

Nya processvägar för effektiv slamhantering

Cecilia Bertholds
Ulrika Olofsson



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Röret & Klimat
Avlopp & Miljö
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Agneta Granberg (m), ordförande	Göteborg
Daniel Hellström, utvecklingsledare	Svenskt Vatten
Henrik Aspegren	VA SYD
Per Ericsson	Norrsvatten
Tove Göthner	Sveriges Kommuner och Landsting
Per Johansson (s)	Gävle kommun
Stefan Johansson	Skellefteå kommun
Annika Malm	Kretslopp och vatten, Göteborgs Stad
Lisa Osterman	Örebro kommun
Kenneth M. Persson	Sydsvatten AB
Carl-Olof Zetterman	SYVAB

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan återopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 14057
167 14 BROMMA
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Nya processvägar för effektiv slamhantering
Title of the report:	Novel processing routes for effective sewage sludge management
Författare:	Cecilia Bertholds, Käppalaförbundet; Ulrika Olofsson, UMEVA
Rapportnummer:	2014-23
Antal sidor:	46
Sammandrag:	Syftet med denna rapport har varit att sammanfatta resultaten från EU-projektet ROUTES, baserat på vad som presenterades på slutkonferensen för slutanvändare. I projektet utvärderades, med hjälp av benchmarking och livscykelanalys, tekniker för att minska slammängder och förbättra slamkvaliteten för att uppnå en hållbar slambehandling och avsättning. Resultaten från benchmarking visar att teknikerna fungerar praktiskt, men att det krävs mer forskning innan de kan användas i full skala.
Abstract:	The aim of this project was to summarize the results from the EU-project ROUTES, based on the results presented at the final conference for end users. The project was evaluated, using benchmarking and life-cycle analysis, techniques to reduce sludge volumes and improve sludge quality to achieve sustainable sludge treatment and disposal. The benchmarking results show that the techniques work practically, but more research is needed before implementation in full scale.
Sökord:	Avloppsslam, gödsel, hygienisering, minska slammängd, förbättra slamkvaliteten, benchmarking, livscykelanalys
Keywords:	Sewage sludge, fertilizer, hygienization, reduction of sludge, improve sludge quality, benchmarking, life-cycle analysis
Målgrupper:	Avloppsreningsverk, kommuner och myndigheter samt konsulter inom området
Omslagsbild:	Bilden härrör från ROUTES hemsida och inkluderar även ROUTES logotyp. Godkänd publicering av dr Mininni, Water Research Institute of Italian National Research Council
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2014
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB
Om projektet	
Projektnummer:	14-102
Projektets namn:	ROUTES – Novel processing routes for effective sewage sludge management
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling

Förord

Behandling av avloppsvatten och hantering av avloppsslam är globala frågor med växande framtida utmaningar. Med anledning av detta startades år 2011 ett treårigt EU-projekt, ROUTES – Novel processing routes for effective sewage sludge management, där cirka 70 % av projektets totala budget har finansierats av Europeiska kommissionen.

Vi har i denna rapport sammanställt de resultat som presenterades den 2 april 2014 i Braunschweig, Tyskland, vid projektets slutkonferens för potentiella användare, med tyngdpunkt på det som är relevant utifrån svenska förhållanden.

Vår ambition är att rapportens innehåll ska vara användbar för små, medelstora och stora avloppsreningsverk vid val av framtida processförändringar för att möjliggöra en lämplig slamhantering. Den intresserade bör dock studera de referenser som anges i texten eftersom denna rapport är ett sammandrag av vad som presenterades i Braunschweig.

Detta arbete har finansierats av Svenskt Vatten Utveckling.

Cecilia Bertholds, Käppalaförbundet
Ulrika Olofsson, UMEVA

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	6
Summary	7
1 Inledning	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Syfte.....	10
2 Material och metod	11
2.1 Konferensens upplägg	11
2.2 Avgränsningar	11
3 Resultat	12
3.1 Slamhantering i Europa	12
3.2 Hygieniserande effekt vid olika slambehandlingsalternativ	13
3.3 Benchmarking och LCA – utvärdering	14
3.4 Riskanalys organiska föreningar	15
3.5 Utvärdering av nya slambehandlingsalternativ	17
3.6 Sammanfattning – resultat benchmarking och LCA.....	33
3.7 Nya metoder för kvalitetskontroll av slam.....	35
4 Diskussion	36
5 Slutsatser	37
6 Referenser	38
Elektroniska källor	40
 Bilagor	
1 Medverkande partners i ROUTES konsortium	41
2 Delprojekten i WP 1–7 (in English)	42

Sammanfattning

Behandling av avloppsvatten och hantering av avloppsslam är globala frågor med växande framtida utmaningar. Med anledning av detta startades år 2011 ett treårigt EU-projekt, ROUTES, där cirka 70 % av projektets totala budget har finansierats av Europeiska kommissionen. Denna rapport är ett sammandrag av vad som presenterades den 2 april 2014 i Braunschweig, Tyskland, vid projektets slutkonferens för potentiella slutanvändare. För ytterligare information bör den intresserade studera de referenser som anges i texten.

I Europa finns ett stort intresse av att tillvarata de resurser som finns i avloppsslammet, till exempel genom biopolymerproduktion, utvinning av växtnäringsämnen och biogasproduktion. Minskade slammängder och förbättrad slamkvalitet anses viktigt för att uppnå en hållbar slambehandling och avsättning. I ROUTES utvärderades tekniker som kan uppnå detta, till exempel termofil anaerob rötning och termisk hydrolys.

Vid utvärdering av projektets föreslagna tekniker för behandling av avloppsvatten och slam användes benchmarking och livscykelanalys (LCA) som verktyg. Även om benchmarkingresultaten visar att samtliga föreslagna lösningar fungerar praktiskt så krävs mer forskning innan teknikerna kan användas i full skala. Resultaten från LCA visar generellt att den energi som krävdes för att minska slammängden inte kompenseras av den vinst som uppkom vid reducerad slammängd. För flera av teknikerna medförde minskad slammängd att fosforhalten i utgående vatten steg samtidigt som emissionen av lustgas från reningen ökade. Ytterligare en slutsats var att faktorer som kan innebära en risk vid användning av avloppsslam på åkermark, såsom toxicitet och patogener i slam, bör utredas med en mer utvecklad metodik.

Risker med slamspridning på åkermark undersöktes genom försök i laboratorie- och fältskala. Försöken visade att organiska ämnen som binds till slam också binds effektivt i jorden och att pH och vattnets egenskaper har en stor inverkan på adsorptionen. Vid bevattning av jord med avloppsvatten innehållande mer polära ämnen reducerades dessa i stor utsträckning och endast mycket persistenta och icke adsorberande ämnen återfanns i grundvattnet.

Mikrobiella indikatorer bör användas för att utvärdera hygienisering av slam. *E. coli* och *Salmonella* anses som lämpliga indikatororganismer vid bedömning av fekal kontaminering av bakterier och somatiska bakteriofager anses som lämplig indikator för enterovirus. En slutsats som dras är att det krävs bättre styrning och lagstiftning kring smittskydd i EU:s slamdirektiv och att analysmetoder behöver vidareutvecklas.

Det viktiga uppströmsarbetet vid källan för att minimera oönskade ämnen till avloppsreningsverk har inte diskuterats och utvärderats inom ROUTES. Eftersom Sverige har positiva erfarenheter av uppströmsarbete och tycker att det är en viktig aspekt som det bör tas hänsyn till när beslut fattas om framtida slam användning, hade det varit önskvärt att även detta hade uppmärksamats i projektet.

Summary

Wastewater treatment and management of sewage sludge are global issues with growing future challenges. For this reason started, in 2011, a three-year EU-project, ROUTES, where about 70 % of the total budget was funded by the European Commission. This report summarizes the results presented at the project's final conference for potential end users (Braunschweig, Germany, April 2nd 2014). For additional information, the reader is referred to study the references given in the text.

In Europe, there is an interest for utilization of resources available in sewage sludge, e.g. via biopolymer production, extraction of nutrients and biogas production. Reduced sludge volumes and improved sludge quality is considered essential to achieve sustainable sludge treatment and disposal. Techniques that can achieve this were evaluated in ROUTES, for example, thermophilic anaerobic digestion and thermal hydrolysis.

Benchmarking and Life-Cycle Analysis (LCA) were used in the evaluation of the proposed techniques. Benchmarking results show that all the proposed solutions work practically, although, more research is needed before the techniques can be used in full scale. LCA results generally show that the energy required to reduce the amount of sludge was not compensated by the profit generated from the reduced amount. For many of the techniques, decreased amount of sludge increased phosphorus in the effluent as well as increased emission of nitrous oxide from the treatment. Another conclusion was that factors that may pose a risk when sewage sludge is used on agricultural land, such as toxicity and pathogens in sludge, should be investigated with a more developed methodology.

Risks of spreading sludge on agricultural land were investigated by experiments in laboratory and field scale. The experiments showed that organic compounds adsorbing to sludge also effectively adsorb in the soil and that pH and water characteristics have great influence on the adsorption. Irrigating the soil with wastewater containing more polar compounds resulted in high reduction of these compounds and only very persistent and non-adsorbing compounds were found in groundwater.

Microbial indicators should be used to evaluate the hygienization of sludge. *E. coli* and *Salmonella* are considered as suitable indicator organisms for the assessment of faecal contamination of bacteria and somatic bacteriophages as indicator for enteroviruses. The project emphasizes the need for better governance and regulation of the disease control in the EU Sludge Directive and that the analyses need to be further developed.

The important upstream work to minimize unwanted compounds in the wastewater at their source has not been discussed and evaluated within ROUTES. Systematic upstream work has a long tradition in Sweden and is an important part of the work with sludge improvement. It would therefore have been desirable if upstream work was included in this project.

1 Inledning

Slamhantering och slamanvändning i Europa står inför flera utmaningar – till exempel minskat antal deponier som kan täckas med slam, opposition mot slamspridning på åkermark och nya slamdirektiv där striktare krav för metaller, organiska föreningar och krav på hygienisering kan bli aktuella.

ROUTES är ett EU-projekt som syftar till att ta fram innovativa lösningar för slambehandling och användning som är hållbara på lång sikt med avseende på ekonomi, teknik och miljö. Denna rapport sammanfattar de resultat som presenterades vid projektets slutkonferens för potentiella användare. Konferensen arrangerades den 2 april 2014 i Braunschweig, Tyskland. För mer information bör den intresserade studera de referenser som anges i texten.

1.1 Bakgrund

ROUTES – Novel processing routes for effective sewage sludge management (<http://www.eu-routes.org/>), kontraktnummer 265156, är ett projekt samfinansierat av Europeiska kommissionen inom ramen för sjunde ramprogrammet, 1982/2006/EG (EU, 2006). Det treåriga projektet startade den 1 maj 2011 och avslutades den 30 april 2014. Av den totala budgeten på 4,89 M€ har 3,36 M€ finansierats av EU-bidrag, resten har finansierats av ROUTES konsortium. I ROUTES konsortium medverkade totalt 18 partners (se bilaga 1). En partner var från Kanada och övriga från sju europeiska länder, varav två från Sverige (Chalmers tekniska högskola och Anox-Kaldnes AB). Konsortiet koordinerades av the Water Research Institute of Italian National Research Council (CNR-IRSA).

1.1.1 Mål och syfte med ROUTES

Det övergripande målet med projektet ROUTES var att:

- utveckla nya processvägar och innovativa tekniker för behandling av avloppsvatten och slam för att:
 - a) förbereda slam för jordbruksändamål genom att omvandla det till en ren och stabiliserad produkt med avseende på låg förekomst av organiska föroreningar och tungmetaller, samt säkerställa ett hygieniskt slam.
 - b) minimera slamvolymen.
 - c) främja material och energiåtervinning vid rötning genom exempelvis ökad biogasproduktion, produktion av biopolymerer och ammoniumsulfat (gödselprodukt).
 - d) minimera utsläpp av oönskade ämnen vid slamavsättning.
 - e) i full skala utvärdera våtoxideration av slam som ett hållbart alternativ till förbränning.

- f) minimera energiåtgången vid pumpning genom att justera torrsubstanshalten (TS) vid en avloppsreningsanläggning där slam pumpas från produktionsstället till en central anläggning.
- utvärdera om det föreligger någon påverkan på jordbruksmarken vid slamgödning.
- bedöma den ekonomiska, tekniska och miljömässiga hållbarheten i de föreslagna teknikerna.

Förväntade resultat från projektet var att (i) jämföra de innovativa tekniska lösningarna med ett referensalternativ, (ii) minska slamvolymen och (iii) att stödja relevant EU-politik, till exempel vad gäller slamanvändning på jordbruksmark genom att bedöma interaktioner mellan slam och jord och föreslå lämpliga slamhygieniseringsmetoder. Om de föreslagna teknikerna implementeras så förväntas en minskning av den totala miljöbelastningen från avloppsreningsystem.

1.1.2 ROUTES – arbetsmetodik

I ROUTES-projektet klassificerades avloppsreningsverk som små vid belastning <20 000 pe, som medelstora vid belastning 20 000–100 000 pe och som stora vid belastning >100 000 pe. Ett pe definierades som 273 liter avloppsvatten per dag innehållande 220 mg suspenderat material, 500 mg COD, 40 mg totalkväve och 5,5 mg totalfosfor per liter.

Projektets syfte var att ta fram olika lösningar som kan tillämpas vid de varierande förhållanden som råder i Europa, och med hänsyn till avfallshierarkin i direktivet 2008/98/EG om avfall (EU, 2008). De lösningar som presenteras har studerats i laboratorie-, pilot- eller fullskala. Applicerbara lösningar och nya processvägar för slamhantering, baserade på bästa integrationen mellan vatten och slambehandlingslinjerna, ska delges till Europeiska kommissionen och till de tekniska och vetenskapliga medlemmarna.

1.1.3 ROUTES – Work Packages (WP)

I ROUTES har sju parallella projekt genomförts, Work Package 1–7 (WP 1–7), se tabell 1-1. Alla delprojekt i respektive WP redovisas i bilaga 2.

Tabell 1-1 Sammanställning över ämnesområden och antal delprojekt i ROUTES WP 1–7.

WP	Ämnesområde	Delprojekt
1	Förberedelse för användning av slam i jordbruket	6
2	Processer för omhändertagande av slam	10
3	Praktiska aspekter	5
4	Slam-jord-interaktioner	10
5	Integrerad hållbarhetsbedömning	4
6	Spridning av projektresultat	5
7	Samordning och projektledning	1

Nedan följer en överskådlig beskrivning av WP 1–7.

