



Nr B 2460
Januari 2023

Framtidens slamhantering vid Roslagsvatten

Behandling av kommunalt orötat slam med HTC-teknik
(OxyPower HTC™) och rening av HTC-vatten med SBR och MBBR

Christian Baresel, Peter Axegård, Aleksandra Lazic, Niclas Bornold, Jing-Jing Yang, Andriy Malovanyy



I samarbete med:
Roslagsvatten AB, C-Green AB och Svenskt Vatten Utveckling

Författare: Christian Baresel (IVL), Peter Axegård (C-Green AB), Aleksandra Lazic (Roslagsvatten AB), Niclas Bornold (IVL), Jing-Jing Yang (IVL), Andriy Malovanyy (IVL)

Medel från: Stiftelsen IVL, Roslagsvatten AB, C-Green AB och Svenskt Vatten Utveckling

Fotograf: Skoog Arkitekter

Rapportnummer B 2460

ISBN 978-91-7883-471-6

Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© **IVL Svenska Miljöinstitutet 2023**

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

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

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

Förord

Hydrotermisk karbonisering (HTC) av avloppsslam har sedan några år seglat upp som en av teknikerna för framtidens slamhantering vid svenska kommunala avloppsreningsverk. Tekniken har tagits upp i olika samband och utredningar utan att det fanns data och praktiska erfarenheter för detta slamhanteringsalternativ vid svenska reningsverk. Som alla ”nya” tekniker behövs dock dessa praktiska erfarenheter för att kunna identifiera eventuella utmaningar med tekniken, kunna få en bra uppfattning om resursförbrukningen samt hur producerade slamprodukter och restströmmar kan hanteras och nyttjas.

Med detta som grund tog Roslagsvatten AB ett initiativ som inom sin planering för framtida slamhantering önskade ett bättre beslutsunderlag. Tillsammans med C-Green som svensk HTC-teknikleverantör kontaktades IVL Svenska Miljöinstitutet för att diskutera möjligheten till ett samverkansprojekt som fokuserar på praktiska pilottester. Tillsammans med Stiftelsen IVL är det också Roslagsvatten AB och C-Green AB som möjliggjorde projektet. Efter att projektet uppmärksammades av Svenskt Vatten beviljades ytterligare medel från Svenskt Vatten Utveckling (SVU) för att utöka och komplettera samverkansprojektet med karakterisering av hydrokol som är även kopplat till Revaq.

Resultatet av detta initiativ finns i föreliggande rapport. Trots alla utmaningar med pilotförsök som även detta projekt hade att kämpa med tycker projektgruppen att rapporten kan bidra med en hel del nyttig kunskap till svenska VA-aktörer.

Projektgruppen vill tacka Stiftelsen Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning (SIVL), Roslagsvatten AB, C-Green AB och Svenskt Vatten Utveckling som huvudfinansiärer av projektet. Även medverkande organisationer som bidragit till projektet vill vi tacka. Speciellt Frischmann Process Technology/Aqua Dynamics i England (pilottester med våtoxideration), SLU i Alnarp för ett samarbete mellan Econova och C-Green i ett projekt (odlingsförsök med torversättning) finansierat av Processums FoU-råd, samt projektet ”Fertiliser value of recirculated waste products - development of methodology for quality control” (odlingstester med olika substrat och hydrokol).

Christian Baresel (projektledare IVL), Peter Axegård (projektledare C-Green AB), Aleksandra Lazic (projektledare Roslagsvatten AB)

Innehållsförteckning

Förkortningar och definitioner	6
Sammanfattning.....	7
Summary	8
1 Bakgrund	9
1.1 Behov av alternativa metoder slamhantering.....	9
1.2 Mål och syfte	9
1.3 Projektorganisation och samverkansaktörer	11
2 Genomförande.....	12
2.1 Labbtester med HTC och våtoxideration	12
2.1.1 Hydrotermisk karbonisering	12
2.1.2 Avvattnings.....	12
2.1.3 Våtoxideration.....	13
2.2 Pilottester med HTC och våtoxideration.....	13
2.2.1 Initial slamavvattnings och inmatning i HTC-pilotens slamficka	14
2.2.2 HTC-behandling av avvattnat slam	14
2.2.3 Hydrokol.....	15
2.2.4 Våtoxideration.....	16
2.3 Biologisk behandling av HTC-vatten	16
2.3.1 Aktivitetstester	17
2.3.2 Sidoströmsbehandling av HTC-vatten med SBR och MBBR	20
2.3.3 Huvudströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten (WO-vatten) med SBR och MBBR	21
2.3.4 Sidoströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten med MBBR	22
2.4 Karakterisering av hydrokol.....	22
2.4.1 Undersökta substrat och hydrokol	23
2.4.2 Tillgängligheten för närsalter	23
2.4.3 Odlingförsök	23
2.4.4 Kolsänkepotential hos utgångssubstrat och hydrokol.....	25
2.4.5 Hygienisering och övrigt underlag för Revaq-certifiering	25
3 Resultat och diskussion.....	26
3.1 Pilottester med HTC och våtoxideration.....	26
3.2 Biologisk behandling av HTC-vatten	27
3.2.1 Aktivitetstester	27
3.2.2 Sidoströmsbehandling av HTC-vatten med SBR och MBBR	32
3.2.3 Huvudströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten.....	36
3.2.4 Sidoströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten med MBBR	38
3.2.5 Resultatsammanfattning av biologiska behandlingsförsöken	40
3.3 Karakterisering av hydrokol.....	41
3.3.1 Kemiska och fysikaliska egenskaper hos hydrokol.....	41
3.3.2 Växttillgängligheten för närsalter	49
3.3.3 Odlingförsök	50

3.3.4	Kolsänkepotential hos utgångssubstrat och hydrokol.....	53
3.3.5	Hygienisering och Revaq-certifiering.....	54
3.4	Systemutvärdering och optimering.....	55
3.4.1	HTC-behandling med OxyPower HTC™.....	55
3.4.2	Biologisk rening av HTC-vatten.....	60
3.4.3	Utmaningar och möjligheter vid fullskaleimplementering.....	62
4	Slutsatser och rekommendationer.....	64
5	Referenser.....	67

Förkortningar och definitioner

ARV	Avloppsreningsverk
Blandslam	Blandning av primärslam och bioslam som har avvattnats mekaniskt
BOD	Biokemisk syreförbrukning (Biochemical oxygen demand)
COD	Kemisk syreförbrukning (Chemical oxygen demand)
DO	Löst syre (Dissolved oxygen)
DOC	Utlöst organiskt kol (Dissolved organic carbon)
Färskvatten	Rent vatten som används till ånga, pumptätning mm.
GAK	Granulerat Aktivt Kol
HRT	Hydraulisk uppehållstid (Hydraulic retention time)
HTC	Hydrotermisk karbonisering (Hydrothermal carbonization), även kallat våtpyrolys.
HTC-slurry	Suspension av bildade partiklar av hydrokol i HTC-reaktorn
HTC-vatten	Klarfas efter sedimentering eller efter avvattning med filterpress av HTC-slurry
Hydrokol	Avvattnad fast produkt från filterpress som avvattnar HTC-slurry
KH ₂ PO ₄	Kaliumdivätefosfat
LOD	Detektionsgräns (Level of detection)
LOQ	Kvantifieringsgräns (Level of quantification)
MBBR	Reaktor med biofilmsbärare (Moving Bed Biofilm Reactor)
NH ₄ HCO ₃	Ammoniumvätekarbonat
NO ₂ -N	Nitritkväve
NO ₃ -N	Nitratkväve
pe	Personekvivalent, 70 g BOD/pe,d
PO ₄ -P	Ortofosfatfosfor
Rejektvatten	Vatten som separeras vid mekanisk avvattning av blandslam
sCOD	Andelen COD som är löst i vattnet (Soluble COD)
SS	Suspenderade ämnen (Suspended Solids)
TOC	Totalt organiskt kol (Total organic carbon)
Total-N	Totalkväve (även TN)
Total-P	Totalfosfor (även TP)
TS	Torrsubstans
TSS	Totalt suspenderat material (Total Suspended Solids)
Våtoxideration	Behandling av HTC-vatten med syrgas.

Sammanfattning

Hydrotermisk karbonisering (HTC) av avloppsslam har potential att bli en av teknikerna för framtidens slamhantering vid svenska kommunala avloppsreningsverk (ARV). HTC-tekniken bygger på en process där slammet eller andra substrat behandlas under högt tryck (>20 bar) och under hög temperatur (180-260 °C). HTC-processen genererar hydrokol som kan avvattnas mekaniskt till höga torrhalter (>60 % TS). Några förväntade fördelar med HTC-tekniken är en mer hållbar återföring av närsalter via det producerade hydrokolet, samt andra positiva effekter som t.ex. mindre växthusgasutsläpp och närsaltläckage till miljön. Samtidigt finns vissa utmaningar, som t.ex. hantering av processvatten, som behöver hanteras och oklarheter kring det hydrokolets egenskaper som behöver utredas. För att besvara dessa frågeställningar och samla in praktiska erfarenheter från HTC som slamhanteringsalternativ har pilotförsök med både HTC-behandling och våtoxidering av HTC-vatten genomförts. Örötat slam behandlades för att producera hydrokol och det producerade HTC-vattnet undersöktes vid pilotanläggning Hammarby Sjöstadswerk i bänk- och pilotskalletester för biologisk rening i sido- eller huvudström.

Med avsikt att studera potential för jordförbättring och näringsegenskaper för hydrokol och slam från Roslagsvattens avloppsreningsverk i Margretelund karakteriserades och testades i odlingsförsök med jord och torv. Även bildningen av koldioxid i jord utvärderades. I dessa studier jämfördes resultaten även med hydrokol från fyra andra substrat (rötrest från matrester, stallgödsel, bioslam från rening av processvatten från massa/pappersbruk samt rötat blandslam från ARV).

Projektet har visat att C-Greens OxyPower HTC™ är ett tekniskt möjligt alternativ för att behandla Margretelunds örötade avloppsslam. Olika tester har illustrerat att tekniken kan minska slamvolymen genom en ökning av TS till ca 65 % inte bara för reningsverkets slam utan även för ett antal andra undersökta organiska substrat. Även om HTC-pilotanläggningen inte kunde köras kontinuerligt som en fullskaleanläggning så kunde ändå en processtabilitet visas. Trots att processen i princip är exoterm och en nettoproduktion av värmeenergi över hela processen kan observeras, så behöver processen högvärdig elenergi för drift. Ett effektivt utnyttjande av överskottsvärmen som produceras blir således en viktig aspekt för att åstadkomma högre resurseffektivitet. C-Greens OxyPower HTC™ är en kompakt process med relativt lite ytbehov och kostnader för processen bedöms domineras av driftkostnader i form av energi och driftpersonal.

Tester med biologisk rening av HTC-vattnet som bildas vid HTC-behandling visade att en blandning med endast rejektvatten från slamavvattningen inte är tillräckligt för att åstadkomma en effektiv rening i delströmmen som krävs för att undvika en ökad internbelastning på huvudströmmen. Även om en effektiv reduktion av organiska föroreningar kunde åstadkommas så indikerade både kortidstester i bänkskala och långtidstester i pilotskala en tydlig hämning av nitrifikationen vilket kan tyda på rester av processpåverkande mikro-föroreningar. Även om ingen komplett hämning observerades så visade långtidstester ändå tydligt att en anpassning av mikrobiotan över tid inte kunde observeras. Samtidigt visade kompletterande långtidspilottester med biologisk rening av både HTC-vatten och rejektvatten i huvudströmmen att en effektiv reduktion av både organiska föroreningar uppmätt som COD och ammonium kunde uppnås. Inga hämmande effekter indikerades vilket beror på den mycket kraftiga utspädningen av hämmande störsubstanser i HTC-vattnet. En återföring till huvudreningen innebär dock en kraftig ökat internbelastning främst med organiska föroreningar och ammonium som kräver extra processvolym om inte utgående haltnivåer ska överskridas.

HTC-tekniken utgör således ett intressant alternativ för slamhantering vid svenska kommunala avloppsreningsverk som dock kräver hänsynstagande till anläggningens förutsättningar för att kunna hantera en ökad internbelastning, dagens slamkvalitet för att få en god kvalitet på hydrokolet, och en bra integrering i befintliga processer för att nå ett optimalt resursutnyttjande.

Summary

Hydrothermal carbonization (HTC) of municipal sewage sludge has the potential to become one of the techniques for future sludge management at Swedish municipal wastewater treatment plants (WWTPs). Some expected benefits of the HTC technology are a more sustainable sludge management and return of nutrients via the produced hydrochar, as well as other positive effects such as less greenhouse gas emissions and nutrient leakage into the environment. At the same time, certain challenges such as the handling of process water and uncertainties about the properties of the produced hydrochar need to be investigated. In order to answer these questions and gather practical experience for HTC as a sludge management alternative, pilot trials with C-Green's OxyPower HTC™ have been carried out at Roslagsvattens WWTP in Margretelund, Åkersberga, Sweden. Undigested sludge was treated to produce hydrochar and the produced HTC water was used at KTH/IVL's pilot plant Hammarby Sjöstadswerk in various side- or mainstream bench- and pilot-scale tests for biological treatment.

Hydrochar and sludge from Roslagsvattens WWTP in Margretelund were characterized and tested in growth trials with soil and peat. The formation of carbon dioxide in soil was also evaluated. In these studies, the results were also compared with hydrochar from four other substrates (digested food waste, stable manure, biosludge from treatment of process water from a pulp/paper mill and digested mixed sludge from municipal WWTPs).

The project has shown that C-Green's OxyPower HTC™ is a possible technical alternative for treating Margretelund's undigested sewage sludge. Various tests have illustrated that the technology can reduce the sludge volume through an increase in TS to about 65 %, not only for sewage sludge but also for several other investigated substrates. Although the HTC pilot plant could not be run continuously as a full-scale plant, still a process stability could be demonstrated. Even though the process is basically exothermic and a net production of energy over the entire process can be observed, the process needs high-quality electrical energy for operation. An efficient utilization of the surplus heat that is produced thus becomes an important aspect to achieve resource efficiency. C-Green's OxyPower HTC™ is a compact process with relatively little surface area and costs for the process are judged to be dominated by operating costs in the form of energy and operating personnel.

Tests with biological treatment of HTC water showed that a mixture with only reject water from sludge dewatering is not sufficient to achieve an effective purification to avoid an increased internal load on the mainstream process. Although an effective reduction of organic pollutants measured as COD could be achieved, both short-term bench-scale and long-term pilot-scale tests indicated a clear inhibition of nitrification. While no complete inhibition was observed, long-term tests clearly showed that an adaptation of the microbial community over time cannot be expected. At the same time, supplementary long-term pilot tests with biological treatment of both HTC-water and reject water in the mainstream process showed an effective reduction of both organic pollutants such as COD and ammonium. No inhibitory effects were indicated, which is due to the very strong dilution of any inhibitory substances in the HTC water. A return to the main treatment, however, means a greatly increased internal load, mainly with respect to organic pollutants and ammonium, which require extra process volumes if the effluent levels are not to be compromised.

The HTC technology thus constitutes an interesting alternative for sludge management at Swedish WWTPs, which, however, requires consideration of several aspects: the facility's fitness to handle an increased internal load, today's sludge quality for producing good quality hydrochar, and a good integration into existing processes for optimal resource utilization.

1 Bakgrund

Dagens slamhantering styrs vid många svenska avloppsreningsverk (ARV) av ett avfall-till-resursperspektiv. Kraven för en godkänd slamhantering kommer dock sannolikt att skärpas i framtiden och ett framtida hållbart samhälle kommer att ha ännu högre krav på en hållbar hantering av avloppsslam. Återföring av viktiga näringsämnen till åkermark är en viktig pelare i resurshushållning. Med dagens spridning av avloppsslam efter långtidslagring kan detta i många fall åstadkommas. Samtidigt finns dock en del utmaningar framför allt med mikroföroreningar, transportbehov, lukt och utsläpp av växthusgaser som ger utrymme för en förbättrad slamhantering. Även läckage av till exempel kväve till yt- och grundvatten från slam vid markanvändning behöver undvikas.

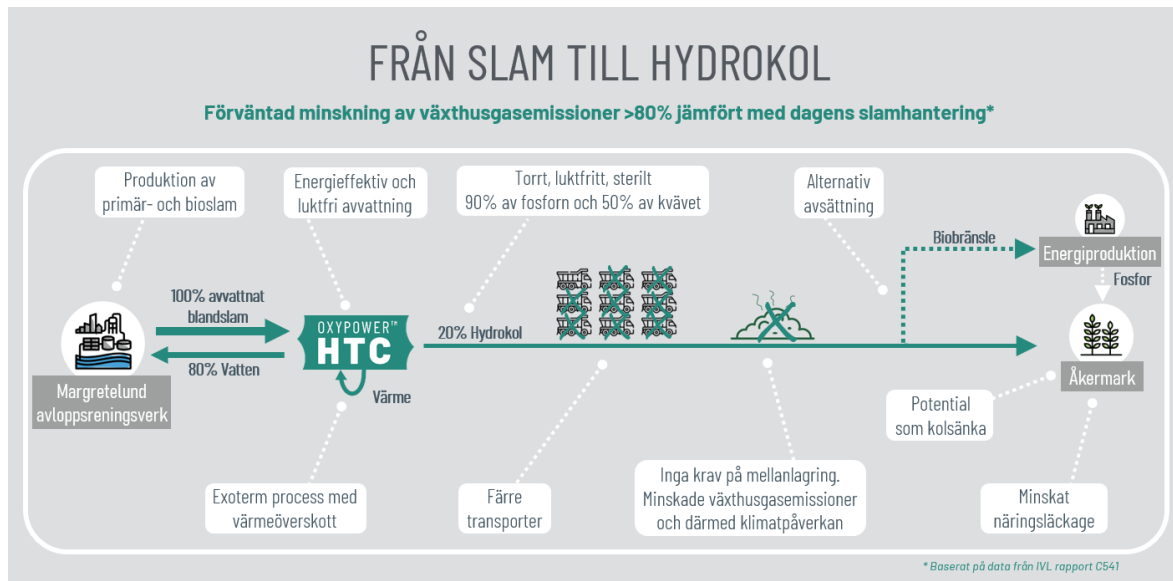
1.1 Behov av alternativa metoder slamhantering

Svenska kommunala avloppsreningsverk står inför nya utmaningar i samband med anpassningen till ett mer hållbart och cirkulärt samhälle. Bland annat på grund av de ökade kraven på lägre restkoncentrationer av olika föroreningar i slammet och försiktighetsprincipen blir en direkt slamspridning på åkermark en allt större utmaning. Ständigt ökande krav på vattenreningen medför i vissa fall att mer föroreningar hamnar i slammet. Hantering av restprodukter, lukt och utsläpp av växthusgaser är andra utmaningar som kräver en modifierad slamhantering.

Hydrotermisk karbonisering (HTC) av avloppsslam har potential att bli en av teknikerna för framtidens slamhantering som även kan ge en förenklad slamhantering vid reningsverk. HTC-tekniken skulle kunna ge en hållbar återvinning av närsalter och medföra andra positiva effekter som t.ex. mindre växthusgasutsläpp. Idag saknas dock data och praktiska erfarenheter för detta slamhanteringsalternativ vid svenska reningsverk. Samtidigt finns vissa utmaningar med tekniken som behöver bemötas. Till dessa räknas om hydrokolets egenskaper tillåter åtminstone samma användningsområden som utgångssubstratet (slam), samt om de organiska substanser, kväve och toxiska föroreningar som bildas i HTC-vatten kan hanteras vid avloppsreningsverk.

1.2 Mål och syfte

Samverkansprojektet mellan IVL, Roslagsvatten och C-Green som finansieras av parterna själva (med Stiftelsen IVL) har haft som mål att i pilotskala undersöka om systemlösningen med HTC-behandling av avloppsslam och våtoxidering av HTC-vatten kan utgöra ett hållbart alternativ för framtidens slamhantering vid svenska avloppsreningsverk. I utvärderingen eftersträvas minskad klimatpåverkan, minskade emissioner av närsalter till miljön och ökad recirkulation av viktiga resurser från avloppsvatten till lantbruket. Projektets övergripande målbild beskrivs i Figur 1.



Figur 1. Schematisk beskrivning av den undersökta slamhanteringen vid Margretelund ARV.

I projektets inledande fas beskrivs nuläget vid Margretelund reningsverk och den tänkta implementeringen av HTC-teknik i framtidens slamhantering samt vilka kritiska aspekter som projektet identifierat i dagens slamhantering och som ska undersökas i projektet (Baresel et al., 2021). Även själva HTC-tekniken har som alla tekniker vissa utmaningar som behöver bemötas. Till dessa utmaningar som projektet syftade till att få svar på räknas:

- i. om HTC-processen är ett resurseffektivt alternativ för slamhantering,
- ii. om hydrokolets egenskaper tillåter åtminstone samma användningsområden som utgångssubstratet (slam), samt
- iii. om de organiska substanser, kväve och toxiska föroreningarna i HTC-vattnet kan hanteras vid avloppsreningsverk.

För att besvara dessa frågeställningar och samtidigt samla in praktiska erfarenheter för HTC som slamhanteringsalternativ har pilotförsök med C-Greens HTC-pilotanläggning genomförts vid Roslagsvattens Margretelunds avloppsreningsverk i Åkersberga. Reningsverkets örötade slam behandlades för att producera hydrokol som sedan karakteriserades med olika relevanta tester. Det producerade HTC-vattnet användes i olika bänk- och pilotskaletester för studier med avseende på biologisk rening i sido- eller huvudström.

I ett tilläggprojekt, som finansierades via Svenskt Vatten Utveckling (SVU) och som inkluderades i det större projektet, syftade till att utreda möjliga användningsområden av hydrokol från HTC-behandlat slam. Detta genom en utvidgad karakterisering av procesströmmarna, bland annat för att bedöma tillgänglighet av näringsämnen, samt lämplighet som jordförbättringsmedel inför en möjlig Revaq-certifiering som ska gälla från 2024.

1.3 Projektorganisation och samverkansaktörer

För att uppnå projektmål och syften genomfördes projektet i samverkan med flera aktörer och finansiärer. Samverkansprojektet som fokuserar på processvattenbehandlingen och den övergripande systemutvärdering drevs av projektparter IVL Svenska Miljöinstitutet, Roslagsvatten AB och C-Green. Det var också dessa tre parter som finansierade projektet via ett samfinansprojekt inom Stiftelsen IVL som innebär offentlig tillgång till projektsresultaten.

Resultat från pilottester med C-Greens HTC-process vid Roslagsvattens reningsverk i Margretelund inklusive våtoxideration av HTC-vatten som genomförts hos Frischmann Process Technology/Aqua Dynamics i England, ingår i denna projektrapport och finansierades av C-Green i samarbete med Roslagsvatten.

Odlingsförsök, där hydrokol från olika typer av substrat delvis har ersatt torv för hobbyodling, har genomförts i två etapper (2021 och 2022) vid SLU i Alnarp inom ramen för ett samarbete mellan EcoNova, C-Green och RISE/Processum med finansiering från Processums FoU-råd. Karaktärisering av slam och hydrokol stöttades av SVU.

Även inledande odlingsförsök där olika substrat och tillhörande hydrokol har använts som jordförbättringsmedel av åkermark har genomförts under 2022 vid RISE/SLU i Uppsala. Försöken är en del i projektet "Fertiliser value of recirculated waste products - development of methodology for quality control" som drivs av RISE och SLU under 2021 - 2023 där olika produkter med näringsämnen från olika restströmmar ingår.

Utöver detta har så kallade respirationsförsök genomförts under vid SLU i Uppsala under 2022 där olika substrat och dess tillhörande producerade hydrokol har blandats med en aktiv jord där CO₂-bildningen över tid utvärderades.

Efter en presentation av projektet för Svenska Näringsplattformen (SNP) beviljades medel från SVU för att utöka och komplettera samverkansprojektet med karaktärisering av hydrokol som är även kopplat till Revaq. Även dessa resultat inkluderas i denna projektrapport.

2 Genomförande

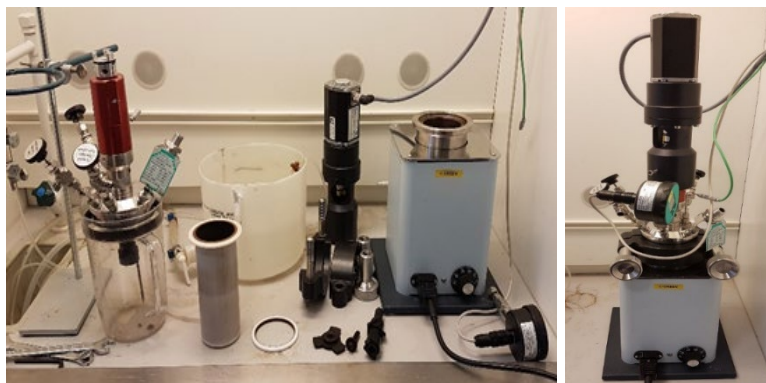
Följande avsnitt beskriver metoder och genomförande av labb- och pilottester med HTC-behandling, våtoxideration och HTC-vattenbehandling samt tester för karakterisering av hydrokol.

2.1 Labbtester med HTC och våtoxideration

Initialt, innan HTC-pilotetableringen, genomfördes tester framförallt med hjälp av C-Greens labbreaktor för HTC-behandling och våtoxideration.

2.1.1 Hydrotermisk karbonisering

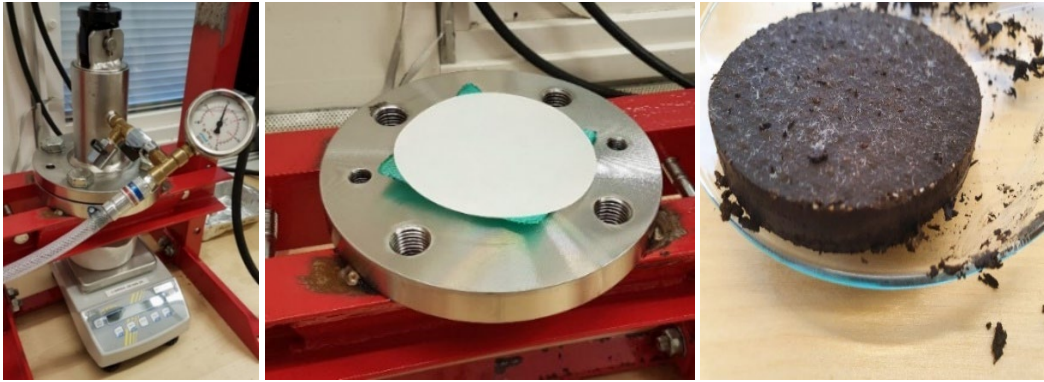
Slammet som ska behandlas späds med avjoniserat vatten till en torrsubstanshalt mellan 10 - 12 % TS. Ca 350 mL slam värms till 200 °C i en satsvis reaktor och behandlas vid 200 °C i 60 minuter. Reaktorn som visas i Figur 2 är från Berghof och är utrustad med värmemantel, omrörning och tefloninsats. Efter HTC-behandlingen i reaktorn kyls hydrokolslurryn till 40 °C innan övertrycket i reaktorn släpps.



Figur 2. C-Greens labbreaktor för HTC-behandling och våtoxideration. Bilden till vänster visar från vänster till höger: omrörare med reaktorlock, tefloninsats, motor och reaktor. Bilden till höger visar reaktorn i drift.

2.1.2 Avvattning

Efter behandling i HTC-labbreaktor hålls HTC-slurry sedan i en satsvis cylinderpress där en kolv sänks ner i en cylinder (Figur 3). Trycksatt luft (1 bar) appliceras ovanför HTC-slurryn varvid en filterkaka fångas på glasfiltret och filtrat pressas genom filterkakan. Trycket hålls konstant ända till dess att en filterkaka har bildats och luft passerar utloppet efter glasfiltret.



Figur 3. C-Greens utrustning för avvattning av HTC-slurry. Från vänster till höger visas: cylinderpress, glasfilter och presskaka med hydrokol.

2.1.3 Våtoxideration

Bildat HTC-filtrat vid avvattningen av HTC-slurryn överförs till en omrörd satsreaktor (Figur 2). Syrgas tillsätts till reaktorn vid rumstemperatur varefter uppvärmning sker till 230 °C. Då temperaturen har nått 230 °C utförs reaktionen under omröring i 120 minuter. Därefter kyls det våtoxiderade HTC-filtratet till 40 °C innan reaktorn öppnas. Våtoxiderat HTC-filtrat filtreras slutligen vid undertryck i Büchnertratt för att avlägsna partiklar som bildas under våtoxideration.

