

Återvinning av näringsämnen från rötrest genom struvitfällning

©Svenskt Gastekniskt Center – Maj 2010



Liisa Fransson
Sofia Löwgren
Gunnar Thelin
Ekobalans Fenix AB

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller dylikt i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC:s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Energigas Sverige, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energikoncernen AB (publ) och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

E.ON Gas Sverige AB
Lantmännen
Swedish Biogas International AB
Göteborg Energi AB
Lunds Energikoncernen AB (publ)
Nordvästra Skånes Renhållnings AB
SplitVision AB
Ekobalans Fenix AB
Statens energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

SAMMANFATTNING

Syftet med det projekt som ligger till grund för denna rapport var att sammanställa information om struvitfällning och de studier som utförts inom området samt att genom laborativa försök undersöka fyra olika rötresters lämplighet för struvitfällning. Rötresten från biogasanläggningar med hushållsavfall, beta, gödsel och drank som dominerande substrat användes i studien.

Struvit, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, är en vit kristallin förening som är lös i sur miljö och faller ut vid pH 7-11. Om struvit faller i en lösning eller inte beror främst på graden av övermättnad, inverkan av konkurrerande jonslag samt pH.

Ett flertal studier på struvitfällning har utförts i lab- och pilotskala. Försöken, där bland annat rötrest från VA-verk och rötrest från rötning av gödsel har använts som substrat, har utförts satsvist omrört eller luftat. Både avvattnade och icke avvattnade lösningar har använts och struvitfällning har utförts både med och utan fosfortillsats.

I rapporten finns även några fullskaleanläggningar beskrivna. Bland fullskaleprocesserna består de allra flesta av fluidiserade bäddreaktorer, som är anslutna till VA-verk. Vanligast är att man använder sig av avvattnat slam men det förekommer även exempel med icke avvattnat slam. Några av produkterna från fullskaleanläggningarna säljs som gödselmedel.

Generellt i studierna om struvitfällning är $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ den vanligaste magnesiumtillsatsen, men även magnesiumkällor som till exempel $\text{Mg}(\text{OH})_2$ har använts.

I den laborativa delen av denna rapport utfördes satsvisa försök dels på rötresterna som de var, och dels på rötresterna i avvattnad form. Avvattningen utfördes genom filtrering i tre steg, förutom för dranken som centrifugerades. Försöken utfördes både med och utan fosfortillsats.

Inledningsvis utfördes några satsvisa försök på syntetiska lösningar för att verifiera valda försöksbetingelser. Därefter inleddes försöken med rötresterna och våtfaserna från avvattningen. Försöken utfördes i magnetomrörda glasbägare. $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ och NaOH var de kemikalier som användes. pH höjdes till 8,5 för våtfaserna och 9 för de obehandlade rötresterna.

Från de syntetiska lösningarna var det mycket enkelt att få struvitfällning. Jämfört med syntetlösningarna var rötresterna oerhört komplexa. Dessutom var det en stor skillnad mellan de fyra rötresterna. Detta ledde till att struvitfällning fungerade olika bra för olika rötresten. I bästa fall reducerades $\text{PO}_4\text{-P}$ med över 90 % och i sämsta fall med bara några få procent. $\text{NH}_4\text{-N}$ -reduktionen var runt 60 % som bäst, vilket tyder på att fosfatjonerna även har fallit som något annat än struvit.

Att dosera rätt mängd kemikalier visade sig vara svårt då lagringen troligtvis har en stor inverkan på hur mycket ammonium- och fosfatjoner som finns i lösning (och därmed är tillgängliga för struvitfällning). Detta är något som bör undersökas närmre då en felaktig kemikaliadosering kan medföra att en stor mängd fosfat-

och ammoniumjoner inte fälls som struvit eller att kostnaderna för tillsatskemikalierna blir högre än nödvändigt.

Några försök utfördes för att jämföra pH-höjning med enbart NaOH-tillsats och CO₂-stripping kombinerat med tillsats av NaOH. Det visade sig att vid kombination av NaOH-tillsats och CO₂-stripping kunde tillsatsen av NaOH reduceras med mellan 30 och 67 % jämfört med att höja pH med enbart NaOH.

Från de flesta satsvisa försök kunde någon form av fällning urskiljas efter torkning. Jämfört med ren struvit överrensstämde inte riktigt de fällningar som analyserades i förhållandet mellan kväve, fosfor och magnesium. Generellt innehöll de för mycket kväve i förhållande till fosfor jämfört med ren struvit. Detta är dock positivt ur gödslingssynpunkt. Fällningsprodukten från drank var den som stämde bäst överens med ren struvit. Fällningarna innehöll en del organiskt material, men tungmetallhalterna var låga.

Baserat på kemikalitillsatserna i de satsvisa försöken utfördes en kostnadsuppskattning för varje rötrest. Beräkningarna grundar sig på försöken med våtfaser med fosfortillsats för samtliga rötresters samt våtfasen från drank utan fosfortillsats. Kostnaden per mängd producerad struvit med fosfortillsats låg på ungefär samma nivå för hushåll, gödsel och drank. För beta låg den något högre. Motsvarande kostnad per mängd producerad struvit för drank utan fosfortillsats visade sig vara minst kostsam. För samtliga rötresters låg kostnaderna för MgCl₂•6H₂O och H₃PO₄ (vilken passar bättre än fosforsaltet att använda i storskala) per mängd struvit ungefär lika medan kostnaden för NaOH varierade kraftigt mellan de olika rötresterna. Eftersom kostnadsuppskattningen är baserad på ett fåtal försök i laboratorieskala utan optimering för varje enskild rötrest och priser från endast en leverantör bör det understrykas att detta är en *grov uppskattning*.

Det är svårt att säga något om gödselmedelsvärdet för de struvitfällningar som kan produceras från rötresters idag, främst beroende på att det är en dålig korrelation mellan innehållet av olika näringsämnen och marknadspris för sammansatta gödselmedel. Det är dock sannolikt att värdet kommer att öka då fosforreserverna är ändliga och framställningen av kvävegödselmedel är energikrävande och kopplat till oljepriset. Miljöprofilen kan också bidra till ett högre värde.

SUMMARY

The aim of the project which is described in this report was to gather information about struvite precipitation and studies that have been performed within this area, and also to investigate struvite precipitation in four different digestates through laboratory experiments. Digestates from biogas plants with household waste, beet, manure and distillery residues as raw materials were used in this study.

Struvite, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, is a white crystal powder which is soluble at low pH and precipitates at pH 7-11. For struvite to precipitate the solution also has to be oversaturated and the influence of other competitive ions has to be low.

Many studies in struvite precipitation have been done as laboratory trials and in pilot plants. The experiments were performed on for example digestates from sewage treatment plants. The reactors were stirred or aerated and the solutions were either dewatered or non dewatered. The experiments were performed both with and without the addition of phosphate.

A few full scale plants are also described in this report. Most of them consist of a fluidized bed and are connected to sewage treatment plants. Dewatered sewage sludge is most commonly used but there are also examples of non dewatered sludge. Some of the products from the full scale plants are sold as fertilizers.