- *WP 1* syftar till att utvärdera och optimera innovativa slambehandlingsprocesser som kan tillämpas på medelstora och stora avloppsreningsverk för att åstadkomma ett slam med hög kvalitet lämplig för återanvändning i jordbruket.
- *WP 2* syftar till att utvärdera och optimera innovativa tekniker för att minimera slamvolymen och alternativ för omhändertagande av slam som kan tillämpas på små, medelstora och stora avloppsreningsverk.
- *WP 3* syftar till att i full skala testa innovativ teknik för minimering och omhändertagande av slam som kan tillämpas på medelstora och stora avloppsreningsverk.
- *WP 4* syftar till att utvärdera en eventuell skadlig inverkan på miljön vid användning av slam i jordbruket.
- *WP 5* syftar till att upprätta tekniska flödesscheman i olika system för behandling av avloppsvatten enligt de föreslagna ändringar som utarbetats i WP 1–3 för att utvärdera deras ekonomiska och tekniska bärkraft. Bland annat utförs Cost-Benefit Analysis, CBA. Bedömning av hållbarhet (miljöaspekter) baseras på resultat i WP 4 och utförs med hjälp av Life-Cycle Analysis, LCA.
- *WP 6* syftar till att tillhandahålla resultat för en bättre hantering av avloppsslam. Målet är att sprida resultaten så brett och effektivt som möjligt till slutanvändare, forskare och politiker samt att hitta sätt att främja praktiskt tillämpning.
- *WP 7* syftar till att säkerställa en effektiv projektledning och samordning samt att arbetsplan, tidsplan och budget följs.

1.1.4 ROUTES – rapportering

När ROUTES-projektet avslutades (30 april 2014) hade 32 vetenskapliga artiklar publicerats och revision av ytterligare 20 publikationer var i full gång. Medverkande forskare i projektet har deltagit och presenterat framkomna resultat på mer än 60 internationella och nationella konferenser. På ROUTES hemsida (<http://www.eu-routes.org/>) finns fem nyhetsbrev, två broschyrer, två flygblad, 10 faktablad och 12 posters tillgängliga samt diverse rapporter och presentationsmaterial. Tyvärr anses projektets slutrapporter som konfidentiella av Europeiska kommissionen. Även för flera av referenserna i denna rapport krävs behörighet som ”end user” för åtkomst.

1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att sammanställa de resultat som kommit fram i EU-projektet ROUTES, baserat på presentationerna vid slutkonferensen, med fokus på att översiktligt presentera resultat relevanta för svenska avloppsreningsverk. Referenserna i denna rapport är huvudsakligen hämtade från ROUTES hemsida (<http://www.eu-routes.org/>), där presentationsmaterial från slutkonferensen och rapporter av delprojekten finns tillgängliga.

2 Material och metod

Presentationer och diskussioner från ROUTES slutkonferens för användare har varit det huvudsakliga underlagsmaterialet för denna sammanställning, men även tidigare presenterade resultat från projektet har använts.

2.1 Konferensens upplägg

Konferensen delades upp i följande sessioner:

- 1 Management aspects and sludge disinfection.
- 2 German stakeholder's view and sludge-soil interactions.
- 3 Innovative treatment solutions for small size plants.
- 4 Innovative treatment solutions for medium size plants.
- 5 Innovative treatment solutions for large size plants.
- 6 New tools and tests for assessing sludge properties.
- 7 Discussion and conclusions.

I denna rapport presenteras inte sessionernas innehåll strikt efter konferensens upplägg. Rapporten redovisar slamhantering i Europa, hygieniserande effekt vid olika slambehandlingsalternativ, benchmarking och LCA, riskanalys av organiska föreningar, utvärdering av nya slambehandlingsalternativ samt nya metoder för kvalitetskontroll av slam.

2.2 Avgränsningar

För avgränsningar vid utförande av benchmarking och LCA se kapitel 3.3.

Inom projektet tas biopolymerproduktion upp för stora reningsverk. Fördjupade studier har genomförts men dessa presenterades inte på konferensen och tas därför inte med här.

Eftersom främst presentationsmaterial och diskussioner från konferensen använts som underlag presenteras bakgrund och syfte till projekten, övergripande resultat och slutsatser. För metodbeskrivningar och mer detaljerad resultatredovisning hänvisar vi till rapporterna som finns tillgängliga på ROUTES hemsida (<http://www.eu-routes.org/>). Slutrapporterna anses som konfidentiella av Europeiska kommissionen och har inte publicerats på hemsidan.

WP 6 och 7 diskuteras inte i denna rapport.

3 Resultat

3.1 Slamhantering i Europa

3.1.1 Trender

Det finns ett stort intresse i Europa av att utveckla olika slambehandlingsalternativ och att hitta alternativa avsättningar av slam. Idag utgör kostnad för slambehandling och avsättning 15 till 25 % av den totala kostnaden för avloppsvattenrening. Detta i kombination med bristen på fosforgruvor i Europa gör att intresset för att hitta nya hållbara slambehandlingsmetoder och avsättningar är stort.

Slambehandlingsmetoder och avsättningar skiljer sig åt mellan olika länder beroende på opinion, folktäthet, behov av slamåterförsel till åkermark och lagstiftning. Till exempel har andelen slam till åkermark i Spanien och England ökat de senaste tio åren samtidigt som det skett en kraftig minskning i Schweiz. Totalt i Europa har slamanvändningen till åkermark minskat och förbränning av slam ökat. Idag förbränns över 90 % av allt slam i Schweiz och Nederländerna och cirka hälften av slammet i Tyskland och Belgien. Den vanligaste förbränningsmetoden i Europa är fluidiserande bädd. Det finns cirka 80 sådana anläggningar i Europa där slam samförbränns med kol, hushållsavfall eller cement följt av att askan sedan deponeras (Kroiss, H., 2014).

En allmän trend när det gäller opinionen kring slam är att fokus har skiftat från diskussion av metaller till diskussion om tillförseln av organiska föreningar och nanopartiklar, problem med smittspridning och risk för resistens.

Stort intresse finns för metoder som tar till vara de resurser som finns i avloppsslammet genom exempelvis biopolymerproduktion, utvinning av växtnäringsämnen och biogasproduktion. Minskade slammängder och förbättrad slamkvalitet är viktigt för hållbar slambehandling och avsättning. Exempel på tekniker som kan uppnå detta är termofil anaerob rötning och termisk hydrolys. Det senaste decenniet har ett antal regionala lösningar för slamhantering utvecklats, oftast drivna av politiska och ekonomiska motiv. Exempel på regionala lösningar som presenterades under konferensen är samrötning med matavfall, pumpning av slam till större verk och våtoxideration (Mininni, G., 2014).

3.1.2 Regelverk

EU:s slamdirektiv, Sewage Sludge Directive 86/278/EEC (EU, 1986), är det första direktivet för slamspridning på åkermark och är det som gäller än idag. Reglerna syftar till att säkerställa att slam kan användas på åkermark utan negativ inverkan på människors hälsa, markmiljö och/eller grödor. Direktivet reglerar bland annat metallkoncentration i slam samt ställer krav som syftar till att minska risk för smittspridning. Direktivet anger även en högsta tillåten giva med avseende på växtnäring i slammet.

Avloppsvattenreningen är beroende av att producerat slam kan avsättas på ett säkert sätt. Därför bör avloppsvattenrening, slamhantering och avsättning

behandlas som en enhet och ingå under en gemensam lagstiftning. Idag regleras avloppsvattenrening under EU:s vattendirektiv, Water Framework Directive 2000/60/EC (EU, 2000) och EU:s avloppsdirektiv, Urban Waste Water Treatment Directive 91/271/EEC (EU, 1991) och slamavsättning regleras i EU:s slamdirektiv 86/278/EEC (EU, 1986). Avloppsslam klassas som ett avfall och regleras sedan 2008 också i EU:s avfallsdirektiv, Waste Framework Directive 2008/98/EC (EU, 2008). Att avloppsvattenrening och slamavsättning hanteras i olika lagstiftningar leder till problem då det i praktiken handlar om samma material och energiflöden.

Slamstrategier och lagstiftning varierar mellan olika länder vilket har en stor inverkan på slammets avsättningsmöjligheter. Frankrike, Italien och Spanien har i stort samma krav som i EU:s slamdirektiv (EU, 1986). I Storbritannien finns inga gränsvärden för metaller i slammet utan endast för den jord där slam ska tillföras (Mininni, G., 2014). I Schweiz är slamspridning på åkermark förbjudet.

I EU:s slamdirektiv (EU, 1986) finns regler som minskar risk för smittspridning. Exempelvis får slam inte spridas på betesmark eller innan skörd. Däremot finns inga reduktionskrav för virus och bakterier.

Flera länder ställer hårdare krav kring smittskydd än de som anges i EU:s slamdirektiv (EU, 1986). Till exempel ställer Danmark, Finland, Italien, Polen och Spanien krav på kontroll av *Salmonella*. Andra patogener som kontrolleras är fekala indikatorbakterier, såsom streptokocker (Danmark), *Escherichia coli* (*E. coli*; Finland, Spanien) och enterobakterier (Luxemburg), och enterovirus (Frankrike).

Under 2010 har ett arbetsdokument tagits fram på uppdrag av EU där det bland annat föreslås gränsvärden för *E. coli* < 500 cfu/gram och *Salmonella* < 1 cfu/50 gram för avloppsslam som ska användas på åkermark utan särskilda restriktioner. Det föreslogs även att nya slambehandlingsmetoder ska uppfylla 6 log 10 reduktion av testorganismer som exempelvis *Salmonella Senftenberg*. Detta har ännu inte antagits.

3.2 Hygieniserande effekt vid olika slambehandlingsalternativ

I projekten WP 1 och WP 4 utvärderades vilken effekt de föreslagna behandlingsalternativen (beskrivs i kapitel 3.5) har på reduktion av smittämnen. De föreslagna innovativa lösningarna jämfördes med konventionella slambehandlingar. Även lämpligheten hos olika indikatorbakterier och risken för återväxt undersöktes.

Eftersom det finns en stor mängd patogener och eftersom analysmetoderna för de olika patogenerna är komplexa används oftast indikatororganismer som är lätta att detektera och som det finns standardiserade analysmetoder för när en hygieniseringsmetod ska bedömas. Exempel på indikatorbakterier är *E. coli*, fekala koliforma bakterier, klostridier och somatiska kolifager. Indikatorbakterier kan även användas för att detektera parasiter och virus. Exempelvis kan sporer från *Clostridium perfringens* (*C. perfringens*) användas som indikator för att detektera cystor från protozoer

i vatten medan somatiska kolifager kan användas som indikator för vattenburna virus. En bedömning av lämpligheten hos de olika indikatorbakterierna utfördes och slutsatserna var bland annat att *E. coli* och *Salmonella* är lämpliga indikatorer vid bedömning av fekal kontaminering av bakterier och att somatiska bakteriofager är bra indikatorer för enterovirus.

Även tendensen till återväxt vid lagring undersöktes genom analys av återväxt av *E. coli*, sulfitreducerande klostridiesporer, somatiska kolifager och *Salmonella* för slam som behandlats genom mesofil eller termofil rötning eller kompostering och därefter lagrats i 22 °C eller 37 °C (Blanch A. R. m.fl., 2013).

I försöket skedde ingen återväxt men däremot observerades en tendens till återhämtning hos skadade *E. coli*-celler under de första timmarna av lagring i 37 °C för termofilt rötat slam. Det gör att resultatet bör tolkas med viss försiktighet när *E. coli* används som indikatorbakterie för att analysera återväxt.

3.3 Benchmarking och LCA – utvärdering

För att uppnå syftet att hitta nya processer och innovativa tekniker för behandling av avloppsvatten och slam användes benchmarking och LCA som verktyg. Nya slambehandlingsalternativ jämfördes med avseende på ekonomi, teknik och miljö med referensalternativ som definierades för små, medelstora respektive stora avloppsreningsverk. Problem med nuvarande lösningar identifierades och förslag på slambehandlingsalternativ som ska bidra till att lösa dessa problem utarbetades.

3.3.1 Benchmarking – metodbeskrivning

Benchmarking används för att jämföra hur de nya slambehandlingsalternativen påverkar ekonomi och teknik. Syftet var att presentera lösningar som är effektiva och har ett brett användningsområde och som är enkla att integrera i verksamheten.

Följande aspekter har inkluderats:

- Driftsäkerhet.
- Komplexitet och möjligheten att integrera metoden i redan existerande strukturer.
- Flexibilitet hos metoden jämfört med referensalternativet.
- Mängd producerade restprodukter (fasta material, vätskor och gaser).
- Konsumtion av råmaterial och kemikalier (reagens).
- Förbrukning och nettoproduktion av energi.
- Påverkan av transporter.
- Hänsyn till myndighetsbeslut samt till sociala faktorer.
- Kostnad (material, personal, avsättning av restprodukter, kapitalkostnad m.m.).

Mer information om avgränsningar samt massbalanser för de olika scenarierna finns beskrivna på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Bertanza, G. m.fl., 2012a, 2012b).

3.3.2 LCA – metodbeskrivning

LCA används för att få en helhetsbild över hur de olika slambehandlingsalternativen påverkar miljön. Varje undersökt scenario i ROUTES inkluderade behandling av avloppsvatten och slam, slamtransport och slutanvändning, produktion och transport av kemikalier, energi och bränsle. Däremot är inte påverkan från transport av avloppsvatten från anslutna personer till reningsverket medtaget eftersom det inte antas påverkas av att nya behandlingsmetoder testas. Även befintlig/nybyggd anläggning (s.k. kapital i form av byggnader) exkluderas då påverkan från dessa inte var signifikant. Biprodukter från behandlingen som exempelvis gödselmedel, värme och elektricitet räknas in i LCA. De värderas genom antagandet att de ersätter existerande råvaror som exempelvis mineralgödsel.

Genom att ta in flera olika miljöaspekter vid utvärderingen och titta på hela kedjan minskas risken att till exempel en förbättrande åtgärd när det gäller ett miljöområde leder till en försämring för ett annat miljöområde.

I LCA-studierna utvärderades fyra olika faktorer som kan påverka miljön:

- Global uppvärmning.
- Risk för försurning.
- Risk för övergödning – sötvatten, saltvatten och mark.
- Risk för fotokemisk ozonpåverkan.

Även human- och ekotoxicitet och patogenrisk bedömdes. Som underlag användes då resultatet från WP 4. Eftersom väl utvecklade metodik för bedömning av dessa tre faktorer saknas behandlades de separat. För bedömning av patogenrisk utvecklades en ny metod inom projektet som beskrivs i kapitel 3.7.

3.4 Riskanalys organiska föreningar

I WP 4 har organiska ämnens nedbrytning och transformationsvägar under aerobiska och anaerobiska förhållanden i jorden, nedbrytningsprodukter, adsorption samt hur olika markegenskaper påverkar adsorption och transformation undersökts. Undersökningarna har utförts både i laboratorieskala genom batch- och kolonnförsök och i fält genom lysimeterförsök. Följande ämnen har undersökts: climbazol, nedbrytningsprodukter från climbazol, triklosan, triklokarban, didekyl-dimetyl-ammoniumklorid, benzyl-dimetyldodekyl-ammoniumklorid, benzyl-dimetyl-tetradekyl-ammoniumklorid, dia-trizoat, karbamazepin, iopromid och nedbrytningsprodukter från iopromid. Organiska föreningars polaritet avgör om de främst går ut med utgående avloppsvatten (hydrofila/polära ämnen) eller binder till slammet (hydrofoba/opolära ämnen). I de här försöken har främst de hydrofoba ämnena som binder till slam undersökts. Som referens har även lysimeterförsök utförts på fält som har bevattnats med behandlat avloppsvatten där både de hydrofila och de hydrofoba ämnena tillförts jorden.

