



CHALMERS

Möjligheter till resursutvinning från kommunalt avloppsvatten

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

DOLLEY ALSKAF
ABRAR DAEBES
RIHAM EBRAHIM
TERRIE LY
SOFIA SANDVIK
VERA WALLIN

INSTITUTIONEN FÖR SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK OCH ARKITEKTUR
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

Möjligheter till resursutvinning från kommunalt avloppsvatten

Kandidatarbete i Samhällsbyggnadsteknik

Dolley Alskaf
Abrar Daebes
Riham Ebrahim
Terrie Ly
Sofia Sandvik
Vera Wallin

© DOLLEY ALSKAF, 2022
© ABRAR DAEBES, 2022
© RIHAM EBRAHIM, 2022
© TERRIE LY, 2022
© SOFIA SANDVIK, 2022
© VERA WALLIN, 2022

Handledare: Oskar Modin
Examinator: Frank Persson

Kandidatarbete 2022
Intuition för Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000



CHALMERS

Abstract

Potential for resource recovery from municipal wastewater.

Large amounts of the nutrients from the food end up in the sewage treatment plants. Wastewater also contains resources that can be recycled, such as energy, cellulose, and nutrients. Today, these resources are barely recycled, and therefore opportunities for resource recovery from wastewater should be studied for a more sustainable future. To achieve a sustainable society, the resources we use today must be used several times.

This essay is outlined to investigate and highlight the opportunities and techniques that exist today for the recovery of nitrogen, phosphorus, cellulose, and energy from wastewater. The techniques discussed in the report are compared with the current wastewater treatment at Ryaverket, which is a large treatment plant that treats wastewater in the Gothenburg region. The questions answered in the report are: *What methods are used today? What methods are being researched? How much potential is there for the recovery of different resources? And Which of the researched methods is best suited?*

The methods used today at Gryaab's treatment plant from inlet to outlet are coarse grate, sand trap, fine grate, pre-sedimentation, ferrous sulphate, direct precipitation, activated sludge, post-sedimentation, biobed, post-nitrification, post-denitrification, and disc filter. These purify the wastewater efficiently, however, the resources are not fully recycled and therefore new innovative techniques are needed. When it comes to energy recovery, heat is recovered in the Ryaverket from the wastewater after it has been treated. Gryaab collaborates with Göteborgs Energi to recycle biogas from sewage sludge.

The innovative nitrogen recovery techniques which is focus of this report are: recycling of reject water, algae and separated systems: separating urine directly at the toilet. When it comes to future phosphorus recovery techniques it is, among other things, modified membrane reactors, struvite and three pipes that are being investigated. The techniques for cellulose recovery that are currently being studied are belt filters and sieving <0.35 mm mesh size. Innovative methods regarding energy recovery being researched are heat recovery using heat pump solutions and hydrogen as an energy carrier.

Using the Traffic light method, one resource recovery technique per resource has been developed as the most optimal in comparison with the other technologies for the same

resource. For nitrogen the most optimal technology is recycling of reject water, for phosphorus it is struvite, for cellulose sieving <0.35 mm mesh size. For energy recovery is local heat recovery from wastewater in properties the most optimal and central production.

Keywords: Resource recovery, nitrogen, phosphorus, cellulose, energy, Gryaab, reject water, algae, separated systems, MBR, Eco: P, belt filter, heat recovery, hydrogen

Sammanfattning

Idag hamnar stora mängder av näringsämnena från maten i våra avloppsreningsverk. Detta resulterar i att det finns kväve och fosfor att utvinna från avloppsvattnet. Det finns även andra resurser att återvinna exempelvis cellulosa och energi. Idag återvinns dessa resurser väldigt lite, och därför ska möjligheter för resursutvinning från avloppsvatten studeras för en mer hållbar framtid. För att uppnå ett hållbart samhälle måste resurserna vi använder idag nyttjas flera gånger.

Detta arbete är utformat för att undersöka och lyfta fram vilka möjligheter och tekniker som finns idag för utvinning av kväve, fosfor, cellulosa och energi från avloppsvatten. De tekniker som diskuteras i rapporten jämförs med nuvarande avloppsvattenrening på Ryaverket, vilket är ett stort reningsverk som behandlar avloppsvatten i Göteborgsregionen. Frågorna som besvaras i rapporten är: *Vilka metoder används idag? Vilka metoder forskas det på? Hur stor potential för utvinning av olika resurser finns det? Och Vilken av de undersökta metoderna lämpar sig bäst?*

Metoderna som används idag på Gryaab's reningsverk från inloppet till utloppet är: grovgaller, sandfång, fingaller, försedimentering, järnsulfat, direktfällning, aktivt slam, eftersedimentering, biobädd, efternitritifikation, efterdenitrifikation och skivfilter. Dessa renar avloppsvattnet effektivt, däremot återvinns inte resurserna och därför behövs det nya innovativa tekniker. När det gäller energiåtervinning återvinns värme i Ryaverket från avloppsvattnets efter att det har renats. Gryaab samarbetar med Göteborgs energi för att återvinna biogas från avloppsvattnets slam.

De innovativa kväveutvinningsteknikerna som det fokuseras på i den här rapporten är: återvinning av rejektivatten, alger och separerade system: separera urin direkt vid toaletten. När det gäller framtida fosforutvinningstekniker är det bland annat modifierade membranreaktorer, struvitfällning och tre rör ut som undersöks. Teknikerna för cellulosa utvinning som studeras i dagsläget är bandfilter och silning <0,35 mm maskstorlek. Innovativa metoder gällande energiåtervinning som forskas på är värmeåtervinning med hjälp av värmepumplösningar och vätgas som energibärare.

Med hjälp av trafikljusmetoden har en resursutvinningsteknik per resurs tagits fram som den mest optimala i jämförelse med de andra teknikerna för samma resurs. För kväve är den mest optimala tekniken återvinning av rejektivatten, för fosfor är det struvitfällning, för cellulosa silning <0,35 mm maskstorlek. För energiåtervinning via värmepump lämpar

sig lokal värmeåtervinning från spillvatten i fastigheter bäst och via vätgas lämpar sig central produktion bäst.

Nyckelord: Resursutvinning, kväve, fosfor, cellulosa, energi, Gryaab, rejektivatten, alger, separerade system, MBR, Eco:P, bandfilter, värmeåtervinning, vätgas

Innehållsförteckning

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Inledning | 1 |
| 2 | Syfte och frågeställning | 4 |
| 2.0 | Avgränsningar | 4 |
| 3 | Metod..... | 5 |
| 3.1 | Trafikljusmetoden..... | 5 |
| 4 | Litteraturöversikt och teori | 8 |
| 4.1 | Resursutvinning av kväve | 8 |
| 4.2 | Resursutvinning av fosfor..... | 9 |
| 4.3 | Resursutvinning av cellulosa | 10 |
| 4.4 | Resursutvinning av energi | 11 |
| 4.5 | Gryaabs avloppsvattenrening idag | 12 |
| 4.5.1 | Mekanisk rening | 13 |
| 4.5.2 | Kemisk rening..... | 13 |
| 4.5.3 | Biologisk rening | 13 |
| 4.5.4 | Slambehandling..... | 15 |
| 4.5.5 | Kväveutvinning | 16 |
| 4.5.6 | Fosforutvinning | 17 |
| 4.5.7 | Cellulosautvinning..... | 17 |
| 4.5.8 | Energiutvinning..... | 17 |
| 5 | Resursutvinningstekniker | 18 |
| 5.1 | Kväve | 18 |
| 5.1.1 | Återvinning av rejektvatten (ÅR)..... | 19 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.2 | Alger (A)..... | 21 |
| 5.1.3 | Separerade system: separera urin direkt vid toaletten (SS) | 22 |
| 5.2 | Fosfor | 27 |
| 5.2.1 | Modifierade membranbioreaktorer (MBR) | 27 |
| 5.2.2 | Eco:P (EP) | 31 |
| 5.2.3 | Tre rör ut (TRU)..... | 33 |
| 5.3 | Cellulosa..... | 34 |
| 5.3.1 | Bandfilter (B)..... | 34 |
| 5.3.2 | Finmaskig silning <0,35 mm maskstorlek (S) | 36 |
| 5.4 | Energi..... | 38 |
| 5.4.1 | Värmeåtervinning med hjälp av värmepumpslösningar (VV)..... | 38 |
| 5.4.2 | Vätgas som energibärare (VE) | 42 |
| 6 | Potential för resursutvinning | 46 |
| 6.1 | Kväve | 46 |
| 6.2 | Fosfor | 47 |
| 6.3 | Cellulosa..... | 48 |
| 6.4 | Energi..... | 49 |
| 7 | Resultat | 51 |
| 7.1 | Kväve resultat..... | 51 |
| 7.2 | Fosfor resultat..... | 53 |
| 7.3 | Cellulosa resultat..... | 55 |
| 7.4 | Energi resultat..... | 57 |
| 8 | Diskussion | 60 |
| 8.1 | Kväve | 60 |

| | | |
|-----|----------------|----|
| 8.2 | Fosfor | 62 |
| 8.3 | Cellulosa..... | 64 |
| 8.4 | Energi..... | 65 |
| 9 | Slutsats..... | 67 |

Terminologi och förkortningar

Ammonium – Kemisk förening av kväve och väte

Ammoniumsulfat – Ett salt av ammoniak och svavelsyra

Anoxisk – Syrefri miljö

Bioväte – Vätgas som produceras biologiskt

CAS-UF - Conventional active sludge – ultra filtration

Fermentering – Jäsning

Fosforit – Sedimentär bergart

Gråvatten – Gråvatten, eller BDT-vatten, innehåller inga fekalier, dock kan det innehålla smuts och olika kemikalier som kommer från disk, tvätt, bad eller rengöringsvattnet.

Köldmedium – Innefattar olika typer av medium som används i slutna kretsprocesser som levererar värme eller kyla.

Kväveföreningar – Ammoniak, ammonium, nitrit, nitrat, kväveoxid

MBR – Membranbioreaktor

Mineralgödsel – Gödsel som har producerats från industriella processer

Mixotrofisk – En alg som kan utvinna energi både från fotosyntes och externa energikällor

Pyrolys – En process som syftar på att sönderfall ett ämne utan att förbränningen

Rejektvatten – Det vatten som avlägsnats från slammet

Sorptionsmedel – Ett medel som suger åt sig kemikalier, i detta fall kväve.

Struvit – Urinkristaller som bildas i urinen

Spillvatten – Spillvatten kommer från bostäder och kan indelas i svartvatten och gråvatten

Svartvatten – Svartvatten innefattar vattnet som spolas ut från toaletter och innehåller urin och fekalier.

Växttillgängligt kväve – Kväve i formen NH_4^+ , NH_3 och aminosyror

1 Inledning

Det är av stor vikt för samhället att avlopp och avloppshanteringen är välfungerande både i vardagen och för den gemensamma miljön. En god avloppshantering är väsentlig för att undvika allvarliga miljöproblem (Naturvårdsverket, u.d.b). Vattnet som renas i avloppsreningsverken kommer från hushåll, industrier, dagvatten och andra verksamheter. Avloppsvattenrening medför att utsläpp av förorenat vatten kan undvikas och därmed minska övergödning och syrebrist i våra sjöar och hav. Majoriteten av ämnena i avloppsvattnet finns även naturligt i miljön, det är när mängderna förstoras eller hamnar på fel plats som läget blir kritiskt (Naturvårdsverket, u.d.a). Klimat- och miljöminister Per Bolund nämner vikten av att cirkulera näringsämnen i en intervju med Björn Anderberg från Aktuell hållbarhet (Anderberg, 2021). För att uppnå ett hållbart samhälle måste resurserna vi använder idag nyttjas flera gånger. Det är därför signifikant att forska på just resursutvinning/resursåtervinning från avloppsvattnet.

En stor del av näringsämnena kommer från toalettfraktionerna och därför finns det potential för insamling och återvinning med källsorterande avloppssystem (Westling, Kärrman, & Norström, u.d). Det finns även andra resurser i avloppet som kan återvinnas, exempelvis cellulosa.

Vid rening av avloppsvatten produceras en biprodukt som kallas avloppsslam. Denna biprodukt kan ha olika användningsområden men också innehålla oönskade ämnen, exempelvis metaller eller smittämnen, som kan skada miljön (Naturvårdsverket, u.d.b). Förutom att orsaka allvarliga miljöproblem så kan avloppsvatten även utgöra en värdefull resurs i samhället exempelvis inom jordbruket eller för värmeenergi (Naturvårdsverket, u.d.a). Vatten från hushåll innehåller näringsämnena, fosfor och kväve, vilka bidrar till övergödning om det rinner ut i sjöar, vattendrag och hav.

I dagsläget läggs stora resurser, globalt sett, på att tillverka konstgödsel som innehåller kväve och fosfor (Westling, Kärrman, & Norström, u.d). Fosfor- och kvävetillgången är begränsad (Ahlgren, Junestedt, Ahlström, & Lundin, 2020) Det krävs högre halter för att utvinna fosfor och kväve samtidigt som det krävs mycket fossil energi till produktionen. Det är därför önskvärt att man använder de näringsämnena som finns i omlopp på ett hållbart sätt.

Näringsämnena i vattnet från hushåll finns även i avloppsvatten och kan utvinnas och återföras till samhället med hjälp av avloppsreningsverken (Westling, Kärrman, &

Norström, u.d). En stor del av avloppsreningsverkens el- och kemikalieförbrukning går åt till att reducera halterna kväve och fosfor i vattnet och bilda kvävgas och slam. Endast en tredjedel av slammet används idag för spridning inom jordbruket, trots att slammet innehåller värdefulla resurser (SOU, 2020). Om en större del av slammet hade använts i form av resursuttag som biogas, mineralgödsel och källsorterade fraktioner, med högt växtnäringsinnehåll, blir följden början på en utveckling där teknisk innovation och systemtänkande kan göra stora förändringar för framtiden. Om även restprodukterna kvävgas och slam tas tillvara på och återförs till samhället kan resursförbrukningen få dubbel nyttoeffekt (Westling, Kärrman, & Norström, u.d).

De idag vanligaste användningsområdena för avloppsslammet är tillverkning av anläggningsjord, deponitäckning samt direkt återföring av slam till åkermark. Det är gynnsamt när växtnäring tillförs till jordbruket då det bidrar till en uthållig livsmedelsproduktion (Naturvårdsverket, u.d.a). Förutom att växtnäringsämnen som återfinns i avloppsvattnet kan utnyttjas i jordbruken så kan även värmeenergin tas tillvara på med hjälp av värmepumpar för att användas till uppvärmning.

Regeringen har utformat riktlinjer för framtida hållbara och kretsloppsanpassade vatten- och avloppssystem. Bland annat anges att "Arbeta för att minska utsläpp av näringsämnen från kommunala reningsverk, ansluta fler små avlopp till det kommunala VA-nätet, samt förbättra dagvattenhanteringen" (Sveriges Miljömål, 2017).

För att resurserna i avloppsvatten ska användas på ett hållbart sätt ska arbetet mot cirkulära avloppssystem prioriteras istället för ett linjärt avloppssystem (Sweden water research, 2017). Det är väsentligt att jobba cirkulärt för att sluta kretsloppet (L. Stålhandske, personlig kommunikation, 25 mars 2022). Ett cirkulärt avloppssystem innebär att all växtnäring och en del av det organiska materialet utnyttjas för energi eller ingår i matproduktionen samt att värme och vatten återutnyttjas (Sweden water research, 2017). Ett linjärt avloppssystem kan leda till konsekvenser såsom att jordbruk blir beroende av importerat mineralgödsel och fjärrvärmesystem som drivs av skogsråvaror. Även om cirkulära avloppssystem är något som VA-Sverige strävar mot så finns det fortfarande flera problem att lösa innan det kan uppnås.

Det finns en vision som tydliggör vilken önskvärd riktning dagens avloppsvattenreningsverk bör arbeta mot. I den långsiktiga visionen inom vattenområdet har det tagits fram konkreta mål i strävan mot ett optimistiskt läge år 2030 (Westling, Kärrman, & Norström, u.d). I de konkreta målen beskrivs hur Sverige ska bidra med

forskning, innovation och samverkan mellan sektorns aktörer för att skapa vattentjänster, produkter och systemlösningar som är uthålliga och globalt konkurrenskraftiga. Vid 2030 ska det enbart finnas resursvattenflöden som genererar recirkulation av nyttigheter samt att alla vattenresurser ska kunna betraktas som ekologiskt återställda och uthålliga. Svenska innovativa lösningar inom vattenområdet ska sträva mot en ledande ställning på den internationella marknaden och bidrar globalt till bland annat nyttjande av resurser från dagens avloppsvatten och innebära ett holistiskt synsätt på VA-systemen. En vision är att det inte kommer heta avloppsreningsverk om 15-20 år utan benämnas som resursverk (L. Stålhandske, personlig kommunikation, 25 mars 2022). Alla avloppssystemen i Sverige ska vid 2030, trots klimatförändringarna, kunna reducera utsläppen för att uppnå målet om god ekologisk och kemisk status i hav, sjöar och vattendrag, samtidigt som systemen ska bidra till bättre hushållning med resurser som växtnäring och energi.

2 Syfte och frågeställning

Syftet med rapporten är att undersöka och lyfta fram vilka möjligheter och tekniker som finns idag för resursutvinning från avloppsvatten. Resurserna som undersöks i denna studie är kväve, fosfor, cellulosa och energi. Målet med studien är att besvara frågorna: vilka metoder används idag? Vilka metoder forskas det på? Hur stor potential för utvinning av olika resurser finns det? och Vilken av de undersökta metoderna lämpar sig bäst? Strukturen som används för att besvara dessa frågeställningar är beskrivning av dagens avloppsvattenrening samt hur effektiv resursutvinningen är. Därefter studeras och analyseras nya tekniker samt deras potential till resursutvinning. I slutändan genomförs en tydlig jämförelse mellan de olika teknikerna och metoderna, för att lyfta de som resulterar i bäst resursutvinning.

2.0 Avgränsningar

Arbetet kommer ligga till grund för arbete inom en av VA:s Teknik Södra aktörer som är verksamma inom VA-teknikområdet i sydvästra Sverige. Därför kommer resurserna som behandlas som vara anpassade därefter. Resurserna som undersöks i denna studie är kväve, fosfor, cellulosa och energi. För att optimera resultatet och inkludera nya innovationer kommer tekniker att hämtas både nationellt och internationellt. Egna laborationer kommer ej att genomföras då mätvärden istället kommer hämtas från reningsverk inom området. Eftersom reningsverket Gryaab inom VA Teknik Södra behandlar rening av kommunalt vatten kommer inte industriellt vatten att analyseras då industrierna delvis ansvarar för egen vattenrening. Ekonomiska faktorer kommer lyftas men inte begränsa potentiella lösningar. Övriga avgränsningar kommenteras inom varje ämne som analyseras.

3 Metod

Arbetet är till största delen en litteraturstudie och majoriteten av den insamlade informationen grundas därför i litteratursökningar. Utöver detta kommer kompletterande information att hämtas från muntliga intervjuer. Respondenterna som intervjuas arbetar inom VA-branschen och har rekommenderats av handledaren, dessa är Liselotte Stålhandske, utvecklingsstrateg från det kommunala VA bolaget Hässleholm och Fredrik Christersson, strategisk utvecklare från Laholmsbuktens VA ABF. Syftet med intervjuerna är att få ett förstärkande underlag till studien. Intervjufrågorna utformas i syfte att samla relevant information som kan tydliggöra studiens frågeställning/ar. Beroende på den rådande pandemin och intervjupersonernas önskemål genomförs intervjuerna via Microsoft Teams. Inspelning av intervjuerna sker med respondentens godkännande och utförs i syfte att kunna gå tillbaka och lyssna på innehållet. Efter att de intervjuerna transkriberats kommer den mest relevanta informationen plockas ut och användas informativt. Tillsammans med den mest relevanta informationen som tagits från litteratursökningarna så analyseras informationsinsamlingen.

Rapportens beräkningsdel har som avsikt att förstärka rapportens innehåll och syfte. I beräkningsdelen analyseras vattnets innehåll av ett specifikt näringsämne. Data som analyseras är orenat samt renat avloppsvatten från Gryaab.

Resultatet kommer presenteras med hjälp av trafikljusmetoden för att tydligt visualisera de tekniker och metoder med bäst resursutvinningspotential. Det kommer inte ske någon jämförelse mellan olika resurser utan mellan olika tekniker för samma resurs.

3.1 Trafikljusmetoden

Metoden som används för att ta fram de bästa utvinningsteknikerna är ett färgkoordinerat poängsystem som kallas för trafikljusmetoden. Den färgkoordinerade bedömningsverktyget används för att bedöma teknikerna inom varje resurs utifrån speciellt utformade delindikatorer och/eller faktorer, se *tabell 1* (Cossio, McConville, Mattsson, Mercado, & Norrman, 2020). Dessa poängsätts därefter med en förenklad poängskala, se *tabell 2*. Eftersom studien som genomförs har till syfte att lyfta fram tekniker som möjliggör resursutvinning så kommer indikatorerna som teknikerna bedöms utifrån att anpassas därefter. Varje bedömningsfaktor besvaras genom fördefinierade svar som motsvarar poäng (0-4) och färger (röd – mörkgrön).

Tabell 1. Delindikatorer/faktorer speciellt utformade för att bedöma teknikerna.

| Indikator | Objektiv |
|--|--|
| Funktion | |
| Mognad | Hur mogen är tekniken? |
| Kapacitet | Kan tekniken klara av Gryaabs behov? (Kapacitet) |
| Underhåll | Hur ofta behövs det underhållning? |
| Livstid | Hur lång är brukstiden på tekniken? |
| Energi och resurs | |
| Energianvändning | Mängden energi som krävs för att bedriva tekniken. |
| Resursutvinningspotential | Hur mycket av resursen utvinns och kan återanvändas? |
| Sociala och samhällsenliga aspekter | |
| Platseffektivitet | Hur mycket volym kräver tekniken |
| Samhällets mottaglighet | Finns det kritik/åsikter från samhället? |
| Ekonomiska förutsättningar | |
| Drift- och underhållskostnad | Hur kostsamt är det att driva och underhålla tekniken? |
| Implementeringskostnad | Vad kostar det att investera i tekniken? |

Tabell 2. Mall för färgkoordinering med färgernas betydelse samt respektive poäng (Cossio, McConville, Mattsson, Mercado, & Norrman, 2020).

| Färg | Poäng | Förklaring |
|----------|-------|---|
| Vit | - | Ingen information ifylld ännu |
| Beige | - | Inte möjligt att implementera |
| Grå | 0 | Ingen information tillgänglig |
| Röd | 1 | Optimal nivå i relation till dagens teknik inte uppnådd |
| Gul | 2 | Optimal nivå i relation till dagens teknik delvis uppnådd |
| Ljusgrön | 3 | Optimal nivå i relation till dagens teknik relativt uppnådd |
| Mörkgrön | 4 | Optimal nivå i relation till dagens teknik uppnådd |

Resultatet presenteras först i en tabell med tillhörande beskrivande text som beskriver tabellens information. De fördefinierade svaren visualiserar tydligt med färg men ger också en tydlig helhetsbedömning i form av en mindre tabell med sammanställningen av poäng tillsammans med medelvärdet av totalpoängen för att då kunna ge varje teknik ett betyg utifrån *tabell 3*.

Tabell 3. Beskrivande mall för medelvärdet av teknikernas totalpoäng som resulterar i en helhetsbedömning (Cossio, McConville, Mattsson, Mercado, & Norrman, 2020).

| Betyg | Intervall | Beskrivning av processen |
|--------------|------------------|---|
| 0 | 0 | Inte möjligt att bedöma tekniken |
| 1 | >0 och <1,5 | Inte bra teknik för resursutvinning |
| 2 | ≥1,5 och <2,5 | Delvis bra teknik för resursutvinning |
| 3 | ≥2,5 och <3,5 | Relativt bra teknik för resursutvinning |
| 4 | ≥3,5 | Mycket bra teknik för resursutvinning |

4 Litteraturöversikt och teori

Idag hamnar stora mängder av näringsämnen från maten i våra avloppsreningsverk. Detta resulterar i att det finns kväve och fosfor att utvinna från avloppsvattnet (Ahlgren, Junestedt, Ahlström, & Lundin, 2020). Idag återvinns dessa resurser väldigt lite, och därför ska möjligheter för resursutvinning från avloppsvatten studeras för en hållbarare framtid. Det finns många resurser att ut- och återvinna från avloppsvattnet. I detta arbete presenteras fyra olika resurser: kväve, fosfor, cellulosa och energi.