$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ is the most common magnesium additive in the studies that have been summarized in this report, but for example $\text{Mg}(\text{OH})_2$ has also been used in a few cases.

The laboratory experiments in this report were performed on non dewatered and dewatered digestates. The dewatering was performed by filtration in three steps, except for the digestate from distillery residues which was centrifuged. The experiments were performed with and without phosphate addition.

First, a few trials on synthetic solutions were performed to verify the chosen experimental conditions. All of the trials, with the synthetic and digestate solutions, were performed in magnetic stirred glass beakers. $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and NaOH were used as chemical additives. The pH was increased to 8,5 for the dewatered digestates and 9 for the non dewatered digestates.

It was very easy to produce struvite from the synthetic solutions. Compared to these solutions the digestates were very complex. The four digestates were also very different to each other. The struvite precipitation worked well for some of the solutions and not so well for others. The reduction of $\text{PO}_4\text{-P}$ was over 90 % in the best cases and only a few percent in the worst cases. The $\text{NH}_4\text{-N}$ reduction was only at around 60 % at its highest. Possible explanations for this are that the phosphate ions also have precipitated as something other than struvite and that the presence of organic material disturbs the precipitation of struvite.

It was difficult to add the correct amount of chemicals to the digestates since the amount of dissolved ammonia and phosphate ions increased during storage. This should be examined further since an incorrect dosage of chemicals can lead to a

large amount of ammonia and phosphate ions not being precipitated as struvite, and the costs of chemicals can become higher than necessary.

A few experiments were performed to compare the pH increase with only NaOH addition, and CO₂ stripping combined with NaOH addition. It showed that the addition of NaOH was reduced 30-67 % when combining NaOH with CO₂ stripping.

From most of the experiments with the digestates a precipitate could be seen after drying. The precipitates did not quite correspond to the ratio of nitrogen, phosphorus and magnesium in pure struvite. They contained more nitrogen than could be explained by the nitrogen content in struvite. In addition to struvite, nitrogen is probably present in other inorganic forms, e.g. nitrates. A higher nitrogen content than expected is, however, generally positive for the fertilizer value. The precipitate from digestate from distillery residues was the one that was most alike pure struvite. All precipitates contained quite a bit organic material, but the content of heavy metals was low.

Based on the experiments an estimation of the cost of the chemical additives was done for each digestate. The costs were based on the trials with the dewatered digestates with phosphate addition for all the digestates, and the dewatered digestate from distillery residues without the addition of phosphate. The cost per amount of produced struvite, with the addition of phosphate, was at about the same level for household waste, manure and distillery residues. For the digestate from beet it was a bit higher. The corresponding cost for digestate from distillery residues without phosphate addition was the least expensive. For all of the digestates the cost of MgCl₂•6H₂O and H₃PO₄ (which would be more suitable than NaH₂PO₄•2H₂O in large scale plants) per amount of produced struvite was at about the same level, but the cost of NaOH varied a lot between the different digestates. Since the costs in this comparison are based on merely a few trials in laboratory scale without optimizing the process for any digestate and prices from only one supplier, it is important to emphasize that this is a *rough estimation*.

It is hard to estimate the value of precipitates from digestates as fertilizers since there is no clear correlation between the content of nutrients and the market price for fertilizers. However, the value of struvite fertilizers will most likely increase since phosphorus is a finite raw material and the production of nitrogen fertilizers needs a lot of energy which is connected to the price of oil. It is also possible that the environmental profile can contribute to a higher value.

INNEHÅLL

1. Inledning.....	1
Del 1. Kunskapssammanställning	3
2. Kväve och fosfor	4
3. Struvit.....	5
4. Struvitfällning.....	6
4.1 Kemisk fällning och kristallisation	6
4.1.1 Mättnadsbegreppet.....	7
4.1.2 Fällningsreaktionens faser och kristalltillväxt.....	8
4.1.3 Induktionstid.....	9
4.1.4 Reaktionskinetik.....	9
4.2 Faktorer som påverkar struvitfällning.....	9
4.2.1 pH.....	9
4.2.2 Konkurrerande fällningar.....	10
4.2.3 Övermättnadsgraden	11
4.2.4 Reaktionsstid	11
4.2.5 Rötrestens sammansättning	12
4.2.6 Val av magnesiumkälla.....	12
4.3 Struvitprodukten.....	13
4.3.1 Produktens renhetsgrad.....	13
4.3.2 Värdet av struvit som gödselprodukt.....	13
5. Struvitfällning i laboratorieskala.....	15
5.1 Försök med huvudsyfte att avlägsna fosfor.....	16
5.2 Försök med huvudsyfte att avlägsna kväve.....	19
5.3 Försök där pH justeras genom stripping av CO ₂	20
5.4 Försök med alternativa magnesiumkällor.....	22
5.5 Övriga försök i laboratorieskala	23
5.6 Sammanfattning av försök i laboratorieskala	24
6. Pilotskaleförsök.....	25
6.1 Omrörda reaktorer	25
6.2 Fluidiserade bäddreaktorer eller luftomrörda reaktorer	28
6.3 Sammanfattning av pilotskaleförsök.....	30
7. Fullskaleprocesser	31
7.1 Ostara	31
7.2 Phosnix.....	32
7.3 Berliener Wasserbetriebe	33
7.4 Crystalactor®	34
7.5 Treviso, Italien.....	35
7.6 NuReSys®.....	36
7.7 Seaborne	37
7.8 Sammanfattning av fullskalestudier.....	38
8. Ekonomi vid struvitfällning.....	39
Del 2. Laborativ studie.....	41
9. Design av den laborativa studien	42
10. Material och metoder.....	44
10.1 Material.....	44
10.2 Avvattning	45
10.3 Inledande karakterisering	45

10.4 Satsvisa försök.....	46
10.4.1 Verifiering av försöksbetingelser genom satsvisa försök med syntetiska lösningar	46
10.4.2 Rötresten och våtfaser	49
10.4.3 Analyser	50
10.5 Stripping	50
11. Resultat och diskussion	51
11.1 Avvattning och inledande karakterisering.....	51
11.1.1 Avvattning genom filtrering och visuell karakterisering.....	51
11.1.2 pH, TS och suspenderade partiklar	53
11.1.3 Kemisk sammansättning.....	54
11.2 Satsvisa försök.....	57
11.2.1 Syntetiska lösningar	57
11.2.2 Rötresten och våtfaser	60
11.3 Stripping	72
12. Kostnadsuppskattning.....	73
12.1 Individuella fullskaleanläggningar.....	74
12.2 Generell fullskaleanläggning.....	76
12.3 Diskussion	78
13. Fällningarnas värde som gödselmedel.....	81
14. Slutsatser.....	84
15. Litteraturförteckning	86
16. Förkortningar.....	91
Appendix 1. Löslighetsekvationer	92
Appendix 2. Laboratorieutrustning	94
Appendix 3. Provtagningsinstruktion	95
Appendix 4. Kemikalietillsatser och pH-värden för de syntetiska lösningarna	97
Appendix 5. Kemikalietillsatser och pH-värden för de satsvisa försöken.....	98
Appendix 6. Analysresultat efter fällning från de satsvisa försöken	100
Appendix 7. pH-värden och NaOH-tillsatser för strippingförsöken.....	101

1. INLEDNING

Denna rapport är resultatet av SGC-projektet *Återvinning av näringsämnen genom struvitfällning*, som finansierats av E.ON Gas Sverige AB, Lantmännen, Swedish Biogas International AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energikoncern AB (publ), Nordvästra Skånes Renhållnings AB, SplitVision AB, Ekobalans Fenix AB, Statens energimyndighet. Studiens syfte var att dels sammanställa information om struvitfällning samt att sammanfatta de studier som har utförts i lab-, pilot- och storskala inom området. Den andra delen av studien innefattade laborativa försök där struvitfällning utfördes på några olika rötresters från biogasanläggningar.