Svampmedlet climbazol är det ämne som har undersökts mest ingående. Climbazol används i mjällschamp (ca 2 %) och i kosmetika (ca 0,5 %) och

är toxiskt både för terrestra och akvatiska organismer (Kunkel, U., 2014a). Ämnet ligger i mellanskiktet mellan polär och opolär och ungefär 60 % hamnar i avloppsvattnet och 40 % i slammet. När climbazol tillförs jorden adsorberar den reversibelt/irreversibelt till markpartiklar eller bryts ned till olika nedbrytningsprodukter. Det kan även ske läckage till grundvattnet.

I laboratorium utfördes batch- och kolonnförsök med slam och avloppsvatten som hade spikats med de aktuella organiska föreningarna. Laboratorieförsöken följdes upp med fältförsök där lysimetrar användes för att samla upp lakvatten som analyserades med avseende på dessa föreningarna. Fältförsöken utfördes i Braunschweig, Tyskland, på fält som gödslats i mer än 50 år med en blandning av renat avloppsvatten och slam.

Batchförsöken visar att climbazol vid aeroba eller nitratreducerande förhållanden i stor utsträckning transformeras till den stabila nedbrytningsprodukten 1-(4-klorofenoxyl)-1-(1-imidazolyl)-3,3-dimetyl-2-butanol under de första 20 dyggen och att mer än 90 % av climbazol och dess nedbrytningsprodukter adsorberas till jorden redan under de två första dyggen efter spikning.

I kolonnförsöken spikades jorden med climbazol och ytterligare sex organiska föreningar. I kolonnen försökte man återskapa verkliga förhållanden i marken. Försöket visade att ämnen som binds till slam också binds effektivt i jorden och att pH och vattnets egenskaper har en stor inverkan på adsorptionen.

Vid lysimeterförsök i fält kunde varken climbazol eller nedbrytningsprodukter av climbazol detekteras i vare sig lakvatten eller i grundvattnet. Orsaken kan vara att ämnet adsorberas permanent eller att det sker ytterligare transformation till okända nedbrytningsprodukter. Samtliga opolära ämnen som adsorberades till slam visade sig som väntat även adsorberas hårt till jord och därmed immobiliseras. Även de mer polära ämnena som tillfördes genom bevattning med avloppsvatten reducerades i stor utsträckning och endast mycket persistenta och icke adsorberande ämnen återfanns i grundvattnet. Resultatet visar att filtrering av behandlat avloppsvatten genom jord kan vara en effektiv metod för att minska mängden föroreningar i ytvattnet.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.euroutes.org/> (Kunkel, U. & Ternes, T.A., 2014b).

3.4.1 Ekotoxikologi – långsiktig effekt på markfaunan

Långsiktig påverkan på markfaunan vid tillförsel av slam undersöktes under 2012 på två försöksplatser i Ontario, Canada (Coors, A. m.fl., 2014). Syftet var bland annat att studera om slamgödsling kan orsaka problem på lång sikt, toxicitet hos olika organiska föreningar och om kombinationen av flera olika organiska föreningar kan förstärka respektive ämnes toxicitet.

Ett av försöksfälten gödslades med oavvattnat slam och ett med avvattnat slam. Efter slamgödslingen analyserades jorden på förekomst, artrikedom och sammansättning av nematoder och maskar samt markfaunans aktivitet. Även upptag av organiska föreningar i maskar undersöktes. Viss bioackumulation av triklosan kunde ses i maskarna men inga långsiktigt negativa effekter på faunans artrikedom. Däremot skedde en försämring i återväxten hos nematodpopulationen. Försöken kommer att presenteras under hösten 2014 inom ROUTES-projektet.

3.5 Utvärdering av nya slambehandlingsalternativ

Tabell 3-1 visar en översikt över de studerade avloppsreningsverkens förutsättningar och föreslagna behandlingsmetoder. Totalt har 10 nya behandlingsalternativ studerats (Svanström, M. m.fl., 2014a). Benchmarking och LCA utfördes både vid projektstart 2012 och vid projektslut 2014. Resultatet från 2012 användes för att identifiera förbättringsmöjligheter för de olika alternativen. Under 2014 förfinades metoderna och resultat från WP 1–4 kunde användas som indata. För att ta fram jämförbara alternativ har flera definitioner antagits för fallstudierna, exempelvis kvalitet på inkommande avloppsvatten. Dessa antaganden samt avgränsningar finns beskrivna i rapporter av Bertanza, G. m.fl. (2012) och Heimersson, S. m.fl. (2012). Det är alltså generella data som använts och inte data från specifika avloppsreningsverk. Utvärdering av ekonomiska och tekniska aspekter är utförda under antagandet att ett redan existerande avloppsreningsverk uppgraderats och beräknad utifrån årlig balans. Data som använts finns beskrivna i rapporten *Technological benchmarking of new technological trains against conventional WWTPs* (Bertanza, G. m.fl. 2012).

Tabell 3-1 De studerade avloppsreningsverkens förutsättningar och föreslagna behandlingsmetoder.

Fallstudie	Kapacitet (pe) ^a	Recipient	Belastning (kg BOD/kg SS, d)	Problem	Utvärderade metoder
1.1	15000	Icke-känslig	0,3	Dålig slamkvalitet ^b	SBBGR ^c
1.2	15000	Icke-känslig	0,3	Dålig slamkvalitet	MBR ^d med integrerad sidoströmprocess
2.1	70000	Icke-känslig	0,3	Överbelastad röt-kammare	Sekventiell anaerob-aerob rötning
2.2	30000	Känslig	0,1	Dålig slamkvalitet	ACSL ^e
2.3	70000	Känslig	0,1	Hög kvävebelastning	Air-stripping
2.4	70000	Icke-känslig	0,3	Ingen slambehandling	Pumpning av slam till en central anläggning
3.1	500000	Icke-känslig	0,3	Hög slamproduktion med dålig slamkvalitet	Vätoxidation och biopolymerproduktion
3.2	500000	Känslig	0,1	Hög slamproduktion med dålig slamkvalitet	Slamavskiljning och förbättrade stabiliseringsprocesser
3.3	500000	Känslig	0,1	Dålig slamkvalitet, delvis stabiliserad	Hybrid slamförbehandling och mesofil/termofil rötning
3.4	500000	Känslig	0,1	Underbelastad röt-kammare	Samrötning med organiskt avfall

^a Studerade avloppsreningsverkens kapacitet.

^b Dålig slamkvalitet: slam som ej är lämplig för jordbruksändamål.

^c SBBGR: Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor.

^d MBR: Membrane Bio Reactor.

^e ACSL: Alternative Cycle process in Sludge Line.

Resultat från benchmarking och LCA utförd 2012 finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Heimersson, S. m.fl., 2012). Resultaten från benchmarking och LCA utförd 2014 har endast delvis presenterats (Svanström, M., 2014a, 2014b) och redovisas i denna rapport. Eftersom resultat för 2014 inte publicerats ännu är materialet taget från presentationerna som hölls i Braunschweig och från muntlig information från Madelene Svanströmmer (Chalmers tekniska högskola).

I kapitel 3.5.1–3.5.3 beskrivs de olika behandlingsalternativen (tabell 3-1), dessa illustreras även med hjälp av flödesscheman, och en kortfattad sammanfattning av resultaten redovisas samt en kort utvärdering med avseende på benchmarking och LCA för respektive metod. De olika metoderna kan inte jämföras inbördes utan endast mot referensalternativet.

3.5.1 Små avloppsreningsverk

För små konventionella avloppsreningsverk (<20 000 pe) med hög andel slam som inte är användbart för jordbruksändamål föreslogs två alternativa tekniska lösningar som testades för att minska slammängden. Följande två fallstudier utfördes:

- Tillämpning av Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor (SBBGR) – ett nytt system utvecklat av CNR-IRSA.
- Tillämpning av Membrane Bio Reactor (MBR) med integrerad sidostömprocess för returslam.

Som referensalternativ definieras ett avloppsreningsverk med 15 000 pe anslutna beläget i ett icke-känsligt område med dålig slamkvalitet på grund av industriell kontaminering. Flödesschema över referensalternativen kan ses i figur 3-1 och 3-2.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Laera, G. m.fl., 2014; Battistoni, P. m.fl., 2013).

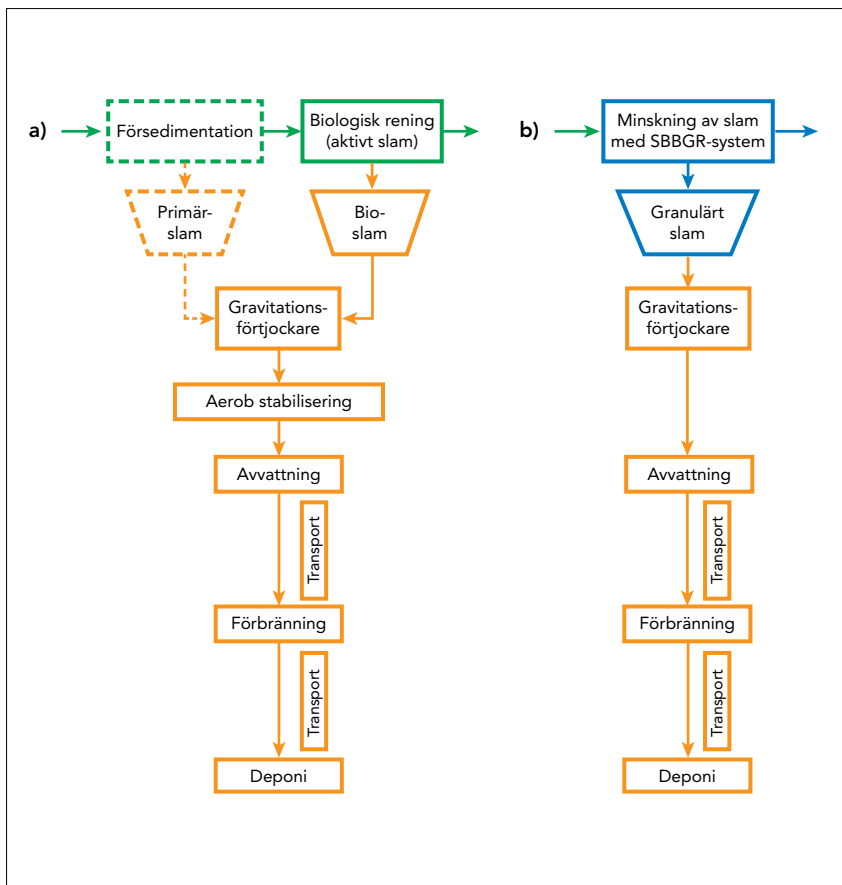
Fallstudie 1.1 – SBBGR

Vid små avloppsreningsverk med eller utan försedimentering testades en ny behandlingslinje baserad på SBBGR-teknologi för att minska slammängden, flödesschema kan ses figur 3-1. SBBGR-systemet består av en enda bas-säng (med ett nedsänkt biofilter) där avloppsvattnet matas in och behandlas innan det renade vattnet släpps ut till recipient. SBBGR är en teknik som bygger på att alla steg i den biologiska reningen äger rum efter varandra i samma tank, istället för att den fortsatta behandlingen sker i en annan tank som i konventionella behandlingssystem. Fördelen med SBBGR är att systemet är stabilt med hög biomassakoncentration, hög organisk belastning och stor flexibilitet.

Försöken utfördes i pilotskala (utan sekundär rening) med avloppsvatten från avloppsreningsverk och med en slamålder på över 200 dagar. Biofiltret utgjordes av plastmaterial och biomassa (50 kg/m³). Resultaten visade på en minskning av slammängden med 70–75 % och en reducering av anläggningsstorlek med ungefär 30 %. Resultaten visade även att ingen aerob/anaerob stabilisering av det bildade slammet behövs.

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Minskad slammängd och kemikalieförbrukning påverkar ekonomin positivt. Driftskostnaderna varierade mellan –38 % och +8,6 %. Vad gäller de tekniska aspekterna så resulterade benchmarkingen i att ingen större utbyggnad/ombyggnad krävs för att integrera denna teknik i befintliga avloppsreningsverk. Ingen specialiserad personal krävs och tekniken medför inga nya arbetsförhållanden, som till exempel nattarbete och arbete med ökad säkerhetsrisk.



Figur 3-1 Flödesschema över a) konventionell teknik (referensalternativ) och b) föreslagen teknik baserad på SBBGR-teknologi för små avloppsreningsverk (< 20 000 pe). Figur modifierad från presentationsmaterial (Di Iaconi, C. och Laera, G., 2014). SBBGR: Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor.

Resultat LCA (miljö)

Vid en uppgradering av konventionell teknik (referensalternativ) med SBBGR med syfte att minska slammängden så minskade kemikalieförbrukningen och miljöpåverkan från slamavsättning. Däremot ökade utsläpp av fosfor till recipienten (sötvatten) och lustgas till luft samt ökade elförbrukningen. Tekniken bedöms kunna påverka miljön negativt med avseende på övergödning i vatten, vilket bör tas i beaktning.

Fallstudie 1.2 – MBR med integrerad sidoströmprocess för returslam

Tillämpning av MBR-teknik växer snabbt, speciellt vid små och medelstora avloppsreningsverk. MBR integrerar biologisk rening med membranfiltrering vilket möjliggör behandling vid högre slamkoncentrationer för att uppnå högre och mer tillförlitlig kvalitet, jämfört med konventionellt aktivt slam, på det utgående reade vattnet. För att minska slamvolymen vid små avloppsreningsverk som använder biologisk rening med MBR testades en sidoströmprocess för returslam, se figur 3-2. Syftet med denna föreslagna process var bland annat att undersöka möjligheterna för en biologisk process för reduktion av fast material med hjälp av en anaerob sidoströmreaktor som ett billigt alternativ till kemiska och fysikaliska behandlingar.

