2 Resultat - Underlag till Workshop 1

Osäkerheter vad gäller hållbarhet av de tekniska lösningarna, kostnader och juridiska frågor uppstår vid övervägandet vad gäller implementering av ett innovativt infrastruktursystem. Dessa osäkerheter skulle potentiellt kunna minskas genom att titta på befintliga pilotområden som betraktas som ”proof of concept”-områden (Skambraks et al. 2016). Med ”proof of concept”-område menas att genomföra en studie eller prototyp vilken omfattar de väsentliga funktionerna av projektet, med syfte att undersöka om det är funktionellt och tekniskt genomförbart (INKA Interactive n.d.). På grund av dessa osäkerheter, är engagerade intressenter (exempelvis kommunen i fråga) och en eller flera starka drivkrafter (exempelvis näringsåterföring) avgörande för implementeringen av källsorterande infrastruktur (Skambraks et al. 2016).

I en studie av Skambraks et al. (2016) utvärderades fem anläggningar. Av dessa fem anläggningar, var två äldre pilotområden, Flintenbreite (Tyskland) och Noorderhoek (Nederländerna), som representerar den tidiga implementeringen av källsorterande system, och tre pilotområden som för närvarande är i uppstartsfas alternativt nyligen införts, Jenfelder Au (Tyskland), Schipperskaai (Belgien) samt H+ (Sverige), som representerar hur den nya trenden med större områden ser ut (ibid.).

I Tabell 1 går det att se vilka fraktioner som behandlas i respektive anläggning (svartvatten, gråvatten och matavfall) samt vilka anläggningar som har processer för återvinning av resurser (näring, värme och vatten). Gällande vilka fraktioner som behandlas är anläggningen i Jenfelder Au avvikande då anläggningen endast behandlar svartvatten, medan de resterande fyra anläggningarna behandlar tre fraktioner.

²Jennifer McConville, Forskare vid Institutionen för energi och teknik; Kretsloppsteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, digitalt möte, 2022-02-11

Angående vilka processer som finns för återvinningssyfte, skiljer det sig mellan anläggningarna. Noorderhoek och Schipperskaai har processer för återvinning av två resurser, nämligen näring och värme. Vidare, har H+ en metod för återvinning av näring, medan de två resterande anläggningarna, Flintenbreite och Jenfelder Au, ännu inte återvinner någon av resurserna.

Tabell 1: Sammanställning av vilka fraktioner som behandlas samt vilka poster som återvinns, där **orange** cell innebär att det har implementerats på platsen, **gul** cell innebär en planerad implementering och **vit** cell innebär att det inte finns implementerat och inte heller några planer om att göra det (Skambraks et al. 2016)

Fraktioner som behandlas			
	Svartvatten	Gråvatten	Matavfall
Flintenbreite	Orange	Orange	Orange
Noorderhoek	Orange	Orange	Orange
Jenfelder Au	Orange	Gul	
Schipperskaai	Orange	Orange	Orange
H+	Orange	Orange	Orange
Processer för återvinning			
	Näring	Värme	Vatten
Flintenbreite	Gul		
Noorderhoek	Orange	Orange	
Jenfelder Au	Gul		
Schipperskaai	Orange	Orange	Gul
H+	Orange	Gul	

Resultatet visade att drivkrafterna bakom vardera anläggning skiljde sig åt, se Tabell 2. För de nyare områdena, det vill säga Jenfelder Au, Schipperskaai samt H+, var de lokala miljömålen en gemensam huvuddrivkraft för samtliga. Detta är även den vanligast förekommande huvuddrivkraften. Vidare, var nationella miljömål den vanligast förekommande av drivkrafter som ej var huvuddrivkrafter.

Tabell 2: Sammanställning av drivkrafter för vardera anläggning, där **vit** cell innebär att det ej övervägts eller inte har en inverkan på beslutet för genomförande, **blå** anses vara viktig och har bidragit till ett beslut som innebär genomförande, **grön** är huvuddrivkraft till ett beslut att implementera källsorterande avloppssystem (Skambraks et al. 2016). Förkortningen UNI står för universitet

	Flintenbreite	Noorderhoek	Jenfelder Au	Schipperskaai	H+
Statligt					
Nationella mål					
Lokala mål					
Lokalt					
Minskad driftkostnad					
Kunskapsgivande					
Marknadssyfte					
Säljbara produkter					
Ekonomiskt stöd					
Icke marknadssyfte					
Samarbete m. UNI					

4.3 Resultat Workshop 1

Workshopen inleddes med en lägesuppdatering från referensgruppen från Uppsala Vatten. Från kommunens håll har det länge funnits ett intresse gällande möjligheten till att öka kretsloppet av resurser inom kommunen. Beslut om vilken typ av system som kommer att implementeras ligger dock längre fram i tiden. De kommande åren kommer en kunskapsnivå gällande implementering av källsorterande avloppssystem att behöva byggas upp.

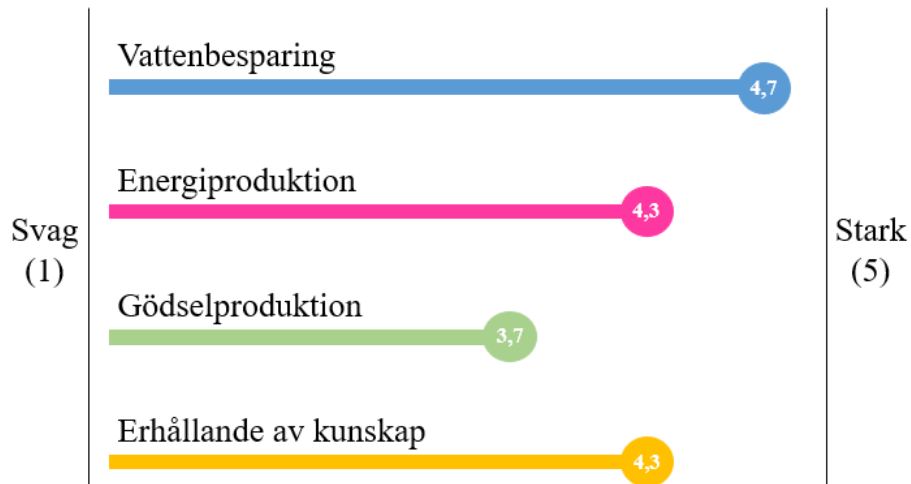
Uppsala Vatten menar att det i framtiden kommer att finnas ett behov av att bygga ett nytt reningsverk i Sydöstra staden, troligen kring 2040-2045, med fokus på resursåterföring. Hur detta reningsverk kommer att utformas är ännu inte beslutat. Tekniker för rening av såväl källsorterat vatten som blandat spillvatten kan bli aktuella.

Utifrån de förberedda frågorna diskuterades nyckelord med referensgruppen. Exempel på sådant är effektiv dricksvattenanvändning. Det finns ett intresse att använda annat vatten till applikationer där vattnet inte behöver vara av dricksvattenkvalitet, så kallat tekniskt vatten. Det finns även en strävan mot klimatneutralitet/klimatpositivitet för Uppsala. I Tabell 3 går det att se en sammanställning av samtliga nyckelord som diskuterades under den första workshopen.

Tabell 3: Sammanställning av de nyckelord som diskuterades under Workshop 1 som delats in i underkategorierna Vattenrelaterat, Miljörelaterat och Annat

Vattenrelaterat	Miljörelaterat	Annat
Rena avloppsvatten	Resursanvändning av energi	Levande stad
Effektiv dricksvattenanvändning	Resursanvändning av näring	Cirkulär ekonomi
Vattenbesparing	Klara utsläppskraven (MKN)	Driftsäkerhet
	Klimatneutral VA	Kunskapsgivande

Resultatet från poängsättningen av de fem drivkrafterna som bestämdes i samråd med handledare går att se i Figur 3. Ekonomi ansågs ej vara en relevant drivkraft för referensgruppen och poängsattes därmed inte. Vattenbesparing var den starkaste drivkraften (4,7 poäng), följt av energiproduktion (4,3 poäng) och erhållande av kunskap (4,3 poäng) och avslutningsvis gödselproduktion (3,7 poäng).



Figur 3: Resultatet från poängsättningen i andra frågan i workshopen, där drivkrafter som förekommit till redan implementerade anläggningar listades och därefter rankades av de deltagande från svag drivkraft (1 poäng) till stark drivkraft (5 poäng).

Uppsala Vatten har Revaq-certifierat slam och referensgruppen upplever att det finns en stor efterfrågan på kvalitetssäkrat slam som gödselmedel. Baserat på resultaten från workshopen är gödselproduktion och möjligheten att återföra näringsämnen en viktig drivkraft även för källsorterande system. Gällande resursåtervinning som drivkraft kan den osäkra marknaden för återvunna gödselprodukter vara ett hinder. Ytterligare en aspekt att ta hänsyn till är att det behöver vara ett driftsäkert och robust system för att säkerställa ett fungerande system för spillvattenhantering. Detta kan vara ett hinder som försvårar en eventuell implementering av ny mindre beprövad teknik.

Utifrån de anteckningar som fördes under workshopen kunde möjliga drivkrafter från referensgruppen identifieras och sammanfattas till nedanstående punkter. Detta val baserades dels på poängsättningen, där vattenbesparing, erhållande av kunskap samt energiproduktion rankades högst. Urvalet baserades även på aspekter som uppkom under diskussion av frågorna som förberetts, där uppfyllande av höga reningskrav samt klimatneutralitet bedömdes vara av stor betydelse för referensgruppen. Referensgruppen föreslog följande möjliga drivkrafter:

- Vattenbesparing
- Uppfyllande av höga reningskrav
- Resurseffektivitet vad gäller energi och näring
- Kunskapsgivande
- Klimatneutralitet.

5 Systemlösningar och teknik i källsorterande anläggningar

I nedanstående avsnitt presenteras metod för den andra etappen i arbetet som innebar litteraturstudie av systemlösningar och teknik.

5.1 Metod

För att identifiera tekniker, såsom typ av toalett, och systemlösningar, såsom insamlingsystem, i källsorterande anläggningar genomfördes en litteraturstudie med detta tema. Denna litteraturstudie följdes sedan upp av ytterligare workshop med referensgruppen.

5.1.1 Framtagande av underlag till Workshop 2

Drivkrafterna som identifierades efter den första workshopen användes för att selektera pilotanläggningar vilka haft liknande drivkrafter som de identifierade i denna studie. I sökningen efter anläggningar användes ordet exempelvis ”drivkrafter” och ”drivers” för att finna anläggningar som uttryckt sina drivkrafter och motiv. Från denna sökning hittades tre anläggningar i vilka systemlösningarna för svart- och gråvatten studerades fördjupande. Då två av anläggningarna hade identiska system inkluderades den pilotanläggning som först togs i drift i underlaget. Utifrån studie av dessa anläggningar, kunde sedan tekniker i systemen väljas ut för att studeras fördjupande. Detta, i syfte att ge förslag på tekniker för implementering i en pilotanläggning i Uppsala.

Litteraturstudien resulterade i ett underlag som sedan skickades till Uppsala Vatten för att de deltagande i workshopen skulle känna till olika tänkbara systemlösningar A.2. Underlaget innehöll beskrivning av system i två anläggningar. Vidare, innehöll materialet även två tekniker för rötning av klosettatten (*UASB-reaktor* och *MBR/AnMBR*). MBR valdes då denna reaktor används vid rötning i en av anläggningarna med liknande drivkrafter som identifierats i detta arbete. Då detta var den enda reaktortyp som användes i de tre anläggningarna med liknande drivkrafter valdes även UASB-reaktor som teknikförslag, då denna reaktortyp används vid rötning i de fem anläggningar som hittades i studien av Skambraks et al. (2016). Dessutom innehöll underlaget två tekniker för behandling av gråvatten (*nanofiltrering* och *anlagda våtmarker*).

5.1.2 Workshop 2

Den andra workshopen hölls i syfte att diskutera systemlösningar och teknik i existerande pilotanläggningar med referensgruppen från Uppsala Vatten. Detta för att undersöka om det fanns någon teknik av särskilt intresse alternativt någon teknik som inte var intressant. Ytterligare mål med workshopen var att fastställa möjlig placering och skala för en eventuell pilotanläggning i Uppsala. Som förberedelse inför workshopen gjordes en PowerPoint-presentation med kort sammanfattning av underlaget gällande teknik. I samråd med handledare³ formulerades även diskussionsfrågor för att erhålla ett resultat till fortsatt arbete, se nedan.

³Jennifer McConville, Forskare vid Institutionen för energi och teknik; Kretsloppsteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, digitalt möte, 2022-03-11

- Var finns det störst intresse att placera pilotanläggningen i nuläget?
- I vilken skala är det i nuläget mest intressant att titta på en källsorterande avloppslösning?
- Vilka tekniker/vilken systemlösning är mest intressant?
- Vilka parametrar/aspekter är av särskilt intresse från Uppsala Vattens sida att inkludera vid dimensionering av systemet?

Under diskussion av frågorna fördes anteckningar som sedan sammanfattades för att styra det fortsatta arbetet gällande tekniker och systemlösningar.

5.2 Resultat - Underlag till Workshop 2

Gemensamt med anläggningarna som valdes ut var att drivkrafterna till implementering liknade de drivkrafter som den första workshopen resulterade i. Med anledning av att sökningen inkluderade sökord såsom ”drivkrafter” var det få anläggningar som påträffades. Det centrala syftet med denna studie var att redovisa hur systemlösningar med drivkrafter likt de identifierade kan se ut.

5.2.1 Sammanställning av teknik i anläggningarna

Den första anläggningen som studerades ligger i Qingdao, Kina. Kina har under en tid haft problem med regional vattenbrist, i synnerhet i de norra samt västra regionerna. Anledningen till detta beror dels på den ekonomiska utvecklingen, en snabb befolkningstillväxt samt ojämn fördelning av vattendrag över landet, där de södra delarna har en högre andel vattenresurser. Dessutom har urbaniseringen resulterat i en sänkning av vattenkvaliteten med anledning av otillräcklig avloppsvattenrening. Detta gäller speciellt avlägsnandet av näringsämnen, som än idag är ett problem för avloppsreningsverken i Kina. Systemet i Qingdao innebär att grå- samt svartvatten samlas in separat i syfte att kunna återanvända gråvattnet. Detta då acceptansen för återanvändning av denna fraktion är större än en blandad sådan. Respektive fraktion behandlas i en membranbioreaktor. Efter behandling återanvänds sedan denna fraktion till bevattning av grönytor i området. Biologiskt hushållsavfall samrötas med slam från avloppsvattnet vilket genererar gödningsmedel och den producerade biogasen används sedan för utvinning av energi (Tolksdorf, Lu & Cornel 2016).

I anläggningen i Kaja, Norge, sker insamling av avloppsvatten från 24 studentlägenheter. Det källsorterande avloppssystemet byggdes som ett projekt av experimentell karaktär för att utvärdera de tekniker som används. Systemet för rening av gråvatten motsvarar filtrering genom en anlagd våtmark. Valet av teknik med biofilter samt anlagd våtmark baserades bland annat på kravet att systemet behöver lite underhåll. Till en början, samlades svartvattnet upp i en tank för att sedan transporteras, med lastbil, till en närliggande lantbrukare med komposteringsenhet. Det visade sig dock att detta var en kostsam process. Som tillfällig lösning, samlas svartvattnet in för att sedan transporteras till det kommunala reningsverket för behandling (Telkamp 2006).

En sammanställning av drivkrafter till vardera anläggning samt behandlingsteknikerna gjordes, se Tabell 4. Från tabellen går det att se att vattenbesparande samt energieffektiv teknik är drivkrafter som förekom för båda anläggningar. Dessa drivkrafter har sedan resulterat i tekniker såsom membranbioreaktor för rötning av enskilda strömmar samt anlagda våtmarker för behandling av gråvatten.

Tabell 4: Sammanställning av drivkrafter samt teknik för två anläggningar, Qingdao, Kina, och Kaja, Norge

Anläggning	Drivkrafter	Teknik
Qingdao	Vattenbesparande teknik Energieffektiv teknik Hög reningsgrad	Svartvatten: MBR Gråvatten: MBR Matavfall: MBR
Kaja	Vattenbesparande teknik Minskade utsläpp Energieffektiv teknik	Svartvatten: kommunal rening Gråvatten: anlagda våtmarker Matavfall: -

5.2.2 Biogasprocessen

Biogasprocessen grundar sig i att organiskt material av komplex karaktär bryts ned till, i huvudsak, koldioxid (CO₂) och metan (CH₄). Det är blandningen av CO₂ och CH₄ som benämns som biogas. Processen sker under anaeroba förhållanden. Processen kan delas upp i fyra delsteg vilka är följande: hydrolys, fermentation, anaerob oxidation samt metanbildning. Ett samarbete krävs mellan mikroorganismerna i de olika stegen för att processen ska fungera (Frid 2012).

Proteiner, fetter och kolhydrater har starka bindningar. Det organiska materialet har för stora beståndsdelar för att mikroorganismerna ska kunna tillgodose sig dessa. Under hydrolyssteg bryts den komplexa strukturen ned till beståndsdelar av mindre karaktär. I nästkommande steg sker fermentationsreaktioner vilket innebär en nedbrytning av en del av de produkter som bildades i föregående steg, exempelvis aminosyror och socker. Det är först i det tredje steget som fettsyror bryts ned. Beroende på substrattyp, närvarande mikroorganismer samt omgivande miljö kan produkterna som bildas i detta steg variera något. Vanligast förekommande är dock olika fettsyror, ammoniak, alkoholer, vätgas och koldioxid. I det tredje steget, sker en omvandling av produkterna som bildats i de två föregående stegen. Fettsyror från hydrolyssteg samt produkterna som bildades under fermentationsreaktioner kommer att omvandlas till vätgas, koldioxid och acetat. Detta sker genom anaerob oxidation. Det avslutande steget, metanbildning, innebär en omvandling av produkterna i ovanstående processteg till koldioxid och metan (Hesselgren 2004). Det vanligast förekommande är att detta steg är hastighetsbegränsande, vilket främst beror på att metanogenernas tillväxthastighet är låg (Frid 2012).

Olika varianter av röt-kammare har med tiden utvecklats för en rad olika syften. Exempelvis för att minska driftinstabiliteten, förkorta starttiden, minska urtvättningen av biomassa eller förbättra hantering av inkommande chockbelastningar. Typen av bioreaktor samt dess utformning är avgörande för biogasproduktionen. Valet av reaktortyp beror därför på det specifika syftet, där vissa reaktorer i första hand används för att maximera biogasproduktionen medan andra används i syfte att optimera reningen av exempelvis COD (Banerjee, Prasad & Selvaraju 2022).

5.2.3 Biogasreaktorer

Urvalet av rötningstekniker i detta arbete baserades dels på biogasreaktorn i anläggningen i Kina (MBR) samt typen av reaktor som förekom i majoriteten av de anläggningar som studerades i studien av Skambraks et al. (2016) gällande drivkrafter (UASB-reaktor).

UASB

UASB motsvarar engelskans *upflow anaerobic sludge blanket reactor* och utvecklades under 1970-talet i Nederländerna (Mullai et al. 2020). UASB-reaktorerna ger en snabb rening och resulterar i en anaerob reduktion av organiskt material (Jansson 2006).

UASB-reaktorn baseras på en trefas-separator som möjliggör att reaktorn kan separera vatten-, gas- och slamblandning under turbulenta förhållanden. Reaktorn är konstruerad så att avloppsvattnet pumpas in vid botten av reaktorn och strömmar sedan uppåt genom ett uppåtriktat flöde (ibid.). De anaeroba bakterierna fäster sig till varandra och bildar täta granulat vilka sedimenterar och sätter sig i reaktorns botten (Mullai et al. 2020). Avloppsvattnet, som pumpas in vid botten, strömmar igenom denna bädd av slamgranulat. Det uppåtriktade flödet av avloppsvatten resulterar i att de anaeroba bakterierna förbrukar substratet (avloppsvattnet) och producerar koldioxid samt metan. På grund av de gasbubblor som bildas skapas turbulens i reaktorn, vilket resulterar i en god omblandning samt en gynnsam kontakt mellan substratet och de anaeroba bakterierna (Jansson 2006). Ovanför ”slamfilten” av granuler, är den tidigare nämnda trefas-separatorm (Gas-Liquid-Solid) placerad vilken har som funktion att separera fasta partiklar från den blandade fraktionen. Detta möjliggör att vätska och gas tillåtes att lämna reaktorn efter behandling medan de fasta partiklarna, granulerna, stannar kvar (The International Water Association 2013). Avslutningsvis, kan rent vatten separeras på toppen av reaktorn (Jansson 2006). Gällande konstruktionen, är det fördelaktigt att ha en hög reaktor då detta minskar markanvändningen. De flesta reaktorer har en höjd mellan 4,5-6 meter, men den maximala höjden för en fortsatt gynnsam process är 8 meter (The International Water Association 2013).

En av de främsta fördelarna med denna reaktortyp är att det är enkla reaktorer med en tillförlitlig teknik. Ytterligare en fördel är att, som tidigare nämnt, kontakten mellan substratet och de anaeroba bakterierna är god. Detta resulterar i att det inte krävs någon tillsats av bärarmaterial för att bakterierna ska kunna etablera sig (Jansson 2006). Systemet kan också inaktiveras under längre tidsperioder utan större konsekvenser vilket är fördelaktigt exempelvis vid driftfel (The International Water Association 2013). Å andra sidan, kan det finnas svårigheter att behålla granulerna stabila. Granulerna är även känsliga för en kvalitetsförändring på avloppsvattnet samt stora variationer i belastning (Jansson 2006). Systemet är även känsligt mot, framförallt, kall lufttemperatur och fungerar som mest optimalt mellan 15-35 °C vilket innebär att det inte är ett lämpligt system för platser med kallare temperatur (The International Water Association 2013).

I en studie gjord av Lew et al. (2011), undersöktes hur UASB-reaktorn fungerar i liten skala vid behandling av avloppsvatten. Reaktorn drevs även med olika omgivningstemperatur, nämligen 10, 15 och 28 °C. Resultatet visade att högt avlägsnande av COD kunde observeras för de högre temperaturerna, 15 respektive 28 °C, nämligen 66 % samt 78 %. När temperaturen däremot sänktes till 10 °C, minskade COD-avlägsnandet till cirka 42 %. Resultatet visade även att temperaturminskningen innebar att den biologiska aktiviteten minskade och så även

metanproduktionen. Sammanfattningsvis, ansågs UASB-reaktorn vara ett lämpligt alternativ till rening av kommunalt avloppsvatten, särskilt fördelaktigt i tempererade klimatförhållanden (Lew et al. 2011).

MBR/AnMBR

Ytterligare en teknik för rening av avloppsvatten är membranreaktorn, MBR (från *membrane bioreactor*). Denna konfiguration kombinerar den biologiska processen via mikroorganismer med membranfiltrering. Organiskt material bryts ned i bioreaktortanken där mikroorganismerna sedan avskiljs från det reade avloppsvattnet i en membranmodul. Det finns i nuläget ett antal olika typer av membranreaktorer. På grund av den höga energianvändningen som aerob rening kräver, exempelvis genom luftningsprocesser, har ett ökat intresse för anaerob rening uppkommit. Detta har resulterat i utveckling av en MBR-konfiguration med anaerob rötningsbehandling integrerat med membranfiltrering för behandling av avfallsvatten (Al-Asheh, Bagheri & Aidan 2021). Systemet består av den anaeroba bioreaktorn samt ett ultrafiltrerings- eller mikrofiltreringsmembran (UF/MF). På så sätt kan AnMBR-reaktorn uppnå fullständig separering av solida partiklar oberoende av avloppsvattnets samt slammets egenskaper eller de biologiska förhållandena i omgivande miljö (Chang 2014).