Kunskapssammanställningen, som är den första delen av rapporten, syftar till att ge en aktuell och heltäckande bild av struvitfällning. Den behandlar såväl tekniker inom forskningsområdet som kommersiellt tillgängliga tekniker. Sammanställningen, som främst baserats på studier av vetenskaplig litteratur, inleds med ett avsnitt om mineralet struvit, ett avsnitt om kemisk fällning och kristallisation generellt samt ett avsnitt som behandlar de faktorer som är av särskild betydelse för fällning och kristallisation av struvit. Därefter följer ett kapitel som behandlar den struvitprodukt som kan fås vid fällning.

I efterföljande kapitel finns en genomgång av försök med struvitfällning utförda i laboratorie-, pilot- och fullskala, inklusive de fullskaletekniker som finns kommersiellt tillgängliga.

Ett viktigt syfte med sammanställningen var också att planera studiens andra del, Laborativa försök, varför resultat och uppställningar vid tidigare utförda laboratoriestudier utgör en relativt stor del av kunskapssammanställningen.

Syftet med den laborativa studien, i den andra delen av denna rapport, var att utvärdera struvitfällning som enda teknik för att reducera både kväve och fosfor för några olika rötresters med olika näringssammansättning.

Dessutom undersöktes hur avvattnad respektive icke avvattnad rötrest påverkade struvitfällningen. Försöken utfördes satsvist.

De rötresters som användes i försöken var följande:

- Rötrest från rötat hushållsavfall
- Rötrest från rötad beta
- Rötrest från rötad gödsel
- Rötrest från rötad drank

DEL 1. KUNSKAPSSAMMANSTÄLLNING

2. KVÄVE OCH FOSFOR

Fosfor är en icke-förnybar råvara och är tillsammans med kväve och kalium mycket viktiga näringsämnen i gödselprodukter. De har en central funktion i många biologiska och biokemiska processer. Fosfor är det elfte mest förekommande grundämnet i litosfären, men förekomsten är ojämnt fördelad i jordskorpan (Steen, 2004).

I den naturliga miljön sker fosfortillförseln genom långsam vittring av fosforinnehållande mineral (Steen, 2004). I dagens samhälle bryts stora mängder fosformineral som tillförs jordbruket. Ca 80 % av den fosfor som bryts används till mineralgödselmedel (Steen, 2004). Resten används bland annat i läkemedelsindustrin, tvättmedelsframställning och flamskyddsmedel.

Tillgången på kväve ökade explosionsartat i världen sedan Haber-Boschprocessen utvecklades i början av 1900-talet (Barnard, 2009). Tillsammans med den extensiva brytningen av fosformineral har den industriella möjligheten att framställa kvävegödselmedel varit en grundförutsättning för den explosionsartade befolkningstillväxten i världen under det senaste århundradet.

Dagens kända fosfortillgångar finns i huvudsak i tre länder, Kina, USA och Marocko (Cordell m.fl., 2009). USA som historiskt sett varit den största producenten av fosformineral kommer troligtvis att ha reserver att bryta under ytterligare 25 år (Cordell m.fl., 2009). Prognoser visar att fosforbrytningen i världen troligtvis kommer att nå en "peak" kring 2030, varefter efterfrågan på fosforgödselmedel kommer att överskrida tillgången (Cordell m.fl., 2009). Eftersom det finns stora flöden av fosfor som inte tillvaratas i det moderna samhället, finns ett stort behov av att utveckla tekniker för återvinning av fosfor, för att ersätta den brutna fosfor.

Samtidigt som det troligtvis kommer att bli brist på bruten fosfor orsakar den fosfor tillsammans med det kväve som redan tillförts naturen stora problem i form av övergödning. Det finns således även miljömässiga incitament att tillvarata den fosfor som redan är introducerad i naturen och minska belastningen på naturen.

3. STRUVIT

Struvit, eller magnesiumammoniumfosfat, är en kristallin förening med sex kristallvatten ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Struvit, som ofta benämns MAP efter det engelska namnet *magnesium ammonium phosphate*, är en vit, kristallin förening med ortorombisk kristallstruktur (Doyle & Parsons, 2002). Molförhållandet mellan kväve, fosfor och magnesium i struvit är 1:1:1. Struvit är lösligt vid låga pH och olösligt vid höga pH. Grundläggande egenskaper hos struvit finns sammanställda i *Tabell 1*.

Tabell 1. Egenskaper hos struvit, efter Le Corre m.fl.(2009).

Typ	mineralsalt
kemisk formel	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Utseende	vit kristall
Kristallstruktur	ortorombisk
Löslighet	Låg i vatten (0,018g/100mL vid 25°C) Hög i syror (0,033g/100mL vid 25°C i 0,001M HCl) (0,178g/100mL vid 25°C i 0,01M HCl)
löslighetskonstant (K_{sp})	$5,5 \cdot 10^{-14}$ - $3,98 \cdot 10^{-10}$ (Doyle & Parsons, 2002)

Det finns omfattande studier av struvit inom medicinsk vetenskap, eftersom det sedan länge varit känt att struvit fäller ut i njurarna och bildar njursten. Inom VA-området dokumenterades bildning av struvit för första gången på 1930-talet. På 1960-talet identifierades att utfällning av struvit i rörledningar skapade stora problem. Särskilt skedde utfällningen på platser inom VA-anläggningen som var utsatta för ökad turbulens såsom vid pumpar, rörkrökar eller luftningsbassänger (Stratful m.fl., 2001). Detta beror på att turbulensen ger upphov till luftning som i sin tur medför att den koldioxid som finns löst i vattnet avgår som gas varvid pH ökar till nivåer där struvit fälls. Från slutet på 1990-talet och framåt finns ett stort antal rapporter i litteraturen kring potentialen med struvit som gödselmedel och intresset för att optimera struvitfällning ökar. Förutom gödselmarknaden föreslås användning av struvit även som råvara till fosfatindustrin, som komponent vid framställning av brandsäkra paneler och som bindemedel i cement (Stratful m.fl., 2001).