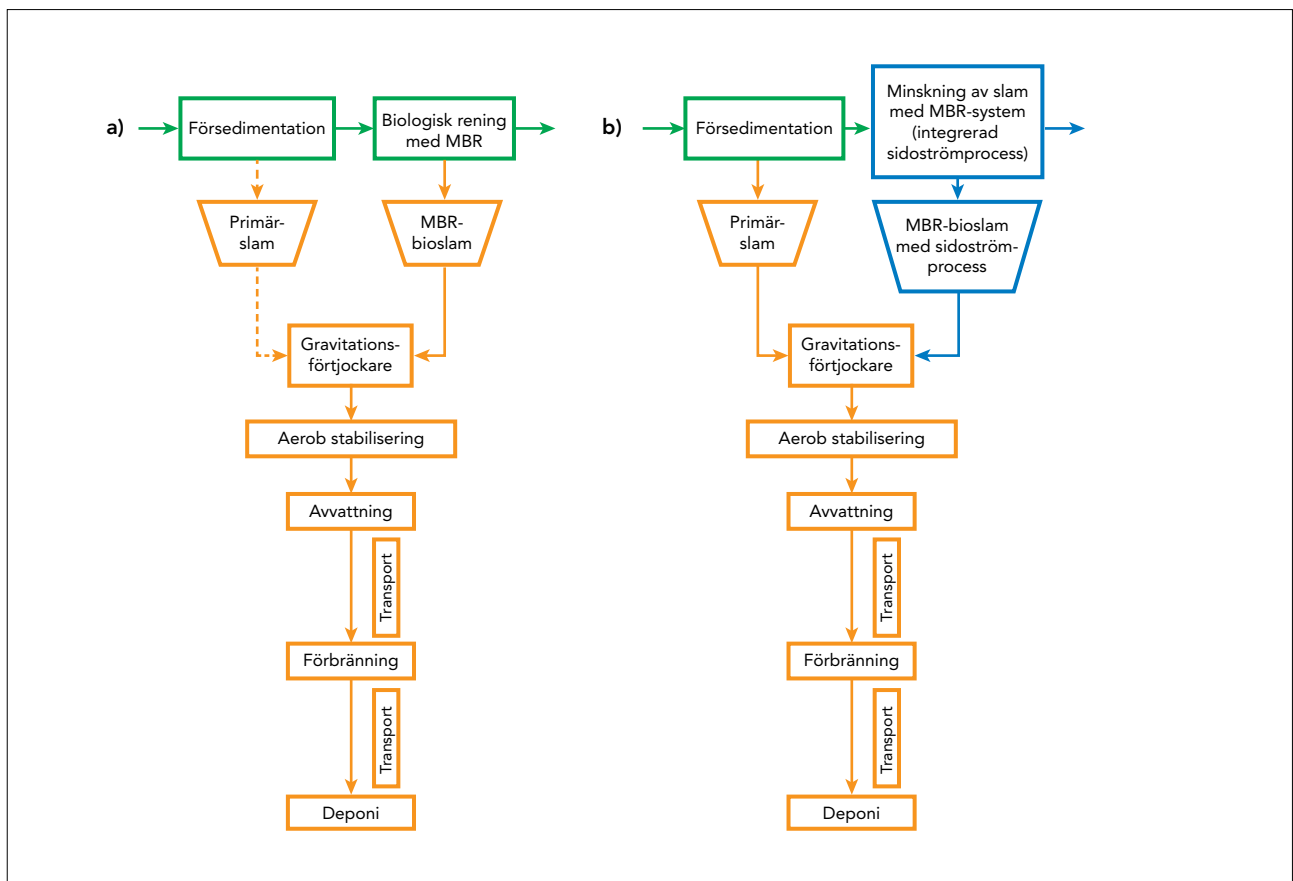
Försöken utfördes i laboratorieskala med syntetiskt avloppsvatten och resulterade i en slamreduktion på maximalt 20 %. Varken behandlingseffektiviteten eller kvaliteten på det utgående reade vattnet påverkades negativt. Resultaten visade även att varken en försämring eller en förbättring av slamets filterbarhet och påväxtpotential uppnås.

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Positivt för ekonomin är att avskrivningsmöjlighet för ny utrustning finns och att slammängden minskar. Driftskostnaderna varierade mellan -1,7 % och +11 %. Ingen större utbyggnad/ombyggnad krävs för att integrera denna teknik i befintliga avloppsreningsverk och ingen specialiserad personal krävs. Ingen ändring av arbetsförhållanden, som till exempel nattarbete och arbete med ökad säkerhetsrisk, krävs.

Resultat LCA (miljö)

När konventionell teknik med MBR (referensalternativ) uppgraderas med integrerad sidoströmprocess med syfte att minska slammängden så ökade utsläpp av fosfor till recipient. Resultatet visar på ingen större negativ miljöpåverkan.



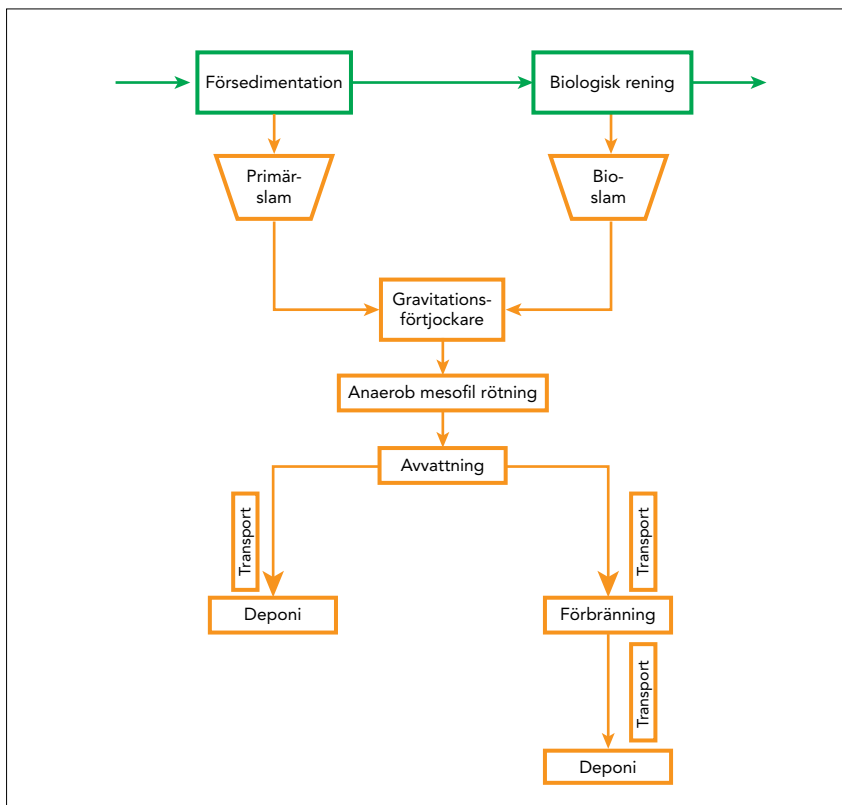
Figur 3-2 Flödesschema över a) konventionell teknik (referensalternativ) och b) föreslagen teknik med integrerad sidoströmprocess för returslam, för små avloppsreningsverk (<20 000 pe) utrustad med MBR-teknik. Figur modifierad från presentationsmaterial (Di Iaconi, C. och Laera, G., 2014). MBR: Membrane Bio Reactor.

3.5.2 Medelstora avloppsreningsverk

För att minska slammängden och möjliggöra lämplig slamavsättning för medelstora konventionella avloppsreningsverk (20 000–100 000 pe) utfördes fyra fallstudier:

- Sekventiell anaerob-aerob rötning.
- Alternative Cycle process in Sludge Line (ACSL) – en biologisk processlösning som inte är en efterbehandling.
- Air-stripping (ammoniak-avdrivning).
- Optimerad pumpning av slam.

I dessa studier definieras ett medelstort konventionellt avloppsreningsverk enligt figur 3-3 (s.k. referensalternativ).

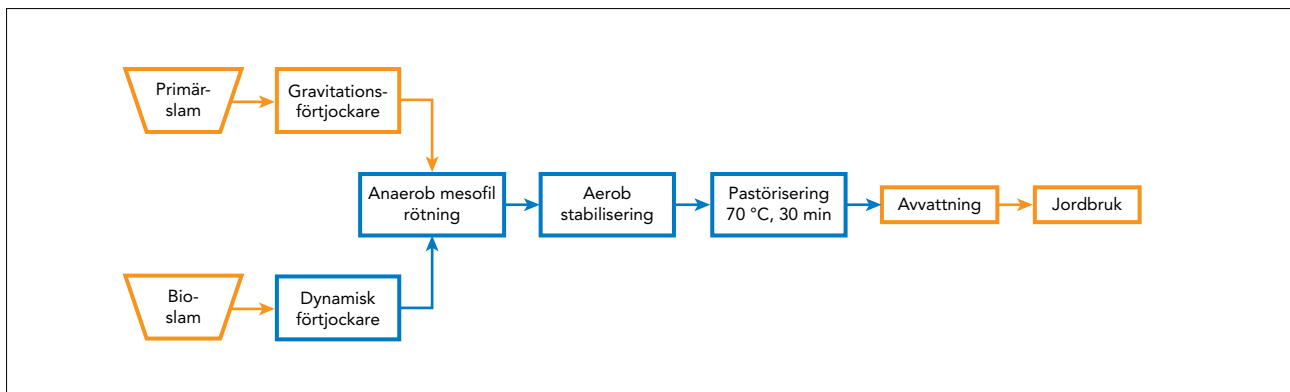


Figur 3-3 Flödesschema över konventionell teknik (referensalternativ) för medelstora avloppsreningsverk (20 000–100 000 pe). Figur modifierad från presentationsmaterial (Tomei, M. C. m.fl., 2014).

Fallstudie 2.1 – Sekventiell anaerob-aerob rötning

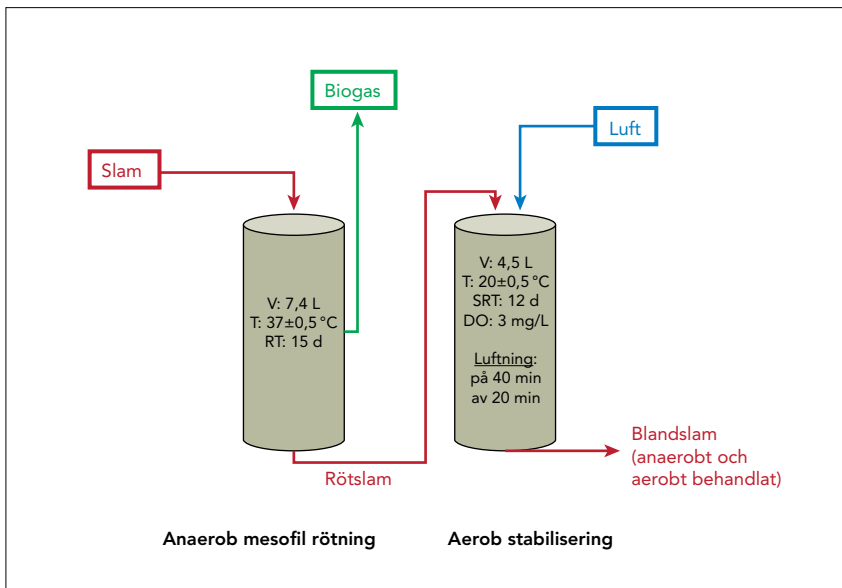
För medelstora avloppsreningsverk med låg stabiliseringseffektivitet föreslogs en processlösning med dynamisk förtjockning för att öka slamkoncentrationen följt av sekventiell anaerob-aerob rötning, se figur 3-4. Denna teknik utvärderades för avloppsreningsverk (70 000 pe) belägna i ett icke-känsligt område med en överbelastad rötchammare och som inte genererar ett slam lämpligt för åkermark. Syftet var att åstadkomma en kvalitetsförbättring som gör att slammet kan användas i jordbruket.

Försöken utfördes i laboratorieskala, reaktorerna bestod av två semi-kontinuerligt kopplade cylindriska kärl (se figur 3-5) som dagligen matades



Figur 3-4

Flödesschema över föreslagen teknik med sekventiell anaerob-aerob rötning för medelstora avloppsreningsverk som inte genererar ett slam som är lämplig för jordbruksanvändning. Figur modifierad från presentationsmaterial (Tomei, M. C. m.fl., 2014).



Figur 3-5

Experimentell försöksupställning för sekventiell anaerob-aerob rötning (figur modifierad från Tomei, M. C. m.fl., 2014). V: Volume; T: Temperature; SRT: Sludge-Retention Time; DO: Dissolved Oxygen.

med slam från avloppsreningsverk. Sekventiell anaerob-aerob rötning visade sig vara effektiv för att förbättra slamstabiliseringen. Reningsgraden av flyktiga ämnen i den anaeroba rötningen var cirka 50 % och metanutbytet 67 % (Tomei, M. C. m.fl., 2014). I den aeroba stabiliseringen var reningsgraden av flyktiga ämnen 45 %. Hög nitrifiering (ca 97 %) och denitrifiering (ca 70 %) uppnåddes och slammets avvattningspotential förbättrades. Försöken visade att slammängden minskade vilket därmed leder till mindre slamtransporter.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Braguglia, C. M. m.fl., 2012).

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Minskad slammängd och ökad biogasproduktion anses positivt för ekonomin. Driftkostnaderna varierade mellan -34 % och +14 %. Att integrera denna teknik i befintliga avloppsreningsverk kräver ingen större utbyggnad/ombyggnad. Ingen specialiserad personal krävs och medför ingen ändring av arbetsförhållanden, som till exempel nattarbete och arbete med ökad säkerhetsrisk.

Resultat LCA (miljö)

Denna processlösning för att förbättra slamkvaliteten medför att utsläpp av fosfor till recipient (sötvatten) ökar något. Slammängden minskar vil-

ket leder till att slamtransporter minskar samt ökar biogasproduktionen. Vid denna teknik uppnås en miljövinst i form av ersatta gödselmedel. Risk för övergödning i vatten, patogener i slam, toxicitet, etc. bedöms kunna påverka miljön negativt.

Fallstudie 2.2 – ACSL – biologisk processlösning

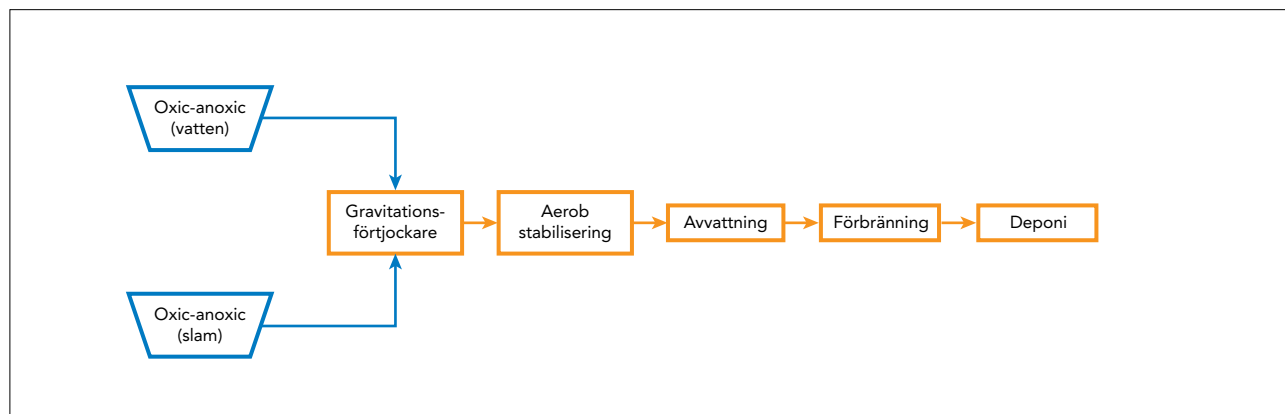
För medelstora avloppsreningsverk med dålig slamkvalitet (dvs. inte lämplig att användas i jordbruket) föreslogs en biologisk processlösning med ACSL med syfte att reducera slammängden, flödesschema kan ses i figur 3-6. Denna teknik är baserad på alternerande oxiska (då aeroba processer gynnas) och anoxiska (syrefria) cykler i vatten- och slamlinjerna. ACSL utvärderades för avloppsreningsverk (30 000 pe) med utsläpp till en känslig recipient och som genererar ett slam som inte är lämpligt för spridning på jordbruksmark. Huvudsyftet med ACSL är att minimera produktionen av överskottsslam. Processen fungerar vid traditionell slamålder men är ingen biologisk efterbehandlingsprocess. Inga kemikalier behövs, det gynnsamma förhållandet mellan de olika oxidations-reduktionspotentialerna för slamcyklerna är ett kostnadseffektivt tillvägagångssätt för att minimera mängden slam. ACSL kan enkelt integreras i befintlig process, till exempel som en linje i den aeroba stabiliseringen.