4.1 Resursutvinning av kväve

Biogeokemiska flöden av kväve har identifierats som en av nio planetära gränser och en av två som överskrider nivån för ”*hög risk för irreversibla effekter*” (WWF, u.d). Forskning visar att dessa nio processer reglerar hela jordsystemets stabilitet och samspelet mellan mark, hav, atmosfär och biologisk mångfald som tillsammans skapar förutsättningarna på jorden som våra samhällen är beroende av (Stockholms universitet, 2015). Klimatfrågan blir allt viktigare och därmed stärks även vikten av att recirkulera kväve.

Kväve kan utvinnas endast ur avloppsvattnet medan exempelvis fosfor kan utvinnas ur avloppsvatten, slam och askan från slammet om det förbränns (Kärrman, Anderzén, von Bahr, Berg, & Nilsson, 2019). Alternativa systemlösningar till utvinning av kväve på det konventionella avloppsreningsverket är källsorterande avloppssystem som avskiljer avloppsfraktioner redan vid källan.

I Sveriges kommunala reningsverk cirkulerar 41 050 ton kväve varje år i avloppen (Jönsson, 2019). I Sveriges kommunala reningsverk cirkulerar det 28 000 ton växttillgängligt kväve, det är lika mycket som växttillgängligt kväve i stallgödsel. Av allt detta är det bara 6 %, 1700 ton, som återvinns i form av avvattnat slam och nyttiggörs som gödsel. En anledning till att det inte mer återvinns är för att cirka hälften av det växttillgängliga kvävet förloras från slammet till rejektivatten vid avvattning. Kvävet i rejektivatten återvanns mellan åren 1992–2006 i Ellinge reningsverk i form av ammoniumnitrat. Idag återvinns inget rejektivattenkväve i något svenskt reningsverk och det tros vara på grund utav att Sverige inte haft något mål om återvinning av kväve från avlopp och ekonomiska aspekter.

4.2 Resursutvinning av fosfor

En annan viktig resurs som kan utvinnas från avloppsvatten är fosfor. Fosfor är ett grundämne som inte finns i fri form naturligt då det är bundet till syre och finns därför i form av fosfat, PO_4^{3-} (Pedersen, Elding, Björn, & Erlandsson, u.d). Fosfor är en ändlig resurs som inte går att ersätta eller förnya. Dessutom är det också en resurs som är geografiskt begränsad (Schaum, 2018). Detta grundämne är viktigt för alla växter och djur, inte minst för människan. Fosfor är en beståndsdel i många organiska föreningar, som till exempel DNA och ATP (Schaum, 2018). Den är nödvändig i cellulära processer hos alla levande organismer (Chowdhury, Moore, Weatherley, & Arora, 2017). Vi människor får i oss fosfor främst från proteinrika livsmedel, såsom kött, mejeriprodukter och baljväxter (Livsmedelsverket, 2022). Om man får brist på fosfor riskerar man att få hälsoproblem som till exempel försämrad njurfunktion, skeletturkalkning, och skador i nerver och muskler.

Det moderna matproduktionssystemet är idag väldigt beroende av tillförseln av gödselmedlet fosfor (Chowdhury, Moore, Weatherley, & Arora, 2017). Vid brist på fosforresursen skulle det därför minska på livsmedelsproduktionen och försvåra trygg livsmedelsförsörjning. Resursen används även i andra industrier såsom elindustrin och läkemedelsindustrin (Schaum, 2018).

Syftet med fosforanvändningen i jordbruket är att ge växterna näring och få de att växa snabbare (Havet.nu, 2021). Trots att fördelen med att använda fosfor som gödselmedel väger tungt, finns det även risker med det. Gödselmedlet i jordbruket kan öka riskerna för eutrofiering i mark, sjöar och andra vattendrag. Vid för stor tillförsel av gödselmedel och därmed hög halt av näringsämnen, blir följden stora algblomningar. Det leder till stor mängd av organiskt material. Dessa omständigheter ger upphov till förändringar som förstör ekosystemen samtidigt som djur och växter kan utrotas. Därför har vattenreningsverken till uppgift att minimera koncentrationen fosfor i avloppsvattnet, vilket därefter skulle minimera utsläppen till vattendragen.

Fosfor som används som gödselmedel produceras främst från fosforit, en sedimentär bergart (Chowdhury, Moore, Weatherley, & Arora, 2017). Ett annat sätt är att använda det avfall som bildas efter att avloppsvatten renats då det innehåller stora mängder fosfor (Bahr & Kärrman, 2019). Att använda avloppsslammet som gödsel i jordbruket har varit ett smart sätt för reningsverken att göra sig av med slammet på ett effektivt sätt. Detta

kan vara ett steg i rätt riktning mot ett cirkulärt avloppssystem. Risken med att använda slam i jordbruket är att det kan innehålla miljögifter.

Som nämnt ovan, kan fosfor utvinnas från avloppsvatten och avloppsslam, det är även möjligt att utvinna fosfor ur askan från förbränt slam (Cornel & Schaum, 2009). Vanligtvis kan man kombinera det med separeringen av fosfor. Idag finns det ett flertal olika sätt att återvinna fosfor men det finns lite kunskap och erfarenhet när det gäller implementering i större skala, exempelvis industriellt.

Faktorer såsom ökad efterfrågan, överdriven gruvdrift, slöseri och utsläpp till vattensamlingar har hindrat hållbar hantering av fosfor (Chowdhury, Moore, Weatherley, & Arora, 2017). Även den naturliga cykeln för fosfor har rubbats på grund av bland annat teknikutvecklingen och livsmedelsproduktionen. Detta leder till problem i aspekter av miljömässiga men även ekonomiska frågor, samt utarmning av resursen och därmed risker för livsmedelsförsörjningen.

4.3 Resursutvinning av cellulosa

En annan resurs som går att utvinna från avloppsvatten är materialet cellulosa, från de stora mängder toalettpapper som spolas ner. Cellulosamaterial som framkommer i toalettpapper är den viktigaste komponenten från det urbana inflytandet inom det kommunala avloppsvattnet och har stor utvinningspotential (Palmieri, o.a., 2019). Den årliga användningen uppskattas till ett genomsnitt på 10 kg toalettpapper per person i Sverige, enligt statistik från 2010 (Wikipedia, 2022). Däremot så finns det stora variationer sett ur ett världsligt perspektiv där användningen över de olika världsdelarna varierar från ett genomsnitt på 365 g /p år i Afrika till ca 17 kg / p år i Amerika (Palmieri, o.a., 2019).

Användningsområden för cellulosa är i dagsläget densamma som för all biomassa som produceras, det vill säga förbränning, som inte är begränsat till enbart cellulosa-andelen. Studier visar på att resursen kan användas som bindningsmedel i byggnadsmaterial, jordbehandlingsmedel, råvaror i jäsningsindustrin för produktion av till exempel biobränslen samt produktion av toalettpapper (Palmieri, o.a., 2019). Den sist nämnda kan däremot vara svårt att applicera på grund av social acceptans.

Trots att en stor del av avloppsvattnet består av onyttjat toalettpapper, utvinns inte resursen alls om man ser till, inte bara Västsverige, utan hela landet och flera länder

utöver det. Detta beror förmodligen på biomassan som produceras av det mekaniskt avlägsnade andelen som inte går till slambehandling, och därmed används som förbränning till biogas. Potentialen för resursen sträcker sig förmodligen längre än så, och i denna rapport kommer tekniker som syftar till att utvinna resursen för ändamål utöver biogas att lyftas och diskuteras.

4.4 Resursutvinning av energi

Med början av 2000-talet, har Sveriges befolkning ökat med cirka 18% (SCB, 2022). Ju mer invånare i Sverige, desto fler bostäder som behöver byggas, vilka i sin tur förbrukar energi för att uppvärmas. Uppvärmningen av lokaler och bostäder står för cirka 70% av energianvändning inom Sveriges byggsektor (Boverket, 2021). Med avseende på den enorma energianvändningen har riksdagen satt ett mål som innefattar en betydlig ökning av energieffektivisering med cirka 50% fram till 2030 jämfört med 2005 (Regeringskansliet, u.d.).

Det förbrukas 50–70 liter tappvarmvatten/person och dygn (K-konsult Energi, 2012). Sveriges befolkning har kommit upp till 10 452 326 invånare i slutet av 2021 (SCB, 2022). Genom att utföra en snabb beräkning med hjälp av ett medelvärde visar det sig att cirka 627 139 560 liter vatten behöver uppvärmas dagligen för att täcka befolkningens behov. Den genomsnittliga energianvändningen för vattenuppvärmning i flerbostadshus i Sverige cirka 1000–1800 kWh/person och år (K-konsult Energi, 2012).

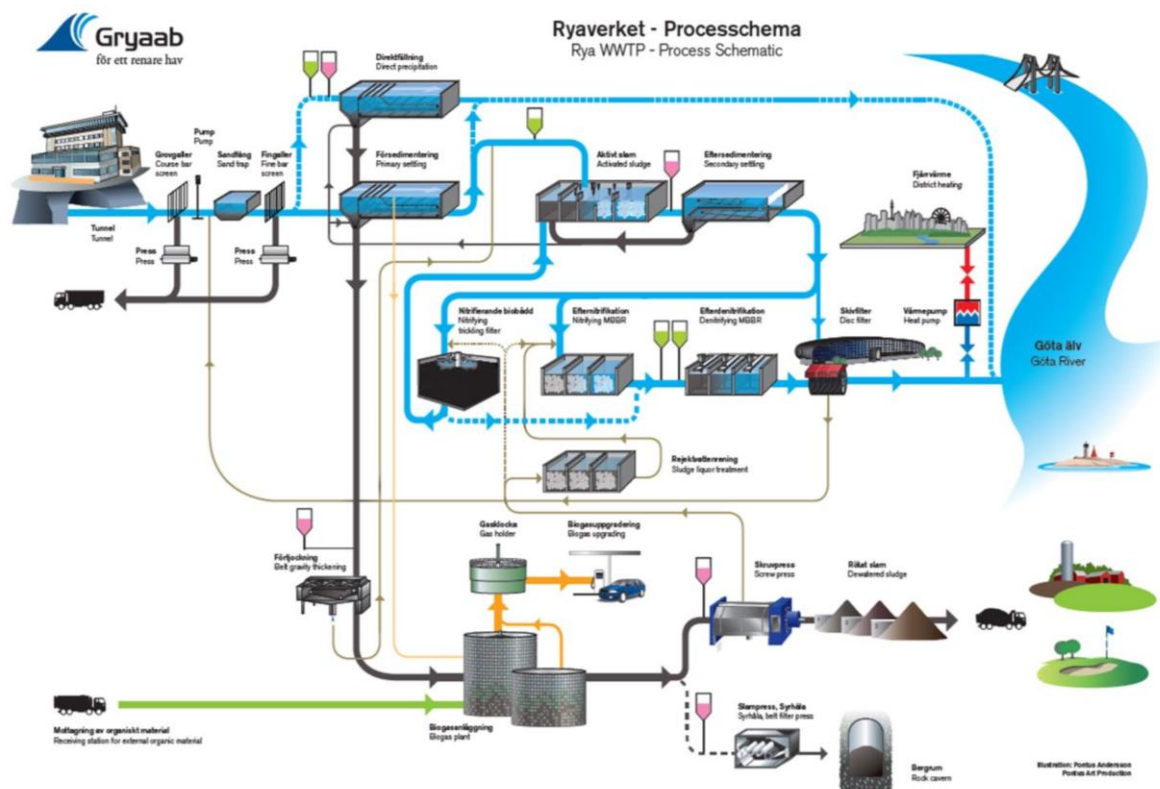
Mer än hälften av dagens samhälle i Sverige får sin värme från fjärrvärme (Rydegran, 2021). Fjärrvärme produceras i ett värmeverk som kan vara kopplad till en hel kommun eller stad. Det finns olika typer av energikällor som används för att driva fjärrvärme. Efter att ha använt träd till att tillverka möbler, huskonstruktion och papper skickas resterna till ett värmeverk. Resterna bränns upp i en panna som är mer än 800 grader varm. Pannan värmer upp vatten som cirkulerar i ett väl isolerat rörsystem under marken och förgrenar sig till olika hus och lokaler.

Som alla förbränningsprocesser kan produktionen av fjärrvärme orsaka utsläpp av stora mängder koldioxid. För att minska miljöpåverkan som beror på fjärrvärme har flera ansvariga företag och experter föreslagit alternativa lösningar. Ett flertal miljövänliga lösningar som berör energiåtervinning ur avloppsvattnet kommer att beskrivas i *avsnitt 5.4*.

4.5 Gryaab avloppsvattenrening idag

Gryaab behandlar avloppsvatten från 800 435 personer i kommunerna Ale, Göteborg, Härryda, Kungälv, Lerum, Mölndal, Partille och Bollebygd (Gryaab, u.d.c; Videbris, 2022). De anslutna hushållens och verksamheternas vatten transporteras i rör till Gryaabs 13 mil långa, lutande, tunnelsystemet innan det ansluter till reningsverket ungefär 20 meter under markyta (Gryaab, u.d.e). I reningsverket behandlas nedbrytbart organiskt material, fosfor och kväve samtidigt som partiklar, föremål och sedimenterbart material avskiljs (Videbris, 2022). På Ryaverket genomförs mekaniska, biologiska och kemiska processer, där dimensionerade kapaciteten är 9 m³/s för den mekaniska delen och 4–10 m³/s för den biologiska och kemiska delen. Stegen som avloppsvattnet passerar mellan inloppet och utloppet är grovgaller, sandfång, fingaller, försedimentering, järnsulfat, direktfällning, aktivt slam, eftersedimentering, biobädd, efternitrifikation, efterdenitrifikation och skivfilter, *se figur 1*. För att möjliggöra effektivare processlösningar krävs en bättre förståelse för reningsprocesserna, vilket presenteras nedan (Westling, Kärrman, & Norström, u.d).

Figur 1. Gryaab schematiska illustration av deras avloppsvattensreningsverk



Kommentar. Från *Miljörapport Gryaab, Ryaverket 2021*, av Karl-Emil Videbris, 2022. Återgiven med tillstånd.

4.5.1 Mekanisk rening

När avloppsvattnet anländer till Ryaverket pumpas det in med fyra pumpar där varje pump skyddas av ett galler, grovgaller, med en spaltvidd på 20 millimeter (Videbris, 2022). I grovgallret fastnar pappershanddukar och annat större skräp som hamnat i avloppsvattnet, detta kallas även för rens (Gryaab, u.d.e). Efter att rensat separerats från avloppsvattnet pressas och finfördelas och förbränns sedan vid Renovas förbränningsanläggningar vid Sävenäs (Videbris, 2022). Från grovgallret pumpas vattnet upp till sandfånget där sand och grus sjunker till botten för att undvika att pumpar och maskiner i verket tar skada (Gryaab, u.d.e). Från sandfånget transporteras vattnet sedan till de mekaniska fingallren, med en spaltvidd på 2 millimeter, där mindre rens separeras. Därefter hanteras avloppsvattnet i 12 försedimenteringsbassänger där tyngre partiklar, bland annat cellulosa, sjunker till botten och bildar primärslam. Fetterna som finns i vattnet flyter till ytan och både slammet och fettets skrapas sedan bort och tas hand om.

4.5.2 Kemisk rening

Nästa steg i reningsprocessen är en kemisk reningsprocess, där tillförs fällningskemikalien järnsulfat för att bilda kemisk fällning av fosfor (Videbris, 2022). Kemikalien gör så att fosfor löst i vattnet bildar flockar som senare binds till slammet och sjunker till botten. Direktfällning är en process som endast utförs vid behov, exempelvis när det tillförs mycket dagvatten till reningsverket (Gryaab, u.d.e). Denna reningsprocess innebär att kemikalier faller ut fosfor redan i försedimenteringsbassängerna så att det överflödiga vattnet som släpps ut, innan ordinarie biologisk och kemisk rening, inte innehåller så höga halter fosfor.

4.5.3 Biologisk rening

Kvävet som befinner sig i avloppsvattnet är till störst del i form av ammonium, men förekommer även i kemiska föreningar (Videbris, 2022). I reningsverkets biologiska processer omvandlas de kemiska föreningarna enkelt till ammonium alternativt binds till slammet. Det är ungefär 15–20 procent av kvävet som hamnar i slammet och resterande kväve omvandlas från ammonium till kvävgas. Gryaab har som mål att avlägsna minst 70 procent av kvävet och detta genomförs med tre olika biologiska processer: nitrifikation (ammonium oxideras till nitrat), denitrifikation (nitrat reduceras till kvävgas) och deammonifikation av rejektivattnet från avvattningen (ammonium oxideras direkt till kvävgas).

Vattnet rinner vidare från försedimenteringsbassängerna och blandas med aktivslam samt recirkulerat vatten från biobäddarna innan de fördelas i tre aktivslambassänger (Videbris, 2022). Det aktivslam som blandas med vattnet är ett koncentrat av bakterier och andra mikroorganismer vilket pumpas i retur från nästkommande sedimenteringssteg. När vattnet passerar genom aktivslambassängerna tas lösta och kolloidala föroreningar upp som näring av bakterier. Bassängerna är uppdelade i oluftade och luftade zoner. Den oluftade zonen är placerad i de första 40–60 procenten av varje bassäng, där sker denitrifikationen. Under denitrifikationen använder bakterierna löst nitrat istället för syre till respiration, varav nitraten omvandlas till kvävgas som släpps ut i atmosfären. I den andra zonen av bassängerna luftas blandningen varvid bakterierna oxiderar (bryter ner) återstående föreningar genom en respiration med syre närvarande. Denna process bildar aktivt slam när oxidationen av föreningar bidrar till att bakterierna förökar sig via celledelning. Processen innebär att luft blåser in i vattnet så att bakterierna effektivt kan bryta ner det organiska materialet, luftningen leder också till att det organiska materialet undviker att sjunka till botten av tanken (Gryaab, u.d.e).

Efter att vattnet behandlats i aktivslambassängerna rinner det vidare till eftersedimenteringsbassängerna, vilka består av 24 tvåvåningsbassänger, med en totalvolym på 72 200 m³. (Videbris, 2022). I eftersedimenteringsbassängerna separeras bakterier och utfälld fosfor i form av slam. Aktivt slam sedimenteras och skiljs från vattnet. Det mesta av vattnet returneras till aktivslambassängerna och överskottsslammet pumpas till försedimenteringsbassängerna. Överskottsslammet kan, vid höga flöden, pumpas direkt till slamhanteringen. Efter att vattnet passerat eftersedimenteringen recirkuleras en del av vattnet till biobäddarna och en del leds till efterdenitrifikationen.

På Gryaab används två olika kväverningssteg: den tidigare nämnda denitrifikationen samt nitrifikationen som sker i biobäddarna och efterdenitrifikationsbassängerna (Gryaab, u.d.e). I biobäddarna återfinns ett specialtillverkat, korrugerat, svart, fast, plastmaterial som är tillverkat för att ge en stor yta som nitrifikationsbakterierna kan växa på (Videbris, 2022). Varje biobädd har volymen 16 500 m³ och för att vattnet ska fördela sig jämnt över ytan och strilas ner genom bädden samt över bakterierna används sex spridare. Resterande föroreningar, mestadels ammonium, är energikällor som växer på de våta ytorna. När bakterierna växer bildas ett tunt lager som kallas för biofilm. Nitraten som bildas förs vidare med vattnet som huvudsakligen leds till aktivslambassängerna. Det finns däremot en möjlighet att leda en del av vattnet vidare till efterdenitrifikationsbassängerna. Från eftersedimenteringen leds avloppsvattnet till

efternitrifikationsbassängerna, med totalvolymen 10 800 m³, som är fyllda med specialtillverkade rörliga plastbärare där bakterier kan växa. Denna process, likt biobäddarnas funktion, omvandlas ammonium till nitrat fast på rörliga bärare istället för den fasta plasten. Därefter leds vattnet vidare till efterdenitrifikationsbassängerna.

När vattnet kommer till efterdenitrifikationen, främst från efterdenitrifikationen, inleds kvävereningens andra steg, då nitrat omvandlas till kvävgas (Videbris, 2022). Även i dessa bassänger, med totalvolymen 11 000 m³, växer bakterier på rörliga, specialtillverkade, bärare av plast (liknande pastahjul) som bidrar med stor kontaktyta. Det är främst nitrat som är kvar i vattnet, vilket används som syrekälla för att skapa den växande biofilmen. Eftersom bärarna är rörliga ryms det många i bassängerna och det leder till att mängden bakterier optimeras, samtidigt som de stannar kvar längre i bassängerna då de inte följer med vattnet vidare i reningsverket (Gryaab, u.d.e).

Det sista reningssteget som passeras innan vattnet släpps ut i havet är skivfilter. Hit leds vatten från eftersedimenteringen och efterdenitrifikationen för att avskilja suspenderade ämnen (Videbris, 2022). Vattnet passerar genom rader av tunna roterande filterdukar med mikroskopiskt små hål på 15 mikrometer, vilket filtrerar bort de allra minsta partiklarna. Detta begränsar mängden fosfor som faktiskt släpps ut i havet (Gryaab, u.d.e). När de mesta av föroreningarna har extraherats släpps det renade vattnet ut vid Rya nabbe i Göta älvs mynning, ungefär 850 meter väster om Älvsborgsbron. På vägen mot utloppet leds vattnet genom Göteborg Energis värmepumpsanläggning som tar vara på värmen för att skapa fjärrvärme.

4.5.4 Slambehandling

Slambehandlingens består av flera olika processer, dessa är förtjockning, rötning, slamavvattning och slamdisponering. Primärslam, från försedimenteringen, samt överskottsslam, från eftersedimenteringen består från början av ungefär 98% vatten (Gryaab, u.d.d). För att minska mängden vatten används fyra bandgravitationsförtjockare där slammet transporteras på en silduk som släpper igenom delar av vätskan. Det tillsätts även polymer för att slammet ska förtjockas bättre och efter processen är andelen vatten ungefär 94%. Från förtjockningen förs sedan rejektivatten till kanalen efter försedimenteringen, därefter pumpas det förtjockade slammet vidare till rötammarna (Videbris, 2022).

I rötningsprocessen omvandlas slammets lättnedbrytbara innehåll av bakterier, vilket genomförs i en anaerob (syrefri) miljö i röt-kammaren (Videbris, 2022). Nedbrytningen bildar en energirik biogas bestående av 60–65 procent metangas samt 35-40 procent koldioxid. Eftersom det organiska materialet i råslammet bryts ner är det behandlade röt-slammet nästintill luktfritt. I biogasanläggningen finns tre röt-kammare varav två är större med konstant slamnivå och en är mindre med varierande mängd slam. I biogasanläggningen finns även utrustning till energiåtervinning, uppvärmning och gashantering. Första röt-kammaren har en temperatur på 35°C, från att slammet cirkuleras genom en värmeväxlare där varmvatten värmer slammet. Den andra röt-kammaren får värme från slammet, från den första röt-kammaren. Från den andra röt-kammaren pumpas slammet till den mindre, tredje, röt-kammaren och sedan vidare till slamavvattningen. Den producerade rötgasen leds till Göteborg Energi, efter att ha tryckhållts i ett gassystem, där den uppgraderas till biogas.

Därefter pumpas slammet vidare till skruvpressarna där ytterligare vatten extraheras från slammet (Gryaab, u.d.d). I skruvpressarna avvattnas slammet och konsistensen börjar därefter likna fuktig jord med en vattenhalt på 70%. Processen består av fyra slamskruvpressar och rejektvattnet som fås av behandlingen filtrerar innan det leds tillbaka till efternitrikationen, biobäddarna, aktivslambassängerna eller blandas med dekantat från förtjockningen (Videbris, 2022).