2.2 Pilottester med HTC och våtoxideration

C-Greens mobila HTC-pilotanläggning har utnyttjats för att producera större mängder hydrokol och HTC-vatten under perioden november 2021 till januari 2022. Figur 4 visar den kompletta HTC-piloten på plats vid Margretelunds ARV.



Figur 4. C-Greens HTC-pilotanläggning på plats i Margretelunds ARV. I förgrunden på den vänstra bilden visas mottagningsfickan för slam. Till höger visas pilotanläggningens HTC-reaktor (bilderna är tagna i Margretelund november 2021).

Målsättningen inom projektet har också varit att använda C-Greens nya pilotanläggning för våtoxideration för pilotförsöken vid Margretelunds ARV. På grund av försenad leverans av pilotanläggningen utfördes dessa tester i stället i våtoxiderationspiloten hos Aqua Dynamics i England. Figur 5 visar våtoxiderationspiloterna vid Frischmann Process/Aqua Dynamics och C-Green. Den senare levererades till C-Green årsskiftet 2022/23. Båda pilotanläggningarna har möjlighet att våtoxidera i två steg, där COD först reduceras med 60–70 % i steg 1 och sedan genomgår fortsatt våtoxideration med katalysator i steg 2 till över 98 %. Motsvarande reduktion av TN och NH₄ med katalytisk våtoxideration är över 99 %.



Figur 5. Pilotanläggningar för våtoxideration, med stöd för katalytisk våtoxideration. Till vänster visas den stationära anläggningen hos Frischmann Process/Aqua Dynamics i vilken HTC-vatten från Roslagsvatten våtoxiderades utan och med katalysator under kvartal 1 2022. Till höger visas C-Greens mobila containerbaserade anläggning som levererades till C-Green från Frischmann Process/Aqua Dynamics, årsskiftet 2022/23.

2.2.1 Initial slamavvattning och inmatning i HTC-pilotens slamficka

Varje vecka togs stickprov på rejektvatten och blandslam efter den existerande centrifugeringen vid Margretelunds ARV där polymer Zetag 8165 användes för avvattningen. Inkommande slam hade en torrsubstanshalt mellan 4 - 5 % TS och det avvattnade slammets torrsubstanshalt var normalt mellan 24 - 26 % TS. Slammet transporterades med frontlastare till slamfickan (Figur 6) vid C-Greens HTC-pilot.



Figur 6. Till vänster visas avvattnat slam under transport till HTC-pilotens slamficka. Till höger hålls slam ned i slamfickan (bilderna är tagna i Margretelund november 2021).

2.2.2 HTC-behandling av avvattnat slam

Slammet i slamfickan spädades med vatten till ca 7 % TS så att det blev pumpbart. Därefter värmdes det med ånga från HTC-pilotens ångpanna och slutligen pumpades det till HTC-reaktorn där det behandlades vid ca 200 °C i ca 60 minuter. En utmaning var att slammets viskositet ökade kraftigt då lufttemperaturen sjönk under +5 °C varvid slammet blev svårt att pumpa. Spädning med mer vatten och uppvärmning av slamfickan och utgående rör från slamfickan med värmekablar minskade problemet.

Reaktionsblandningen efter HTC-behandlingen, som består av en slurry av bildade hydrokolpartiklar, kylades och pumpades sedan till en tank där hydrokolpartiklarna sedimenterade och en i det närmaste partikelfri klarfas med HTC-vatten bildas.

I korthet kan processen och en försöksomgång beskrivas enligt nedan:

- Ungefär 150 kg avvattnat bioslam med ca 25 % TS, blandas med spädvatten till ca 7 % TS i en separat omrörd slamficka med lock. Den homogeniserade slamlurryn pumpas med en skruppump in till processen. Under kalla vinterdagar ökar slammets viskositet och mer vatten måste då tillföras för att hålla slammets pumpbart.
- Slamlurryn värms i två seriekopplade direktångvärmare till ca 200 °C och behandlas därefter i en kontinuerlig HTC-reaktor under ca 60 min. Den heta HTC-slurryn kyls till strax under 100 °C och samlas upp i uppsamlingskärl.
- Sedimenterad HTC-slurry kyls till ungefär 40 °C varefter den övre "klarfasen" dekanteras (HTC-vatten) och det kvarvarande sedimentet i botten av tunnan sparas för avvattning i en filterpress. HTC-vatten från filterpressen kan vid behov samlas upp och användas för analyser och utvärdering av bionedbrytbarhet.
- Gaser från HTC-processen kyls och renas i ett kolfilter innan de släpps ut till atmosfär.

C-Greens HTC-pilotanläggning planerades att tas i drift i september 2021 men på grund av generellt längre ledtider vid byggnation och leverans p.g.a. COVID19 kunde en stabil drift i HTC-piloten först åstadkommas från november 2021.

2.2.3 Hydrokol

Hydrokol producerades genom att HTC-slurry avvattnades med en hydraulisk kammarfilterpress med filterarea på 0,4 m² från Novatek och togs ut som filterpresskakor med en TS-halt nära 65 %. Hydrokolet analyserades med avseende på kemisk sammansättning, fysikaliska egenskaper, testades i olika typer odlingsförsök se avsnitt 2.4 nedan. Olika slam och korresponderande hydrokol utvärderades även med avseende på kolsänkepotential, se avsnitt 2.4.4 nedan.

I korthet skedde avvattningen i cykler på 20 – 30 minuter enligt:

- Inmatning och filtrering vid 2 – 3 bar av HTC-slurry av hydrokol
- Pressning vid 12 bar till dess att inget vatten pressas ut
- Luftgenomblåsning vid 8 bar till dess att inget vatten pressas ut
- Normalt producerades ca 2 kg filterkaka med en torrhalt på ca 65 % TS



Figur 7. Filterpress i C-Green HTC-pilotanläggning (vänster) och filterpresskaka av hydrokol med en TS-halt på ca 65 % (höger). Bilderna är tagna i Margretelund november 2021).

2.2.4 Våtoxideration

Från början hade projektet planerat att C-Green skulle ha en specialtillverkad kontinuerlig pilotanläggning för våtoxideration av HTC-vatten från Frischmann Process/Aqua Dynamics på plats i Margretelund från januari 2022. Även här blev det kraftiga förseningar framför allt på grund av COVID19 och att leverans av piloten till Sverige inte kunde garanteras inom den avsedda projektperioden. Anläggningens prestanda är: Maximalt tryck 180 bar, 270 grader °C, reaktorvolym 3,65 L, uppehållstid för våtoxideration (WAO) 30 - 120 min, uppehållstid för katalytisk våtoxideration (CWAO) 5 - 60 min, kapacitet 20–180 L/dygn, maximal COD-halt i HTC-vatten 80 000 mg/L. Anläggningen är kontinuerlig och inbyggd i en mobil 20-fotcontainer.

På grund av leveransförseningen beslöt därför projektgruppen att transportera HTC-vatten till Frishman Process/Aqua Dynamics i England för att genomföra testerna med våtoxideration. Detta innebar dock att mindre mängder än planerat kunde produceras vilket påverkade utformningen av de biologiska testerna för rening av HTC-vattnet (se nedan).

Två pilotkörningar med våtoxideration gjordes. Totalt producerades 750 L WAO-behandlat HTC-vatten. 150 L WAO behandlat HTC-vatten behandlades med CWAO där katalysatorn utgjordes av en fast bädd. Betingelserna för WAO resp. CWAO var 270 °C, 80 bar och 60 minuter. Försöken var kontinuerliga. HTC-vattnet värmdes med indirekt elvärmare innan våtoxiderationen.

2.3 Biologisk behandling av HTC-vatten

Utvärderingen av möjligheten till en biologisk rening av HTC-vatten inkluderade både bänkskala- och pilotskaletester. Förutom aktivitetstester av olika blandningar av avloppsvatten, rejektvatten från slamavvattningen vid Margretelunds ARV, och HTC-vatten, har pilottester med olika reningstekniker (MBBR och SBR) och blandningar genomförts för att undersöka eventuella hämmande effekter. Här ingick både installation och drift av två biologiska pilotanläggningar för behandling av rejektvatten blandat med HTC-vatten och våtoxiderat HTC-vatten. Blandningen behandlades med både MBBR och SBR för att utvärdera lämpliga tekniker för en fullskaleimplementering. Dessa försök genomfördes vid Hammarby Sjöstadswerk.

Rejektvattnet togs ut från Roslagsvattens reningsverk i Margretelund. Detta vatten uppkommer när primärslam och bioslam avvattnas från ca 4 % TS till 25 % TS innan vidare slambehandling och ska inte blandas ihop med mer kväverika rejektvatten från avvattning av rötat slam som uppkommer på andra reningsverk. HTC-vatten tillverkades dels i C-Greens labbskalereaktor, dels i C-Greens HTC-pilot vid Margretelunds ARV. Våtoxiderat HTC-vatten producerades därefter hos Frischmann Process/Aqua Dynamics från HTC-vattnet (se 2.2.4 för mer info).

Tabell 1. Översikt över olika aktivitets- och pilottester som genomfördes inom projektet.

Typ av genomfört test	Blandningar som undersöktes
Aktivitetstester	
HTC-vatten och våtoxiderat HTC-vatten från C-Greens labbskalereaktor (För genomförande se 2.3.1.1) (För resultat se 3.2.1.1)	Bas: - bioslam, kommunalt avloppsvatten och kranvatten Tillsats i olika mängder: - HTC-vatten - våtoxiderat HTC-vatten
HTC-vatten från C-Greens labbskalereaktor och rejektvatten från Margretelunds ARV (För genomförande se 2.3.1.2) (För resultat se 3.2.1.2)	Bas: - bioslam Tillsats i olika mängder: - kommunalt avloppsvatten - kranvatten - HTC-vatten - rejektvatten
Icke behandlat och behandlat våtoxiderat HTC-vatten från C-Greens HTC-pilot (För genomförande se 2.3.1.3) (För resultat se 3.2.1.3)	Bas: - bioslam Tillsats i olika mängder: - kranvatten - våtoxiderat HTC-vatten - GAK-filtrerat våtoxiderat HTC-vatten
Pilot- och bänkskaletester med MBBR och SBR	
Sidoströmbehandling av HTC-vatten och rejektvatten från Margretelunds ARV (För genomförande se 2.3.2) (För resultat se 3.2.2)	Blandningsförhållande på 1:8,6 - 1 del HTC-vatten - 8,6 delar rejektvatten
Huvudströmbehandling av våtoxiderat HTC-vatten och rejektvatten från Margretelunds ARV (För genomförande se 2.3.3) (För resultat se 3.2.3)	Blandningsförhållande på 1658:1:8,6 - 1658 delar kommunalt avloppsvatten - 1 delar HTC-vatten - 8,6 delar rejektvatten
Sidoströmbehandling av HTC-vatten och rejektvatten från Margretelunds ARV (För genomförande se 2.3.4) (För resultat se 3.2.4)	Blandningsförhållande på 1:8,6 - 1 del HTC-vatten - 8,6 delar rejektvatten

2.3.1 Aktivitetstester

Aktivitetstester utfördes för att undersöka om olika typer och mängder av HTC-vatten har hämningseffekter framför allt på nitrifikationsprocessen. Detta för att kunna bedöma lämpliga strategier för behandling av HTC-vatten tillsammans med andra strömmar vid Margretelunds ARV. Testerna utfördes i flera omgångar med olika kombinationer av HTC-vatten och blandningar för en bred kartering och som komplement till pilottesterna.

Testerna, inklusive våtkemiska analyser, utfördes av IVL Svenska Miljöinstitutet på Hammarby Sjöstadswerk (SSV). Tester genomfördes i 2 L bägare vid rumstemperatur under minst 24 timmar. Bägarna fylldes med bioslam från MBR-pilotlinjen vid SSV spätt med kranvatten till TSS 1 g/L och med olika blandningar av HTC-filtrat och rejektvatten från slamavvattningen vid Margretelunds ARV eller kranvatten. Referentstester med samma mängd bioslam och kommunalt avloppsvatten som substrat genomfördes samtidigt. Proverna togs ut varje timme under de första 5 timmarna och ytterligare prov togs vid länge testperioder samt vid avslut av testet. Luftningen med en syrehalt på >1,5 mg/L åstadkoms med en akvariepump. pH, temperatur och DO följdes med handmätare vid varje försök. NH₄-N, NO₃-N, TN, TSS och sCOD analyserades efteråt (dock inte för alla prover). Reaktionshastigheter beräknades baserat på ammoniumreduktion eller nitratproduktion och

slamkoncentrationen vid försöken. Våtkemiska analyser gjordes med kyvetter och spektrofotometer. Vid höga halter fick några prover spädas innan analys för att hamna inom kyvetternas mätområde. I vissa fall förekom en stark färgning av prover med rejektvatten och HTC-vatten vilket innebär en ökad osäkerhet i analysresultaten.

2.3.1.1 HTC-vatten och våtoxiderat HTC-vatten från labbskaleförsök

Dessa första nitrifikationstester genomfördes vid Hammarby Sjöstadsvärk från februari till april 2020 som förberedande test inför projektet. I testerna användes HTC-vatten och våtoxiderat HTC-vatten som tillverkades i C-Greens labbskalareaktor från avvattnat slam från Margretelunds ARV.

Två omgångar med aktivitetstester har genomförts, båda med HTC-vatten som uppvisar höga halter ammonium och organiskt material ($\text{NH}_4\text{-N}$: 1 928 mg/L; COD: 38 220 mg/L) och våtoxiderat HTC-vatten där våtoxideration leder till högre halter av ammonium och organiskt material ($\text{NH}_4\text{-N}$: 3 386 mg/L; COD: 13 400 mg/L). Skillnaden mellan de två omgångarna är att HTC-vatten respektive våtoxiderat HTC-vatten tillsattes till bioslammet redan 24 timmar under aeroba förhållande innan aktivitetstesterna påbörjades för att låta slammet anpassa sig till nytt substrat i den andra omgången. Totalt 10 tester ingick i den första omgången och 8 tester i den andra omgången (Tabell 2). I samtliga tester späddes HTC-vatten kraftig ut med kommunalt avloppsvatten från Henriksdals avloppsreningsverk ($\text{NH}_4\text{-N}$: 33 mg/L; COD: 527 mg/L) och kranvatten med upp till ca 8 ggr.

Tabell 2. Utförande av aktivitetstester med HTC-vatten och våtoxiderat HTC-vatten från bänkskaletester.

Omgång 1 (Februari 2020)				
Test nr.*	Kranvatten (mL)	Slam (mL)	Avloppsvatten (mL)	HTC-vatten (mL)
1HTC0	400	300	300	0
1HTC10	400	300	300	10
1HTC30	400	300	300	30
1HTC50	400	300	300	50
1HTC90	400	300	300	90
Test nr.	Kranvatten (mL)	Slam (mL)	Avloppsvatten (mL)	Våtoxiderat HTC-vatten (mL)
1WO0	400	300	300	0
1WO10	400	300	300	10
1WO30	400	300	300	30
1WO50	400	300	300	50
1WO90	400	300	300	90
Omgång 2 (April 2020)				
Test nr.	Kranvatten (mL)	Slam (mL)	Avloppsvatten (mL)	HTC-vatten (mL)
2HTC0	400	300	300	0
2HTC30	400	300	300	30
2HTC50	400	300	300	50
2HTC90	400	300	300	90
Test nr.	Kranvatten (mL)	Slam (mL)	Avloppsvatten (mL)	Våtoxiderat HTC-vatten (mL)
2WO0	400	300	300	0
2WO30	400	300	300	30
2WO50	400	300	300	50
2WO90	400	300	300	90

* baserat på omgång (1 resp. 2), typ HTC-vatten (HTC resp. WO), och mängd HTC-vatten (0 till 90 mL)

2.3.1.2 Blandning av HTC-vatten från C-Greens labbskalareaktor och rejektvatten från Margretelunds ARV

Två blandningar av HTC-vatten som tillverkats av C-Green i labbskalareaktor och rejektvatten från slamavvattningen vid Margretelunds ARV testades baserat på uppskattade blandningsförhållanden vid en eventuell fullskaleimplementering av HTC-processen vid anläggningen. De två blandningarna på volymförhållande 1:8,6 och 1:3,9 (HTC-vatten:rejektvatten) beräknades motsvara förhållanden för två alternativ vid en fullskaleimplementering som skulle behöva behandlas i en sidoströmsbehandling eller huvudströmmen.

Testerna utfördes under februari - mars 2021. I den första omgång av testet tillsattes en stor andel kranvatten till de två blandningar för att simulera den höga utspädningen vid behandling i huvudström (Tabell 3). I andra omgången av försöket undersöktes de två blandningar utan ytterligare utspädning för att simulera en separat sidoströmsbehandling. Efter det andra testet observerades att ammonium och organiskt material fortfarande fanns kvar i reaktorerna och därför beslutade projektgruppen att fortsätta testerna 2-2 och 2-3 i en tredje omgång för att se om resterande ammonium och organiskt material kunde avlägsnas vid en förlängd försöksperiod (72 timmar). För att säkerställa att det finns en aktiv biologi i reaktorn som kan avlägsna resterande ammonium och organiskt material från testerna 2-2 och 2-3, tillsattes extra 400 mL "färskt bioslam" till proverna (2-2 och 2-3) och testet fortsattes i ytterligare 72 timmar.

Tabell 3. Aktivitetstester med HTC-vatten feb-mar 2021.

Test-Reaktor	Slam (mL)	Tid (tim)	Blandning
1-1	200	24	800 mL avloppsvatten (referens)
1-2	200	24	40 mL blandning 1:8,6 + 760 mL kranvatten
1-3	200	24	25 mL blandning 1:3,9 + 775 mL kranvatten
2-1	200	96	400 ml avloppsvatten (referens)
2-2	200	96	400 mL blandning 1:8,6
2-3	200	96	400 mL blandning 1:3,9
3-2	+400	72	Återstoden av 2-2
3-3	+400	72	Återstoden av 2-3

2.3.1.3 Icke-behandlat och behandlat våtoxiderat HTC-vatten från C-Greens HTC-pilot

Under mars till april 2022 utfördes aktivitetstester med våtoxiderat HTC-vatten (WO) och våtoxiderat HTC-vatten som har behandlats genom ett aktivkolfiler (GAK). Detta för att se om en GAK-filtrering av våtoxiderat HTC-vatten skulle ha en påverkan på den biologiska processen. Tabell 4 visar förutsättningar för det genomförda testet och i avsnitt 3.1 ges en karakterisering av HTC-vattnet. Vid början av dessa tester tillsattes ammoniumvätekarbonat (NH_4HCO_3) för att justera ammoniumhalten till liknande initiala nivåer för en bättre jämförelse av de olika blandningar. För att undvika en aktivitetshämning p.g.a. för höga ammoniakhalter vid de relevanta pH valdes 40 mg $\text{NH}_4\text{-N/L}$ som en initial nivå. Kaliumdivätefosfat (KH_2PO_4 , 4 mg/L) tillsattes till samtliga tester som en pH-buffert och även för att undvika fosforbrist som kan påverka utvärderingen av den biologiska aktiviteten.

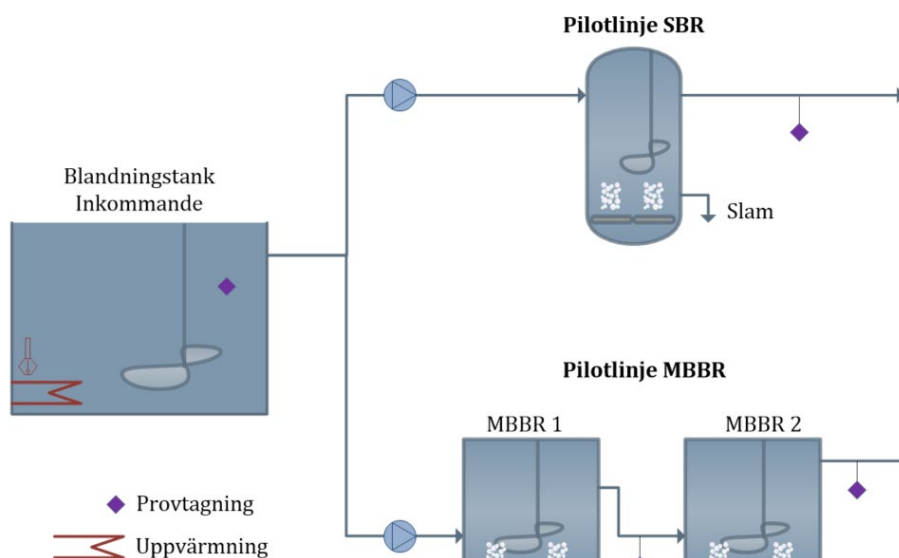
Tabell 4. Information om de genomförda aktivitetstesterna.

Försök nr	Mängd och typ av HTC-vatten (mL)	Mängd och typ kranvatten (mL)	Slam (mL)	Tillsats av NH_4HCO_3	Tillsats av KH_2PO_4
Icke behandlat våtoxiderat HTC-vatten					
1-1	0	1 400	600	×	×
1-2	40	1 360	600	×	×
1-3	60	1 340	600	×	×
1-4	80	1 320	600	-	×
Våtoxiderat HTC-vatten behandlat med GAK					
2-1	0	1 400	600	×	×
2-2	40	1 360	600	×	×
2-3	60	1 340	600	×	×
2-4	80	1 320	600	-	×

2.3.2 Sidoströmsbehandling av HTC-vatten med SBR och MBBR

105 L HTC-vatten som tillverkades i HTC-pilotanläggningen vid Margretelunds ARV blandades med 895 L rejektivatten vid reningsverket för att simulera det blandningsförhållande på 1:8,6 som en fullskaleimplementering beräknas ge om allt HTC-vatten blandas med rejektivatten från slamavvattningen. Blandningen transporterades en gång per vecka till Hammarby Sjöstadtsverk för pilotförsöket. En doppvärmare i inloppstanken användes för att hålla blandningen på en temperatur på ca 25 °C som motsvarar den beräknade temperaturen vid en potentiell framtida fullskala.

Från inkommande tank matades SBR och MBBR-piloterna (fyllningsgrad på ca 40 % med bärare av typ AnoxKaldnes™ K3; yta 500 m²/m³). På grund av kraftig lukt i början av försöken försenades SBR-piloten med flera veckor då en separat ventilation av de olika reaktorerna fick installeras först. Efter installation har luktproblemet i princip försvunnit dock upplevdes även mindre lukt under transporten och därför misstänks initiala störningar i Margretelunds slam-/rejektivattenhantering kan ha orsakat extra luktproblem i starten av pilotförsöken.



Figur 8. Schematisk beskrivning av pilotanläggningen för sidoströmsbehandling.

SBR och MBBR-piloterna ympades med bioslam från MBR-linjen vid Hammarby Sjöstadverk, både vid uppstart (25 november 2021) och den 14 januari 2022. För att undvika fosforbrist doserades KH_2PO_4 (8 mg/L) i inkommande vatten då uppmätta fosfathalter i den inkommande blandningen observerades ligga under 0,5 mg/L. De låga fosfathalter förmodades bero på fosfatutfällningar orsakat av metaller i rejektvatten och HTC-vatten. Efter initiala försök med endast en MBBR (MBBR1) kopplades även ett andra MBBR-steg (MBBR2) in för att undersöka eventuell kompletterande reningseffekt. Det initiala försöket med en MBBR motsvarar en processlösning med lågbelastad MBBR där både COD-reduktion och nitrifikation pågår samtidigt. För att denna processlösning ska fungera krävs en belastning på $<5 \text{ g COD/m}^2, \text{ d}$, uppmätt som bionedbrytbar COD. En lösning som bygger på två MBBR är mer volymeffektiv eftersom belastning på första aeroba steget kan vara högre (5-10 $\text{g COD/m}^2, \text{ d}$) och nitrifikationshastigheten i den andra reaktorn kommer vara högre eftersom nitrifierare inte behöver konkurrera med heterotrofa bakterier om plats på bärare.

Båda SBR och MBBR-piloterna kördes med en låg belastning (Tabell 5) och lång uppehållstid (6 dagar för SBR och 4 dagar för varje MBBR) för att successivt öka belastningen efter att biologin anpassat sig. En belastningsökning har dock inte genomförts baserat på de resultat som har uppnåtts. Luftningen skedde kontinuerligt utan DO-styrning men syrehalter kontrollerades manuellt.

Tabell 5. Belastning för de olika pilotprocesserna.

Pilotprocess	COD-belastning	$\text{NH}_4\text{-N}$ -belastning
SBR	0,14 g COD/gTSS/d	0,007 g $\text{NH}_4\text{-N}$ /gTSS/d
MBBR1	2 g COD/ m^2/d	0,1 g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^2/\text{d}$
MBBR2	0,97 g COD/ m^2/d	0,05 g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^2/\text{d}$

2.3.3 Huvudströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten (WO-vatten) med SBR och MBBR

För att minimera den hämmande effekten på reningsprocessen minskades andelen av våtoxiderat HTC-vatten i den testade blandningen till ett förhållande som skulle motsvara en direkt återföring av WO-vatten och rejektvatten till inkommande avloppsvatten utan extra rening.

Blandningsförhållandet av inkommande avloppsvatten, rejektvatten från slamavvattningen och våtoxiderat HTC-vatten motsvarade den beräknade blandningen vid en fullskaleinstallation på 100 % av dessa tre strömmar. Blandningsförhållandet blev därmed uttryckt som flödesandel 99,5 % inkommande avloppsvatten, 0,44 % rejektvatten från slamavvattningen och 0,06 % våtoxiderat HTC-vatten. Baserat på kunskapen om sammansättningen av de olika strömmar vid denna tidpunkt beräknades TN bidraget med 90 % från inkommande avloppsvatten, 1 % från rejektvatten från slamavvattningen och 9 % från våtoxiderat HTC-vatten.

Både rejektvatten från Margretelunds reningsverk och WO-vatten skickades till Hammarby Sjöstadverk innan piloten kördes. Pilotuppsättningen var identiskt med tidigare tester (se Figur 8). Inflödet förbereddes på plats med 1 m^3 kommunalt avloppsvatten (från Hammarby Sjöstadverk efter försedimentering), 4 L WO-vatten och 9 L rejektvatten från Margretelunds avloppsreningsverk. Upphållstid var 1 dag i SBR och 2 dagar i MBBR. Temperaturen i piloterna reglerades inte och följde därmed inomhustemperaturen i anläggningen.

2.3.4 Sidoströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten med MBBR

För att undersöka en sidoströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten blandat med rejektvatten från slamavvattningen blandades motsvarande mängder HTC-vatten som tillverkades i HTC-pilotanläggningen och därefter våtoxiderades hos Aqua Dynamics med rejektvatten från Margretelunds ARV. Blandningsförhållande motsvarade beräknade framtida flöden vid Margretelund vid en fullskaleimplementering. Eftersom endast begränsande mängder våtoxiderat HTC-vatten fanns tillgängligt, kunde endast tester i en mindre MBBR-pilot genomföras (Figur 9). Testerna genomfördes således framför allt för att upptäcka eventuella svårigheter med att reducera kväve och lättnedbrytbara organiska föroreningar i långtidsdrift.

Båda MBBR startades upp i början av mars 2022 och kördes med vanlig kommunalt avloppsvatten (inflöde till Henriksdal), en uppehållstid på ca 1 dygn och en slamålder på 15 dagar tills en stabil drift och reningseffekt hade etablerats. MBBR1 kopplades sedan om till blandningen med våtoxiderat HTC-vatten och rejektvatten. Även MBBR2 kopplades sedan in och testerna kördes till v27 2022. COD-belastning var 3 g COD/m²/d och ammoniumbelastningen ca 1g NH₄-N/m²/d.



Figur 9. Sidoströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten med MBBR.

2.4 Karakterisering av hydrokol

Projektaktiviteter som omfattar karakterisering av hydrokol och som beskrivs i föreliggande avsnitt samt tillhörande delar i resultat, diskussion, slutsatser och rekommendationer genomfördes till stor del inom SVU-projektet 21-109 "Biokol från Hydrotermisk karbonisering (HTC): Karakterisering, avsättning och Revaq-certifiering".