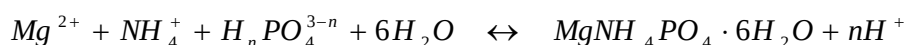
4. STRUVITFÄLLNING

I detta kapitel beskrivs inledningsvis ett antal generella begrepp rörande fällning och kristallisation. I kapitlets andra del beskrivs de faktorer som påverkar fällning av struvit i mer detalj. Slutligen beskrivs den struvitprodukt som framställts vid olika typer av lab-, pilot- och fullskaleförsök.

4.1 KEMISK FÄLLNING OCH KRISTALLISATION

En kemisk fällning uppkommer när två lösningar blandas och reagerar med varandra på ett sådant sätt att en löslig fraktion och en olöslig fraktion (fällningen) bildas. Fällningar kan vara amorfa eller kristallina. Kristallina fällningar är mycket regelbundna i sin kristallstruktur, medan amorfa fällningar är oregelbundna. Inuti amorfa strukturer kan vatten eller andra ämnen inneslutas, medan kristallina fällningar är rena och homogena, även om vissa, atomärt sett, liknande ämnen i kristallstrukturen kan vara utbytta. Beroende på fällningens typ och struktur, som ger upphov till densitetsskillnader, kan en fällning i en lösning stiga upp till ytan, vara jämnt fördelad i lösningen eller sedimentera till botten.

Struvit fälls i lösningar som innehåller magnesium-, ammonium- och fosfatjoner. Struvitfällning sker enligt följande generella reaktion, där $n=0, 1$ eller 2 (Le Corre m.fl., 2009):



Den generella ekvationen används eftersom fosfatjonen förekommer i tre olika former beroende på vilket pH lösningen har. I svagt sura lösningar dominerar *divätefosfatjonen* ($H_2PO_4^-$), i svagt basiska lösningar dominerar *vätefosfatjonen* (HPO_4^{2-}) och först vid starkt basiska lösningar dominerar *fosfatjonen* (PO_4^{3-}). I sura lösningar förekommer fosfat som fosforsyra (H_3PO_4). Ofta benämns samtliga jonformer med samlingsnamnet *fosfatjon*. Det gäller även i denna rapport. Vid de pH som är vanligast för struvitfällning är den dominerande jonformen vätefosfat, HPO_4^{2-} , och denna form kommer fortsättningsvis att användas i jämviktsekvationerna. För att undvika förvirring anges samtliga koncentrationer i enheten mol/L PO_4 -P eller mg/L PO_4 -P.

Vid de pH som är vanligast för struvitfällning kan reaktionen för struvitfällning således skrivas (Saidou m.fl., 2009):



Reaktionen innebär att vid gynnsamma betingelser kan magnesium-, ammonium- och fosfatjoner i vattenlösning kombinera och fällas som struvit. Eftersom det bildas vätejoner vid reaktionen sjunker pH medan struvit bildas. Det finns en rad parametrar som påverkar om struvit fälls eller ej. Till dessa hör bland annat:

- mättnadsgraden med avseende på de ingående jonerna (Mg^{2+} , NH_4^+ och HPO_4^{2-})
- lösningens sammansättning och inverkan av övriga jonslag
- pH
- tid och temperatur

4.1.1 Mättnadsbegreppet

Begreppet mättnad styr om struvit kan fällas i en lösning eller inte. Mättnadsgraden beror på koncentrationen av de för struvitfällning nödvändiga jonerna samt eventuella konkurrerande joner. Det finns fyra olika stadier av mättnad (Le Corre m.fl., 2009):

- I en *undermättad* lösning är kristallisation inte möjlig. Om man tillför struvit i fast form till lösningen kommer struviten att lösas upp.
- I en *mättad* lösning sker ingen spontan kristallisation, däremot kan redan bildade kristaller tillväxa.
- Vid *övermättad* är koncentrationerna av de ingående jonerna över jämvikt och det sker en snabb och spontan utfällning av struvit.
- Mellan mättad och övermättad infinner sig det *metastabila* området där lösningen är mättad och ingen spontan utfällning kan ske, men fällning kan initieras genom tillsats av en grodd som kristallen kan växa på.

För att struvit ska fällas spontant krävs att lösningen är övermättad med avseende på de ingående jonerna (Mg^{2+} , NH_4^+ och HPO_4^{2-}). Teoretiskt sker detta när produkten av koncentrationerna är högre än löslighetskonstanten K_{sp} (för definitioner se *Appendix 1. Löslighetsekvationer*):

$$[Mg^{2+}] \times [NH_4^+] \times [HPO_4^{2-}] > K_{sp}$$

Detta gäller dock svaga lösningar där förekomsten av andra jonslag är låg. I verkligheten påverkas fällningen av andra jonslag som kan generera konkurrerande fällningar och reaktioner. Vid beräkningar av övermättad i verkliga lösningar bör man ta hänsyn till aktiviteten av enskilda joner och i stället beräkna en löslighetsprodukt baserad på aktiviteter, K_{so} (se *Appendix 1. Löslighetsekvationer*):

$$K_{so} = a_{Mg^{2+}} \cdot a_{NH_4^+} \cdot a_{HPO_4^{2-}}$$

Optimala fällningsbetingelser kommer således att variera mellan olika typer av lösningar eller över tiden om ingående jonslag i en lösning varierar. För att kunna bestämma aktiviteterna krävs en matematisk iterativ process där jämviktsreaktionerna för samtliga ingående joner i bländningen medtages. I de flesta fall bör reaktioner för HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4 , $MgPO_4^-$, $MgHPO_4$, $MgH_2PO_4^+$, $MgOH^+$, NH_4^+ och H_2O ingå vid beräkning av mättnadsgraden i lösningar som är aktuella för struvitfällning (Galbraith & Schneider, 2009).

För att kunna kvantifiera övermättnaden har (Bouropoulos & Koutsoukos, 2000) definierat övermättnadsgraden Ω enligt:

$$\Omega = \frac{a_{Mg^{2+}} \cdot a_{HPO_4^{2-}} \cdot a_{NH_4^+}}{K_{so}}$$

I ekvationen jämförs produkten mellan aktiviteterna i den aktuella lösningen med löslighetskonstanten. Ju högre Ω desto högre är produkten av aktiviteterna jämfört med löslighetskonstanten och därmed graden av övermättnad (jfr *Appendix 1. Löslighetsekvationer*). Övermättnadsgraden kan tolkas som en drivkraft för kristallisation. Ju högre övermättnadsgrad desto fler kristaller bildas. I verkliga applikationer är man ofta intresserad av större kristallstorlek framför en kraftig tillväxt av antalet kristaller. I det fallet vill man inte att övermättnadsgraden skall vara alltför hög.