Konceptet av AnMBR-reaktorn utvecklades redan på 1980-talet, men tekniken tillämpades i början inte i stor skala på grund av den höga energikonsumtionen för membranteknik. Tekniken har dock visat tydliga framsteg och storskaliga system med membranfiltrering är i nuläget en beprövad teknik och effektiva strategier gällande design, drift och underhåll har utvecklats (ibid.).

Tekniken i AnMBR-systemet har undersökts för olika typer av avloppsvatten, exempelvis avloppsvatten från pappersbruk och livsmedelstillverkning, men även kommunalt avloppsvatten. Resultatet från dessa undersökningar har visat att denna typ av reaktor resulterar i ett avlägsnande av COD till cirka 90 %. Baserat på dessa goda resultat, har ett ökat intresse för implementering av reaktortypen till kommunal avloppsvattenrening uppstått. Experimentella resultat har visat att den mest effektiva anaeroba reningen av avloppsvatten från kommunalt bruk är inom temperaturintervallet 20-30 °C. Detta innebär att det kan finnas utmaningar gällande anaerobisk rening på platser där temperaturen kan bli låg. Den största begränsande faktorn gällande effektiviteten för AnMBR-systemet är dock nedsmutsning av membranet som orsakas av partikelavsättning dess yta. (ibid.).

Sammanfattningsvis, har de kommersiella tillämpningarna av AnMBR-konceptet begränsats på grund av problematik gällande effektiviteten av membranfiltreringen. Aktuell forskning har dock visat att AnMBR-systemet kan användas för att rena ett brett spektrum av avloppsvatten med olika innehåll och att det även finns potential att kunna återvinna både resurser och energi från avloppsvattnet (ibid.).

Sammanställning av reaktorerna

COD-avlägsnandet för de två reaktortyperna sammanfattades i Tabell 5 (Chang 2014; Lew et al. 2011). Avlägsnandet beror inte endast på temperaturen, men tabellen ger en fingervisning över hur reaktorernas reningsgrad ser ut vid olika temperaturer.

Från tabellen går det att se att AnMBR har högt avlägsnande av COD vid temperaturändring (dock liten sådan) medan UASB-reaktors avlägsnande endast är 44 % vid 10 °C. Det går även att se att UASB-reaktor inte uppnår samma avlägsnande som AnMBR vid högre temperatur.

Tabell 5: Sammanställning av hur reningen av COD (i %) varierar med olika temperatur på omgivningen för vardera reaktortyp

	Temperatur [°C]	COD-avlägsnande [%]
UASB	10	44
	15	66
	28	78
AnMBR	24,5	99
	25	88

Vidare, sammanfattades de olika biogasreaktorernas robusthet i Tabell 6, då detta är ett av kraven som ställs av Uppsala kommun på det framtida systemet. Från de forskningsartiklar som studerades gällande robusthet (Buntner, Sánchez & Garrido 2013; Leitão 2004), valdes ett antal robusthetsaspekter ut. En bock innebär att reaktortypen är robust gällande aspekten i fråga. Från tabellen går det att se att AnMBR bockar i flest aspekter.

Tabell 6: Sammanställning av robusthetsaspekter för vardera reaktortyp, där en bock innebär att biogasreaktor anses vara robust för denna aspekt

Robusthetsaspekt					
	Temperaturförändringar	Kvarhållen biomassa	COD-avlägsnande	Variabilitet i vattnets innehåll	pH
UASB			✓		✓
AnMBR	✓	✓	✓	✓	

5.2.4 Rötning av brunvattenfraktionen

Med ett system som inkluderar urinsortering, följer att substratet som används till rötning kommer att ha ett annat innehåll i jämförelse med svartvattenfraktionen. Anaerob nedbrytning i biogasreaktor med matavfall som substrat är en metod som förekommer i omfattande utsträckning världen över. Rötning av endast mänskliga fekalier däremot, är inte en metod som används i lika stor utsträckning. I dagsläget är den vanligast förekommande processen för behandling av toalettavfall att fraktionerna transporteras, ibland långa avstånd, till en centraliserad anläggning för behandling vilket kräver stora mängder vatten samt en hög energiförbrukning. I nuläget finns knapphändig tillgång till forskning och artiklar gällande anaerob behandling av de sorterade fraktionerna, det vill säga brunvatten (Jun Wei 2011).

Rötning av brunvatten, samt i samrötning med organiskt hushållsavfall, har undersökts av Jun Wei (2011). I studien användes alltså två olika typer av substrat, brunvatten, som samlades in från en urinsorterande toalett i närheten av ett universitetslaboratorium i Singapore, samt matavfall, som samlades in från en matsal på universitetscampus i Singapore. Brunvattnet, blandades även ut med ytterligare 2 liter spolvatten. Matavfallet krossades för att efterlikna matavfallet från en köksavfallskvarn. Vid rötning med substrat som endast innehöll brunvatten visade resultatet att den genomsnittliga metanhalten som erhöles varierade mellan 70-78 %. I jämförelse med rötning av endast matavfallet, som resulterade i en genomsnittlig metanhalt mellan 56-73 %, genererar rötning av brunvattnet ett högre metaninnehåll i den resulterande gasen. Vidare, visade resultatet även att metanutbytet var högre för brunvattenfraktionen, som varierade mellan 0,54-0,59 liter CH₄/g VS, medan den för den blandade fraktionen endast uppgick till 0,21-0,29 liter CH₄/g VS. En möjlig anledning till detta som diskuteras i studien är att innehållet av fett och salt är högre i matavfallet, vilket möjligen kan innebära att hämmande effekter på de metanproducerande organismerna uppstått. Resultatet visade även att en blandning av de två fraktionerna inte innebar någon större skillnad gällande metaninnehållet, då koncentrationen varierade mellan 68-74 %. Vid jämförelse av dessa tre rötningssubstrat, går det att urskilja att den fraktion som enskilt ger högst metaninnehåll är rötning av brunvatten, samtidigt som biogasutbytet för brunvatten minskar vid tillsats av matavfallet (Jun Wei 2011).

Liknande studie har även gjorts av Rajagopal et al., som dock visar motsatsen. Likt den sistnämnda studien, skedde insamling av brunvatten via en urinsorterande toalett från Nanyangs Tekniska Universitet i Singapore (även utspätt med 2 liter spolvatten) samt matavfallet från en matsal på campus. Resultatet visade att metanutbytet för den blandade fraktionen blev högre än i fallen då fraktionerna behandlades separat. Den blandade fraktionen uppnådde metanutbytet 0,54-0,59 liter CH₄/g VS som tillsattes, medan för hushållsavfallet samt brunvattnet enskilt uppnåddes endast 0,4-0,42 respektive 0,26-0,30 liter CH₄/g VS. I jämförelse med resultatet ovan, som visade att rötning av endast brunvatten genererar ett högre metaninnehåll samt utbyte av gas, visar denna studie motsatsen. Alltså, har en blandad fraktion av hushållsavfall samt brunvatten under förhållandena som rådde i studien av Rajagopal et al. högre metanutbyte (Rajagopal et al. 2012).

I en studie av Phee (2011), var det huvudsakliga syftet att utvärdera brunvatten som potentiellt substrat vid anaerob rötning. Undersökningen baserades på en analys av hur biogaspotentialen varierade med olika organiska belastningar i brunvattnets innehåll. Resultatet visade att metanutbytet ökar fram till en viss grad, innan belastningen blir för hög och utbytet sedan minskar igen. Den genomsnittliga metanhalten i den producerade biogasen varierade mellan cirka 67-73 %, där det lägsta innehållet genereras av den högsta belastningen. Vidare, uppnåddes ett metanutbyte motsvarande 0,34 liter CH₄/g VS. I jämförelse med sistnämnda undersökningen av Rajagopal et al., är de numeriska värdena för metanutbytet liknande. Slutsatsen som drogs efter undersökningen var att resultatet indikerar att brunvatten som substrat vid anaerob rötning är en gynnsam metod baserat på den höga biologiska nedbrytbarheten samt utbytet av metan i form av det höga metaninnehållet i den resulterande biogasen (Phee 2011).

Vid jämförelse av resultaten från ovanstående studier är det tydligt att förhållandena under vilka undersökningarna genomförs är avgörande för det slutgiltiga resultatet. Detta, baserat på att motsatt resultat har redovisats för de olika studierna, trots att de huvudsakliga syftena har varit liknande. En ytterligare aspekt som kan vara avgörande är vilken typ av reaktor som användes

i de olika försöken då det utifrån tidigare avsnitt i litteraturstudien går att säga att prestandan mellan olika biogasreaktorer skiljer sig åt.

5.2.5 Urinsortering

I tusentals år har olika tekniker för urinseparation använts. Orsakerna till implementering av ett sådant system varierar och även lösningarna i sig. Exempelvis, har motivet till urinsortering i Kina varit möjligheten till att återföra näringsämnen. I Sverige däremot, och även andra delar av Europa, har motivet i stället främst syftat till att minska vätskehalten i avfallsfraktionen. När de första urinsorterande toaletterna kom ut på marknaden, i 1990-talets början, installerades de främst i ekobyar alternativt lantställen. I dagsläget installeras de exempelvis även i villor, lägenhetskomples samt skolbyggnader. Det finns även specifika fall där en urinsorterande systemlösning utformas i syfte att uppfylla de stränga kraven på avloppsvattenrening. Bostadsområdet Kullön i Vaxholms kommun är ett exempel på just detta. Här installerades urinsorterande toaletter i över 100 nya bostadshus för att kunna uppfylla Vaxholm kommuns utsläppskrav gällande kväve och fosfor (Johansson 2001).

Med de urinsorterande systemen möjliggörs separering av näringsämnen, såsom kväve, fosfor och kalium, redan vid källan. Vidare, motsvarar urinfractionen cirka 1 % av totala volymen avloppsvatten. Därmed, är innehållet av näringsämnen i en mer koncentrerad form vid sortering. Innehållet av tungmetaller, patogener och andra miljöfarliga ämnen är även lågt, vilket resulterar i att fraktionen efter behandling kan användas som koncentrerat gödselmedel. I jämförelse med andra alternativa system är tekniken för urinsortering enkel och beprövad. Den främsta utmaningen i dagsläget är att implementera systemet i stor skala, där det också finns en organisation samt ekonomiska incitament till återcirkulering av fraktionen till lantbruket (ibid.).

Insamlingen av urinen sker alltså genom en separat ledning vidare till en uppsamlingstank vilken ett eller ett flertal hushåll är kopplade till. Därefter, sker upphämtning av fraktionen med en tankbil som antingen organiseras av en utomstående aktör alternativt lantbrukaren själv. Vanligast i nuläget är det sistnämnda alternativet, men för att förenkla genomförandet av detta system i stor skala bör kommunen i stället vara ansvarig för upphämtning för att underlätta för lantbrukaren. Eftersom sortering av urin motsvarar ett komplement till avloppssystemet kvarstår dock reningen av brun- samt gråvatten (ibid.).

År 2020 installerades en urinsorterande vattenklosett på avdelningen *Kretsloppsteknik* på Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU, i Uppsala. Klosetten är av märket LAUFEN som utvecklat en innovativ toalett med urinsorterande teknik med ett underlättat användargränssnitt. Den installerade modellen går under namnet *save!*, där den främsta skillnaden från liknande modeller är att urinen via ytspänning leds till ett dolt utlopp (Sveriges Lantbruksuniversitet 2019). Designen säkerställer en urinsortering oberoende av användaren, vilket fallet inte är för modeller med en skål uppdelad i två separata fack (LAUFEN n.d.). Denna modell valdes för vidare studie (Sveriges Lantbruksuniversitet 2019).

Som nämnt i tidigare avsnitt, är kväve, fosfor samt kalium värdefulla näringsämnen för användning som gödselmedel inom jordbruket. I nuläget är jordbruket kraftigt beroende av gödselmedel, vilka i stor utsträckning är tillverkade på syntetiskt vis (Naturskyddsföreningen 2021). Genom att separera avfallsströmmarna vid källan, möjliggörs en mer hållbar behandling av strömmarna i syfte att återvinna de resurser som finns i innehållet. Detta resulterar i att avloppshanteringen bidrar till den cirkulära ekonomin. Dessutom minskar belastningen på reningsverken då exempelvis 1,5 liter urin förorenar uppskattningsvis 180 liter vatten (LAUFEN n.d.).

I Tabell 7 går det att se hur priset samt spolvolymen varierar mellan tre olika typer av toaletter, nämligen en konventionell vattentoalett, en urinsorterande sådan samt en vakuumtoalett. Gällande priset är den urinsorterande toaletten överlägset dyrast, ett inköpspris motsvarande nästan 13 000 kr, medan den konventionella motsvarar cirka 15 % av priset för den urinsorterande och 20 % av priset för vakuumtoaletten. Spolvolymen för den konventionella och urinsorterande toaletten är nästintill identisk, med en dubbelspolningsfunktion där vattenförbrukningen är cirka 2 eller 4 liter. Vakuumtoaletten har utstickande låg vattenförbrukning vid spolning, motsvarande endast 0,5 liter.

Tabell 7: Sammanställning av pris och spolvolym för tre olika typer av toaletter, det vill säga en konventionell och urinsorterande vattenklosett samt en vakuumtoalett från tre olika tillverkare

Typ av toalett	Tillverkare	Pris [kr]	Spolvolym [l]	Referens
Konventionell	Gustavsberg	1 995	4/2	(BAUHAUS n.d.)
Urinsorterande	LAUFEN	12 995	4/2,5	(Avloppscenter n.d.[a])
Vakuum	JETS	10 000	0,5	(Avloppscenter n.d.[b])

Ett tillvägagångssätt att koncentrera näringsämnena i urinen, vilket ökar dess värde som gödselmedel, är genom torkning av urinen. Detta innebär att vatten från fraktionen avlägsnas genom avdunstning (Karlsson 2019). Genom torkning kan potentiellt samtliga växtnäringsämnen bevaras. Det ämne som kan vara utmanande att bevara är kväve, då ämnet urea som återfinns naturligt i urin bryts ned till ammoniak under tid. Därmed, kan det krävas ett förbehandlingssteg för att hindra att denna reaktion sker. Ett exempel på ett sådant förbehandlingssteg är alkalisering av materialet (Senecal 2020).

En integrering av alkalisering med urintorkningen är en vanlig behandlingsteknik vilken sker i två steg. I det första steget tillsätts urin från en urinsorterande toalett till ett alkaliskt substrat. Detta kan exempelvis vara kalk. Tillsatsen gör att urinens pH ökar vilket är nödvändigt för att stabilisera urinen och minska risken för att oönskade kemiska reaktioner sker. Blandningen av urinen och alkaliska ämnen torkas sedan i en anordning med ventilation för att erhålla ett torrt och fast gödselmedel. Denna torkningsprocess kommer att minska urinens ursprungliga volym med drygt 90 % (ibid.).

I en studie av Senecal (2020), genomförd år 2020 vid Sveriges Lantbruksuniversitet, undersöktes bland annat bakterieinnehållet i urin. Resultatet visade att det krävdes torkning under 4 dagar, i en omgivande temperatur motsvarande 20 °C, för att uppfylla WHO:s samt USEPA:s riktlinjer för säker återanvändning av gödselmedlet på livsmedelsgrödor, och det med stora marginaler. Det krävs dock även att förekomsten av mag-tarmpatogener är låg.

Ytterligare aspekt som undersöktes var andel kväve som finns kvar i slutprodukten efter torkningsprocessen. Denna parameter varierade mellan 64-90 % (Senecal 2020). Gällande fosfor, uppnås fullständig återvinning i slutprodukten (Simha 2021).

De instabila egenskaperna hos urinen som leder till oönskade reaktioner kan resultera i utfällningar av exempelvis kalcium som sedan blockerar ledningarna. Att spola vatten i rören kan minska denna risk, men å andra sidan måste en avvägning göras gällande utspädningen av urinen som detta resulterar i, då mycket utspädning med vatten kan innebära en ineffektiv behandling alternativt att transport av lagringstankar krävs (Jönsson 2013). För att minimera risken för att dessa reaktioner sker bör ledningsdragningen minimeras till endast nödvändig, då en kortare uppehållstid kan minska denna risk (Senecal 2020).

5.2.6 Nanofiltrering för behandling av gråvatten

På senare tid har återvinningsperspektivet gällande gråvatten fått allt mer uppmärksamhet. Återvinningssystemen inkluderar källsortering av avloppsvattnet från hushåll till svart- respektive gråvatten. Den efterföljande behandlingen av gråvattnet sker vanligtvis lokalt i området för att sedan återanvändas till exempelvis toalettspolning eller bevattning av grönytor (Ramon et al. 2004).

Reco lab i Helsingborg är den första demonstrationsanläggningen i stor skala av framtidens infrastruktur gällande avloppssystem i Sverige. Den teknik som används och kommer att användas i Reco Lab är väl beprövad, men det är hur tekniken kombineras som är nytt för marknaden. I Reco Lab renas gråvattnet med nanofiltreringsteknik, vilket möjliggör att det renade vattnet kan återanvändas alternativt släppas ut i lokala vattendrag vilket kan resultera i en ekonomisk vinst. Syftet med nanofiltreringstekniken är att Helsingborgskvarteret ska kunna ha en lokal rening av källsorterat gråvatten, medan svartvattnet via mindre vakuumledningar leds till ett centralt reningsverk för rening. Den lokala reningen av gråvatten innebär också en minskning av kostnaderna gällande både anläggning och underhåll av det ledningsnät som transporterar fraktionen. Ur ett livscykelkostnadsperspektiv är detta den enskilt största posten av kostnader för avloppshantering (Sweden Water Research 2018).

Nanofiltrering är den nyaste teknologin gällande tryckdrivna membran och har i flera tillämpningar ersatt omvänd osmos baserat på den lägre energiförbrukningen samt potentialen till högre flödes hastigheter. Porerna i nanofiltret är vanligtvis cirka 1 nm, vilket resulterar i en god rening även av mer komplexa strömmar. Utvecklingen av tekniken har resulterat i en anmärkningsvärd ökning av bredden för tillämpningsområde, exempelvis inom textil- samt läkemedelsindustrin. Dock, liksom för samtliga processer som inkluderar membranteknik, är membran med nanofiltrering känsligt för nedsmutsning. Detta är en av de främsta utmaningarna med membranprocesser, vilket är anledningen till att mekanismerna som bidrar till nedsmutsning är väsentliga att identifiera. Utöver detta, är det även centralt att lämpliga lösningar för att styra och justera detta identifieras (Shon et al. 2013).

I en studie gjord av Ramon et al. (2004), undersöktes potentialen av membranfiltrering med nanofiltrering som metod för behandling av gråvatten med återvinnings syfte. Studien gjordes i mindre skala där resultatet visade att behandlingen med direkt nanofiltrering gav upphov till en produkt av hög kvalitet, med högt avlägsnande av COD (över 93 %) och ett nästintill fullständigt

avlägsnande av fasta ämnen (suspenderade) samt grumlighet. I jämförelse med ultrafiltrering, där avlägsnandet av COD varierar mellan 45-70 %, har nanofiltreringen en betydligt högre effektivitet. Nanofiltreringen har även visat hög potential gällande rening av vatten med industriell karaktär, där innehållet av organiskt material kan vara högre än för gråvatten. Baserat på detta, är nanofiltrering en teknik som verkar vara väl lämpad för ändamålet, det vill säga rening samt återvinning av gråvatten (Ramon et al. 2004).

5.3 Resultat Workshop 2

Under workshopen diskuterades tre möjliga platser för anläggningen: i Sydöstra staden, kvarteret Kölen eller på Kungsängsverket. Gällande kvarteret Kölen, har det fördelen att det ligger nära Kungsängsverket vilket skulle underlätta driften av en eventuell pilotanläggning då utsläppen kan efterbehandlas på Kungsängsverket. Gällande alternativet att placera pilotanläggningen vid Kungsängsverket, var detta alternativ av mindre intresse i detta skede dels på grund av att en omfattande utbyggnad av reningsverket planeras. Referensgruppen ser nyttan med att i en eventuell pilotanläggning testa systemlösningar genom att i stället implementera tekniken i ett kvarter eller bostadshus. I detta projekt valdes att utvärdera en pilotanläggning i Sydsöstra staden med motivet att erhålla kunskap om hur hela systemet fungerar och inte endast tekniken för rening. Därmed, fastställdes att dimensionering av anläggningen i detta projekt utgår från scenariot med ett kvarter i Sydöstra staden.

Vid workshopen fördes en dialog gällande urval av tekniker där möjligheterna till återföring av kväve var centralt. Erfarenheter från andra projekt visar att det krävs särskilda tekniksteg för utvinning av kväve från svartvattenrening. Exempelvis används ammoniakstripping i Reco Lab i Helsingborg. Många av teknikerna är förhållandevis resurskrävande och en fortsatt utveckling av tekniker för kväve- och näringsåterföring pågår. Ett alternativt sätt att återföra kvävet från spillvatten är genom urinsortering. Det finns fler tekniker för efterbehandling som resulterar i erhållande av näringsämnen för en urinfraktion, medan teknikerna för svartvatten fortfarande är begränsade. Urinsortering blev därför en del av systemet.

De två alternativen till gråvattenrening diskuterades, där referensgruppen menade att infiltrering genom anlagda våtmarker inte är en lämplig lösning för Uppsala då det finns ett grundvattenskydd. Det är dessutom en ytkrävande reningsteknik. Ytterligare aspekt som diskuterades var att anlagda våtmarker resulterar i ett mer begränsat användningsområde av det reade vattnet i jämförelse med nanofiltrering som ger en större variation. Med nanofiltrering finns exempelvis potential till att återvinna värme från gråvattnet, vilket är av intresse.

Ett projekt likt H+ kommer att kräva en organisation, vilket var en aspekt av intresse från referensgruppen att utreda. Ett möjligt tillvägagångssätt för att utreda detta som diskuterades var att genomföra intervjuer med personer som varit delaktiga i pilotprojekt i Sverige. Genom intervjuer skulle det vara möjligt att få svar på frågor såsom hur tidigare projekt varit organiserade och hur mycket resurser som krävts (exempelvis tids- samt arbetsmässigt).

Sammanfattningsvis, resulterade workshopen inklusive efterarbete i att fortsätta utreda placering av pilotanläggningen i Sydöstra staden i projektet. Gällande tekniker, förkastades alternativet till att anlägga våtmarker för rening av gråvatten på grund av att detta kan äventyra kvaliteten på grundvattnet samt att det är en ytkrävande teknik. Det fastställdes även att inkludera urinsortering som teknik för att återföra kväve i den planerade systemlösningen. Vidare, bestämdes att intervjuer med personer som varit delaktiga i planering för pilotanläggningar ska genomföras. Frågor som var av särskilt intresse för referensgruppen rör organisation, resurser och tid.

5.4 Resultat - Teknikernas uppfyllande av drivkrafter

En jämförelse av hur de olika teknikerna möter de fem möjliga drivkrafterna genomfördes. Detta gjordes genom att poängsätta hur väl de olika teknikerna möter de möjliga drivkrafterna. Två poäng gavs det teknikalternativ som mötte drivkraften i högst grad, medan det andra alternativet fick ett poäng. Om teknikerna ansågs likvärdiga gällande drivkraften i fråga, gavs ett poäng till de båda. I de fall då teknikalternativen inte ansågs direkt röra den möjliga drivkraften, gavs inget poäng.