Karakteriseringen av hydrokolet och jämförande med utgångssubstrat inkluderade flera aspekter:

- Kemiska och fysikaliska egenskaper,
- Tillgängligheten för närsalter,
- Odlingsförsök med torv och jord,
- Kolsänkepotential,
- Hygienisering och Revaq-certifiering

Alla hydrokolprover torkades i ugn över natt vid 105 °C till >99 % TS innan de skickades till externa laboratorier för analys.

2.4.1 Undersökta substrat och hydrokol

Hydrokol från fem olika substrat producerades i C-Greens HTC-pilot under kvartal 2 2021 i Örnsköldsvik. Pilotförsöken gick till på samma sätt som vid de senare försöken vid Margretelunds ARV. Att tester genomfördes med piloten i Örnsköldsvik berodde på förseningar med etableringen av HTC-piloten vid Margretelunds ARV. Presskakorna av hydrokol torkades över vid 105 °C till över 99 % TS för att eliminera risken för mögelbildning.

Följande utgångssubstrat användes för produktion av hydrokol i HTC-piloten:

1. Slam från rening av utgående processvatten från Stora Ensos massa/pappersbruk i Heinola, Finland.
2. Stallgödsel (utan strö) från ko från bondgård nära Örnsköldsvik.
3. Rötat matavfall från Scandinavian Biogas biogasanläggning på Södertörn.
4. Orötat blandslam från Roslagsvattens kommunala reningsverk i Margretelund, Åkersberga.
5. Rötat blandslam från MIVAs kommunala avloppsreningsverk i Örnsköldsvik.

Karakteriseringen med avseende på olika parameter av de olika substraten och hydrokolen gjordes vid Eurofins, Tyskland (Tabell 6).

Tabell 6. Kemiska och fysikaliska analyser på substrat och hydrokol vid försöken i HTC-piloten. Analyserna är utförda av tyska Eurofins (EBC-paket).

	Substrat	Hydrokol	Metod
Fukthalt	×	×	DIN 51718: 2002-06
Askhalt	×	×	DIN 51719: 1997-07
C, H, N-tot		×	DIN 51732: 2014-07
S	×	×	DIN 51724-3: 2012-07
O	×	×	DIN 51733: 2016-04
Kväve	×	×	ISO 11732 och CSN ISO 13395
Metaller	×	×	DIN EN ISO 17294-2
Polyaromatiska kolväten (PAH)		×	DIN EN 16181:2019-08
Ytarea (BET)		×	DIN ISO 9277
Konduktivitet		×	BGK III. C2: 2006-09
pH (CaCl ₂ buffert)		×	DIN ISO 10390: 2005-12
Bulkdensitet		×	Baserad på VDLUFA-metoden A 13.2.1

Värmevärdesanalys utfördes på substrat och hydrokol vid RISE enligt SS-EN-ISO 18125:2017.

2.4.2 Tillgängligheten för närsalter

Tillgängligheten för närsalter bestämdes vid Mark- och Växtlaboratoriet vid SLU i Uppsala för substrat och hydrokol med ammoniumlaktatmetoden (AL-metoden), som är standardmetoden i Sverige för att bedöma behovet av gödseltillförsel i marken (Otabbong et al., 2009). Metoden anses simulera rötters upptag av närsalter använder en blandning av ammoniumlaktat och ättiksyra vid pH 3,75 för att extrahera P, Ca, K och Mg.

2.4.3 Odlingsförsök

Två olika typer av odlingsförsök genomfördes. I det ena fallet ersattes torv partiellt med hydrokol. I det andra fallet tillsattes slam och hydrokol i en väldefinierad jordblandning.

2.4.3.1 Odlingförsök med hydrokol i torv

Försöken genomfördes i samarbete med EcoNova som har god erfarenhet av kommersiella jordprodukter och olika typer av odlingsförsök. Odlingförsöken med torv utfördes med Basilika och Pak choi vid SLU i Alnarp i två omgångar. Valet av båda dessa växter gjordes av EcoNova p.g.a. deras känslighet och lämplighet som testväxter.

I omgång 1, som utfördes 2021, ersattes 20 % respektive 40 % av torvvolymin med sönderdelat, torkat hydrokol från olika utgångssubstrat (från rötrest, från matrester, från bioslam från rening av processvatten från massa/pappersbruk, samt rötat blandslam från kommunalt reningsverk) studerades. 100 % torv användes som referens.

Blandningen av torv och hydrokol lades i 1,5 L krukor som vattnades under en vecka för att få alla blandningar att hålla vatten. Pak choi planterades i fem krukor för de tre typerna av hydrokol. Skörd skedde efter 5 veckor. 20 basilikafrön såddes i fem krukor som gallrades till 10 plantor och skördades efter 5 veckor. Basilikan utvärderades m.a.p uppkomst, längd av högsta plantan, klorofyllindex samt frisk- och torrsvikt. Pak choi utvärderades m.a.p klorofyllindex, samt frisk- och torrsvikt. Odlingbetingelserna var 18 h ljus/dygn, temperatur 20 °C (dag) och 18 °C (natt).

I omgång 2, som utfördes 2022 med mer optimala betingelser (justering av pH och mer anpassad jordanpassad torv), ersattes 20 % och 40 % av torvvolymin med tre typer av hydrokol från olika utgångssubstrat (bioslam från rening av processvatten från massa/pappersbruk samt rötat kommunalt blandslam från Heinola stad). I övrigt var metodiken samma som i omgång 1.

2.4.3.2 Odlingförsök i jord

Odlingförsök i kruk genomfördes under 2022 vid RISE och SLU i Uppsala med rajgräs med slam och hydrokol från Roslagsvatten. Rajgräs är en gröda som är mycket vanlig som djurfoder. Försöken simulerar dagens slamspridning i det översta jordlagret. Fem typer av jord används: Normal jord, jord med låg lerandel/högt pH, kalkad jord, och jord med hög lerandel/lågt pH. Försöken är en del i ett annat projekt (se avsnitt 1.3).

I utvärdering ingår följande analyser:

- *Substrat/hydrokol*
Tungmetaller och Al, Fe, Si, Ca, P
- *Substrat/hydrokol/jord*
C-tot, N-tot, NH₄-N, N-nitrat, TS, pH
Extraktion (4 näringsämnen) med ammoniumlaktat, HCl, citrat, Olsen-extraktion
- *Krukförsök*
Växtmassa ovan jord redovisas som TS, våtvikt och visuellt (bilder)
Växtmassans innehåll av tungmetaller, N-tot, P-tot

I denna rapport finns dock endast resultat från krukförsöken i form av bilder på rajgräs. Övriga resultat blir inte tillgängliga förrän under Kv 1 2023.

Groningsförsök utfördes vid SLU i Uppsala under 2022 med frön från rädisa i lerig sandjord med 1,5 % organiskt material och 300 g i 500 mL plastkrukor. Valet av rädisa gjordes av SLU p.g.a. dess känslighet vid icke-optimala betingelser och eftersom rädisa är en vanligt växt för dessa tester. Destillerat vatten tillsattes för att höja innehållet i jordblandningen till 50 % fukthalt och förinkuberades i växthus vid 15 °C under en vecka. Därefter applicerades hydrokol på tre nivåer (0,5 %, 0,8 % och 1,6 %). NH₄NO₃ och KCl tillsattes efter behov. Krukor med enbart jord användes som kontroll. Alla odlingsförsök var kvadrupla och placerades i växthus under 21 dagar. Efter försöken utvärderades även torrsvikten hos biomassan över jord.

2.4.4 Kolsänkepotential hos utgångssubstrat och hydrokol

Matjord samlades in från ett försöksfält av SLU, Krusenberg, Uppsala. Jorden var lerig sandjord med 1,5 % organiskt material med fukthalt på 29 %. Jorden lufttorkades och förinkuberades under en månad efter justering av fukthalten till 50 % med destillerat vatten. Tre parallella inkubationsuppsättningar initierades för att utvärdera nedbrytningsdynamiken av slam och motsvarande hydrokol. Försöken utfördes under 160 dagar från mars till september 2022 vid 15 °C.

Mängden applicerat utgångssubstrat respektive hydrokol motsvarade 10 ton TS/hektar vilket representerar en realistisk användning av utgångssubstrat och hydrokol i praktiken. Jord utan tillsats av utgångssubstrat resp. hydrokol och jord som endast fick en kontrollerad tillsats av ammoniumnitrat, fungerade som kontroll. Destillerat vatten tillsattes till 65 % fukthalt. Proverna vägdes regelbundet och destillerat vatten tillsattes vid behov för att upprätthålla stabila fuktförhållanden.

Kolmineralisering utvärderades genom att fånga upp bildad CO₂ i NaOH-lösning efter 0, 2, 4, 6, 14, 21, 35, 60, 90, 120 och 160 dagar. Resultat från CO₂-mätningarna kompletterades med mätningar med kalorimetri, en indirekt metod som använder värmeflöden från mikroorganismer, för att uppskatta mikrobiell biomassas aktivitet. Även oorganiskt kväve (NH₄-N och NO₃-N) analyserades.

2.4.5 Hygienisering och övrigt underlag för Revaq-certifiering

Hygieniseringstester utfördes på hydrokol och på avvattnat orötat blandslam från Margretelunds ARV där proverna skickades till Eurofins för att analysera Salmonella, Enterokocker och Escherichia coli. Ett hygieniseringstest utfördes på blandslam från Margretelunds ARV och två olika hygieniseringstester för hydrokol, där det i test nr 2 togs tre prover från samma sats.

Analysresultat från karakteriseringen av de fem hydrokolen togs fram och redovisades för Svenskt Vatten och Revaq kommitté inför en möjlig Revaq-certifiering av hydrokol som ska gälla från 2024.

3 Resultat och diskussion

3.1 Pilottester med HTC och våtoxideration

I Tabell 7 visas HTC-vattnets innehåll av COD, BOD, N-tot, NH₄-N, pH och konduktivitet för samtliga 13 driftveckor. Halten COD låg i medeltal på 18,4 g/L och 18,5 g/L för C-Greens respektive Eurofins analyser. BOD₇ är ca 35 % av COD-innehållet. Detta stämmer bra överens med C-Greens studier av ett 10-tal andra kommunala blandslam.

N-tot ligger i medel på 1,3 g/L med en ammoniumandel på 30 %. Även detta stämmer väl överens med tester av andra kommunala slam. P-tot ligger i medel på 38 mg/L. Variationerna är dock stora mellan körveckorna. Andelen PO₄-P är i snitt ca 80 % av P-tot. pH ligger förhållandevis stabilt mellan 5,2 – 5,6 medan konduktiviteten varierar mellan 2 – 5 mS/cm.

Tabell 7. Karakteristik av producerat HTC-vatten under de olika körveckorna. Analyserna utfördes av Eurofins och C-Green. Analyser utförda vid C-Green anges med asterisk.

Kör- vecka	År/ Vecka	COD* (g/L)	COD (g/L)	BOD ₇ (g/L)	N-tot (g/L)	NH ₄ -N (mg/L)	P-tot (mg/L)	P-PO ₄ (mg/L)	pH*	Konduk- tivitet* (mS/cm)
1	2021/44	18,2	16,0	6,1	1,7	0,58	22	17	5,3	2,0
2	2021/45	21,6	20,0	-	1,7	0,47	70	60	5,6	5,2
3	2021/46	22,1	21,0	6,4	1,6	0,36	22	20	5,6	2,4
5	2021/48	18,8	16,0	7,2	1,0	0,35	25	21	5,3	1,7
7	2021/50	18,0	18,0	7,1	1,1	0,49	62	39	-	-
8	2021/51	15,5	16,0	5,6	0,8	0,31	67	55	5,2	3,6
9	2021/52	-	15,0	5,9	1,3	0,39	29	23	-	-
10	2022/01	-	14,0	5,2	1,3	0,38	26	22	-	-
11	2022/02	15,5	13,0	5,7	1,2	0,38	12	19	5,2	3,4
12	2022/04	16,3	16,0	6,9	1,3	0,47	58	44	5,5	3,8
13	2022/05	19,9	20,0	7,2	1,9	0,50	26	26	5,5	4,7
Medelvärde		18,4	18,5	6,3	1,3	0,39	38	31	5,4	3,3
Maxvärde		22,1	21,0	7,2	1,7	0,58	70	60	5,6	5,2
Minvärde		15,5	13,0	5,2	0,74	0,31	12	17	5,2	2

HTC-vatten från körvecka 5 transporterades till Frischmann Process/Aqua Dynamics i England och behandlades med våtoxideration (WAO) och katalytisk våtoxideration (CWAO), se Tabell 8. Betingelserna redovisas i avsnitt 2.2.4 ovan.

COD reducerades i WAO-behandlingen 64 % respektive 60 % beroende vilket COD reagens som användes. I det efterföljande CWAO-steget eliminerades ytterligare minst 98,4 % respektive 99,7 % beroende på COD reagens.

pH-värdet ökade något över WAO. Detta kan förklaras med omvandling av N-tot till NH₄-N. Innan CWAO-behandling tillsattes NaOH varvid utgående pH blev 6,7. Utan tillsats av NaOH blir pH ca 1,5. Detta beror på att NH₄-N omvandlas till kvävgas samt att det bildas sulfat- och fosfatjoner.

Tabell 8. Analyser av pH och COD vid pilotförsök med våtoxideration (WAO) och katalytisk våtoxideration (CWAO)

	pH		COD (mg/L)			COD (mg/L)		
	IN	UT	IN	UT	Red. (%)	IN	UT	Red. (%)
			15-150 mg COD-kyvett			100-200 mg COD-kyvett		
WAO	6,4	7,1	13 250	4780	64	15 435	6 220	60
CWAO	7,1	6,7*	4 780	<15	>99,7	6 220	<100	<98,4

* Tillsats av 2,25 g NaOH/L WAO-vatten

N-tot reducerades ca 10 % i WAO steget samtidigt som en betydande del (ca 76 %) omvandlades till ammoniumkväve. I CWAO steget omvandlas praktiskt taget all N-tot och NH₄-N till kvävgas.

Tabell 9. Kväveanalyser vid pilotförsök med våtoxideration (WAO) och katalytisk våtoxideration (CWAO).

	N-tot (mg/L)		NH ₄ -N (mg/L)		NO ₃ -N (mg/L)	
	IN	UT	IN	UT	IN	UT
WAO	1 457	1 329	31	1 018	<5	52
CWAO	1 329	<7,5	1 018	<2	52	42

Under några av körveckorna med HTC-piloten avvattnades slurry av hydrokol från HTC-reaktorn i en hydraulisk kammarfilterpress som är robust och lättkörd. Skumning kunde observeras vid pressning och luftgenomblåsning. Torrhalten på producerat hydrokol var ca 65 % TS. De fuktiga filterpresskakorna fick vid förvaring i rumstemperatur synlig påväxt av mögel efter några dagar. Förvaring i slutna plastpåse gav mer mögeltillväxt jämfört med förvaring utan plastpåse.

Separata försök i C-Greens regi utanför projektet med hantering av hydrokol har visat följande:

- Mögelproblem uppstår inte efter torkning av hydrokol till minst 80 % TS. Även vakuumförpackning stoppar mögelbildning vilket kan vara relevant i storskalig användning av hydrokol.
- Mögelbildning kan även minskas med förvaring vid låg temperatur, pelletering och granulering.
- Pelletering och granulering har i inledande försök visat på behov av torkning av hydrokolet till över 80 % TS för att ge acceptabla pellets/granuler

3.2 Biologisk behandling av HTC-vatten

Här redovisas resultaten från försöken med biologisk rening av HTC-vatten i bänkskala- och pilotskala. Även aktivitetstester av olika vattenströmmar och HTC-vatten för att undersöka eventuella hämmande effekter ingår.

3.2.1 Aktivitetstester

Som beskriven i avsnitt 2.3.1 genomfördes olika aktivitetstester med HTC-vatten både som förberedande inför pilottester samt för att kartlägga olika behandlingsalternativ.

3.2.1.1 HTC-vatten och våtoxiderat HTC-vatten från bänkskalletester

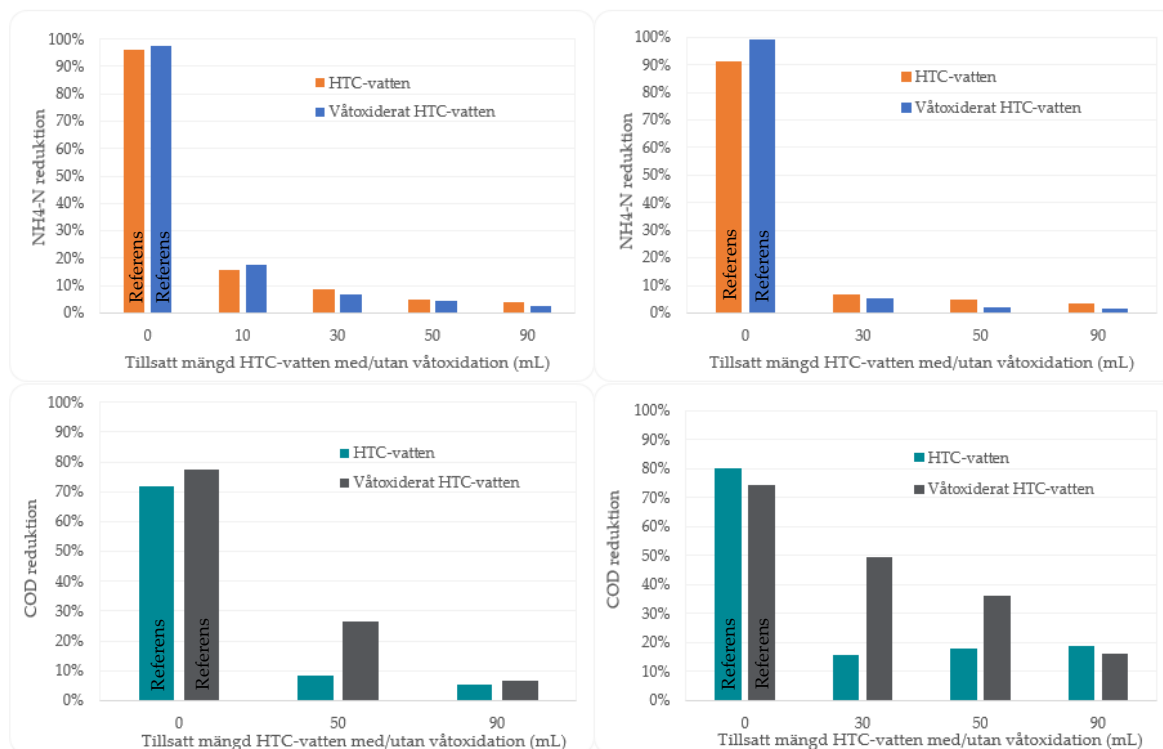
Under testerna hölls syrehalter mellan 1,5-4 mg/L och pH var mellan 7,1-8,5. NH₄-N, NO₃-N och COD halter i början och på slutet av varje test visas i Tabell 10. Eftersom först testomgång 1 fokuserade endast på nitrifikation gjordes COD-analyser endast i några av proverna för att kontrollera om COD kunde brytas ned biologiskt eller inte.

Tabell 10. Uppmätta NH₄-N, NO₃-N och COD halter samt reduktion vid de genomförda aktivitetstesterna.

Omgång 1 (Februari 2020)							
Test nr.	NH ₄ -N IN (mg/L)	NH ₄ -N UT (mg/L)	NO ₃ -N UT (mg/L)	NH ₄ -N reduktion (%)	COD IN (mg/L)	COD UT (mg/L)	COD reduktion (%)
1HTC0	10,4	0,43	9,7	96	410	115	72
1HTC10	34	28,6	4,7	16			
1HTC30	75	68,5	5,2	9			
1HTC50	103	98	5,1	5	2310	2113	9
1HTC90	175	168	6,8	4	4090	3870	5
1WO0	13	0,33	10,2	97	437	99	77
1WO10	47,3	38,9	5,2	18			
1WO30	117	109	4,4	7			
1WO50	161	154	4,5	4	1090	800	27
1WO90	272	265	5,4	3	1510	1410	7
Omgång 2 (April 2020) (tillsatt av HTC-vatten redan 24 h för teststart)							
Test nr.	NH ₄ -N IN (mg/L)	NH ₄ -N UT (mg/L)	NO ₃ -N UT (mg/L)	NH ₄ -N reduktion (%)	COD IN (mg/L)	COD UT (mg/L)	COD reduktion (%)
2HTC0	14,9	1,3	11,1	91	480	96	80
2HTC30	81	75,6	5,2	7	1472	1242	16
2HTC50	120,4	114,3	7,8	5	2360	1935	18
2HTC90	189	182	9,8	4	3836	3123	19
2WO0	12,6	0,103	17,2	99	440	112	75
2WO30	135	128	11	5	972	492	49
2WO50	216	212	11,8	2	1524	972	36
2WO90	415	408	13,9	2	2696	2268	16

Ammonium och COD reduktion visas i Figur 10. Resultaten visar att ammonium och COD-reduktioner var höga när det inte fanns tillsatt av HTC-vatten (tester 1HTC0, 1WO0, 2HTC0 och 2WO0). En hämmande effekt på ammoniumoxiderande bakterier (AOB) och heterotrofa bakterier kunde dock observeras redan vid den lägsta inblandning av HTC-vatten (både med och utan våtoxideration; tester 1HTC10 och 1WO10). Nitrathalter ut var med ca 5 mg/L i tester 1HTC10 och 1WO10 cirka hälften av nitrat ut i referensen (1HTC0 respektive 1WO0). Detta mot förväntade högre nitrathalter än i referenstesterna p.g.a. höga initiala ammoniumnivåer om ingen hämning skulle ske. Det misstänks därför att det fanns hämmande ämnen i HTC-vattnet. I testerna 1HTC30-90 och 1WO30-90 fanns höga ammoniumhalter redan vid början av testerna. Dessa tillsammans med rumstemperatur och pH 7,1–8,5 kan innebära höga ammoniakhalter som också har en hämningseffekt på nitrifikationsprocessen. Den observerade ammoniumreduktionen skedde både p.g.a. nitrifikationsprocessen och ammoniakstrippning.

I andra testomgången kunde ingen effekt av att tillsätta HTC-vatten redan 24 timmar före testet till bioslammet observeras på ammoniumreduktionen för de olika inblandningar. För COD-reduktionen kan eventuell en något mindre hämning observeras från Figur 10. Detta kan tyda på en viss anpassning av biologin till HTC-vatten vilket resulterar i en bättre COD-reduktion.



Figur 10. Reduktionsgrader för NH₄-N och COD vid de genomförda aktivitetstesterna (Omgång 1 till vänster och Omgång 2 till höger).

3.2.1.2 Blandning av HTC-vatten från C-Greens labb HTC-reaktor med rejektivatten från Margretelunds ARV

Inför aktivitetstestet med två blandningar av HTC-vatten från C-Greens labb HTC-reaktor och Margretelunds ARV rejektivatten gjordes analyser på plats vid Hammarby Sjöstadsvverk efter filtrering genom 0,45 µm filter för att karakterisera blandningarna (Tabell 11). COD och NH₄-N halter i 1:3,9 blandningen ligger på en högre nivå då en större andel HTC-vatten ingår i blandningen.

Tabell 11. Analyserade halter sCOD, NH₄-N, NO₃-N och PO₄-P i de undersökta blandningarna med HTC-vatten : rejektivatten.

Blandning HTC-vatten : rejektivatten	sCOD (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
1 : 8,6	5295	571	0	1
1 : 3,9	6210	783	1	1,1

I testerna med hög utspädning av blandningen med HTC-vatten/rejektivatten och avloppsvatten (1-2 och 1-3; se Tabell 12) och referenstesten (test 1-1) med endast avloppsvatten reducerades ammoniumhalten som initialt låg på samma nivå (ca 25 mg/L) till under detektionsgränsen på 4 mg/L efter 24 tim. Testerna indikerade således ingen hämningseffekt på nitrifikationsprocessen. Detta kan förklaras med att en eventuell hämmande effekt i HTC-vatten spädades ut och inte längre påverkade den biologiska aktiviteten. Eftersom utspädningsförhållanden efterliknade en tänkbar framtida blandning vid återföring till huvudströmmen, kan det tolkas som att störningar på huvudprocessen p.g.a. återföring av obehandlat HTC-vatten/rejektivatten inte behöver förväntas.

Tabell 12. Uppmätt NH₄-N i början och efter 24 h i aktivitetstest.

Test nr.	NH ₄ -N IN (mg/L)	NH ₄ -N UT (mg/L)
1-1	25,5	<4
1-2	26,2	<4
1-3	24,3	<4

Samma ammoniumreduktion som ovan kunde konstateras för referensreaktorn med endast avloppsvatten i den andra testomgången (2-1, se Tabell 3). Tabell 13 visar förändringen av NH₄-N, NO₃-N, COD, TN och pH över de 24 timmar som test pågick. Liknande halter observerades för de olika tester i första omgång. Ammonium avlägsnades nästan helt och även en TN-reduktion observerades trots att testet utfördes under aeroba förhållanden. Detta då en ojämn lufttillförsel till testreaktorn kan ha öppnat för en simultan nitrifikation och denitrifikation.

Tabell 13. Analysresultat för aktivitetstester med blandning HTC-vatten från C-Greens labb HTC-reaktor med rejektivatten från Margretelunds ARV

Test	NH ₄ -N (mg/L)		NO ₃ -N (mg/L)		COD (mg/L)		TN (mg/L)		pH (-)	
	0 h	24 h	0 h	24 h	0 h	24 h	0 h	24 h	0 h	24 h
2-1	28,7	<4	0,4	18,9	243	139	39	25	7,63	6,9

Haltutvecklingen för samma parameter för de två tester med de två olika HTC-vatten/rejektivatten blandningar (2-2 och 2-3, se Tabell 3) visas i Tabell 14. Den fria ammoniumkoncentrationen beräknades på grund av det höga pH-värdet och temperaturen som noterades under testet. pH-värdena ökade i början av testerna på grund av CO₂-strippning från blandningen men förväntades sedan att minska p.g.a. nitrifikationsprocessen. pH stannade dock på en nivå på ca 9 efter 24 h till testets slut. Det kan tolkas som att ingen nitrifikation tog plats efter de första 24 tim. Låga NO₃-N nivåer under testerna berodde troligtvis på en låg nitrifikation och denitrifikation (Tabell 13). Att reduktionen av både NH₄-N och COD var höga under de första 48 h men sedan avstannande kan också bero på att testet initialt är framtagna för korttidstester (5 - 24 h). Det misstänks t.ex. att ammoniumreduktion efter 24 h berodde mest på ammoniakstrippning. Även brist på fosfor kan ha uppstått som tyvärr inte mättes under testet. Efter 24 h kunde endast en mindre ammonium och COD-reduktion observeras. Ammoniakhalterna var höga efter 24 h och detta kan ha orsakat en hämningseffekt på båda AOB och heterotrofa bakterier.

Tabell 14. Analysresultat från tester med blandningarna 2-2 och 2-3 i den andra kampanjen.

Timmar	Test 2-2 (blandning 1:8,6) (mg/L)						Test 2-3 (blandning 1:3,9) (mg/L)					
	NH ₄ -N	NO ₃ -N	COD	TN	PH	NH ₃ -N*	NH ₄ -N	NO ₃ -N	COD	TN	PH	NH ₃ -N*
0	362	1,9	3070	484	7,0	2	490	2,5	3870	592	7,2	4,3
24	275	2,4	980		8,9	85	418	3,2	1205		9,0	151
48	266,5	2,1	1005		8,9	82	399	3,2	1240		9,0	144
72	246	2,2	980		8,9	76	326	3,3	1190		9,0	118
96	211	2,2	1005	252	8,9	65	307	3,1	1130	364	9,0	111

*beräknade värden

För att undersöka om den låga ammonium- och COD-reduktionen efter de första 24 h berodde på en låg bakterieaktivitet i testerna 2-2 och 2-3, tillsattes 400 mL "färskt" bioslam från MBR-pilotlinjen vid Hammarby Sjöstadswerk till de återstående testvolymerna från 2-2 och 2-3. Genom tillsats av extra bioslam spädades ammoniumhalterna i blandningen ut (Tabell 15). Andelen fri ammonium var inte längre hög p.g.a. de låga ammoniumhalterna och lägre pH i den nya blandningen. Det färska slammet tillsammans med aktiva bakterier gav en bra nitrifikation (Tabell 15). Att inte allt NO₃-N förbrukades i denitrifikationen berodde förmodligen på otillgänglig COD i blandningen. Den lätt biologiskt nedbrytbara COD hade troligtvis redan konsumerats i det andra

kampanj. Efter 24 h observerades att reaktionshastigheterna gick ned som i den andra kampanjen (Tabell 14). Tillsats av totalt 600 mL bioslam (200 mL i andra omgång och ytterligare 400 mL i tredje omgång) till en provvolym på 400 mL blandning av HTC-vatten/rejektvatten innebär dock även en stor utspädning i försöken och att ingen hämningseffekt kunde observeras kan således i huvudsak bero på utspädningen.