Försöken utfördes vid fyra avloppsreningsverk med en belastning mellan 20 000 och 50 000 pe. Resultaten visade på en generell minskning (25–35 %, medelvärde) av VSS/COD (VSS: Volatile Solid Substance; COD: Chemical Oxygen Demand). Vid längre hydraulisk uppehållstid i cyklerna ökade reduktionsgraden.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Battistoni, P. m.fl., 2013).

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Positivt för ekonomin är att avskrivningsmöjlighet för ny utrustning finns och att slammängden minskar. Driftskostnaderna varierade mellan –11 % och +6,6%. Tekniken kräver ingen större utbyggnad/ombyggnad för att integreras i befintliga avloppsreningsverk. Inget behov av specialiserad personal finns och det krävs ingen ändring av arbetsförhållanden (t.ex. nattarbete och arbete med ökad säkerhetsrisk).



Figur 3-6 Flödesschema över föreslagen teknik, alternerande oxiska/anoxiska cykler, för medelstora avloppsreningsverk med dålig slamkvalitet. Figur modifierad från presentationsmaterial (Tomei, M. C. m.fl., 2014).

Resultat LCA (miljö)

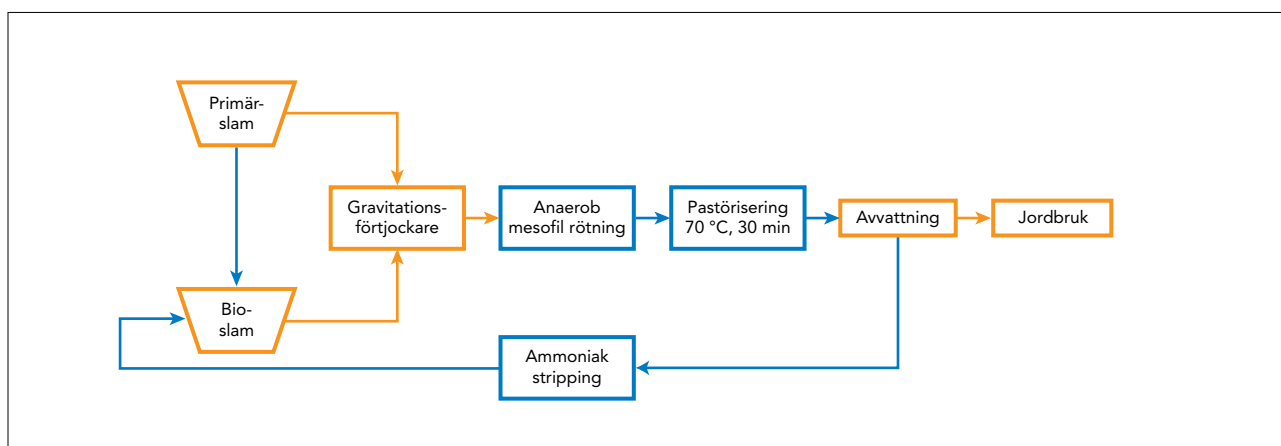
Denna processlösning för att minska slammängden medför att elförbrukning och miljöpåverkan från slamavsättning minskar. Minskad slammängd medför att slamtransporterna minskar. Ingen större negativ miljöpåverkan kunde påvisas.

Fallstudie 2.3 – Air-stripping (ammoniakavdrivning)

För medelstora avloppsreningsverk med hög kvävebelastning i det biologiska steget föreslogs avdrivning av ammoniak (air-stripping) från rejeckt-vattnet som uppkommer efter rötning, pastörisering och avvattning, se figur 3-7. Detta rejeckt-vatten bidrar med cirka 15–20 % av den inkommande kvävebelastningen vid ett kommunalt avloppsreningsverk. Produktion av kvävegödsel via Haber-Boschprocessen och kväverening vid avloppsreningsverk via denitrifikation är kostnads- och energikrävande, dessutom bildas växthusgasen lustgas vid denitrifikation. Detta motiverar att teknik för näringsseparering och näringsåtervinning bör utvecklas i framtiden. I Europa finns det endast cirka 10 anläggningar som använder sig av air-stripping och som producerar ett gödselmedel i form av ammoniumsulfat. Några av dessa har designats av ROUTES-projektets tyska partner ATEMIS och dessa fullskaliga anläggningar finns vid avloppsreningsverk, till exempel Straubing och Wallau (Tyskland) och Spittal (Österrike).

Air-stripping utvärderades för avloppsreningsverk (70 000 pe), med hög kvävebelastning, där utsläpp sker till en känslig recipient. Syftet med denna teknik var att öka kvävereningen eftersom EU kräver en hög kvävereningsprestanda (70–80 %) vid utsläpp i känsliga recipienter och att åstadkomma en kvalitetsförbättring av slammet som medför att det kan användas i jordbruket samt att tillverka ammoniumsulfatgödsel.

Schweiz första anläggningen utrustad med air-stripping var färdigbyggd 2011 vid avloppsreningsverket Kloten-Opfikon. Vid detta verk utfördes försök att vidareutveckla och optimera air-strippingprocessen, det vill säga minimera mängden natriumhydroxid som behövs i processen och optimera processparametrarna pH och temperatur. Detta för att möjliggöra återvinning av ammoniak från det rejeckt-vatten som uppstår i slambehandlingen, med syfte



Figur 3-7 Flödesschema över föreslagen teknik, air-stripping, för medelstora avloppsreningsverk med hög kvävebelastning i det biologiska steget. Figur modifierad från presentationsmaterial (Tomei, M. C. m.fl., 2014).

att tillverka värdefull flytande kvävegödsel. I denna fallstudie genomfördes också pilotskaleförsök med membran-stripping, processen är baserad på att ammoniak diffunderar genom membranet, $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$ ($\text{pK}_{\text{NH}_3/\text{NH}_4^+}$: 8,8).

Resultaten visade på en hög kväveringsgrad (90 %) från rejektvattnet vid följande processinställningar: temperatur rejektvatten: 60 °C; pH: 9,3; rejektvattenflöde: 5,25 m³/h; luftflöde: 3 600 Nm³/h (luft/vatten-kvot: 685). Samtidig behandling av urin är möjlig, som förbättrar ekonomin i processen och minskar den specifika energiförbrukningen. De avloppsreningsverk som använder sig av Bio-P måste först avlägsna fosfat med en fällningsprocess (struvit) från rejektvattnet innan air-stripping kan användas. Membranstripping kräver mycket mindre utrymme jämfört med air-stripping, dock är temperaturen begränsad till 45–50 °C vilket medför att förbrukningen av natriumhydroxid blir högre samt att slutprodukten blir mer utspädd pga. vattendiffusion genom membranet.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Boehler, M. m.fl., 2014; Grömping, M. m.fl., 2012).

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Positivt för ekonomin är att avskrivningsmöjlighet för ny utrustning finns. Kemikalieförbrukningen ökar och driftskostnaderna ökade med cirka 13–33 %. Vad gäller de tekniska aspekterna så resulterade benchmarkingen i att ingen större utbyggnad/ombyggnad krävs för att integrera denna teknik i befintliga avloppsreningsverk. Inget behov av specialiserad personal finns och tekniken medför inga nya arbetsförhållanden, som till exempel nattarbete och arbete med ökad säkerhetsrisk.

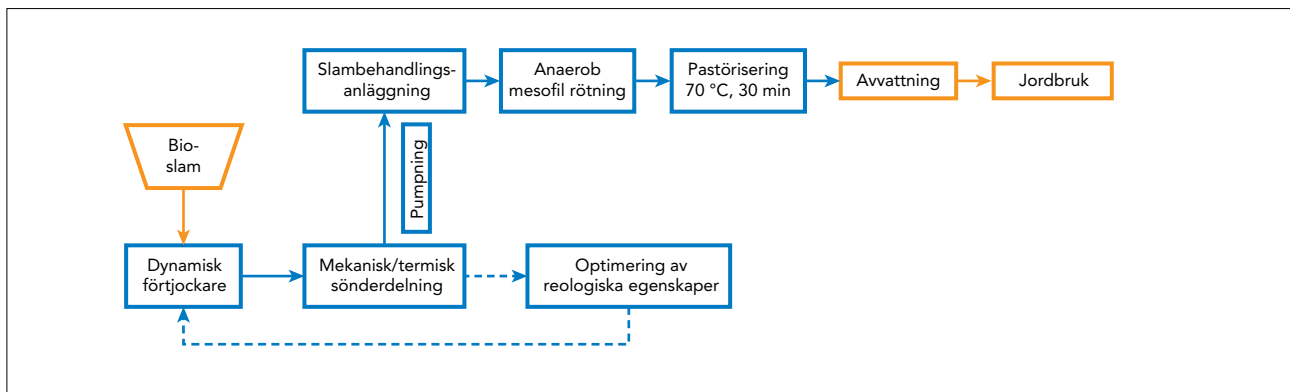
Resultat LCA (miljö)

Vid en uppgradering av konventionell teknik (referensalternativ) med air-stripping med syfte att förbättra slamkvaliteten så ökar ammoniakavgången från avloppsreningsverket samt ökar kemikalieförbrukningen. Att slammet kan ersätta mineralgödsel anses som en viktig positiv parameter vid helhetsbedömning av denna tekniks miljöpåverkan. Miljöriskerna bedöms framför allt vara övergödning i mark, patogener i slam och toxicitet.

Fallstudie 2.4 – Optimera pumpning av slam

För medelstora avloppsreningsverk med bristfällig slambehandling föreslås att slammet pumpas till en central slambehandlingsanläggning, se figur 3-8. Denna teknik är baserad på att slammet förbehandlas för att förbättra slammets reologiska egenskaper och dess rötbarhet. Detta förslag kräver att pumpning av slam till en central slambehandlingsanläggning optimeras, vilket möjliggör att slamtransporter kan ersättas. Syftet med denna fallstudie var att optimera slampumpning, med avseende på TS-halt och förbehandling av slam med ultraljud eller termisk hydrolys. Denna teknik utvärderades för avloppsreningsverk (70 000 pe), med bristfällig eller avsaknad av slambehandling, belägna i ett icke-känsligt område. Ultraljudsförsöken utfördes i pilotskala med slam från avloppsreningsverk. Försöken med termisk hydrolys utfördes vid två kraftvärmeverk.

Ultraljudsförsöken resulterade i en minskning av viskositeten för primärslam och blandslam, däremot uppvisades en ökad viskositet för bioslam.



Figur 3-8 Flödesschema över föreslagen teknik där en central slambehandlingsanläggning används, lämplig för medelstora avloppsreningsverk med bristfällig slambehandling. Figur modifierad från presentationsmaterial (Tomei, M. C. m.fl., 2014).

Slammängden minskades med cirka 16% och energiförbrukningen som krävs för ultraljudsbehandling, föranledd av högre flödes hastighet och högre TS, ökade. Resultatet visade också att den optimala TS-halten vid pumpning av obehandlat slam var cirka 2,6% TS för primärslam och cirka 4% TS för bioslam.

En minskning av viskositeten påvisades också vid försöken med termisk hydrolysis. Den totala energiförbrukningen bör utvärderas med hänsyn till andra faktorer, såsom ökad biogasproduktion och produktion av ett patogenfritt och stabiliserat slam.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Colombino, M. m.fl., 2014).

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Positivt för ekonomin är att avskrivningsmöjlighet för ny utrustning finns och att slamtransporterna minskar. Driftskostnaderna varierade mellan -21% och +34%. Tekniken kräver liten utbyggnad/ombyggnad för att integreras i befintliga avloppsreningsverk.

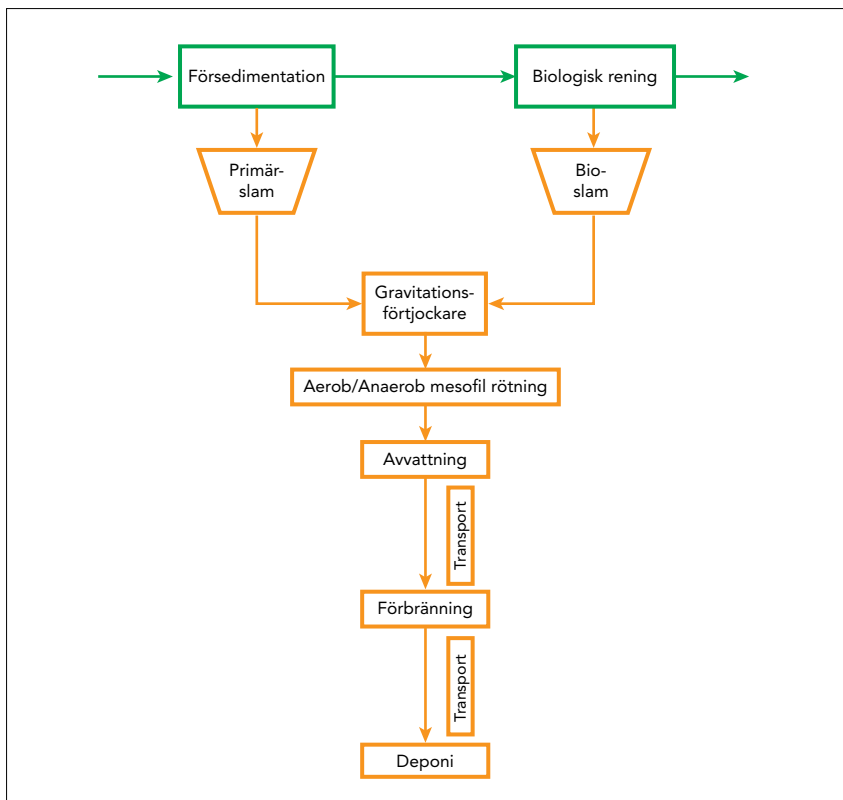
Resultat LCA (miljö)

Denna processlösning för att förbättra slamkvaliteten medför att slamtransporter minskar och mineralgödsel kan ersättas. Däremot ökar miljöpåverkan från slamavsättning i form av försurning och övergödning i mark samt risk för patogener i slam, toxicitet, etc.

3.5.3 Stora avloppsreningsverk

För att minimera slammängden och möjliggöra lämplig slamavsättning för stora konventionella avloppsreningsverk (>100 000 pe) utfördes följande fallstudier:

- Våtoxideration och biopolymerproduktion.
- Slamavskiljning och förbättrade stabiliseringsprocesser samt sekventiell anaerob-aerob rötning.
- Hybrid slamförbehandling och mesofil/termofil anaerob rötning.
- Samrötning med organiskt avfall (+ aerob kompostering och struvitfällning).