I Tabell 8 går det att se hur de två biogasreaktorerna (UASB och AnMBR) uppfyller de fem möjliga drivkrafterna. Gällande den första drivkraften, vattenbesparing, ansågs ingen av reaktorerna direkt röra denna. För den andra drivkraften, uppfyllande av höga reningskrav, användes resultatet från Tabell 5 där COD-avlägsnandet för de två reaktorerna sammanfattats. För samtliga temperaturer visar AnMBR på en högre reningsgrad av COD (Lew et al. 2011) och möter därmed drivkraften i högre grad. Vidare, ansågs båda biogasreaktorer, UASB och AnMBR möta drivkraften om resurseffektivitet då de genom efterbehandling av det erhållna slammet från rötning genererar potentiell gödselprodukt (Goddek et al. 2018; Robles et al. 2022). Med anledning av att UASB-reaktorn förekom i pilotanläggningarna som studerats i arbetet (Flintenbreite, Noorderhoek, Jenfelder Au, Schipperskaai samt H+ som nämndes i avsnittet 4.2 *Resultat - Underlag till Workshop 1*), ansågs implementering av AnMBR möta drivkraften gällande kunskapsgivande i högre grad då den inte är lika vanligt förekommande i pilotanläggningar i Europa. Gällande den sista drivkraften, klimatneutralitet, kan inte denna uppfyllas endast genom implementering av en viss bioreaktor och därmed poängsattes ej denna. Poängen summerades till 3 för UASB och 5 för AnMBR.

Tabell 8: Jämförelse av UASB- samt AnMBR-tekniken för rötning av brunvattenfraktionen mot de möjliga drivkrafterna som identifierats för Uppsala

	UASB	AnMBR
Vattenbesparing	-	-
Uppfyllande av höga reningskrav	1	2
Resurseffektivitet (energi och näring)	1	1
Kunskapsgivande	1	2
Klimatneutralitet	-	-
Σ	3	5

Det gjordes även en jämförelse mellan hur den urinsorterande- (US-T) samt vakuumpoalett (Vakuumpoalett-T) uppfyller drivkrafterna i Tabell 9. Gällande vattenbesparing, förbrukar den urinsorterande poaletten 4/2,5 liter vatten beroende på vilken spolfunktion som används (Avloppscenter n.d.[a]), medan vakuumpoalettmodellen endast förbrukar 0,5 liter per spolning (Avloppscenter n.d.[b]). Vakuumpoaletten kan därför anses vara en vattenbesparande modell (Wostman n.d.) och möter därmed denna drivkraft i högre grad. Uppfyllande av höga reningskrav är en drivkraft som uppfylls genom behandling av de källsorterade fraktionerna, vilket är anledningen till att denna aspekt inte kan uppfyllas endast genom implementering av en specifik poalettmodell. Vidare, ansågs båda poalettmodeller kunna möta drivkraften angående resurseffektivitet. Den urinsorterande poaletten resulterar i effektiv återvinning av både kväve och fosfor från en koncentrerad urinfraction (Senecal 2020; Simha 2021) och vakuumpoaletten genererar en koncentrerad svartvattenfraktion för ökad resursåtervinning (Todt et al. 2021). Vidare, ansågs den urinsorterande poaletten möta den kunskapsgivande aspekten i högst grad. Detta, på grund av att vakuumpoaletten installerats i ett flertal pilotanläggningar i Europa (exempelvis i Flintenbreite, Noorderhoek, Jenfelder Au, Schipperskaai samt H+ som nämndes i avsnittet 4.2 Resultat - Underlag till Workshop 1). Gällande den sista drivkraften, klimatneutralitet, kan inte denna heller uppfyllas endast genom implementering av en viss poalettmodell och poängsattes därmed inte. Poängen summerades till 4 för båda poalettmodeller.

Tabell 9: Jämförelse av urinsorterande- samt vakuumpoalett för behandling av urin mot de möjliga drivkrafterna som identifierats för Uppsala

	US-T	Vakuumpoalett-T
Vattenbesparing	1	2
Uppfyllande av höga reningskrav	-	-
Resurseffektivitet (energi och näring)	1	1
Kunskapsgivande	2	1
Klimatneutralitet	-	-
Σ	4	4

6 Intervjuer

För att uppfylla Uppsala Vattens önskemål om frågor gällande exempelvis organisation för implementering av ett källsorterande system, genomfördes intervjuer med personer som varit delaktiga i liknande projekt i Sverige.

6.1 Metod

I samråd med handledare⁴ bestämdes att Marinette Hagman och Maria Lennartsson skulle intervjuas. Urvalet av dessa personer baserades på att de befinner sig i olika stadier gällande implementering av ett källsorterande avloppssystem. Marinette talar från ett perspektiv där implementeringen är färdigställd medan Maria är i liknande fas som Uppsala gällande implementering, det vill säga fortfarande under planeringsfas.

⁴Jennifer McConville, Forskare vid Institutionen för energi och teknik; Kretsloppsteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, digitalt möte, 2022-03-14

I samråd med handledare formulerades intervjufrågor som återfinns i Appendix A.3. Därefter sammanfattades, från anteckningar som fördes under intervjuernas gång, huvudaspekterna som diskuterats.

6.1.1 Intervju 1

Den första intervjun gjordes med Marinette Hagman⁵ som i nuläget jobbar på DHI (konsultföretag inom vattenmiljöer), men under planering av H+-området jobbade hon på NSVA, Nordvästra Skånes Vatten och Avlopp, som forsknings- och utvecklingschef. Marinette var med under planering av systemet fram till projektering. Alltså, var hon delaktig i projektet fram till själva byggnationen av området inleddes. För de fullständiga anteckningarna för vardera fråga, se Appendix A.4.

6.1.2 Intervju 2

Nästa intervju gjordes med Maria Lennartsson⁶ som jobbar som konsult och miljöszakunnig i projektet Norra Djurgårdsstaden i Stockholm stad. I Stockholm finns det ännu ingen färdigställd pilotanläggning utan projektet befinner sig fortfarande under planeringsfas. Maria har varit projektledare för utvecklingsprojektet MACRO (MAT i Cirkulära ROBusta system) som har haft syftet att ta fram nödvändiga kunskapsunderlag för att kunna komma vidare i planeringsprocessen gällande en implementering av ett sorterande avloppssystem i Norra Djurgårdsstaden (Stockholm Stad 2022). För de fullständiga anteckningarna för vardera fråga, se Appendix A.5.

6.2 Resultat

I avsnittet nedan följer en sammanfattning av resultatet från intervjuerna. För de kompletta anteckningarna från vardera intervju se vardera Appendix A.4 och A.5.

6.2.1 Sammanställning av resultat från intervjuer

Under ett tidigt skede av H+-områdets utveckling, tillsattes en utvecklingsgrupp med hög ambitionsnivå gällande vad som skulle uppfyllas med det nya systemet. Helsingborgs stad var från planeringsstart bestämda vid tanken att en hållbar systemlösning skulle implementeras. Stockholm stad har haft en liknande arbetsgång, där ett exploateringskontor har tagit rollen att driva arbetet mot implementering av ett sorterande avloppssystem.

Gällande tillståndsansökan för H+-området, behövde de dåvarande tillstånden för Öresundsverket (reningsverket som vattnet efter behandling i Reco Lab sedan skickas till) uppdateras oavsett. Detta resulterade i att stor del av tillståndsansökan rörde det redan befintliga reningsverket, alltså inte pilotanläggningen. I fallet för Stockholm är processen att söka tillstånd inte aktuell i nuläget.

Aktörer som varit drivande i de olika projekten skiljer sig något. För H+ var ett beslut på politisk nivå (kommunfullmäktige) gällande implementering av det källsorterande systemet av stor betydelse. Beslutet grundar sig i regelbunden kontakt med stadens politiker under

⁵Marinette Hagman, Avdelningschef för verksamheter inom inlandsvatten och marina miljöer, DHI, Intervju 2022-03-22

⁶Maria Lennartsson, Miljöszakunnig vid Stockholms stad, Maria Lennartsson Konsult AB, Intervju 2022-04-07

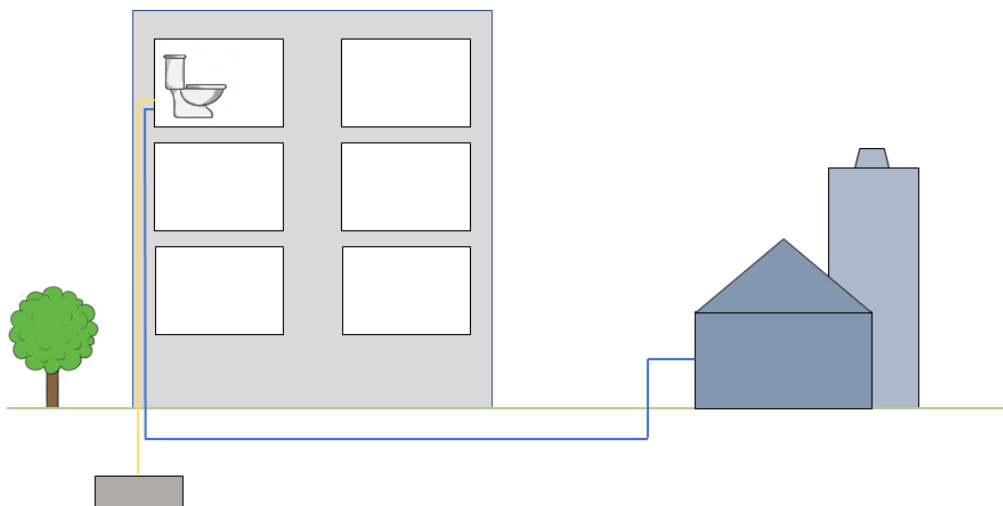
planeringsfasen. Dessutom försågs politikerna med nödvändigt underlag för att kunna ta ställning under planeringens gång. För Stockholm har staden och kommunens planeringsansvariga varit delaktiga under processen och det slutgiltiga förslaget om ett källsorterande system måste accepteras av just dessa aktörer för ett genomförande.

Gällande tidsaspekten, tog hela processen cirka 10 år för implementering av H+-området. De stora utmaningarna för implementering gällde valet av system. Dessutom, hade byggtreprenörerna inte installerat denna typ av systemlösning tidigare. Därmed uppkom frågor gällande exempelvis materialval vilket krävde utredning. Sammanfattningsvis menade Marinette att det tog längst tid att fastställa vilken typ av systemlösning samt ingående tekniker som skulle implementeras. Även Maria menade att det som tagit längst tid hittills i fallet för Stockholm är att få alla inblandade aktörer att enas om vilken typ av system som i framtiden ska installeras. Processen att enas om en gemensam vision för samtliga aktörer samt en plan för det framtida arbetet har tagit cirka 8 år. Projektet Norra Djurgårdsstaden är nu inne i sista fasen gällande planering vilket bland annat innebär framställning av beslutsunderlag. Alltså, kan tiden från planering till implementering skilja sig mellan olika projekt.

Den avslutande frågan gällde vad dimensionering av områdena baserades på. I Helsingborg var det utbyggnadstakten som styrde, där pilotanläggningen dimensionerades efter pe i området vid färdigställande av det första exploaterade området. Detta för att undvika ett över- alternativt underdimensionerat system för reningsprocesserna. I Norra Djurgårdsstaden är dimensioneringen i dagsläget inte helt klar, men utgångspunkten är att området som ska vara anslutet till anläggningen motsvarar cirka 4000 lägenheter.

7 Framtagande av förslag till pilotanläggning

Efter identifiering av systemlösningar och teknik i pilotanläggningar med liknande drivkrafter som Uppsala, kunde ett förslag till pilotanläggning i Uppsala tas fram. Det tänkta systemet inkluderar urinsorterande toaletter och torkningsytor samt rötning av fekaliefractionen i AnMBR (som mötte flest robusthetsaspekter och i högst grad mötte drivkrafterna). På grund av den begränsade tidsramen inkluderades inte grävattenbehandling i dimensioneringsberäkningarna. I Figur 4 visualiseras systemet som dimensioneringsberäkningarna inkluderar, det vill säga urintorkningsanordningen samt rötning i reaktor.



Figur 4: Systemet som inkluderas i dimensioneringsberäkningarna, där den **gula** ledningen motsvarar avloppsröret för urin och den **blå** för brunvatten. Torkningsanordningen är placerad i lägenhetshusets källare och rötningen av brunvatten sker i AnMBR med efterbehandling.

7.1 Metod

Utformningen av pilotanläggningen baserades på beräkningar samt antaganden som beskrivs i avsnitten som följer nedan.

7.1.1 Skala

Planering av de sydöstra stadsdelarna är fortfarande i ett tidigt skede, vilket är anledningen till att det endast är en fördjupad översiktsplan för området som finns tillgänglig för allmänheten (Wiklander et al. 2021). I den fördjupade översiktsplanen redovisas en preliminär figur över hur ett kvartersområde i Sydöstra staden kan komma att se ut. Denna figur jämfördes i sin tur med Rosendalsområdet i Uppsala, där tydliga likheter mellan kvartersutformningen kunde urskiljas. Mot bakgrund av detta, gjordes antagandet att utformningen av kvarter och de ingående lägenhetskplexen i Sydöstra staden kommer att likna utformningen av lägenhetsområden som nyligen byggts i Rosendal.

Vidare, undersöktes kartor över Rosendalsområdet för att hitta ett komplex av passande storlek med den preliminära planfiguren för Sydöstra staden. Detta gjordes genom att jämföra kartor i Google Maps samt faktablad för bostadsrättsföreningar i Rosendal med den preliminära figuren i den fördjupade översiktsplanen. Efter att ett område identifierats, där lägenhetskplexen var jämförelsevis lika, användes Googles sökmotor för att även identifiera bostadsrättsföreningarna som ingår i komplexet. Därefter, identifierades antalet lägenheter i vardera förening, brf_1 , brf_2 och så vidare, genom faktablad och information på bostadsrättsföreningarnas hemsidor. Antalet lägenheter adderades sedan enligt ekvation 1 nedan för att erhålla totala antalet lägenheter i hela komplexet, A_{brf} .

$$A_{brf} = brf_1 + \dots + brf_n \quad (1)$$

Därefter, valdes en av bostadsrättsföreningarna ut för djupare studie av storleken på lägenheterna. Valet baserades på att det fanns ett faktablad för bostäderna i den första etappen i just denna förening, där tydliga ritningar över bostäderna och vardera våning återfanns. En sammanställning gjordes för hur vardera våning såg ut, där antal lägenheter med olika rum och kök identifierades. Dessa sammanställdes sedan i en tabell, där antalet lägenheter av vardera storlek kunde fastställas samt även det totala antalet lägenheter för denna byggnad. Därefter, gjordes antagandet att antalet personer som bor i vardera hushåll motsvarar antalet rum och kök. Alltså, i en lägenhet med 1 rum och kök bor det 1 person, i en lägenhet med 2 rum och kök bor det 2 personer och så vidare. Genom att multiplicera antalet boende (som alltså även motsvarar antalet rum och kök) med antalet av de olika lägenhetsstorlekarna för vardera våning erhöles hur många personer som bor i de olika lägenhetsstorlekarna. Även detta resultat sammanställdes i en tabell, där antalet boende sedan summerades för att erhålla det totala antalet för hela lägenhetshuset. Sedan kunde det genomsnittliga antalet personer i vardera hushåll beräknas, A_{avg} , genom att dividera det totala antalet boende, A_{boende} , med antalet lägenheter, $A_{hushåll}$, enligt ekvation 2 nedan. Detta värde kunde sedan antas gälla för samtliga bostadsrättsföreningar.

$$A_{avg} = \frac{A_{boende}}{A_{hushåll}} \quad (2)$$

Det genomsnittligt antalet boende per hushåll, A_{avg} , multiplicerades sedan med det totala antalet lägenheter som beräknades tidigare, A_{brf} , för att erhålla det totala antalet boende i hela lägenhetskompexet enligt ekvation 3.

$$A_{tot} = A_{brf} \cdot A_{avg} \quad (3)$$

Resultatet avrundades till närmsta jämna hundratal och motvarar det uppskattade antalet boende i det framtida lägenhetskompexet i Sydöstra staden.

7.1.2 Beräkningar - Urin

Nedan följer de beräkningar som genomfördes gällande dimensionering för behandling av urin.

Dimensioneringsberäkningar

I syfte att uppskatta storleken på pilotanläggningen beräknades volymen urin som produceras per dag i kvartersområdet. Detta gjordes genom att använda resultatet i ovanstående avsnitt, A_{tot} , och multiplicera med producerad volym urin per person och dag, V_u , som i genomsnitt motsvarar 1,5 liter (Brydolf 2019). Dessutom, gjordes antagandet att de boende spenderar $2/3$ av dagen i hushållet (Münch & Winker 2011), se ekvation 4.

$$V_{tot,u} = A_{tot} \cdot V_u \cdot \frac{2}{3} \quad (4)$$

Därefter, beräknades den totala produktionen av kväve för kvarteret. Detta, genom att multiplicera urinproduktionen från kvarteret, $V_{tot,u}$, med den genomsnittliga koncentrationen av kväve i urin, $c_{u,N}$, som motsvarar cirka 8 g/liter urin (Rose et al. 2015), enligt ekvation 5.

$$V_{u,N} = V_{tot,u} \cdot c_{u,N} \quad (5)$$

Motsvarande genomfördes för beräkning av fosforproduktionen. Den totala urinproduktionen för kvarteret multiplicerades i stället med den genomsnittliga produktionen av fosfor i urin, $c_{u,P}$, i medel 1,8 g/liter urin, enligt ekvation 6.

$$V_{u,P} = V_{tot,u} \cdot c_{u,P} \quad (6)$$

Resultatet från dessa beräkningar användes sedan för fortsatta beräkningar gällande behandling av urinen.

Area för behandling av urin

Torkningshastigheten för behandling av urin varierar enligt en studie av Senecal mellan 30-40 liter/dag och m^2 (Senecal 2020). Därmed, genomfördes beräkningar för den lägsta respektive högsta hastigheten vid beräkning av hur stor area för torkningsprocessen som kommer att krävas i kvarteret, $A_{v1/v2}$. Detta gjordes genom att dividera den totala volymen urin som kvarteret producerar dagligen, $V_{tot,u}$, med torkningshastigheten, se ekvation 7 för $v1$ (lägre hastigheten). Samma beräkning gjordes för den högre hastigheten, $v2$.

$$A_{v1} = \frac{V_{tot,u}}{v1} \quad (7)$$

Återföring av näringsämnen från urin

Vidare beräkningar gjordes gällande hur stor del av den totala produktionen av näringsämnen som sedan kan återföras efter behandling av urinfractionen, $R_{u,N}$. Detta, genom att multiplicera den totala kväveproduktionen för kvarteret, $V_{u,N}$, med andelen kväve som finns kvar efter torkningsprocessen, P_N , enligt ekvation 8. Andelen kväve som kan återvinnas från torkningsprocessen varierar mellan 64-90 % (ibid.). I detta arbete valdes att utgå från ”värsta tänkbara fall”, vilket innebar att beräkningarna görs utifrån fallet då endast 64 % av det totala kväveinnehållet retenteras.

$$R_{u,N} = V_{u,N} \cdot P_N \quad (8)$$

För möjlig återföring av fosfor genomfördes samma beräkning, där den totala produktionen av fosfor för kvarteret, $V_{u,P}$, multiplicerades med andelen fosfor som kvarhållits efter torkningsprocessen av urin, P_P . Andelen fosfor som återfinns i den torkade urinfractionen är 100 % (Simha 2021).

Reduktion av näringsämnen som skickas till rening som följd av urinsortering

Avslutningsvis, beräknades minskningen av näringsämnen i avloppsvattnet som följd av att implementera urinsortande toaletter. Detta gjordes genom att beräkna kväve- samt fosforinnehållet i urinen som samlas in årligen via de urinsortande toaletterna. Genom att multiplicera den beräknade produktionen av kväve respektive fosfor dagligen i kvarteret, $V_{u,N/P}$, med antal dagar på ett år erhålles ett värde för den årliga produktionen av kväve respektive fosfor, M_u .

Nedan illustreras en exempelberäkning för kväve, se ekvation 9. Samma beräkning gjordes sedan för fosfor.

$$M_{u,N} = V_{u,N} \cdot 365 \quad (9)$$

Vidare, beräknades sedan innehållet av kväve respektive fosfor i fekaliefractionen, M_f (som skickas till rötning). Detta, genom att multiplicera mängden kväve och fosfor i fekalier per person, $V_{f,N/P}$ som motsvarar 0,55 respektive 0,183 kg/person och år (Vinnerås et al. 2006), med antal personer i lägenhetskomplexet, A_{tot} . Nedan illustreras en exempelberäkning för kväve, se ekvation 10. Samma beräkning gjordes sedan för fosfor.

$$M_{f,N} = V_{f,N} \cdot A_{tot} \quad (10)$$

Därefter, dividerades andelen kväve respektive fosfor som produceras via urinen med den totala produktionen av dessa, det vill säga som härstammar från både urin och fekalier, se ekvation 11 för kväve. På så vis erhålles andelen näringsämne som i stället för att skickas till rening genomgår torkningsprocess i syfte att återvinna produkten, Red_N .

$$Red_N = \frac{M_{u,N}}{(M_{u,N} + M_{f,N})} \quad (11)$$

7.1.3 Beräkningar - Fekalier

Nedan följer de beräkningar som genomfördes gällande dimensionering för behandling av fekalier.

Dimensioneringsberäkningar

Även beräkningar av volymen fekalier som kvarteret producerar dagligen genomfördes. I första hand, beräknades totala volymen fekalier, $V_{tot,f}$, genom att multiplicera volymen fekalier per person som produceras per dag, V_f , i medel 0,2 liter per dag (Dalahmeh 2020), med kvarterets invånare, A_{tot} samt $2/3$ likt för urinen (Münch & Winker 2011), se ekvation 12.

$$V_{tot,f} = A_{tot} \cdot V_f \cdot \frac{2}{3} \quad (12)$$

Den urinsorterande toalettmodellen, som tidigare beskrivits, har en dubbelspolande funktion. Med antagandet att knappen för den större spolvolymen, $V_{s,A}$, används 2 gånger per dag och knappen för den mindre spolvolymen, $V_{s,B}$, används 6 gånger per dag (Leonard 2018), kunde den totala vattenförbrukningen för endast spolningen, V_s , beräknas enligt ekvation 13.

$$V_s = (2 \cdot V_{s,A}) + (6 \cdot V_{s,B}) \quad (13)$$

Därefter, beräknades den totala spolvolymen för kvarteret genom att multiplicera vattenförbrukningen per person, V_s , med antal boende i kvarteret, A_{tot} , enligt ekvation 14 nedan.

$$V_{tot,s} = A_{tot} \cdot V_s \quad (14)$$

Vidare, beräknades den totala volymen för både spolvolymen vatten inklusive fekalier genom att summera $V_{tot,f}$ och $V_{tot,s}$, se ekvation 15.

$$V_{tot,fs} = V_{tot,f} + V_{tot,s} \quad (15)$$

Volymen för toalettpapper antogs vara försumbar. Resultatet omvandlades sedan till m^3 samt avrundades till närmsta heltal.