När slammet sedan är färdigbehandlat består det av näringsämnen och mull (Gryaab, u.d.d). Det rötade slammets innehåll är signifikanta faktorer som behövs för att grödor ska kunna växa. Därför komposteras en del och en tredjedel hygieniseras genom långtidslagring för att används som gödsel på åkermark. Det behandlade röt-slammet används som gödsel på jordbruksmark eller för att tillverka anläggningsjord (Videbris, 2022). En del av slammet hygieniseras och komposteras med bland annat bark, flis och sand för att få olika kvaliteter av anläggningsjord medan en tredjedel långtidslagras för att användas som gödsel.

4.5.5 Kväveutvinning

Kväverensningsprocessen som beskrivits innan tar bort minst 70% från avloppsvattnet (Gryaab, u.d.a). Av detta hamnar ungefär 20 % av kvävet i slammet och resten släpps ut i atmosfären i form av kvävgas.

4.5.6 Fosforutvinning

Under 2021 renades 94,8%% av fosfor från vattnet på Ryaverket, som lagrades i slammet (Videbris, 2022). Det fanns 449 440 kg fosfor (ackumulerad mängd) i slammet. Mängden slam som producerades var 15 443 ton torrsbstans. 12 574 ton av den mängden godkändes av REVAQ, ett certifieringssystem vars syfte är bland annat att kvalitetssäkra slam, till att använda slammet som gödsel på åkermark. Det innebär att 81,4% av slammet användes som gödsel, och därmed återvanns ungefär 77% av fosfor till gödsel.

I Sveriges avloppsreningsverk används främst kemisk- och biologisk fällning vid hanteringen av fosfor i flytande form (Bahr & Kärrman, 2019). För båda metoderna finns det ett behov av ett mer utvecklat och effektivare system på grund av att det finns nackdelar med användningen av fällningskemikalier (Jansen, Särner, Tykesson, Jönsson, & Jönsson, 2009). Bland annat så har tillverkning och transport av kemikalierna en negativ påverkan på miljön. Fällningskemikalierna används i en stor utsträckning på grund av Sveriges höga krav på halten fosfor i renat avloppsvatten. Det krävs därför en optimerad metod där kemikalierna kan minskas markant eller i bästa fall uteslutas helt.

4.5.7 Cellulosautvinning

Av den information som är publicerad av Gryaab framkommer det att cellulosan idag separeras med mekanisk rening tillsammans med annat organiskt material för att sedan förbrännas eller hamna i slammet (Gryaab, u.d.a). I intervjun med Fredrik Christersson från Laholmsbuktens VA ABF nämns att återvinning av cellulosa är relevant även om det inte riktigt finns en lösning till det ännu (F. Christersson, personlig kommunikation, 8 april 2022). Det är däremot inget som prioriteras i framtidsarbetet idag, vilket ökar vikten av rapportens resultat för att hitta en lösning.

4.5.8 Energiutvinning

Biogasstationen på Gryaab behandlar den energirika biogasen som innehåller 60% metan och majoriteten av resterande är koldioxid. För att kunna producera så mycket biogas som möjligt så tar Gryaab även in fett- och matavfall från restauranger och matproducenter (Gryaab, u.d.d). På ett år produceras nästan 70 GWh biogas som sedan säljs till Göteborgs Energi, vilka uppgraderar innehållet till 95–98 % metan. Därefter komprimeras gasen och säljs som fordonsbränsle. Den biogas som produceras med hjälp av Gryaabs avloppsvatten årligen räcker för att driva upp till 5000 personbilar (Gryaab, 2020).

Efter att ha renat avloppsvattnet skickas en del till Göteborgs energis värmepumpsanläggning där värmeåtervinningen sker (Göteborgs energi AB, 2020). Enligt Gryaab's data har 486 GWh värme återvunnits år 2017 (Gryaab, 2018). Under 2017 förbrukade Gryaab 40,7 GWh el och 12,7 GWh värme. Med avseende på mängden biogasproduktion som sker i Gryaab och värmeåtervinningen i Göteborgs energi, kan man dra slutsatsen att Gryaab redan är självförsörjande ur energisynpunkt. Värmeåtervinningen som sker med hjälp av det renade avloppsvattnet som skickas från Gryaab försörjer upp till 55 000 hem i Göteborg (Gryaab, u.d.b).

Värmepumparna har en livslängd på minst 30 år (Göteborgs energi AB, 2020). Värmeenergin som återvinns från värmepumparna är cirka 3,3 gånger större än den energin som förbrukas för att driva dem. Värmeåtervinningen sker i Rya kraftvärmeverk som är cirka 9800 m² enligt Google maps. Hela anläggningen kostade 2,2 miljarder kronor inklusive installationer och bygganden och har verkningsgraden 92,5% totalt (Göteborgs Energi AB, u.d.) Gryaab's totala drift-och underhållskostnader kom upp till 353,9 mkr år 2020, där 46,4% utgörs av driftkostnader (Gryaab, 2020).

5 Resursutvinningstekniker

Effektiviseringen av resurser inom avloppsvattenhanteringen går att dela in i två delar (Westling, Kärrman, & Norström, u.d.). Den första av de två delarna innebär att optimera och effektivisera användningen av resurser som krävs vid rening av avloppsvatten. Den andra delen är att resurserna som återfinns i avloppsvattnet återvinns effektivt. Exempel på dessa delar i resurseffektiviseringen kan vara att hålla el- och kemikalieförbrukningen låg, öka produktionen av biogas samt att gasen som produceras används effektivt. Den resurseffektiva avloppsreningen möjliggör för både en mer holistisk resursoptimering av dagens reningsprocesser och implementering av nya reningstekniker och metoder. Detta genom att exempelvis, återanvända vatten som tekniskt vatten för produktion av dricksvatten eller till bevattning. I detta kapitel presenteras olika resursutvinningstekniker för kväve, fosfor, cellulosa och energi.

5.1 Kväve

Efter att avloppsvattnet renats släpps kvävet ut i luften, späds ut med andra ämnen, hamnar i grundvatten och/eller ytvattnet. Nedan kommer tre tekniker presenteras för att

möjliggöra kväveåtervinningen i Västsverige så att kvävet snabbare kan återgå direkt till jordbruket och/eller till användning för människan.

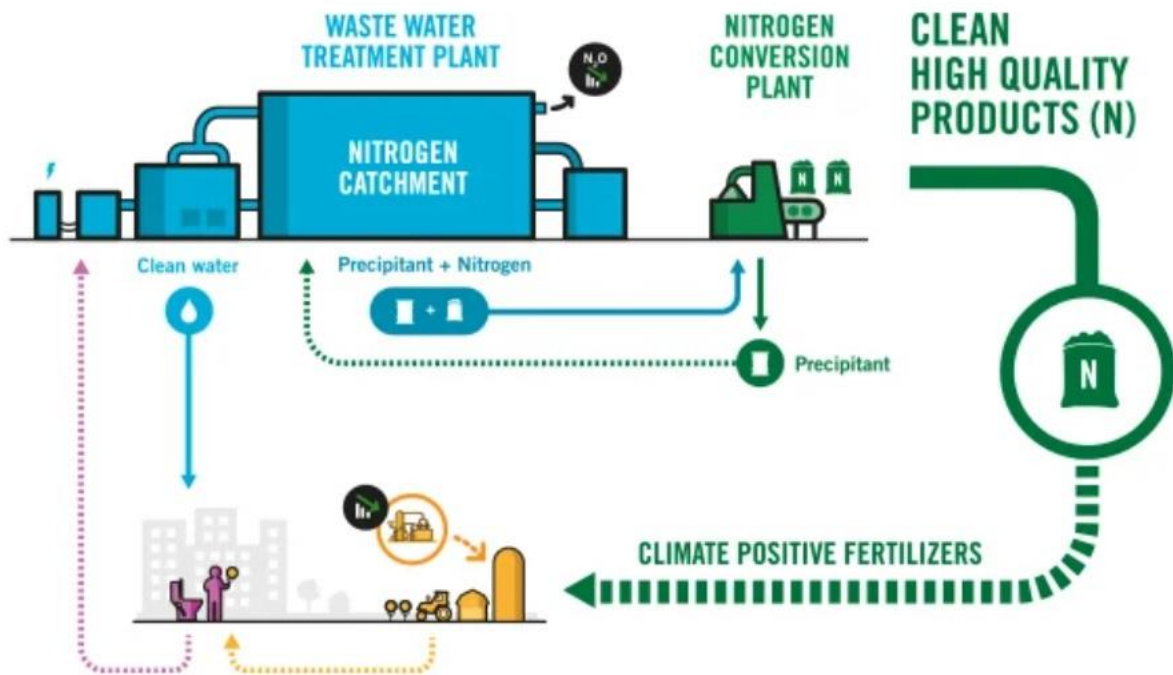
5.1.1 Återvinning av rejektivatten (ÅR)

För att öka återvinningen av kväve bör ett system för återvinning av rejektivatten byggas. När avloppsslammet avvattnas uppstår rejektivatten och i rejektivattnet finns mängder av kväve. Ett projekt som finansierats från EU är Ragn-Sells innovationsbolag EasyMining (EasyMining, 2021). Projektet går ut på att återvinna kväve ur rejektivatten. Idag är det ungefär 20 % av kvävet som återvinns från reningsverken och med EasyMinings metod ska det återvinnas dubbelt så mycket kväve. EasyMinings metod för att återvinna kväve bygger på en kemisk process, till skillnad från dagens reningsverk där biologiska processer används. Det går till så att kvävet behandlas med ett sorptionsmedel och separeras från avloppsvattnet. I det andra steget av renings- och återvinningsprocessen fångas kväveföreningarna in i en omvandlingsanläggning och blir i fastform (EasyMining, 2021). Kvävet kristalliseras och fälls ut. Sorptionsmedlet förnyas för att återanvändas. Processen består av flera på varandra följande kemiska reaktioner utförda vid förhöjd temperatur. Fredrik Christersson, jobbar för Laholms reningsverk och tidigare 22 år i konsultbranschen nämnde även i en intervju att ett bra sätt att återvinna kväve hade varit genom rejektivatten och tipsade om EasyMinings metod (F. Christersson, personlig kommunikation, 8 april 2022). *Figur 2* visar processen för EasyMining metod för återvinning av kväve genom rejektivatten. När rejektivattnet behandlats bildas rent kväve med hög kvalitet (*clean high quality products (N)*) som sedan skickas till jordbruket.

I Schweiz finns en fullskalig anläggning på ARV Yverdon för att återvinna kväve från rejektivattnet och en liknande på ARV Altenrhein som startade upp 2020 (Kärrman, Anderzén, von Bahr, Berg, & Nilsson, 2019). Tekniken som används här medför en reduktion av dikväveoxid-utsläpp från det biologiska reningssteget och i Schweiz fås dessutom en ekonomisk kompensation om man gör dessa åtgärder och minskar klimatpåverkan.

Även i Norge finns ett bolag vid namn VEAS som också återvinner kväve från rejektivattnet, däremot görs det via ammoniakstripping. I kapitel 9.1.1.2 *Ammoniakstripping* beskrivs det närmare.

Figur 2. Beskrivande bild av EasyMinings project (EasyMining, 2021). Återgiven med tillstånd.



Kommentar. Från *Project Nitrogen*, av EasyMining, 2021. Återgiven med tillstånd.

5.1.1.1 Struvit

Struvit, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, är ett svårlösligt salt som kan utfällas spontant i olika delar av ett avloppsreningsverk, exempelvis i rör och pumpar (Nayström, 2017). Struvit kan även utfällas avsiktligt ur rejektivattnet och följden blir att problemet med spontan utfällning minskar.

Struvitfällning är i övrigt mest lämpat för återvinning av fosfor men även kväve har återvunnits ur struvit i Helsingborg under tidsbegränsade perioder med lyckade resultat. I struvit är viktförhållandet ca 2:1 mellan kväve och fosfor och på grund av dess innehåll kan det användas som gödningsmedel (Nayström, 2017). Struvit har betydligt lägre halter av tungmetaller och föroreningar än mineralgödsel och är därför ett relativt rent gödningsmedel. När struvit fälls ur rejektivatten fälls en stor del av fosfatet men endast 10 % av kväveföreningarna. Det innebär att resterande kväveföreningar återförs till reningsprocessen som en internbelastning och är en stor del av avloppsreningsverkets kvävebelastning. Om utfällning av struvit i rejektivattnet hade skett mer skulle det bli en minskad internbelastning, minskat behov av kväverening och skapa en näringsrik gödselprodukt. För att mer kväveföreningar från rejektivattnet ska bindas till struvitmolekylerna krävs en ammoniakutvinning via recirkulation av newberyite, som är

resterna av struvitmolekylen. Därefter kan ammoniak sedan utvinnas från struvitmolekylerna. Om struvitkristallerna värms kan ammoniumet i molekylen avges som en vattenlös ammoniak för att sedan ersätta fossilbaserad ammoniak i kvävegödseltillverkningen (Nayström, 2017).

5.1.1.2 Ammoniakstripping

VEAS är ett stort kommunalt reningsverk för avloppsvatten i Oslo. Där återvinns 12–15 % av kvävet som kommer in till anläggningen (Circulary, 2017). Kvävet återvinns genom att avloppsvattnet först går igenom anaerob rötning, kalkkonditionering och filterpressning. Därefter kommer ammoniakstripping och efterföljande infångning av ammoniakgasen med en koncentrerad salpetersyralösning. Denna strippnings- och skrubbningsbehandling ger ett industriellt återanvändbart ammoniumnitrat som säljs vidare och används vid produktion av mineralgödsel. Ammoniakstripping är till för att reducera ammoniumhalten i vatten och är en kemisk-fysikalisk metod (Stenström, o.a., 2017). Det går till så att pH i vattnet höjs till 10,8–11,5 och därefter pumpas vattnet till ett strippingtorn för att strilas ovanifrån över ett plastmaterial med stor yta. Inifrån kommer luft och blåser på vatten underifrån för att driva bort ammoniaken från vattnet. Ammoniaken som drivits bort absorberas och bildar ammoniumsulfat eller ammoniumnitrat. Den kemiska delen är pH-justeringen medan den fysikaliska är strippingtornet. Avskiljningen av ammoniak i strippingtornet beror på luftflödet. Vid försök på Ryaverket i Göteborg gav ett luftflöde på 3000 m³ luft/m³ rejektivatten en avskiljningsgrad av ammoniak på 64 % medan 3500 m³ luft/m³ ökade avskiljningsgraden till 82 % (Stenström, o.a., 2017). I Ellinge fanns en ammoniakstrippningsanläggning men den lades ned, främst pga. höga drift- och underhållskostnader.

5.1.2 Alger (A)

En andra teknik för att återvinna kväve i avloppsvatten är alger. Det är en teknik som är på väg att utvecklas och hittills har ett par studier av den här typen genomförts. Alger har visat stor potential för att minska kväveinnehållet på inkommande vatten i ett avloppsverk. Ett projekt gjordes i Umeåregionen där alger odlades på kommunalt avloppsvatten med positiva resultat. Efter att alger hade odlats i avloppsvattnet så minskade kvävet med 40 % efter fem dagar i odling och med 95 % efter 12 dagar i odling (Rylander & Wiqvist, 2009).

På Vasa energiinstitut genomförs ett projekt för algodling i avloppsvatten som fått EU-finansiering på sammanlagt 2,2 miljoner euro (Brink, 2016). Denna studie görs genom att kombinera sötvattenmikroalger som övervintrar i pilotskaliga fotobioreaktorer med konstgjord rening av avloppsvatten (Zhu, o.a., 2014). Det utformades en mixotrofisk kultur med tillsatser av ättiksyra, för att reglera pH-värdet, och algodling. Resultaten visade att vid användning av ättiksyra tre gånger om dagen kunde kvävehalterna sänkas med upp till 92 %. Alltså visar studien att odling av mikroalger och pH-justering med ättiksyra är effektivt under vinterperioden för minskning av näringsämnen.

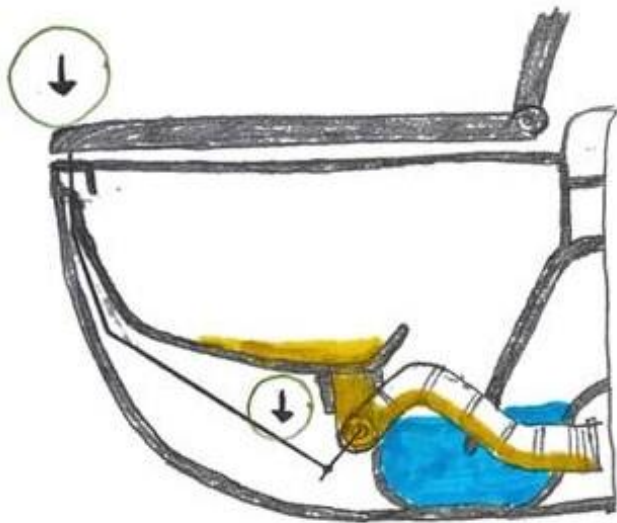
Mikroalger som odlas i avloppsvatten förbättrar vattenkvalitén och förbrukar betydligt mindre färskvatten (Zhu, o.a., 2014). Detta beror på att inga eller begränsade mängder kemiska gödningsmedel måste appliceras på reningssystemet. Mikroalger har även beskrivits som en av den mest lovande råvaran för produktion av biobränsle. När alger odlas uppstår en biomassa som går att använda vid produktion av bioenergi, användas som gödsel eller som massa för landskapsarkitektur. Det kan till och med användas som produktion av näringsämnen eller läkemedel om rena ursprungsämnen används. Alger är dessutom experter på att ta upp tungmetaller och är minst lika bra på att reducera fosfor som kväve. För att odla alger kan avloppsvatten användas och förutom att vattnet används för själva odlingen så kan även algproduktionen rena avloppsvattnet. En till fördel är att slammet skulle kunna transporteras genom rörledningarna, då forskare tror att slammet får en smidigare rörlighet på grund av oljorna som finns i algerna. Ur ett hållbarhetsperspektiv hade lösningen varit passande då slammet undviker transporteras längs vägarna. I intervjun med Christersson nämner han att rening/återvinning med hjälp av alger kan ta stor plats och passar därför ett mindre reningsverk (F. Christersson, personlig kommunikation, 8 april 2022).

5.1.3 Separerade system: separera urin direkt vid toaletten (SS)

Ett annat alternativ för att öka återvinningen av kväve är att separera urinen i toaletten från spolvatten och avföring. I toalettvattnet utgör urinen idag ca 85 % av det utsöndrade kvävet (Sweden water research, 2017). Sweden water research gjorde ett projekt mellan 2017 och 2018 där urinen avleds i toaletten för att inte blandas med spolvatten. När urinen separerats leds det till en torkningskammare där biokol utnyttjas som torkmedium och ventilationsluft från fastigheten utnyttjas som värmekälla. Slutprodukten bildas i form av ett pulver och hämtas ett par gånger per år. Målet för projektet är att bilda ett kommersiellt användbart gödselmedel med ett kväveinnehåll på 20 %.

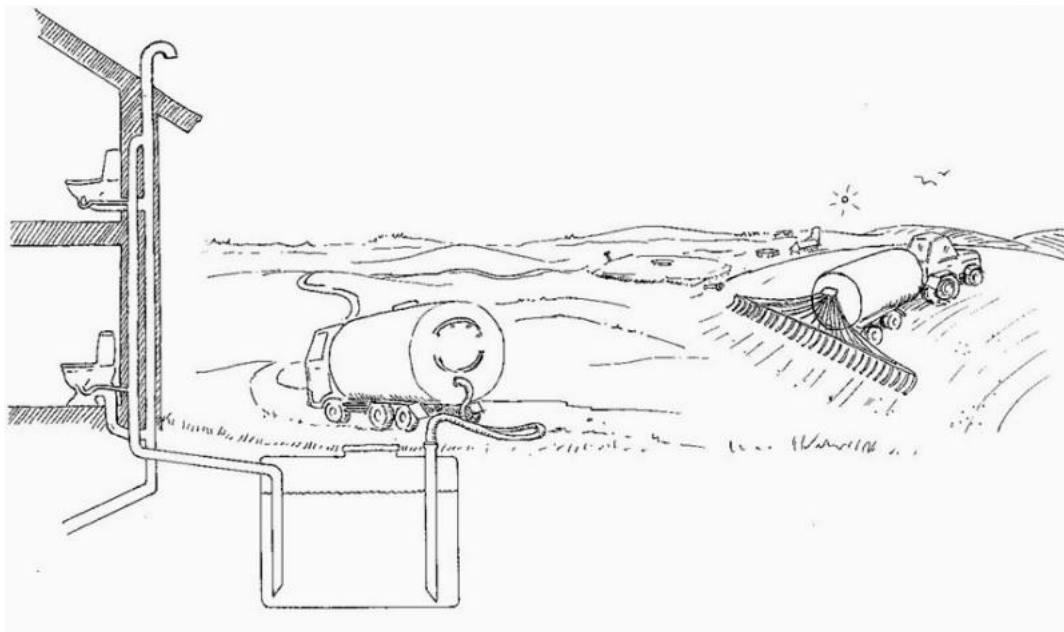
I *figur 3* visas ett exempel på hur en toalett kan se ut för att separera urin från toalettvattnet. Det främre facket används för urin och det bakre facket för fekalier och papper. När det bakre facket spolas så stängs det främre facket med en ventil (Larsen, o.a., 2001). Dessa existerar redan på vissa ställen i Sverige. Urinen samlas sedan i stora tankar som töms i olika perioder av lokala bönder som sprider urinen direkt på sina fält. I *figur 4* visas hur ett hanteringssystem för återföring av urin kan se ut (Degaardt, 2004).

Figur 3. Ett exempel på hur en toalett kan se ut som separerar urin.



Kommentar. Pilarna symboliserar ventilen.

Figur 4. Hanteringssystem för återföring av urin.



Kommentar. Från Humanurin till åkermark och grönytor – avsättning och organisation i Göteborgsområdet, av Susanna Degaardt, 2004. Återgiven med tillstånd.

Att separera urin i toaletten har funnits i flera decennier ute på landsbygden i vissa delar av Sverige och för att tillämpa det i stadsområden uppstår en rad tekniska och organisationsproblem (Larsen, Udert, & Leinert, Source separation and decentralization for wastewater management, 2013). Vid utvecklande av ett nytt avloppssystem måste det finnas medvetenhet om att det inte är en ny liten toalett eller ett reningsverk, snarare en utveckling av en helt ny infrastruktur. Detta gäller inte bara kväve utan även resurserna fosfor, cellulosa och energi. Faktorer som måste samverka är juridiska krav, handelsregler, teknik, organisationer för konstruktioner och drift, arkitekter, allmänheten, acceptans av ingenjörer och ekonomisk konkurrenskraft med alternativa tekniker. Dagens avloppsvattensystem tog över 100 år att få till och det är fortfarande inte perfekt, men faktum är att just nu syns en snabb övergång i miljöingenjörernas gemenskap och därför borde ett nytt system endast ta några decennier att få igenom. Med tanke på den snabba befolkningstillväxten, vattenbrist och i många delar dålig sanitet så bör denna sektor prioriteras.