Tabell 15. Analysresultat från tester med blandningarna 3-2 och 3-3 i den tredje kampanjen

Timmar	Test 3-2 (blandning 1:8,6) (mg/L)				Test 3-3 (blandning 1:8,6) (mg/L)			
	NH ₄ -N	NO ₃ -N	COD	TN	NH ₄ -N	NO ₃ -N	COD	TN
0	110	1,7	543	180	161	2,2	625	198
24	55	45			140	26,4		
72	45	55	263	138	129	11,9	489	176

Utifrån dessa tester med två blandningar av HTC-vatten från C-Greens HTC-labbskalareaktor och Margretelunds ARV rejektvatten konkluderades att pilotförsöken med dessa blandningar borde starta med låg NH₄-N belastning och att tillsats av fosfor bör göras för att undvika eventuell fosforbrist.

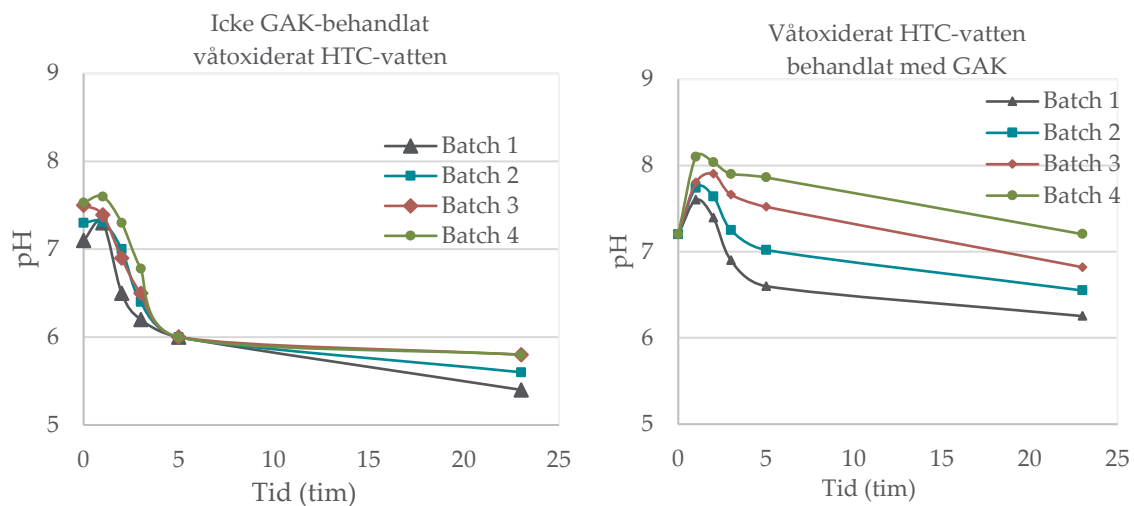
3.2.1.3 Icke behandlat och behandlat våtoxiderat HTC-vatten från C-Greens HTC-pilot

Tabell 16 visar analysresultaten för aktivitetstester med icke-behandlat och behandlat våtoxiderat HTC-vatten. Alla blandningar justerades till liknande ammoniumhalter vid start av försöket genom kemikalietillsats. Från tabellen kan det observeras att ammoniumhalten reducerades mer ju högre utspädningen av HTC-filtratet var.

Tabell 16. Analysresultat från aktivitetstester med behandlat och icke-behandlat våtoxiderat HTC-vatten.

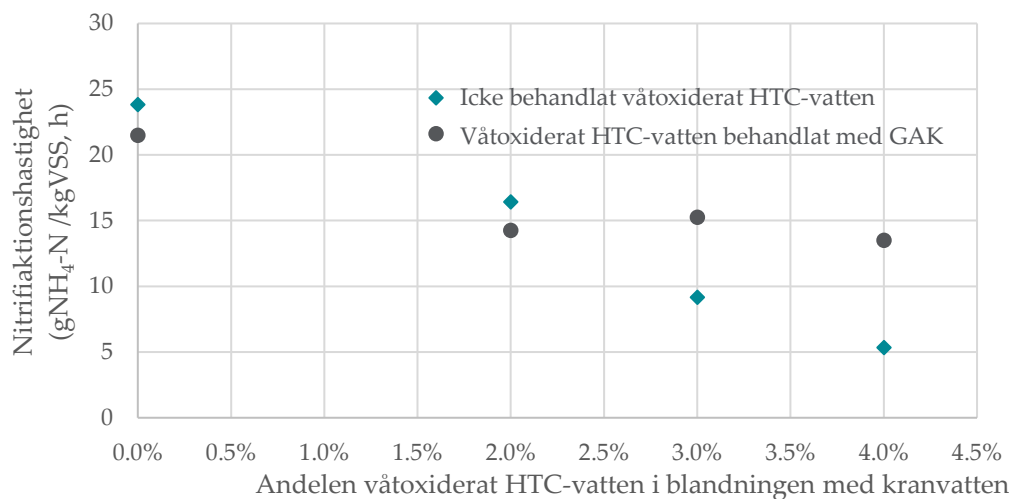
Försök nr	Tid				
	0 h	5 h		23 h	
	NH ₄ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)
Icke behandlat våtoxiderat HTC-vatten					
1-1	37,8	9,2	21,6	9	31,2
1-2	36,5	16,8	21,3	8,1	18,7
1-3	36,2	25,2	11,2	9,5	16,7
1-4	41,7	35,3	6,2	14,7	15,8
Våtoxiderat HTC-vatten behandlat med GAK					
2-1	36,3	10,5	23	8,8	24,2
2-2	34,5	17,4	17	16	20,2
2-3	35,3	17	17	10,7	24,6
2-4	41	24,8	14	13,2	27,8

pH för båda kampanjerna visas i Figur 11. pH ökade först i båda omgångar p.g.a. strippning av CO₂ men sjönk sedan när nitrifikation startade. Efter 5 timmars körning var pH lägre än 6 i testerna 1-1 till 1-4, vilket kan antas vara hämmande för nitrifikationsprocessen och analysresultaten efter 23 h rekommenderas därför beaktas med viss reservation.



Figur 11. pH-trender vid de genomförda aktivitetstesterna.

Resultaten tyder på en nitrifikationshastighet som är högre än hastigheter vanligt vid svenska avloppsreningsverk (1-2 gNH₄-N/kgVSS, h). På grund av det låga pH-värdet vid testets slut, rekommenderas att jämförelse av nitrifikationshastigheten endast görs under de första 5 timmarna för testerna 1-1 till 1-4. Resultaten visade då att när andelen våtoxiderat HTC-vatten i blandningen med kranvatten var under 2 % i testet, kunde ingen skillnad i nitrifikationen observeras mellan behandlat och icke-behandlat HTC-vatten. När andelen våtoxiderat HTC-vatten i blandningen med kranvatten var 3 % och 4 %, observerades en ökning i nitrifikationshastigheten på 66 % - 150 % för GAK-behandlat våtoxiderat HTC-vatten jämfört med obehandlat våtoxiderat HTC-vatten (Figur 12).



Figur 12. Ammoniumtrender vid de genomförda aktivitetstesterna.

3.2.2 Sidoströmsbehandling av HTC-vatten med SBR och MBBR

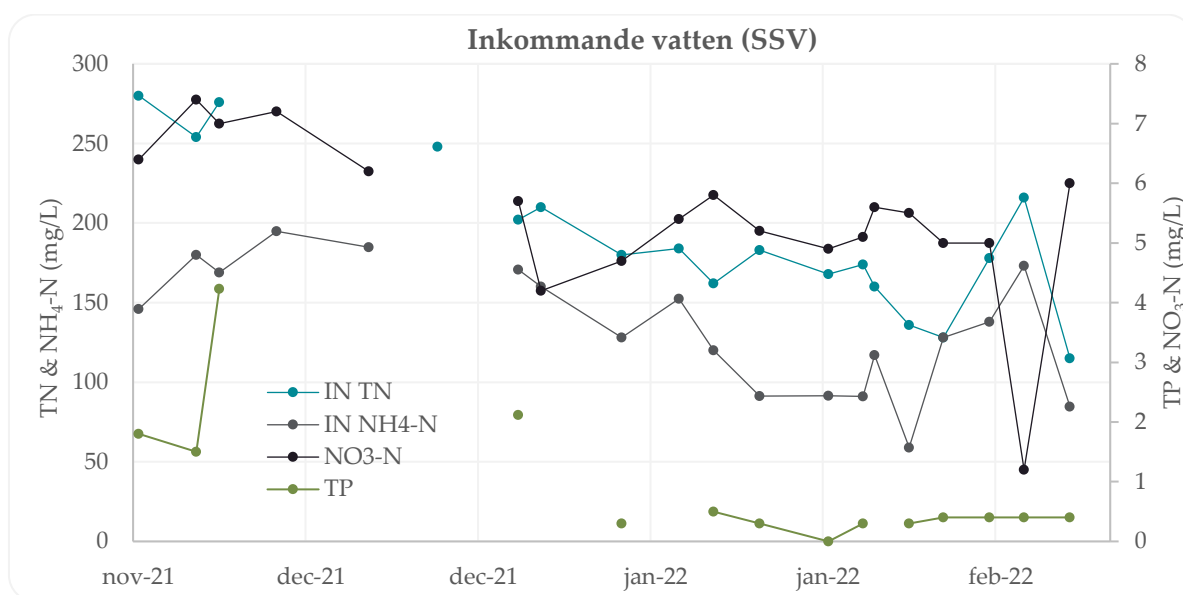
Pilottesterna startade i början av november 2021 med först MBBR-pilotreaktorn. En utmaning som pilotkörningar konfronterades med i början var oförklarliga avvikelser i blandningen av HTC-vatten/rejektvatten som levererades från Margretelunds ARV. Tabell 17 visar Eurofins rapporterade halter för rejecktvalet och HTC-vatten innan de två delströmmar blandades för transport till Hammarby Sjöstadsvärk. Tabellen visar även beräknade och förväntade halter baserat

på dessa analyser och blandningsförhållanden. Som visas i tabellen, avviker de faktiska halter som baseras på prover och analyser som gjordes i pilotanläggningen av själva blandningen delvis signifikant från de förväntade halter. Även om kvävefraktioner eventuellt kunde påverkas under transporten och fosfat eventuellt bilda komplex med metaller som fanns i blandningen så var det ändå svårt att hitta en förklaring till detta. Samma problem kvarstod i två veckor vilket medförde att denna period inte togs med i utvärderingen av pilotförsöken. En förklaring varför analyserna senare stämde väl överens med att förväntade halter kunde inte hittas.

Tabell 17. Analyserade halter i delströmmar och blandningen för sats 3 november 2021.

Parameter (mg/L)	Delströmmar		Blandning		Differens
	Rejekt ARV	HTC-vatten	Beräknad halt	Uppmätt halt	
TSS	570	260	538	-	-
COD	1 800	16 000	3 291	3249	-1 %
BOD ₇	1 300	6 100	1 804	-	-
NH ₄ -N	71	580	124,5	993	+698 %
PO ₄ -P	0,007	17	1,8	0,2	-89 %
NO ₃ + NO ₂	<0,1	<0,5	<0,1	14,2	+10 000 %
TP	0,3	22	2,6	0,3	-88 %
TN	84	1700	253,7	1440	+470%
Volym (L)	895	105	1 000	1 000	0 %

Figur 13 visar halter för olika kvävefraktioner och totalfosfor för hela första testperioden förutom de initiala två veckor. Även om halterna har varierat en del mellan de olika satsar som levererat genom testperioden så har haltvariationerna ändå varit mindre än under de först två veckorna.



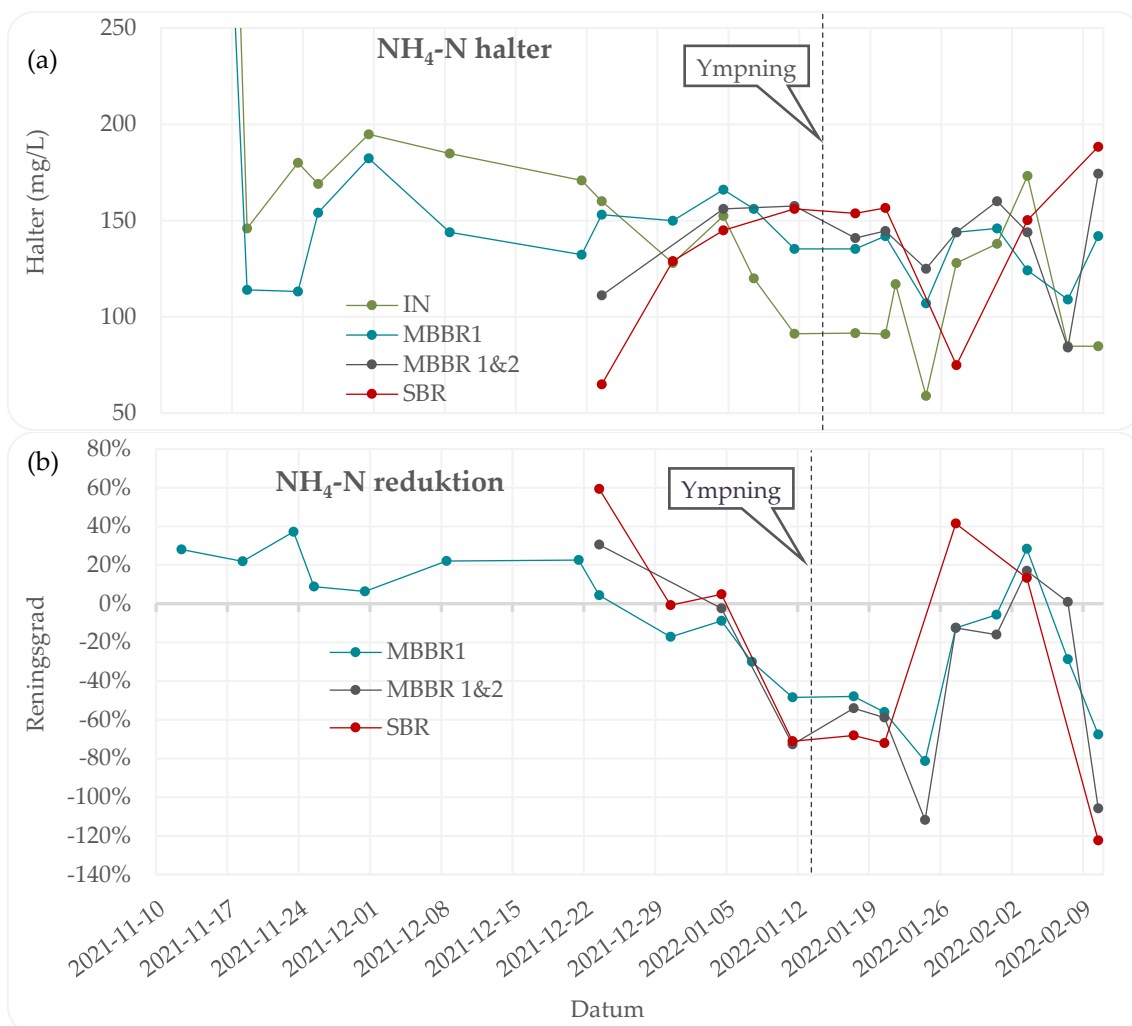
Figur 13. Halter i inkommande blandningen av rejekt och HTC-vatten.

Figur 14 visar utvecklingen av ammoniumhalter (a) och -reduktionen (b) över de olika pilotreningssteg. En initial ammoniumreduktion på ca 20 % efter uppstart i första MBBR (MBBR1) övergick till en ökande negativ reduktion av ammonium (haltökning). Även i andra MBBR steget (MBBR2) och SBR-piloten observerades en ökande negativ ammoniumreduktion efter uppstart. En möjlig förklaring är att bakterierna som etablerades i piloterna med hjälp av bioslamympning från MBR-piloten vid Hammarby Sjöstadverket, drabbades av en "chock" vid byte från kommunalt avloppsvatten till blandningen med endast HTC-vatten/rejektvatten. Det medförde att aktiviteterna avtog efter bytet av inflödet. Med den låga bakterieaktiviteten och kontinuerlig

tillförsel av kväve med inflödet ökade kvävet i reaktorn. Nitrat- och nitrithalter över pilotstegen låg samtidigt konstant på samma låga nivåer under hela försöksperioden (Tabell 18), vilket indikerar avsaknaden av nitrifikation. Förutom den hämmande effekten från testblandningen kan en hög COD-belastning vara en annan orsak som begränsar nitrifikationsprocessen. Heterotrofa bakterier blev dominerande i reaktorerna och AOB konkurrerades ut.

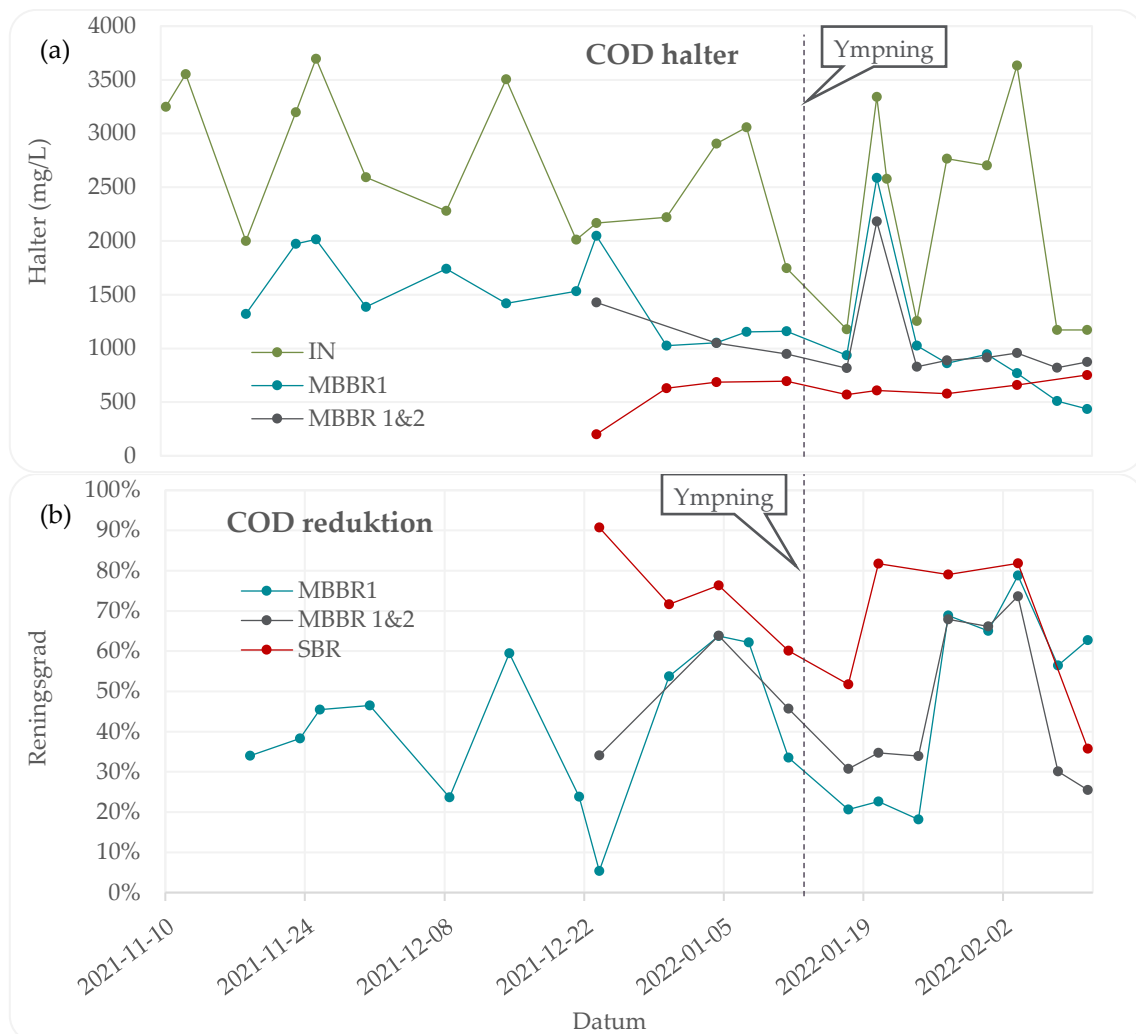
För att undersöka effekten av ympningen genomfördes en ny ympning den 14 januari 2022 i samtliga piloter. Som figuren indikerar kunde en trendändring efter några dagar observeras i samtliga processer. Efter den 2 februari vände dock trenden igen till en kraftig negativ reduktion som fortsatte till pilotförsöken avslutades. Samma förklaring som vid första ympning, alltså hämning av bakterier och hög COD-belastning, kan användas här. Även om inkommande försöksvatten hölls vid en konstant temperatur på ca 25 °C så har inte pilotreaktorerna själv värmts upp och temperaturen i processen har därför legat på ca 16 °C genom försöken. Detta kan ha påverkat nitrifikationen mer än COD-reduktionen. Dock har ingen nitrifikation alls kunnat observeras. Att COD-reduktionen inte var bra nog kan ha hindrat nitrifikationen.

Resultaten från försöken pekar dessutom på att ingen nitrifikation etablerades i någon av de olika reningssystem under försöksperioden.



Figur 14. Ammoniumhalter (a) och -reduktion (b) över piloterna vid sidoströmsbehandling.

Figur 15 visar COD-halter och -reduktionen över de olika reningsstegen. I motsats till ammonium sker en reduktion under hela testperioden förutom i MBBR2. Störst reduktion med upp till 90 % skedde i SBR:en som också påverkades mindre än MBBR:en av de kraftigt varierande inkommande COD-halter. Den extra ympningen av piloterna den 14 januari 2022 har inte påverkat utgående COD-halter dock kan en viss reduktionsökning observeras efter 2 uppehållstider (HRT - hydraulic retention time) som dock minskar mot testernas avslut.



Figur 15. COD-halter (a) och -reduktion (b) över pilotstegen.

Tabell 18 visar medelvärden för inkommande och utgående halter över hela testperioden (förutom de två första veckor med oförklarliga avvikelser i blandningen) för de tre reningsprocesser. Bortser man från de kraftiga variationerna i inkommande vattensammansättning så indikeras endast en marginell TN-reduktion, ingen ammoniumreduktion eller nitratproduktion. Samma resultat från aktivitetstesterna i labbskala kunde nu påvisas i pilotskala. En reduktion av COD och BOD sker i samtliga piloter med den högsta reduktionsgraden i SBR-piloten.

Tabell 18. Genomsnittsvärden för de tre pilotreningssteg.

	pH (-)	HRT (d)	TN (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	COD (mg/L)	BOD (mg/L)
IN	7,52±0,4		192±48	136±39	5,48	0	2 500±790	1 950±350
MBBR1	7,90±0,2	4	189±31	139±20	5,02	0	1 295±552	589±232
MBBR2	8,01±0,2	4	170±36	140±25	4,37	0	1 063±408	250±108
SBR	7,60±0,5	6	148±36	135±40	4,35	0,11	598±160	140±124

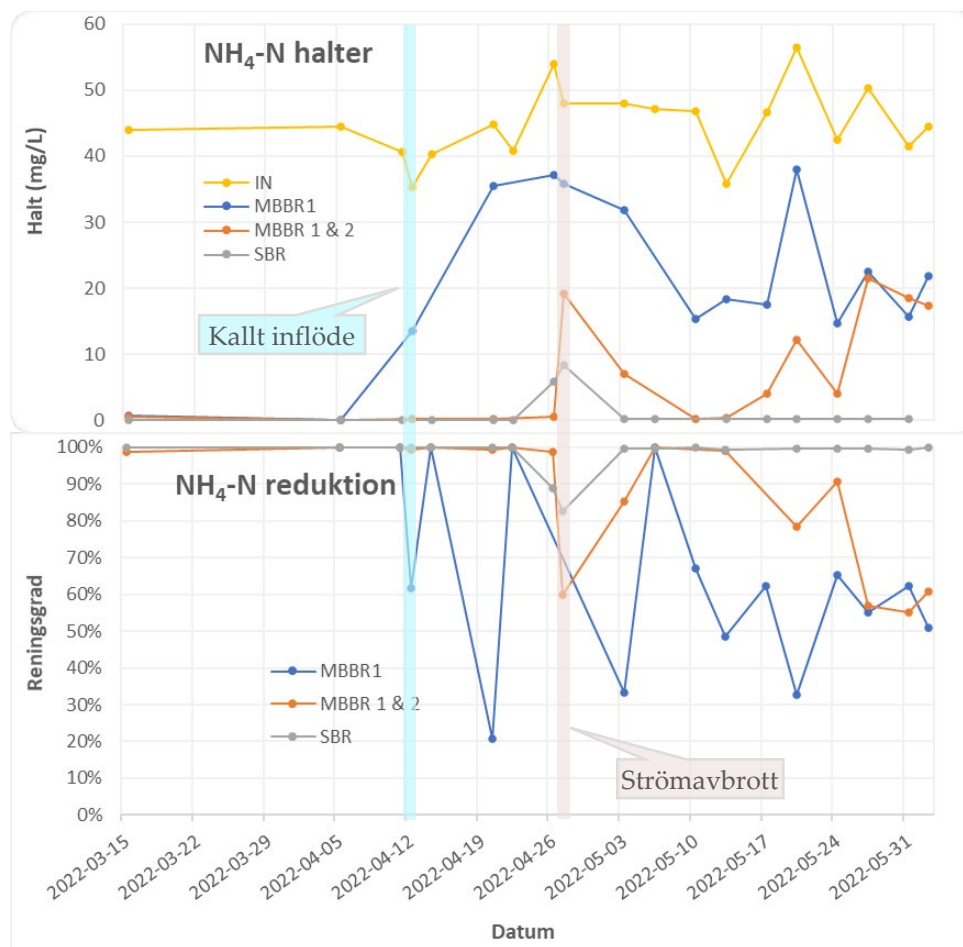
Utgående halter av fosfatfosfor analyserats vid flertal tillfällen och var i genomsnitt 0,4 mg/L och 0,15 mg/L som lägst. Även om dessa halter är låga så indikerar en viss resthalt att fosforbristen inte borde ha varit en begränsande faktor.

3.2.3 Huvudströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten

I dessa pilottester undersöktes om hämmande effekter på nitrifikationsprocessen som observerades i pilotförsöken med den biologiska behandlingen av blandningen av rejektvatten och HTC-vatten (se 3.2.1.1) också skulle observeras vid behandling av både rejekt och HTC-vatten i huvudströmmen utan separat sidoströmsbehandling. Vid dessa försök användes våtoxiderat HTC-vatten som vid en potentiell fullskaleimplementering. Både rejektvatten från Margretelunds avloppsreningsverk och våtoxiderat HTC-vatten skickades till SSV innan piloten kördes. Inflödet förbereddes på plats med 1 m³ kommunalt avloppsvatten (efter försedimentering vid SSV), 4 L våtoxiderat HTC-vatten och 9 L rejektvatten från Margretelunds avloppsreningsverk. Att det användes 4 L våtoxiderat HTC-vatten i stället för 1 L berodde på att det i våtoxiderationspiloten krävdes en utspädning av våtoxiderat HTC-vatten med 4 ggr av praktiska skäl. Blandningen motsvarade det beräknade förhållandet vid en fullskaleimplementering vid Margretelunds ARV på 99,5 % avloppsvatten, 0,44 % rejektvatten och 0,06 % våtoxiderat HTC-vatten.

Samma piloter för SBR respektive MBBR användes som i föregående pilottest (se 3.2.1.1) dock rengjordes reaktorerna inför den nya testperioden. Innan testperioden med testvatten beskickades reaktorerna med vanlig kommunalt avloppsvatten (inkommande avloppsvatten till Henriksdal avloppsreningsverk efter försedimentering) för att etablera en representativ biologi för en huvudreningsprocess. Därefter byttes inflödet till piloterna till blandningen såsom beskrivits ovan. En uppehållstid på 1 dag i SBR och 2 dagar i MBBR etablerades. Eftersom reningsprocessen skulle efterlikna en rening i huvudström så justerades inte temperaturen i inkommande testvatten som i föregående testperioden.