Figur 3-9 Flödesschema över konventionell teknik (referensalternativ) för stora avloppsreningsverk (>100 000 pe). Figur modifierad från presentationsmaterial (Morgan, F. m.fl., 2014).

I dessa studier definieras stort konventionellt avloppsreningsverk enligt figur 3-9 (s.k. referensalternativ).

Fallstudie 3.1 – Våtoxideration och biopolymerproduktion

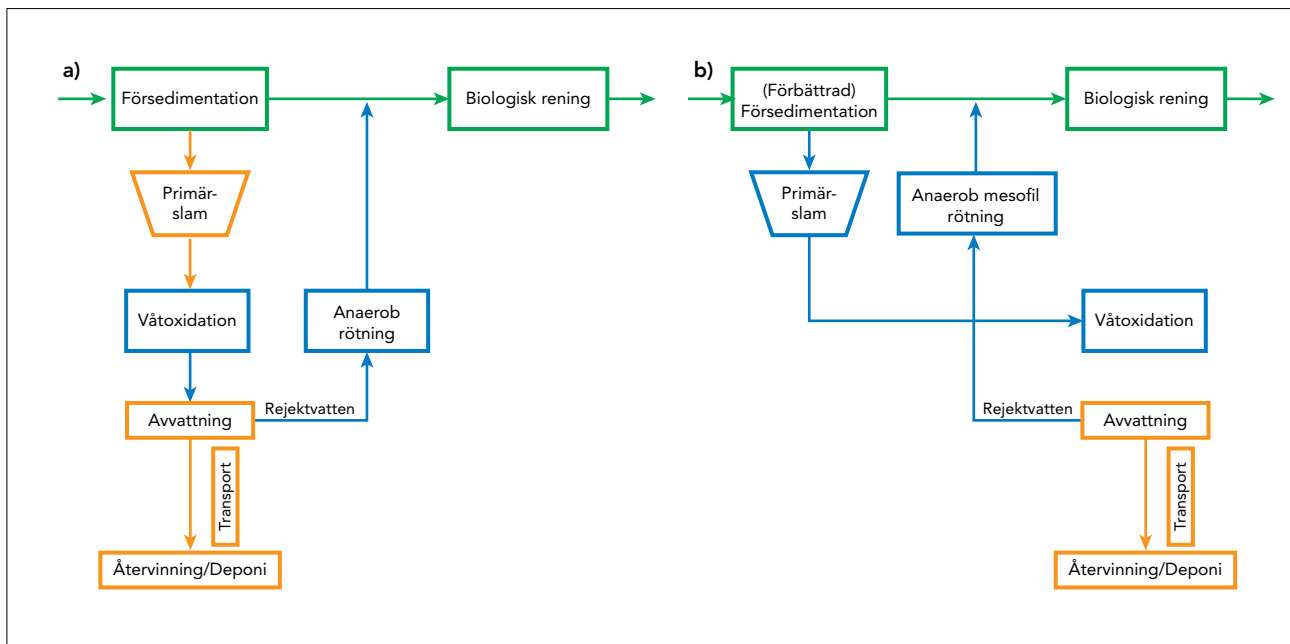
Tre alternativ föreslogs för stora avloppsreningsverk (500 000 pe) där utsläpp sker i icke-känslig recipient och som genererar mycket slam med dålig slamkvalitet, som inte är lämplig i jordbruket:

- Våtoxideration och biopolymerproduktion från rejektivattnet som härrör från våtoxiderationen.
- Våtoxideration och anaerob rötning av det uppkomna rejektivattnet.
- Biopolymerproduktion från syrabildande jäsning av primärslam.

I figur 3-10 presenteras våtoxideration och anaerob rötning av rejektivattnet. De två alternativ som inkluderar produktion av biopolymerer (polyhydroxylalkanoater) redovisas inte i denna rapport, information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Morgan, F. m.fl., 2014; Morgan-Sagastume, F. m.fl., 2013; Valentino, F. m.fl., 2012).

Försöken utfördes i laboratorie-, pilot- och fullskala med slam från avloppsreningsverk (industriella och kommunala).

Våtoxideration, kemisk oxidation vid hög temperatur och högt tryck, är en teknik som bryter ned icke-bionedbrytbara och toxiska organiska ämnen till bionedbrytbara ($BOD_5/COD > 0,5$) och icke-toxiska produkter som därefter kan behandlas i efterföljande biologisk process. Organiska ämnen



Figur 3-10 Flödesschema över föreslagen teknik där a) våtoxideration av primärslam och b) våtoxideration av primärslam och/eller bioslam används, samt anaerob rötning av det uppkomna rejecktvalet. Tekniken är anpassad för stora avloppsreningsverk som genererar mycket slam som inte är lämpligt för jordbruksändamål. Figur modifierad från presentationsmaterial (Slavik, E., m.fl., 2014).

omvandlas till koldioxid och vatten vid reaktion med syre i höga temperaturer och det höga trycket medför att slammet bibehålls i vätskefas. Testanläggningen (DUAL TOP®) består av en reaktor (V: 2 670 L). Den kontinuerliga processen sker vid temperaturer omkring 240–250 °C och vid ett tryck på 55–60 bar, med en reaktionstid på 40–80 minuter.

Bra resultat kunde påvisas för våtoxideration i industriell skala, COD minskade med cirka 70 % och flyktiga ämnen minskade upp till 98 % (dvs. en signifikant reduktion av slammängden). Processparametrar (reaktionstid, temperatur och syremängd) och typ av slam påverkar avskiljningseffektiviteten. Försöken visade på hög bionedbrytbarhet av rejecktvalet. Den energi som finns lagrad i slammet utgör cirka 50 % av den totala energin i systemet, varav cirka 90 % kan återvinnas.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Bertanza, G. och Collivignarelli, C., 2012c; Slavik E. m.fl.).

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Denna teknik medför att slammängden minskar och således slamtransporterna. Däremot ökar kemikalieförbrukningen och driftskostnaderna varierade mellan –39 % och +106 %. Tekniken kräver liten utbyggnad/ombyggnad för att integreras i befintliga avloppsreningsverk.

Resultat LCA (miljö)

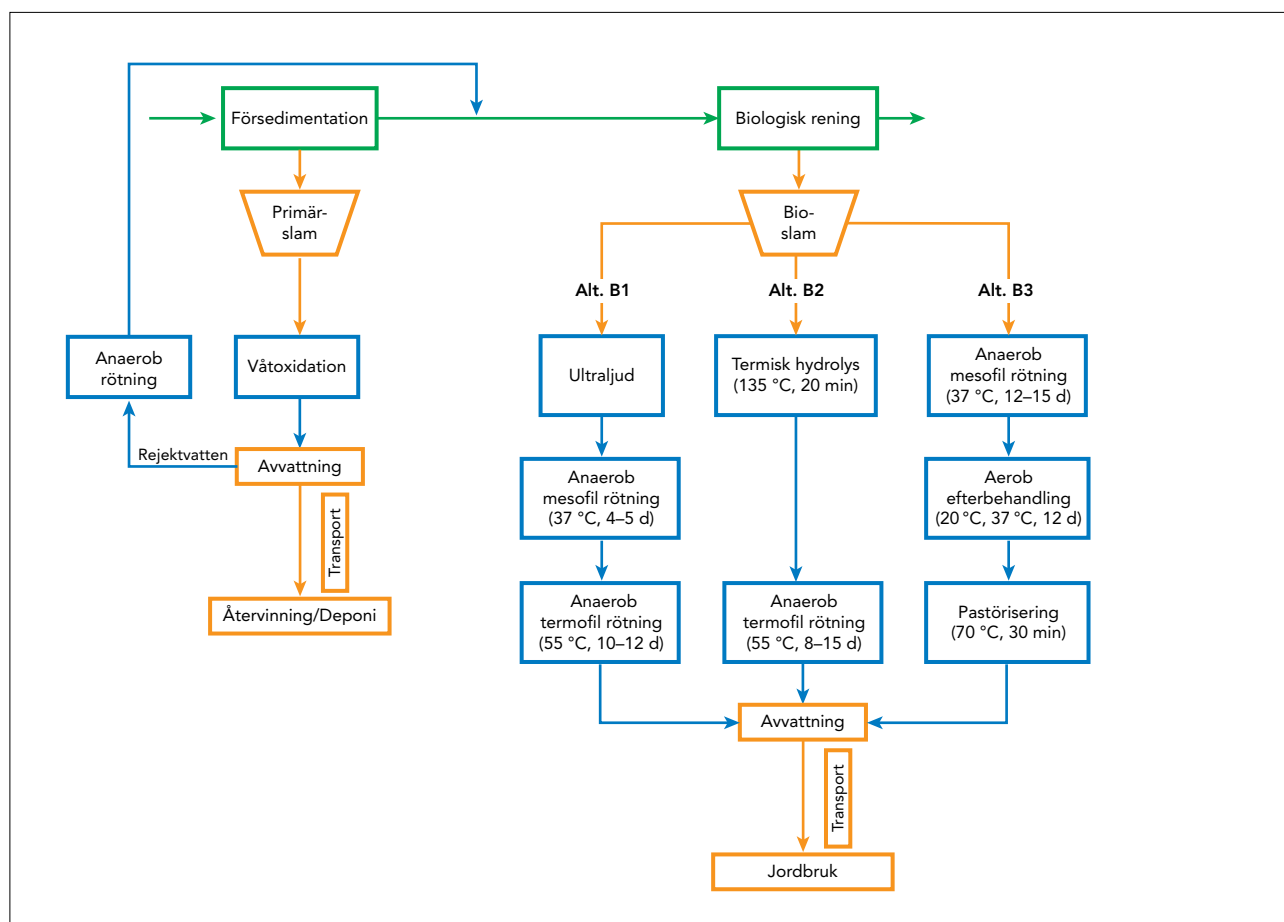
Processlösningen med våtoxideration och anaerob rötning av rejecktvalet för att minska slammängden medför mindre utsläpp av fosfor och slamtransporterna minskar. Däremot ökar kemikalieförbrukningen och naturgasanvändningen. De höga utsläppen av lustgas kompenseras av värmeåtervinning. Ingen större negativ miljöpåverkan kunde påvisas.

Fallstudie 3.2 – Slamavskiljning och förbättrade stabiliseringsprocesser

För stora avloppsreningsverk (500 000 pe) där utsläpp sker till känslig recipient samt genererar mycket slam som inte är lämpligt för användning på åkermark (dålig slamkvalitet) utvärderades olika alternativ för slamavskiljning av primärslam och bioslam, se figur 3-11. Syftet var att uppnå en avskiljning och minimering av primärslammet samt åstadkomma en kvalitetsförbättring av bioslammet som gör att det kan användas på jordbruksmark. Olika stabiliseringsprocesser utvärderades, det vill säga potentiella hygieniseringsmetoder som kan möjliggöra att slammet kan användas för jordbruksändamål, de tre alternativen (Alt. B1, B2, B3) åskådliggörs i figur 3-11. Sekventiell anaerob-aerob rötning utvärderades också för stora avloppsreningsverk för att uppnå förbättrad stabilisering av slammet, denna teknik beskrivs i kapitel 3.5.2 (fallstudie 2.1).

Försöken (Alt. B1, B2, B3) utfördes i både pilot- och laboratorieskala med slam från avloppsreningsverk. Alla tre alternativ resulterade i en minskning av slammängden (ca 70 %).

Resultaten visade att termofil rötning påverkade kvaliteten på rektvattenet och slammets avvattningsbarhet negativt. När ultraljud användes som förbehandlingssteg innan tvåstegsrötning (mesofil och termofil) uppnåddes en hög reduktion av organiskt material (ca 55 %). Både ultraljud och ter-



Figur 3-11 Flödesschema över föreslagen teknik för slamavskiljning och förbättrade stabiliseringsprocesser, lämplig för stora avloppsreningsverk som genererar mycket slam som inte är lämplig för jordbruksändamål. Figur modifierad från presentationsmaterial (Morgan, F. m.fl., 2014).

misk hydrolys som förbehandlingssteg ökade utbytet av biogas med cirka 30 % samtidigt som en förbättrad desinfektionskapacitet av slammet uppnåddes. De undersökta stabiliseringsprocesserna innebar en förbättring av rötningsprocessen och därmed mer sönderdelat slam, mer kolloidala fina partiklar och mer lösligt COD. Mer lösligt COD kräver dock optimering av belastning och hydraulisk uppehållstid i rötningsprocessens slutsteg (metanogenes) för att förbättra omvandlingen av dessa ämnen för att undvika en försämring av rötresten (slammet). Vid val av lämplig teknik måste hänsyn tas till avloppsreningsverkets mål med uppgraderingen, till exempel förbättrad slamkvalitet, energiproduktion, etc.

Försöken med sekventiell anaerob-aerob rötning, experimentell försöksuppställning se figur 3-5, utfördes i laboratorieskala (i ungefär 8 månader) med slam från avloppsreningsverk. Sekventiell anaerob-aerob rötning visade sig vara effektiv för att förbättra slamstabiliseringen. I den anaeroba rötningen påvisades en reningsgrad av flyktiga ämnen på cirka 48 % och ett metanutbyte på 66 % (Morgan, F. m.fl., 2014). I den aeroba stabiliseringen minskade slammängden, med cirka 25 % ökad reningsgrad av flyktiga ämnen. Hög nitrifiering (ca 90 %) och denitrifiering (ca 62 %) uppnåddes samtidigt som slammets avvattningspotential förbättrades. Minskad slammängd leder till mindre slamtransporter. En förbättrad reningsgrad (ca 33 %) i den aeroba stabiliseringen kunde påvisas när temperaturen höjdes till 37 °C i den aeroba reaktorn. Den högre temperaturen resulterade också i lägre nitrifieringsgrad (ca 65 %), däremot var övriga parametrar jämförbara med de försök utförda vid 20 °C.

Fördjupad information (Braguglia, C.M. m.fl., 2012) och faktablad baserat på preliminära resultat (Braguglia, C.M. m.fl.) finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/>.

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Alla tre alternativ medför att slammängden minskar och att kemikalieförbrukningen ökar, driftskostnaderna varierade mellan cirka -31 % och +50 %. Utbyggnad/ombyggnad för att integrera tekniken i befintliga avloppsreningsverk krävs för alternativ B1 och B3. För alternativ B2 krävs omfattande ombyggnation, specialiserad personal och ändring av arbetsförhållanden, som till exempel nattarbete och arbete med ökad säkerhetsrisk.

Resultat LCA (miljö)

Dessa processlösningar för att förbättra slamkvaliteten medför att kemikalieförbrukningen ökar och utsläpp av lustgas till luft ökar. Minskad slammängd leder till minskade transporter. Slamavsättning på åkermark kan innebära risker för hälsa och miljö (patogener i slam, toxicitet, etc). Samtidigt innebär det en miljövinst när slam ersätter mineralgödsel.