Att bygga ett helt nytt avloppssystem kräver mycket jobb och är kostsamt. Lokal återvinning för avloppsvatten är ofta mer lämpligt. Problemet med lokalt avloppsvattensystem är att avloppssystem kräver stora mängder vatten och i snabbt växande städer kan ledningarna snabbt överbelastas efter kort tid (Larsen, Udert, &

Leinert, Source separation and decentralization for wastewater management, 2013). Tre stora tekniska aspekter som kommer uppstå vid förändring av avloppsvatteninfrastruktur är:

- Transport av vatten, föroreningar och rester
- Behandlingsprocessutveckling, drift och uppföljning
- Övergång från tidigare systemdesign till ny design

5.1.3.1 Transport av vatten, föroreningar och rester

Det krävs transport av stora mängder avloppsvatten över längre avstånd om reningen ska ske mer centralt. Varje år transporteras över 100 ton avloppsvatten per person flera kilometer, avloppsvattnet är beroende av stora avloppssystem som utvecklats i flera decennier och ska fungera i alla scenarion (Larsen, Udert, & Leinert, Source separation and decentralization for wastewater management, 2013). Dessutom skapas avfallsströmmar som kan orsaka nya problem, exempelvis fjällning av urin eller att vissa koncentrerade vätskor, urin i det här fallet, måste transporteras ineffektivt där mycket kväve går miste om på grund av för mycket kontakt med luft. Att minska volymen och vikten är därför av största prioritet för att utveckla ett effektivt transportsystem för lokal avfallshantering. Att lyckas använda alla rester i lokala och moderna storstäder är svårt. Det skulle kunna vara möjligt om avloppssystemet skulle producera torra rester, som beskrevs i exemplet ovan. Sedan kunde de torra resterna samlas in tillsammans med exempelvis dagens återvinning för sopor, då skulle möjligheten för återvinning av näringsämnen vara större i lokala storstäder som Göteborg i Västra Götaland. Men transport av färsk urin från toaletten skulle endast klara av korta avstånd. Därför krävs lämpliga insamlingssystem och standardlösningar som för Sveriges matfalls- och återvinningshantering. Trots att det skulle vara möjligt så blir hygien fortfarande ett problem, resterna måste vara mer eller mindre luktfria.

5.1.3.2 Behandlingsprocessutveckling, drift och uppföljning

I mindre avfallsbehandlingsystem/avloppssystem så kan belastningsvariationen vara extrem och i vissa fall påverka systemets prestation. En längre frånvaro av belastning (semesterperioder), korta extrema användningsperioder (hemmafester) eller dumpning av medicin kan påverka behandlingsprocessen (Larsen, Udert, & Leinert, Source separation and decentralization for wastewater management, 2013). Utformningen av dessa system måste därför vara själv Anpassande. Driften av denna teknik kräver intelligent forskning

och lång tid för utveckling och uppföljning. Exempelvis moderna bilar är komplexa maskiner som använts dagligen och tillhandahåller pålitlig och bekväm service. Denna effektiva användning beror på infrastrukturen, vägar, bilhandlare, bensinstationer, försäkringsbolag osv. Det är möjligheterna som erbjuds av sensorer, data, överföring och så vidare som tillåter utvecklingen av lokala separerade system.

5.1.3.3 Övergång från tidigare systemdesign till ny design

När det börjades övervägas om separerade avloppssystem i mitten på nittioalet var huvudsakliga förslaget att urinen skulle samlas i huset och tömmas under natten (Larsen, Udert, & Leinert, Source separation and decentralization for wastewater management, 2013). Idéerna har sedan dess utökats för att utnyttja och ta vara på resurserna i avloppsvattnet. Även många idéer för installation av så kallade "NoMix-toaletter" har presenterats men det är fortfarande en svår industri att få dessa sålda då verksamheten fortfarande är riskabel. Hittills finns bara pilotprojekt och för att övertyga konsumenterna behövs större och mer övertygande projekt. En av dessa utvecklingar pågår i Sydafrika där urinseparation och urinbehandling undersöks i stor skala, nästan stadsövergripande skala med stöd från staden och Bill Gates Foundation.

Avloppstekniker har utvecklats i mer än 100 år och av många olika generationer för att hela tiden förbättra dagens standard. Det kommer inte bli perfektion på en gång, det kommer ta tid och kräva evolutionär utveckling. Idag ser vi olika scenarion från övergång från redan existerande avloppssystem till ett potentiellt framtida system som kan domineras av separerade system. I industrialiserade miljöer där tillväxten av städer är långsam, renovering av redan existerande avloppssystem krävs och anpassning till nya miljökrav blir för stor går det att direkt börja med införande av separerade system (Larsen, Udert, & Leinert, Source separation and decentralization for wastewater management, 2013). Det kommer i sin tur minska belastningen på befintliga reningsverk och kontinuerligt utökas när det äldre systemet förfaller. Avloppen som redan finns kan användas för att transportera det behandlade avloppsvattnet. Under livscykeln för det redan existerande system kommer ett sådant tillvägagångssätt leda till helt ny teknologi baserad på separerade avloppssystem. I miljöer som snabbt industrialiseras växer städerna mycket snabbt och ofta i form av stora nybyggnationer. Här kommer det befintliga avloppssystemet mestadels överbelastas och det kommer vara fördelaktigt med ny utveckling speciellt avloppstekniker. Den förväntade expansionen för sådan teknik kommer möjliggöra snabbare anpassning med högsta möjliga standard och införande av

flera bekväma lösningar under utveckling. I U-länder är arbetskraft fortfarande billig och kan användas för att bygga avloppsinfrastruktur, det öppnar upp för nya möjligheter. Här kommer hela avloppssystemet utvecklas och prioritering av hygien, rent vatten och skydd av lokala vattenresurser.

5.2 Fosfor

Det finns olika sätt att utvinna fosfor på. I följande avsnitt kommer tre möjliga tekniker för fosforutvinning från avloppsvatten att presenteras.

5.2.1 Modifierade membranbioreaktorer (MBR)

Membranbioreaktor, MBR, är en beprövad teknik som många länder använder. (Andersson, o.a., 2017). Tekniken använder membranseparation för att rena vatten (IVL Svenska Miljöinstitutet, u.d.). Membranbioreaktorer kan kombineras med andra tekniker för att uppnå mål som till exempel näringsutvinning, däribland fosforutvinning (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). Membranet i en membranbioreaktor har en porstorlek mellan 0,02 till 0,4 mikrometer och skiljer slammet från vattnet som ska renas (IVL Svenska Miljöinstitutet, u.d.). MBR kan ersätta delarna sedimentering, som använder gravitationen för att separera slammet från vattnet, och filtrering i det konventionella reningssystemet. Membranseparation ger en högre slamhalt än sedimentering, vilket renar vattnet bättre. I jämförelse med CAS-UF (Conventional activated sludge – ultrafiltration), som använder aktivslam följt av ultrafiltration, tar MBR mindre plats i reningsverket. Vattnet som erhålls från MBR är fritt från parasiter, bakterier och partiklar. MBR är dock energikrävande och komplex. Den har även ett behov av extra kemikaliehantering. Kostnaden för MBR kan vara mindre än den för CAS. Kostnader för membranerna är höga men kan kompenseras genom att ha billigare konstruktion. Membranerna har uppskattningsvis en livslängd på 10 år vid bra skötsel, men förstörs snabbt när den utsätts för exempelvis kemisk rengöring eller partiklar som orsakar slitning. Energiförbrukningen för MBR är, i bästa fall, ungefär $0,5 \text{ kWh/m}^3$ där 30-50% går åt för att rengöra membranerna. För CAS-UF ligger den på $0,2 \text{ till } 0,3 \text{ kWh/m}^3$ och där är det ultrafiltrationen som kräver mycket energi.

Det finns flera faktorer som måste tas hänsyn till vid implementering av MBR som vattenreningsteknik (IVL Svenska Miljöinstitutet, u.d.). Det ska dimensioneras korrekt för att minska risken för bräddning och överbelastning. Vid för hög belastning minskar kapaciteten för vattenreningen. Det är även viktigt att förbehandlingen innan MBR

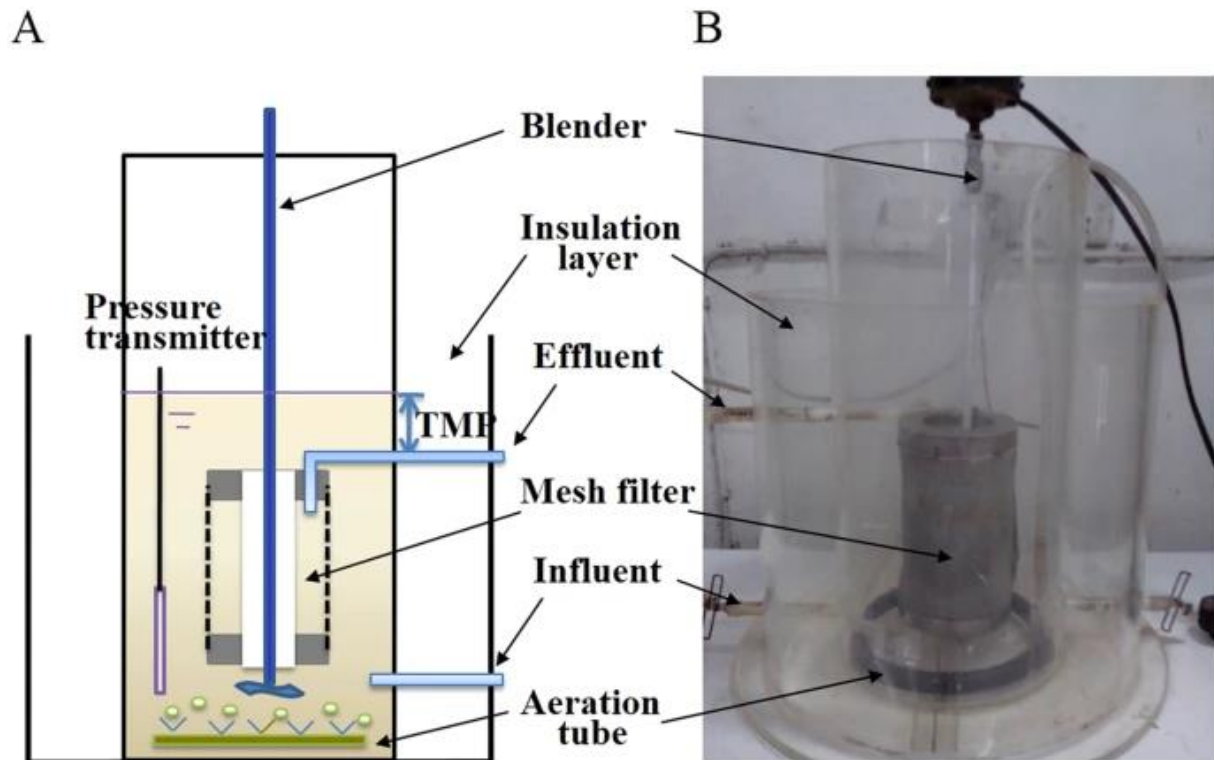
fungerar bra för att större material såsom hår och plastbitar inte kommer in i MBR. En faktor som kan bli ett stort problem är membranfouling. Membranfouling är samlingen av suspenderat material som fastnar på membranet eller i membranporerna. Detta påverkar kapaciteten, effektiviteten och även energiförbrukningen. Systemet kräver mycket energi men det finns många delar i det som kan förbättras, till exempel kemisk rengöring, processparametrar och mekanisk rengöring.

Membranbioreaktorer är en teknik som fått mer uppmärksamhet den senaste tiden. Denna teknik är relativt ny i Sverige och det har funnits några pilotförsök med membranbioreaktorer i Sverige (Hammarby Sjöstadswerk, u.d.). Ett av dem genomfördes på Hammarby Sjöstadswerk. Detta projekt visade att MBR-tekniken går att klara framtida utsläppskrav och även reducera användningen av resurser och kemikalier (VA Mälardalen, 2020). Man beslutade att satsa på utvecklingen av Henriksdals avloppsreningsverket med MBR-tekniken (Stockholm Vatten och Avfall, u.d.b). Det kommer vara ett av världens största reningsverk som använder tekniken. Idag tar reningsverket hand om avloppsvatten från 780 000 personer (Stockholm Vatten och Avfall, u.d.a). Moderniseringen av reningsverket beräknas fördubbla kapaciteten samtidigt som det minskar på utsläppen. Fosforavskiljningen i biosteget med MBR beräknas vara 96% (Andersson, o.a., 2021). Reningsverket planeras bli klar 2029.

5.2.1.1 Intermittent luftad membranbioreaktor – ett modifierat MBR-system

Tidigare studier har visat att det är möjligt att avskilja fosfor, kol, och kväve samtidigt genom att koppla luftad membranbioreaktor med anoxiska och/eller anaerobiska processer (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). Men detta komplicerar systemet då processerna kopplas till enskilda membranbioreaktorer i följd. På Shandong University i Kina har man undersökt hur man effektivt kan både avlägsna kol och kväve, och återvinna fosfor (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). I undersökningen utvecklades ett integrerat system med en luftad membranbioreaktor för att ta bort kol och kväve, som sedan följs av fosforåtervinning från slam. I studien konstruerades en liten membranbioreaktor med ett rörformat membranfilter av rostfritt stål, se *figur 5*. I botten på reaktorn installerades en mikroporös slang som hade till uppgift att lufta systemet med små luftbubblor. En omrörare sattes under membranet för att kunna blanda vattnet under de perioder då det inte luftas.

Figur 5. A) Schematisk figur på intermittent MBR-system. B) Bild på intermittent MBR-system.



Kommentar. Från *Simultaneous effective carbon and nitrogen removals and phosphorus recovery in an intermittently aerated membrane bioreactor integrated system [Figur]*, av Wang et al., 2015. CC BY 4.0.

Under undersökningen tillfördes avloppsvatten konstant i systemet och systemet växades mellan anaerobiska och anoxiska omständigheter genom att slå av/på luftningen (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). Detta ledde till flera biokemiska reaktioner, bland annat nitrifikation och denitrifikation. Även fosforupptagning/-frisläppning av mikroorganismer. Syremättnad och pH-värdet i vattnet varierade med växlingen av luftningen. Förändringen av pH underlättade fosfatutfällningen från slammet.

Hur mycket fosfor som kunde avskiljas från vattnet påverkades av inflödande fosforkoncentration, hydraulisk retentionstid samt slammets tillstånd (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). I det första försöket med en lägre inflödande fosforkoncentration på 6,7 mg/L var kunde det avlägsnas $66,4 \pm 19,2$ % fosfor. I det andra försöket, med en inflödande fosforkoncentration på 12 mg/L var andelen $45,1 \pm 11,5$ %. Under det tredje försöket minskades den andelen ytterligare och det aktiva slammets fosforupptagningsförmåga tappades nästan helt, vilket visar mättnaden för fosforupptaget i slammet. Tabellen nedan visar resultatet på experimentet, *se tabell 4*. Slammet togs sedan ut från membranbioreaktorn för att frigöra fosfor från slammet. Slammets förmåga att ta upp fosfor blev därefter delvis återhämtad. Systemet kunde fortfarande i hög grad avlägsna

kol och kväve efter att slammet lades tillbaka i membranreaktorn. Slutsatsen att dra från detta är att det går att återanvända det fosforrika slammet i en intermittent luftad membranbioreaktor.

Tabell 4. Resultatet på experimentet. Inflödet, utflödet och avskiljningseffektivitet för respektive ämne redovisas. Tabellen visar de genomsnittliga värdena som erhöles under varje period.

| Run | Operation time (day) | HRT (h) | Inflow (mg/L) | | | Effluent (mg/L) | | | Removal efficiency (%) | | |
|-----|----------------------|---------|---------------|------------|------------|-----------------|-----------|-----------|------------------------|------------|-------------|
| | | | COD | TN | TP | COD | TN | TP | COD | TN | TP |
| 1 | 1–18 | 8 | 330.2 ± 29.2 | 28.8 ± 5.8 | 6.7 ± 1.1 | 18.3 ± 7.6 | 1.8 ± 1.5 | 2.2 ± 1.1 | 94.4 ± 2.3 | 93.6 ± 5.5 | 66.4 ± 19.2 |
| 2 | 19–28 | 8 | 290.0 ± 33.1 | 27.6 ± 3.4 | 12.1 ± 0.5 | 17.6 ± 9.7 | 2.2 ± 1.5 | 6.7 ± 1.4 | 93.8 ± 3.4 | 92.2 ± 5.6 | 45.1 ± 11.5 |
| 3 | 29–43 | 6 | 316.7 ± 36.7 | 27.6 ± 2.9 | 11.7 ± 1.3 | 19.2 ± 7.2 | 1.2 ± 1.2 | 9.6 ± 4.8 | 94.0 ± 1.8 | 94.2 ± 8.6 | 20.4 ± 38.5 |
| 4 | 44–58 | 6 | 318.0 ± 27.6 | 28.7 ± 2.2 | 11.9 ± 0.7 | 15.8 ± 9.6 | 1.1 ± 0.7 | 5.0 ± 3.1 | 95.0 ± 1.7 | 96.0 ± 2.7 | 58.3 ± 25.6 |

Kommentar. Från *Simultaneous effective carbon and nitrogen removals and phosphorus recovery in an intermittently aerated membrane bioreactor integrated system* [Tabell], av Wang et al., 2015. CC BY 4.0.

Att växla mellan anaerobiska och anoxiska processer i membranbioreaktorn medförde en ökad aktivitet av polyfosfatackumulerande organismer, nitrifierande och denitrifierande bakterier (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). Den höga mikrobiella aktiviteten kunde i sin tur förbättra processen för avlägsnandet av näringsämnen. Membranet i systemet kunde hålla kvar slammet, vilket också bidrog till en högre mikrobiell aktivitet.

Användningen av stålmembran, istället för mikro- eller ultrafilter, minskar kostnader och främjar implementering och användning av denna teknik (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). Till skillnad från den konventionella membranbioreaktorn, kan energianvändningen i detta system minskas då behandlingen av membranfouling och behovet av dränering reduceras.

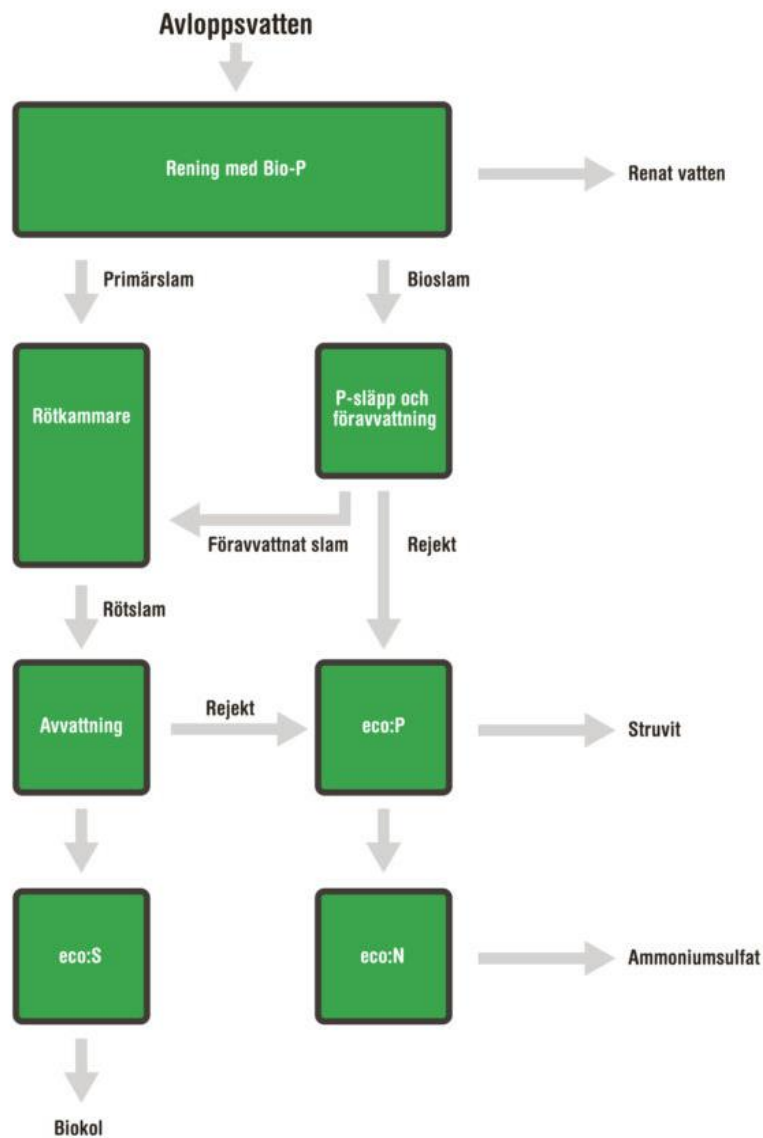
Studien visar att detta system kunde i genomsnitt avlägsna $53,3 \pm 29,7\%$ av den totala fosformängden (Wang, Pan, Geng, & Sheng, 2015). Den avlägsnade fosfor lagrades i slammet och $68,7\%$ av den andelen kunde utvinnas i form av fosfatlösning. Fosfatkoncentrationen i lösningen var 3000% högre än fosfatkoncentrationen i avloppsvattnet. I ett reningsverk som behandlar $50\,000\ m^3$ avloppsvatten per dag med ett inflödande av fosfor på $10\ mg/L$ skulle $267\ kg$ fosfor avlägsnas från avloppsvattnet per dag. Ungefär $200\ kg$ fosfor i form av högkoncentrerad fosfatlösning skulle erhållas per dag.

5.2.2 Eco:P (EP)

EkoBalans är ett företag vars fokus är att återanvända de stora mängder fosfor och kväve som finns i avloppsreningsverkens restflöden (EkoBalans, u.d.a). Grundaren, Gunnar Thelin, vill uppmärksamma RWRP - Resource Water Recycling Plan istället för det konventionella WWTP - Waste Water Treatment Plant (Bahr & Hey, 2018). Syftet med detta är att se avloppsvattnet från ett hållbart perspektiv. Han anser att det är viktigt att se det som ett flöde av resurser man kan återvinna och inte avfall som måste hanteras. Med detta som bakgrund arbetar man på EkoBalans med olika lösningar i syfte att recirkulera växtnäring från existerande reningsverk (EkoBalans, u.d.b). EkoBalans presenterar processerna Eco:P, Eco:N och Eco:S som producerar fosfor i form av struvit, kväve i form av ammoniumsulfat och slambiotokol. Dessa tre processer inkorporeras i ett befintligt avloppssystem som använder sig av biologisk fosforfällning. Målet med processerna är att skapa gödslings- och jordförbättringsprodukter som kombinerats av fosfor, kvävet och slambiotokolen som utvinns, *se figur 6*. Resultatet är en optimerad och ren kretsloppsgödsel utan oönskade ämnen och metaller (Bahr & Kärrman, 2019). Detta ska ersätta de traditionella restprodukterna som kan innehålla tungmetaller och organiska föroreningar (EkoBalans, u.d.a). Utöver detta så erbjuder verksamheten kompletta koncept som bland annat innefattar förstudier, pilotskalanläggningar till förädling och marknadssättning av produkter.

Eco:P är en av de tre processerna vars teknologi gör det möjligt att utvinna majoriteten av all fosfor i avloppsvattnet (EkoBalans, u.d.b). Fosfor i form av struvit utvinns genom tillsättning av magnesiumsalt, $MgCl_2$, i en process med kort uppehållstid (EkoBalans, u.d.c). För att utvinna struvit krävs det att fosfor finns i vattenfas vilket är orsaken till att processen passar bäst med biologisk fosforfällning (Bahr & Kärrman, 2019). Vid användning av biologisk fällning kan avloppsreningsverken utvinna en högre mängd fosfor då andelen fosfor i det inkommande vattnet är högre än vad det är vid kemisk fosforrening. Tekniken går ut på att separera fosfor ur rejektivattnet från föravvattnat överskottsslam samt från rötat och avvattat slam (EkoBalans, u.d.b). Slamavvattning innebär en minskning av vattenhalten i slammet som gör det möjligt att vidarebehandla slammet (Baresel, Lüdtke, Levlin, Fortkamp, & Ekengren, 2014)

Figur 6. Figuren illustrerar ett reningsverk med processerna Eco:P, Eco:N och Eco:S



Kommentar. Från *Växtnäring från reningsverk*, av Ekobalans, u.d. Återgiven med tillstånd.