Storlek för biogasreaktorn

För beräkning av biogasreaktorns storlek omvandlades volymen av fekalier samt spolvatten från dm^3 till kg genom att multiplicera respektive fraktion med dess densitet, se ekvation 16. För fekalier är densiteten $1,1 \text{ kg/dm}^3$ medan vatten har densiteten $1,0 \text{ kg/dm}^3$ (Dalahmeh 2020).

$$W_{f,s} = (V_{tot,f} \cdot \rho_f) + (V_{tot,s} \cdot \rho_s) \quad (16)$$

En teoretisk volym för biogasreaktorn kunde sedan beräknas. Detta gjordes genom att utgå från att 25 kg av rötmaterial kräver en volym motsvarande 1 m^3 (Eagri n.d.). Därefter, beräknades volymen som krävs i detta arbete, V_{dig} , genom att dividera mängden av fekalier samt spolvatten, $W_{f,s}$, med 25 enligt ekvation 17.

$$V_{dig} = \frac{W_{f,s}}{25} \quad (17)$$

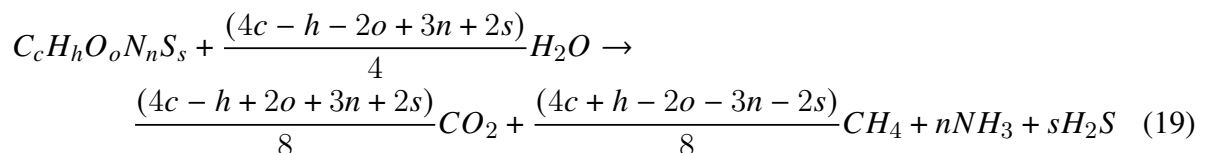
Avslutningsvis, gjordes antagandet att reaktorn kommer att ha formen av en cylinder. Genom att utgå från ekvationen för volymen av en cylinder, se ekvation 18, kunde sedan måtten, det vill säga bottenradie samt höjd, på reaktorn beräknas genom att testa olika lämpliga parametrar och jämföra med volymen som krävs för kvarteret, V_{dig} .

$$Volym = \pi \cdot (radie)^2 \cdot höjd \quad (18)$$

Biogaspotential

Ett angreppssätt för att beräkna exempelvis biogaspotential samt metanhalt i biogasen är att använda *Buswells ekvation*, se ekvation 19 nedan. I ekvationen görs antagandet att produkterna utgörs av koldioxid, metan, ammoniak samt svavelväte. En teoretisk beräkning som är baserad på denna ekvation kan alltså skilja sig från det verkliga fallet. Baserat på att det organiska innehållet i avloppsfractionen fördelas som proteiner, kolhydrater och lipider, kunde den kemiska sammansättningen av dessa fastställas (Jadstrand & Lingmerth 2017). De olika kategoriernas sammansättning, det vill säga proteiner, kolhydrater och lipider, baserades på primärslam, motsvarande det slam som avskiljs vid sedimentering med ett innehåll av exempelvis fekalier samt toalettpapper (Gryaab n.d.). Därmed, gjordes antagandet att primärslam och brunvatten kommer att ha liknande kemisk sammansättning, med den största skillnaden att brunvattenfraktionen är mer utspädd.

Med nedanstående ekvation kunde konstanterna framför vardera ämne i ekvationen beräknas för lipider, kolhydrater samt protein för utvinning av biogas från primärslam.



Baserat på konstanterna som erhöles genom Buswells ekvation, följde sedan en rad beräkningar i syfte att slutligen erhålla värden för totala volymen biogas samt andelen metan i biogasen. För de fullständiga beräkningarna, se Appendix A.6.

Reningsgrad efter rötning

Som beskrivits i bakgrundsavsnittet, har Kungsängsverket höga krav gällande rening av vattnet innan utsläpp i Fyrisån och därför gjordes antagandet att även reningskraven för den eventuella pilotanläggningen kommer att vara höga. Mot bakgrund av detta, genomfördes beräkningar gällande reningsgraden av kväve samt fosfor för reaktorn som mötte flest robusthetsaspekter i detta arbete, AnMBR. Detta gjordes genom att multiplicera totala kväve- respektive fosforhalten i inkommande vatten till Kungsängsverket i Uppsala år 2020, c (Uppsala Vatten och Avfall AB 2020). Koncentrationen av näringsämnen multiplicerades sedan med andelen som återfinns i fekalier, P_f , det vill säga 10 % för kväve respektive 25 % för fosfor (Naturvårdsverket 1995), samt graden av rening för näringsämnen för en AnMBR, Re , 62 % för kväve samt 41 % för fosfor (Ariunbaatar et al. 2021). Se ekvation 20 för exempelberäkning med kväve.

$$RMV_N = c_N \cdot P_{f,N} \cdot Re_N \quad (20)$$

Värdet som erhålles från denna ekvation motsvarar graden av rening. Därefter, subtraherades detta värde, RMV , från koncentrationen kväve respektive fosfor för den orenade fraktionen, c , för att erhålla koncentrationen av respektive näringsämne i det utgående vattnet, UTG . Dessa värden jämfördes sedan mot utsläppskraven för Kungsängsverket i avsnitt 8 *Diskussion*.

7.1.4 Känslighetsanalys

En känslighetsanalys gjordes för att studera det beräknade resultatets säkerhet vid dimensioneringen. Detta gjordes genom att öka antalet boende i lägenhetskomplexet, A_{tot} , med 10 %, då samtliga efterföljande beräkningar beror på denna parameter. Därefter, gjordes beräkningarna för urin samt fekalier med det nya värdet på A_{tot} .

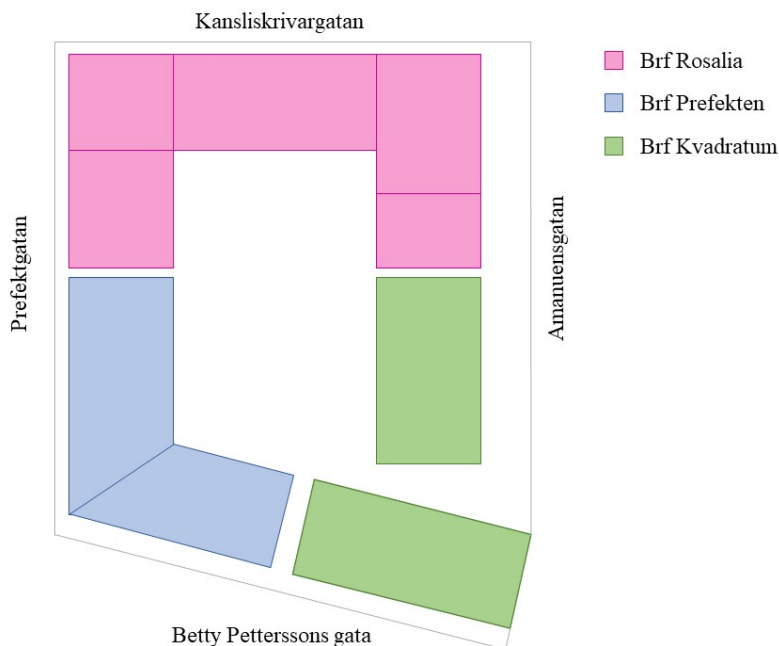
7.2 Resultat

Den sista delen i arbetet motsvarade beräkningar gällande dimensioneringen av pilotanläggningen. Det inledande steget innebar beräkningar gällande skala på anläggningen. Detta följs upp av dimensioneringsdata gällande urin, det vill säga hur mycket som produceras i ett kvarter av storleken som beräknades i tidigare steg. Därefter, beräknades storleken på torkningsanordningen som krävs för urinproduktionen i kvarteret av den beräknade storleken. Dessutom beräknades mängden kväve samt fosfor som efter torkningsprocessen kan återföras till jordbruk. Sedan, beräknades även minskningen av kväve och fosfor i avloppsvattnet till rening som följd av urinsorteringen. Vidare, beräknades sedan dimensioneringsdata gällande fekalieproduktionen i kvarteret. Utifrån detta, kunde sedan biogasreaktors storlek beräknas samt biogaspotentialen vid rötning av fekaliefractionen. Avslutningsvis, beräknades koncentrationen av näringsämnen i det utgående vattnet från bioreaktorn för att jämföra mot gränsvärden.

7.2.1 Skala

Efter en jämförelse mellan den fördjupade översiktplanen över Sydöstra staden samt nybyggda områden i Rosendalsområdet i Uppsala, fastställdes att ett lägenhetskomplex med tre olika bostadsrättsföreningar i Rosendal skulle studeras fördjupande, nämligen *Rosalia, Prefekten*

samt *Kvadratum*. Lägenhetskomplexet omringas av gatorna Kansliskrivargatan, Prefektgatan, Amanuensgatan samt Betty Petterssons gata i Rosendal, se Figur 5.



Figur 5: Lägenhetskomplexet i Rosendalsområdet med Kansligatan, Prefektgatan, Amanuensgatan samt Betty Petterssons gata som omringande gator (Booli n.d.; JM AB 2017, n.d.).

Vidare, identifierades antalet lägenheter i vardera bostadsrättsförening samt summan av samtliga lägenheter. En sammanställning av detta resultat går att se i Tabell 10. Summan av lägenheterna från samtliga föreningar antogs vara densamma för lägenhetskomplexet i Sydöstra staden.

Tabell 10: Antal lägenheter i bostadsrättsföreningarna i det valda lägenhetskomplexet i Rosendalsområdet

Bostadsrättsförening	Antal lägenheter [st]	Referens
Rosalia	116	(JM AB 2017)
Prefekten	87	(Bostadsrättsföreningen Prefekten n.d.)
Kvadratum	76	(JM AB n.d.)
Σ	279	

Därefter, studerades sedan hur våningsplanen kan se ut. För detta valdes föreningen Rosalia att studeras fördjupande då ritningar fanns tillgängliga för den första etappen motsvarande 53 lägenheter, se sammanställning i Tabell 11 nedan. Tabellen visar hur många lägenheter av olika storlek, 1-5 rum och kök, som finns på våningsplan 0-7 i lägenhetshuset.

Tabell 11: Sammanställning av antalet lägenheter av olika storlek (1-5 rum och kök) för respektive våning (0-7) i den första etappen i bostadsrättsföreningen Rosalia. Förkortningen "R.o.k." betyder "rum och kök" (JM AB 2017)

R.o.k.	Våning 0 [st]	Våning 1 [st]	Våning 2-3 [st]	Våning 4-5 [st]	Våning 6-7 [st]
1	1	-	-	-	-
2	4	3	6	4	2
3	-	4	10	6	2
4	1	-	2	2	-
5	1	1	-	4	-

I Tabell 12 redovisas antal boende i vardera lägenhetsstorlek, med antagandet att det bor 1 person i en lägenhet av storleken 1 rum och kök. Dessutom, presenteras resultatet av det totala antalet boende i hela komplexet, det vill säga 154 st.

Tabell 12: Sammanställning av antal lägenheter av vardera storlek (1-5 rum och kök), antalet boende, samt det totala antalet boende i lägenhetshuset i den första etappen av Rosalia med antagandet att antal personer som bor i vardera hushåll motsvarar antalet rum och kök

Rum och kök	Antal lägenheter [st]	Antal boende [st]
1	1	1
2	19	38
3	22	66
4	5	20
5	6	30
Totalt	53	154

Eftersom det endast fanns ritningar tillgängliga för en etapp i en av bostadsrättsföreningarna beräknades sedan ett genomsnittligt antal boende per hushåll till 3 personer genom att dividera antal boende med antal lägenheter (se Tabell 12). Detta antogs gälla för samtliga tre föreningar. Beräkningarna ovan resulterade i att pilotanläggningen i Sydöstra staden ska dimensioneras för 900 personer (avrundat till närmsta jämna hundratal).

7.2.2 Sammanställning av beräknade parametrar för urin och fekalier

I Tabell 13 redovisas resultatet efter beräkningar enligt ekvationerna i metodavsnittet. För beskrivning av vardera parameter, se Appendix A.7. I tabellen går det att se att arean för torkning som krävs ($A_{v1/v2}$) beräknades till 30 respektive 23 m² beroende på torkningshastighet. Vidare, beräknades att 6,9 kg kväve ($R_{u,N}$) och 2,4 kg fosfor ($R_{u,P}$) erhålles från torkningsprocessen. Implementering av urinsorterande teknik resulterar också i en reduktion av 89 % kväve och 84 % fosfor som skickas till reningsverk ($Red_{N/P}$). Det går även att se att volymen spolvatten ($V_{tot,s}$) är högre än volymen fekalier ($V_{tot,f}$) som är substratet vid rötning. Den stora volymen spolvatten från kvarteret resulterar i en reaktor med volymen 833 m³ (V_{dig}), med en 5 meters radie ($radie_{dig}$) och 11 meters höjd ($höjd_{dig}$). Substratet genererar dagligen 37 m³ bigoas (S_{biogas}), med en metanhalt som uppgår till 58 % (ACH_4).

Tabell 13: Sammanställning av beräknade parametrar som rör urin och fekalier

Parameter	Enhet	Beräknat värde	Känslighetsanalys (+10 %)
A_{tot}	[st]	900	990
Urin			
$V_{tot,u}$	[L/d]	1350	1485
$V_{u,N}$	[kg/d]	11	12
$V_{u,P}$	[kg/d]	2,4	2,6
A_{v1}	[m ²]	30	50
A_{v2}	[m ²]	23	37
$R_{u,N}$	[kg]	6,9	7,6
$R_{u,P}$	[kg]	2,4	2,6
Red _N	[%]	89	89
Red _P	[%]	84	84
Fekalier			
$V_{tot,f}$	[L/d]	120	132
$V_{tot,s}$	[L/d]	21 000	23 000
$W_{f,s}$	[ton/d]	21	23
V_{dig}	[m ³]	833	917
radie _{dig}	[m]	5	5
höjd _{dig}	[m]	11	12
S_{biogas}	[m ³]	37	41
S_{CH_4}	[m ³]	21	23
A_{CH_4}	[%]	58	58
UTG _{N,KÄV}	[mg/L]	2,2	-
UTG _{P,KÄV}	[mg/L]	0,95	-

7.2.3 Känslighetsanalys

I Tabell 13 går det att se att känslighetsanalysen, som innebar en ökning av parametern A_{tot} med 10 %, resulterade i högre värden för samtliga parametrar. För de flesta parametrar innebar ökningen av antal boende i komplexet en ungefär lika stor ökning av det beräknade värdet, det vill säga 10 %.

8 Diskussion

Den första frågeställningen i arbetet besvarades genom studie av en rapport av Skambraks et al. (2016). Den vanligast förekommande huvuddrivkraften enligt studien av Skambraks et al. är uppfyllande av lokala mål, medan de vanligast förekommande drivkraften som bidragit till genomförande (dock inte huvuddrivkraft) är uppfyllande av nationella mål följt av erhållande av kunskap från den nya tekniken (Skambraks et al. 2016). I en studie av Maletz (2017) undersöktes avgörande faktorer för implementering av ett källsorterande system i Tyskland och Kina, där resultatet visade att den främsta drivkraften för implementering av ett innovativt avloppssystem är kostnaden för avfallshanteringen (Maletz 2017). Ett införande av källsorterande system innebär i många fall stigande avgifter för avfallshanteringen (Kärrman et al. 2017). Därmed, kan det

krävas påverkan från yttre faktorer för att uppmuntra genomförandet. Detta innebär exempelvis att marknaden för återvunnet material med avloppsursprung främjas i miljöpolitiken, vilket skulle kunna resultera i ett ökat värde av de återvunna produkterna (Maletz 2017). Resultatet från studien av Maletz återspeglas även i pilotanläggningen i Kaja där komposteringsbehandling av svartvatten ersattes med konventionell rening, vilket var en mindre ekonomiskt kostsam process. I fallet för Kaja var inte ekonomi en av de uttryckta drivkrafterna, men styrde ändå teknikvalet vilket tyder på att kostnaden för avfallshanteringen verkar spela roll även i andra länder.

Möjliga drivkrafter för Uppsala sammanställdes baserat på anteckningar från workshopen till *vattenbesparing, uppfyllande av höga reningskrav, resurseffektivitet vad gäller energi och näring, klimatneutralitet* samt *kunskapsgivande*, vilket besvarar den andra frågeställningen. Eftersom drivkrafterna för Uppsala baserats på denna workshop, skulle resultatet kunna bli annorlunda utifall att exempelvis representanter från Uppsala kommun inkluderats i diskussionen. Under intervju med Hagman, diskuterades utvecklingsgruppen med representanter från Helsingborgs stad. Hagman menade att drivkrafterna i fallet för Helsingborg blev sekundära, baserat på ambitionen från utvecklingsgruppen gällande implementering av ett innovativt avloppssystem. I fallet för Uppsala, där planering av Sydöstra staden fortfarande är i en tidig fas, är det svårt att avgöra om drivkrafterna kommer att vara starka och även om de kommer att kvarstå och anses passande när planeringen är i en senare fas. Det skulle dock vara värdefullt att en utvecklingsgrupp tillsattes även i Uppsala, förslagsvis med representanter från både kommunen och exempelvis Uppsala Vatten, för underlätta ett eventuellt införande av ett innovativt system.

Det finns ytterligare systemlösningar och tekniker för rening av källsorterat avloppsvatten som överensstämmer med drivkrafterna som identifierats för Uppsala, vilka inte undersöks i detta arbete. Svaret på frågeställningen kan därmed se annorlunda ut exempelvis beroende på tidsramen för arbetet, då fler tekniker kan inkluderas om arbetet skulle sträckt sig över längre tid.

Den urinsorterande tekniken inkluderades efter den andra workshopen. En sammanställning av olika typer av toaletter (konventionell, urinsorterande samt vakuumpolett), inköpspriset samt spolvolymen går att se i Tabell 7. Den urinsorterande toaletten är betydligt dyrare än den konventionella modellen. Dock skiljer sig priset inte särskilt mycket mellan den urinsorterande toaletten och vakuumpoletter, cirka 300 kr, som är en vanligt förekommande modell i hushåll med källsorterande system. I jämförelsen av hur de två toalettmodellerna möter de fem möjliga drivkrafterna fick modellerna lika många poäng, se Tabell 9. Beslut om vilken typ av toalett som är lämplig för Sydöstra staden skulle alltså kunna bero på vilken drivkraft som huvudsakligen är viktigast för Uppsala. Kostnaden för avfallshanteringen har dock visat sig vara en avgörande faktor till implementering (ibid.). Det kommer därmed exempelvis vara viktigt att produkterna som erhålles genom den urinsorterande tekniken har ett högt värde, för utjämning av toalettmodellens högre investeringskostnad (ibid.).

Eftersom tekniken för urinsortering inkluderades i arbetet, förändrades förutsättningarna för röttningsprocessen. Mot bakgrund av detta, undersöktes även rötning av endast brunvattenfraktionen i arbetet. Detta är en process som i nuläget inte förekommer i särskilt stor utsträckning. Studier har gjorts gällande samrötning av brunvatten med avfall från hushåll med organisk karaktär, exempelvis matrester. I detta arbete har två studier sammanfattats som visar olika resultat. I den första studien, av Jun Wei (2011), var förutsättningarna liknande för toalettmodellen som

undersöktes i detta arbete då fekalier späddes ut med spolvatten innan rötning. Resultatet visade att rötning av fekalier enskilt genererade ett högre metanutbyte i jämförelse med enskild rötning av matavfallet. Vidare, hade en blandad fraktion ingen särskild påverkan på resultatet. Motsatsen till detta visades dock i en studie av Rajagopal et al. (2012). Även i denna studie späddes fekalier ut med spolvatten. Undersökningen visade att metanutbytet för den blandade fraktionen blev högre än i fallen då fraktionerna rötades separat. Utifrån resultaten från dessa studier går det alltså att säga att förutsättningarna under försöken spelar roll. Exempelvis skulle matavfallets innehåll kunna variera mellan de två studierna. Detta tyder på att det krävs undersökningar gällande fekaliefractionens innehåll för vardera specifika fall för att kunna generera en gynnsam biogasprocess, vilket studier har påvisat att det finns potential för gällande rötning av brunvattenfraktionen. För att återkoppla till drivkrafterna som erhöles från den första workshopen, skulle rötning av brunvatten exempelvis svara mot ”Resurseffektivitet gällande energi och näring”, då potential finns gällande återvinning av värme som erhålls från biogasprocessen såväl som användning av slammet i jordbrukssyfte. Även aspekten ”Kunskapsgivande” skulle vara en drivkraft för att motivera valet av separat insamling av brunvatten respektive urin, då det inte ännu är en metod som använts eller används i stor utsträckning. Därtill även att resultatet mellan olika undersökningar kan motsäga varandra, vilket tyder på att omfattande studier behöver göras för att inspirera och motivera till genomförande.

I en studie av Öhrn Sagrelius (2015) utvärderades olika typer av källsorterande system ur ett kostnads- och nyttoperspektiv. De olika systemen jämfördes gällande årlig totalkostnad samt ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. Det första alternativet, som motsvarade rötning i en UASB-reaktor samt efterföljande behandling genom struvitfällning samt ammoniakstripping (Öhrn Sagrelius 2015), liknar behandlingen i Reco Lab i Helsingborg. Processen för struvitutfällning innebär en tillsats av magnesiumklorid som resulterar i att struvitkristaller faller ut. Vidare kräver även ammoniakstrippingen tillsats av kemikalier och är den process med störst kemikaliebehov av de två. Ett praktiskt exempel på detta redovisades i ett försök då det krävdes dubbelt så mycket kemikalier i processen som massan produkt, det vill säga utfälld ammoniumsulfat (Gisle 2021). En av drivkrafterna som identifierades under den första workshopen var ”klimatneutralitet”. Det stora behovet av kemikalier och därmed transporter till anläggningen är ytterligare en anledning till att denna typ av behandling inte helt överensstämmer med drivkrafterna, då det troligtvis inte går att säkerställa att samtliga transporter och tillverkning av kemikalier kan ske på ett klimatneutralt vis.

Det andra alternativet som utvärderades i arbetet av Öhrn Sagrelius inkluderade en AnMBR samt efterbehandling av vattnet via omvänd osmos (Öhrn Sagrelius 2015). I jämförelse med struvitfällning samt ammoniakstripping innebär processen med omvänd osmos ingen tillsats av kemikalier. Däremot kan i stället igensättning av membranet uppstå vilket kräver åtgärder för att kvaliteten på det utgående vattnet inte ska äventyras. Vid kostnadsanalys av systemet var det systemet med ett behov av kemikalier som var dyrast i drift, alltså var systemet med AnMBR mest kostnadseffektivt trots högre kostnader gällande exempelvis arbetskraft vid rengöring eller byte av membran. Även från det samhällsekonomiska perspektivet uppfyllde systemet med AnMBR flest kriterier i studien av Öhrn Sagrelius, där det som skiljer sig mellan denna samt UASB-reaktorn är att tekniken resulterar i minskade utsläpp av läkemedelsrester till recipient. För att återkoppla detta till drivkrafterna som identifierats för Uppsala, var *uppfyllande av höga reningskrav* en av dessa. Denna drivkraft kan kopplas samman med utsläppen till recipient, då uppfyllande av en hög reningsgrad från behandlingsprocesserna resulterar i ett

lägre utsläpp av föroreningar, såsom läkemedel, till recipient. Alltså, skulle implementering av just AnMBR-tekniken i pilotanläggningen i Uppsala resultera i lägre utsläpp av föroreningar till recipient i jämförelse med exempelvis UASB-reaktorn. Därmed, stämmer just denna reaktortyp bäst överens med drivkrafterna som identifierats, se Tabell 8. Under den första intervjun, med Hagman, diskuterades att det finns svårigheter gällande att fastställa nyttan samt att studera dessa typer av system från ett samhällsekonomiskt perspektiv. Såväl som olikheter finns mellan ett konventionellt samt källsorterande avloppssystem finns även skillnader mellan olika typer av källsorterande system, exempelvis att typen av reaktor skiljer sig åt. Därmed, trots att AnMBR-tekniken verkar stämma bäst överens med de möjliga drivkrafterna som identifierats för Uppsala i detta arbete, kan konceptet gällande hur det källsorterande systemet samt föreslagna tekniker framställs vara avgörande för vilket typ av beslut som kommer att fattas.

Gällande gråvattenfraktionen, diskuterades de två alternativen med slutsatsen att referensgruppen påtalat att anlägga våtmarker för gråvattenrening inte lämpar sig i Uppsalas fall på grund av grundvattenskyddet samt det stora ytbehovet. Baserat på att infiltration av gråvatten genom våtmark i Sydöstra staden kan äventyra grundvattnets kvalitet är det därmed inte en passande lösning i Uppsalas fall. Dessutom, resulterar rening av gråvatten genom anlagda våtmarker i ett begränsat användningsområde av det renade vattnet, det vill säga bevattning, medan nanofiltrering, som var det andra alternativet som redovisades, ger en större variation av aktiviteter som vattnet kan användas till.