Figur 16 visar ammoniumhalter (a) och -reduktion (b) under hela testperioden. Första månaden presenterar referensperioden där piloterna endast mattades med kommunalt avloppsvatten. Stabila ammoniumhalter in och ut ur de olika piloterna kan observeras och en mycket effektiv reduktion av ammonium sker i SBR:en och den första MBBR:en (MBBR1). P.g.a. praktiska skäl byttes inflödet till SBR:en den 13 april 2022 och MBBR den 19 april 2022 till blandning innehållande avloppsvatten, rejektvatten och våtoxiderat HTC-vatten. Efter bytet av inkommande vatten kan en mer varierande testperiod observeras. Inkommande ammoniumhalter ökade generellt något p.g.a. de högre halter i rejektvatten och våtoxiderat HTC-vatten. Ammoniumreduktionen har endast i SBR-piloten varit på en hög stabil nivå som verkade inte påverkas av variationer i inkommande testvattnet. Det medförde att även utgående ammoniumhalter låg på samma låga nivå som under referensperioden. För MBBR observerades stora variationer i reningseffektiviteten med höga ammoniumhalter i utgående vatten som följd. Den efterföljande MBBR2 kunde endas delvis åstadkomma en ytterligare ammoniumreduktion som helt avstannade mot slutet av testperioden. Den sammanlagda reduktionen för MBBR 1 & 2 låg då på endast ca 60 % medan SBR:en åstadkom en komplett ammoniumreduktion.

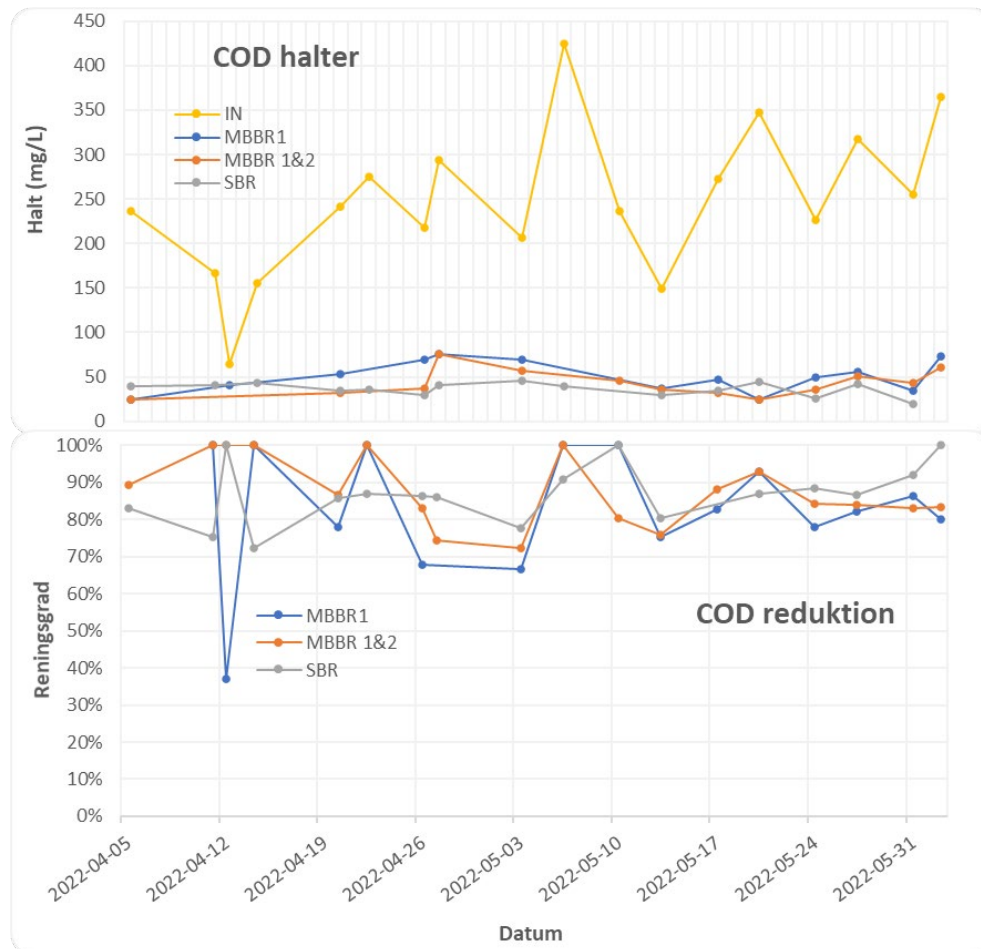


Figur 16. Ammoniumhalter (a) och -reduktion (b) över piloterna över tid.

I figuren indikeras två händelser som påverkat pilotdriften. Runt den 8 april 2022 föll temperaturen i inkommande avloppsvatten till Henriksdal reningsverk från ca 13,5 °C till 8 °C och temperaturen kom tillbaka på vanlig nivå först efter 4-5 dagar. Detta berodde troligtvis på snösmältning som enligt SMHI inträffade efter kraftigt snöfall i början av april. Detta kan ses som en utspädning av inkommande ammoniumhalt och reducerad nitrifikation i MBBR1 (Figur 16). MBBR2 och SBR-piloterna påverkades mindre av temperatursänkningen. MBBR2 eftersom den ligger som andra steg och SBR:en då den satsvisa behandlingen medför en utjämning av variationer i inkommande vatten. Den 27 april inträffade ett större strömavbrott på hela Henriksdalsberget som stoppade både inflödet av avloppsvatten och själva pilotdriften vilket också medförde en viss störning av reningsprocessen och en återhämtningsperiod. Fosfathalter i den inkommande blandningen av avloppsvatten, rejektvatten och våtoxiderat HTC-vatten låg under testperioden på >6 mg/L (medelvärde 6,9 mg/L). I SBR:en reducerades fosfathalten i genomsnitt till under 0,5 mg/L medan MBBR 1 & 2 endast åstadkom en reduktion till ca 4 mg/L.

Figur 17 visar motsvarande COD-halter (a) och COD-reduktion (b) för de två pilotlinjer. Även om också COD-halter varierade en del i den inkommande blandningen av avloppsvatten, rejektvatten och våtoxiderat HTC-vatten så kan det observeras att utgående halter ligger relativt stabilt på halter för det mesta under 50 mg/L. Även här kan utspädningen av COD i inkommande avloppsvatten p.g.a. snösmältningen i början av april observeras. Strömavbrottet den 27 april antas ha påverkat COD-trender i samtliga reningssteg till minst en vecka efter händelsen. Men en stabil

COD-reduktion på >80 % kan en relativt jämförbar COD-reduktion i både MBBR och SBR-piloten observeras.



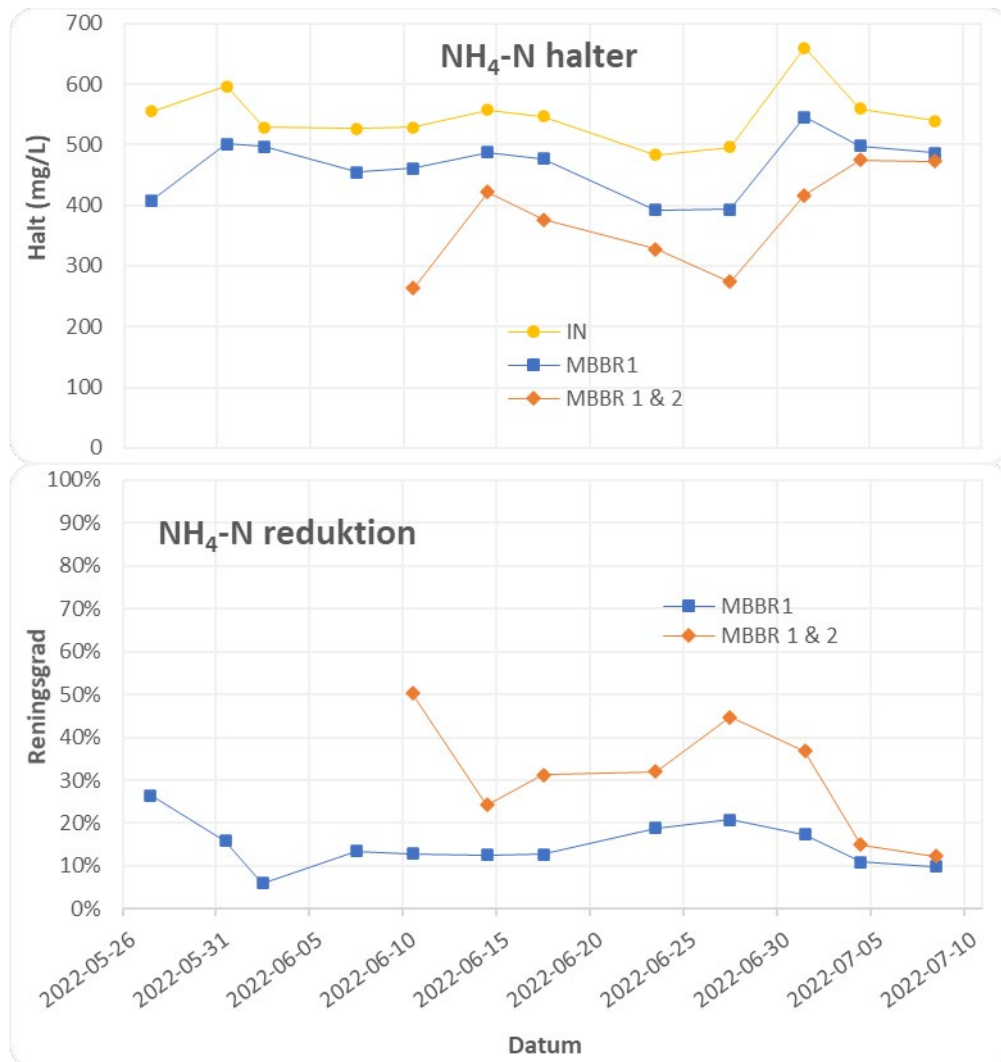
Figur 17. COD-halter (a) och -reduktion (b) över pilotstegen.

3.2.4 Sidoströmsbehandling av våtoxiderat HTC-vatten med MBBR

Tester med blandningen rejektivatten/våtoxiderat HTC-vatten (9,4 : 1) som skulle motsvara den beräknade blandningen i en möjligt framtida sidoströmsbehandling vid Margretelunds ARV. Detta mest p.g.a. att inte tillräckligt med våtoxiderat HTC-vatten kunde tillverkas i våtoxiderationspiloten för tester i pilotskala, så som projektet initialt hade planerat. Detta medförde också att endast en mindre kopia av MBBR-piloten med två steg kunde sättas upp. Både rejektivatten från Margretelunds avloppsreningsverk och våtoxiderat HTC-vatten skickades till SSV innan piloten kördes.

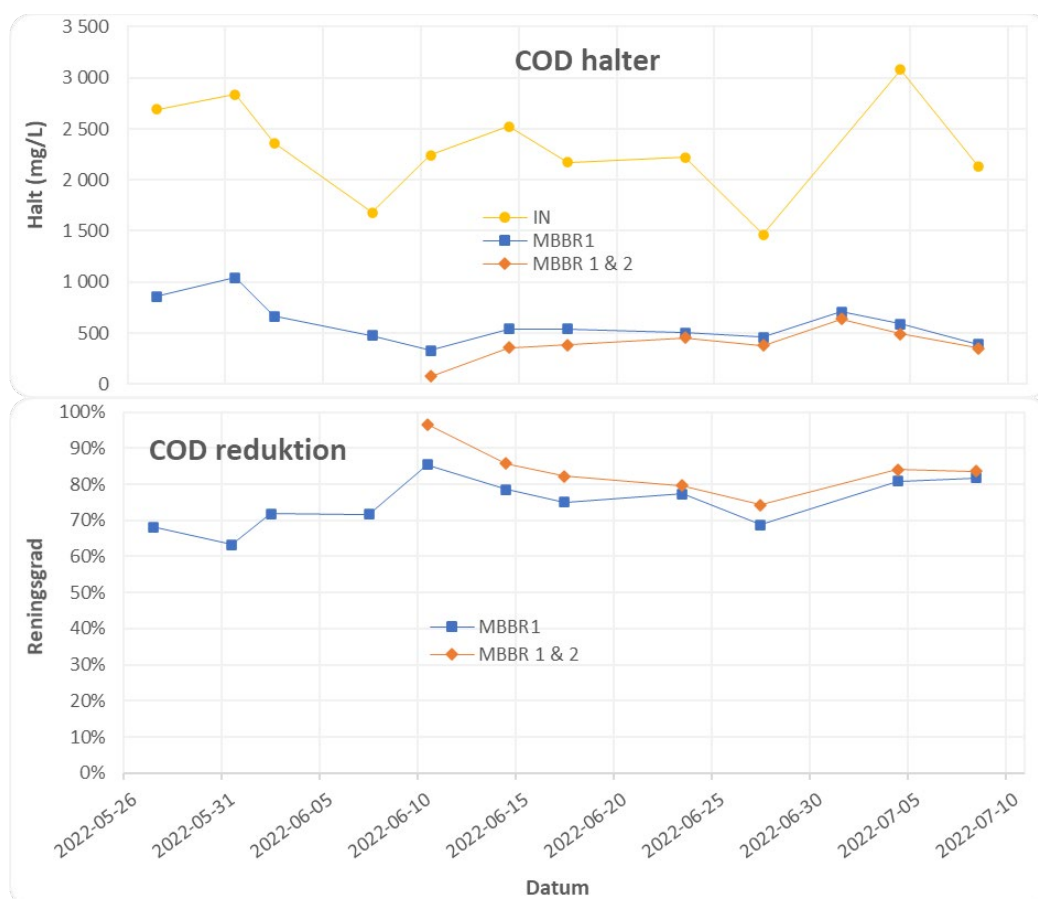
Innan testperioden med testvatten beskickades båda MBBR-reaktorerna med vanlig kommunalt avloppsvatten (inkommande avloppsvatten till Henriksdal avloppsreningsverk efter försedimentering) för att etablera en representativ biologi för en huvudreningsprocess. Efter två veckor med en stabil reduktion av både ammonium på >95 % och COD på >85 % byttes inflödet till MBBR1 den 26 maj 2022 om till blandningen såsom beskrivits ovan. MBBR2 kopplades först en månad senare, den 27 juni 2022, in. En uppehållstid på 1 dag i SBR och 1 dag i MBBR (MBBR1 och MBBR2) etablerades. Temperaturen i testvatten justerades inte men fosfat tillsattes under hela försöksperioden för att undvika fosforbrist som en påverkande faktor.

Figur 18 visar ammoniumhalter (a) och -reduktion (b) under hela testperioden för både MBBR1 och efter MBBR2. Ammoniumhalter över labbskalepiloten var rätt stabil under försöksperiod och reduktionen i MBBR1 låg mellan 10 - 20 % förutom i början som troligtvis påverkats av den höga nitrifikationen under referensperioden. Samma effekt kunde observeras när MBBR2 kopplades till. Den höga ammoniumreduktionen som konstaterades under referensperioden med vanligt avloppsvatten, sjönk snabbt till mellan 10 - 20 % för att avta ännu mer mot slutet av testperioden. Den totala ammoniumreduktionen över systemet låg därmed på endast 10 % vid försökets avslut.



Figur 18. Ammoniumhalter (a) och -reduktion (b) över labb-MBBR piloten över tid.

Figur 19 visar motsvarande COD-halter (a) och COD-reduktion (b) för MBBR-labbskalepiloten. Som figuren visar varierade COD-halter mer än ammoniumhalter. Utgående halter efter MBBR1 låg dock genomgående på en stabil nivå på ca 500 mg/L. Det bör noteras att COD analyser i inkommande testvattnet är behäftade med en rätt stor osäkerhet eftersom de höga halterna krävde flera utspädningar vid analys. En relativ stabil COD-reduktion på >70 % kunde observeras i MBBR1. När MBBR2 kopplades in så konstaterades endast en marginal reningseffekt i MBBR2. Kontinuerliga syrehaltsmätningar visade att syrehalter i utgående vatten från MBBR1 låg under 0,5 mg/L medan motsvarande halt i MBBR 2 var >4 mg/L. En teknisk ökning (fördubbling) av luftningskapaciteten i MBBR1 den 9 juni 2022 för att undersöka om en ännu högre COD-reduktion kunde åstadkommas visade dock att så inte var fallet.



Figur 19. COD-halter (a) och -reduktion (b) över Labb-MBBR piloten.

3.2.5 Resultatsammanfattning av biologiska behandlingsförsöken

De olika aktivitetstester med HTC-vatten i olika blandningar med rejektivatten, kommunalt avloppsvatten och kranvatten för att kartlägga olika behandlingsoptioner indikerade tydligt att en hämningseffekt på nitrifikation vid tillsats av HTC-vatten och våtoxiderat HTC-vatten vid låg utspädning. Ingen hämningseffekt observerades däremot vid höga utspädningar med mer än 250 gånger. En extra behandling av HTC-vatten med filtrering genom aktivt kol gav ingen avsevärd skillnad än vid tester med HTC-vatten som inte behandlades med aktivt kol. Aktivitetstesterna visade dessutom att COD-reduktion inte hämmas på samma sätt som nitrifikation vid tillsats av olika typer HTC-vatten.

I pilottesterna med blandningen HTC-vatten/rejektivatten kunde liknande resultat observeras som i de initiala aktivitetstesterna som indikerade en möjlig COD-reduktion men ingen nitrifikation trots att förutsättningarna fanns. Även om HTC-vatten redan spädde ut 9 gånger med rejektivatten från slamavvattningen i pilottesterna så verkar en nitrifikationshämning uppstå, så som även aktivitetstesterna indikerade.

Pilottesterna med blandningen av våtoxiderat HTC-vatten, avloppsvatten och rejektivatten som motsvarar en huvudströmsbehandling vid framtida Margretelunds ARV gav ingen indikation på en hämning av den biologiska processen även om skillnader i reduktionskapaciteten i de olika pilotlinjer kunde observeras under hela testperiod. Även detta stämmer väl överens med de initiala aktivitetstesterna (se 3.2.1) som indikerade att ju större utspädningen av rejektivatten/HTC-vatten men avloppsvatten är desto mindre påverkas $\text{NH}_4\text{-N}$ och COD-reduktionen jämfört med referenstester med endast avloppsvatten.

En biologisk sidoströmsbehandling av blandningen rejecktatten och våtoxiderat HTC-vatten som testades i sista försök indikerade att även en våtoxideration av HTC-vatten ger en nitrifikationshämning medan COD-reduktionen inte verkar påverkas. Även detta stämmer överens med de initiala aktivitetstesterna (se 3.2.1).

Pilottesterna indikerade dessutom att behandlingen av en blandning HTC-vatten/rejecktatten kan behöva hantera lukt. Låga fosforhalter i blandningen gör dessutom att det behöver planeras för att undvika fosforbrist vid sidoströmsbehandlingen.

3.3 Karakterisering av hydrokol

I följande avsnitt presenteras resultaten från de olika delaktiviteter som beskrivs i avsnitt 2.4 rörande karakterisering av hydrokol och dess olika utgångssubstrat.

3.3.1 Kemiska och fysikaliska egenskaper hos hydrokol

De fem olika utgångssubstraten och hydrokol som producerades i HTC-piloten analyserades med avseende på ett antal kemiska och fysikaliska egenskaper som redovisas i efterföljande avsnitt.

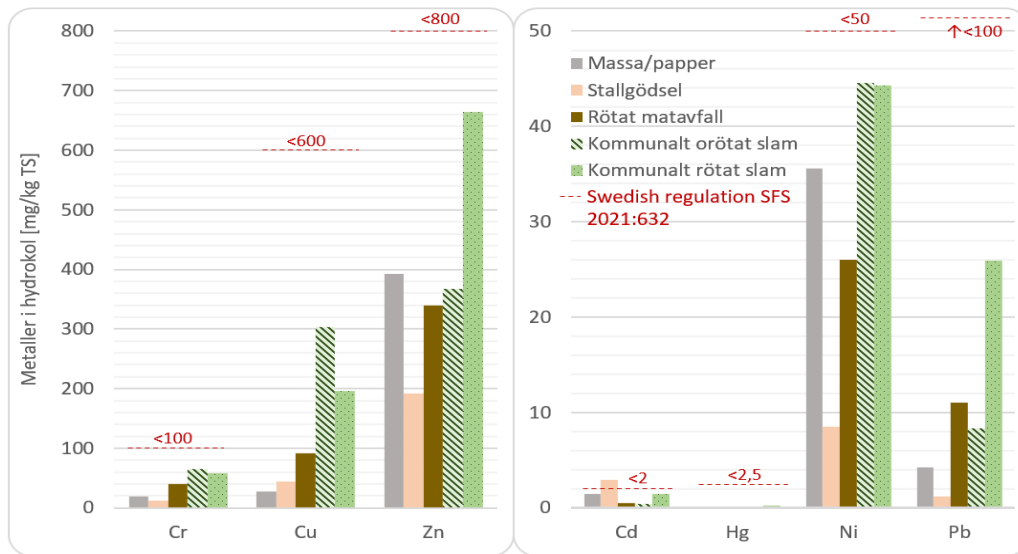
3.3.1.1 Metaller och makronäringsämnen i substrat och hydrokol

Resultaten som visas i Tabell 19 visar att tungmetaller anrikas i hydrokol. Eftersom utbytet av hydrokol från utgångssubstratet (mängd TS hydrokol som % av mängd TS utgångssubstrat) varierar mellan 60 - 75 %, ökar halten av tungmetallerna hydrokolet jämfört med i utgångssubstratet. Baserat på tester med flera olika kommunala slam anger C-Green att 95–100 % av fosfor och tungmetaller i slam och även andra substrat återfinns i hydrokolet (P. Axegård, personlig kommunikation, okt, 2022). Det bör noteras att samtliga analyser är att betrakta som stickprov. Det förhållandevis höga innehållet av kadmium i stallgödsel och motsvarande hydrokol kan bero på att djurfodret kom från mark som gödslats med konstgödsel som innehåller kadmium.

Tabell 19. Tungmetaller i enkelprover i utgångssubstrat och hydrokol.

	Enhet	Massa/ Papper	Stall- gödsel	Rötat matavfall	Kommunalt, örötat slam	Kommunalt, rötat slam	Riktvärde SFS: 2021, 632
Utgångssubstrat (innan HTC-behandling)							
Ag	mg/kg TS	<0,1	<0,10	0,19	0,78	1,61	
Cd	mg/kg TS	0,93	2,20	0,32	0,34	0,90	2
Cr	mg/kg TS	10,9	<10,0	13,6	12,5	52,8	100
Cu	mg/kg TS	20,9	30,9	44,0	200	168	600
Hg	mg/kg TS	0,075	<0,05	<0,05	0,19	0,11	2,5
Ni	mg/kg TS	18,6	4,9	9,80	12	29,6	50
Pb	mg/kg TS	2,9	<1,0	8,9	5,0	19,4	100
Zn	mg/kg TS	287	121	171	243	513	800
Hydrokol (efter HTC-behandling)							
Ag	mg/kg TS	0,1	<0,10	0,39	1,1	1,28	
Cd	mg/kg TS	1,42	2,92	0,52	0,42	1,46	2
Cr	mg/kg TS	19,0	12,6	39,7	64,8	57,9	100
Cu	mg/kg TS	27,5	44,9	91,2	304	196	600
Hg	mg/kg TS	0,07	<0,05	<0,05	0,094	0,22	2,5
Ni	mg/kg TS	35,6	8,5	26,4	44,6	44,3	50
Pb	mg/kg TS	4,2	1,2	11,3	8,3	25,9	100
Zn	mg/kg TS	392	192	340	367	664	800

Med undantag för kadmium i stallgödsel och tillhörande hydrokol överskreds inga gränsvärden för spridning på åkermark, enligt svensk förordning SFS 2021:632 varken, för slam eller för hydrokol (Figur 20).



Figur 20. Halter av tungmetaller i hydrokol jämfört med gränsvärden enligt SFS 2021:632.

Förhållanden mellan metall/fosforkvoten i utgångssubstratet och tillhörande hydrokol visar att kvoten är oförändrad för de allra flesta metaller och substrat (Tabell 20). Detta betyder att det mesta av både fosfor och metallerna som finns i utgångssubstratet förbli där även under HTC-behandlingen. Detta gäller för Ag, Cd, Cu, Hg, Pb och Zn. Spridningen är dock stor och vad gäller Cr och Ni är kvoten i stort sett oförändrad förutom för rötat matavfall och kommunalt slam, vilket är uppenbart orimligt. Detta kan bero på att analyserna är baserade på enkelprov, kontaminering i pilotförsöken och hantering av hydrokolet i samband med torkning.

C-Greens erfarenhet av HTC-körningar under välkontrollerade betingelser i C-Greens labb ger betydligt säkrare massbalanser. Vid test av slam från Roslagsvatten i C-Greens labb erhöles en anriktningsfaktor för Cr/P och Ni/P på 0,97 respektive 1,1.

Tabell 20. Relativ anrikning av tungmetaller vs P i hydrokol vs utgångssubstrat vid framställning av hydrokol i C-Greens HTC-pilot.

Kvot	Metall/fosforkvot i hydrokol: Metall/fosforkvot i utgångssubstrat				
	Massa/Papper	Stallgödsel	Rötat matavfall	Kommunalt örötat slam	Kommunalt rötat slam
Cd/P	0,86	0,90	0,96	0,98	1,49
Cr/P	0,98	0,87	1,72*	4,13*	1,01
Cu/P	0,74	1,00	1,22	1,21	1,07
Hg/P	0,53	0,69	0,58	0,39	1,84
Ni/P	1,08	1,19	1,56*	2,96*	1,38
Pb/P	0,82	0,84	0,73	1,32	1,23
Zn/P	0,77	1,09	1,17	1,20	1,19

* - outliers som troligen beror på analysosäkerheter i metall respektive fosforanalysen

Makronäringsämnen i utgångssubstrat och hydrokol visas i Tabell 21. Det kan noteras att de högsta fosforhalterna finns i kommunalt slam, medan stallgödsel har klart högst halt av kalium. Fosfor och magnesium anrikas på samma sätt som tungmetaller i hydrokolet. Svavel och kalcium

har hög men varierande anrikning. Kalium har låg anrikning utom hydrokol från de två kommunala slammen.

Tabell 21. Makronäringsämnen i utgångssubstrat och hydrokol.

	Enhet	Massa/ Papper	Stallgödsel	Rötat matavfall	Kommunalt orötat slam	Kommunalt rötat slam
Utgångssubstrat (innan HTC-behandling)						
Ca	mg/kg TS	30 200	11 550	49 250	14 050	16 600
K	mg/kg TS	3 780	53 550	7 440	2 795	9 540
Mg	mg/kg TS	1 940	6 345	2 355	1 780	5 800
P	mg/kg TS	10 500	6 510	13 950	22 000	24 400
S	mg/kg TS	20 500	4 620	13 650	9 145	6 440
Hydrokol (efter HTC-behandling)						
Ca	mg/kg TS	19 900	17 300	78 000	18 400	16 900
K	mg/kg TS	1 110	8 120	1 980	2 150	8 800
Mg	mg/kg TS	2 240	7 260	3 950	1 990	6 110
P	mg/kg TS	18 600	9 490	23 700	27 600	26 500
S	mg/kg TS	21 300	3 850	19 100	6 940	3 120

Innehållet av övriga metaller visas i Tabell 22. Al, Fe, och Si dominerar i slam. I likhet med tungmetaller och fosfor anrikas de i hydrokol på grund av sin affinitet till hydrokol. Något förvånande är den relativt höga halten av natrium (liksom för kalium, se ovan) i kommunalt hydrokol trots sin vattenlöslighet. Samtliga övriga metaller anrikas också i hydrokolet med få undantag.

Tabell 22. Övriga metaller i utgångssubstrat och hydrokol.