Mellan 2012–2014 har processen provats på NSVA Öresundverket och visat på stor framgång (Bahr & Kärrman, 2019). Trots goda resultat togs beslutet att upphöra Eco:P eftersom man ville fortsätta med slamspridning som var REVAQ-certifierat. Certifieringssystemet jobbar bland annat med att optimera slamkvaliteten för en hållbar återföring av växtnäring (Svenskt Vatten, 2020). Detta gör de genom att sätta krav för slamspringning på åkermark. Ett av dessa krav är kadmium-fosforkvoten på 17 mg Cd/kg P som innebär att maximalt 17 mg kadmium får föras till åkermarken för varje kg fosfor. Kravet på kadmium, Cd, beror på att det är ett grundämne som kan vara skadligt för organismer vid höga halter (Svenskt Vatten, 2022). Då fosfor utvinns i form av struvit

kan kadmium-fosforkvoten överstiga kravet för vad som är tillåtet enligt REVAQ. Detta var anledningen till att NSVA tog beslutet om att häva användningen av processen med Eco:P (Bahr & Kärrman, 2019).

Mathias Zessner, expert på olika utvinningstekniker för fosfor, har studerat olika tekniker och sedan jämfört dem (Bahr & Hey, 2018). Detta bidrog till att han kunde urskilja övergripande tendenser för processer med utvinning ur rejektivatten, avvattnat slam samt slamaska. Eco:P innefattas i processer med fosforutvinning från rejektivatten. Dessa processer beskriver Zessner generellt som relativt enkla att införa samt att dess teknik är etablerad. Vidare nämner han att det kan finnas en begränsad återvinnings-potential för fosfor som finns löst i vattnet.

Enligt Thelin är Eco:P utvecklad för mycket koncentrerade flöden med fosfor på över 70 mg/l som t.ex. slamavvattningsrejekt på reningsverk med biologisk fosforrening (G. Thelin, personlig kommunikation, 5 maj 2022). Tekniken har en brukstid på minst 20 år men kan drivas längre än så om man byter ut uttjänta pumpar och andra tekniska detaljer. Thelin menar att energin som krävs för att bedriva den är mycket liten och kräver ett underhåll på 1–2 dagar/halvår. Beroende på storleken av anläggningen varierar kostnaden för investering i tekniken. Kostnaden ligger på ca 4 000 000 kronor. Beroende på fosforkoncentrationen kan över 95 % avskiljas och av detta kan all utvunnen fosfor användas i produktion av gödselmedel.

Vidare påstår Thelin att det inte krävs extra personal för hantering av tekniken då det räcker med en dags utbildning för befintlig driftpersonal på reningsverken (G. Thelin, personlig kommunikation, 5 maj 2022). Eftersom tekniken kräver biologisk fosforrening behöver avloppsreningsverken med kemisk fosforrening ställas om för att kunna använda Eco:P. Detta har positiva effekter som sänkta kemikaliekostnader, mindre slamhantering då inget kemslam bildas, ökad biogasproduktion och minskat behov av uppvärmning av rötchammare. Intäkterna från såld struvit menar Thelin ska ses som en bonus då det inte är tillräckligt för att bekosta driften. Beräkningar som utförts för Lunds reningsverk påvisar att det är lönsamt med denna omställning trots att ingen vinst görs från såld struvit.

5.2.3 Tre rör ut (TRU)

Idag finns det olika projekt kring avloppsvatten som fokuserar på att separera toalettavatten från spillvatten och hushåll. Ett av dessa som kan utvinna fosfor är Tre rör

ut. I Tre rör ut byggs ett nytt avloppssystem i Helsingborg (NSVA, 2021). Projektet genomförs i Oceanhamnen som är en ny stadsdel, där det byggs med fokus på hållbarhet. I Oceanhamnen kommer det byggas 350 bostäder och tre kontorsbyggnader (Helsingborg stad, 2021). Detta projekt testar en ny teknik som källsorterar avloppsvatten (NSVA, 2021). Målet med detta nya avloppssystem är att öka produktionen av biogas, återvinna näringsämnen samt reducera på energianvändningen för läkemedelsrening. I stadsdelen kommer tre avloppsledningar att byggas. En ledning för toalettavatten (svartvatten), en för dusch- och tvättvatten (gråvatten), samt en för matavfall. Det kommer även installeras vakuumtoaletter som effektivt hanterar svartvatten och matavfallsquarn. Vakuumtoaletterna minskar även mängden vatten som behövs för att spola toaletter. Ledningarna ansluts till RecoLab-anläggningen som ligger nära Helsingborgs avloppsreningsverk. I anläggningen kommer näringsämnen såsom fosfor, och organiskt material att samlas upp som sedan används för att producera godkänt biogödsel och biogas. Från gråvattenströmmen kan anläggningen samla upp energi, i form av värme, som kan användas till att värma upp hem. Resten av avloppsvattnet åker till Helsingborgs avloppsreningsverk. Enligt H22 Helsingborg, kan detta system reducera växthusgasutsläppen med mer än hälften, i jämförelse med det traditionella avloppssystemet.

5.3 Cellulosa

Som tidigare nämnt, är fokuset på utvinning av just cellulosaqubrer få. I avsnittet nedan presenteras två tekniker som testat möjligheten att nyttja resursen i det kommunala avloppsvattnet.

5.3.1 Bandfilter (B)

En av teknikerna som forskats på i Italien är cellulosaquvinning via bandfilter. Ett pilotförsök utfördes där två liknande metoder testades och båda grundades i användningen av ett bandfilter (Palmieri, o.a., 2019). En dynamisk separation integreras med konventionella reningsflödesscheman för att separera större delar av fasta ämnen och cellulosaquiber i samband med att man ersätter den traditionella primära sedimentationen i reningsprocessen för avloppsvatten.

Då byggbranschen står för 40% av den globala energi som används för främst tillverkning av murbruk och betong har tekniken framtagits för att delvis ersätta murbruk med utvunnet cellulosaquaterial (Palmieri, o.a., 2019). I pilotförsöket har två verkliga

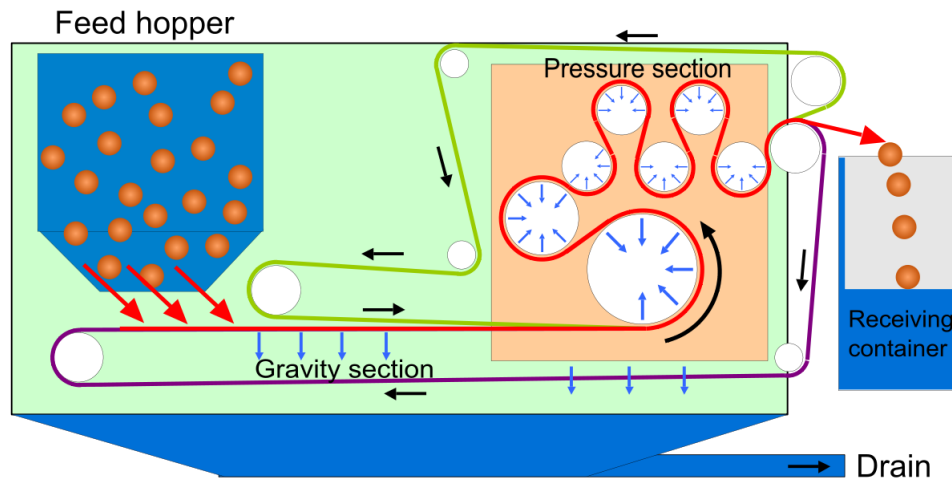
kommunala reningsverk använts för att undersöka möjligheten av utvinningen av cellulosafiber genom utveckling och förbättring av den primära separationen. Reningsverkens kapacitet var 81 000 personer för Falconara och 40 000 i Carbonera, där kombinerat avloppsystemvatten behandlades.

Det första steget i tekniken för utvinningen av cellulosa från avloppsvatten är en dynamisk separation. Filtret som installerades vid reningsverket Falconara bestod först av en förbehandlingssektion som avsöndrar de större materialen som avloppsvattnet består av. För att bibehålla en kontrollerad hastighet regleras vattnet med manuell ventil. Med hjälp av en blandningstank kan cellulosaslammet separeras i två olika tankar för att sedan släppas ut till huvudreningsverket. Där installerades mätverktyg för kontroll av koncentration av fasta ämnen.

I det andra avloppsreningsverket, beläget i Carbonera förbehandlades det inkommande avloppsvattnet för en avsöndring och borttagning av olja och sedan skickades vattnet även där till en blandningslagringstank med samma dynamiska filter. Därefter användes en centrifugalpump, som styrs av en inverter, vars syfte är att mata filtret med rätt flödes hastighet. I pilotförsöken behövdes även vattentankar på minst 70 grader Celsius för att kunna rengöra det dynamiska bandfiltret mellan varje separationstest.

För att kunna provta och karakterisera det framtagna cellulosaslammet lagrades massan i olika tankar och testades enligt befintliga standardmetoder för avloppsvatten. Vid reningsverket i Falconara bestämdes även kornstorleksfördelningen i laboratorium med en siktningsmetod. En skillnad mellan de olika reningsverken var vilka experiment som utfördes under separationen av cellulosaslammet. I Falconara användes 21 experiment i jämförelse med Carboneras 14. För de olika testerna snittade varaktigheten på 4 timmar. Resultaten för varje test redovisades med prestationer i hur mycket totalt suspenderade ämnen (TSS) som avlägsnats relativt hydraulisk belastningshastighet samt laddningshastighet för fasta ämnen. Ett exempel på hur ett bandfilter fungerar visas i *figur 7*.

Figur 7. Exempel på hur ett bandfilter fungerar principiellt



Kommentar: Från *Wikipedia Commons*, av Wikiwayman, 2009

Efter separationen av cellulosaslammet bestämdes procentandelen i slammet som utgörs av proteiner, lipider, aska, hemicellulosa, ren cellulosa, lignin och humuskompund (Palmieri, o.a., 2019). För bestämning av materialet som kan användas till återvinning användes beräkning med hjälp av cellulosautbyteskoefficienten CYcell. Efter lyckad framtagning av cellulosafiber kan resursen användas till framställning av murbruk, där cellulosan ersätter förstärkningsmedel som vanligtvis används. För genomförande av tekniken i Falconara samt Carbonera behövdes en energianvändning på 53 W/m^3 och resultatet var en cellulosautvinning mellan 11-74% av den inkommande mängden.

5.3.2 Finmaskig silning <0,35 mm maskstorlek (S)

Ytterligare en teknik som kan användas för återvinning av cellulosa från avloppsvatten är användning av finmaskiga silar (Ruiken, Breuer, Klaversma, Santiago, & van Loosdrecht, 2012). Genom att implementera silar vid förbehandlingen av avloppsvattnet ökar nyttjandegraden för cellulosan, som förekommer från användningen av toalettpapper. Det är en reningsteknik som vanligtvis används för enstegs-mekanisk rening, men genom en maskstorlek på under 0,35 mm optimeras utvinning av cellulosa fibrer. I en pilotanläggningsforskning baserat på tre reningsverk med kombinerat avloppssystem i Nederländerna har dessa silars återvinning av cellulosa utvärderats, däremot så kan liknande silar hittas i Norge utan en efterföljande biologisk behandling. Reningsverken behandlade avloppsvatten från 30 000 personekvivalenter.

Den norska metoden är optimerad för maximalt avlägsnande av alla suspenderade partiklar, och vid jämförelse av bortföringskapacitet hos silar och primära rengöringstekniker visar det första av de två på bättre kapacitet vid förbehandlingssteget. Vid låg hydraulisk belastning kan silen drivas med en så kallad kakfiltrering, det vill säga att en filtrering som uppstår av de ansamlade massorna på ett filter som bidrar till ytterligare ett lager som vattnet ska trängas förbi (The Envirogen Group, u.d.).

Pilotförsöket i Nederländerna, med liknande metod som den norska, hade som syfte att undersöka hur borttagning av suspenderat material, TSS, från inflödet med finmaskiga silar kan minska kostnader för rening av avloppsvatten genom en minskning av energiförbrukning av reningsprocessen (Ruiken, Breuer, Klaversma, Santiago, & van Loosdrecht, 2012). Baserat på de framtagna resultaten genomfördes en fallstudie för tillämpningen av silar under 0,35 mm för de tre avloppsreningsverken som studerades.

Metoden som användes för ett av avloppsreningsverken, Blaricum, behandlar en flödes hastighet på 1600 m³/h och består av en barskärm på 6 mm, ett icke luftat sandfång, oxidationsdike, slambehandling och slamförtjockning genom gravitation. Slambehandlingen, rötningen och avvattningen är centraliserad till reningsverket Amsterdam West.

För utvärderingen användes resultat från pilottester från september 2008 - januari-2009, med en sil från Salsnes Filter. Flödeskapaciteten för sikten var på 35 l/s och 0,35 mask och 0,5 m² effektiv bandyta. Vid kostnadsberäkning antogs hur mycket siktmaterial som kunde utvinnas efter den mekaniska avvattningen, för förbränning av biomassa till elproduktion (Ruiken, Breuer, Klaversma, Santiago, & van Loosdrecht, 2012). Även ett antagande om att den specifika biologiska överskottslamproduktionen vid sikt som primär rening är densamma för ett system med primär rening, vilket till störst sannolikhet är en överskattning av slamproduktionen på grund av mängden av slam som består av icke biologiskt nedbrytningsbart material.

Cellulosafibrerna i siktningarna samt slammet observerades mikroskopiskt med ett polariserat ljus och därefter beräknades fraktion cellulosan som var framtagen efter siktning. Efter torkning i ugn, malning och analys i en TGA-analysator kunde massminskningen som funktion utav temperaturen bestämmas. Slutsatsen om hur mycket av resursen som beräknades kunna utvinnas var 10-75% av den inkommande mängden. En minskning av energianvändningen beräknas till minst 40% vid användning av finmaskig silning, vid jämförelse med ett fall utan tekniken.

Vinstmöjligheter per år är 125 000 € och livstiden på tekniken är ca 15 år, vilket resulterar i att investeringstiden beräknas till mellan 7-10 år (Stowa, 2010). Dimensionerna för ett Salnes 1000 filter är 1,5×1,5×1,3 m³ (Salnes Filter, 2017). Efter framtagande av cellulosan är potentiella användningsområden tillverkning av återvunnet pappersprodukter, bindemedel för asfalt samt förstärkningsmedel för byggnadsmaterial.

5.4 Energi

Genom att effektivisera energianvändningen kan samhället uppnå miljö- och klimatmålen. Effektiviseringen av energi sker antingen genom att få mer nytta av de befintliga resurserna eller genom att använda mindre resurser. I kommande kapitel introduceras ett flertal energiåtervinningstekniker som berör avloppssystemet.

5.4.1 Värmeåtervinning med hjälp av värmepumpslösningar (VV)

Värme är en typ av energi som kan återvinnas ur avloppssystemet med hjälp av värmepumpar. En värmepump drivs med hjälp av det som kallas kompressorprocessen (Greenmatch, 2021). Värmepumpar fungerar på samma sätt som ett kylskåp, dock tvärtom. Istället för att överföra värme från insidan till utsidan, så överförs värme från utsidan (värmekälla) till insidan (värmesänka). För att driva en värmepump behövs det en energikälla. Det beror på att värmepumpen inte kan konsumera värmeenergin som den utvinner, utan den behöver en extern energikälla.

För att definiera hur effektiv en värmepump är används det som kallas COP-värde (Learn metrics, 2022). Om en värmepump har COP värdet 3, betyder det att värmepumpen producerar 3 kW för varje 1 kW energi den förbrukar. Med andra ord kan man säga att ju högre COP värde, desto lönsammare systemet är.

5.4.1.1 Värmepumpen Sjölunda (VS)

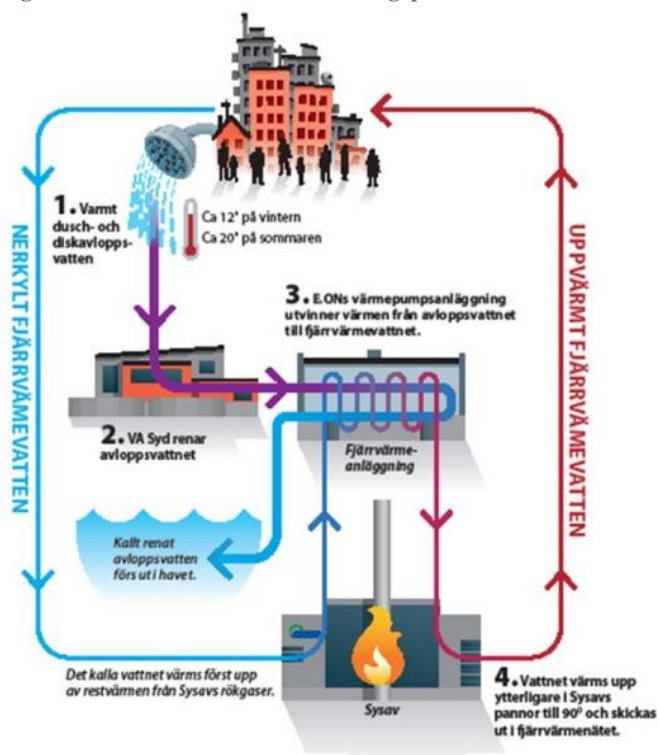
Installationen av värmepumpen Sjölunda Heat Pump i Malmö presenteras av Per Hannius och Peter Pålsson (Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen, 2019). Med hjälp av värmepumpen täcks 8% av stadens energibehov. Investeringen för detta projekt var 200 miljoner kronor, inklusive lokalen och monteringen.

För den nya värmepumpen valdes ammoniak istället för R134a som ett köldmedium på grund av dess farliga miljöpåverkan (Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen, 2019). När det gäller placeringen av värmepumpen valdes ett industriområde utanför stan.

Anläggningen är ny och inkluderar fyra värmepumpar som tar emot spillvärme ur renat avloppsvatten. Varje värmepump har ett COP värde som ligger på 3,7 och ett COP 3,5 för hela anläggningen. Värmepumparna levererar värme med full produktion under perioden oktober till april och delvis under sommaren, totalt 200 GWh/år med 300 000 anslutna personer. När det kommer till miljöbelastningen, kan man minska utsläppen med cirka 50 000 ton mindre koldioxid/år om man väljer att driva värmepumparna med hjälp av förnybar el.

Processen börjar med att det varma disk- och duschvattnet hamnar i ett avloppsnät (Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen, 2019). Spillvattnet förs fram till VA-Syd för att renas, *se figur 8*. Efter reningen, åker avloppsvattnet vidare till E.Ons värmepumpsanläggningar där värme återvinns ur det renade avloppsvattnet. Efter att ha återvunnit värme, förs det renade kalla vattnet i havet. Värme som har återvunnits används för att uppvärma fjärrvärmevattnet från 57°C till 66°C. Efter att vattnet har uppvärmts cirka upp till 66 °C, fortsätter det till Sysavs förbränningscentral där vattnet värmas upp ytterligare till 90 °C. Efter att vattnets temperatur har kommit upp till 90 °C, skickas det vidare till konsumenterna. Målet med denna process är att utvinna så mycket värme som möjligt ur avloppsvattnet, och inte att värma upp vattnet.

Figur 8. Beskriver värmeåtervinningsprocess

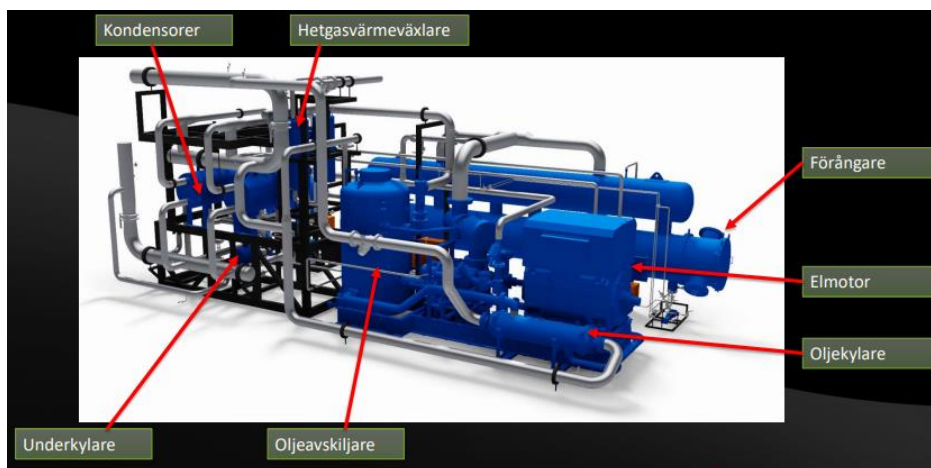


Kommentar. Från Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen, av Peter Pålsson, 2019. Återgiven med tillstånd.

Värmepumparnas huvudkomponenter är enligt följande, *se figur 9* (Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen, 2019):

- Förångare: Processen i värmepumpen inleds med att köldmediet passerar förångaren med sin låga temperatur och lågt tryck. Förångaren tar emot 300 liter vatten/sekund.
- GEA skruvkompressor: Dess uppgift är att ta emot köldmediet som kommer från förångaren och komprimera det vilket gör att köldmediet får högre tryck och då ökar köldmediets temperatur.
- Kondensor: När köldmediet passerar kondensorn, får det en hög kokpunkt. Detta medför att köldmediet tvingas att återgå till sin flytande form och då avges värme.
- Hetgasvärmväxlare: Dess uppgift är att utnyttja den heta ångan från kompressorn för att värma upp vattnet cirka upp till 70 °C under billiga förhållanden.
- Elmotor, underkylare och oljeavskiljare.

Figur 9. En av Sjölanda värmepumpar



Kommentar. Från Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen, av Peter Pålsson, 2019. Återgiven med tillstånd.

Monteringen av värmepumparna krävde cirka 5500 timmar (Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen, 2019). Kompressaggregatet epoxilimades i betonggolvet på grund av de kraftiga vibrationerna. Anläggningen livslängd är ungefär 20–30 år, och då

är det viktigt att välja ett köldmedium som är tillgängligt under hela denna period (Vahterus, u.d.).

5.4.1.2 Evertherm lösningssystem (EL)

Konceptet bakom Evertherms system är att kombinera värmepumpslösningar med tankar för att lagra energi (Evertherm, 2020). Denna kombination gör det möjligt att återvinna 95% av spillvattnets energi som återförs till lokaler och bostäder med ett COP-värde 4,61.

Processen inleds med att spillvattnet från lokalen går igenom avloppsstammen till det som kallas pumpgrop (1), se figur 10 (Evertherm, 2020). Pumpgropen finfördelar spillvattnet som pumpas vidare till en buffertank (2) för energiutjämning och ackumulering. Buffertankens huvuduppgift är utjämning av flödesvariationer för att få så stor utvinningsfaktor som möjligt. I buffertanken lagras energi som kan användas vid behov. Från buffertanken pumpas spillvattnet vidare till det som kallas kollektortank (3). I kollektortanken sker energiutvinning, då lämnas energin till värmepumpen och ackumulatortank (4) med hjälp av en värmeväxlare. Evertherm regleras av ett styr-och optimeringssystem (5) som kontrollerar flödesstorlek och vattnets temperatur för att behålla de jämna och konstanta. Det är viktigt med regleringen för att utnyttja spillvattnets energi optimalt.

Figur 10. Evertherms värmepumpslösning, övergripande systembeskrivning



Kommentar. Från *Dimensionering & räkneexempel*, av Evertherm, 2020. Återgiven med tillstånd.

Evertherm har en hög verkningsgrad (Evertherm, 2020). Det beror på att om temperaturen i kollektortanken sänks till en viss nivå, hämtas den tillgängliga lagrade energin från buffertanken. Detta gör att energin cirkulerar och bevaras kontinuerligt

inom fastigheten. Evertherms tankar kan designas utifrån det som kallas modulkonceptet, det vill säga att de kan kombineras med fastighetens storlek och behov.

En undersökning gjordes i ett examensarbete vid Umeå universitet för att beräkna mängden CO_2 – *ekvivalenter* som besparas med hjälp av Evertherms system för boytan $5470 m^2$ med 123 personer (Grefve, 2021). Undersökningen visade att systemet kan bespara upp till 317 ton CO_2 – *ekvivalenter* under sin livslängd. Samma undersökning visade att Evertherms energibesparing kan komma upp till 144 MWh/år med en paybacktid på ungefär 40,7 år för 67 lägenheter med boytan $5470 m^2$.