Fallstudie 3.3 – Hybrid slamförbehandling och mesofil/termofil anaerob rötning

För stora avloppsreningsverk (500 000 pe) där utsläpp sker till känslig recipient samt genererar ett slam som inte är lämpligt för jordbruksändamål (dålig slamkvalitet) utvärderades en hybrid förbehandling av slammet följt av mesofil/termofil anaerob rötning, se figur 3-12. Den hybrida slamförbehandlingen är en kombination av kemisk och hydrodynamisk teknik. Syftet

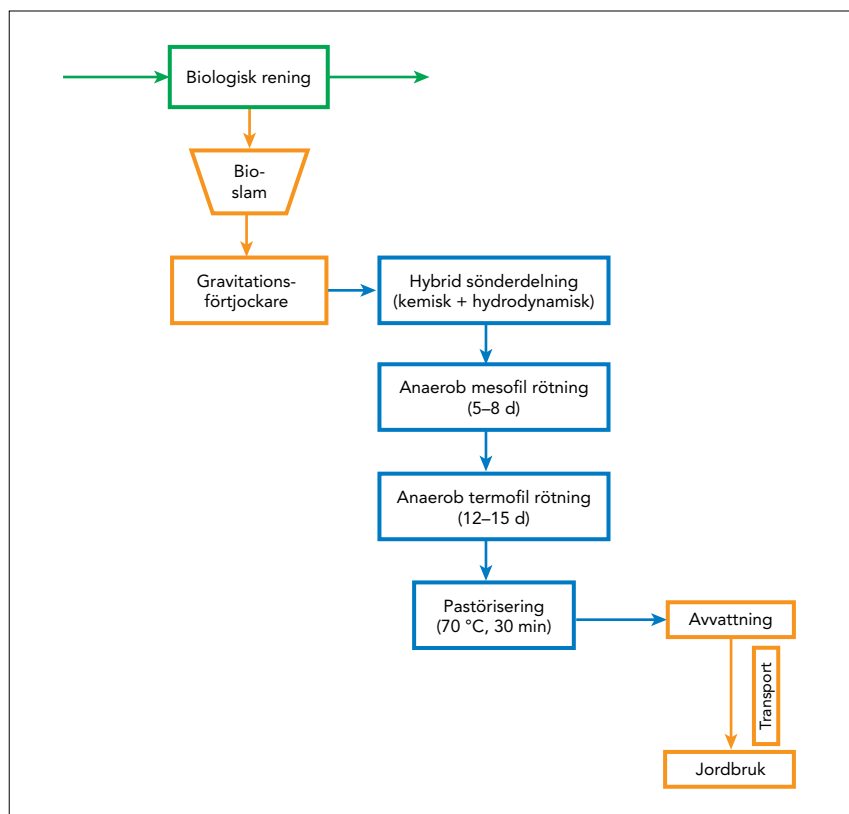
var att minska slammängden och förbättra dess kvalitet som möjliggör att slammet kan användas i jordbruket.

Försöken utfördes i laboratorieskala med slam från avloppsreningsverk, natriumhydroxid tillsattes för att uppnå pH 9–10 och reaktionstiden var 30 minuter. Denna teknik bedöms som en lågintensiv sönderfallsprocess som är lätt att installera och flexibel i drift samt med låg kemikalieförbrukning. Energiförbrukningen anses låg i förhållande till den höga nedbrytningshastighet som uppnås. Labbförsöken med hybrid slamförbehandling följt av mesofil och termofil rötning resulterade i ett högt metanutbyte. Slammängden minskade, reningsgraden av flyktiga ämnen var högre än 50 %, och anses dessutom lämpligt för jordbruksändamål (mikrobiellt säkert). Rejektvattnet undersöktes också med avseende på ammoniumkväve (800–1100 mg N-NH₄/L) och fosfor (150–280 mg PO₄/L).

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Braguglia, C. M. m.fl., 2012).

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Minskad slammängd och låg kemikalieförbrukning är positivt för ekonomin. Tekniken medför att driftskostnaderna ligger mellan –4 % och +8,6 %. Ingen större utbyggnad/ombyggnad för att integrera tekniken i befintliga avloppsreningsverk krävs, ingen specialiserad personal behövs och ingen ändring av arbetsförhållanden, såsom nattarbete och arbete med ökad säkerhetsrisk, krävs.



Figur 3-12 Flödesschema över föreslagen teknik, hybrid slamförbehandling följt av mesofil och termofil anaerob rötning, lämplig för stora avloppsreningsverk som genererar slam som inte är lämplig för jordbruksändamål. Figur modifierad från presentationsmaterial (Morgan, F. m.fl., 2014).

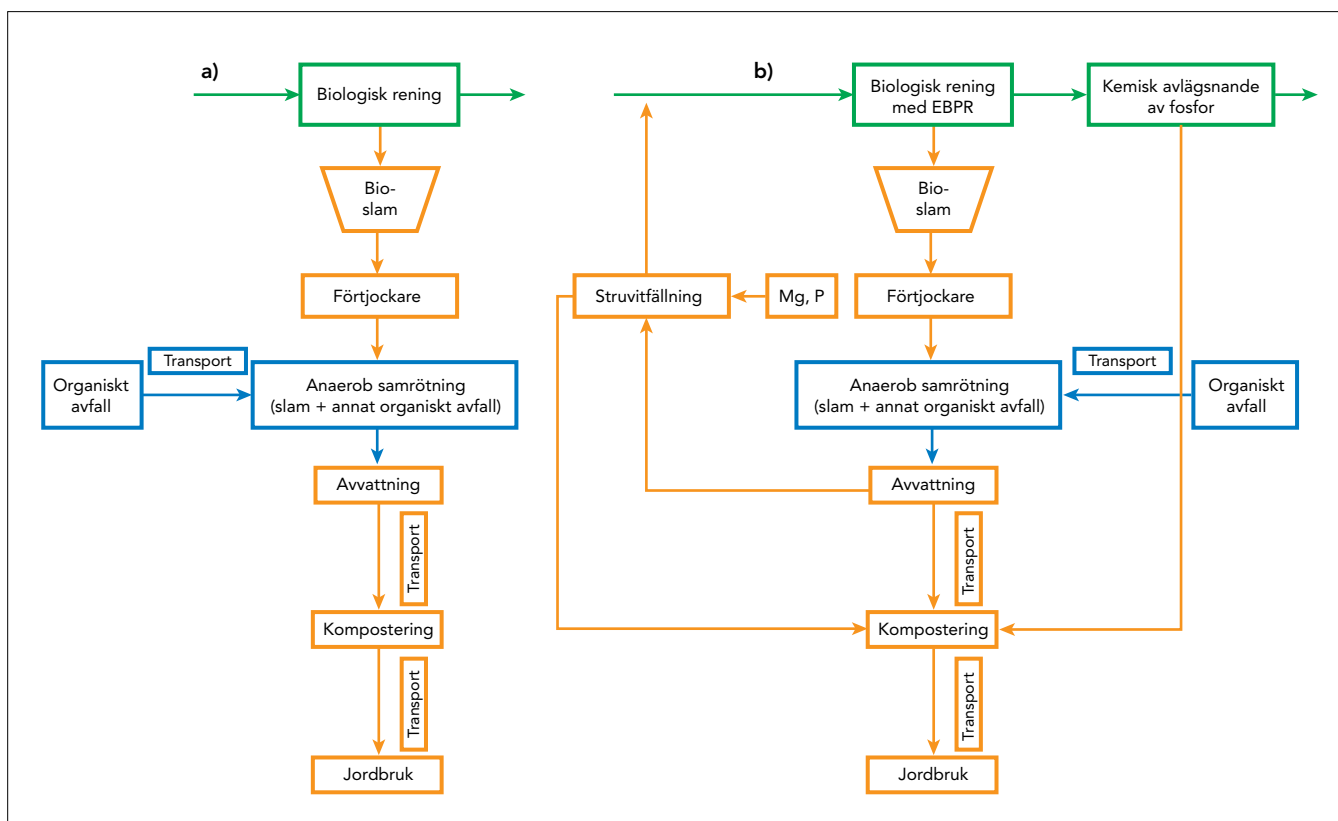
Resultat LCA (miljö)

En uppgradering av konventionell teknik (referensalternativ) till hybrid slamförbehandling följt av mesofil och termofil rötning med syfte att förbättra slamkvaliteten medför ökat utsläpp av ammoniak och lustgas till luft vid slamavsättning. Slamavsättning på åkermark kan innebära risker för hälsa och miljö (patogener i slam, toxicitet, etc). Samtidigt innebär det en miljövinst när slam ersätter mineralgödsel.

Fallstudie 3.4 – Samrötning med organiskt hushållsavfall och kompostering (+ struvitfällning)

För stora avloppsreningsverk (500 000 pe) där utsläpp sker till känslig recipient och med en underbelastad rötkammare utvärderades samrötning av slam med organiskt hushållsavfall, se figur 3-13. Syftet var att öka biogasproduktionen och kvalitetsförbättra slammet för att möjliggöra att slammet kan användas i jordbruket.

Försöken utfördes i pilot- och fullskala med slam från avloppsreningsverk. I de två delstudierna i denna fallstudie genererades en ökning av slam-mängden. Vid samrötning av slam och organiskt hushållsavfall fördubblades biogasproduktionen, jämfört med enbart rötning av slam. Denna teknik kräver att det organiska avfallet förbehandlas innan det kan samrötas med slam och resultaten visar att denna förbehandling är relativt komplicerad (Morgan, F. m.fl., 2014). Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Pavan, P. m.fl., 2013).



Figur 3-13 Flödesschema över föreslagen teknik för samrötning med organiskt hushållsavfall och a) kompostering och b) kompostering och struvitfällning, lämplig för stora avloppsreningsverk med syfte att öka biogasproduktionen och möjliggöra slamgödsling i jordbruket. Figur modifierad från presentationsmaterial (Morgan, F. m.fl., 2014). EBPR: Enhanced Biological Phosphorus Removal.

Resultat benchmarking (ekonomi och teknik)

Dessa processlösningar medför ökad biogasproduktion (och i kombination med kraftvärmeverk även ökad energiproduktion) vilket är positivt för ekonomin. Driftkostnaderna varierade från -94 % till +17 %. Teknikerna kräver liten utbyggnad/ombyggnad för att kunna integreras i befintliga avloppsreningsverk.

Resultat LCA (miljö)

Samrötning med organiskt avfall ger ökad biogasproduktion och i kombination med kraftvärmeverk minskar den totala elförbrukningen (elektricitet och värme). Slammet kan ersätta mineralgödsel i jordbruket, men kan innebära en risk för hälsa och miljö (patogener i slam, toxicitet, etc.). Vid slamavsättning ökar utsläppen till luft (ammoniak och lustgas).

3.6 Sammanfattning – resultat benchmarking och LCA

I projektet har en metodik för att utföra benchmarking och LCA för olika slambehandlingsmetoder tagits fram. Denna metod kan utvecklas vidare och användas för ett specifikt system där lokala förutsättningar som exempelvis avsättningskostnader, transportavstånd, avloppsvattnets sammansättning, effektivitet i hanteringen m.m. tas i beaktande. Metoden kan användas dels av enskilda reningsverk som vill utveckla sin slamhantering dels av myndigheter vid framtagande av direktiv för slamanvändning. Viktigt att poängtera är att resultaten endast kan användas för det system som beskrivits och inte överförs till andra system utan att först anpassas till rådande förutsättningar. En sammanfattning av resultaten kan ses i tabell 3-2.

Benchmarking – resultat

Samtliga föreslagna lösningar antas fungera praktiskt, även om det finns några kritiska punkter som måste undersökas vidare innan storskalig användning. Mer forskning behövs för att hitta lösningar på dessa kritiska punkter (Bertanza, G. m.fl., 2012a, 2012b).

LCA – resultat

Resultatet visar att elförbrukningen har en stark inverkan på alla faktorer utom övergödning. Den elektricitet som krävdes för att minska mängden slam kompensterades för de flesta alternativen inte av den vinst som uppkom tack vare reducerad slammängd.

Processer som minskade slammängden ledde i flera fall till att fosforhalten i utgående vatten steg samtidigt som emissionen av lustgas från reningen ökade.

Direkta emissioner till luft och vatten från reningsverken hade stor påverkan på växthusgasavgång och övergödning. Likaså hade ersättningen av mineralgödsel och produktion av värme eller elektricitet stor inverkan på utfallet (Heimersson, S. m.fl., 2012).

Toxicitet och patogener i slam kan innebära risk vid användning på åkermark. Dessa faktorer kan i nuläget inte kvantifieras eftersom metodiken inte är tillräckligt utvecklad.

Tabell 3-2 Sammanfattning av resultaten från benchmarking och LCA, där de två viktigaste ekonomiska aspekterna redovisas och en helhets-bedömning av de tekniska och miljömässiga (LCA) aspekterna.

Fall-studie	Ekonomiska aspekter ^a							Tekniska aspekter ^e	LCA ^{a,f}
	Avskrivnings-möjlighet	Slam-avsättning ^b	Kemikalie-förbrukning ^c	Minskade slam-transporter	Ökad biogas-produktion	Intäkter från samrötning med organiskt hushållsavfall	Driftskostnads-variationer ^d (%)		
1.1		x (-)	x (-)				-38	+8,6	
1.2	x	x (-)					-1,7	+11	
2.1		x (-, g)			x		-34	+14	
2.2	x	x (-)					-11	+6,6	
2.3	x		x (+)				+13	+33	
2.4	x			x			-21	+34	
3.1		x	x (+)				-39	+106	
3.2 B1		x	x (+)				-34	+50	
3.2 B2		x	x (+)				-31	+50	
3.2 B3		x	x (+)				-39	+46	
3.3		x	x (-)				-4,0	+8,6	
3.4					x	x	-94	+22	

^a De två parametrar som bidrar mest till den ekonomiska utvärderingen redovisas.

^b Minskad slammängd (-) eller förbättrad slamkvalitet (g, möjlighet att ersätta mineralgödsel).

^c Låg (-) eller hög (+) kemikalieförbrukning.

^d De uppskattade driftskostnaderna varierade mellan dessa värden, beroende på lokala förhållanden.

^e Grönt: positivt, gult: neutralt; rött ljus: negativt, med avseende på tekniska och miljömässiga (LCA) aspekter.

^f LCA: Life-Cycle Analysis.

3.7 Nya metoder för kvalitetskontroll av slam

Som ett delprojekt i ROUTES undersöktes biomolekylära metoder för att detektera patogener i slam. Två olika metoder testades; Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) och quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR). Syftet var att undersöka hur väl metoderna fungerade med avseende på svarstid för analys, precision och känslighet.

Den konventionella metoden för analys av patogener i slam är kultivering där slam odlas på exempelvis en agarplatta och därefter kan "colony forming unit" per gram slam (cfu/g) beräknas. Fördelarna med denna metod är att den är enkel och att det är en välkänd teknik. Nackdelen är att det går åt mycket material och att den tar lång tid.

FISH är en metod där molekylära markörer märkta med fluorescerande ämnen används för att hitta sekvenser i cellernas RNA. Om en markör hittar en komplementär RNA-sekvens i en patogen kan den därefter detekteras visuellt med hjälp av ett mikroskop som kan mäta fluorescerande ljus. Fördelarna med FISH är att det går fortare än kultivering, metoden är billig och ger hög precision. Nackdelar är hög detektionsgräns, svårighet att hitta rätt sekvens för den specifika patogenen, att resultat inte kan avläsas automatiskt och att det krävs ett mikroskop som kan mäta fluorescerande ljus.