	Enhet	Massa/ papper	Stall- gödsel	Rötat matavfall	Kommunalt, örötat slam	Kommunalt, rötat slam
Utgångssubstrat (innan HTC-behandling)						
Al	mg/kg TS	17 400	1 325	3 540	15 300	41 900
Fe	mg/kg TS	18 100	2 060	22 200	45 700	93 400
Na	mg/kg TS	7 190	5 795	4 655	1 009	6 010
Si	mg/kg TS	4 300	19 450	12 850	15 950	102 000
Ba	mg/kg TS	151	57	55	142	362
Co	mg/kg TS	7,76	<3,20	19,4	3,02	8,61
Mo	mg/kg TS	3,89	4,48	9,31	4,32	3,62
Nb	mg/kg TS	<1,0	<1,0	1,12	1,05	6,55
Sb	mg/kg TS	<0,05	0,08	0,35	0,91	1,78
Sn	mg/kg TS	0,41	0,84	3,4	8,0	12,7
Sr	mg/kg TS	50	54,1	107	61,2	108
V	mg/kg TS	7,53	2,23	6,36	16,1	43,1
W	mg/kg TS	1,32	<1	6,19	1,66	4,65
Y	mg/kg TS	2,23	0,77	1,44	7,02	19,8
Zr	mg/kg TS	11,1	17,1	15,8	20,4	86,4
Hydrokol (efter HTC-behandling)						
Al	mg/kg TS	18 800	2200	6490	21 000	46 200
Fe	mg/kg TS	32 200	4750	42 600	56 200	127 000
Na	mg/kg TS	1 170	1 260	964	868	5070
Si	mg/kg TS	53 90	28 200	16 600	17 400	82 800
Ba	mg/kg TS	211	84,9	89,5	202	401
Co	mg/kg TS	12,5	<3,2	23,4	4,0	10,3
Mo	mg/kg TS	7,0	4,4	7,6	11,2	3,6
Nb	mg/kg TS	<1,0	<1,0	1,71	1,38	5,94
Sb	mg/kg TS	0,15	0,32	0,88	1,15	2,0
Sn	mg/kg TS	1,2	0,3	6,8	12,6	16,8
Sr	mg/kg TS	62	81	131	89,8	115
V	mg/kg TS	9,9	2,6	12,9	20,5	52,4
W	mg/kg TS	2,0	<1,1	7,4	2,7	8,2
Y	mg/kg TS	4,1	1,3	2,2	7,4	31,9
Zr	mg/kg TS	33,7	13,4	22,3	38	83,8

3.3.1.2 Kväve i utgångssubstrat och hydrokol

Analysen av olika former av kväve redovisas i Tabell 23. Samtliga studerade substratprover innehåller betydande mängder kväve. Merparten av detta kväve utgörs av organiskt kväve, 13 - 39 % $\text{NH}_4\text{-N}$, och låga mängder nitrit och nitrat. Med antagandet att utbytet av hydrokol är 70 % återfinns ca 25 % av N-tot i hydrokolet från de två kommunala slammen medan andelen är ca 40 % i de övriga proverna.

Baserat på tester med flera kommunala slammer är C-Greens erfarenhet att 30 – 45 % av kvävet i kommunalt slam brukar återfinnas i ej torkat hydrokol vid 60 - 70 % torrhalt (P. Axegård, personlig kommunikation, okt, 2022). Den lägre andelen av N-tot kan bero på att hydrokol som framställdes i C-Greens pilotanläggning torkades till över 99 % TS varvid en del flyktiga ämnen kan ha drivits av.

Tabell 23. Kväveföreningar i utgångssubstrat och hydrokol.

	Enhet	Massa/ Papper	Stall- gödsel	Rötat matavfall	Kommunalt, orötat slam	Kommunalt, rötat slam
Utgångssubstrat (innan HTC-behandling)						
N-tot	mg/kg TS	63 000	46 100	60 500	36 400	33 700
NH ₄	mg/kg TS	21 000	23 400	12 800	12 100	5720
NH ₄ -N	mg/kg TS	16 300	18 200	9920	9410	4440
NH ₄ -N/N-tot	%	26	39	16	25	13
NO ₂ -N	mg/kg TS	0,5	2,9	0,4	0,4	9,7
NO ₃ -N	mg/kg TS	<4	<4	<4	<4	<4
Hydrokol (efter HTC-behandling)						
N-tot	mg/kg TS	36 300	27 200	33 500	12 800	12 900
Andel av N-tot i slam	%	40	41	39	25	27
NH ₄	mg/kg TS	790	494	79	31	339
NH ₄ -N	mg/kg TS	614	383	62	24	263
NH ₄ -N/N-tot	%	1,7	1,4	0,3	0,2	2
NO ₂ -N	mg/kg TS	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
NO ₃ -N	mg/kg TS	<4	<4	<4	<4	<4

3.3.1.3 Värmevärdesanalyser på utgångssubstrat och hydrokol

HTC-behandling medför en ökad andel kol i den organiska substansen samtidigt som askhalten ökar (Tabell 24). Det ökande kolinnehållet i den organiska substansen medför att det högre värmevärdet (Higher Heating Value - HHV) i den organiska substansen ökar med 5 - 10 % enheter till 55 - 65 %. Detta är högre än för ved där kolhalten är ca 50 %.

Det kan noteras att det högre värmevärdet (HHV) i den organiska substansen är högre i hydrokol jämfört med slam. Det högre värmevärdet beror på att kol har anrikats. Hydrokolets högre värmevärde i den organiska delen ligger nära ligninets högre värmevärde på ca 26 GJ/t. C-Greens erfarenhet är att hydrokol i de allra flesta fall oavsett ursprung har HHV på 25–28 GJ/t TS hos den organiska substansen.

Tabell 24. Energianalys av utgångssubstrat och hydrokol.

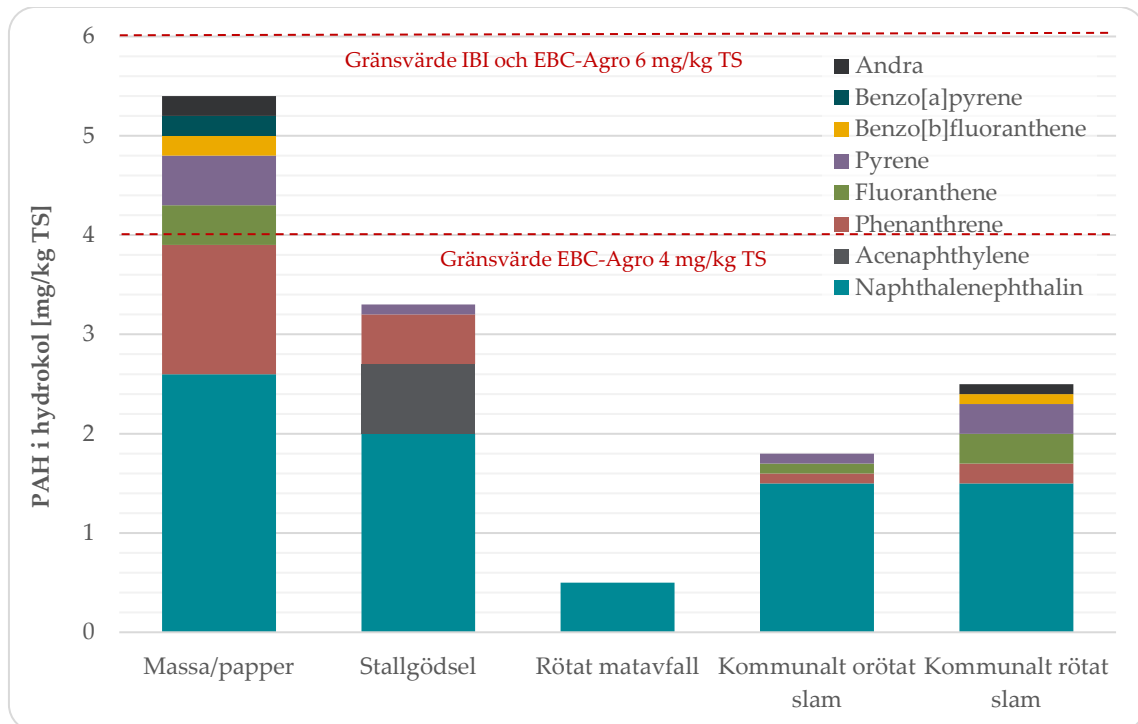
	Enhet	Massa/ papper	Stall- gödsel	Rötat matavfall	Kommunalt, orötat slam	Kommunalt , rötat slam
Utgångssubstrat (innan HTC-behandling)						
Torrhalt (TS)	%	13	9	24	27	30
Askhalt	% av TS	17,7	19,3	21,2	24,3	55
C (TS)	% av TS	44,9	44,1	44,5	41,9	23,1
C (TS-org.)	% av TS-org.	54,6	54,6	56,5	55,4	51,3
H	% av TS	5,4	5,3	5,7	5,8	3
N	% av TS	6,9	2,0	6,6	3,6	3,3
Cl	% av TS	0,03	1,63	0,59	0,03	0,02
S	% av TS	2,14	0,42	0,66	0,59	0,66
HHV (TS)	MJ/kg TS	18,7	18,1	18,9	18,3	9,4
HHV (TS-org.)	MJ/kg TS-org.	22,7	22,4	23,9	24,2	20,9
Hydrokol (efter HTC-behandling)						
Torrhalt (TS)	%	99,1	99	98,5	99,5	99,4
Askhalt	% av TS	22,8	15,8	34,6	29,8	63,1
C (TS)	% av TS	49,9	50,7	41,2	41,1	20,4
C (TS-org.)	% av TS-org.	64,6	60,2	63,0	58,6	55,3
H	% av TS	4,4	5,2	4,4	5,2	2,3
N	% av TS	4,3	2,51	3,5	1,45	1,48
Cl	% av TS	0,01	0,27	0,06	0,01	0,02
S	% av TS	2,72	0,47	2,16	0,83	0,36
HHV (TS)	MJ/kg TS	21,2	21,9	17,9	18,2	8,4
HHV (TS-org.)	MJ/kg TS-org.	27,5	25,9	27,3	25,9	22,8

3.3.1.4 PAH i hydrokol

Sexton olika PAH analyserades i de fem olika hydrokolen, men endast sju kunde detekteras (Tabell 25). European Biochar Institute (EBI) har etablerat certifiering av biokol enligt EBC-Certificate (EBC 2022) och där satt upp gränsvärden för spridning av biokol på åkermark enligt EBC-Agro (6 mg/kg TS) och EBC-AgroBio (4 mg/kg TS) som uppfyller uppsatta krav i EU:s gödseldirektiv (Huygens et al., 2019). Alla hydrokol utom från massa/papper uppfyllde dessa gränsvärden (Figur 21).

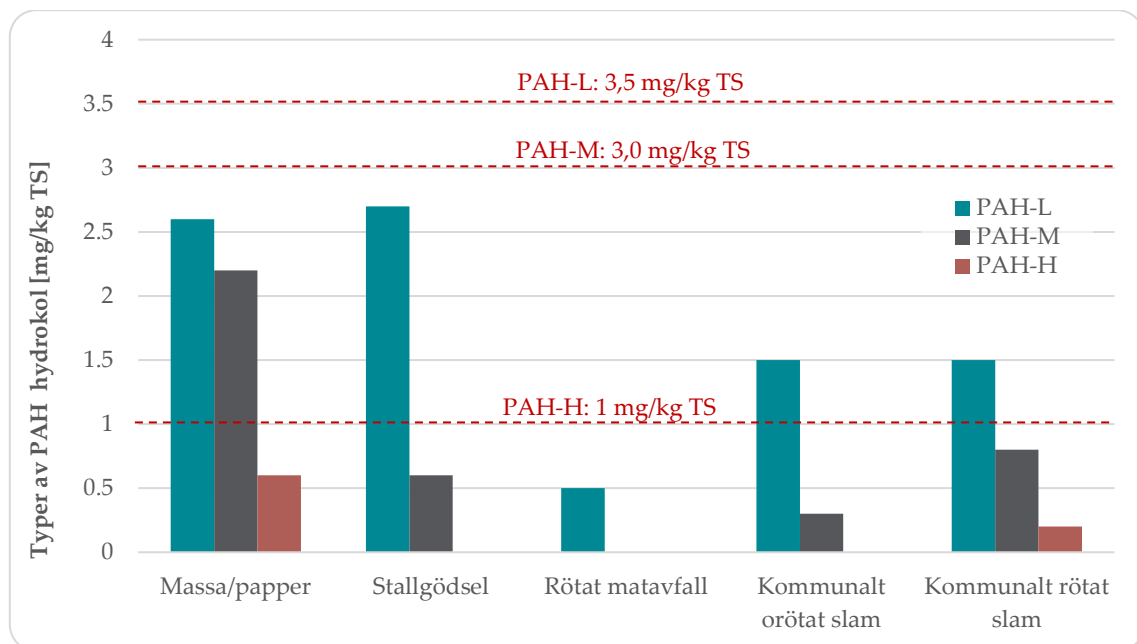
Tabell 25. Detekterade PAH i hydrokol från olika utgångssubstrat (detektionsgränsen är 0,1 mg/kg TS).

	Enhet	Massa/ Papper	Stall- gödsel	Rötat matavfall	Kommunalt, orötat slam	Kommunalt, rötat slam
Naftalen	mg/kg TS	2,6	1,8	0,5	1,5	1,5
Acenafylen	mg/kg TS	< 0,1	0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Fenantren	mg/kg TS	1,3	0,6	< 0,1	0,1	0,2
Fluoranten	mg/kg TS	0,4	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3
Pyren	mg/kg TS	0,5	0,1	< 0,1	0,1	0,3
Benzo[b]fluoranten	mg/kg TS	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
Benzo[a]pyren	mg/kg TS	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Summa PAH	mg/kg TS	5,4	3	0,5	1,8	2,5



Figur 21. Halt av detekterade PAH i hydrokol samt gränsvärden enligt EBC-Agro (6 mg/kg TS) och EBC-AgroBio (4 mg/kg TS).

Naturvårdsverkets generella riktvärden för förorenad mark finns för PAH med låg (PAH-L), medelhög (PAH-M) och hög (PAH-H) molekylvikt och känslig eller mindre känslig markanvändning (Naturvårdsverket 2009). Alla undersökta hydrokol ligger under riktvärden för känslig markanvändning (Figur 22).



Figur 22. Halt av olika typer av PAH i hydrokol samt gränsvärden enligt Naturvårdsverket.

I ett examensarbete vid Umeå universitet har den potentiella bildningen av PAH vid HTC-behandling av kommunalt, orötat slam undersökts (Sundqvist, 2021). Slutsatsen var att innehållet av PAH var kopplat till mängden PAH i inkommande slam och risken för bildning av PAH vid normala HTC-betingelser (200 - 220 °C) är låg. En tendens till PAH-bildning kunde noteras först vid 260 °C.

3.3.1.5 Fysikaliska egenskaper och pH hos hydrokol

De olika hydrokolens fysikaliska egenskaper och pH redovisas i Tabell 26. Dessa analyser är baserade på standardanalyser för olika jordprodukter (torv, biokol, stallgödsel med mera) och utförs för att kunna optimera betingelserna i kommersiella jordprodukter som jordsäckar och användning på åkermark.

- **Ytarea** mätt som BET (Brunauer Emmet och Teller) baseras på kväveadsorption är en egenskap som påverkar markens (i) sorptionsförmåga, (ii) vatten- och näringsretention, och (iii) mikrobiella aktivitet. Ju högre BET-värdet desto bättre adsorptionsförmågan. BET-värdet är lågt 0,4 – 4,5 m²/g för alla testade hydrokol utom från massa/papper med ett BET-värde på 35 m²/g.
Pyrolytisk biokol från kommunalt slam har BET-värden mellan 25 och 68 m²/g vid pyrolystemperaturer mellan 500 och 900 °C, (Racek et al., 2020). C-Greens HTC-behandling sker vid ca 200 °C. Resultaten för BET-värdena stämmer väl med publicerad litteratur som anger att hydrokol har lägre ytarea och porositet jämfört med pyrolytiskt biokol (Kambo et al., 2015).
- **Konduktiviteten** är ett vanligt sätt att mäta joner (lösliga salter) som baseras på principen att lösningar med högre koncentration av salter har en större förmåga att leda elektrisk ström. Ofta används konduktiviteten som ett sätt att uppskatta mängden lösliga näringsämnen. Konduktiviteten i de testade hydrokolen varierar inom intervallet 130 – 2800 µS/cm med högst värde för stallgödsel och rötat matavfall och lägst för kommunalt slam.
Typiska värden för konduktivitet hos pyrolytiskt biokol har visats variera från 40 till 54 200 µS/cm (Singh et al., 2017). Konduktiviteten i hydrokol ligger i den lägre delen av detta i intervall.
- **pH-värdet** för testade hydrokol ligger mellan 4,8 - 6,6 där hydrokol från rötat matavfall har högst pH och kommunalt orötat slam har lägst pH. Vid ersättning av torv, som har ett högt pH, finns här en möjlighet för hydrokol eftersom det finns behov av att kompensera med ett surt substrat.
För pyrolytiskt biokol varierar ligger pH mellan 5,3 och 12,2 (Racek et al., 2020). Även här finns en möjlighet för hydrokol eftersom det ofta finns behov av sänka pH användning av pyrolytiskt biokol.
- **Bulkdensiteten** inkluderar volymen av den fasta strukturen och porutrymmet.
Bulkdensiteten för testade hydrokol ligger mellan 43–113 kg/m³. Tillsats av pyrolytiskt kol till jord sänker bulkdensiteten enligt ett flertal studier (Razzaghi et al 2020). Effekten är i många fall gynnsam för jordens biologiska aktivitet (Blanco-Canqui 2021). Även hydrokol torde därför ge en gynnsam effekt på jorden bulkdensitet.

Tabell 26. Fysikaliska egenskaper och pH i hydrokol.

Utgångssubstrat	Ytarea, BET [m ² /g]	Konduktivitet [μS/cm]	pH	Bulkdensitet [kg/m ³]
Massa/papper	34,6	947	5,3	43
Stallgödsel	0,4	2 830	5,5	66
Rötat matavfall	1,4	1 750	6,6	91
Kommunalt, orötat slam	Gick ej att tolka	129	4,8	102
Kommunalt, rötat slam	4,5	239	5,4	113

3.3.2 Växttillgängligheten för närsalter

I Tabell 27 visas mängden som lakas ut med ammoniumlaktat för utgångssubstrat och motsvarande hydrokol. Metoden är en standardmetod som utförs vid SLU i Uppsala för att bedöma tillgängligheten av närsalter. Eftersom en del näringsämnen löses ut i HTC-vatten i HTC processen ger den relativa lakbarheten en bättre beskrivning av lakbarheten (se Tabell 28).

Det bör noteras att lakning med ammoniumlaktat simulerar tillgängligheten på ett färskt substrat d.v.s. tillgängligheten på kort sikt, i detta fall slam och hydrokol. Vad som händer över tid då slam och hydrokol kolonialiseras med markorganismer kan inte simuleras med lakning. Dessutom finns det ett forskningsbehov av att utreda hur specifik lakbarhet kan översättas till tillgänglighet för växter eller risk för utläckage.

Tabell 27. Mängd näringsämnen som lakas ut med ammoniumlaktatmetoden.

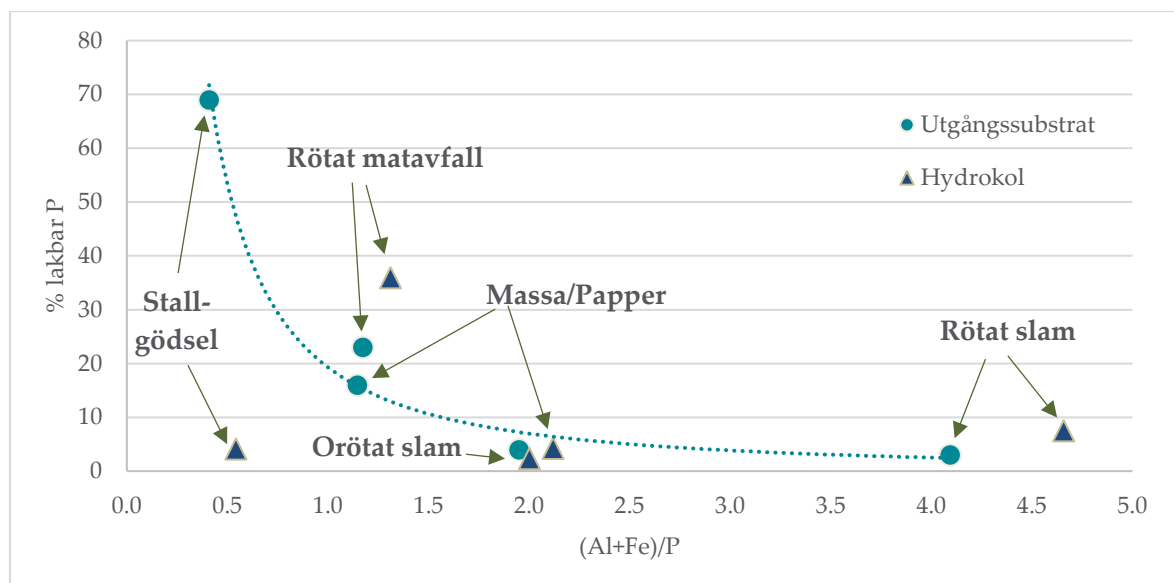
	Enhet	Massa/ Papper	Stall- gödsel	Rötat matavfall	Kommunalt, orötat slam	Kommunalt , rötat slam
Utgångssubstrat (innan HTC-behandling)						
P	mg/100 g TS	172	452	325	88	82
K	mg/100 g TS	273	3 335	538	75	59
Ca	mg/100 g TS	2 008	868	3 195	971	652
Mg	mg/100 g TS	138	532	153	70	90
Hydrokol (efter HTC-behandling)						
P	mg/100 g TS	78	39	850	62	198
K	mg/100 g TS	45	12	75	7	721
Ca	mg/100 g TS	828	309	4 601	270	358
Mg	mg/100 g TS	91	35	116	11	72

Resultaten i Tabell 28 visar att hydrokol från bioslam från massa/papper och rötat matavfall har högst lakbarhet av näringsämnen, följt av hydrokol från kommunalt rötat avloppsslam. Med få undantag minskade den relativa lakbarheten efter HTC-behandling. Några exempel där den relativa lakbarheten ökade efter HTC-behandling är ökade andelen lakningsbart P från 3 % i rötat slam till 8 % i hydrokol. För rötat matavfall ökade också andelen tillgängligt P från 23 % till 36 % i hydrokolet.

Tabell 28. Andel näringsämnen som lakas ut med ammoniumlaktatmetoden.

	Enhet	Massa/ Papper	Stall- gödsel	Rötat matavfall	Kommunalt, örötat slam	Kommunalt , rötat slam
Utgångssubstrat (innan HTC-behandling)						
P	%	16	69	23	4	3
K	%	72	62	72	27	6
Ca	%	67	75	65	69	39
Mg	%	71	84	65	39	16
Hydrokol (efter HTC-behandling)						
P	%	4	4	36	2	8
K	%	40	2	38	3	82
Ca	%	42	18	59	15	21
Mg	%	41	5	30	6	12

Vad gäller fosfor är det känt att lösligheten minskar kraftigt med ökande molkvot (Al+Fe)/P (Ylivainio et al., 2021). Figur 23 visar andel lakningsbart P vs molkvoten (Al+Fe)/P för testade utgångssubstrat och motsvarande hydrokol. Figuren visar att molkvoten (Al+Fe)/P verkar vara en bra parameter för att prediktera lakningsbart P i slam. Vad gäller hydrokol är sambandet med molkvoten inte lika tydligt.



Figur 23. Andel lakningsbart P vs. molkvot (Al-Fe)/P.

3.3.3 Odlingsförsök

Att odlingsförsök genomfördes i blandningar med både torv och jord är relevant som torversättning för kommersiella produkter som köps av konsumenter i byggvaruhus. Odlingsförsök i jord simulerar användning av Revaq-certifierat slam.

3.3.3.1 Odlingsförsök i torv

Tabell 29 visar fysikaliska egenskaper hos blandningarna av hydrokol och torv i försöksomgång 1. Tillsats av hydrokol ledde till en ökning av både bulk- och kompaktdensitet jämfört med 100 % torv (kontroll). Detta resulterade i en måttlig minskning av substratets porositet på upp till 15 %. På liknande sätt observerades en avsevärd ökning av den elektriska ledningsförmågan. Detta skulle kunna relatera till ökningen av koncentrationen av näringsämnen, eftersom skillnaderna i

ledningsförmågan visar en viss korrelation med näringsstillgängligheten för varje specifik hydrokol (se Tabell 27 och Tabell 28).

Provernas pH visade sig vara lägre än förväntat, särskilt när man tittar på pH-resultaten för hydrokolproverna i Tabell 29. Enligt Tabell 29 ökade pH något vid tillsats av hydrokol från massa-/pappersslam och rötat matavfall, medan hydrokol från kommunalt, orötat slam minskade pH. Försöken är att betrakta som indikativa eftersom betingelserna ej var optimerade, till exempel justerades inte pH under försöken.

Tabell 29. Fysikaliska egenskaper och pH blandningar mellan hydrokol och torv.

Hydrokol från	Andel i torvblandning (%)	Skrymdensitet (kg/m ³)	Kompakt-densitet (kg/m ³)	Porositet (%)	Konduktivitet (μS/cm)	pH
Massa/papper	20	286	599	52	247	4,7
	40	302	730	59	290	4,6
Kommunalt, orötat slam	20	203	493	58	60	4,1
	40	277	552	50	70	4,1
Rötat matavfall	20	232	473	51	377	5,1
	40	257	518	50	563	5,7
Torv (kontroll)	100	179	437	59	23	4,5

Figur 24 och Figur 25 visar basilika och Pak choi innan skörd. Groning och tillväxt skedde i samtliga krukor. Sammanfattningsvis gav de tre olika hydrokolen lovande resultat. Målet med förstudien var att utvärdera om hydrokol har potential att fungera som råvara i kommersiella jordprodukter. Med det övervägande goda resultatet från denna studie bedömdes hydrokol från samtliga substrat har potential som partiell ersättning av torv i kommersiella jordprodukter. Baserat på detta genomfördes fortsatta försök 2022 (se omgång 2 nedan).



Figur 24. Basilika vid skörd. Till vänster är andelen hydrokol 20 % och till höger är andelen hydrokol 40 %. I varje bild visas från vänster; hydrokol från massa/papper, kommunalt orötat slam och rötat matavfall (Foto: Helene Larsson Jönsson, SLU).



Figur 25. Pak choi vid skörd. Till vänster är andelen hydrokol 20 % och till höger är andelen hydrokol 40 %. I varje bild visas från vänster; torv 100 %, hydrokol från massa/papper, orötat kommunalt slam och rötat matavfall (Foto: Helene Larsson Jönsson, SLU).

Försöken i omgång 2 genomfördes under 2022 med styrning av pH för att kompensera för de olika hydrokolens egenskaper. Resultaten var dock inte klara vid rapportens färdigställande och kommer därför att rapporteras separat.

3.3.3.2 Odlingsförsök i jord

Odlingsförsök i kruka är en del av ett betydligt större projekt vid RISE/SLU där olika näringsämnesinnehållande restströmmar från avloppsvatten och slam undersöks. Resultaten för rajgräs beräknas vara klara under första kvartalet 2023 och ingår därmed inte i denna rapport. Första resultat visar visuellt att rajgräs vid skörd ser ut ha svarat lika bra med både utgångssubstrat och motsvarande hydrokol, se Figur 26.



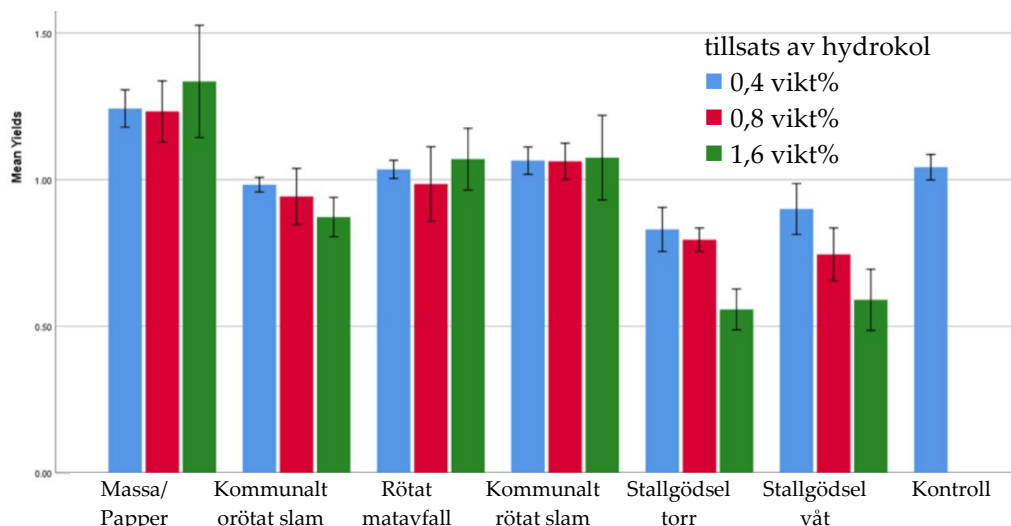
Figur 26. Rajgräs vid skörd med tillsats av kommunalt, orötat slam (bild till vänster) och motsvarande hydrokol (bild till höger).