Tankarnas livslängd är cirka 40–50 år med en investeringskostnad 1 800 000 kr (Evertherm, u.d.). Tillverkningsföretaget påstår att systemet är helt underhållsfri, och att tekniken har använts i avloppsreningsverk sedan 2014 utan driftstörningar.

5.4.2 Vätgas som energibärare (VE)

Det lättaste och vanligaste grundämnet i universum är väte (Naturskyddsföreningen, 2022). Genom att två väteatomer blir sammanbundna bildas vätgas (H_2) som har möjligheten att lagra och transportera energi, därför kallas den för energibärare. Vätgas är ett populärt alternativ till fossila bränslen och gör att dagens samhälle blir ett steg närmare miljömålen och nollutsläpp. I följande avsnitt kommer möjliga tekniker för vätgasåtervinning från avloppsvatten att presenteras.

5.4.2.1 Jäsning av avloppsvattnets slam (JS)

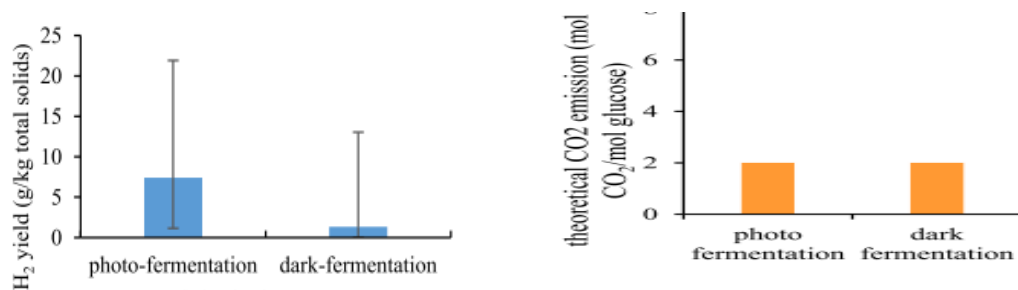
Vid University of Glamorgan forskades hur jäsningen av avloppsslam resulterar i vätgasproduktion (Liu, Lin, Man, & Ren, 2019). Resultatet från denna forskning visade att väte kan produceras genom att jäsa avloppsslam, dock efter att det hade behandlats med värme och röts med ett enzympreparat. När varken värmebehandling eller enzymatisk nedbrytning användes, bildades inget väte under fermenteringen. Fermentering utfördes vid pH-nivåer från 4,5 till 7,0. När den ägde rum vid pH 5,5 observerades en maximal väteproduktionshastighet på 3,75 ml/min.

Vätgasproduktion från avloppsslam med biologiska tekniker innefattar två huvudsakliga metoder, fotojäsning och mörkjäsning (Liu, Lin, Man, & Ren, 2019). Fotojäsning är beroende av solljus under anaeroba förhållanden. Därför krävs det en stor yta med tillräcklig solljusabsorption och en anaerob miljö för att driva processen. Processen påverkas också av slammets innehåll av organiska ämnen och omgivningens pH-värde.

Till skillnad från fotojäsnning, krävs det en mörk anoxisk miljö för att driva mörkjäsningsprocessen. Fördelen med mörkjäsningen jämfört med fotojäsnningen är att den kan drivas dag och natt eftersom den inte är ljusberoende. Metoderna omvandlar organiskt material till koldioxid, bioväte och andra produkter med hjälp av mikroorganismer.

Enligt *figur 11* genereras mer vätgas per total torr substans under fotojäsnning jämfört med mörkjäsning. Däremot utsläpps samma mängd koldioxid för båda processerna, vilket tyder på att mörkjäsningen är mer miljövänligt på något sätt.

Figur 11. Vätgasproduktion och koldioxidutsläpp under fermentering



Kommentar. Från *Recent developments of hydrogen production from sewage sludge by biological and thermochemical process*, av Lin et al., 2019. Återgiven med tillstånd.

Fermenteringsmetoder kan vara billiga men ganska tidskrävande och relaterade studier befinner sig i det grundläggande skedet (Liu, Lin, Man, & Ren, 2019). Att producera vätgas fermentativt är miljövänligt men ganska dyrt och kan komma upp till ungefär 7,54 - 7,61 \$/kg (SF, o.a., 2021). Fotojäsningsanläggning kostar cirka 193 USD miljoner, medan mörkjäsningsanläggning kostar 980 USD miljoner. Investeringskostnader inkluderar arbetskraft, gasseparering, hantering och vatten med paybacktiden på ungefär 4 år.

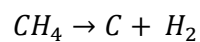
Enligt företaget Honglin som tillverkar fermenterings tankar, kräver tankarna underhåll minst en gång per år med livslängden på minst 10 år och storleken 250–4500 liter beroende på behov (Joyce, personlig kommunikation, 9 maj, 2022).

5.4.2.2 Biosolids (B)

Biosolider är en form av fast organiskt material som återvinns ur avloppsvattnets slam efter att det har behandlats (Netinbag, u.d.). Vätgasåtervinning ur biosolider utvecklades av ett flertal forskare vid RMIT University (Kaszubska, 2020). Den patenterade tekniken

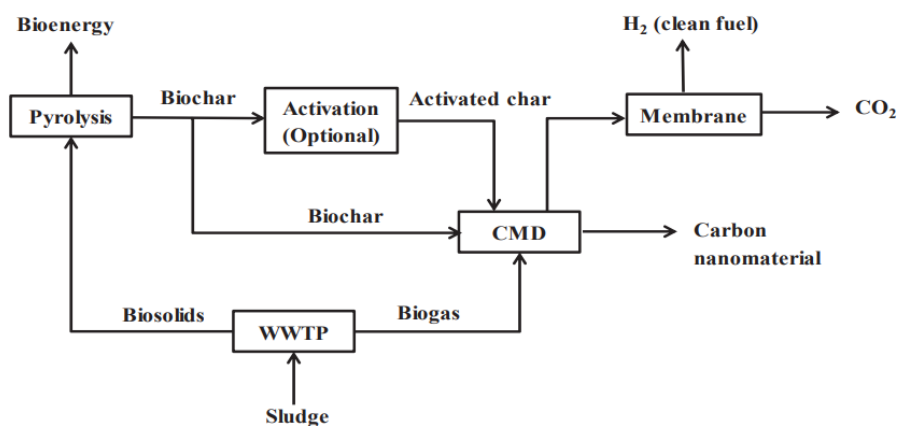
använder ett speciellt material som kommer från biosolider. Detta material hjälper att utlösa kemiska reaktioner för att producera väte från biogas. Allt material som behövs för väteproduktion kan hämtas på plats vid ett avloppsreningsverk, utan behov av dyra katalysatorer. Metoden fångar också kolet som finns i biosolider och biogas, vilket i framtiden kan möjliggöra en nollutsläppssektor för avloppsvattnet.

Tekniken heter Catalytic methane decomposition (CMD), och det är enstegsprocess för väteproduktion där metanmolekylens kol binds i form av stabila och högvärdiga kolmaterial enligt följande reaktion (Patel, o.a., 2020):



I CMD omvandlas biosolider först till biokol med hjälp av pyrolys, *se figur 12* (Patel, o.a., 2020). Biokolet som kommer från biosolider innehåller en del tungmetaller, vilket gör det till en idealisk katalysator för att producera väte ur biogas. Pyrolys används för att producera biokol som sedan genomgår ett valfritt steg av aktivering. I nästa steg används biokol eller aktiverad kol som kolkatalysatorer i biogasnedbrytningen. Högre reaktionstemperaturer och lägre metankoncentrationer visade sig vara gynnsamma för att uppnå högre metanomvandling. En maximal metanomvandling av $71,0 \pm 2,5$ och $65,2 \pm 2,3$ % observerades för aktiverad kol och biokol, vid $900\text{ }^\circ\text{C}$ respektive för 10 % CH_4 i N_2 inom de första 0,5 timmarna av experimentet. Den föreslagna processen tillåter kolbindning i båda pyrolys och CMD. Detta medför en betydlig minskning av koldioxidutsläpp från reningsverk.

Figur 12. Processkarta över väteproduktion i Wastewater Treatment Plant WWTP



Kommentar. Från Production of hydrogen by catalytic methane decomposition using biochar and activated char produced from biosolids pyrolysis, av Patel et, al., 2020.

Återgiven med tillstånd.

Som en del av experimentet, testade forskaren att driva processen med en metanrik gas som liknar biogas (Patel, o.a., 2020). Det visade sig att biokol tillverkat av biosolider är mycket effektivt för nedbrytning av gasen till dess beståndsdelar, vilka är väte och kol.

Nedbrytningsprocessen kan också genomföras i en specialdesignad reaktor som utvecklades av RMIT, och producerar och lagrar väte och ett högvärdigt biokol som är belagt som kolnanomaterial (Kaszubska, 2020). Det biokolet som produceras genom den nya tekniken har en rad potentiella tillämpningar, exempelvis förstärkning av jordbruksjordar och energilagring. Enligt RMIT kommer denna teknik att minska koldioxidutsläppen med ungefär 30% jämfört med befintliga alternativ för biosoliders/avfalls hantering (Evans, 2021). Att anlägga RMIT reaktor kostar upp till 1.77 USD miljoner (ARENA, u.d.).

Med hjälp av denna teknik undviks användningen av dyra metalloxidbaserade katalysatorer, vilket gynnar den cirkulära ekonomin. Dock är tekniken helt ny och under utvecklingen, därför krävs det mer forskning i framtiden för att simulera den verkliga biogassammansättningen.

6 Potential för resursutvinning

I detta kapitel redogörs beräkningar på resursutvinningsgraden för respektive resursutvinningsteknik. Nedan visas data från reningsverket Ryaverket.

Det genomsnittliga inflödet av avloppsvatten i Ryaverket är 4000 liter per sekund (Gryaab, u.d.a). Det innebär att det kommer in 345 600 m³ per dag, se ekvation 1.

$$Q_{in} = \frac{4000 \text{ l/s}}{1000} * 60 * 60 * 24 = 345\,600 \frac{\text{m}^3}{\text{dag}} \quad [\text{ekv. 1}]$$

6.1 Kväve

Återvinning av rejektvatten

Om Sveriges reningsverk skulle använda EasyMinings teknik för återvinning av rejektvatten:

- 41 050 ton kväve finns i avloppen per år (Jönsson, 2019)
- 20 % av kvävet återvinns från reningsverken (EasyMining, 2021)
- EasyMining ska återvinna åtminstone 40 % (EasyMining, 2021)

$$\text{Utan EasyMinings teknik: } 41050 \text{ ton/år} \times 0,2 = 8210 \text{ ton/år}$$

$$\text{Med EasyMinings teknik: } 41050 \frac{\text{ton}}{\text{år}} \times 0,4 = 16420 \frac{\text{ton}}{\text{år}}$$

$$16420 \text{ ton/år} - 8210 \text{ ton/år} = 8210 \text{ ton/år}$$

Gryaab skulle kunna återvinna 8210 ton/år mer om EasyMinings teknik används.

Om Ryaverket hade använt sig av alger

TN_{in} = Total nitrogen in influent

TN_{in} medelvärde, Ryaverket 2015–2017: 29,08 mg/l (Videbris, 2022).

$$29,08 \times [\text{ekv 1}] = 1,005 \times 10^{10} \frac{\text{mg}}{\text{dag}} = 10\,050 \frac{\text{kg N}}{\text{dag}}$$

Om alger skulle kunna återvinna allt kväve i Ryaverket i 12 dagar, hade 95% återvunnits (Rylander & Wiqvist, 2009).

$$10\,050 \times 0,95 = 9547,5 \text{ kg N/dag}$$

$$9546,5 \times 365 \div 1000 = 3484,8 \text{ ton N/år}$$

Det innebär att 9547,5 kg kväve hade kunnat återvinnas per dag vilket är 3484,8 ton per år.

Återvinning av kväve med hjälp av separerade system

Ryaverket har 800 435 personer anslutna, en person kissar 1–2 l per dag (Gryaab, u.d.a). 85 % av kvävet står urinen för (Sweden water research, 2017). Just nu blandas urinen med toapapper, fekalier och dusch/kran vatten. Det innebär att kvävet inte blir lika koncentrerat. Om alla personer som är anslutna till Ryaverket hade använt sig av separerade system där urinen separeras i toaletten, hur mycket kväve hade Ryaverket kunna återvinna då?

$$800\,435 \times 1 = 800\,435 \text{ liter/dag}$$

$$800\,435 \times 2 = 1\,600\,870 \text{ liter/dag}$$

$$800\,435 \times 0,85 = 680\,369,75 \text{ kg N/dag}$$

$$1\,600\,870 \times 0,85 = 1\,360\,739,5 \text{ kg N/dag}$$

Ryaverket får just nu in 10 050 kg kväve /dag, se tidigare beräkningar. Med separerade system hade det varit möjligt att få in mellan 680 369,75 kg kväve/dag till 1 360 739,5 kg kväve/dag. Därmed hade det funnits en större mängd kväve att återvinna.

6.2 Fosfor

Modifierad membranbioreaktor

Den genomsnittliga TP_{in} i Ryaverket låg på 3,5 mg/L (Videbris, 2022). Ett genomsnittligt inflöde på 4000 liter per sekund skulle därmed ge TP_{in} :

$$3,5 \text{ mg/L} \times 4000 \text{ L/s} = 1,29 \times 10^9 \text{ mg/dag} = 1209 \text{ kg/dag}$$

Med hjälp av det intermittenta luftade MBR-tekniken skulle 53,3% av det inkommande fosfor kunna avlägsnas och 68,7% av det avlägsnade fosfor skulle utvinnas.

$$0,533 \times 1209 \text{ kg/dag} = 645 \text{ kg/dag}$$

$$0,687 \times 645 \text{ kg/dag} = 443 \text{ kg/dag}$$

Det innebär att 645 kg fosfor skulle avlägsnas och 443 kg fosfor i form av fosfatlösning skulle erhållas från reningsverket varje dag.

Hur stor andel av TP_{in} som blir till utvunnen fosfor beräknas enligt följande:

$$0,533 \times 0,687 = 0,366 \approx 37\%$$

Eco:P

Som tidigare nämnts kan över 75 % av inkommande fosfor återvinnas i form av struvit med hjälp av processen Eco:P. Det medför att den potentiella utvinningen från Gryaab minst hade varit följande:

$$0,75 \times 1209 \text{ kg/dag} \approx 907 \text{ kg struvit /dag}$$

Tre rör ut:

Det påstås att med Tre rör ut kan tre gånger så mycket fosfor återvinnas jämfört med dagens teknik. På Ryaverket låg totala mängden fosfor i slam på 449 400 kg/år och det återvinns ca 77% av den inkomna fosfor till gödsel (Videbris, 2022).

$$3 \times 0,77 \times 449\,400 = 1\,038\,114 \text{ kg P/år}$$

$$3 \times 0,77 \times 449\,400 = 1\,038\,114 \text{ kg P/år}$$

Enligt ekvationen ovan skulle ungefär 1040 ton fosfor återvinnas varje år på Ryaverket med hjälp av Tre rör ut.

Hur mycket fosfor som skulle återvinnas per dag skulle därmed vara enligt följande:

$$\frac{1038114}{365} = 2844 \text{ kg P/dag}$$

Det innebär att 2844 kg P i slam skulle återvinnas som gödsel per dag på Gryaab.

6.3 Cellulosa

Uppskattning av årligt toalettpapper användning i Sverige (Wikipedia, 2022): 10 kg/person (Wikipedia, 2022):

$$27,4 \frac{\text{g}}{\text{dag.personer}}$$

Uppskattning 85% cellulosa i toalettpapper (Palmieri, o.a., 2019):

$$27,4 \times 0,85 = 23,3 \frac{g}{dag * person}$$

$$27,4 \times 0,85 = 23,3 \frac{g}{dag * person}$$

Antal personer anslutna till Gryaabs avloppsreningsverk är 800 435:

$$800435 \times 23,3 = 18,7 \text{ ton cellulosa/dag}$$

Utvinningsgrad för bandfilter (Palmieri, o.a., 2019): 11–74%

$$0,11 \times 18,7 = 2,06 \frac{ton}{dag} \text{ (minimum)}$$

$$0,74 \times 18,7 = 13,6 \frac{ton}{dag} \text{ (maximum)}$$

Utvinningsgrad för finmaskig silning (Ruiken, Breuer, Klaversma, Santiago, & van Loosdrecht, 2012):

TSS 10–75%

$$0,10 \times 18,7 = 1,87 \frac{ton}{dag} \text{ (minimum)}$$

$$0,75 \times 18,7 = 14,0 \frac{ton}{dag} \text{ (maximum)}$$

6.4 Energi

Inkommande vattentemperatur hos Ryaverket är ganska hög. Med antagandet att Ryaverket har samma COP-värde som anläggningen Sjölunda och Everthem lösning, hur mycket värmeenergi kan återvinnas? Antagande att värmepumparna är i drift oktober-maj (250 dagar)

Sjölunda:

$$T_{inkommande,medel} = 14,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$COP = \frac{T_{in}}{T_{in} - T_{ut}}$$

$COP = 3,5$ för hela anläggningen, där $T_{in} = 14,31\text{ °C}$ och $T_{ut} = 10,22\text{ °C}$

Den användbara återvunna värmen blir: $W = m_w \times c_p \times |T_{ut} - T_{in}|$,

där $c_p(14\text{ °C}) = 4187\text{ J/kg °C}$

$$W = 345\,600\,000\text{ kg} \times 4187\text{ J/kg °C} \times (14,31 - 10,22) \approx 5,9 \times \frac{10^{12}\text{ J}}{\text{dag}}$$

$$\approx 1,64\text{ GWh/dag} \approx 410\text{ GWh/år}$$

Evertherm lösning:

$COP = 4,61$, där $T_{in} = 14,31\text{ °C}$ och $T_{ut} = 11,21\text{ °C}$

$$W = 345\,600\,000\text{ kg} \times 4187\text{ J/kg °C} \times (14,31 - 11,21) \approx 4,5 \times 10^{12}\text{ J/dag}$$

$$\approx 1,25\text{ GWh/dag} \approx 313\text{ GWh/år}$$

7 Resultat

Resursutvinningsteknikerna bedöms med hjälp av Trafikljusmetoden och redovisas nedan. Teknikerna jämförs förhållande till varandra och hur det ser ut i dagsläget. Rutorna som är gråa är inte ifyllda på grund av att ingen information finns tillgänglig.

7.1 Kväve resultat

I *tabell 5* ser vi att ÅR, återvinning av rejektivatten, har högst poäng, 2,3 av 4. ÅR är den mest lämpliga tekniken för resursutvinning från avloppsvatten. Tre mörkgröna rutor, två ljusgröna och en gul. Det innebär att ÅR är dimensionerad för Gryaabs inflöde då denna typ av teknik är testad på stora vattenflöden, det utvinns upp till 40 % kväve och tekniken tar inte mer plats än Gryaabs. Däremot tar det lite mer energi att driva ÅR jämfört med SS, men i förhållande till Gryaab så krävs det mycket mindre energi. Idag tar det väldigt mycket energi att ta tillbaka kvävet från atmosfären, vilket det inte kommer göra med ÅR. Gul ruta ges till ÅR på grund utav att ammoinakstrippingen som användes i Ellinge var tvungen att stänga för att det var för höga drift- och underhållskostnader.

Tabell 5. Resultat från trafikljusmetoden för kväve.

| Kväve | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Indikator | ÅR | A | SS | Gryaab |
| Mognad | | | | |
| Kapacitet | | | | |
| Underhåll | | | | |
| Livstid | | | | |
| Energianvändning | | | | |
| Resursutvinningspotential | | | | |
| Platseffektivitet | | | | |
| Samhällets mottaglighet | | | | |
| Drift- och underhållskostnad | | | | |
| Implementeringskostnad | | | | |
| Implementeringskostnad | | | | |
| Medelvärde | 2,3 | 1 | 1,8 | 1,1 |
| Helhetsbedömning | 2 | 1 | 2 | 1 |

A, Alger, har lägst poäng, 1 av 4. Första indikatorn visar mognaden på tekniken och där ser vi att A endast har testats i små labb ännu. Tekniken har just nu svårt att hantera stora flöden och det kräver mycket plats. Om endast alger ska kunna rena stora mängder avloppsvatten krävs stora ytor. Det antagandet stöds av Fredrik Christersson som nämnde att han tror alger som användning för att rena vatten tar väldigt stor plats. Alger kommer dessutom behöva energi för att växa och därmed ges en gul ruta. Däremot har alger stora potential i framtiden då det kan utvinna upp till 95 % av kvävet, vilket är den tyngsta frågeställningen för detta arbete.

Separerade system, SS, är den näst bäst lämpade tekniken för resursutvinning av kväve. Den kommer vara dimensionerad för samma flöde och det kommer inte krävas extra energi för att bedriva tekniken. Däremot kommer det krävas extremt mycket energi och investeringar för att bygga denna teknik. Samhället är även kritiska till den hygieniska aspekten och den kommer krävas mer plats under mark.

Gryaab har 1,1 poäng av 4 vilket innebär att ÅR och SS är bättre lämpade tekniker. Ur resursutvinnings- och energiperspektiv är även A bättre lämpad, vilket är den viktigaste aspekten i denna rapport.

Enligt beräkningar på hur stor potential respektive teknik har från avsnitt 6, visas att om Gryaab använt EasyMinings teknik för återvinning av rejektvatten skulle 8210 ton mer kväve per år kunna utvinnas. Om Gryaab använt alger hade 9547,5 kg kväve kunna återvinnas per dag, alltså 3484,8 ton per år.

7.2 Fosfor resultat

Utifrån *tabell 6* fås att Eco:P får 2,7 poäng, MBR får 2,4 poäng och Tre rör ut får 1,2 poäng. Det framkommer att Eco:P, EP, har sex mörkgröna rutor, en gul och en röd. Detta gör den till den mest optimala tekniken av de tre som studerats i arbetet för fosforutvinning från avloppsvatten.

Tabell 6. Resultat från trafikljusmetoden för fosfor.

| Fosfor | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Indikator | MBR | Eco:P | TRU | Gryaab |
| Mognad | | | | |
| Kapacitet | | | | |
| Underhåll | | | | |
| Livstid | | | | |
| Energianvändning | | | | |
| Resursutvinningspotential | | | | |
| Platseffektivitet | | | | |
| Samhällets mottaglighet | | | | |
| Drift- och underhållskostnad | | | | |
| Implementeringskostnad | | | | |
| Medelvärde | 2,4 | 2,7 | 1,3 | 1,6 |
| Helhetsbedömning | 2 | 3 | 1 | 2 |

EP-tekniken är inte testad i större skalor och enbart lämpad för väldigt koncentrerade flöden därför är den inte dimensionerad för Gryaab's inflöde. Därav fick den röd färg i bedömningen gällande Gryaab's kapacitet. Angående hur mycket av resursen som kan utvinnas och återanvändas får EP mörkgrön färg i förhållande till Gryaab's som får en ljusgrön färg. Detta beror på att all utvunnen fosfor kan användas som gödselmedel jämfört med dagens som ligger på 81,4%. Vid bedömning av investeringskostnader antog vi att tekniken är ett billigare alternativ att implementera då man utgår från befintliga system. Därför sattes den till mörkgrön.

Till MBR tilldelades tre mörkgröna, två ljusgröna, två gula och två röda rutor. Henriksdals avloppsreningsverk som kommer använda MBR-teknik beräknas kunna hantera avloppsvatten från 1 600 000 personer, vilket är dubbelt så mycket som Gryaab har hand om idag. Därför bedöms MBR-tekniken ha tillräcklig kapacitet för både dagens

och framtida behov. Eftersom dagens reningsverk på Gryaab har tillräcklig kapacitet för dagens behov ges även mörkgrön markering gällande dagens teknik. MBR-tekniken kräver mycket underhåll på grund av risken för membranfouling och behöver mer kemikaliehantering, därav får den röd färg i bedömningen gällande underhåll. Livslängden för membranen är uppskattningsvis 10 år, men vid byte av membran kan tekniken klara längre än så. Tekniken är mycket energikrävande och kan kräva nästan dubbelt så mycket energi som CAS. Energianvändningen bedöms inte vara optimal. MBR får därför en röd markering. Gryaab får en ljusgrön markering eftersom Eco:P antas kräva mindre energi. Resursutvinningspotentialen av fosfor med den modifierade MBR-tekniken beräknas vara ca 68,7% av fosfor i slammet, vilket är sämre än de övriga teknikerna och får därför en ljusgrön markering. Tekniken är platseffektiv och kan ta mindre än hälften så mycket plats som CAS-UF, och når således den optimala nivån. Drift- och underhållskostnader är höga men det finns potential för optimering, därav en gul markering. I den kategorin är tekniken på Gryaab bättre och får ljusgrönt. Implementeringskostnaden är hög men beräknas kunna vara lägre än CAS, enligt IVL svenska miljöinstitutet. Det bedöms därför som relativt optimal och får därför ljusgrön markering.