4.1.2 Fällningsreaktionens faser och kristalltillväxt

Fällningsreaktioner som genererar kristallina produkter består av två faser: kärnbildning och tillväxt (Doyle m.fl., 2002). Vid kärnbildning bildas kristallembryon genom att joner kombinerar i lösning. Det finns två olika typer av kärnbildning, heterogen och homogen. Homogen kärnbildning kan enbart ske vid övermättnad i lösningar med hög renhetsgrad (Le Corre m.fl., 2009). Heterogen kärnbildning kan ske på partiklar som finns i lösningen, så kallade groddar, och kan således ske även när koncentrationerna av de ingående jonerna är något lägre. Eftersom det ofta finns en hög andel partiklar och andra orenheter i de lösningar som är aktuella för struvitfällning dominerar oftast den heterogena kärnbildningen (Le Corre m.fl., 2009).

Kristalltillväxten pågår sedan tills jämvikt uppnåtts i lösningen. Kristalltillväxten är en masstransportstyrd reaktion, där diffusionen av jonerna är avgörande för tillväxten (Le Corre m.fl., 2009). Kristalltillväxten är därmed tidskrävande, medan kärnbildningen kan gå mycket snabbt.

Vid struvitfällning med verkliga lösningar medföljer ofta partiklar som fungerar som groddmaterial. Detta leder ofta till att det bildas många små kristaller, på bekostnad av kristalltillväxt. Därför är det viktigt att adressera aspekten kring kristallstorlek vid design av anläggningar för struvitfällning (Galbraith & Schneider, 2009). Det är oftast önskvärt att maximera andelen stora kristaller eftersom små kristaller kan följa med rejektet och ge upphov till igensättning. Små kristaller som medföljer rejektet från processen kan också fungera som groddar och ge upphov till icke önskvärd struvitfällning. För att undvika detta kan man filtrera utgående rejekt eller försöka agglomerera de mindre partiklarna. Le Corre m.fl. (2007) undersökte effekten av tillsats av olika typer av flockuleringsmedel och fann att små struvitpartiklar kunde agglomereras inom ett snävt pH-intervall genom tillsats av järnsalt eller katjonpolymer (polyDADMAC), där det senare föredrogs om struviten ska användas som gödselmedel.

För att påskynda fällning eller skapa fällning även utan övermättnad kan man tillsätta groddar. Exempel på groddmaterial som studerats är kvartssand (Battistoni m.fl., 2000) eller små struvitkristaller (von Münch & Barr, 2001) (Kim m.fl., 2007) (Ueno, 2004).

4.1.3 Induktionstid

Tiden mellan att en lösning blir övermättad tills det första kristallembryot uppkommer benämns induktionstid (Galbraith & Schneider, 2009). Induktionstiden är beroende av övermättnadsgraden, omröring och pH (Le Corre m.fl., 2009). Ju högre grad av övermättnad desto kortare är induktionstiden (Bouropoulos & Koutsoukos, 2000). På grund av olika processdesign och förutsättningar har induktionstiden uppmätts till allt mellan 0,25 minuter och 24 timmar. I merparten av försöken ligger dock induktionstiden under 30 minuter (Le Corre m.fl., 2009).

4.1.4 Reaktionskinetik

Nelson m.fl. (2003) undersökte reaktionskinetiken för struvitfällning i rejekt från anaerobt lagrad svingödsel (*swine lagoon liquid*) och fann att reaktionskinetiken är av första ordningen med avseende på $\text{PO}_4\text{-P}$ koncentrationen:

$$\frac{-dC}{dt} = kC$$

där hastighetskonstanten, k , varierade med pH enligt *Tabell 2*. Första ordningens reaktionskinetik innebär att reaktionshastigheten, i detta fall bildandet av produkten struvit, är proportionell mot fosfatkoncentrationen. Det innebär att en fördubblad fosfatkoncentration ger en fördubblad produktionshastighet av struvit.

Tabell 2. Hastighetskonstant för struvitfällning vid olika pH.

Källa: Nelson m.fl. (2003).

$k [\text{h}^{-1}]$	pH [-]
3,7	8,4
7,9	8,7
12,3	9,0

4.2 FAKTORER SOM PÅVERKAR STRUVITFÄLLNING

4.2.1 pH

pH är en mycket viktig processparameter vid struvitfällning eftersom koncentrationen av samtliga ingående joner är pH-beroende. Det optimala pH-värdet kan variera från fall till fall då det bland annat beror på övriga ingående joner i lösningen och temperaturen. I litteraturen rapporteras pH-intervallet för struvitfällning mellan 7-11 (von Münch & Barr, 2001) medan optimala pH i de flesta försök ligger kring 8,5-9 (se sammanställning av laboratorieförsök, *Tabell 4* i *Kapitel 5. Struvitfällning i laboratorieskala*).

Samtidigt medför fällning av struvit att pH minskar (se formel för struvitfällningsreaktion i *Kapitel 4.1 Kemisk fällning och kristallisation*). pH-minskningen kan användas som ett enkelt mått på om struvitfällning pågår och när reaktionen har avstannat (Saidou m.fl., 2009). Studier har visat att pH-sänkningen hindrar fortsatt struvitfällning trots att fosfat-, ammonium- och magnesiumjoner finns kvar i lös-

ning. Perera m.fl. (2009) fann att struvitutbytet blir högre om man håller pH konstant vid 9,0 under hela processen genom att tillföra natriumhydroxid.

Stratful m.fl. (2001) visar att struvitfällningen gynnas av ett överskott av ammoniumjoner. Detta kan troligtvis förklaras med att ett sådant överskott buffrar systemet och vidhåller ett högre pH än i ett obuffrat system. Eftersom försöken utfördes med syntetiskt framställda lösningar med relativt få jonslag närvarande kan inte resultaten direkt överföras till verkliga komplext sammansatta lösningar.

I de flesta fall håller den lösning som struviten skall fällas ur ett lägre pH än det optimala. Det finns olika möjligheter för att öka pH rapporterat i litteraturen:

- Tillsats av natriumhydroxid (NaOH) (bl.a. Uludag-Demirer m.fl., 2005)
- CO₂-stripping (bl.a. Saidou m.fl., 2009)
- Användning av magnesiumhydroxid (Mg(OH)₂) eller magnesiumoxid (MgO) som magnesiumkälla för att samtidigt öka pH (Stratful m.fl., 2001) (Ganrot m.fl., 2008)

Det finns ytterligare påverkan av pH beskrivet i litteraturen. Le Corre m.fl. (2009) visar att en ökning av pH kan påverka graden av övermättnad och därmed öka tillväxthastigheten av struvitkristaller. Vidare såg man att en pH-ökning från 8 till 11 medförde en minskning av struvitkristallernas medelstorlek (Le Corre m.fl., 2009).