I nuläget är det svårt att kräva implementering av ett källsorterande system med huvudsyfte att återföra produkter, då kretsloppsaspekten inte juridisk har varit ett tillräckligt motiv för genomförande eftersom denna aspekt även kan uppfyllas med konventionella system. Systemet i Helsingborg diskuterades under den första intervjun med Marinette Hagman. En hög ambitionsnivå och en tydlig målbild från kommunen gällande implementering av just ett källsorterande system underlättade genomförandet i Helsingborg. En tydlig målbild och ett bra beslutsunderlag är viktiga förutsättningar även i andra områden där val av VA-lösning ska göras. På grund av den höga ambitionsnivån i Helsingborg fanns ett utvecklingskontor endast för detta projekt. Den juridiska processen, exempelvis med tillståndsansökan, kommer att skilja sig mellan olika anläggningar. I fallet för Helsingborg, krävdes det exempelvis inget utsläppstillstånd på grund av att vattnet efter behandling i Reco Lab sedan skickas vidare till det kommunala reningsverket. En viktig aspekt för implementering av ett innovativt system i Helsingborg var att besluta om systemet på politisk nivå. Kontakt mellan stadens politiker samt den utredande gruppen resulterade i ett beslut gällande att VA-huvudmannen ej själv står ansvarig om problem skulle uppstå med systemet i Helsingborg. Detta skulle kunna vara en betydande faktor även för Uppsala, då konsekvenserna av eventuella problem med systemet inte lämnas till en enskild aktör. En exakt tid för planeringen och genomförandet av ett källsorterande system går inte att fastställa. I fallet för H+ tog det cirka 10 år, där utredningar gällande systemet som skulle implementeras tog längst tid. En aspekt som är avgörande för byggnation av systemet är acceptans från byggherren. Om det finns tveksamheter från byggbolagets håll, kan detta hindra implementeringen. Stockholm har precis som Helsingborg ett utvecklingskontor som arbetar med att koordinera arbetet och dela ut ansvarsroller. För en framtida implementering i Uppsala skulle införandet av en liknande grupp vara väsentligt. Detta skulle resultera i en tydlig uppdelning av roller och ansvarsområden för aktörer inblandade i pilotanläggningen i Uppsala, vilket i sin tur skulle kunna underlätta arbetet mot en gemensam vision och målbild under ett tidigt skede i arbetet.

Den avslutande delen i arbetet motsvarade beräkningar gällande dimensionering av pilotanläggningen, som svar på den sista frågeställningen i arbetet. Valet av placering i just Sydöstra staden, samt att pilotanläggningen görs på kvartersnivå, baserades dels på att även kvarteret Kölen är i ett tidigt skede gällande planering och utformning. Kvarteret Kölen planeras att byggas om från ett industriområde till ett kvarter med exempelvis kontor, parkeringshus samt handel (Uppsala kommun 2022). Fördelen med placering i kvarteret Kölen är dock att det ligger nära Kungsängsverket vilket skulle underlätta driften av en pilotanläggning eftersom utsläppen då kan efterbehandlas på Kungsängsverket. Vidare, var alternativet att placera anläggningen på Kungsängsverket i mindre skala för att testa tekniken av mindre intresse i detta skede. Detta berodde exempelvis på att det redan finns ett antal pågående pilotprojekt på Kungsängsverket. Reningsverket kommer dessutom att vara under omfattande ombyggnation under de kommande tio åren för att möta behovet av spillvattenrening i ett växande Uppsala. På grund av att planeringen av Sydöstra staden fortfarande är i ett tidigt skede, är ordningen för utbyggnad av området fortfarande inte fastställd, därav att skalan på kvartersområdet baserades på ett lägenhetskomplex i Rosendalsområdet i Uppsala. Beräkningarna resulterade i att ett lägenhetskomplex av denna typ omfattar cirka 900 boende. Å andra sidan, har Oceanhamnen cirka 1400 bostäder (Helsingborgs stad n.d.) och området som ska vara anslutet till den framtida anläggningen i Norra Djurgårdsstaden ska omfattas av cirka 4000 bostäder. I jämförelse mot dessa projekt, är det beräknade antalet boende i detta arbete lägre.

Gällande systemet för urintorkning, resulterade den dagliga urinproduktionen från 900 personer i att torkningsbädden måste ha en area motsvarande 30 m^2 alternativt 23 m^2 beroende på vilken torkningshastighet som kan uppfyllas. En möjlig lösning vid placering av dessa torkningsytor skulle kunna vara att sprida ut de i ett antal mindre torkningsytor, exempelvis en för vardera bostadsrättsförening. Detta skulle innebära tre stycken med storleken 10 m^2 vardera för den lägre torkningshastigheten (med dimensionerna 2×5 meter exempelvis) alternativt med storleken 8 m^2 vardera för den högre (med dimensionerna 2×4 meter exempelvis). Ytterligare alternativ till placering av torkningsbäddarna är att dessa placeras på höjden, ovanpå varandra. Detta skulle resultera i att en mindre bottenarea krävs för anordningen. Dessutom, innebär detta alternativ att upphämtning av den torra fraktionen endast behöver ske vid en plats, i jämförelse mot tre platser. På Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU, har den urinsorterande toaletten såväl som torkningsanläggningen placerats i handikappstoaletten då denna är större till ytan i jämförelse med en icke-handikappstolett (Sveriges Lantbruksuniversitet 2019). Med en urinsorterande teknik i större skala än detta, skulle torkningsbädden/-bäddarna i stället kunna placeras i nära anslutning till lägenhetshuset, se Figur 5. Exempelvis, skulle detta kunna motsvara ett utrymme i vardera källare, alternativt i endast en källare om anordningen kan staplas på höjden. Som nämnt i litteraturstudien, avsnitt 5.2.5 *Urinsortering*, är urinen en instabil lösning där reaktioner som resulterar i exempelvis förlust av ammoniak kan ske om urinen uppehålls under för lång tid i exempelvis ledningar eller lagringstankar. Därmed, är det av stor vikt att studier gällande ledningsdragningen från vardera lägenhet till källarutrymmet genomförs, i syfte att säkerställa en önskad kemisk sammansättning av urinen. Dessutom beräknades mängden kväve samt fosfor som potentiellt kan återföras från den torkade fraktionen urin motsvarande cirka 6,9 respektive 2,4 kg efter torkningstiden som uppfyller WHO:s samt USEPA:s riktlinjer för säker återanvändning på livsmedelsgrödor. Detta, under förutsättningen att förekomsten av patogener är låg. Implementeringen av den urinsorterande tekniken skulle även resultera i en minskning av

mängden kväve respektive fosfor som skickas till reningsverk eftersom insamlingen sker separat. Reduktionen av kväve till reningsverk beräknades till 89 % och 84 % för fosfor.

Gällande fekalier, resulterade beräkningarna i en volym för biogasreaktorn motsvarande 833 m³ för området med 900 boende. Detta möjliggjorde att mått på reaktorn kunde fastställas till radien 5 meter och höjden 11 meter. Med dessa mått erhålles en volym motsvarande 864 m³, vilket alltså med marginal ska vara tillräckligt för kvarterets storlek. I Tabell 13 går det att se att volymen fekalier är mindre än volymen spolvatten. Fekalievolymer motsvarar knappt 1 % av den totala volymen substrat som skickas till rötning. Detta innebär att spolvolymen är orsaken till att volymen på reaktorn blir stor, vilket beror på att den urinsorterande toalettmodellen valdes för studie. Om vakuumpoiletten i stället skulle studerats, hade volymen för reaktorn blivit mindre då det endast används 0,5 liter per spolning, jämfört mot 2-4 liter som användes i beräkningarna i detta arbete. Substratet kan koncentreras genom implementering av ett sedimenteringssteg innan röttningsprocessen, vilket skulle resultera i att volymen minskar. I detta fall skulle endast det mer koncentrerade fekalieslammet kunna skickas till rötning, medan vattnet från sedimenteringsprocessen skickas till reningsverk för konventionell rening. Ytterligare förslag till en förbättrad röttningsprocess är att matavfallskvarnar installeras i lägenheterna, vilket genererar ett substrat med lägre innehåll av vatten till rötning.

Rötning av brunvattenfraktionen innebär en daglig produktion av 37 m³ biogas, med 58 % metaninnehåll. I miljörapporten för Kungsängsverket år 2020 redovisades att metanhalten i biogasen uppgick till 63 % i snitt (Uppsala Vatten och Avfall AB 2020). Alltså, genererar rötning av brunvattenfraktionen ett lägre innehåll av metan i jämförelse med Uppsalas nuvarande substrat (slam från försedimentering från rening av blandat avloppsvatten) (ibid.). Röttningsprocessen behöver därför optimeras för att uppnå samma metaninnehåll som processen på Kungsängsverket. Vidare resulterade beräkningarna gällande rening av inkommande brunvatten i ett fastställande att ytterligare reningssteg kommer att krävas efter rötning i AnMBR för att uppfylla Uppsalas reningskrav. Kvävereningen med denna reaktortyp resulterar i att koncentrationen av utgående vatten har ett innehåll motsvarande 2,2 mg/liter. I jämförelse mot reningskravet, 10 mg/liter, innebär detta alltså en tillräcklig rening. För fosfor, å andra sidan, resulterar reningen i membranreaktorn en koncentration av 0,95 mg/liter i utgående vatten. I jämförelse mot gränsvärdet, 0,25 mg/liter, är detta cirka 4 gånger för stort mot det tillåtna. Både i studien av Öhrn Sagrelius samt i en utvärdering av Svenskt Vatten, i syfte att ta fram underlag till ett reningsverk i Hammarby Sjöstad, presenterades AnMBR med efterföljande behandling i form av omvänd osmos som lämpligt reningsalternativ. En anläggning med rötning i AnMBR följt av behandling genom omvänd osmos kommer att resultera i en lägre våtvolum i jämförelse med både aktivslam-processen på en konventionell reningsanläggning samt UASB-reaktorn (som kräver en våtvolum i samma storleksordning som den konventionella processen). Kostnaderna för membran-tekniken kommer dock att vara högre (Hellström et al. 2008). Sammanfattningsvis, kan anaerob behandling i membranbioreaktor i kombination med omvänd osmos generera god återvinning av näringsämnen i avloppsvattnet. Detta då koncentratet som erhålles efter behandling har ett högt innehåll av växtnäring samt ett lågt innehåll av tungmetaller. Om avloppsvattnet dessutom källsorteras kan den högre användningen av energi som membran-tekniken innebär vägas mot produkterna som erhålles, nämligen utvunnen biogas och näringsämnen för återföring (Hellström et al. 2007).

Som förväntat ökar värdet på respektive parameter då A_{tot} ökas med 10 %. Ökningen av antalet boende i området genererar mer urin samt fekalier, vilket innebär att erhållandet av torr urinprodukt samt biogas från rötning av fekalier ökar. Däremot erhålles samma reduktion av kväve och fosfor till reningsverk samt andelen metan i erhållen biogas. Därmed bör inte antalet boende vara en särskilt känslig parameter för resultatet i detta arbete.

9 Slutsats

Möjliga drivkrafter till pilotanläggning med källsorterande avloppssystem i Uppsala identifierades som *Vattenbesparing*, *Uppfyllande av höga reningskrav*, *Resurseffektivitet vad gäller energi och näring*, *Kunskapsgivande* samt *Klimatneutralitet*. System som stämmer överens med dessa drivkrafter kan innefatta rötningsteknik, exempelvis i membranbioreaktor (AnMBR), samt insamling av urin för separat behandling genom torkning. För ett genomförande av en anläggning med sådan innovativ teknik kommer en stor ambition från inblandade aktörer, exempelvis Uppsala kommun, Uppsala Vatten och byggherrar, att krävas. Detta för att underlätta under både planerings- samt implementeringsprocessen. Aktiviteter för att öka kunskapen, såsom ytterligare workshops och möten, kan vara alternativ till fortsatt arbete i strävan mot implementeringen av ett källsorterande avloppssystem i Sydöstra staden i Uppsala.

Systemlösningen som bäst möter de identifierade drivkrafterna inkluderar rötning av fekaliefractionen i membranbioreaktor (AnMBR), samt urinsortering med efterföljande torkning. Beräkningar gällande en potentiell implementering resulterade i att pilotanläggningen i Sydöstra staden bör dimensioneras för 900 personer. Mått på membranreaktorn för behandling av fekalier från kvarteret fastställdes till radien 5 meter och höjden 11 meter. Den dagliga urinproduktionen för ett kvarter av denna storlek resulterade i en torkningsbädd motsvarande 30 m^2 alternativt 23 m^2 (beroende på torkningshastighet).

Referenser

- Abrahamsson, A. & Ljunggren, M. (2008). *Bedömningsgrunder och reningskrav för avloppsreningsverk, 25-2000 pe, i Laholms kommun*. Examensarbete. Miljövetarprogrammet, Sektionen för ekonomi och teknik, Högskolan Halmstad. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:238904/FULLTEXT01.pdf> [2022-01-27].
- Arden, S. & Ma, X. (2018). Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. *Science of The Total Environment*, vol. 630, ss. 587–599. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971830617X?via%3Dihub#!> [2022-03-01].
- Ariunbaatar, J., Bair, R., Ozcan, O., Ravishankar, H., Esposito, G., Lens, P. N. L. & Yeh, D. H. (2021). *Performance of AnMBR in Treatment of Post-consumer Food Waste: Effect of Hydraulic Retention Time and Organic Loading Rate on Biogas Production and Membrane Fouling*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.594936/full> [2022-05-02].
- Al-Asheh, S., Bagheri, M. & Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, (4). Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016421000311#!> [2022-03-17].
- Avloppscenter (n.d.[a]). *Laufen Save, Urinseparerande toalett, vägghängd*. Tillgänglig: <https://www.avloppscenter.se/vara-produkter/olika-typer-av-wc/urinseparerande-wc-1/laufen-save-urinseparerande-toalett-vagghangd.html> [2022-03-29].
- Avloppscenter (n.d.[b]). *JETS TOALETT JADE VÄGG FLEXI*. Tillgänglig: <https://www.avloppscenter.se/vara-produkter/vakuumtoaletter/tillbehor-jets/flexi-systemet/jets-vakuum-toaletter/jets-toalett-jade-vagg-flexi.html> [2022-03-29].
- Avloppsguiden (n.d.). *Toaletter*. Tillgänglig: <https://avloppsguiden.se/informationssidor/toaletter/> [2022-06-01].
- Banerjee, S., Prasad, N. & Selvaraju, S. (2022). Reactor Design for Biogas Production - A Short Review. *Journal of Energy and Power Technology*, (4). Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/357736016_Reactor_Design_for_Biogas_Production-A_Short_Review [2022-02-28].
- BAUHAUS (n.d.). *TOALETT GUSTAVSBERG SKANDIC 6400 INKL STANDARDSITS*. Tillgänglig: <https://www.bauhaus.se/toalett-gustavsberg-skandic-6400-inkl-standardsits> [2022-03-29].
- Booli (n.d.). *Välkommen till BRF Prefekten i Kåbo*. Tillgänglig: <https://www.booli.se/bostadsrattsforening/277588> [2022-03-30].
- Bostadsrättsföreningen Prefekten (n.d.). *Brf Prefekten*. Tillgänglig: <https://www.prefekten.se/> [2022-03-29].
- Brydolf, J. (2019). *Så fungerar njurar och urinvägar*. Tillgänglig: <https://www.1177.se/liv--halsa/sa-fungerar-kroppen/njurar-och-urinvagar/> [2022-04-01].
- Buntner, D., Sánchez, A. & Garrido, J. (2013). Feasibility of combined UASB and MBR system in dairy wastewater treatment at ambient temperatures. *Chemical Engineering Journal*, ss. 475–481. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894713008164> [2022-02-22].
- Carlén, G., Nenzén, M., Adolphson, T., Alvin, L., Carlsson, K. & McConnachie, D. (2019). *Uppsalas framtida avloppsförsörjning – system och lokalisering*. Tekn. rapport. Uppsala kommun, Uppsala Vatten & Avfall AB. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/contentassets/13cb8885ca51464f83bdc06c90942091/5.-uppsalas-framtida-avloppsforsorjning---system-och-lokalisering.pdf> [2022-03-16].
- Chang, S. (2014). *Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR) for Wastewater Treatment*. Tekn. rapport. Kanada: Guelphs Universitet. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/276495148_Anaerobic_Membrane_Bioreactors_AnMBR_for_Wastewater_Treatment [2022-02-16].
- Collivignarelli, M. C., Miino, M. C., Gomez, F. H., Torretta, V., Rada, E. C. & Sorlini, S. (2020). Horizontal Flow Constructed Wetland for Greywater Treatment and Reuse: An Experimental Case. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17 (7). Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/7/2317> [2022-03-01].
- Dalameh, S. (2020). *Hushållsavlopp – sammansättning och flöden och krav på små anläggningar*. Föreläsning för Sveriges Lantbruksuniversitet 2020-11-03. Uppsala. [2022-04-01].
- E. Uman, A., A. Bair, R. & H. Yeh, D. (2021). Assessment of an Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) Treating Medium-Strength Synthetic Wastewater under Cyclical Membrane Operation. *Membranes*. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/6/415> [2022-02-21].
- Eagri (n.d.). *Size and Site Selection for Biogas plant*. Tillgänglig: <http://eagri.org/eagri50/AENG352/lec14.pdf> [2022-04-11].

- Folkhälsomyndigheten (2020). *Allmänna hänsynsregler*. Tillgänglig: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/miljohalsa-och-halsoskydd/tillsynsvagledning-halsoskydd/tillampa-miljobalken/allmanna-hansynsregler/> [2022-01-27].
- Frid, S. (2012). *Optimering och effektivisering av biogasprocessen vid biogasanläggningen Kungsängens gård*. Examensarbete. Institutionen för mikrobiologi, Sveriges lantbruksuniversitet. Tillgänglig: https://www.uppsalaavatten.se/globalassets/dokument/om-oss/rapporter-och-exjobb/2012_sara_frid.pdf [2022-02-07].
- Gisle, S. (2021). *En förstudie om näring- och energiåtervinning från källsorterande avloppssystem*. Examensarbete. Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap, Karlstads Universitet. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1582618/FULLTEXT01.pdf> [2022-04-28].
- Goddek, S., Delaide, B. P. L., Joyce, A., Wuertz, S., Jijakli, M. H., Gross, A., Eding, E. H., Bläser, I., Reuter, M., Keizer, L. C. P., Morgenstern, R., Körner, O., Verreth, J. & Keesman, K. J. (2018). Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. *Aquacultural Engineering*, vol. 83, ss. 10–19. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860918300566> [2022-06-28].
- Gryaab (n.d.). *Slam*. Tillgänglig: <https://www.gryaab.se/vad-vi-gor/slam/> [2022-04-18].
- Havs- och Vattenmyndigheten (2017). *När är det skäligt att ställa krav på kretslopp av växtnäringssämnen?* Tillgänglig: <https://www.havochvatten.se/avlopp-och-dricksvatten/sma-avloppsanlaggningar/fragor-och-svar-om-sma-avlopp/kretslopp-och-resurshallning/2017-01-30-nar-ar-det-skaligt-att-stalla-krav-pa-kretslopp-av-vaxtnaringsamen.html> [2022-03-24].
- Hellström, D., Baky, A., Bergström, R., Ek, M., Jonsson, L., Nordberg, Å. & Olsson, L.-E. (2007). *Utvärdering av anaerob membranbioreaktor och omvänd osmos för utvinning av biogas och näringsämnen ur avloppsvatten från hushåll*. Tekn. rapport. Tillgänglig: https://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf/rapporter/avlopp/avloppsrening/hby41_r06-2007_anaerob_membranbioreaktor.pdf [2022-06-05].
- Hellström, D., Jonsson, L., Nordberg, Å. & Olsson, L.-E. (2008). *Anaerob behandling av hushållspillvatten och klosettavlopp blandat med organiskt hushållsavfall – resultat från Sjöstadverket, Stockholm*. Tekn. rapport. Tillgänglig: http://vav.griffel.net/filer/Rapport_2008-08.pdf [2022-06-05].
- Helsingborgs stad (n.d.). *Oceanhamnen i Helsingborg*. Tillgänglig: <https://hplus.helsingborg.se/etapper/oceanhamnen/> [2022-06-22].
- Hesselgren, F. (2004). *Anaerob psykrofil behandling av hushållsavloppsvatten i UASB - Utvärdering av kapaciteten hos en två-stegs UASB-reaktor för behandling av hushållsavloppsvatten*. Examensarbete. Institutionen för Informationsteknologi, Uppsala Universitet. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:159167/FULLTEXT01.pdf> [2022-02-07].
- INKA Interactive (n.d.). *Att lyckas med en Proof of Concept*. Tillgänglig: <https://www.inka.se/vad-vi-kan/loesningar/poc-proof-of-concept/https%3a%2f%2fwww.inka.se%2fvad-vi-kan%2floesningar%2fpoc-proof-of-concept%2f> [2022-01-31].
- Jadstrand, J. & Lingmerth, J. (2017). *Gödsel som substrat vid biogasproduktion - Undersökning av biogas- och metanpotential i satsvisa laboratorieförsök*. Examensarbete. Institutionen för byggd miljö och energiteknik, Linnéuniversitetet. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1109261/FULLTEXT01.pdf> [2022-04-18].
- Jansson, J. (2006). *Utvärdering av behandling av hushållspillvatten med anaeroba reaktorer (UASB) och omvänd osmos för närsaltåtervinning och höggradig rening*. Examensarbete. Mälardalens Högskola. Tillgänglig: http://www.stockholmvattenochavfall.se/globalassets/pdf1/rapporter/avlopp/avloppsrening/r09_2006_jessica_jansson.pdf [2022-02-16].
- JM AB (2017). *UPPSALA ROSENDAL - Rosalia 1 - Bostadsfakta*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.jm.se/globalassets/jm.se/bostader/upsala/upsala/rosendal/rosalia-1/dokument/rosalia-etapp1-bostadsfakta-v1.pdf> [2022-03-29].
- JM AB (n.d.). *Kvadratum | välplanerade bostäder i Rosendal | JM*. Tillgänglig: <https://www.jm.se/upsala-lan/upsala-kommun/rosendal/kvadratum-1/> [2022-03-29].
- Johansson, M. (2001). "URINE SEPARATION – CLOSING THE NUTRIENT CYCLE". Tillgänglig: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/JOHANSSON%202000%20Urine%20Separation%20-%20Closing%20the%20Nutrient%20Cycle_0.pdf [2022-03-25].
- Johansson, M. & Albinsson, M. (2020). *Förstudie avseende avloppslösningar för nya stadsdelar i Knivsta och Uppsala*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <http://www.sou.gov.se/wp-content/uploads/2020/04/F%C3%B6rstudie-avseende-avloppsl%C3%B6sningar-f%C3%B6r-nya-stadsdelar-Ecoloop.pdf> [2022-01-04].