När det kommer till Tre rör ut är många rutor gråmarkerade. Det är en väldig ny teknik och det är mycket som det fortfarande forskas på. Idag fungerar systemet för 2000 personer och är alltså i en relativt liten skala i jämförelse med Ryaverket, därav röd ruta i bedömningen. Energianvändningen antas vara mindre än den för Gryaab och får därför mörkgrön markering. Tekniken kommer ta upp mer plats på grund av tre separerade avloppsrör istället för ett, därav gul markering. Gällande hur mycket fosfor som kan utvinnas med hjälp av denna teknik beräknas det vara tre gånger så mycket som det nuvarande systemet. Detta når optimal nivå.

Enligt beräkningar på hur stor potential respektive teknik har, baserat på data från Gryaab, skulle den modifierade MBR få ut 443 kg P i koncentrerad fosfatlösning per dag, EP skulle få 907 kg struvit per dag och TRU skulle få 2844 kg fosfor i form av slam per dag. Dagens reningsystem på Gryaab återvinner ungefär 81,4% av den årliga mängden 449 400 kg P, det vill säga 365 812 kg P/år. Daglig mängd för återvunnen fosfor blir således 1002 kg P/dag.

7.3 Cellulosa resultat

Teknikerna för utvinning av cellulosa ger liknande resultat i trafikljusmetoden och redovisas i *tabell 7*. Bandfilter har, utöver de tre gråa, 1 röd, 3 gula, 2 ljusgröna och en mörkgrön, och silningstekniken har 1 röd, 2 gula, 4 ljusgröna, 2 mörkgröna samt en grå. Totalpoängen för respektive blir därmed 1,7 poäng och 2,5 poäng av max 4 poäng i genomsnitt. I jämförelse med Gryaab cellulosahanteringsteknik, som får totalpoäng på 0,5 poäng, blir finmaskig silning den bästa tekniken utifrån kriterierna i trafikljusmetoden. Båda tekniker är röda för kriteriet om kapacitet då de grundar sig i pilotförsök där antalet personer som varit anslutna till reningsverken understigit Gryaabs markant. Gemensamt för båda tekniker var även brist på information om hur ofta underhåll är nödvändigt, men då båda tekniker använder en filtrering av någon typ lär det behövas för rengöring av maskerna/porerna. För bandfilter saknas det även information om livstiden på tekniken och även implementeringskostnad.

Tabell 7. Resultat från trafikljusmetoden för cellulosa.

| Cellulosa | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| Indikator | B | S | Gryaab |
| Mognad | | | |
| Kapacitet | | | |
| Underhåll | | | |
| Livstid | | | |
| Energianvändning | | | |
| Resursutvinningspotential | | | |
| Platseffektivitet | | | |
| Samhällets mottaglighet | | | |
| Drift- och underhållskostnad | | | |
| Implementeringskostnad | | | |
| Medelvärde | 1,7 | 2,5 | 0,5 |
| Helhetsbedömning | 2 | 2 | 1 |

Bandfilter bedöms vara gul i kriterier för mognad, energianvändning och volym. Detta på grund av att tekniken beskrivs att vara relativt ny, vilket främst beror på att utvinning av cellulosa är begränsat i alla länder och avloppsreningsverk. En energianvändning på

53 W/m³ medför även den gula färgen då det i jämförelse med befintlig rening förmodligen innebär en ökning. Volym beskrivs också gul vilket är på grund av att faktorer för resursutvinning och återanvändning enligt pilotförsöken kommer innebära en volym utöver självaste tekniken, det vill säga volym som går till att framställa exempelvis murbruk. De andra faktorerna anses vara positiva i skalan, detta gäller resursutvinningsmöjlighet (11–74%), samhällets mottaglighet, och operationskostnader.

För silning är kriterierna som resulterar i gul färg livstiden (15 år) och samhällets mottaglighet. Energianvändningen är minst 40% mindre vid användning av finmaskiga silar, volymen anses ta minimalt med plats så själva tekniken inte kräver större bassänger. Lönsamheten på 7 år, tillsammans med de två tidigare kriterierna får därmed nästhögst betyg. Högst betyg bland kriterierna finns för resursutvinningskapaciteten, som är mellan 10–75% samt drift och underhållskostnader, då kostnaderna relativt vinsterna är minimala. En vinst på 125 000 €/år kan förväntas från ett medelstort avloppsreningsverk.

Vid tillämpning av utvinningsgraden från teknikerna på Gryaabs avloppsvattenmängd blir resultaten följande:

Bandfilter: 2,06 ton/dag och 13,6 ton/dag

Silning: 1,87 ton/dag till 14,0 ton/dag

7.4 Energi resultat

När det kommer till värmeåtervinning tilldelades de flesta mörkgröna rutor till Evertherm lösning, EL. EL får betyget 2,8, sen kommer Gryaab med 2,2 poäng och Sjölunda värmepumpen, VS, med 1,8 poäng. Det innebär att EL är den mest lämpliga tekniken för värmeåtervinningen från avloppsvatten. När det kommer till vätgasproduktion visar det sig att Gryaabs biogasproduktion, BP, får högsta antalet poäng, vilket betyder att Gryaabs anläggning är den mest lämpliga tekniken för reursåtervinning från avloppsvatten.

Tabell 8. Resultat från trafikljusmetoden för energi.

| Energi | | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|--------|------|
| | VV | | VE | | Gryaab | |
| Indikator | VS | EL | JS | BS | VÅ | BP |
| Mognad | Grön | Grön | Gul | Röd | Gul | Gul |
| Kapacitet | Gul | Grön | Gul | Gul | Grön | Gul |
| Underhåll | Gul | Grön | Grön | Grå | Gul | Grön |
| Livstid | Röd | Grön | Grå | Grå | Gul | Grå |
| Energianvändning | Grön | Grön | Grön | Grå | Gul | Grön |
| Resursutvinningspotential | Röd | Grön | Grön | Grön | Röd | Grön |
| Platseffektivitet | Röd | Grå | Grå | Grå | Grön | Grön |
| Samhällets mottaglighet | Grå | Grå | Grå | Grå | Grå | Grå |
| Drift- och underhållskostnad | Grön | Grön | Röd | Grön | Röd | Grå |
| Implementeringskostnad | Grå | Röd | Gul | Grå | Grön | Grön |
| Medelvärde | 1,8 | 2,8 | 1,8 | 1 | 2,2 | 2,5 |
| Helhetsbedömning | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |

Enligt *tabell 8* är båda VS och EL mogna tekniker som har använts i stort utsträckning och testats under lång period. EL kan dimensioneras utifrån Gryaabs flöde enligt modulkoncept, därför får EL en mörkgrön ruta. För att VS ska kunna klara Gryaabs flöde, krävs det att mer värmepumpar installeras än antalet som studeras i rapporten, vilket var fyra värmepumpar. Detta leder till att VS får en gul ruta på grund av kompletteringar som krävs. När det kommer till underhåll, är EL underhållsfri under sin livstid medan kräver VS och Gryaab årligt underhåll och daglig granskning. Detta medför att både Gryaab och SV får en gul ruta, medan EL får en mörkgrön ruta. Livstids ruta är mörkgrön

för EL som har livstiden 40–50 år, och röd för VS med livstiden 20–30 år. Dagens värmepumpar hos Göteborgs energi har en livstid på minst 30 år, vilket motiverar valet av färgerna.

EL återvinner 4,61 kW/ 1 kW förbrukad el, medan VS återvinner 3,5 kW/ 1 kW förbrukade el och Gryaab återvinner 3,3 kW/1 kW förbrukad el. Detta gör att EL förbrukar minst energi att drivas och får en mörkgrön ruta, därefter kommer VS, sen Gryaab. Göteborgs energi återvinner 92,5% av spillvattnets värme. Detta gör att VS får en röd ruta med återvinningspotential som hamnar på 86%, dock får Evertherm en ljusgrön ruta med en återvinningspotential på 95%.

När det kommer till platseffektivitet får VS en röd ruta. Det beror på att siffrorna som är tillgängliga beskriver anläggningen med endast fyra värmepumpar, dock krävs det flera för att klara Gryaabs flöde. Detta leder till att det finns en stor risk att VS:s anläggning tar större utrymme än Gryaabs värmeåtervinnings anläggning. EL får en grå ruta eftersom systemet designeras utifrån modulkoncept och det är inte tydligt hur stort utrymme det krävs för att klara Gryaabs flöde.

Anläggningskostnader för VS och EL är mindre än dagens Rya kraftvärmeverk, därför får teknikerna mörkgrön färg. Payback-tiden för EL är jättelång och gynnar inte Gryaab som redan är självförsörjande. VS sparar ca 200 GWh/år med 300 000 personer anslutna, vilket är sämre än EL som återvinner 0,144 GWh/år från 123 anslutna, och bättre än Gryaab med 800 435 anslutna och energibesparing 486 GWh/år med tanken på återvinningsgrad per ansluten person.

Enligt beräkningar i avsnitt 6.4 *Energi* kommer Gryaab att återvinna mindre värmeenergi per år om värmepumparna skulle ha samma COP-värde som värmepumparna hos VS och EL, vilket går emot de teoretiska värden som har använts vid jämförelsen i trafikljusmetoden.

När det kommer till vätgasproduktion tilldelades de flesta mörkgröna rutor till Gryaabs installation för biogasproduktion med högsta betyget 2,5 poäng, därefter kommer jäsning av avloppsvattnets, JS med 1,8 poäng och Biosolids, B, med 1 poäng. Det innebär att Gryaabs befintliga anläggning är den mest lämpliga för resursåtervinning från avloppsvatten.

Vätagasåtervinningstekniker som studerades är inte tillräckligt mogna och det pågår fortfarande mycket forskning för att få exakta siffror på återvinningspotentialen, speciellt

när det gäller B. Rutorna för indikatorn kapacitet får en beige färg på de tre teknikerna vilket beror på att basen för processerna är avloppsvattnets slam och inte vattenflöde. Jäsning av avloppsvattnets slam, JS, kräver underhåll minst en gång/år, samma som det befintliga systemet hos Gryaab. Detta medför att JS får en mörkgrön ruta. För att driva JS krävs det ca 16% av energin som krävs för att driva hela Gryaab, vilket är ganska ett bra värde.

Mängden vätgas som produceras under JS och Biosolids, B, är hög och kan ge ett stort framsteg i framtiden enligt forskarna, därför får dem en mörkgrön färg. Att installera jäsningsanläggning kan vara mycket dyrt jämfört med RMIT:s tank. Paybacktiden för JS hamnar på 4 år vilket inte är en lång period, dock gynnar inte Gryaab som redan är självförsörjande ur energisynpunkt.

8 Diskussion

Nedan presenteras våra personliga tankar och åsikter kring teknikerna och vilka obesvarade frågor som kan ställas. Hur ser det ut i framtiden, vilka aspekter har inte tagits i hänsyn och vilken information är vi kritiska till.

8.1 Kväve

I rejektvatten finns mängder av kväve. Respondenten Fredrik Christersson tydde också på det och att det borde vara en lämplig metod för att återvinna kväve på. EasyMining, ARV Yverdon och VEAS återvinner alla kväve genom rejektvattnet och hittills är det lyckade resultat. EasyMining använder sig av kemiska processer jämfört med Gryaabs tekniker som använder sig av biologiska processer. I den kemiska processen kan kvävet omvandlas till fast form, kristalliseras och sedan fälls ut. Detta är väldigt bra för reningsprocessens interna belastningar eftersom det resterande kväve som inte skulle ha fällts ut kommer återföras som en internbelastning och är en stor del av ett avloppsreningsverks kvävebelastning. I dagens avloppsrening passerar kvävet den biologiska reningsprocessen för att sedan släppas ut i atmosfären som kvävgas. Därefter behöver vi människor ta ner kvävet igen från atmosfären och dem metoderna kräver mycket energi. Andra metoder drar helt enkelt mycket energi men EasyMinings metod gör att återvinning av kväve är enkelt, drar inte mer energi och är relativt billigt.

VEAS använder sig av liknande upplägg som Gryaab avloppsreningsverk med anaerob rötning, kalkkonditionering och filterpressning. Skillnaden här är att det kommer en ammoniakstrippning som sista steg. Denna metod ger ett industriellt återanvändbart ammoniumnitrat som sedan kan säljas vidare vid produktion av mineralgödsel, istället för att omvandla ammoniaken och nitratet till kvävgas och släppa ut det i atmosfären som görs på Gryaab i det första stegen under reningsprocessen. Nackdelar med ammoniakstrippning är att det kräver en del kemikalier, NaOH, för att ändra pH värdet. Dessutom lades ammoniakstrippningsanläggningen i Ellinge ned, främst pga. höga drift- och underhållskostnader.

Att återvinna kvävet direkt utan att det förs tillbaka till atmosfären och sedan plockas ned igen skulle alltså innebära stora energibesparingar och en rejäl minskning på klimatpåverkan. Frågan är vilket sätt som är det bästa att återvinna kväve på genom rejektvatten, är det via kemiska processer där kvävet kan fällas ut eller är det via

ammoniakstrippning. Ammoniakstrippning har en del nackdelar men samtidigt är det mer likt dagens avloppsrening och därmed kanske det inte krävs lika stora ombyggnationer som kräver energi och tar fler år att bygga. I vilket fall som helst tyder allt på att det är bättre än Gryaabs kväveåtervinning i dagsläget.

Alger har potential att reducera kväve med upp till 95 %. Alger är inte bara bra för att minska kväve utan även fosfor, alger är dessutom experter på att ta upp tungmetaller. Mikroalger förbättrar även vattenkvaliteten och förbrukar betydligt mindre mängd färskvatten. Men det är inte slut där, alger har även beskrivits som den mest lovande råvaran för produktion av biobränsle och kan användas vid produktion av läkemedel. Förutom att alger används för att rena avloppsvattnet så används avloppsvattnet för att odla alger. En till fördel är att slammet som bildas vid avloppsvattenrening skulle kunna transporteras i avloppsrören som annars var gjorda för avloppsvattnet, slammet hade varit halt på grund utav alla oljor som finns algerna. Det hade varit ett hållbart alternativ istället för att slammet ska transporteras längs vägarna. Trots att alger visat bra resultat i pilotprojekt och är ett lovande system för framtiden så finns många obesvarade frågor. Vi har inte lyckats hitta information om vad som händer med det reducerande kvävet. Vart tar det vägen? Återvinns det endast i form av att algerna kan använda det för att växa eller kan människan få tag i kvävet? Fredrik Christersson var tveksam till att alger skulle fungera på stora reningsverk. Han tror att rening med hjälp av alger skulle innebära ett upptag av stora ytor och att det därför endast fungerar på små reningsverk. Hur skulle alger fungera ekonomiskt i längden och hur mycket energi krävs för att hålla i gång denna typ av rening?

Eftersom 85 % av kvävet finns i urinen hade separerade system varit ypperligt för att koncentrera mängden kväve för att sedan kunna återvinna det enklare och i större mängder. I våra tidigare beräkningar visas att med separerade system hade det varit möjligt att få in mellan 680 369,75 kg kväve/dag till 1 360 739,5 kg kväve/dag, jämfört med nuvarande 10 050 kg kväve/dag. I och med det hade det funnits större mängder kväve att kunna återvinna varje dag. Ett annat typ av separerade system beskriver att urinen samlas i stora tankar som töms i olika perioder av lokala bönder för att sedan spridas ut på odlingsfälten. Här finns debatter kring att det inte är så fräscht eller hälsosamt att äta mat som gödslats direkt med orenat urin. Om det är en ny modern åsikt eller inte är upp till var och en att själva ta ställning till. Dock så är dessa toaletter som krävs för att separera urin fortfarande väldigt dyra. Konsumenterna vill inte köpa något som fortfarande inte är helt utvecklat eller används till fullo än, vilket är förståeligt. Därav

blir det lite av en ond cirkel. Dessa system kommer börja fungera när det finns toaletter som passar, men toaletterna kommer inte köpas förrän systemet fungerar. Vi måste vara medvetna om att denna typ av ingrep är en början på ett helt nytt infrastruktursystem. Faktorer som måste samverka är juridiska krav, handelsregler, teknik, organisationer för konstruktioner och drift, arkitekter, allmänheten, acceptans av ingenjörer och ekonomisk konkurrenskraft med alternativa tekniker. Att bygga ett helt nytt system innebär mycket jobb, höga kostnader och det kommer uppstå framför allt tre tekniska aspekter som beskrivs i avsnittet *1.1.3 Separerade system: separera urin direkt vid toaletten*. Ett alternativ som skulle vara en bra början är lämpliga insamlingssystem och standardlösningar som för Sveriges matavfalls- och återvinningshantering. Trots att det skulle vara möjligt så blir hygien fortfarande ett problem, resterna måste vara mer eller mindre luktfria. Det finns många problem att lösa men det är ändå dags att börja med separerade avlopp nu i mer lokala och centrala städer. Exempelvis skulle dessa nya toaletter som separerar urin kunna implementeras i nybyggda områden. Inget är för sent, vi behöver vision, mod och sist men inte minst kapital.

8.2 Fosfor

Den modifierade membranbioreaktorn i experimentet som utfördes i Shandong University visade intressanta resultat gällande fosforutvinning samt rening av vatten. Avlägsnandet av fosfor från vattnet låg genomsnittligen på 53,3%, vilket är lågt jämfört med dagens reningsteknik på Gryaab. Andelen som kunde utvinnas från den totala inkommande fosfor låg på 37%, vilket är mindre än dagens återvinningsgrad på 76%. Dagens system återvinner fosfor i slam som gödsel till åkermarken, till skillnad från den modifierade MBR-tekniken som kan utvinna fosfor i form av högkoncentrerad fosfatlösning. Studien visade att med hjälp av ojämn luftning i perioder kan man öka den mikrobiella aktiviteten och att slammet kunde återanvändas.

I studien redogjordes inte faktorer såsom kostnader, kapacitet, underhåll- och energikrav för den modifierade membranbioreaktorn med intermitterent luftning. Det gör att det är svårt att bedöma hur lämplig och möjligt det är att implementera denna teknik på Gryaab utifrån studien. Det är därför också svårt att jämföra med dagens reningssystem på Gryaab. Däremot kan informationen om den vanliga MBR-tekniken, som IVL Svenska Miljöinstitutet och Stockholm Vatten och Avfall presenterar, ge en bild på dessa faktorer eftersom de grundar sig på samma teknik. Enligt studien skulle denna teknik minska behovet av underhåll samt reducera kostnaderna för både konstruktion och energi, i

jämförelse med den vanliga MBR-tekniken. Om man utgår från detta skulle investeringen och användningen av MBR att främjas. När det gäller huruvida det är lämpligt att implementera tekniken på Ryaverket skulle ett stort problem vara att det kostar väldigt mycket att bygga om det nuvarande systemet och ersätta stora delar av det. Detta skulle ta lång tid och påverka driften. Det skulle möjligtvis vara lämpligare att integrera denna teknik i nya reningsverk.

Mycket pekar på att MBR-tekniken kan vara en lösning på framtida krav på vattenreningen, och med resultatet från studien i Shandong University, skulle det vara intressant att undersöka den modifierade MBR-tekniken närmare. Det skulle öka möjligheterna att investera i tekniken, särskilt när det finns en potential för resursutvinning av fosfor i renare form.

Eco:P är inte REVAQ-certifierad vilket medför att reningsverken inte kan använda tekniken för större mängder vatten och därmed i större reningsverk. Tekniken har inte prövats i större skalor, därför är det osäkert hur bra det skulle passa i större reningsverk som till exempel Gryaab. I mindre skalor har den beprövats, NSVA Öresundsverket, och visat på goda resultat. Eco:P kan användas i befintliga reningsverk med biologisk fällning, därför krävs det inte omfattande tillbyggnationer eller större ändringar. Då kemisk fosforfällning används vid Gryaabs reningsverk krävs det att detta övergår till biologisk fällning innan man kan använda sig av tekniken. Dessutom behöver även Gryaabs inkommande flöde koncentreras innan en implementering av Eco:P kan ske. Mängden utvunnen fosfor varierar beroende på hur koncentrerat det inkommande flödet är. Med biologisk fosforrening finns en större potential för utvinning då det inkommande vattnet innehåller en högre mängd fosfor. I dagens reningsverk används fällningskemikalier vid utvinning av fosfor. Inom tekniken finns inget behov av kemikalierna vilket är fördelaktigt ur ett hållbarhetsperspektiv då transporten och tillverkningen av dessa är miljöförstörande.

Tre rör ut är väldigt nytt och det är fortfarande mycket som man inte vet om. Utifrån projektet som genomförts har tekniken en kapacitet att hantera vatten från 2000 personer. Jämför man med vad som kan hanteras av dagens på 800 000 personer har TRU inte förmågan att täcka detta. Tekniken passar bättre till nya områden där man avser att bygga nya avloppssystem eftersom en omställning till TRU kräver en ersättning av det konventionella systemet. Detta hade dels varit väldigt dyrt men också komplext då det hade krävt flera år att utföra. Däremot är fördelarna med systemet många såsom

fosforåtervinningen med tre gånger större potential än dagens, produktion av biogödsel och biogas samt uppvärmning av hemmen från samlad energi. Ett steg i rätt riktning hade därför varit att använda sig av detta system vid uppbyggnad av nya avloppssystem.

8.3 Cellulosa

Som nämnt i intervjun med Fredrik Christersson finns det stora möjligheter till resursutvinning för cellulosa från avloppsvatten. I dagens avloppsvattenhantering är det litet fokus på att ta fram en lösning som utvinnet specifikt cellulosa ur biomassan som annars används till förbränning för energitillverkning, och de två tekniker som forskats på i pilotförsöken grundar sig i andra länder.

En viktig aspekt att ta hänsyn till vid analys av resultaten är att varken tekniken bandfilter eller den finmaskiga silning varit dimensionerad för de mängder som Gryaab hanterar. Detta påverkar till störst sannolikhet kostnadsanalyser, energiförbrukning samt volym, då teknikerna skulle kunna behöva flera uppsättningar, vid jämförelse med pilotförsöken som snittade ca 45 000 personekvivalenter. Relativt Gryaabs ca 800 000 anslutna personer är det därmed onekligt att driftkostnader och volym kommer vara större.

En svårtolkad aspekt att ta hänsyn till är samhällets eventuella kritik mot de produkter som kan framställas med teknikerna. För bandfilter skrivs det väldigt positivt om vilka möjligheter som finns för den framställda cellulosan, och mängden murbruk som skulle kunna tillverkas från det annars dagliga svinnet. Samma positivitet saknas för den finmaskiga silningens tillämpning. Enligt pilotförsökets användningsområden är det återanvändbart för tillverkning av återvunnet pappersprodukter, bindemedel för asfalt men även förstärkningsmedel för byggnadsmaterial. Mottagligheten för återvunnen papperstillverkning anses mer svåraccepterad av samhället än de andra lösningarna, då den är "närmre" befolkning, och mer synlig än de andra tillämpningsområdena.

Även jämförelsen med dagens användning kan bli svårtolkad. I dagsläget används biomassan för tillverkning av biobränsle i Sverige, som står för en väldigt viktig del av transportmedel som används. Klimatpåverkan av förbränningen är en av anledningarna till att en ny lösning för användningsområdena sökes, men i jämförelse med icke förnybara resurser så anses biobränsle vara ett tydligt bättre alternativ.