4.2.2 Konkurrerande fällningar

För att erhålla rena struvitkristaller som är av god kristallkvalitet (klaras lagring och transport) krävs att övriga joner som finns i lösningen inte påverkar kristallisationsprocessen negativt. I litteraturen har struvitfällning utförts med en rad lösningar, bland annat rötat avloppsslam, rötrest från rötning av kogödsel och svin gödsel, urin och lakvatten. Vid försök med verkliga, komplext sammansatta lösningar är det inte ovanligt att fosfor fälls som andra föreningar än struvit. Många studier visar på en hög effektivitet vad gäller att avlägsna fosfor ur lösning. I många fall har man inte undersökt om fällningen består av ren struvit. Troligtvis förekommer blandningar av olika fällningar, vilka förutom struvit kan vara olika typer av kalciumfosfater, till exempel dikalciumfosfatdehydrat (CaHPO₄), octakalciumfosfat (Ca₈H₂(PO₄)₆·5H₂O), hydroxyapatit (Ca₅(PO₄)₃OH och amorft kalciumfosfat (Pastor m.fl., 2008)).

Flera författare har påpekat problem med struvitfällningen vid förekomst av höga koncentrationer av kalcium- och karbonatjoner (Le Corre m.fl., 2005). Jonerna kan påverka kristallisationsprocessen negativt och förekommer ofta i höga koncentrationer i lösningar som är aktuella för struvitfällning. Närvaro av Ca²⁺ eller CO₃²⁻ förlänger induktionstiden och har negativ påverkan på kristallisationshastigheten. Ca²⁺-joner reagerar med fosfat eller karbonat och bildar kalciumfosfater eller kalciumkarbonat.

Flera studier visar att för att erhålla en väl kristalliserad struvit krävs ett överskott på magnesium (Le Corre m.fl., 2005). Försök har visat att redan vid ett Mg:Ca molförhållandeförhållande 1:1 bildas mer amorft kalciumfosfat än kristallin struvit (Le Corre m.fl., 2005). Pastor m.fl. (2008) undersökte hur kalciumkoncentrationen påverkade avskiljningsgraden av fosfat samt andelen struvit i produkten. Man undersökte ett spann av koncentrationer, från inget kalcium alls till ett kraftigt överskott av kalcium (Mg:Ca molförhållande på 1:1,8). Inom intervallet ökade avskiljningsgraden av fosfat från 58 % till 92 %, däremot minskade andelen struvit i produkten från 93 % till 12 %. Man kunde också se att andelen små kristallpartiklar inom storleksintervallet 10-100 μm ökade med ökat kalciuminnehåll.

Vid pilotskaleförsök utförda av Moerman m.fl. (2009) utvärderades tre olika typer av processvatten. För de vatten där Ca/P-förhållandena var mellan 1,36 och 2,96 bildades mestadels struvit och avskiljningsgraden av fosfat var god. I den tredje lösningen var Ca/P-förhållandet 1,25 och avskiljningsgraden enbart 20 %. I detta fall bildades inte någon struvitprodukt utan enbart en amorf kalcium/magnesiumfosfatprodukt som flockulerade.

I andra studier ser man inga problem med en produkt som består av en blandning av struvit och hydroxyapatit (HAP) (Battistoni, 2004). HAP, som är den mest stabila föreningen av kalciumfosfaterna (Koutsoukos & Valsami-Jones, 2004), fälls ut inom pH-intervallet 9-10,5. Inom pH-intervallet 8-8,5 har man påvisat att en blandning av struvit och HAP fälls (Battistoni m.fl., 2000). Vilken fällning som kommer att dominera beror på lösningens sammansättning. Löslighetskoefficienten för HAP, pK_{sp} , är 57,8 vilket medför att HAP kristalliserar lättare än struvit (Battistoni m.fl., 2000). Genom att beräkna kvoten mellan de aktivitetsbaserade löslighetsprodukterna K_{so} (för definitioner se *Appendix 1. Löslighetsekvationer*) fann man att fällning av struvit dominerade när kvoten $pK_{so,HAP}/pK_{so,struvit}$ var lägre än 0,54.

4.2.3 Övermättnadsgraden

Graden av övermättnad utgör tillsammans med pH de viktigaste parametrarna för struvitfällning (Le Corre m.fl., 2009). Bouropoulos & Koutsoukos (2000) fann att en övermättnadsgrad över 2 ($\Omega > 2$) krävs för att kärnbildningen ska vara homogen. Man visade också att induktionstiden är omvänt proportionell mot graden av övermättnad (Bouropoulos & Koutsoukos, 2000) vilket medför att graden av övermättnad är den parameter som starkast påverkar induktionstiden (Le Corre m.fl., 2009).

4.2.4 Reaktionstid

Vid de rätta betingelserna sker själva fällningsreaktionen mycket snabbt, däremot krävs längre reaktionstid för att kristallerna ska öka i storlek. Den totala reaktionstiden beräknas som summan av tiden för kärnbildning och tiden som krävs för tillväxt. I satsvisa försök visade Stratful m.fl. (2001) att struvit fälldes redan efter 1 minut i artificiellt framställda lösningar innehållande fosfat-, magnesium- och ammoniumjoner. Storleken på dessa kristaller var max 0,1 mm medan 3 mm stora kristaller förekom efter 180 minuters reaktionstid. Detta beror på att kristalltillväxt är en diffusionsstyrd process vilken tar tid. Induktionstiden, som beskrivs i *Kapitel 4.1.3 Induktionstid*, är således bara en del av den totala reaktionstiden.

4.2.5 Rötrestens sammansättning

I de allra flesta rötresten förekommer ammoniumkväve i överskott jämfört med fosfat. I de flesta fall beskrivna i litteraturen ligger fokus på att avlägsna fosfor ur lösningen och kvarvarande ammoniumkväve omhändertas på annat sätt. Struvitfällning kan dock även användas som teknik för att eliminera ammoniumkväve genom att tillsätta fosforkälla, vilket utvärderats bland annat för lakvatten från deponi av Kim m.fl. (2007) och Kabdasli m.fl. (2008) och processvatten från halvlederindustrin av Ryu m.fl. (2008). I *Tabell 3* finns en förteckning av möjliga fosforkällor som är beskrivna i litteraturen. Utav dessa beskrivs fosforsyra och superfosfat som möjliga för användning i industriell skala medan man i samtliga beskrivna laboratorieskaleförsök med fosfortillsats har använt salter av fosforsyra, till exempel K_2HPO_4 och $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$.

Tabell 3. Sammanställning av olika fosforkällor beskrivna i litteraturen.

Fosforkälla	Referens
Fosforsyra (H_3PO_4)	von Münch & Barr (2001)
Superfosfat ($Ca_3(PO_4)_2$)	von Münch & Barr (2001)
KH_2PO_4	Perera m.fl. (2009), Kim m.fl. (2007)
K_2HPO_4	Ryu m.fl. (2008)
$NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$	Kabdasli m.fl. (2008)
Na_2HPO_4	Uludag-Demirer m.fl. (2005)

4.2.6 Val av magnesiumkälla

De två huvudsakliga magnesiumkällorna som används för struvitfällning är magnesiumklorid ($MgCl_2$) och magnesiumhydroxid ($Mg(OH)_2$) (Uludag-Demirer m.fl., 2005). Fördelen med magnesiumklorid är att den är mer löslig vilket medför kortare reaktionstid (von Münch & Barr, 2001). Magnesiumhydroxid är mer svårslöslig (Stratful m.fl., 2001) men har fördelen att tillsatsen av magnesium samtidigt ökar pH och således minskar eller ersätter behovet av ytterligare kemikalier för pH-justeringen. Detsamma gäller vid användning av magnesiumoxid (MgO) (Ganrot m.fl., 2008).