- Jun Wei, L. (2011). Anaerobic Co-digestion of Brown Water and Food Waste for Energy Recovery. *World Wide Workshop for Young Environmental Scientists (WWW-YES-2011) - Urban Waters: resource or risks?*, (11). Tillgänglig: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00607958> [2022-04-11].
- Jönsson, F. (2013). *The Future of Urine Diversion - an Australian context*. Examensarbete. Lunds Universitet. Tillgänglig: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=4530250&fileId=4530251> [2022-04-06].
- Karlsson, C. (2019). *Teknikutvärdering av Urintorkning i Pilotskala - ett Fältförsök i Finland*. Examensarbete. Institutionen för Energi och Teknik, Sveriges lantbruksuniversitet. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1374211/FULLTEXT01.pdf> [2022-04-04].
- Kjerstadius, H., Haghatafshar, S. & Davidsson, Å. (2015). "Potential for nutrient recovery and biogas production from blackwater, food waste and greywater in urban source control systems". *Environmental Technology*. 13. utg., ss. 1707–1720. Tillgänglig: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2015.1007089> [2022-02-01].
- Kärman, E., Kjerstadius, H., Davidsson, Å., Hagman, M. & Dahl, S. (2017). *Källsorterande system för spillvatten och matavfall – erfarenheter, implementering, ekonomi och samhällsnytta*. Tekn. rapport. Tillgänglig: https://www.svensktvatten.se/contentassets/37d5142be0f946d3a2cdf26cb16e3dc0/svu-rapport_2017-04.pdf [2022-02-03].
- Langergraber, G. & Günter, E. (2004). Ecological Sanitation—a way to solve global sanitation problems? *Environment International*, vol. 31 (3), ss. 433–444. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041200400145X> [2022-05-08].
- Lantmäteriet (2022). *Uppsala*. Tillgänglig: <https://karta.geoskolan.se/?config=geoskolan.json> [2022-05-25].
- LAUFEN (n.d.). *Save! | Design & Innovation*. Tillgänglig: <https://www.laufen.com/news-stories/en/market-export/news-stories/save-smart-sanitation-2> [2022-03-28].
- Leitão, R. C. (2004). *Robustness of UASB reactors treating sewage under tropical conditions*. Doktorsavhandling. Wageningen Universitet, Wageningen, Nederländerna. Tillgänglig: <https://edepot.wur.nl/121572> [2022-02-23].
- Leonard, J. (2018). *How often should you pee? What's normal and what's perfect?* Tillgänglig: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/321461> [2022-06-02].
- Lew, B., Lustig, I., Beliaevski, M., Tarre, S. & Green, M. (2011). An integrated UASB-sludge digester system for raw domestic wastewater treatment in temperate climates. *Bioresour. Technol.*, vol. 102 (7), ss. 4921–4924. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852411000988?via%3Dihub> [2022-02-23].
- Lew, B., Tarre, S., Beliaevski, M., Dosoretz, C. & Green, M. (2009). "Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for domestic wastewater treatment". *Desalination*. 3. utg., ss. 251–257. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916409002720> [2022-02-18].
- MACRO (n.d.). *Om Macro - Mat i cirkulära robusta system*. Tillgänglig: <https://www.macrosystem.se/om-macro/> [2022-06-01].
- Maletz, R. (2017). Success Factors for the Implementation of Separate Collection Systems. *Source Separation and Recycling*, vol. 63, ss. 297–314. Tillgänglig: https://link.springer.com/chapter/10.1007/698_2017_51 [2022-06-04].
- Miljöförvaltningen Uppsala kommun (2021). *Yttrande över remiss om tillstånd enligt miljöbalken för om- och nybyggnation och drift av Kungsängsverkets avloppsreningsverk*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/contentassets/4f7716f2d6d74f54b28d684dd3962172/10.-yttrande-over-remiss-om-tillstand-enligt-miljobalken-for-om--och-nybyggnation-och-drift-av-kungsangsverket-avloppsreningsverk.pdf> [2022-06-27].
- Miyamoto, M., Nakashimada, Y. & Uemiya, S. (2015). *Membrane reactors for biogas production and processing*. Tekn. rapport. Gifu University, Hiroshima University. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178242235000121> [2022-02-16].
- Mullai, P., Vishali, H., Yogeswari, M., Estefanía López, M. & Eldon, R. R. (2020). "Methane production and recovery from wastewater". *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, ss. 17–36. [2022-02-07].
- Münch, E. von & Winker, M. (2011). *Technology review of urine diversion components - Overview on urine diversion components such as waterless urinals, urine diversion toilets, urine storage and reuse systems*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/875> [2022-05-03].
- MälarenEnergi (2018). *Munga får en unik och hållbar avloppslösning*. Section: Framtidens samhälle. Tillgänglig: <https://blogg.malarenenergi.se/unik-avloppslosning-i-munga/> [2022-06-01].
- Naturskyddsföreningen (2021). *Konstgödsel och klimatpåverkan*. Tillgänglig: <https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/problemet-med-konstgodselt/> [2022-06-16].

- Naturvårdsverket (1995). *Vad innehåller avlopp från hushåll?* Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/4400/978-91-620-4425-7.pdf> [2022-05-15].
- Naturvårdsverket (n.d.[a]). *Avlopp*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/avlopp/> [2022-05-03].
- Naturvårdsverket (n.d.[b]). *Avloppshantering och miljömålsarbetet*. sv. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/avlopp/avloppshantering-och-miljomalsarbetet/> [2022-05-03].
- Naturvårdsverket (n.d.[c]). *Avloppsvattnets miljöpåverkan*. sv. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/avlopp/avloppsvattnets-miljopaverkan/> [2022-05-03].
- Nordberg, Å. (2020). *Biogas production – theoretical and practical calculations, kursen "Små avloppssystem, näringsåterföring och slambehandling på Sveriges Lantbruksuniversitet*.
- NSVA (2019). *Helsingborg: Tre rör ut*. sv-SE. Tillgänglig: <https://projekt.nsva.se/kommuner/helsingborg/tre-ror-ut/> [2022-06-01].
- Petersens, E. af & Granath, M. (2015). *Utvärdering av användaraspekter av vakuumtoaletter till slutna tank*. Tekn. rapport. Tillgänglig: https://www.wrs.se/wp-content/uploads/2015/12/Vakuumpport-Kungsbacka_WRS_150510-med-bilagor.pdf [2022-06-01].
- Phee, V. P. Z. (2011). *Feasibility of anaerobic digestion on brown water*. Tekn. rapport. Nanyangs Tekniska Universitet. Tillgänglig: <https://dr.ntu.edu.sg/handle/10356/45098?mode=simple> [2022-04-11].
- Rajagopal, R., Lim, J. W., Mao, Y., Chen, C.-L. & Wang, Y.-Y. (2012). Anaerobic co-digestion of source segregated brown water (feces-without-urine) and food waste: For Singapore context. *Science of the Total Environment*, (433), ss. 877–886. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712014404?via%3Dihub> [2022-04-11].
- Ramon, G., Green, M., Semiat, R. & Dosoretz, C. (2004). Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane filtration. *Desalination*, vol. 170 (3), ss. 241–250. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916404800286#!> [2022-03-01].
- Rana, D. B., Yenkie, M., Khatri, N., Haldar, A. & Puri, P. (2017). *Greywater Treatment by Constructed Wetland: A New Age Technique*. Tekn. rapport. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/317868948_Greywater_Treatment_by_Constructed_Wetland_A_New_Age_Technique [2022-03-01].
- Riksdagsförvaltningen (1998). *Miljöbalk (1998:808)*. Last Modified: 2014-12-12 15:00:54. Tillgänglig: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/miljobalk-1998808_sfs-1998-808 [2022-01-27].
- Riksdagsförvaltningen (2006). *Lag (2006:412) om allmänna vattentjänster Svensk författningssamling 2006:2006:412 t.o.m. SFS 2017:749 - Riksdagen*. Last Modified: 2014-12-12 15:00:54. Tillgänglig: https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2006412-om-allmanna-vattentjanster_sfs-2006-412 [2022-06-01].
- Robles, Á., Jiménez-Benítez, A., Giménez, J. B., Durán, F., Ribes, J., Serralta, J., Ferrer, J., Rogalla, F. & Seco, A. (2022). A semi-industrial scale AnMBR for municipal wastewater treatment at ambient temperature: performance of the biological process. *Water Research*, vol. 215, s. 118249. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135422002123> [2022-06-28].
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B. & Cartmell, E. (2015). The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 45 (17), ss. 1827–1879. Tillgänglig: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10643389.2014.1000761> [2022-04-06].
- Senecal, J. (2020). *Safe Nutrient Recovery from Human Urine - System and Hygiene Evaluation of Alkaline Urine Dehydrat*. Doktorsavhandling. Institutionen för Energi och Teknik, Sveriges lantbruksuniversitet. Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/17113/1/senecal_j_200601.pdf [2022-04-04].
- Shon, H., Phuntsho, S., Chaudhary, D., Vigneswaran, S. & Cho, J. (2013). Nanofiltration for water and wastewater treatment – a mini review. *Drinking Water Engineering and Science*, vol. 6 (1), ss. 47–53. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/307838739_Nanofiltration_for_water_and_wastewater_treatment_-_a_mini_review [2022-03-01].
- Simha, P. (2021). *Alkaline Urine Dehydration - How to dry source-separated human urine and recover nutrients?* Doktorsavhandling. Institutionen för Energi och Teknik, Sveriges lantbruksuniversitet. Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/23473/1/simha_p_210511.pdf [2022-04-10].
- Skambraks, A.-K., Kjerstadius, H., Meier, M., Davidsson, Å., Wuttke, M. & Giese, T. (2016). "Source separation sewage systems as a trend in urban wastewater management: Drivers for the implementation of pilot areas in Northern Europe". *Sustainable Cities and Society*. Hamburg, Lund: Elsevier, ss. 287–296. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670716304000> [2022-01-28].

- Stockholm Stad (2022). *Med uppdrag att ligga i framkant - Stockholm växer*. Tillgänglig: <https://vaxer.stockholm/nyheter/2022/02/med-uppdrag-att-ligga-i-framkant/> [2022-05-24].
- Stockholms stad (april 2020). *Sorterande avloppssystem till Värtahamnen och Loudden*. Tillgänglig: <https://www.norradjurgardsstaden2030.se/innovationer/sorterande-avloppssystem-till-vartahamnen-och-loudden/> [2022-06-01].
- Sweden Water Research (2018). *NSVA får investeringsbidrag för rening av läkemedel*. Tillgänglig: <https://www.swedenwaterresearch.se/projektnyheter/nsva-far-investeringsbidrag-rening-av-lakemedel/> [2022-03-01].
- Sveriges Lantbruksuniversitet (2019). *SLU har fått en egen urinsorterande toalett!* Tillgänglig: <https://www.slu.se/ew-nyheter/2019/11/slu-har-fatt-en-egen-urinsorterande-toalett/> [2022-03-28].
- Tebini, S. (2020). *Karakterisering av kommunalt avloppsvatten - Partikelstorleksfördelning och sammansättning av COD*. Examensarbete. Institutionen för Kemiteknik, Lunds universitet. Tillgänglig: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9020376> [2022-04-18].
- Telge (2022). *Våtkomposten i Hölö, unik kretsloppsanläggning*. Tillgänglig: <https://www.telge.se/vatten-avlopp/kretsloppsanlaggning/> [2022-06-01].
- Telkamp, P. (2006). *Separate collection and treatment of domestic wastewater in Norway*. Examensarbete. Wageningen Universitet, Wageningen, Nederländerna. Tillgänglig: http://www.switchurbanwater.eu/outputs/pdfs/W4-I_GEN_PHD_Separate_collection_treatment_domestic_wastewater_in_Norway_-_Telkamp.pdf [2022-03-02].
- The International Water Association (2013). *Up Flow - Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) | IWA Publishing*. Tillgänglig: <https://www.iwapublishing.com/news/flow-anaerobic-sludge-blanket-reactor-uasb> [2022-02-16].
- Todt, D., Bisschops, I., Chatzopoulos, P. & H. A. van Eeker, M. (2021). Practical Performance and User Experience of Novel DUAL-Flush Vacuum Toilets. *Water*, vol. 13 (16). Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2228> [2022-06-28].
- Tolksdorf, J., Lu, D. & Cornel, P. (2016). First implementation of a SEMIZENTRAL resource recovery center. *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol. 6 (4), ss. 466–475. Tillgänglig: <https://iwaponline.com/jwr/article/6/4/466/28849/First-implementation-of-a-SEMIZENTRAL-resource> [2022-02-28].
- UNDP (2021). *Mål 6: Rent vatten och sanitet för alla*. Tillgänglig: <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-6-rent-vatten-och-sanitet/> [2022-05-03].
- United States Environmental Protection Agency (2004). *Constructed Treatment Wetlands*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.epa.gov/wetlands/constructed-wetlands> [2022-03-01].
- Uppsala kommun (2021). *Kommunens arbete inom miljö och klimat*. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/kommun-och-politik/sa-arbetar-vi-med-olika-amnen/sa-arbetar-vi-med-miljo-och-klimat/kommunens-arbete-inom-miljo-och-klimat/> [2022-05-08].
- Uppsala kommun (2022). *kvarteret Kölen*. Tillgänglig: <https://www.uppsala.se/bygga-och-bo/samhallsbyggnad-och-planering/detaljplaner-program-och-omradesbestammelser/hitta-detaljplaner-och-omradesbestammelser/2018/kvarteret-kolen/> [2022-04-26].
- Uppsala Vatten och Avfall AB (2019). *Miljörapport 2019 - Kungsängsverket*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.uppsalavatten.se/globalassets/dokument/om-oss/rapporter-och-exjobb/miljorapporter/miljorapport-kungsangverket-2019.pdf> [2022-03-16].
- Uppsala Vatten och Avfall AB (2020). *MILJÖRAPPORT 2020 - Kungsängsverket*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.uppsalavatten.se/globalassets/dokument/om-oss/rapporter-och-exjobb/miljorapporter/miljorapport-kungsangverket-2020.pdf> [2022-05-15].
- Uppsala Vatten och Avfall AB (n.d.). *Kungsängsverket*. Tekn. rapport. Tillgänglig: <https://www.uppsalavatten.se/globalassets/dokument/hushall/blanketter-och-trycksaker/avloppsrening-vid-kungsangverket.pdf> [2022-01-26].
- Wiklander, J., Nenzén, M., Andersson, J., Franzén, J., Söderquist, C., Kahlström, O., Klingwall, L., Landqvist, G., Guterstam, S., Bergman, A., Dahlin, Å. & Andersson, F. (2021). *Fördjupad översiktsplan för de Sydöstra stadsdelarna inklusive Bergsbrunna*. Tekn. rapport. Tillgänglig: https://www.uppsala.se/contentassets/b10f912d4da64f69b0f2fb8469f485cf/01_fordjupad-oversiktsplan-for-de-sydostra-stadsdelarna.pdf [2022-01-25].
- Vinnerås, B., Palmquist, H., Balmér, P. & Jönsson, H. (2006). The characteristics of household wastewater and biodegradable solid waste — A proposal for new Swedish design values. *Urban Water Journal*, vol. 3 (1), ss. 3–11. Tillgänglig: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15730620600578629> [2022-05-18].
- Wostman (n.d.). *Vacuum toilets*. en-US. Tillgänglig: <https://www.wostman.se/en/vacuum-toilets> [2022-06-27].
- Öhrn Sagrelius, P. (2015). *Sorterande avloppssystem: kostnads- och nyttoanalys i stadsdelen H+, Helsingborg*. Examensarbete. Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik, Institutionen för kemiteknik, Lunds universitet. Tillgänglig: <https://docplayer.se/12718471-Sorterande-avloppssystem-kostnads-och-nyttanalys-i-stadsdelen-h-helsingborg.html> [2022-03-09].

A Appendix

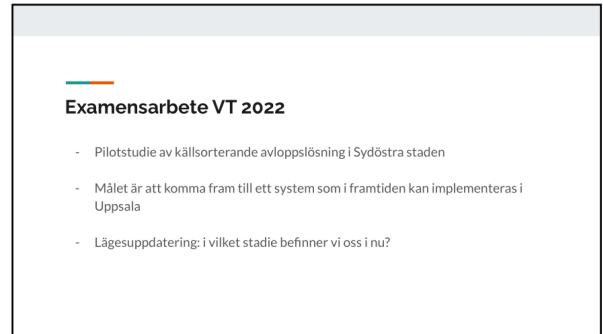
A.1 Presentation - Workshop 1

Nedan följer PowerPoint-presentationen med underlaget som tagits fram gällande drivkrafter till den första workshopen.



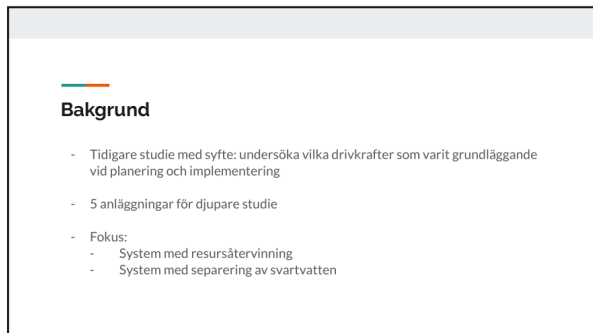
Drivkrafter för implementering av källsorterande avloppssystem

Linnea Ekblad
2022-02-14



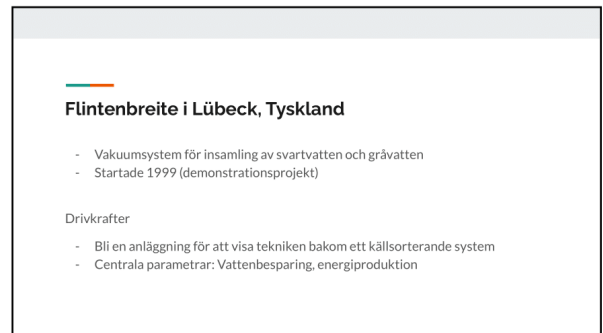
Examensarbete VT 2022

- Pilotstudie av källsorterande avloppslösning i Sydöstra staden
- Målet är att komma fram till ett system som i framtiden kan implementeras i Uppsala
- Lägesuppdatering: i vilket stadie befinner vi oss i nu?



Bakgrund

- Tidigare studie med syfte: undersöka vilka drivkrafter som varit grundläggande vid planering och implementering
- 5 anläggningar för djupare studie
- Fokus:
 - System med resursåtervinning
 - System med separering av svartvatten



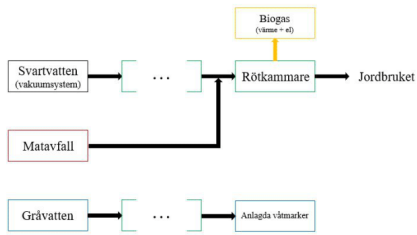
Flintenbreite i Lübeck, Tyskland

- Vakuumsystem för insamling av svartvatten och gråvatten
- Startade 1999 (demonstrationsprojekt)

Drivkrafter

- Bli en anläggning för att visa tekniken bakom ett källsorterande system
- Centrala parametrar: Vattenbesparing, energiproduktion

Flintenbreite i Lübeck, Tyskland



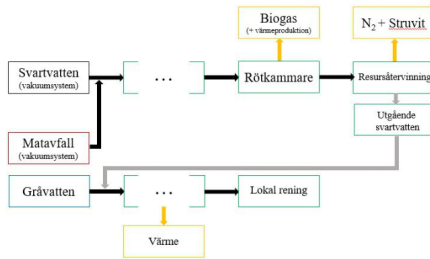
Noorderhoek i Sneek, Nederländerna

- Sneek Lemmerweg (sedan 2006) och Sneek Noorderhoek (sedan 2010)
- Vakuumsystem för svartvatteninsamling
- Separerat behandling av grå- och svartvatten
- Matavfallskvarnar

Drivkrafter

- Målbilden: "proof of concept"-anläggning
- Vattenbesparande teknik

Noorderhoek i Sneek, Nederländerna



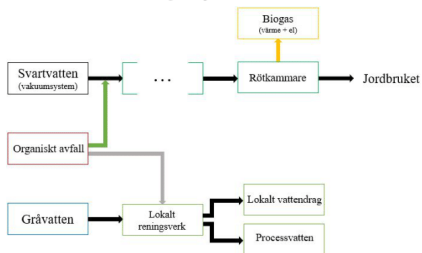
Jenfelder Au i Hamburg, Tyskland

- Ett område under utveckling
- Hamburg Water Cycle, HWC
- Vision: skapa ett klimatneutralt kvarter
- Vakuumsystem med insamling av svartvatten

Drivkrafter

- Lokala miljömålen
- Fördjupande kunskaper
- Anpassning till de rådande och framtida klimatförändringarna

Jenfelder Au i Hamburg, Tyskland



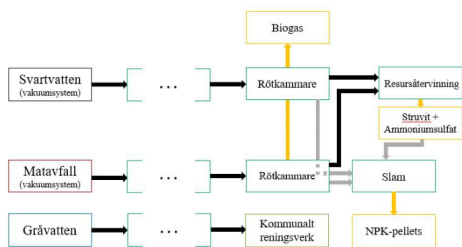
H+ i Helsingborg, Sverige

- Föryelseprojekt
- Vision: en modell för en mer hållbar stadsutveckling
- Trevägsnät: källsortering av gråvatten, svartvatten och matavfall

Drivkrafter

- Maximera resursåtervinningen
- Erhålla kunskap från systemet
- Ökat behov av resursåtervinning
- Ökad biogaspotential
- Möjlighet till renare gödselprodukt

H+ i Helsingborg, Sverige



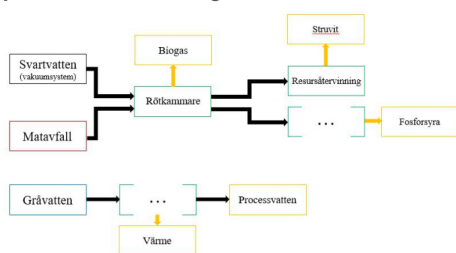
Schipperskaai i Gent, Belgien

- Föryelseprojekt
- Källsortering av grå- och svartvatten samt matavfall
- Efterföljande lokal hantering
- Kooperativet DuCoop
- Ekonomisk vinst

Drivkrafter

- De förväntade ekonomiska fördelarna
- Bedriva en decentraliserad vattenrening vilken har en lägre ekonomisk - och energikostnad i jämförelse med centraliserad hantering

Schipperskaai i Gent, Belgien



A.2 Komplet underlag - Workshop 2

A.2.1 Tekniker i befintliga anläggningar med drivkrafter likt Uppsala

Baserat på de drivkrafter som identifierades under Workshop 1, studerades två pilotanläggningar. Gemensamt med anläggningarna som valdes ut var att drivkrafterna till implementering liknade de möjliga drivkrafter som den första workshopen resulterade i.

Qingdao, Kina

Kina har under en tid haft problem med regional vattenbrist, i synnerhet i de norra samt västra regionerna. Anledningen till detta beror dels på den ekonomiska utvecklingen, en snabb befolkningstillväxt samt ojämn fördelning av vattendrag över landet, där de södra delarna har en högre andel vattenresurser. Dessutom, har urbaniseringen resulterat i en minskning av vattenkvaliteten med anledning av otillräcklig avloppsvattenrening. Detta gäller speciellt avlägsnande av näringsämnen, som än idag är ett problem för avloppsreningsverken i Kina. Drivkrafterna till implementering av källsorterande infrastruktur grundade sig i detta fall i vattenbesparande samt energieffektiv teknik som uppfyller hög grad av rening (Tolksdorf, Lu & Cornel 2016).

SEMIZENTRAL motsvarar en infrastrukturstrategi för tätorter med snabb tillväxt och har utvecklats som en möjlig lösning till att, bland annat, uppnå högre resurseffektivitet. Strategin innebär en integrering mellan sektorerna för försörjning av vatten och behandling av avloppsvatten samt avfall. Systemets storlek definieras av vilka krav som ställs, exempelvis gällande resurseffektivitet, drift- samt underhåll, flexibilitet och liknande. Potentialen till ökad biogasproduktion genom integrering av de ovan nämnda sektorerna möjliggör drift av ett semi-centraliserat reningsverk kallat "Resource Recovery Center", (RRC) (ibid.).

I Qingdao implementerades den första RRC i full skala år 2014. Grå- samt svartvatten samlas in separat, i syfte att kunna återanvända gråvattnet då acceptansen för återanvändning av denna fraktion är större än en blandad sådan. Gråvattnet återanvänds sedan som vatten vid toalettpolning, vilka överensstämmer storleksmässigt per person och dag. Biologiskt hushållsavfall samröts med slam från avloppsvattnet och den producerade biogasen används sedan för utvinning av värme och el. Det renade svartvattnet återanvänds sedan till bevattning av grönytor i området. RRC placerat i Qingdao är dimensionerat för ett område med 12 000 boende som inkluderar två nybyggda bostadsområden, tre hotell samt kontorsbyggnader. Konceptet SEMIZENTRAL är en process som kräver ett öppet tillvägagångssätt, där valet av teknik till processerna anpassas till de lokala förhållandena. I Qingdao innebär detta att gråvattnet återanvänds för toalettpolning samt att svartvatten används till bevattning av grönytor efter behandling (ibid.).