Resultat från gröningsförsöket visar grobarhet och antal deformerade plantor i Tabell 30. Grobarheten av frö från rädisa hämmas inte signifikant av något av de fem testade hydrokolen vid tillsatser på 0,4, 0,8 och 1,6 vikt%. Andra studier har visat att hydrokol kan ge toxiska effekter vid högre doser jämfört med i denna studie (Melo et al., 2019; Karatas et al., 2022).

Tabell 30. Grobarhet (%) hos frö från rädisa och antal deformerade plantor (OECD rapport) efter 15 dagar vid tillsats av 0,4, 0,8 och 1,6 vikt% till jord. Grobarheten redovisas i % av kontroll och deformationen redovisas som antal deformerade plantor. Kontroll har inga deformerade plantor.

Dos hydrokol, %	Massa/ Papper		Stall- Gödsel		Rötat matavfall		Kommunalt orötat slam		Kommunalt rötat slam	
	%	Def.	%	Def.	%	Def.	%	Def.	%	Def.
0,4	97,1	0	94,3	0	100	3	103	5	100	2
0,8	97,1	0	103	1	97,1	1	100	3	103	2
1,6	101	1	100	1	97,1	3	97,1	3	100	0

Tillväxt av rädisa utvärderades som torrvikten hos plantorna (Figur 27). Hydrokol från massa/papper gav en signifikant ökning, 20 - 30 %, av mängden biomassa. Hydrokol från kommunalt slam gav samma mängd biomassa som kontrollen medan hydrokol från stallgödsel gav en reduktion av mängden biomassa.



Figur 27. Tillväxt av rädisa vid tillsats av 0,4, 0,8 och 1,6 vikt% hydrokol till jord samt kontroll.

3.3.4 Kolsänkepotential hos utgångssubstrat och hydrokol

Den kumulativa bildningen av CO₂ vid respirationsförsök med de olika utgångssubstraten och motsvarande hydrokol visas i Tabell 31 respektive Tabell 32.

Kommunalt, örötat slam har högst bildning av CO₂ följt av rötat matavfall medan slam från massa/papper, stallgödsel och kommunalt rötat slam har lägst bildning av CO₂.

Tabell 31. Bildning av CO₂ i % av kolmängd i tillfört substrat vid respirationsförsök. Den procentuella standardavvikelsen redovisas som % SD.

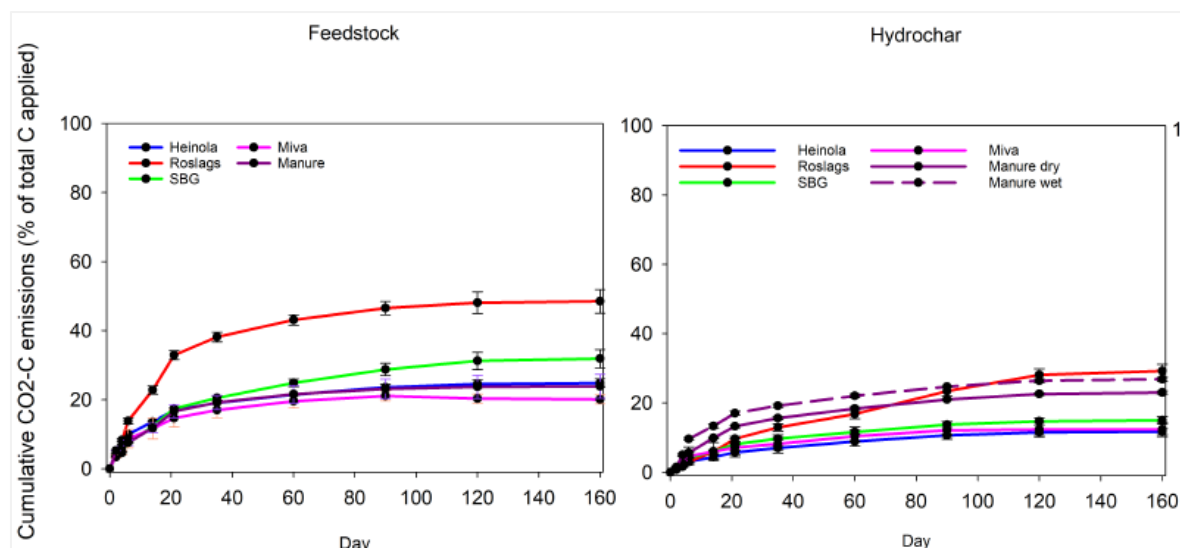
Dagar	Massa/ Papper		Stall- Gödsel		Rötat matavfall		Kommunalt, örötat slam		Kommunalt, rötat slam	
	% C	% SD	% C	% SD	% C	% SD	% C	% SD	% C	% SD
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3,7	0,3	5,3	0,1	3,4	0,1	4,1	0,3	3,6	0,5
4	6,8	0,3	6,5	0,1	5,0	0,1	8,3	0,4	4,6	0,5
6	10,0	0,3	7,5	0,8	7,6	0,2	13,8	0,9	8,7	2,7
14	13,6	0,3	11,8	1,3	12,6	0,3	22,8	1,2	11,6	3,0
21	16,9	0,2	16,6	1,8	17,4	0,2	32,9	1,3	14,6	2,5
35	19,1	0,2	19,2	2,1	20,5	0,6	38,1	1,4	17,0	2,2
60	21,4	0,2	21,6	2,6	24,9	1,1	43,1	1,5	19,6	1,9
90	23,6	0,9	23,1	2,8	28,8	1,8	46,5	1,9	21,1	1,4
120	24,5	1,2	23,7	3,3	31,2	2,5	48,1	3,1	20,3	1,3
160	24,8	1,2	23,9	3,5	31,9	2,7	48,5	3,4	20,1	1,3

Samtliga hydrokol utom från stallgödsel har betydligt lägre bildning av CO₂ än motsvarande slam. Efter 160 dagar är CO₂-bildningen ca 50 % lägre från hydrokol jämfört med slam med undantag för stallgödsel där CO₂-avgången vari stort oförändrat. Det avvikande beteendet hos hydrokol från stallgödsel skulle kunna bero hög halt av lignin som inte genomgår HTC-reaktioner vid de aktuella betingelserna.

Tabell 32. Kumulativ bildning av CO₂ i % av kolmängd i tillfört hydrokol vid respirationsförsök. I tabellen anges även den procentuella standardavvikelsen, % SD.

Dagar	Massa/ Papper		Stall- Gödsel		Rötat matavfall		Kommunalt, örötat slam		Kommunalt, rötat slam	
	% C	% SD	% C	% SD	% C	% SD	% C	% SD	% C	% SD
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,9	0,2	0,9	0,1	1,3	0,1	0,7	0,1	1,2	0,3
4	1,6	0,1	2,4	0,2	2,8	0,1	1,7	0,3	2,3	0,1
6	3,1	0,6	5,6	0,3	4,1	0,2	2,9	0,1	4,6	2,7
14	4,3	0,7	9,8	0,1	6,0	0,1	5,9	0,6	5,9	2,6
21	5,7	0,6	13,2	0,4	8,1	0,2	9,6	0,7	7,1	2,7
35	7,0	0,5	15,6	0,4	9,7	0,3	12,9	1,0	8,2	2,7
60	8,9	0,1	18,3	0,5	11,6	0,6	16,8	1,4	10,4	2,7
90	10,6	0,3	21,0	0,1	13,8	0,9	23,4	1,4	12,1	2,6
120	11,5	0,8	22,6	0,4	14,7	1,0	28,1	1,8	12,3	2,2
160	11,7	0,9	23,0	0,5	14,9	1,1	29,2	1,9	12,4	2,1

Figur 28 visar den kumulativa bildningen av CO₂ vid respirationsförsök med de olika utgångssubstrat och respektive hydrokol.



Figur 28. Kumulativ bildning av CO₂ vid respirationsförsök med slam respektive motsvarande hydrokol.

3.3.5 Hygienisering och Revaq-certifiering

Två hygieniseringstester med hydrokol producerat från slam från Margretelunds ARV och ett test på avvattnat örötat slam från Margretelund har utförts. I det andra testet togs tre prover ut från en och samma sats, ett så kallat triplikat. Resultat visar att inga av hydrokolproverna innehåller salmonella och att Enterokocker och E.coli ligger långt under hygieniseringsgränsvärden (Tabell 33).

Tabell 33. Analys av Salmonella, Enterokocker och E.coli i slam och hydrokol.

Test Nr	1	1	2a	2b	2c
	Slam	Hydrokol	Hydrokol	Hydrokol	Hydrokol
Salmonella	Påvisad/25 g	Ej påvisad /25 g	Ej påvisad /25 g	Ej påvisad /25 g	Ej påvisad /25 g
Enterokocker	2,7 log cfu/g	<2,0 log cfu/g	<2,0 log cfu/g	<2,0 log cfu/g	<2,0 log cfu/g
Escherichia coli	3,4 log cfu/g	<1,0 log cfu/g	<1,0 log cfu/g	<1,0 log cfu/g	<1,0 log cfu/g

I framtiden skulle loggning av temperaturen och uppehållstiden av slammet i HTC-reaktorn kunna ersätta hygieniseringsanalyser men då behöver man kunna bevisa och följa upp i efterhand att processen för varje slampartikel hållit 200 °C i minst 10 minuter (Revaq, 2022).

I projektets nulägesbeskrivning (Baresel et al., 2021) beskrivs flera potentiella användningsområden för hydrokol och biokol. En intressant applikation för hydrokol från kommunalt slam är som gödsel på åkermark på samma sätt som slam används idag för återanvändning av näringsämnen. Detta ingår i Roslagsvattens slamvision där ett mål på återanvändning av minst 60 % av fosfor i slammet sattes. Om hydrokolet ska användas på åkermark måste det visas att HTC-processen inte försämrar ursprungs kvalitén av slammet. Dessutom behöver det säkerställas att det framtagna hydrokolet producerat från ett Revaq-certifierat slam också kan Revaq-certifieras. Resultat från detta kapitel (5.6) har visat att hydrokol skulle kunna bli Revaq-certifierat och därmed kan spridas på åkermark enligt de nya Revaq-reglerna som gäller från 2024. Potentialen som kolsänka är också en fördel med hydrokol.

Under sommaren 2022 presenterade Revaq-kommittén ett remissförslag till nya Revaq-regler för certifiering som ska gälla fr o m 2024 som inkluderar en ny modul för certifiering av slamkol som inkluderar hydrokol från HTC-behandling och biokol från pyrolyshandling. I remissutgåvan föreslås bland annat införande av nya regler för PAH-gränsvärden i slamkol.

3.4 Systemutvärdering och optimering

I detta avsnitt beskrivs och diskuteras den övergripande utvärdering och bedömning av optimeringsmöjligheter som projektgruppen gjort för de olika delar i projektet.

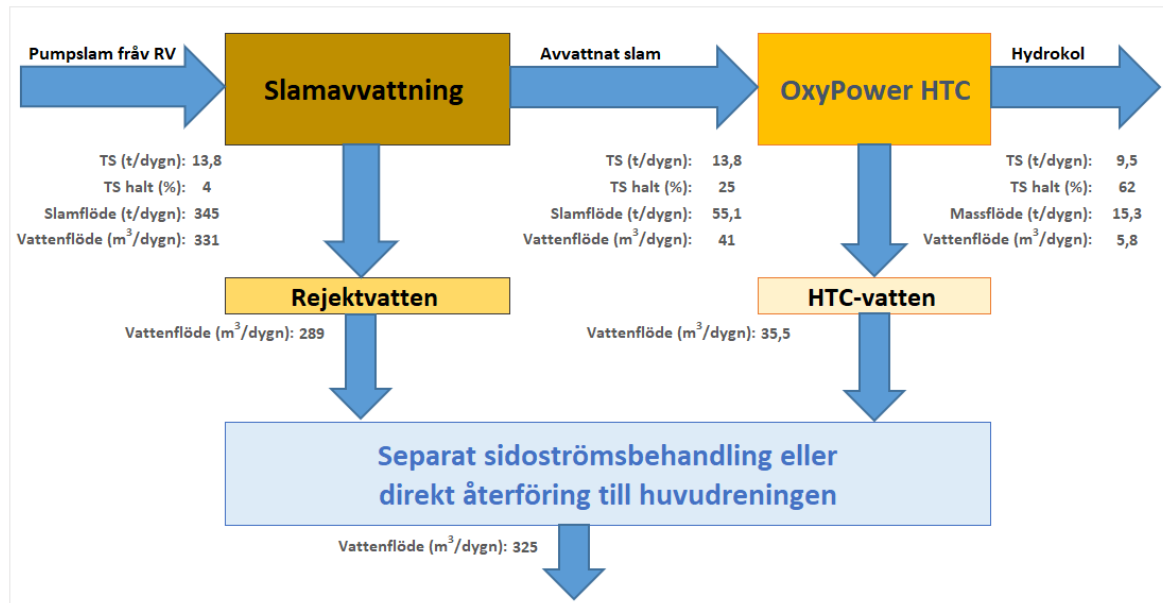
3.4.1 HTC-behandling med OxyPower HTC™

Resultaten från pilotförsöken med HTC-behandling med C-Greens HTC-process, OxyPower HTC™, hade som primärt syfte att framställa HTC-vatten och hydrokol och kan endast i begränsad utsträckning användas för en bedömning av en potentiell fullskaleimplementering vid framtidens Margretelunds avloppsreningsverk. Baserat på genomförda försök i labbskala, pilottester och uppskalningsberäkningar kan dock ses olika indikationer hur en fullskaleimplementering skulle påverka slamhanteringen och andra delar av reningsverket, samt vilka optimeringsmöjligheter som finns för att uppnå den mest resurseffektiva implementeringen. Här ingår massflödes- och energibalanser, miljöpåverkan och kostnader.

3.4.1.1 Massflödesbalanser

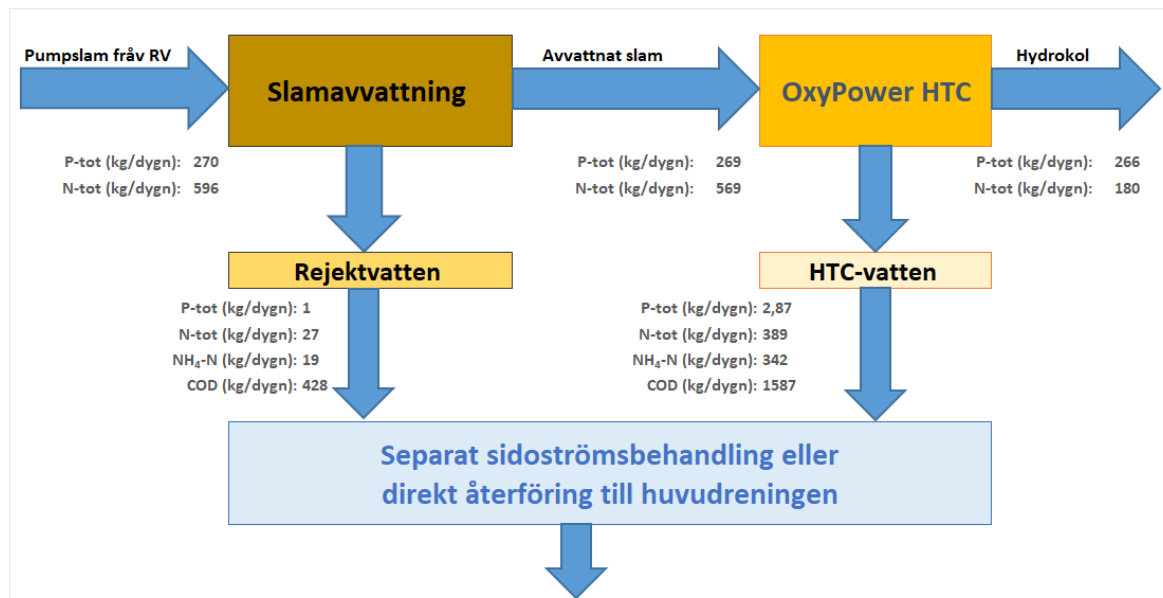
En massflödesbalans för förtjockat slam (TS på 4 %) som avvattnas med centrifug (TS på 25 %) och sedan behandlas i en OxyPower HTC™ anläggning visas i Figur 29. Massbalansen baseras på förväntade slamflöden på 4500 t TS/år vid framtidens Margretelunds avloppsreningsverk efter ombyggnad (Etapp 3 med 125 000 pe). Balansen utgår ifrån att slammet inte rötas och att våtoxidationen drivs till 60 % reduktion av utlöst COD. Det framgår klart att rejektivattenflödet från slamavvattningen är ca 7–8 gånger större än flödet av producerat HTC-vatten. Notera att dessa förhållanden även utgjort grunden för genomförda aktivitetstester och pilotförsöken (se 2.3).

En motsvarande balans visades i Figur 7 i projektets nulägesbeskrivning (Baresel et al., 2021). Värdena skiljer sig främst beroende på att den aktuella balansen är baserad på 4500 t TS/år medan den i tidigare rapport baseras på dagens slammängd 950 t TS/år.



Figur 29. Vatten- och TS-balans från slamvattning till OxyPower HTC™ vid 4500 t TS slam/år.

Figur 30 visar samma massflödesbalans för det beräknade dygnsflödet av P, N-tot, NH₄-N, COD och BOD. Eftersom halterna av dessa parameter är avsevärt högre i HTC-vattnet än i rejektvattnet bidrar HTC-vatten med samma (för P) eller signifikant större andel till blandningen rejektvatten/HTC-vatten som skulle leda till den biologiska reningen i en separat sidoströmsbehandling eller till huvudströmmen. I balansen ingår inte alternativet att ta ut ammoniumkväve genom strippning. Vid strippning skulle NH₄-N i HTC-vattnet minska med 85–90 % och N-tot med ca 80 % enligt uppgifter från C-Green. Skulle våtoxideringen drivas till 70 % COD-reduktion skulle COD i HTC-vattnet minska med ca 15 %.



Figur 30. Balanser för P, N-tot, NH₄-N och COD från slamvattning till OxyPower HTC™ vid 4500 t TS slam/år.

Ifall slammet skulle avvattnas till lägre TS inför HTC-behandlingen skulle flödet av rejektivatten minska samtidigt som flödet av HTC-vatten skulle öka (Tabell 34).

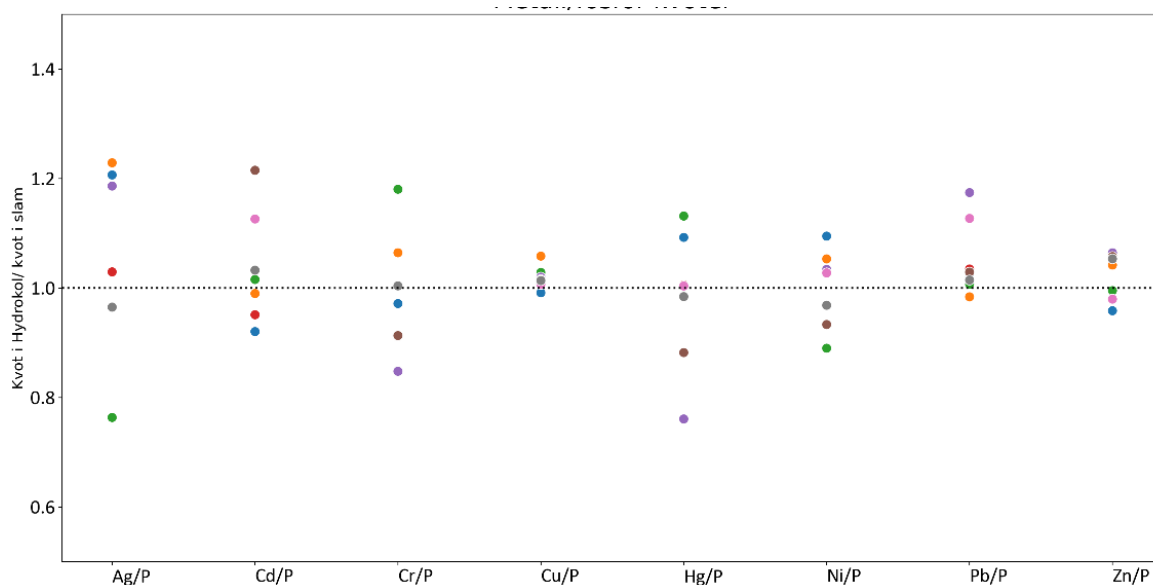
Tabell 34. Vattenbalans över slamavvattning och OxyPower HTC™ vid TS 16 – 26 % på slam efter centrifug (för 4500 ton TS/år).

	Enhet	TS efter avvattning i centrifug (%)					
		16	18	20	22	24	26
Rejektivatten	m³/d	258,8	268,3	276,0	282,0	287,5	291,9
HTC-vatten	m³/d	66,6	57,0	49,4	43,1	37,9	33,4
Kvot rejektivatten/HTC-vatten	m³/m³	3,9	4,7	5,6	6,5	7,6	8,7

3.4.1.2 Tungmetaller och fosfor

Örötat slam från Margretelunds avloppsreningsverk och rötat slam från sju kommunala avloppsreningsverk (VEAS i Oslo, Käppalaverket, Slottshagen i Norrköping, Kungsängsverket i Uppsala, Sjöstadverket i Karlstad, Kungsängsverket i Västerås och MIVA i Örnsköldsvik) har HTC-behandlats i C-Greens HTC-reaktor i labbskala.

I Figur 31 visas kvoten Ag/P, Cd/P, Cr/P, Cu/P, Hg/P, Pb/P och Zn/P i hydrokol dividerat med kvoten i utgångssubstratet (slam) från de åtta reningsverken. Det framgår att kvoten är relativt oförändrad för alla metaller och substrat. Detta betyder att både fosfor och tungmetaller som finns i utgångssubstratet även finns kvar i hydrokolet.



Figur 31. Kvot för metall/fosfor-kvot i utgångssubstrat och hydrokol för åtta olika kommunala slam (Roslagsvatten, MIVA, Käppala, Västerås, Karlstad, Uppsala, VEAS och Nodra).

3.4.1.3 Energibalans

OxyPower HTC™ är en exoterm process eftersom hydrotermisk karbonisering och speciellt våtoxideration är exoterma reaktioner. Omfattningen av våtoxiderationen är anpassad för att göra hela anläggningen självförsörjande på värme, d.v.s. att ingen värme behöver tillföras processen vid normal drift. Värme tas ut ur processen genom kylning av utgående gaser, kylning av HTC-slurry innan pressfilter och uttag av HTC-vatten som förs till reningsverket (Tabell 35). Processen använder elektricitet och ingen externt tillförd värme behövs för driften. Nödvändig värme för att höja temperaturen på slammet till 200 °C bildas i processen, främst genom våtoxideration, och

återförs till processen. Nära 600 kWh/t TS i bildad värme har potential att användas som nyttig värme.

Tabell 35. Energibalans OxyPower HTC™ utan strippning av HTC-rejektvatten.

Tillförda energiflöden			
Elektricitet	kWh/t TS*	490	Inkluderar generering av syrgas från luft samt övrig drift av anläggningen (avvattning, pumpning)
Värme	kWh/t TS*	0	Ingen extern värme krävs p.g.a. exoterm process och värmeåtervinning.
Kemisk energi i slam	kWh/t TS*	5090	Enligt energianalys i Tabell 24
Energiflöden UT			
Kylvatten från gaser	kWh/t TS*	290	Kylvattnet har potentiell användning till fjärrvärme eller ökad temperatur i olika delar av reningsverket
Kylvatten från HTC-slurry	kWh/t TS*	170	
HTC-vatten	kWh/t TS*	130	Utgående HTC-vatten med ca 70 °C
Förluster	kWh/t TS*	40	Övriga värmeförluster från anläggningen
Kemisk energi i hydrokol	kWh/t TS*	3540	Enligt energianalys i Tabell 24
Energibalans			
HTC-Nettoenergibehov	kWh/t TS*	490	Elenergi som behöver tillsättas i processen idag
Teoretiskt energiöverskott	kWh/t TS*	140	Principiellt energiöverskott från HTC-processen
Överskott värmeenergi	kWh/t TS*	590	Potential maximum återvinningsbar värmeenergi till fjärrvärme, rötning eller andra värmebehov

*avser TS i ingångssubstratet (slam)

3.4.1.4 Miljöpåverkan och miljökonsekvenser av HTC-behandlingen

Även om en kvantitativt miljöpåverkansanalys av C-Greens OxyPower HTC™ inte har varit del av projektet så finns några generella och specifika miljöaspekter för Margretelunds ARV som projektgruppen vill lyfta.

Att producera hydrokol från slam med hjälp av HTC-processen i kombination med våtoxideration bedöms ge följande miljömässiga fördelar:

- Reducerad slammängd behöver hanteras vilket medför färre transporter.
- Reducerade direkta lustgas- och metanemissioner från slammet vid hantering som lagring, transport och användning.
- Reducerat läckage av näringsämnen genom
 - omhändertagandet vid avloppsreningsverk (HTC-vatten), och
 - fixering av närsalter i hydrokolet som minskar läckage vid användning på åkermark.
- Reducerad lukt från slamhantering vid avloppsreningsverket (uppfattas dock subjektivt).
- Hygienisering av slammet vilket eliminerar smittorisken.
- Produktion av överskottsvärme som kan användas för olika ändamål.
- Genom partiell karbonisering binds kol och hydrokol kan fungera som partiell kolsänka.
- De höga halterna av ammonium i våtoxidat HTC-vatten indikerar en potential för en effektiv närsaltsåtervinning genom uttag av ammoniumsulfat eller ammoniakvatten som ersätter fossilbaserade kväveprodukter.

Eventuella negativa eller beaktande aspekter vid implementering av HTC-processen för hydrokolproduktion inkluderar:

- Mängden tungmetaller och organiska föroreningar påverkas generellt inte genom en HTC-behandling nära pH 7 och finns således kvar i hydrokolet (att tillsätta syra skulle minska mängden tungmetaller i hydrokolet och öka mängden i HTC-vattnet men då krävs en extra behandling av HTC-vattnet).

- Även om HTC-processen är en exoterm process utan behov av tillförd värme behöver högvärdig elenergi tillföras processen.

3.4.1.5 Kostnadsanalys

Eftersom HTC-processen fortfarande är under etablering för hantering för kommunalt slam och inga fullskaleinstallationer finns att tillgå som referens i Sverige ännu, är kostnadsbilden för tekniken fortfarande något oklar. Även utanför Sverige finns än så länge endast enstaka HTC-fullskaleanläggningar (Baresel et al., 2021) varav C-Greens anläggning vid Stora Ensos massa/pappersbruk i Heinola, Finland som togs i drift under 2021 är en. Att det finns några fullskaleinstallationer innebär att potentiella tekniska utmaningar relaterade till HTC-tekniken börjar bli kända och en optimering av installationer kan börja ske. Det innebär också att kostnader för HTC-installationer och drift troligtvis reduceras med ökande antal installationer och medförande kunskapsöverföring och optimeringar.

På grund av skaleffekter kan pilotanläggningen som användes i projektet naturligt nog inte ligga till grund för en kostnadsberäkning av en fullskaleimplementering vid Margretelunds ARV. Baserat på C-Greens anläggning vid Heinola och kunskap från de genomförda pilotförsöken har C-Green bedömt investeringskostnader (CAPEX) och driftkostnader (OPEX) för en OxyPower HTC™ anläggning med en kapacitet på 5000 t TS/år. Dessa har lagts till grund för en beräkning av kostnader för slammängden på 4500 t TS/år vid framtidens Margretelunds ARV (Tabell 36).

Tabell 36. Bedömda kostnadsposter för en OxyPower HTC anläggning med en kapacitet på 5000 t TS/år som körs för hantering av 4500 t TS/år.