För att reducera kemikaliekostnaden har man i flera studier undersökt användningen av magnesiuminnehållande restprodukter för struvitfällning. Dessa försök har utförts i laboratorieskala och goda resultat har erhållits med havsvatten (98 % fosforreduktion), magnesiuminnehållande restprodukt från produktion av pottaska (K_2CO_3) (96 % fosforreduktion) (Esemen m.fl., 2009). Liknande resultat har visats med en restprodukt från magnesiumindustrin som magnesiumkälla (Quintana m.fl., 2008) och bittern, en restprodukt vid salttillverkning (Lee m.fl., 2003).

4.3 STRUVITPRODUKTEN

4.3.1 Produktens renhetsgrad

En viktig aspekt när det gäller användbarheten av struvit är renhetsgraden. De olika typer av avfall och avloppsströmmar som är rika på kväve och fosfor kan även innehålla läkemedelsrester, tungmetaller och andra organiska föreningar. För att struviten ska kunna fungera som gödselprodukt måste halterna av dess ämnen i den slutliga produkten hållas låga. I en studie av Ronteltap m.fl. (2007) undersöktes i vilken omfattning läkemedelsrester återfanns i den fällda struviten. Vid studien användes urin som spikades med en blandning av läkemedel (bland annat diclofenac (antiinflammatoriskt), ibuprofen (smärtstillande) och ethinylestradiol (p-piller)) samt tungmetaller (As, Cd, Cu, Cr, Ni och Pb). Efter tillsats av $MgCl_2$ och pH-justering skedde struvitfällning och fällningen analyserades med avseende på tungmetall- och läkemedelsinnehåll. Gällande läkemedelssubstanserna återfanns mellan 95-100 % i lösning efter fällning. I de fall där struviten dessutom sköljdes efter fällning var innehållet av läkemedelsrester i produkten försumbart. Vid lagring av urin uppkommer kemiska förhållanden som medför att tungmetaller fälls ut som karbonater eller hydroxider. Utav tungmetallerna återfanns mellan 47 och 63 % av Cd, Cu och Pb i den fasta fasen, medan siffran låg mellan 20 och 37 % för As, Cr och Ni. Genom att se till att de fällningar som uppkommer spontant vid lagring av urin separeras innan struvitfällningen blev innehållet av tungmetaller i själva struvitprodukten mycket lågt. Resonemanget ovan gäller specialfallet urin. I en pilotstudie där struvit fälldes på ett avloppsreningsverk i Australien visar von Münch & Barr (2001) att tungmetallinnehållet i produkten är mycket lågt; $<5,5$ mg Cd/kg P, <7 mg Pb/kg produkt och $<0,2$ mg Hg/kg produkt. Detta ligger långt under det svenska gränsvärdet för kadmiuminnehåll i gödselmedel; 100 mg Cd/kg P (Jordbruksverket, 2009).

4.3.2 Värdet av struvit som gödselprodukt

Struvitproduktens värde som gödselmedel nämns kortfattat på flera håll i litteraturen. Struvit beskrivs som ett gödselmedel som löses upp mycket långsamt (Le Corre m.fl., 2009) och beskrivs därför ofta som ett gödselmedel av ”*slow release*”-typ (de-Bashan & Bashan, 2004).

En enda mer omfattande studie har påträffats vid litteraturgenomgången. I den jämförs olika restproduktbaserade P-gödselmedel med kommersiella gödselmedel (trippel superfosfat och ”*rock phosphate*”) i krukexperiment och fältskaleexperiment (Cabeza Pérez m.fl., 2009). Vid experimenten jämfördes struvitprodukter från två olika tyska reningsverk med askor från förbränning av avloppsslam. Vid fältskaleförsöken såg man ingen tydlig skillnad gällande mängden växttillgängligt P eller P-koncentrationen i marklösning för de olika restprodukterna eller kommersiella gödselprodukterna. Inte heller kunde signifikanta skillnader påvisas i grödans avkastning eller fosforupptag. Dock kunde man se en antydning att struviten var ett något bättre gödselmedel än övriga restproduktbaserade fosforkällor (Cabeza Pérez m.fl., 2009). Försöken kommer att pågå under tre år och denna studie rapporterade enbart resultaten från det första året. Vid krukexperimenten kunde man se att mängden växttillgänglig fosfor efter gödsling med struvit var nästan lika hög som vid gödsling med trippelfosfat och att grödor gödslade med

struvit visade det högsta fosforupptaget uttryckt som upptag relativt upptag av trippel superfosfat (Cabeza Pérez m.fl., 2009).

Ett fåtal struvitprodukter har kommersialiserats och marknadsförs under olika varunamn. I Japan säljs struvit producerad i Phosnix-processen (se *Kapitel 7.2 Phosnix*) till gödselmedelindustrin för vidare förädling (Ueno, 2004) under namnet Green MAP II (von Münch & Barr, 2001). Struvit producerad med den belgiska processen NuReSys® (se *Kapitel 7.6 NuReSys®*) marknadsförs under namnet BIOSTRU® och det kanadensiska företaget Ostara (se *Kapitel 7.1 Ostara*) marknadsför sin struvitprodukt under namnet Crystal Green®. På VA-verket Berliner Wasserbetriebe produceras och säljs en gödselprodukt där struvit är uppblandat med slam (se *Kapitel 7.3 Berliener Wasserbetriebe*).

5. STRUVITFÄLLNING I LABORATORIESKALA

Det finns ett stort antal laboratorieförsök kring struvitfällning beskrivna i litteraturen. I detta kapitel är ett urval av dessa sammanställda. I efterföljande kapitel beskrivs processer som utförts i pilotskala (*Kapitel 6. Pilotskaleförsök*) och fullskala (*Kapitel 7. Fullskaleprocesser*). Definitionen mellan laboratorie-, pilot- och fullskala kan vara otydlig. I sammanställningen nedan har studierna uppdelats efter hur artikel/rapportförfattarna själva benämner sina försök.

Struvitfällningsförsök har utförts med en rad olika lösningar, både med syntetiskt framställda och lösningar baserade på restprodukter, bland annat rötat avloppsslam, rötrest från rötning av kogödsel och svingödsel, urin, samt lakvatten. De flesta försök har utförts med vattenfasen efter att restprodukten (rötresten/rötslammet) avvattnats, men det finns även exempel där icke avvattnad rötrest använts.

Många försök har utförts på VA-anläggningar med rejekt från centrifugerat röt-slam. Detta rejekt har ofta ett högt innehåll av ammoniumkväve eftersom detta bildas vid den anaeroba nedbrytningen av protein och bakterier (von Münch & Barr, 2001). Fosfor i slammet härrör från den fosfor som tas upp av bakterierna vid den biologiska fosforeringen och sedan frigörs till vätskefasen under rötprocessen (Marti m.fl., 2008).