Gällande rening av gråvatten, samlas detta upp i en tank vilket möjliggör att flödet till nästkommande steg i reningsprocessen kan hållas jämnt. Förbehandlingen innebär bortsilning av fibrösa ämnen (ämnen innehållande stor andel fiber). Därefter, skickas vattnet vidare till en membranbioreaktor i passande intervaller. Eftersom koncentrationen av kväve i gråvattenfraktionen är låg, är avlägsnandet av organiskt material tillräckligt. Efterföljande steg motsvarar klorering, för att säkerställa vattenkvaliteten. Därefter, lagras det renade vattnet i en tank för att utjämna efterfrågan på service-/tekniskt vatten (ibid.).

Svartvattnet i området genomgår en mer komplex reningsprocess i jämförelse med gråvattnet. Förbehandlingen motsvarar fyra steg, i stället för ett steg som i fallet för gråvatten, exempelvis silning samt sedimentering. På grund av den höga koncentrationen av fosfor i svartvattenfraktionen samt

det låga gränsvärdet i utgående vatten, sker en förutfällning av fosfor i det fjärde förbehandlingssteget. Detta, med anledning av att gränsvärdet inte kan garanteras att uppnås med endast den biologiska reningen i bioreaktorn, som även för svartvattnet sker i en reaktor med membranfiltrering. Därefter, passerar vattnet ett filter av aktivt kol i syfte att avfärga det renade vattnet. De två efterföljande stegen för svartvattnet är identiska med de motsvarande för gråvattnet (Tolksdorf, Lu & Cornel 2016).

Matavfallet genomgår mekanisk förbehandling, som bland annat innebär att avfallet krossas för homogenisering. Den kinesiska lagstiftningen kräver inte att avfallet hygieniseras som i Europa. Dock, var inriktningen under planering av området europeiska förordningar vilket är anledningen till att ett hygieniseringssteg installerades. Detta steg avviker från referensdesignen av SEMIZENTRAL. Hygieniseringssteget innebär att avfallet värms upp till 70 °C under 1 timme. Sedan rötas matavfallet ihop med avloppsslammet (ibid.).

Näringsbelastningen som efter behandling i RRC släpps ut är lägre i jämförelse med konventionella system. Dock, är kemikalieanvändningen liksom energianvändningen högre. Platsspecifik utvärdering måste genomföras för en tydligare bild av för- och nackdelar. Med Kinas nuvarande energianvändning i beaktning, som till stor del innefattar fossilt ursprung, kan implementeringen av ett källsorterande avloppssystem utgöra ett bidrag till att lokalt minska utsläppen av växthusgaser (ibid.).

Kaja, Norge

I området Kaja byggdes år 1996 24 stycken studentlägenheter, för totalt 48 studenter, med ett källsorterande sanitetssystem. Området ligger intill Universitetet för Biovetenskap i Norge. På initiativ av en professor på universitetet, byggdes studentlägenheterna som ett projekt med experimentell karaktär med syfte att utvärdera de valda teknikerna. Drivkrafter till detta projekt har i första hand varit vattenbesparing och aspekter gällande klimatet såsom minskade utsläpp. Sekundära drivkrafter var återvinning av vatten och minskad energianvändning (Telkamp 2006).

Systemet för rening av gråvatten består av ett antal steg, där fraktionen först samlas i en tank. Därefter, pumpas det vidare till kupolformade biofilter för att sedan filtreras horisontellt genom en konstruerad våtmark. Uppsamlingsstanken installerades i syfte att förbehandla gråvattnet, som sedan pumpas i intervaller till biofiltret. Vidare från det aeroba filtret flödar gråvattnet till ytan av den anlagda våtmarker. I våtmarken tillåts vass att växa, då dess rötter har visat sig ha en positiv effekt på avlägsnandet av kväve (dock inge märkbar skillnad gällande fosforavlägsnandet). På grund av det kallare klimatet i Norge, rekommenderas konstruerade våtmarker ha ett djup på minst 1 meter. Detta djup lämnar de översta 30 cm att frysa, men tillräcklig hydraulisk kapacitet att transportera gråvattenfraktionen under denna zon. Behandlingssystemets totala yta är cirka 100 m². Gråvattnet återanvänds inte, utan släpps ut till de kommunala ledningarna för insamling av regnvatten, som sedan hamnar i närliggande vattendrag. Detta beslut togs på grund av att området är litet. Därmed skulle det bli dyrt att återanvända vattnet på grund av att kostnaden för vatten är lågt i Norge (ibid.).

Baserat på drivkrafterna, installerades vakuumpoletter som endast använder 0,5-1 liter per spolning i lägenheterna. Till en början, samlades svartvattnet upp i en tank för att sedan transporteras, med lastbil, till en närliggande lantbrukare med komposteringsenhet. Det visade sig dock att detta var en kostsam process. Som tillfällig lösning, samlas svartvattnet in för att sedan transporteras till det kommunala reningsverket. Tanken måste tömmas mellan 11-13 gånger per år. Målet är att i stället ha en sluten lösning för rening av svartvatten i området, vilken ännu inte har fastställts (ibid.).

Valet av teknik med biofilter samt anlagd våtmark baserades bland annat på kravet att systemet behöver lite underhåll. De största kostnaderna, det vill säga installation för vakuumsystemet samt grävattensystemet med anlagd våtmark och biofilter, finansierades av universitetet då området ingår i ett projektarbete. Vid utvärdering av systemet, jämfördes innehållet i grävattnet mot WHO:s standard för dricksvatten. Resultatet visade bland annat att utgående vatten från uppsamlingstanken uppfyller WHO:s standard gällande kväveavlägsnande, med ett avlägsnande mellan 5-20 % i tanken. Vidare, kan sannolikheten att vattnet efter behandling i den anlagda våtmarken inte uppfyller WHO:s krav antas vara mycket liten med en uppehållstid mellan 6-7 dagar. Per år uppstår blockering i rören i reningssystemet för grävatten cirka 10-15 gånger, vilket även uppkommer i konventionella system. Däremot har problem aldrig uppstått för processerna i sig vilket tyder på ett robust system. Angående vakuumpoletterna uppstår problem mellan 18-22 gånger på år, vilket är 10-15 % mer i jämförelse med konventionella modeller (Telkamp 2006).

A.2.2 Tekniker för rötning av källsorterat avloppsavfall

Olika varianter av röt-kammare har med tiden utvecklats i en rad olika syften. Exempelvis för att minska driftinstabiliteten, förkorta starttiden, minska urtvättningen av biomassa eller förbättra hanterandet av inkommande chockbelastningar. Typen av bioreaktor samt dess utformning är avgörande för biogasproduktionen. Valet av reaktor-typ beror därför på det specifika syftet, där vissa reaktorer i första hand används för att maximera biogasproduktionen medan andra används i syfte att optimera reningen (Banerjee, Prasad & Selvaraju 2022).

I kommande avsnitt kommer två olika bioreaktorer redovisas, UASB samt AnMBR.

UASB-reaktor

UASB står för engelskans *upflow anaerobic sludge blanket reactor* och utvecklades under 1970-talet i Nederländerna (Mullai et al. 2020). UASB-reaktorerna ger en snabb rening och resulterar i en anaerob reduktion av organiskt material (Jansson 2006).

UASB-reaktorn baseras på en trefas-separator som möjliggör att reaktorn kan separera vatten-, gas- och slamblandning under turbulenta förhållanden. Reaktorn är konstruerad så att avloppsvattnet pumpas in vid botten av reaktorn och strömmar sedan uppåt genom ett uppåtriktat flöde (ibid.). De anaeroba bakterierna fäster sig till varandra och bildar täta granulat vilka sedimenterar och sätter sig i reaktorns botten (Mullai et al. 2020). Avloppsvattnet, som pumpas in vid botten, strömmar igenom denna bädd av slamgranulat. Det uppåtriktade flödet av avloppsvatten resulterar i att de anaeroba bakterierna förbrukar substratet (avloppsvattnet) och producerar koldioxid samt metan. På grund av de gasbubblor som bildas skapas turbulens i reaktorn, vilket resulterar i en god omblandning samt en gynnsam kontakt mellan substratet och de anaeroba bakterierna (Jansson 2006). Ovan ”slamfilten” av granuler, är den tidigare nämnda trefas-separatortypen (Gas-Liquid-Solid) placerad vilken har som funktion att separera fasta partiklar från den blandade fraktionen. Detta möjliggör att vätska och gas tillåtes att lämna reaktorn efter behandling medan de fasta partiklarna, granulerna det vill säga, stannar kvar (The International Water Association 2013). På grund av att de täta granulerna har en hög sedimentationshastighet kommer de, trots höga flöden av avloppsvatten, att stanna kvar i reaktorn. Avslutningsvis, kan rent vatten separeras på toppen av reaktorn (Jansson 2006).

Gällande konstruktionen, är det fördelaktigt att ha en hög reaktor då detta minskar markanvändningen. Den vanligast förekommande höjderna varierar mellan 4,5-6 meter och den maximala höjden för en

fortsatt gynnsam process är cirka 8 meter (The International Water Association 2013).

Systemet med UASB-reaktor är väl beprövat och är vanligt förekommande i tropiska och tempererade klimat. En av de främsta fördelarna med denna reaktortyp är att det är enkla reaktorer med en tillförlitlig teknik. Ytterligare en fördel är att, som tidigare nämnt, kontakten mellan substratet och de anaeroba bakterierna är god. Detta resulterar i att det inte krävs någon tillsats av bärarmaterial för att bakterierna ska kunna etablera sig (Jansson 2006). Systemet kan också, utan allvarliga konsekvenser, inaktiveras under längre tidsperioder utan större konsekvenser vilket är fördelaktigt exempelvis vid driftfel (The International Water Association 2013). Å andra sidan, kan det finnas svårigheter gällande att behålla granulerna stabila. Granulerna är även känsliga för en kvalitetsförändring på avloppsvattnet samt stora variationer i belastning (Jansson 2006). Systemet är även känsligt mot, framförallt, för kall temperatur och fungerar som mest optimalt mellan 15-35 °C vilket innebär att det inte är ett lämpligt system för platser med kallare temperatur (The International Water Association 2013).

I en studie gjord av Lew et al. (2011), undersöktes hur UASB-reaktorn fungerar i liten skala vid behandling av avloppsvatten. En UASB-reaktor med volymen 5,3 liter byggdes, med en trefas-separator som placerades i reaktorns övre del. Initialt, fylldes reaktorn med granulärt slam från en fullskalig UASB-reaktor vilken behandlar matavfallsvatten. Därefter, pumpades det in avloppsvatten från hushåll i en stadsdel i Haifa, Israel. Reaktorn drevs även under varierande omgivningstemperatur, det vill säga 10, 15 och 28 °C. Varje temperatur hölls i cirka 2 månader innan den varierades. Ingen förbehandling, såsom sedimentering, filtrering eller koagulering, gjordes innan avloppsvattnet pumpades in i reaktorn. Resultatet visade att högt avlägsnande av COD kunde observeras för de högre temperaturerna, 15 respektive 28 °C, nämligen 66 % samt 78 %. När temperaturen däremot sänktes till 10 °C, minskade även COD-avlägsnandet till cirka 42 %. Resultatet visade även att temperaturminskningen innebar att den biologiska aktiviteten minskade och så även metanproduktionen. En temperaturökning på omgivande miljö resulterade i att sedimentationen ökar, vilket ger en mer gynnsam kontakt mellan fasta ämnen och slam. Detta kan i sin tur förväntas resultera i bättre infångning och avlägsnande. Sammanfattningsvis, ansågs UASB-reaktorn vara ett lämpligt alternativ till rening av kommunalt avloppsvatten, särskilt fördelaktigt i tempererade klimatförhållanden (Lew et al. 2011).

I en doktorsavhandling av Leitão (2004), utvärderades robustheten hos en UASB-bioreaktor för kommunal avloppsvattenrening i tropiskt klimat. Experimentella undersökningar gjordes i syfte att studera stabiliteten och robustheten av systemet. Detta gjordes genom att totalt 11 UASB-reaktorer i pilotskala, 120 liter, undersöktes genom att variera olika parametrar såsom innehållet av COD i inkommande vatten. För att utvärdera systemets robusthet utsattes systemen för chockbelastningar, både organiska samt hydrauliska. Därefter utvärderades systemen gällande ett antal parametrar, exempelvis COD-avlägsnande och pH. Resultatet visade att UASB-reaktorer kan behandla avloppsvatten innehållande ett lågt COD-värde, 200 mg/liter, men effektiviteten blir maximal först vid ett högre COD-innehåll, 300 mg/liter. Variationen i kvaliteten på utgående vatten beror starkt på kvalitetsvariationen på det ingående vattnet, vilket tyder på att denna reaktortyp inte dämpar den dagliga COD-fluktuationen i ingående vatten. Däremot, visar sig UASB-reaktorer i tropiska länder, vilka behandlar avloppsvatten, vara stabila gällande pH samt COD-avlägsnande. Dessa värden upprätthölls även under chockbelastningar och var ungefär i samma storlek som under ”steady state”. Då bioreaktorn utsattes för en chockbelastning, krävdes kort tid för att återgå till normala driftförhållanden. De är däremot inte robusta gällande variabilitet i avloppsvattnets innehåll (Leitão 2004).

MBR och AnMBR

Ytterligare en teknik för rening av avloppsvatten, motsvarar en membranreaktor, MBR. Denna konfiguration kombinerar den biologiska processen som mikroorganismerna motsvarar med en membranfiltrering. Organiskt material bryts ned i bioreaktortanken där mikroorganismerna sedan avskiljs från det renade avloppsvattnet i en membranmodul. Det finns i nuläget ett antal olika typer av membranreaktorer. På grund av den höga energianvändningen som aerob rening kräver, exempelvis genom luftningsprocesser, har ett ökat intresse för anaerob rening uppkommit. Detta har resulterat i utveckling av en MBR-konfiguration som motsvarar anaerob rötningsbehandling integrerat med membranfiltrering för behandling av avfallsvatten (Al-Asheh, Bagheri & Aidan 2021). Denna typ av membranreaktor kommer vidare att diskuteras fördjupande.

Genom tillägget av membranfiltreringen, kan det renade avloppsvattnet separeras från den anaeroba biomassan i reaktorn, samtidigt som koncentrationen biomassa kan koncentreras till en gynnsam nivå. Konceptet av AnMBR-reaktorn utvecklades redan på 1980-talet, men den anaeroba membrantechniken tillämpades i början inte i stor skala på grund av en rad anledningar. De senaste åren har dock tekniken visat tydliga framsteg och storskaliga system med membranfiltrering är i nuläget en beprövad teknik och effektiva strategier gällande design, drift och underhåll har utvecklats (Chang 2014).

För en anaerob membranreaktor finns ett integrerat system av dels den anaeroba bioreaktorn samt antingen ett ultrafiltrerings- eller mikrofiltreringsmembran (UF/MF). Typen av anaerob bioreaktor som membranfiltreringen integreras med kan vara exempelvis en UASB-reaktor (ibid.). UF/MF-membran har funktionen att de kan kvarhålla suspenderade fasta partiklar, inklusive biomassa (suspenderad). Detta är anledningen till att AnMBR-reaktorn kan uppnå fullständig separering av solida partiklar oberoende av avloppsvattnets samt slammets egenskaper eller de biologiska förhållandena i omgivande miljö (ibid.) Trots att anaeroba mikroorganismer vanligtvis har en lång tillväxttid, speciellt vid lägre temperaturer, tillåter AnMBR-systemet bakterierna att växa utan att tvättas ut. De vanligast förekommande membranreaktorerna består dels av en membranfiltreringsanordning samt även en reaktor för celltillväxt, där dessa enheter kombineras till en gemensam (Lew et al. 2009).

Membranfiltreringen kan integreras enligt tre olika konfigurationer med anaeroba bioreaktorer (Chang 2014):

- 1) Internt nedsänkt membranfiltrering (Internal submerged membrane filtration)
- 2) Externt nedsänkt membranfiltrering (External submerged membrane filtration)
- 3) Extern tvärflödes-membranfiltrering (External crossflow membrane filtration)

I den förstnämnda konfigurationen, den internt nedsänkta membranfiltreringen, är membranet placerat inuti bioreaktorn, i biomassan. Vattnets genomträngning genom membranet genomförs under ett vakuum. En av de främsta fördelarna med denna konfiguration är energiförbrukningen som är lägre än de resterande två. Gällande den andra anordningen, externt nedsänkt membranfiltrering, är membranet i stället placerat skilt från reaktorn i en extern kammare. Membranet är dock fortfarande nedsänkt i biomassan, men till skillnad från den första konfigurationen är denna ej nedsänkt i huvudreaktorn. Placeringen av membranet underlättar rengöring och andra underhållsuppgifter då membranheten kan isoleras i den avskilda placerade kammaren, vilket gör att reningsprocessen ej behöver avstanna under lika lång tid. Även i den sistnämnda konfigurationen, extern tvärflödes-membranfiltrering, är membranet placerat skilt från huvudreaktorn. Biomassa från huvudreaktorn pumpas över till membranheten, där kvarhållen biomassa sedan återförs till huvudreaktorn (Miyamoto, Nakashimada & Uemiya 2015).

Den externa membranfiltreringen har ett högre energibehov på grund av att innehållet i reaktorn måste pumpas till modulen för membranfiltrering med en hastighet hög nog för att vattnet ska ta sig igenom membranet. Energiförbrukningen mellan de två konfigurationerna är därmed betydande stor. Ur ett driftperspektiv är dock yttre membran mer fördelaktiga då konstruktionen möjliggör ett enklare drift- och underhållsarbete (E. Uman, A. Bair & H. Yeh 2021). I det tredje systemet, externa tvärflödet, fungerar membranheten oberoende av reaktorn. Det inkommande avloppsvattnet pumpas in i reaktorn där det inledningsvis renas av mikroorganismer som använder det organiska innehållet som substrat. Därefter, leds vattnet vidare till enheten för membranfiltrering. Det genomträngda vattnet är slutprodukten medan det som filtrerades bort av membranet kontinuerligt återförs till bioreaktorn. Risken för igensättning av membranet minskas exempelvis genom att återcirkulationen hålls hög vilket resulterar i att trycket över transmembranet blir högt (Lew et al. 2009).

Tekniken i AnMBR-systemet har undersökts för olika typer av avloppsvatten, exempelvis avloppsvatten från pappersbruk och livsmedelstillverkning, men även kommunalt avloppsvatten. Resultatet från dessa undersökningar har visat att denna typ av reaktor resulterar i ett avlägsnande av COD till cirka 90 %. Baserat på dessa goda resultat, har ett ökat intresse för implementering av reaktortypen till kommunal avloppsvattenrening uppstått. Det finns dock fortfarande en problematik gällande stabiliteten av behandlingens prestanda under ändrade temperaturförhållanden på omgivningen. Experimentella resultat har visat att den mest effektiva anaeroba reningen av avloppsvatten från kommunalt bruk är inom temperaturintervallet 20-30 °C. Detta innebär att det kan finnas utmaningar gällande reningen på platser där temperaturen kan bli låg. Den största begränsande faktorn gällande effektiviteten för AnMBR-systemet är igensättning av membranet (Chang 2014).

Gällande reningsgrad, gjordes en studie av membranfiltrering i pilotskala av Buntner et al. (2013). I studien undersöktes kombinationen av en UASB-reaktor samt externt nedsänkt membran med ultrafiltrering för rening av avloppsvatten från ett mejeri. Valet av just denna kombination grundar sig i att minska COD-utsläppet från avloppsvatten från mejeriproduktionen samt erhålla produkt av hög kvalitet, i kombination med erhållande av metanrik biogas. Systemet tilläts köras i 292 dagar med en varierande omgivningstemperatur (17,5-24,5 °C). Ett av kännetecknen för avloppsvatten från mejeriproduktion är högt innehåll av COD. Det är därför av särskilt stor vikt att avlägsnandet av COD är tillfredsställande innan utsläpp av vattnet. I just detta fall, bröts majoriteten av COD i inkommande avloppsvatten ned i det första UASB-steget och det efterföljande steget med extern membranfiltrering fungerade som poleringssteg. I UASB-steget var medelvärdet på avlägsnandet av COD 95 %, medan kombinationen av de två stegen uppnådde nära 99 % avlägsnande under samtliga dagar som systemet var i drift. Sammanfattningsvis, kan resultaten tolkas som att systemet ger en effektiv rening av avloppsvatten som härstammar från mejeriproduktion, med ett avlägsnande av COD som når över 99 %. Under hela driftperioden var produktionen av biogas hög, där metanhalten genomsnittligt var 73 %. Ett samband mellan högre effektivitet gällande avlägsnande av COD i UASB-reaktorn och högre temperatur hittades, vilket dock resulterar i att igensättning av membranet sker i snabbare takt (Buntner, Sánchez & Garrido 2013). Eftersom innehållet av kommunalt avloppsvatten dock skiljer sig från avloppsvatten från mejeriproduktion går det inte att fastställa att det kommer att vara samma reningsgrad för de båda, men resultatet tyder fortfarande på hög reningsgrad av COD.

I en studie gjord av Lew et al. (2009) undersöktes i stället reningsgraden för en membranmodul med externt tvärflödesmembran. Den externa membranmodulen placerades två meter under bioreaktorn, där höjdskillnaden gav upphov till ett tillräckligt stort tryck över membranet för att slippa installera en pump (som höjer membrantrycket vid behov). Inledningsvis fylldes bioreaktorn med granulärt slam

från en UASB-reaktor i vilken vatten från matavfall behandlats. Därefter, var det hushållsavloppsvatten från stadsdel i staden Haifa, Israel, som pumpades in under ett år. Det genomsnittliga avlägsnandet av COD var 88 %, med ett inflöde av 540 mg COD/liter avloppsvatten samt en omgivande temperatur på cirka 25 °C (Lew et al. 2009). Eftersom Sverige har en annan kemisk sammansättning på avloppsvattnet är detta inte helt jämförbart med en implementering i Sverige, men det ger riktlinjer för ett eventuellt genomförande.

En integrering av membranfiltrering med anaerob bioreaktor kan resultera ytterligare i förbättrad driftstabilitet och kvaliteten på det renade avloppsvattnet (Chang 2014). Vidare, finns det studier som tyder på att AnMBR-systemet har hög robusthet gällande utspolning av biomassa. Detta, då avlägsnande av det organiska materialet i avloppsvattnet inte påverkades, trots att uppehållstiden i reaktorn minskades. I samma studie visade resultatet även att integreringen av UASB-reaktor med membranfiltrering resulterar i en robust avlägsnande av COD. Inkommande vattens COD-koncentration varierade, men avlägsnandet av COD var alltid högre än 99 % för hela systemet. Detta resultat bekräftar pålitligheten och robustheten av det kombinerade systemet (Buntner, Sánchez & Garrido 2013).

A.2.3 Tekniker för behandling av gråvatten

På senare tid har återvinningsperspektivet gällande gråvatten fått allt mer uppmärksamhet från såväl inblandade aktörer som gemene man. Återvinningsystemen inkluderar källsortering av avloppsvattnet från hushåll till svart- respektive gråvatten. Den efterföljande behandlingen av gråvattnet sker lokalt i området för att sedan återanvändas till exempelvis toalettspolning eller bevattning av grönytor (Ramon et al. 2004).

Gällande behandling av källsorterat gråvatten finns en rad olika kandidater av tekniker. I detta avsnitt kommer två teknikkandidater att presenteras.