Vid qPCR extraheras DNA ur ett prov och med hjälp av ett enzym förökas en specifik genssekvens. Den förökade genssekvensen analyseras och DNA-kopior/g prov kan uppskattas. En fördel med qPCR är att det går

snabbt och att resultat kan avläsas automatiskt. Nackdelar är hög detektionsgräns och att metoden inte kan åtskilja döda organismer från levande eftersom metoden endast detekterar DNA-fragment.

I ROUTES-projektet jämfördes de olika metoderna för analys av *C. perfringens*. Slutsatsen var att FISH-metoden fungerade bra och bör utvecklas vidare medan qPCR måste tolkas med försiktighet då ingen åtskillnad görs mellan döda och levande celler. En stor fördel med de molekylära metoderna är att svarstiden endast är några timmar, jämfört med kultivering som tar 1,5–2 dagar för analys av *E. coli* och 4–5 dagar för analys av *Salmonella*.

Fördjupad information finns på ROUTES hemsida, <http://www.eu-routes.org/> (Beimfohr, C., 2013; Tandoi, V. m.fl., 2012).

4 Diskussion

I ROUTES-projektet har många föreslagna tekniker utvärderats för att framför allt minska slammängden och förbättra slamkvaliteten, vilket det finns ett stort intresse för hos svenska vattentjänstföretag. De varierande förhållandena som råder vid de svenska avloppsreningsverken kanske inte fullt ut kan jämföras med de referensalternativ som har definierats i ROUTES, men förhoppningsvis kan resultaten vara kunskapshöjande. Erfarenheterna från benchmarking och LCA-studierna kan ge en vägledning vad gäller de ekonomiska, tekniska och miljömässiga aspekterna som bör tas i beaktning vid val av processteknik. Vid utförandet av LCA framkom det bland annat att SBBGR, MBR och sekventiell anaerob-aerob rötning riskerar att öka utsläpp av fosfor till recipienten jämfört med referensalternativet. Detta är ett stort hinder i Sverige där gränsvärdena för utsläpp av fosfor är striktare än i många andra europeiska länder.

Projektet syftade bland annat till att ta fram ett underlag för att stödja arbetet inom EU med att ta fram nya slamdirektiv. Det framkom till exempel att det finns behov av bättre styrning och lagstiftning kring smittskydd. Trots flera tidigare försök att uppdatera EU:s slamdirektiv från 1986 har detta ännu inte genomförts. En orsak till att nya direktiv dröjer kan vara att det ekonomiska värdet för växtnäringsämnen i slam är mindre än 1 % av EU:s totala stöd till jordbruket och därmed sällan diskuteras inom EU:s gemensamma jordbrukspolitik.

Det viktiga uppströmsarbetet vid källan för att minimera oönskade ämnen till avloppsreningsverk, som till exempel bedrivs vid många svenska avloppsreningsverk, har tyvärr inte diskuterats inom ROUTES. Sverige har ett väl utvecklat uppströmsarbete som bedrivs systematiskt med hjälp av bland annat Svenskt Vattens certifieringssystem Revaq. Stora resurser läggs på att bland annat uppfylla hårda krav på ständiga förbättringar, noggrann uppföljning och kvalitetssäkring av slammet vilket har gjort att uppströmsarbetet har blivit avgörande i Sveriges arbete för att förbättra slamkvaliteten. Eftersom Sverige har positiva erfarenheter av uppströmsarbete och tycker att det är en viktig aspekt som det bör tas hänsyn till när beslut fattas om framtida slam användning, hade det varit önskvärt att även detta hade uppmärksammats i projektet.

Denna rapport har framför allt sammanställts utifrån de presentationer som hölls vid projektets slutkonferens för potentiella användare (2014-04-02) och innehåller en översiktlig presentation av resultaten från projektet. Detta medför att viss information och vissa resultat inte beskrivs i denna rapport men fördjupad information, som till exempel material från workshops, konferenser och projektmöten, finns på ROUTES hemsida (<http://www.eu-routes.org/>).

5 Slutsatser

Utifrån det som presenterats inom ROUTES-projektet kan följande slutsatser dras:

- Det krävs bättre styrning och lagstiftning kring smittskydd i EU:s slamdirektiv.
- Lämpliga mikrobiella indikatorer för bedömning av fekal kontaminering av bakterier är *E. coli* och *Salmonella* och lämplig indikator för bedömning av enterovirus är bakteriofager.
- De laboratorie- och fältförsök som genomfördes för riskanalys av organiska föroreningar visade att ämnen som binds till slam även binds effektivt i jorden och att pH och vattnets egenskaper har en stor inverkan på adsorptionen.
- Resultat från benchmarking visar att samtliga föreslagna lösningar fungerar praktiskt men att det finns några kritiska punkter som bör utredas vidare innan storskalig användning.
- LCA-resultaten visar att den energi som krävdes för att minska slammängden för de flesta alternativen inte kompenserade den vinst som uppkom vid reducerad slammängd.
- För snabbare analys av patogener i slam bör nya analysmetoder som exempelvis FISH utvecklas vidare.
- Ett av målen inom ROUTES var att förbättra slammets kvalitet med avseende på organiska föroreningar och metaller för att möjliggöra slamspridning på åkermark. Uppströmsarbetet är avgörande för att uppnå det målet och det hade varit önskvärt att det hade utvärderats inom projektet.

6 Referenser

- Battistoni, P. m.fl. (2013) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Sludge minimization by different techniques (in conjunction with D2.6) Deliverable D3.3.
- Beimfohr, C. (2013)) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Midterm report on new molecular tools for pathogen detection Deliverable D1.1.
- Bertanza, G. m.fl. (2012a) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Technological benchmarking of new technological trains against conventional WWTPs Deliverable 5.1.
- Bertanza, G. m.fl. (2012b) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Technological benchmarking of new technological trains against conventional WWTPs Factsheet.
- Bertanza, G. & Collivignarelli C. (2012c) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Midterm report of Wet Oxidation of primary and mixed sludge Deliverable 2.2.
- Blanch, A. R. m.fl. (2013) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Bacterial regrowth in sludge samples during storage Deliverable D4.5.
- Boehler, M. m.fl. (2014) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ recovery from ammonia stripping Deliverable D2.7.
- Braguglia, C. M. m.fl. ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Enhanced stabilization processes to improve sludge use in agriculture: preliminary results, Factsheet.
- Braguglia, C. M. m.fl (2012) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Midterm report of AOP and enhanced stabilization processes Deliverable D1.2.
- Colombino, M. m.fl. (2014) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Optimization of sludge pumping Deliverable D3.5.
- Coors, A. m.fl. (2014) Presentationsmaterial ”Ecotoxicological assessment of sludge application to soil: Long-term effects of sludge application on soil fauna”. *2nd End User Conference Routes, Braunschweig 2014, April 2nd*.
- Di Iaconi, C. & Laera G. (2014) presentationsmaterial ”Outputs of the project for small size plants”. *2nd End User Conference Routes, Braunschweig 2014, April 2nd*.
- EU (1986) Rådets direktiv av den 12 juni 1986 om skyddet för miljön, särskilt marken, när avloppsslam används i jordbruket (86/278/EEG).

EU (1991) Rådets direktiv av den 21 maj 1991 om rening av avloppsvatten från tätbebyggelse (91/271/EEG).

EU (2000) Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG av den 23 oktober 2000 om upprättande av en ram för gemenskapens åtgärder på vattenpolitikens område.

EU (2006) Europaparlamentets och rådets beslut nr 1982/2006/EG av den 18 november 2006 om Europeiska gemenskapens sjunde ramprogram för verksamhet inom forskning, teknisk utveckling och demonstration (2007–2013) Uttalanden från kommissionen.

EU (2008) Europaparlamentets och rådets direktiv 2008/98/EG av den 19 november 2008 om avfall och om upphävande av vissa direktiv.

Grömping, M. m.fl. (2012) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Production of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ from Ammonia Stripping (full-scale plant experiments) Deliverable n. 3.1.

Heimersson, S., m.fl. (2012) ROUTES “Novel processing routes for effective sewage sludge management” Environmental sustainability of proposed WWT scenarios via life cycle approach Deliverable n. 5.2.

Kroiss, H. (2014) Presentationsmaterial ”Sewage Sludge processing and management perspectives in Europe”. *2nd End User Conference Routes, Braunschweig 2014, April 2nd.*

Kunkel, U. m.fl. (2014a) Presentationsmaterial ”Fate of organic micropollutants in sludge and wastewater-amended soil”. *2nd End User Conference Routes, Braunschweig 2014, April 2nd.*

Kunkel, U. & Ternes T.A. (2014b) ROUTES ”Novel processing routes for effective sewage sludge management Fate of emerging organic micropollutants in soil after the application of sewage sludge and/or the irrigation of treated wastewater Factsheet.

Laera, G. m.fl. (2014) ROUTES ”Novel processing routes for effective sewage sludge management” Sludge minimization by different techniques Deliverable D2.6.

Mininni, G. (2014) Presentationsmaterial ”Presentation of ROUTES Perspectives of sewage sludge management in Europe”. *2nd End User Conference Routes, Braunschweig 2014, April 2nd.*

Morgan-Sagastume, F. m.fl. (2013) ROUTES ”Novel processing routes for effective sewage sludge management” Biopolymer production (bench and pilot scale) Deliverable D2.8.

Pavan, P. m.fl. (2013) ROUTES ”Novel processing routes for effective sewage sludge management” Anaerobic co-digestion of sludge and organic bio-waste Deliverable D3.6.

Slavik, E. m.fl. ROUTES ”Novel processing routes for effective sewage sludge management” Factsheet “Industrial scale wet oxidation tests on different kinds of sludge”.

- Slavik, E. m.fl. (2014) Presentationsmaterial "Wet oxidation industrial scale tests of different types of sludges". *2nd End User Conference Routes, Braunschweig 2014, April 2nd*.
- Svanström, M. m.fl. (2014a) Technical, economic and environmental assessment of wastewater and sludge management solutions designed to overcome common issues. *ECSM 2014 – 4th European Conference on Sludge Management. Izmir, Turkey, 26&27 May 2014*.
- Svanström, M. m.fl. (2014b) Method for technical, economic and environmental assessment of advanced sludge processing routes. *Water Science and Technology, 69 (12), 2407–2416*.
- Tandoi, V. m.fl. (2012) ROUTES "Novel processing routes for effective sewage sludge management" Pathogens in sewage sludge Fact sheet.
- Tomei, M. C. m.fl. (2014) Presentationsmaterial "Outputs for medium size plants". *2nd End User Conference Routes, Braunschweig 2014, April 2nd*.
- Valentino, F. m.fl. (2012) ROUTES "Novel processing routes for effective sewage sludge management" Biopolymer production from primary sludge or liquid side-streams from wet-oxidation Deliverable D2.4.

Elektroniska källor

<http://www.eu-routes.org/> [2014-04-09–2014-08-11].

Bilagor

Bilaga 1 – Medverkande partners i ROUTES konsortium¹

Nr	Namn	Land
1	Consiglio Nazionale delle Ricerche	Italien
2	Consorzio Interuniversitario Nazionale "La Chimica per l'Ambiente"	Italien
3	Universita' Degli studi di Brescia	Italien
4	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz	Schweiz
5	Bundesanstalt für Gewässerkunde	Tyskland
6	Akademia Techniczno-Humanistyczna Wbielsku-Bialej	Polen
7	Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie	Polen
8	Universite de Reims Champagne-Ardenne	Frankrike
9	Universitat de Barcelona	Spanien
10	Chalmers Tekniska Högskola AB	Sverige
11	3v Greeneagle spa	Italien
12	Vermicon Aktiengesellschaft	Tyskland
13	ECT Oekotoxikologie GmbH	Tyskland
14	AnoxKaldnes AB	Sverige
15	Atemis GmbH Ingenieurbüro für Abwassertechnik, Energiemanagement und innovative Systementwicklung	Tyskland
16	Mediterranea delle Acque S.p.A.	Italien
17	Agriculture and Agri-Food Canada	Kanada
18	Università degli Studi di Roma "La Sapienza" – Chemistry Department	Italien

¹ http://www.euroutes.org/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=18 [2014-04-09].

Bilaga 2 – Delprojekten i WP 1–7 (in English)¹

WP	Projektbeskrivning	
1.1	Development of molecular tools for pathogens detection	
1.2	Removal of organic micropollutants by advanced oxidation processes (AOP)	Laboratory scale
1.3	Enhanced sludge stabilization processes	Laboratory scale
1.4	Identification of microorganisms to optimize digestion performance (FISH)	
1.5	Assessment of hygenization by culture based methods and qPCR	
1.6	Effectiveness of the removal of viral indicators and pathogens by new processes	
2.1	Sludge production minimization by sequencing batch biofilter granular reactor (SBBGR)	Bench plant of 30 L
2.2	Optimization of integrated side-streams bioprocesses for sludge reduction in membrane bioreactor (MBR)	Bench plant of 5–10 L
2.3	Sludge production minimization by microbial electrolytic cells	
2.4	Production of biopolymers from primary sludge and side-streams from wet oxidation	Laboratory scale
2.5	Production of biopolymers from primary sludge and side-streams from wet oxidation	Pilot scale
2.6	Downstream processing of biopolymer-rich biomass for recovery of polymer	Pilot scale
2.7	Anaerobic co-digestion of waste and bio-waste	Pilot scale
2.8	(NH ₄) ₂ SO ₄ recovery from ammonia stripping	Full scale
2.9	Experimental set up of experiments on wet oxidation	Pilot scale
2.10	Kinetic studies and process scale up of wet oxidation	Pilot scale
3.1	Tests of wet oxidation with different types of sludge and assessment of residues	Full scale
3.2	Rheology analysis and optimization of sludge pumping at actual scale	Full scale
3.3	Production of (NH ₄) ₂ SO ₄ from ammonia stripping	Full scale
3.4	Testing of sludge minimisation by biological alternate cycles	Full scale
3.5	Anaerobic co-digestion of waste activated sludge with bio-waste	Full scale
4.1	Bacterial re-growth during storage	
4.2	Fate of heavy metals in sludge amended soil	Laboratory scale
4.3	Effects of emerging organic micropollutants in soil	
4.4	Ecotoxicological testing	
4.5	Phyto-toxicity tests	
4.6	Fate of emerging organic micropollutants in soil	Laboratory scale
4.7	Lysimeter field studies	
4.8	Emerging organic micropollutants monitoring of sludge samples provided by WP1	
4.9	Conventional organic micropollutants monitoring of sludge samples provided by WP1	
4.10	Monitoring of sludge treated field sites	
5.1	Technological benchmarking of new technological trains against conventional WWTPS	
5.2	Environmental sustainability analysis of proposed WWT scenarios via life cycle approach	
5.3	Updating of the technological benchmarking	
5.4	Integration of the activities with impact assessment	
6.1	Results dissemination	
6.2	Organization of training courses for microbial procedures	
6.3	Commission environmental policy	
6.4	Technological uptake	
6.5	Publications	
7.1	Project management	

¹ <http://www.eu-routes.org/> [2014-04-11].



Box 14057, 167 14 Bromma

Tel 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se