Separerade system diskuteras i både resursutvinning för fosfor och kväve och skulle inte kunna direktillämpas på cellulosa, jämförelsen som skulle kunna dras är att inte slänga toalettpapper i avloppen, och istället i soptunnor. Det anser vi vara ett steg i motsatt riktning i den tekniska utvecklingen som samhället har gjort, och skulle till störst sannolikhet bemötas av kritik bland invånare som behöver ändra sina rutiner.

Trots att både tekniker visar på bra möjligheter, om man ser till utvinningsgraden, så är den stora variationen en stor nackdel då det innebär att tekniken inte anses vara stabil. Det kan kopplas till mognaden av teknikerna, och att man i dagens samhälle inte prioriterar att resursutvinna cellulosa, men är en faktor som med störst sannolikhet kommer stabiliseras vid tillämpning av teknikerna.

8.4 Energi

Värmepumps lösningar har visat sin effektivitet när det gäller värmeåtervinning från avloppsvatten. Med avseende på antalet anslutna personer i förhållande till återvinningspotentialen, visar det sig att EL återvinner mest värme. VS är mogen, dock krävs att man tar hänsyn till avloppsvattnets kvalité, tryck, syresättning och olika vattentemperaturer årets runt, till skillnad från Evertherm värmepumpar som har ett regleringssystem som fungerar automatiskt.

Både Sjölundas värmepumpar och Evertherm är tids-och kostnadskrävande. Exempelvis vid installationen av Sjölanda värmepumparna gjorde vibrationerna att kompressaggregaten måste epoxilimmas i betonggolvet och lokalen som byggdes ägde ett stort utrymme. När det kommer till Evertherm krävs markberedning för installering av tankarna samt en gjutning av platta i mark för att infästa dem vid placering utomhus. Denna typ av resurskrävande markarbete kan undvikas om installationen av Evertherm planeras redan i tidiga byggsleden, vilket Gryaab kan utnyttja i sina kommande projekt.

Evertherms tillverkningsföretag påstår att systemlösningens livslängd är 40–50 år, vilket är en ganska lång period som gör oss fundersamma över om det verkligen kan stämma. Evertherms lösning har möjligheten att lagra energin i tankar vilket gör att tappning och tömning inte behöver ske samtidigt för att kunna återvinna energin från lägenheternas spillvatten. EL:s payback-tid är cirka 40,7 år vilket tyder på att investeringen inte är lönsam och utgifter kommer att väga mer än besparingen.

Både VS och EL strävar efter minskning av koldioxidutsläpp, vilket gynnar Gryaab's hållbarhetsmål. VS kan minska koldioxidutsläpp upp till 50 000 ton medan Evertherm minskar utsläppen med 317 ton koldioxidekvivalenter under sin livstid med avseende på antalet anslutna personer.

Båda värmeåtervinningsteknikerna är testade på större skala och bidrar utmärkt till värmeåtervinning med mindre koldioxidutsläpp. EL installationskostnader tyder på att tekniken inte är lönsam, dock krävs det inga personal på plats under driftstiden. Att det inte behövs personal på plats kan väcka intresset hos olika reningsverk som vill spara personalkostnader för att utveckla deras system, men vad kommer att hända med befintliga anställda?

Beräkningar som genomförs i avsnitt 6.4 *Energi* tyder på att Gryaab kommer att återvinna mindre värme om Gryaab's värmepumpar skulle ha samma COP-värde som VS och EL. Det kan bero på olika faktorer som inte tas hänsyn till vid genomföringen av den enkla beräkningen. Exempelvis den exakta driftstiden och variationen på värden som gäller inkommande vattentemperaturer till Gryaab. Det kan också bero på att de teoretiska värdena som hämtades från VS:s och EL:s tillverkningsföretag gällande återvinningspotentialen är högre än verkligheten.

Vätgasproduktion gör att samhället blir ett steg närmare nettoutsläpp som är noll. Teknikerna som studerades är fortfarande under utveckling, därför finns det inga tydliga siffror på miljöpåverkan eller utvinningspotentialen på en större skala. Biologiska processerna som jäsning av avloppsslammet kräver särskilda förhållanden för att fungera, exempelvis bestämda pH värden, temperaturer och ljusmiljöer. RMIT forskning gällande biosolids möjliggör bindningen av kol i form av kolnanomaterial som är högvärdigt, vilket kan minska miljöbelastningen som beror på koldioxidutsläpp. Med hjälp av denna teknik undviks användningen av dyra metalloxidbaserade katalysatorer, vilket gynnar den cirkulära ekonomin. Dock är tekniken helt ny och under utvecklingen, därför krävs det mer forskning i framtiden för att stimulera den verkliga biogassammansättningen. Båda vätgasproduktionstekniker som studerades utnyttjar avloppsvattnets slam, vilket är bra för både ekonomin och miljön. Basvaran till processerna, det vill säga slam, kan hämtas på plats från reningsverket, vilket Gryaab kan ha en stor nytta av med avseende på att Gryaab jobbar med slambehandlingen.

9 Slutsats

Alla tre kvävetekniker har potential för att bidra till resursutvinning. ÅR verkar vara den mest lämpliga tekniken just nu. Alger har också stora potential i framtiden men det är mycket kring kostnad, effektivitet och yta som behöver lösas. Separerade system är inte en kemiskkomplicerad lösning och alla vet att det hade fungerat om vi gjorde det, men frågan är: Är samhället redo för att bygga en helt ny infrastruktur?

De studerade fosforteknikerna har alla tre potential för fosforåtervinning. I nuläget indikeras att struvit fällning är den med störst potential. Trots att MBR är en beprövad teknik kan det vara intressant att undersöka varianter av den i syfte att förbättra resursutvinningen. Det finns en högre förbättringspotential hos TRU eftersom den är i sitt tidiga skede och under pågående forskning. Lyckas man med denna förbättring kan denna teknik vara framtidens lösning för nya avloppssystem. Men frågan kvarstår om samhället är redo för denna omställning.

Bandfilter och silning är två tekniker som har stora möjligheter att ta utvinningspotentialen för cellulosa framåt. En av svårigheterna som utvecklingen eventuellt står inför är konkurrensen med energitillverkningen. Kostnader och komplikationer av omställning är ytterligare faktorer som kan försvåra, men de positiva aspekter som nämnts tidigare i rapporten kan förhoppningsvis bidra till möjligheten att införa bandfilter eller silning i avloppsvattensreningsprocessen.

När det gäller värmeåtervinning har både VS och EL visat en stor återvinningspotential och kan uppgraderas ännu mer genom att driva pumparna med 100% förnybar el för att uppnå en maximal återvinning och cirkulär ekonomi. Vätgasåtervinningstekniker JA och B är fortfarande under forskning vilket medför att man inte med säkerhet kan avgöra om de kommer att vara gynnsamma eller inte. Labbförsöken tyder på att återvinningspotentialen är stor. Däremot krävs det mer forskning på miljöpåverkan och de ekonomiska aspekterna.

Litteraturförteckning

- Ahlgren, S., Junestedt, C., Ahlström, M., & Lundin, E. (2020). *Atervinning av växtnäringsämnen ur avloppsvatten – hur gör vi hållbarhetsbedömningar på bästa sätt?* Uppsala: IVL Svenska miljöinstitutet.
- Anderberg, B. (den 23 02 2021). Rivstart: Så blir Per Bolunds 100 första dagar. *Aktuell hållbarhet*.
- Andersson, S. L., Westling, K., Andersson, S., Karlsson, J., Narongin, M., Munoz, A. C., . . . Baresel, C. (2021). *Long term trials with membrane bioreactor for enhanced wastewater treatment coupled with compact sludge treatment*. Stockholm : IVL Svenska miljöinstitutet.
- Andersson, S. L., Westling, K., Andersson, S., Laurell, C., Baresel, C., Narongin, M., . . . Bornold, N. (2017). *Pilotförsök med membranbioreaktor för avloppsvattenrening - Delrapport 3 - försöksår 3*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.
- ARENA. (u,d). *Proton Flow Reactor System*. Hämtat från <https://arena.gov.au/projects/proton-flow-reactor-system/> den 6 Maj 2022
- Bahr, B. v., & Kärrman, E. (2019). *Tekniska processer för fosforåtervinning ur avloppsslam*. Stockholm: RISE Research Institutes of Sweden AB.
- Bahr, B., & Hey, T. (2018). *Fosforåtervinning från avloppsvatten*. Bromma: Svenskt Vatten AB.
- Baresel, C., Lüdtke, M., Levlin, E., Fortkamp, U., & Ekengren, Ö. (2014). *Slamavvattning i kommunala reningsverk*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet AB.
- Boverket. (2021). *Bygg- och fastighetssektorn energianvändning*. Hämtat från <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/energianvandning/> den 4 Mars 2022
- Brink, A. (den 6 Juli 2016). *Alger kan bli bioenergi och rena avloppsvatten*. Hämtat från Svenska Yle: <https://svenska.yle.fi/artikel/2016/07/06/alger-kan-bli-bioenergi-och-rena-avloppsvatten>

- Chowdhury, R. B., Moore, G. A., Weatherley, A. J., & Arora, M. (den 01 01 2017). *Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation*. Hämtat från Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616309003> den 2 februari 2022
- Circulary. (den 11 April 2017). *Yara's recovery and reuse of nitrogen from municipal waste water*. Hämtat från Circulary.eu: <http://www.circulary.eu/project/yara-recovery/>
- Cornel, P., & Schaum, C. (den 01 03 2009). *Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs*. Hämtat från IWA Publishing: <https://iwaponline.com/wst/article/59/6/1069/15572/Phosphorus-recovery-from-wastewater-needs> den 7 februari 2022
- Cossio, C., McConville, J., Mattsson, A., Mercado, A., & Norrman, J. (2020). *Framework for sustainability assessment of small wastewater treatment systems in low and lower-middle income countries: method and tool*. Journal of Environmental Management.
- Degaardt, S. (2004). *Humanurin till åkermark och grönytor - avsättning och organisation i Göteborgsområdet*. Uppsala: SLU.
- EasyMining. (2021). *Project Nitrogen*. Hämtat från Easymining.se: <https://www.easymining.se/technologies/project-nitrogen/>
- EkoBalans. (u.d.a). *Vi älskar ekologisk balans!* Hämtat från EkoBalans: <https://ekobalans.se/om-oss/> den 24 mars 2022
- EkoBalans. (u.d.b). *Växtnäring från reningsverk*. Hämtat från EkoBalans: <https://ekobalans.se/vaxtnaring-fran-reningsverk/> den 14 mars 2022
- Ekobalans. (u.d.c). *eco:P-fosfor*. Hämtat från Ekobalans: <https://ekobalans.se/eco-p-fosfor/>
- Evans, S. (2021). *biomarketinsights.com*. Hämtat från <https://biomarketinsights.com/rmit-researchers-develop-novel-waste-management-technology/> den 7 Maj 2022

- Evertherm. (den 18 Mars 2020). *Evertherm sew*. Hämtat från https://assets.website-files.com/5df7622d35688ccc81186cfd/5ea979e7536b877426afcd6_EVT-Dimensioneringsblad-A4.pdf den 1 April 2022
- Evertherm. (u.d.). *Frågor och svar*. Hämtat från <https://www.evertherm.se/faq> den 1 April 2022
- Göteborg energi AB. (2020). *Årsrapport 2020 Rya värmepumpverk*. Göteborg.
- Göteborg Energi AB. (u.d.). *Göteborg energi*. Hämtat från https://web.archive.org/web/20100618183415/http://www.goteborgenergi.se/Om_oss_Var_verksamhet_Produktionsanlaggningar_Rya_Kraftvarmeverk_DXNI-2108519_.aspx den 8 Maj 2022
- Greenmatch. (2021). *Hur fungerar en värmepump?* Hämtat från <https://www.varmepumppriser.se/blogg/2014/05/hur-fungerar-en-vaermepump> den 24 Mars 2022
- Grefve, S. (2021). *Energiåtervinning av spillvatten-en studie av ett flerfamiljhus*. Umeå: Institutionen för Tillämpad Fysik och Elektronik.
- Gryaab. (2018). *Gryaab AB: General Statistics 2017*. Göteborg: Gryaab.
- Gryaab. (2020). *2020// Hållbarhetsredovisning*. Göteborg: Gryaab.
- Gryaab. (2020). *Biogas*. Hämtat från <https://www.gryaab.se/vad-vi-gor/biogas/> den 10 Maj 2022
- Gryaab. (u.d.a). *Avloppsvattenrening*. Hämtat från Gryaab: <https://www.gryaab.se/vad-vi-gor/avloppsvattenrening/>
- Gryaab. (u.d.b). *Gryaab*. Hämtat från <https://www.gryaab.se/wp-content/themes/gryaab/assets/animation-bv/vatten/utlopp.php> den 8 Maj 2022
- Gryaab. (u.d.c). *Kort om Gryaab*. Hämtat från Gryaab: <https://www.gryaab.se/vad-vi-gor/kort-om-gryaab/>
- Gryaab. (u.d.d). *Slambehandling*. Hämtat från Gryaab: <https://www.gryaab.se/vad-vi-gor/slam/slamhantering/>

- Gryaab. (u.d.e). *Vattenbehandling*. Hämtat från Gryaab: <https://www.gryaab.se/vad-vi-gor/avloppsvattenrening/vattenbehandling/> den 4 mars 2022
- Hammarby Sjöstadsverk. (u.d). *Hammarby Sjöstadsverk - en testanläggning i världsklass för nya vattenreningstekniker*. Hämtat från Hammarby Sjöstadsverk: <https://sjostad.ivl.se>
- Havet.nu. (den 29 4 2021). *Övergödning*. Hämtat från Havet.nu: <https://www.havet.nu/overgodning-> den 5 februari 2022
- Helsingborg stad. (den 19 5 2021). *Oceanhamnen*. Hämtat från H+ stadsförnyelseprojekt: <https://hplus.helsingborg.se/etapper/oceanhamnen/>
- IVL Svenska Miljöinstitutet. (u.d.). *MembranBioreaktor (MBR)*. Hämtat från Hammarby Sjöstadsverk - Forskning och utveckling för renare vatten: <https://sjostad.ivl.se/download/18.1369484715f59ce4bab311/1510055031325/MBR%20allmän.pdf>
- Jönsson, H. (2019). *Fosfor, kväve, kalium och svavel - tillgång, sårbarhet och återvinning från avlopp*. Uppsala : SLU Sveriges lantbruksuniversitet.
- Jansen, J. I., Särner, E., Tykesson, E., Jönsson, K., & Jönsson, L.-E. (2009). *Biologisk fosforavskiljning i Sverige - Uppstart och drift* . Stockholm: Svenskt Vatten Utveckling.
- Kärrman, E., Anderzén, C., von Bahr, B., Berg, J., & Nilsson, J. (2019). *Översikt över återvinning av fosfor och kväve från avlopp i nio utvalda länder*. Stockholm: RISE Research Institutes of Sweden.
- Kaszubska, G. (2020). *Rmit.edu.au*. Hämtat från <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2020/sep/biosolids-hydrogen> den 15 April 2022
- K-konsult Energi . (2012). *Vattenanvändning i hushåll* . Eskilstuna : Statens energimyndighet.
- Larsen, T. A., Peters, I., Alder, A., Eggen, R., Maurer, M., & Muncke, J. (2001). *The toilet for sustainable waste water management*. American Chemical society.

- Larsen, T. A., Udert, K. M., & Leinert, J. (2013). *Source separation and decentralization for wastewater management*. London: IWA Publishing.
- Learn metrics. (2022). *Understanding COP: Coefficient Of Performance Of Heat Pumps*. Hämtat från <https://learnmetrics.com/coefficient-of-performance/> den 24 Mars 2022
- Liu, Y., Lin, R., Man, Y., & Ren, J. (2019). *Recent developments of hydrogen production from sewage sludge by biological and thermochemical process*. Hong Kong: Elsevier Ltd.
- Livsmedelsverket. (den 2 3 2022). *Fosfor*. Hämtat från Livsmedelsverket: <https://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/naringsamne/salt-och-mineraler1/fosfor> den 4 februari 2022
- Naturskyddsföreningen. (den 16 Februari 2022). *Hur fungerar vätgas*. Hämtat från Naturskyddsföreningen: <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-vatgas/>
- Naturvårdsverket. (u.d.a). *Avloppsvattnets miljöpåverkan*. Hämtat från Naturvårdsverket: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/avlopp/avloppsvattnets-miljopaverkan/> den 3 februari 2022
- Naturvårdsverket. (u.d.b). *ÄMNESOMRÅDE Avlopp*. Hämtat från Naturvårdsverket: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/avlopp/> den 3 februari 2022
- Nayström, J. (2017). *Återvinn näringsämnen till jordbruket och reducera avloppsreningsverkets ammonium och fosfatbelastning*. Lindköping: Lindköpings universitet.
- Netinbag. (u.d.). *vad är Biosolid*. Hämtat från Netingbag: <https://www.netinbag.com/sv/science/what-is-a-biosolid.html>
- NSVA. (den 17 12 2021). *Helsingborg: Tre rör ut*. Hämtat från NSVA: <https://projekt.nsva.se/kommuner/helsingborg/tre-ror-ut/>
- Palmieri, S., G., C., Pastore, C., Giosuè, C., Akyol, Ç., Eusebi, A., . . . Fatone, F. (2019). *Pilot scale cellulose recovery from sewage sludge and reuse in building*. Elsevier Ltd.

- Patel, S., Kundu, S., Halder, P., Marzbali, M. H., Chiang, K., Surapaneni, A., & Shah, K. (2020). *Production of hydrogen by catalytic methane decomposition using biochar and activated char produced from biosolids pyrolysis*. Australia: Elsevier Ltd.
- Pedersen, K., Elding, L. I., Björn, L. O., & Erlandsson, U. (u.d). *Fosfor*. Hämtat från Nationalencyklopedin: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/fosfor>
- Regeringskansliet. (u.d.). *Mål för energipolitiken*. Hämtat från <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/energi/mal-och-visioner-for-energi/> den 4 Mars 2022
- Ruiken, C., Breuer, G., Klaversma, E., Santiago, T., & van Loosdrecht, M. (2012). *Sieving wastewater e Cellulose recovery, economic*. Elsevier Ltd.
- Rydegran, E. (den 17 Augusti 2021). *Fjärrvärme*. Hämtat från Energi företagen: <https://www.energiforetagen.se/energifakta/fjarrvarme/> den 8 februari 2022
- Rylander, H., & Wiqvist, W. (2009). *Rening av lakvatten, avloppsvatten och reduktion av koldioxid med hjälp av alger*. Malmö: Avfall Sverige.
- Salnes Filter. (2017). *Salsnes Filter Product Overview*. Hämtat från Salsnes Filter: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.salsnes-filter.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/10/Salsnes-ProductBrochure-A4-LR.pdf>
- SCB. (2022). *Sveriges befolkning*. Hämtat från <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/manniskorna-i-sverige/sveriges-befolkning/> den 2 Mars 2022
- Schaum, C. (2018). *Phosphorus: Polluter and Resource of the Future : Removal and Recovery from Wastewater*. London: IWA Publishing.
- SF, A., N, R., M, M., IA, B., A, I., MS, A., . . . Khan, Y. (2021). *Biohydrogen Production From Biomass Sources: Metabolic Pathways and Economic Analysis*. China: Frontiers in Energy Research.
- SOU. (2020). *Hållbar salmhantering*. Stockholm: Statens offentliga utredningar.

- Steffan, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., . . . Mace, G. M. (2015). *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*, Vol 347, 1259855-6. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- Stenström, F., Jansen, J. I., Chan, A. A., Eliasson, M., Eriksson, Y., Marsteng, A.-K., . . . Thelin, G. (2017). *Rejektvattenbehandling - en kunskapssammanställning*. Svenskt Vatten AB.
- Stockholm Vatten och Avfall. (u.d.a). *Avloppsreningsverk*. Hämtat från Stockholm Vatten och Avfall: <https://www.stockholmvattenochavfall.se/kunskap/sahar-renas-vatten-och-avlopp/avloppsrening/avloppsreningsverk/>
- Stockholm Vatten och Avfall. (u.d.b). *Om Stockholms framtida avloppsrening*. Hämtat från Stockholm Vatten och Avfall: <https://www.stockholmvattenochavfall.se/framtidensavloppsrening/om-projektet/>
- Stockholms universitet. (den 16 Januari 2015). *Fyra av nio planetära gränser överskrids*. Hämtat från Stockholms universitet: <https://www.su.se/forskning/fyra-av-nio-planet%C3%A4ra-gr%C3%A4nser-%C3%B6verskrids-1.218028>
- Stowa. (2010). *Influent fljnzeven In rwzI's*. Hämtat från Stowa: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202010/STOWA%202010-19.pdf>
- Sweden water research. (2017). *Uricycle - urinsorterande kretsloppslösning av urban växtnäring i avlopp*. Hämtat från Sweden water research: <https://www.swedenwaterresearch.se/projekt/uricycle/>
- Svenska Kyl & Värmepumpsföreningen. (den 28 November 2019). *Avloppsvattnet som värmer. Malmö*. Hämtat från https://www.youtube.com/watch?v=UB7b1M4hHoY&ab_channel=SvenskaKyl%26V%C3%A4rmepumpf%C3%B6reningen den 23 Mars 2022
- Svenskt Vatten. (2020). *Revaq - Årsrapport 2019*. Stockholm : Svenskt Vatten.
- Svenskt Vatten. (2022). *Revaq - Regler för certifieringssystemet*. Stockholm: Svenskt Vatten.

- Sveriges Miljömål. (den 27 november 2017). *Ingen övergödning - saker kommuner kan göra*. Hämtat från Sveriges Miljömål: <https://www.sverigesmiljomal.se/stod-och-rad-i-miljoarbetet/ingen-overgodning---saker-kommuner-kan-gora/>
- The Envirogen Group. (u.d.). *Cake Filtration*. Hämtat från The Envirogen Group: <https://www.envirogengroup.com/process-filtration/cake-filtration/>
- VA Mälardalen. (den 10 2 2020). *MBR-piloten på Hammarby Sjöstadsverk fortsätter 2020*. Hämtat från VA Mälardalen: <https://www.vamaldalen.se/nyheter/nyheter/mbrpilotenpahammarbysjostadsverkfortsatter2020.5.4447c37f16fa0999d19298b.html>
- Vahterus. (u.d.). *40 MW Ammonia Heat Pumps are Revolutionising District Heating in Sweden*. Hämtat från <https://vahterus.com/resources/cases/40-mw-ammonia-heat-pumps-are-revolutionising-district-heating-in-sweden/> den 24 April 2022
- Wang, Y.-K., Pan, X.-R., Geng, Y.-K., & Sheng, G.-P. (2015). *Simultaneous effective carbon and nitrogen removals and phosphorus recovery in an intermittently aerated membrane bioreactor integrated system*. *Nature*. Hämtat från <https://www.nature.com/articles/srep16281.pdf>.
- Westling, K., Kärrman, E., & Norström, A. (u.d). *Vattenvisionen – Forsknings- och innovationsagenda för vattensektorn, etappmål 2030*. Vatten visionen.
- Videbris, K.-E. (2022). *Miljörapport Gryaab, Ryaverket 2021*. Göteborg: Gryaab.
- Wikipedia. (den 22 April 2022). *Toalettpapper*. Hämtat från Wikipedia: https://sv.wikipedia.org/wiki/Toalettpapper#cite_note-GP-5
- Wikipedia Commons. (den 12 August 2009). *Belt Press*. Hämtat från Wikipedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BeltPress.svg>
- WWF. (u.d). *Ekonomi och planetens gränser*. Hämtat från WWF: <https://www.wwf.se/ekonomi-och-finans/inom-planetens-granser/> den 07 Mars 2022
- Zhu, L., Hiltunen, E., Shu, Q., Zhou, W., Li, Z., & Wang, Z. (2014). *Biodiesel production from algae cultivated in winter with artificial wastewater through pH regulation by acetic acid*. *ACADEMIA*.