Nanofiltrering

Reco lab i Helsingborg motsvarar den första demonstrationsanläggningen i stor skala av framtidens infrastruktur gällande avloppssystem i Sverige. Den teknik som används och kommer att användas i Reco lab är väl beprövad, men det är hur tekniken kombineras som är nytt för marknaden. Under våren startades ett projekt gällande gråvattenhanteringen, nämligen en jämförelse mellan ozoneringsanläggning mot en teknik som inkluderar nanofiltrering vilken är aningen mer avancerad. Genom att rena gråvattnet med nanofiltreringstekniken, är det möjligt att det renade vattnet återanvänds alternativt släpps ut i lokala vattendrag vilket kan resultera i en ekonomisk vinst. Syftet med nanofiltreringstekniken är att Helsingborgskvarteret ska kunna ha en lokal rening av källsorterat gråvatten, medan svartvattnet via mindre vakuumledningar leds till ett centralt reningsverk för rening. Den lokala reningen av gråvatten innebär också en minskning av kostnaderna gällande både anläggning och underhåll av det ledningsnät som transporterar fraktionen. Ur ett livscykelkostnadsperspektiv är detta den enskilt största posten av kostnader för avloppshantering (Sweden Water Research 2018).

Nanofiltrering är den nyaste teknologin gällande tryckdrivna membran och har i flera tillämpningar ersatt omvänd osmos baserat på den lägre energiförbrukningen samt potentialen till högre flödeshastigheter. Membranet blev relativt nyligen introducerat som lämplig teknik i rening av avloppsvatten. Porerna i nanofiltret är vanligtvis cirka 1 nm, vilket resulterar i en god rening även av mer komplexa strömmar. Utvecklingen av tekniken har resulterat i en anmärkningsvärd ökning av bredden för tillämpningsområde, exempelvis inom textil- samt läkemedelsindustrin. Dock, liksom för samtliga processer som inkluderar

membranteknik, är membran med nanofiltrering känsligt för nedsmutsning. Detta är en av de främsta utmaningarna med membranprocesser vilket är anledningen till att mekanismerna som bidrar till nedsmutsning är väsentliga att identifiera. Utöver detta, är det också centralt att lämpliga lösningar för att styra och justera detta identifieras (Shon et al. 2013).

I en studie gjord av Ramon et al., undersöktes potentialen av membranfiltrering med nanofiltrering som metod för behandling av gråvatten med återvinningssyfte. Studien gjordes i mindre skala, med insamlat gråvatten som lagrades i en tank med en volym av 200 liter. Resultatet visade att behandlingen med direkt nanofiltrering gav upphov till en produkt av hög kvalitet, med högt avlägsnande av COD (över 93 %) och ett nästintill fullständigt avlägsnande av fasta ämnen (suspenderade) samt grumlighet. I jämförelse med ultrafiltrering, där avlägsnandet av COD varierar mellan 45-70 %, har nanofiltreringen en betydligt högre effektivitet. Nanofiltreringen har även visat hög potential gällande rening av vatten med industriell karaktär, där innehållet av organiskt material kan vara högre än för gråvatten. Baserat på detta, är nanofiltrering en teknik som verkar vara väl lämpad för ändamålet, det vill säga rening samt återvinning av gråvatten. Det krävs dock ytterligare forskning och studier för att fastställa ett optimalt driftsätt (Ramon et al. 2004).

Anlagda våtmarker

Baserat på att gråvatten innehåller en lägre koncentration av bland annat patogener samt organiska näringsämnen, kan reningen av denna fraktion vara av mer simpel karaktär med antagandet att vattnet ska återvinnas. Om gråvattnet dessutom inte renas till drickbar standard, krävs mindre resursintensiva processer. En rad olika tekniker har testats gällande behandling av gråvatten, exempelvis filtreringssystem såsom nanofiltreringsmembran, där många av dessa tekniker är energikrävande processer. Ett alternativ som vanligtvis presenteras som ett energieffektivt samt ekonomiskt tillvägagångssätt att behandla gråvattenfraktionen är anlagda våtmarker (Arden & Ma 2018).

Filtrering genom en våtmark resulterar i att fasta ämnen (suspenderade) fångas upp av vegetation, medan andra föroreningar exempelvis tas upp av växter genom att de omvandlas till mindre löslig form. Dessa växter främjar i sin tur gynnsamma förutsättningar för mikroorganismer att leva i våtmarken. Genom komplexa reaktioner, bidrar även mikroorganismerna till avlägsnandet av föroreningar. Exempelvis kan näringsämnen såsom fosfor och kväve, vilka genom bland annat dagvattenavrinning transporteras till våtmarken, tas upp av mikroorganismer eller växter. Trots att inte konstruerade samt naturliga våtmarker inte är identiska i alla fall, finns motiv till införandet. Våtmarker är generellt lägre utgifter gällande drift och underhåll, anläggningsarbetet är billigare i jämförelse med ett konventionellt alternativ och dessutom kan våtmarkerna hantera fluktuerande vattenströmmar. Om konstruktionen planeras grundligt och sedan underhålls på lämpligt sätt, kan rening av avloppsvatten med våtmarker ge gott resultat samt främja återanvändning av vatten. Potentiella skador på omgivande miljö, såsom förändring av hydrologi, störning på de naturliga växt- och djursamhällena eller liknande, kan undvikas med en grundlig planering gällande konstruktion, design och drift (United States Environmental Protection Agency 2004).

Tekniken för behandling av gråvatten i en anlagd våtmark har utvärderats i en studie av Rana et al. I studien utvärderas, i mindre skala, hur syntetiskt framställt gråvatten renas genom en konstruerad våtmark. Olika typer av material användes som filtreringsmedium, vilka staplades vertikalt i behållaren för att likna en naturlig våtmark med ett vertikalt flöde. Efter att gråvattnet passerat genom behållaren samlades det upp för att göra provtagningar. Resultatet visade att gråvatten på ett effektivt sätt kan behandlas i anlagda våtmarker, exempelvis med en COD-avlägsnande mellan 95-98 %. Det behandlade

gråvattnet kan användas till bevattning av grönytor alternativt släppas ut i närliggande vattendrag (Rana et al. 2017).

I en annan studie, av Collivignarelli et al., redovisas resultaten från behandling av gråvatten genom en anlagd våtmark med horisontellt flöde. Gråvatten samlades under den fyra månaders långa testperioden in från ett hus i Italien, det vill säga vatten från dusch, handfat i både badrum och kök samt tvättmaskin. Undersökningen inkluderade mätningar av exempelvis koncentrationen COD och totalt suspenderade fasta ämnen och jämförde innehållet av dessa parametrar i ingående respektive utgående vatten. Resultatet tydde på ett avlägsnande av COD med 89 %. Det undersöktes även hur reningsgraden i våtmarken påverkades av en längre uppehållstid genom att öka denna från 1 dag till 3 dagar. Det visade sig att reningsgraden inte påverkades märkbart, förutom för avlägsnandet av fosfor där effektiviteten ökade med cirka 4 %. Resultaten jämfördes därefter med de rekommendationer som finns från WHO där det var möjligt att konstatera att kvaliteten på gråvattenbehandlingen behöver stärkas gällande bland annat mikrobiologin i den konstruerade våtmarken. De lösningar som föreslogs som kompletterande åtgärder var dels att den konstruerade våtmarken kopplas ihop med en desinfektionsprocess för att uppnå högre avlägsnande av bakterier, samt att tillåta en längre uppehållstid av gråvattnet (längre än 3 dagar) i systemet för att uppnå ett bättre avlägsnande av organisk material (Collivignarelli et al. 2020).

Det rättsliga ramverket gällande återanvändning av gråvatten är oenhetlig på internationell nivå, där ett fåtal länder antagit specifik lagstiftning. WHO har dock utfärdat rekommendationer innehållande minimikrav som ländernas lagstiftning garanterat ska uppfylla gällande det reade gråvattnet (ibid.).

A.3 Intervjufrågor

Frågorna som ställdes under båda intervjuerna redovisas nedan.

Fråga 1: Beskriv hur den inledande processen gick till för implementeringen.

Fråga 2: Vilka tillstånd behövs för att få installera en pilotanläggning?

Fråga 3: Hur ni har organiserat er för implementering: Vem/vilka har varit styrande?

Fråga 4: Vilka aktörer var avgörande för implementering?

Fråga 5: Vilka resurser var avgörande för implementeringen?

Fråga 6: Är det någon process som tar utstickande lång tid i jämförelse med de andra?

Fråga 7: Vad baserades dimensioneringen av antal pe ansluta till systemet på?

A.4 Intervju 1

Nedan redovisas anteckningarna som fördes under den första intervjun, med Marinette Hagman.

Fråga 1: Gällande den första frågan, om den inledande planeringsprocessen, menade Marinette att H+ var en del av ett projekt inom en hel stadsutvecklingsapparat. I ett tidigt skede fanns det ett utvecklingskontor endast för H+-området och redan då satte både Helsingborgs stad samt anställda på kontoret en hög ambitionsnivå för vad man ville åstadkomma. Detta har varit ledande under planeringsprocessen och även vid valet av system.

Fråga 2: Processlösningen av de tre separata strömmarna i H+-området skickas efter insamling till det lokala reningsverket vilket är anledningen till att samma utsläppskrav som för ett ”vanligt” reningsverk gäller, oberoende av att fraktionerna är uppdelade. På Reco Lab behövdes alltså inget utsläppstillstånd, på grund av att vattnet sedan skickas till det lokala reningsverket. Under planeringsprocessen var dock ansökan om olika tillstånd fortfarande en nödvändig del av arbetet. Öresundsverket, vilket är det reningsverk som vattnet från Reco Lab sedan transporteras till, behövde söka en rad olika tillstånd baserat på att ett flertal av deras dåvarande tillstånd oavsett behövde uppdateras.

Fråga 3: Gällande frågan om organisation, har projektledare varit Helsingborgs stad. De har haft rollen som koordinator för alla andra bolag och aktörer som var med under projektet samt de utredningar som gjordes. Det system som slutligen valdes resulterade i att engagemanget från NSVA:s håll blev stort eftersom det är NSVA som ansvarar för just avloppssystemen. Helsingborg stad hade redan från start en ambition att införa hållbara system, dock inte bestämt vilken teknik som skulle tillämpas. Helsingborgs stad samlade sedan alla energi-, VA- samt avfallsbolag för att finna ett hållbart system.

Fråga 4: Gällande aktörer som var avgörande för projektet var beslutet på politisk nivå av stor vikt. Eftersom skillnaderna mellan dagens konventionella system och systemlösningen i H+ är stora, var det fastställande beslutet av kommunfullmäktige avgörande. Detta beslut grundar sig i en regelbunden kontakt med stadens politiker samt att de försågs med nödvändigt underlag för att de ska kunna ta ställning under planering av systemet.

Fråga 5: Det finns ett flertal studier gällande kostnader för implementering av denna systemlösning. Resultatet visar att det blir dyrare och att det krävs ekonomiska resurser, men att det är svårt att jämföra systemen eftersom de har olika mål (se exempelvis Kärrman et al. (2017)). Det går inte att svara på om det är dyrt eller ej innan man har definierat mål med systemet och vad man vill att det ska resultera i. Det är därför svårt att jämföra med de traditionella system och processlösningar som tillämpas idag. Återigen är det viktigt att först definiera sitt mål och vad man vill åstadkomma, vilket staden och dess politiker först behöver göra. Därefter kan man titta på lämpliga tekniska lösningar.

Fråga 6: Vidare, diskuterades också om det finns någon process som tar längre tid än resterande. Sammantaget, tog hela processen i Helsingborg nästan 10 år, men då inkluderas även utredningar såsom multikriterieanalyser av olika tekniker och systemlösningar. EVAA-projektet skapades i ett tidigt skede under den inledande planeringen av H+, där ett antal utredningar gjordes. Denna process varade i flera år, för att sedan godkännas av kommunfullmäktige där det fastställdes vilken typ av system som skulle implementeras. För att det ska vara möjligt att söka tillstånd, måste alltså denna process vara färdigställd. Marinette menar att det alltså inte är tillståndsprocessen som är den kritiska punkten. De stora utmaningarna rör snarare utredningarna samt byggentreprenaderna som inte tidigare har installerat denna typen av systemlösning. Frågor som hur det ska byggas, vilket material som ska användas samt hur det ska dimensioneras resulterar i att tveksamhet kan uppstå från byggentreprenadernas sida. I fallet för Helsingborg, tog det längst tid att fastställa vilken typ av systemlösning med ingående tekniker som skulle implementeras. Detta steg innebar många utredningar följt av tillståndsansökan. Utöver de tillstånd för Öresundsverket som behövde förnyas, var det även tillstånd gällande bullernivåer samt spridning av lukt och aerosoler från det befintliga reningsverket som krävdes. Detta är dock aspekter som inte har med systemlösningen i sig att göra, vilket är en av anledningarna till att det är svårt att jämföra denna process med andra platser behov av tillstånd. Tiden för hela processen är svårt att fastställa. I slutändan är även de ekonomiska förutsättningarna avgörande.

Fråga 7: Storleken på H+-området i Helsingborg har styrts av utbyggnadstakten. I Helsingborg finns ett antal piren där staden började exploatera på ena piren. Eftersom processen fram till färdigställd systemlösning är lång, är det inte lämpligt att lämna marginal för att det någon gång i framtiden kommer att bo fler personer i området. Om dimensioneringen skulle utgå från detta, kommer reningsanläggningen inte fungera optimalt för de som bor där i nuläget. Därmed, för att undvika ett överdimensionerat system, dimensionerades H+-området efter hur många personer som antogs bo där efter färdigställande av det första exploaterade området. Om det dock finns planer att omkringliggande kvarter byggs ut snabbt, kan ett förslag vara att se över möjligheten att kunna docka på ytterligare ett område till den befintliga anläggningen.

Avslutningsvis, nämnde Marinette betydelsen av ett accepterande från exploatörerna. I slutändan är det nämligen byggbolagen som köper marken och beslutar om hur bygget ska genomföras. Om de inte anser att det är lämpligt att bygga ett sådant typ av system är det osannolikt att det kommer att fullföljas. Det är därför väsentligt att detta är tydligt formulerat i markanvisningen, det vill säga vilken typ av system som planerats att implementeras. Däremot, är detta inte ett problem i fall då staden redan äger marken där systemet planeras att bygga.

A.5 Intervju 2

Nedan redovisas anteckningarna som fördes under den andra intervjun, med Maria Lennartsson.

Fråga 1: Den inledande planeringsprocessen av systemet i Stockholm utgår från mål som finns i stadens hållbarhetsprogram, som formulerades 2010. Stockholm stad har ett exploateringskontor som har haft ansvaret gällande att koordinera arbetet i projektet. Det var även exploateringskontoret som tog rollen att driva arbetet mot att implementera ett sorterande avloppssystem. Maria menar att det har tagit lång tid att hitta en gemensam utgångspunkt för samtliga inblandade aktörer, men att de nu är inne i den sista fasen som bland annat innebär att framställa beslutsunderlag för ett framtida investeringsbeslut. Detta beslutsunderlag kommer dock troligtvis inte definieras förrän senare detta år. Det finns alltså i nuläget inte ett färdigställt pilotprojekt i Stockholmsområdet ännu.

Fråga 2: Kunde ej besvaras då projektet fortfarande befinner sig i ett tidigt skede.

Fråga 3: I projektet i Stockholm som Maria är delaktig i har det, som tidigare nämnt, varit exploateringskontoret för Stockholm stad som varit drivande i frågan redan i ett tidigt skede. Gällande fördelning av roller och ansvarsområden har detta hittills varit exploateringskontoret, men fortfarande inte fastställt hur uppdelning av det framtida arbetet gällande pilotanläggningen kommer att ske.

Fråga 4: Gällande vilka aktörer som varit drivande under planeringsprocessen har det varit avgörande att både staden och kommunens planeringsansvarig samt exploateringsansvarig måste vara delaktiga i processen och acceptera förslaget om implementering av denna typ av system.

Fråga 5: Kunde ej besvaras då projektet fortfarande befinner sig i ett tidigt skede.

Fråga 6: Det som Maria menar har tagit längst tid i planeringen av pilotprojektet är att få alla inblandade parter och aktörer att enas om vad som ska implementeras, exempelvis vilken typ av system. Processen att komma till och enas om en gemensam vision samt plan för framtida arbete har tagit cirka 8 år.

Fråga 7: I dagsläget är utgångspunkten att området ska byggas för cirka 4000 lägenheter med närhet till en plats där behandlingsanläggning för avfallet även kan etableras. Maria kunde dock inte svara på hur de kommit fram till en pilotanläggning av just denna storlek.

A.6 Beräkning av biogaspotential

Som beskrivet i metodavsnittet, användes *Buswells ekvation* för att erhålla konstanterna framför de två produkterna (koldioxid samt metan). Detta gjordes för sammansättningen av de tre kategorierna (lipider, proteiner och kolhydrater) i primärslam. Nedanstående kemiska sammansättning för de tre kategorierna användes (Tebini 2020):

Lipid: $C_{50}H_{90}O_6$

Kolhydrat: $C_6H_{10}O_5$

Protein: $C_{16}H_{24}O_5N_4$

Vardera kategori genererade en reaktionsformel, samtliga listas nedan.

Lipid: $C_{50}H_{90}O_6 + 24,5 H_2O \rightarrow 15,25 CO_2 + 34,75 CH_4$

Kolhydrat: $C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3 CO_2 + 3 CH_4$

Protein: $C_{16}H_{24}O_5N_4 + 10,5 H_2O \rightarrow 7,75 CO_2 + 8,25 CH_4 + 4 NH_3$

Därefter, kunde andelen av vardera produkt beräknas, det vill säga koldioxid, CO_2 , samt metan, CH_4 (med antagandet att det endast är dessa produkter som bildas). Notationen a motsvarar konstanten som erhålles framför CH_4 medan b motsvarar konstanten som erhålles framför CO_2 . Andelen, MR_{CO_2/CH_4} beräknades genom att dividera den ena konstanten med summan av dessa två, se ekvation 21.

$$MR = \frac{a}{a + b} \quad (21)$$

Därefter, användes ideala gaslagen för att beräkna den producerade volymen metangas. I ekvationen motsvarar p trycket som antogs vara 1 atm, V_{CH_4} är volymen, n motsvarar substansmängden av metan som beräknades genom Buswells ekvation, R är den allmänna gaskonstanten och T motsvarar temperaturen (i K) som antogs vara 10 °C, se ekvation 22.

$$V_{CH_4} = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} \quad (22)$$

Vidare, behövdes molmassan för de tre kategorierna, $M_{lipider/proteiner/kolhydrater}$ för beräkning av metanutbytet, se ekvation 23 för beräkning.

$$M = c \cdot 12 \text{ g/mol} + h \cdot 1 \text{ g/mol} + o \cdot 16 \text{ g/mol} + n \cdot 14 \text{ g/mol} + s \cdot 32 \text{ g/mol} \quad (23)$$

Då molmassan för lipid, protein samt kolhydrat i primärslam erhållits, beräknades sedan metanutbytet, Y_{metan} , för samtliga tre kategorier. Detta gjordes genom att dividera volymen metangas som erhållits från ekvation 22, V_{gas} , med molmassan som beräknades i föregående steg, M , se ekvation 24.

$$Y_{CH_4} = \frac{V_{gas}}{M} \quad (24)$$

Även biogasutbytet för de tre kategorierna beräknades. Detta, genom att metanutbytet, Y_{CH_4} , dividerades med andelen produkt som tidigare beräknades för respektive kategori, MR_{CO_2/CH_4} , i ekvation 21, se ekvation 25 för beräkning av biogasutbytet.

$$Y_{biogas} = \frac{Y_{CH_4}}{MR} \quad (25)$$

Biogasutbytet erhöles i enheten m^3/kg lipid/kolhydrat/protein. Därefter, gjordes ytterligare beräkningar för att erhålla ett värde av det totala biogasutbytet från summan tre kategorierna för primärslam. För

vardera kategori, beräknades volymen biogas som produceras till att även bero av våtvikten av fekalier (WW), andelen torrsbstans (TS), andelen glödförlust (VS) samt hur stor andel av VS som respektive kategori utgör. Det första steget innebar insamling av numeriska värden till parametrarna som nämndes i metodavsnittet. Dessa sammanfattas i Tabell A1.

Tabell A1: Sammanställning av numeriska värden gällande våtvikt av fekalier, torrsbstans i fekalier, glödförlust av fekalier samt det procentuella innehållet av lipider, proteiner samt kolhydrater av glödförlusten (Nordberg 2020)

	Bemämning		Referens
Våtvikt [kg/d]	WW	115,2	(Rose et al. 2015)
Torrsbstans [%]	A_{TS}	25	(Rose et al. 2015)
Glödförlust [% av TS]	A_{VS}	89	(Rose et al. 2015)
Andel lipider av VS [%]	$A_{k/VS}$	34	(Nordberg 2020)
Andel proteiner av VS [%]	$A_{k/VS}$	28	(Nordberg 2020)
Andel kolhydrater av VS [%]	$A_{k/VS}$	38	(Nordberg 2020)

Beräkning med dessa parametrar motsvarar en bättre uppskattning av biogasproduktionen i praktiken, medan beräkningen med Buswells ekvation inte tar hänsyn till exempelvis våtvikten av fekalier (Nordberg 2020). Detta gjordes enligt ekvation 26, där Y_{biogas} varierades för de tre kategorierna som beräknades i föregående steg.

$$Pr_{biogas} = WW \cdot A_{TS} \cdot A_{VS} \cdot A_{k/VS} \cdot Y_{biogas} \quad (26)$$

Därefter, beräknades den totala praktiska biogasproduktionen per dag, S_{biogas} , genom att addera Pr_{biogas} för de tre kategorierna enligt ekvation 27.

$$S_{biogas} = Pr_{biogas, lipid} + Pr_{biogas, kolhydrat} + Pr_{biogas, protein} \quad (27)$$

Även den totala praktiska metanproduktionen beräknades, S_{CH_4} . Detta gjordes genom att multiplicera den totala praktiska biogasproduktionen, S_{biogas} , med andelen metan som de olika kategorierna genererar vid rötning, MR_{CH_4} , se ekvation 28.

$$S_{CH_4} = \sum_{i=1}^3 Pr_{biogas} \cdot MR_{CH_4} \quad (28)$$

Andelen metan för biogas (bildad från rötning av lipider, kolhydrater och proteiner i primärslam), A_{CH_4} , beräknades genom att dividera metankoncentrationen som beräknades i föregående steg, S_{CH_4} , med den totala produktionen biogas per dag, S_{biogas} , se ekvation 29.

$$A_{CH_4} = \frac{S_{CH_4}}{S_{biogas}} \quad (29)$$

A.7 Sammanställning av parametrar

I Tabell A2 återges en beskrivning av vardera parameter som beräknades under dimensioneringsdelen av arbetet.

Tabell A2: Sammanställning av parametrar som rör urin och fekalier

Parameter	Beskrivning
A_{tot}	Totalt antal boende i lägenhetskompaket
Urin	
$V_{tot,u}$	Volym urin som produceras dagligen i kvarteret
$V_{u,N}$	Dagliga produktionen av kväve från kvarteret
$V_{u,P}$	Dagliga produktionen av fosfor från kvarteret
A_{v1}	Area för torkning av urin med lägsta torkningshastighet
A_{v2}	Area för torkning av urin med högsta torkningshastighet
$R_{u,N}$	Mängd kväve som kan återföras
$R_{u,P}$	Mängd fosfor som kan återföras
Red_N	Minskningen av kväve till reningsverk
Red_P	Minskningen av fosfor till reningsverk
Fekalier	
$V_{tot,f}$	Volym fekalier som produceras dagligen i kvarteret
$V_{tot,s}$	Volym spolvatten som produceras dagligen i kvarteret
$W_{f,s}$	Mängd fekalier och spolvatten som produceras dagligen i kvarteret
V_{dig}	Volym av biogasreaktor för kvarteret
$radie_{dig}$	Radie av biogasreaktor för kvarteret
$höjd_{dig}$	Höjd av biogasreaktor för kvarteret
S_{biogas}	Total biogasproduktion dagligen för kvarteret
S_{CH_4}	Total metanproduktion dagligen för kvarteret
A_{CH_4}	Andel metan i biogasen
$UTG_{N,KÄV}$	Koncentration av kväve i utgående vatten från AnMBR
$UTG_{P,KÄV}$	Koncentration av fosfor i utgående vatten från AnMBR