Investeringskostnad (CAPEX)	
OxyPower HTC™	80 - 100 Mkr
Årlig kostnad	6 - 8 Mkr <i>avbetalning på 20 år och en antagen kalkylränta på 5 %</i>
Årliga driftkostnader (OPEX)	
Elektricitet	2,2 Mkr <i>vid inköpspris El (inkl. skatt) på 1 kr/kWh och elbehov enligt Tabell 35</i>
Reservdelar och underhåll	1,6 - 2 Mkr 2 % av investeringen
Personal	2,2 - 3,4 Mkr <i>2-3 heltider, personalkostnader 550 kr/tim</i>
Totala kostnader (CAPEX + OPEX)	
Årliga kostnader	12 - 15,5 Mkr
Kostnader per t TS	2700 - 3450 kr

Kostnader för etablering av anläggningen inkluderar själva HTC-reaktorn med tillhörande våtoxideration och värmeåtervinning, men även avvattningen av HTC-slurryn till hydrokol. Kostnader för markarbeten och andra byggtekniska anläggningar har antagits som en installation på planmark. Specifika behov som sprängningsarbete eller markstabilisering har alltså inte tagits med. Kostnader för skrotning av anläggningen har inte heller tagits med då det antas att anläggningen är en infrastruktur som förnyas och sällan avvecklas efter den uppnådda livstiden.

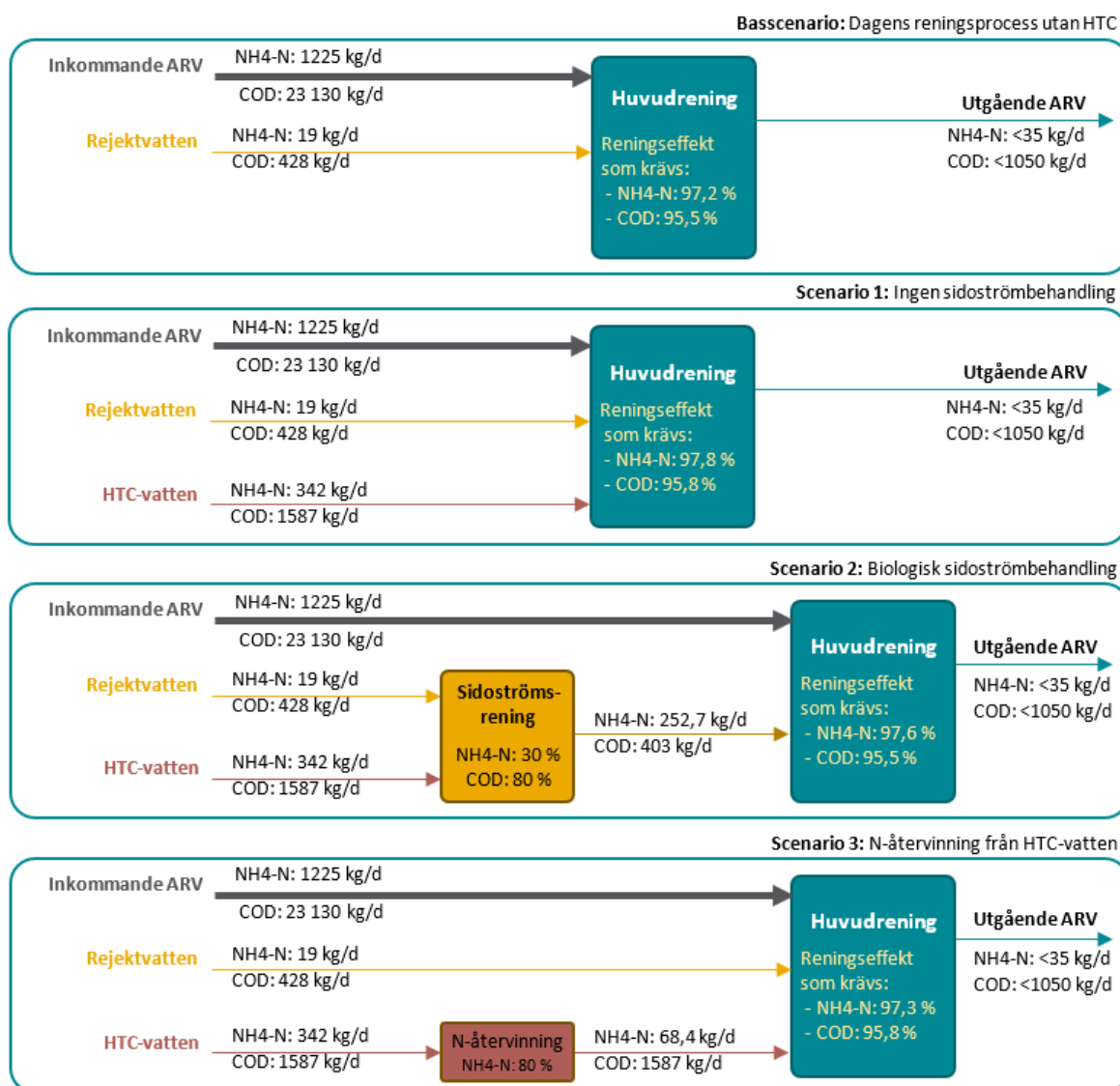
Driftkostnader relaterades till elen som behövs för att driva OxyPower HTC™ framåt som mycket osäkra med tanke på rådande osäkerheter kring elpriset i Sverige och utvecklingen framöver. Denna aspekt gäller dock för alla processer som är beroende av elektricitet.

3.4.2 Biologisk rening av HTC-vatten

En optimering av den biologiska reningen för HTC-vatten så som det ursprungligen var planerat av projektgruppen har inte kunnat genomföras för en separat sidoströmbehandling av blandningen HTC-vatten/rejektvatten. Initialt har pilottesterna planerats med en intrimningsperiod som skulle följas av en stegvis optimering av reningsprocessen. Dessutom var endast en sidoströmsbehandling planerat från starten. Efter de första erfarenheterna från aktivitetstesterna och pilottesterna med en obefintlig ammoniumreduktion trots relativt låga belastningar, ändrades fokus på pilottesterna till att undersöka hur en rening skulle åstadkommas ändå. Detta med hjälp av bl.a. en utökning till en tvåstegs-MBBR, optimerade förutsättningar för en biologisk rening genom tillsats av fosforsyra för att undvika fosforbrist och ympningar med bioslam. Pilottester med biologisk rening i huvudströmmen för att efterlikna en återföring av blandningen HTC-vatten/rejektvatten till den inkommande avloppsströmmen vid Margretelunds ARV har varit en annan anpassning av projektaktiviteter för att undersöka lämpliga alternativ.

Eftersom resultaten tyder på att en biologisk sidoströmsbehandling av HTC-vatten tillsammans med rektvatten inte framstår som ett realistiskt alternativ som kan åstadkomma den reduktion av ammonium och organiska föreningar som skulle behövas för att hålla en ökad internbelastning på en rimlig nivå, behöver lämpliga alternativ undersökas. Ett alternativ som undersöktes inom projektet är just direkt återföringen av HTC- och rektvatten till huvudreningen utan en separat rening. Även om pilottesterna visade att en effektiv reduktion av både kväve, fosfor och organiska föreningar kan åstadkommas så kan den ökade internbelastningen ändå innebära utmaningar om den extra reningskapaciteten som behövs inte finns tillgängligt i huvudreningen. I värsta fall kan det leda till en lägre reningseffekt och påverkan på utsläppshalter. Figur 32 visar framtidens belastning för COD och $\text{NH}_4\text{-N}$ på reningsprocessen från inkommande avloppsvatten och från rektvatten från slamavvattningen. Dessutom visas tre tänkbara scenarier för framtidens Margretelunds ARV med HTC-process implementerat med avseende för COD och $\text{NH}_4\text{-N}$ flöden. Dessa baseras på förväntade utsläppskrav för organiskt material och kväve på $\text{BOD}_7 = 6 \text{ mg/L}$ respektive $\text{TN} = 6 \text{ mg/L}$, den framtida beräknade belastningen, och antagandet av samma $\text{NH}_4\text{-N/T-tot}$ och COD/ BOD_7 förhållanden som råder idag.

Som figuren illustrerar behövs en effektiv rening i huvudströmmen på 97,2 % och 95,5 % för $\text{NH}_4\text{-N}$ respektive COD för att uppnå de förväntade utsläppskraven. Vid en extra internbelastning vid implementering av HTC-processen för hela slamflödet och ingen extra behandling av HTC-vatten eller rektvatten (Scenario 1 i Figur 32) skulle reningseffektiviteten i huvudströmmen behöva ökas till 97,8 % och 95,8 % för $\text{NH}_4\text{-N}$ respektive COD för att uppnå samma utsläppsmängder. Implementeras en sidoströmbehandling för blandningen av HTC-vatten och rektvatten (Scenario 2 i Figur 32) med samma reningseffektivitet som observerat i pilottesterna (se 3.2.2), skulle reningseffektiviteten i huvudströmmen endast behöva ökas till 97,6 % och 95,5 % för $\text{NH}_4\text{-N}$ respektive COD för att uppnå samma utsläppsmängder. En separat återvinning av ammonium från HTC-vatten t.ex. genom strippning med 80 % effektivitet (Scenario 2 i Figur 32), skulle innebära att reningseffektiviteten i huvudströmmen endast marginellt skulle behöva ökas till 97,3 % för $\text{NH}_4\text{-N}$ medan reningen för COD skulle behövs ökas till samma reningsgrad som i Scenario 1 för att uppnå samma utsläppsmängder.



Figur 32. Dagens reningsprocess och tänkbara scenarier för behandling av HTC-vatten och internbelastning vid framtidens Margretelunds ARV.

Eventuella hämningseffekter som har sitt ursprung i HTC-vatten finns även kvar vid en återföring till huvudreningen. Dock innebär den kraftiga utspädningen att även dessa hämningseffekter "späds ut" i motsvarande grad och en störning av biologin i huvudprocessen p.g.a. HTC-vatten i princip kan uteslutas.

Eftersom den extra belastningen på huvudreningen med organiska föreningar mätt som COD inte bedöms utgöra en utmaning, framstår en återvinning av ammonium från HTC-vatten som en potential bra lösning. HTC-vattnets höga temperaturer och de höga koncentrationerna av ammonium kan dessutom vara en fördel vid tillämpning av vissa återvinningstekniker (Malovanyy et al., 2022). En kväveåtervinning från HTC-vatten skulle minska internbelastningen på huvudreningen avsevärt och samtidigt ökar miljönyttan med HTC-processen som möjlig slamhanteringsteknik.

Andra alternativ som behandling av HTC-vatten med avancerade separationstekniker skulle också kunna tillämpas men bedöms av projektgruppen som orealistiska p.g.a. kostnaderna och att det

fortfarande skulle återstå en restström som skulle behöva hanteras. En ytterligare möjlighet är att utföra våtoxideringen i två steg (se avsnitt 3.1) där det andra steget innebär en i det närmaste total eliminering av COD och N-org och att $\text{NH}_4\text{-N}$ omvandlas till kvävgas (uppgifter från C-Green).

3.4.3 Utmaningar och möjligheter vid fullskaleimplementering

Behandling av kommunalt slam med HTC-tekniken medför generellt en ökad internbelastning på reningsverket främst med avseende på kväve och organiska ämnen. Även om denna extra belastning kan hanteras t.ex. via rening i huvudströmmen så behöver den extra belastningen tas hänsyn till vid planering av en eventuell HTC-implementering. En kapacitetsutredning av existerande reningsprocess kan t.ex. krävas för att se om processvolymerna är tillräckliga eller om en utökad reningskapacitet behövs för att kunna ta hand om den extra belastningen från HTC-vatten.

Ett alternativ till en kapacitetsökning i reningsverket är enligt C-Green även att komplettera HTC-processen med en katalytisk våtoxideration av HTC-vattnet. Detta har undersökts av C-Green med försök i pilotskala som visar en komplett reduktion av N-tot, $\text{NH}_4\text{-N}$ och COD (Tabell 8, avsnitt 3.1).

Eftersom HTC-vatten kan medföra en ökning av $\text{NH}_4\text{-N}$ -belastningen med ca 25 % och COD-belastningen med ca 6 % som vid Margretelunds avloppsreningsverk behöver även en eventuell ökad reduktion av dessa parameter undersökas ifall marginalen i existerande utsläppshalter och eventuella mängder är otillräckliga. För reningsverk som har rötkammare och därför redan en ökad ammoniumbelastning i rejecktvalet, kan ett utbyte av rötkammare mot HTC-processen öka internbelastning av ammonium med ca 10 %.

C-Greens OxyPower HTC-process har bäst driftsprestanda vid kontinuerlig drift. Vid anläggningsstorlekar som Margretelunds avloppsreningsverk rekommenderar C-Green en HTC-reaktor för optimal processutformning och resurseffektivitet. Det innebär att årliga underhållsstopp på ca en vecka och mindre stopp kräver att det finns en tillräcklig slambuffert. Vid en årlig kapacitet på 4500 t TS i slammet blir buffertbehovet exempelvis 390 m³ respektive 2430 m³ om slam lagras vid 25 % respektive 4 % TS.

Behovet av elenergi i OxyPower HTC™-processen kan som vid andra energikrävande processer (t.ex. ozonering) kräva en utbyggnad av infrastrukturen.

Eftersom en OxyPower HTC-anläggning har tryckkärl måste detta beaktas ur arbetsmiljösynpunkt.

Utöver mer generella aspekter vid HTC-processimplementering enligt ovan finns några specifika aspekter som seglat upp under projektgenomförandet som möjliga utmaningar eller möjligheter.

- **Mögel vid hantering av hydrokol**

Hydrokol från filterpressen i C-Greens pilotanläggning och i fullskala i Heinola, Finland har visat sig vara benäget att mögla. Detta kan undvikas genom torkning till över 80 % torrhalt. Granulering eller pelletering kombinerat med torkning kan vara intressanta alternativ vid applikationer i jord.

- **Möjligheter att utvinna kväve från våtoxiderat HTC-vatten**

HTC-behandling av kommunalt slam medför att 60-70 % av det kväve som finns i slammet återfinns i HTC-vattnet. Efter våtoxideration utgör andelen $\text{NH}_4\text{-N}$ ca 80-90 % av

totalkvävet. Halten $\text{NH}_4\text{-N}$ är 5–10 g/L vilket innebär att förutsättningarna för kväveseparation med ammoniakstrippning är goda. Kvävet kan efter strippning tas ut i form av ammoniakvatten eller ammoniumsulfat. Ett annat möjligt alternativ är att separera kväve i HTC-vattnet med Ragn-Sells teknik Aqua2TMN men även andra tekniker kan vara relevanta (Malovanyy et al., 2022). Den höga temperaturen på HTC-vattnet kan vara en fördel för vissa återvinningstekniker.

Utvinning av kväve och fosfor kommer att utvärderas i ett projekt finansierat av energimyndigheten i en demonstrationsanläggning för blandslam från Nodra i en fullstor OxyPower HTC™-anläggning med uppstart årsskiftet 2023/24. Kväveutvinningen sker genom strippning av ammoniak från våtoxiderat HTC-vatten och tas ut som ammoniumsulfat. Återvinning av fosfor utvärderas med Ragn-Sells Ash2Phos teknik. Projektet är ett samarbete mellan Ragn-Sells och C-Green. Anläggningen som tas i drift årsskiftet 2023/24 har en kapacitet på 5 000 ton TS slam per år och är placerad hos Ragn-Sells i Häradsudden, Norrköping. Möjlighet finns att behandla slam från andra reningsverk.

4 Slutsatser och rekommendationer

Hydrotermisk karbonisering (HTC) av kommunalt avloppsslam har potential att bli en av teknikerna för framtidens slamhantering vid svenska kommunala reningsverk. En mer hållbar slamhantering och återföring av närsalter via det producerade hydrokolet, samt andra positiva effekter som t.ex. mindre växthusgasutsläpp och närsaltläckage till miljön, är några förväntade fördelar med HTC-tekniken. Samtidigt finns som med alla tekniker vissa utmaningar som behöver hanteras. Till dessa räknas (i) om HTC-processen är ett resurseffektivt alternativ för slamhantering, (ii) om hydrokolets egenskaper tillåter minst samma användningsområden som ingångssubstratet (slam), samt (iii) om de toxiska föroreningar som bildas i HTC-vatten kan hanteras i avloppsreningsverk. För att besvara dessa frågeställningar och samtidigt samla in praktiska erfarenheter för HTC som slamhanteringsalternativ har pilotförsök med C-Greens OxyPower HTC™-process genomförts vid Roslagsvattens Margretelunds avloppsreningsverk i Åkersberga. Reningsverket orötade slam behandlades för att producera hydrokol som sedan karakteriserades med olika relevanta tester och det producerade HTC-vattnet användes i olika bänk- och pilotskaletester för biologisk rening i sido- eller huvudström.

Projektet har visat att C-Greens OxyPower HTC™-teknik kan i princip användas för att behandla Margretelunds orötade avloppsslam. Olika tester har illustrerat att tekniken kan minska slamvolymen kraftigt genom en ökning av TS till ca 65 %. Detta gäller även för ett antal andra undersökta organiska substrat. Trots att processen är exoterm och en nettoproduktion av termisk energi över hela processen kan observeras, så behöver processen högvärdig elenergi för drift. Effektiv nyttjande av överskottsvärmen som produceras bli således en viktig aspekt för att åstadkomma resurseffektivitet. C-Greens OxyPower HTC är en kompakt process med relativt lite ytbehov och kostnader för processen bedöms domineras av driftkostnader i form av energi och driftpersonal.

Även om de genomförda pilottesterna med HTC-tekniken har bidragit till praktiska erfarenheter så finns det fortfarande ett behov till flera pilot- och fullskaletester för en ökad kunskap om tekniken. Projektgruppen anser också att det finns potential till optimeringar av tekniken generellt och vid den tekniska utformningen som skulle kunna ge en ännu lägre resursförbrukning och därmed lägre miljöpåverkan och kostnader.

Hydrokol, inte bara från orötat slam från Margretelunds avloppsreningsverk, utan även från fyra andra utgångssubstrat (rötrest från matrester, stallgödsel, bioslam från rening av processvatten från massa/pappersbruk samt rötat blandslam från kommunala reningsverk) har producerats, karakteriserats och testats i bl.a. odlingsförsök med torv och jord. För samtliga hydrokol och specifikt hydrokol från Margretelunds orötade blandslam kan följande slutsatser dras:

- Tungmetaller och fosfor stannar kvar i substraten vid HTC-behandling och återfinns därmed till nära 100 % i hydrokolet. Det innebär att kvoten tungmetaller/P i stort sett är lika i ingångssubstraten och respektive hydrokol.
- I samtliga fall ligger halterna av tungmetaller i hydrokolet under uppsatta gränsvärden utom för stallgödsel där Cd-halten överskred gränsvärdet.
- En betydande mängd kväve återfinns i hydrokolet. För de två studerade kommunala slammen återfinns 25 - 30 % av totalkvävet som finns i utgångssubstratet i hydrokolet.
- Fosfor och magnesium anrikas på samma sätt som tungmetaller i hydrokolet. Svavel och kalcium har en hög men varierande anrikning. Kalium har låg anrikning på grund av sin vattenlöslighet.

- Andelen kol ökar i substratet vid HTC-behandling. I den organiska substansen ökar kolhalten med 5 - 10 % enheter till 55 - 65 % vilket är högre än för ved där kolhalten är ca 50 %.
- PAH-innehållet i samtliga undersökta hydrokol ligger under Naturvårdsverkets riktvärden för känsliga jordar. Även EBC:s riktvärde för PAH innehålls med undantag för hydrokol från massa/papper.
- Salmonella kunde inte detekteras i hydrokol från örötat, kommunalt slam och innehållet av Enterokocker och E.coli ligger långt under uppsatta gränsvärden.
- Hydrokol har i inledande odlingsförsök:
 - visat potential att kunna ersätta torv vid odling av Basilika och Pak choi.
 - visat potential i likhet med slam att vara gynnsamt för tillväxt av rajgräs.
 - inte visat på inhibering vid groning av frö från rädisa
- Bildningen och avgången av koldioxid från hydrokol vid markanvändning är lägre än för motsvarande utgångssubstrat. Det innebär att kolsänkepotentialen är högre för hydrokol än för slam.

Även med tester som gjordes inom projektet finns det fortfarande ett generellt behov att genomföra fler fältförsök för att utvärdera den långsiktiga potentialen av bland annat hydrokol som både partiell kolsänka och gödningsmedel inklusive tillgängligheten av kväve och närsalter för olika växter. Just hur specifika lakbarheten för olika substrat kan översättas till växttillgänglighet eller risk för läckage av närsalter kräver fortsatt forskning. Även ödet av mikroföroreningar som PFAS och läkemedel behöver vidare studier. Eftersom slammet från Margretelunds ARV inte innehöll kvantifierbara halter av dessa föroreningar kunde ingen utredning om påverkan av dessa vid HTC-behandlingen undersökas.

Tester för biologisk behandling av *HTC-vattnet* som bildas vid HTC-behandling visade att en blandning med endast rejektvatten från slamavvattningen inte är tillräckligt för att kunna åstadkomma en effektiv rening för att undvika en ökad internbelastning på huvudströmmen. Även om en effektiv reduktion av organiska föroreningar mätt som COD kunde åstadkommas så indikerade både kortidstester i bänkskala och långtidstester i pilotskala en tydlig hämning av nitrifikationen. Även om ingen komplett hämning observerades så visade långtidstester ändå tydligt att en anpassning av bakterierna över tid inte kan förväntas.

Samtidigt visade kompletterande långtids-pilottester med biologisk rening av både HTC-vatten och rejektvatten i huvudreningen att en effektiv reduktion av både organiska föroreningar mätt som COD och ammonium kunde åstadkommas. Inga hämmande effekter indikerades vilket beror på den mycket kraftiga utspädningen av eventuella hämmande störsubstanser i HTC-vattnet. En återföring till huvudreningen innebär dock en kraftigt ökad internbelastning främst med organiska föroreningar och ammonium som kräver extra processolymer om inte utgående haltnivåer ska äventyras. Ett möjligt resurseffektivt alternativ är en återvinning av ammoniumkvävet från HTC-vatten för produktion av kvävegödsel. Detta skulle möjliggöra ett resurseffektivt återbruk av nyttiga resurser i avloppsvatten, undvika en kraftig ökad internbelastning och nyttiggöra en del av överskottsenergin från HTC-processen som finns i HTC-vatten. En annan möjlighet att behandla HTC-vattnet med katalytisk våtoxideration som enligt initiala pilotförsök eliminerar innehållet av COD och kväve i HTC-vattnet.

Avslutningsvis önskar projektgruppen återkomma till de utmaningar som svenska kommunala avloppsreningsverk står inför och som beskrevs i projektets första delrapport (Baresel et al., 2021). Dessa utmaningar uppstår i samband med anpassningen av avloppsreningen till ett mer hållbart och cirkulärt samhälle. De främsta aspekterna som togs upp i den initiala nulägesbeskrivningen och hur dessa kan bemötas av HTC-tekniken kan sammanfattas enligt nedan.

1. Vikt- och volymminskning
En ytterligare minskning åstadkommas vid HTC-behandlingen
2. Återföring av näringsämnen och organiskt material
En återföring av nästan all fosfor och stora delar av kvävet i slammet kan återföras via hydrokol. Även organiskt material återförs.
3. Tungmetaller, mikroplast och organiska föroreningar
Inga av dessa föroreningar destrueras eller avlägsnas vid HTC-behandlingen och finns därmed kvar i hydrokolet och återförs kretsloppet om inte hydrokolet destrueras. I projektet kunde dock endast några mikroföroreningar undersökas och flera studier rekommenderas.
4. Patogena mikroorganismer
Vid en HTC-behandling åstadkommas en hygienisering av hydrokolet.
5. Lukt
Det producerade hydrokolet bedömdes av projektgruppen inte vara luktfritt men lukten liknar lukten av rostad kaffe och framstår därför inte som störande.
6. Okända mikroföroreningar
Processparametrar som nyttjas vid HTC-behandling bidrar inte till att det finns skäl att anta att okända mikroföroreningar skulle avlägsnas bättre än ex. tungmetaller, mikroplast och organiska föroreningar. Dock har projektet inte undersökt detta och studier av detta rekommenderas.
7. Energiutvinning
Även om överskottsvärme produceras vid HTC-behandling så behöver högvärdig elenergi tillsättas i processen och nettoenergiutbytet är lågt. En eventuell termisk energiåtervinning genom förbränning av hydrokolet skulle dock ge en mycket högre energiutbyte.
8. Utsläpp av växthusgaser och kolsänka
Bildning av växthusgaser och relaterade -utsläpp vid behandling av kommunalt, orötat slam med HTC-teknik och vid rening av HTC-vatten har inte undersökts i projektet. Dock medför HTC-behandlingen att kvävefraktioner som potentiellt kan omvandlas till lustgas vid traditionell slamhantering hamnar i HTC-vattnet och kan renas bort i reningsprocessen. Ett alternativ är att ta en stor del kvävet som ammoniumsulfat eller ammoniakvatten. Notera att även i reningsprocessen av HTC-vatten kan lustgasemissioner uppstå. Hydrokol kan dessutom fungera som en kolsänka genom fastläggning av kolet som projektet visat.

HTC-tekniken utgör således en intressant teknik för slamhantering vid svenska avloppsreningsverk. Dock krävs hänsynstagande till anläggningens förutsättningar att kunna hantera en ökad internbelastning, dagens slamkvalitet för en bra kvalitet på hydrokolet och en bra integrering i befintliga processer för ett optimalt resursutnyttjande.

5 Referenser

- Baresel, C., Yang, J.-J., Lazic, A., Axegård, P. 2021. Framtidens slamhantering vid Roslagsvattens reningsverk i Margretelund - Beskrivning av nuläget för slambehandling. IVL Svenska Miljöinstitutet, rapport B2430.
- Brewer, C.E., Levine, J. 2015. Weight and volume for handling biochar and biomass. *The biochar journal*, Arbaz, Switzerland. <https://www.biochar-journal.org/en/ct/71>].
- EBC 2022. Guidelines of the European Biochar Certificate – version 10.1. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. (<http://european-biochar.org>). Version 10.1 as of 10th January 2022.
- Huygens, D., Saveyn, H., Tonini, D., Eder, P., Delgado Sancho, P. 2019. Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009); Brussels.
- Kambo, H.S., Dutta, A.A. 2015. comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 359–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
- Karatas, O., Khataee, A., Kalderis, D. Recent progress on the phytotoxic effects of hydrochars and toxicity reduction approaches. *Chemosphere* 298, 134357. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134357>
- Melo, T.M., Bottlinger, M., Schulz, E., Leandro, W.M., Oliveira, S.B. de, Filho, A.M. de A., El-Naggar, A., Bolan, N., Wang, H., Ok, Y.S., Rinklebe. Management of biosolids-derived hydrochar (Sewchar): Effect on plant germination, and farmers' acceptance. *J Environ Manage* 237, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.042>
- Naturvårdsverket 2009. Riktvärden för förorenad mark - Modellbeskrivning och vägledning. Rapport 5976.
- Naturvårdsverket 2017. <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/vagledning/fororenade-omraden/riktvarden/datablad/datablad-pah-20170518.pdf>
- OECD 2006. OECD Guidelines for the testing of chemicals. Terrestrial plant test: Seedling emergence and seedling growth test. OECD rapport 208.
- Otabbong, E., Börling, K., Kätterer, T., Otabbong, E., Bo, K., Mattsson, L. 2009. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B – Soil and Plant Science* Compatibility of the ammonium lactate (AL) and sodium bicarbonate (Olsen) methods for determining available phosphorus in Swedish soils. vol. 4710. <https://doi.org/10.1080/09064710902777091>
- Racek, J., Sevcik, J., Chorazy, T., Kucerik, J., Hlavinec, P. 2020. *Biochar – Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review*, vol. 11, no. 7. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00679-w>
- REVAQ 2022. Remissutgåva 2024. Regler för certifieringssystemet.

Singh, B., Dolk, M.M., Shen, Q., Camps-Arbestain, M. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. in *Biochar: a guide to analytical methods*, B. Singh, Ed. CSIRO Publishing.
<https://www.researchgate.net/publication/319206365>

Sundqvist B. 2021, Examensarbete vid Umeå Universitet "Polyaromatic hydrocarbons in hydrochars".

Ylivainio, K., Lehti, A., Jermakka, J., Wikberg, H., Turtola, E. 2021. Predicting relative agronomic efficiency of phosphorus-rich organic residues. *Sci. Total Environ.*, vol. 773, p. 145618.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145618>



IVL Svenska Miljöinstitutet AB // Box 210 60 // 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se