Bland rötresterna förekommer två typer av rötrest från rötning av kogödsel, båda genom mesofil rötning. Den ena kommer från en enfasreaktor med en uppehållstid på tjugo dygn och den andra kommer från en tvåstegsprocess där den första acidogena fasen hade en uppehållstid på två dagar och den metanogena fasen åtta dagar (Uludag-Demirer m.fl., 2005). Dessutom förekommer rötrest från rötning av svingödsel.

I de allra flesta försök finns ammoniumkväve i överskott och tillgången av fosfat och magnesium är begränsande för struvitfällning. I många applikationer nöjer man sig med att avlägsna så mycket av fosfor som möjligt och överskottet av ammoniumkväve omhändertas på annat sätt. I andra applikationer, framför allt vid rening av lakvatten, är reduktion av kvävet huvudsyftet och fosfat tillsätts. pH har justerats till intervallet 7,5-10 genom tillsats av natriumhydroxid (NaOH) eller andra baser, genom stripping av koldioxid, eller genom en kombination av stripping och tillsats av bas.

I laboratoriestudierna utvärderas flera olika magnesiumkällor; magnesiumklorid (MgCl_2), magnesiumoxid (MgO) och magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) samt magnesiuminnehållande restprodukter. Magnesium har doserats antingen i stökiometrisk mängd i relation till P och/eller N eller ofta med visst överskott.

I detta kapitel beskrivs ett urval av dessa försök i mer detalj som kan visa på bredden av möjliga försöksuppställningar inför användning i den laborativa studien inom detta projekt. Viktiga processparametrar för samtliga beskrivna laboratorieförsök finns sammanställda i *Tabell 4*. Vid beskrivningen har försöken delats in i följande grupper:

- Försök med huvudsyfte att avlägsna fosfor
- Försök med huvudsyfte att avlägsna ammoniumkväve
- Försök där pH-justerings utförs med CO₂-stripping
- Försök med alternativa magnesiumkällor
- Övriga försök i laboratorieskala

5.1 FÖRSÖK MED HUVUDSYFTE ATT AVLÄGSNA FOSFOR

De flesta försök i laboratorieskala har utförts på VA-anläggningar, där struvitfällning utförts med rejekt från centrifugering av rötat avloppsslam. Huvudsyftet har i dessa fall främst varit att avlägsna fosfor och avskiljningsgraden av kväve är oftast inte optimerad.

Stratful m.fl. (2001) undersökte en rad olika förutsättningar för satsvis struvitfällning med artificiellt framställda lösningar. Efter fällning fanns mer NH₄⁺-joner än beräknat kvar i lösningen, vilket tyder på att fällningen inte bestod av ren struvit utan att fosfat även fälldes som andra föreningar. För att utvärdera hur pH inverkar på fällningen av struvit ökade man sakta pH. Vid pH 7,5 producerades mycket små mängder struvit, vid pH 8,5 hade 92 % av magnesiumet avlägsnats från lösningen, medan enbart 85 % av fosfor hade reagerat. Vid pH 10 återstod bara 3 % av magnesiumet medan 12 % av fosfatet fanns kvar. Försöket visade att magnesium fällde i andra föreningar än struvit och för att fälla mer fosfor behövs troligen ett överskott av magnesium. Stratful m.fl. (2001) undersökte även inverkan av reaktionstiden och fann att reaktionen var mycket snabb. Den mesta kärnbildningen ägde rum under den första minuten. Kristallstorleken ökade dock med ökad reaktionstid och efter 180 minuter hade vissa kristaller vuxit till 3 mm storlek. Man fann att ett överskott av NH₄⁺-joner gav en renare struvitprodukt, troligtvis på grund av att ett högre pH kunde bibehållas i lösningen.

I ett examensarbete av Heldt (2005) utfördes en serie fällningsförsök med rejektet från rötat Bio-P slam från reningsverket i Hammarby Sjöstad, Stockholm. Inledningsvis justerades pH från det ursprungliga 7,7 till 8,8 genom koldioxidstripping. Fällningsförsöken utfördes i 1 L glasbägare med propelleromrörning. Mängden suspenderade partiklar i rejektet analyserades och låg på ca 250 mg/L. För att fastställa inverkan av suspenderade partiklar på fällningen utfördes försök både på icke-filtrerat och filtrerat rejekt. Högst fosfatreduktion erhöles vid försök med det icke-filtrerade slammet. I det fallet innehöll fällningen mycket partiklar och såg mer ut som ett slam än en kristallin fällning. Eftersom detta slam sedimenterade betydligt långsammare (16 timmar) än den kristallina struvitprodukten kan också den ökade fosforreduktionen ha berott på att fosfor fälldes ut under hela sedimentationsfasen. Fosforreduktionen låg på mellan 33 och 76 %.

Tabell 4. Sammanställning av fällningsförsök utförda i laboratorieskala.

Avfallstyp	Mg-källa	Process	Mg:P:N ¹	[NH ₄ -N] ₀ [mg/L]	[PO ₄ -P] ₀ [mg/L]	Avskiljningsgrad N [%]	Avskiljningsgrad P [%]	pH [-]	T [°C]	Tid	Referens
Rejekt från rötrest av 1 och 2-stegsrotning av kogödsel	MgCl ₂ , Mg(OH) ₂	Satsvist	0,9-2,2:-1	198-404	-	95	-	8,5	21-22	<60 min	Uludag-Demirer m.fl. (2005)
Urin	MgO	Satsvist, kombination av struvitfällning och tillsats av zeoliter för N-reduktion	1:1:-	2500 ²	510 ³	50-60	>97	9,0	-	-	Ganrot m.fl. (2008)
Icke avvattnat avlopps-slam/syntetiskt framställd lösning	MgCl ₂	Satsvist i luftad reaktor, CO ₂ -stripping som pH-höjning	1:1:-	1250	330	-	85-90	7,5-8,7	-	1-16 h	Stumpf m.fl. (2009)
Syntetiskt framställd lösning	MgCl ₂	Satsvist med luftning	1:1:1	53	117	-	78	>8,1	25	60-70 min	Saidou, m.fl. (2009)
Rejekt från avloppsreningsverk	Restprodukt från Mg-industri	Satsvist magnetomrört	1,6:1:8,6	250	64	30	90	8,3	14	30 min	Quintana, m.fl. (2008)
Rejekt från rötad svingödsel	MgCl ₂	Satsvist, delvis vid konstant pH och med omröring med nätpeller. Tillsats av P-källa.	1,2:1,2:1	296	786	71	97	9,0	-	15 h	Perera m.fl. (2009)

¹ Mg:P:N-förhållandet anges som molförhållande mellan jonerna Mg²⁺, H₂PO₄³⁻ⁿ, NH₄⁺

² I detta fall avses totala kvävekoncentrationen

³ I detta fall avses totala kvävekoncentrationen

Avfallstyp	Mg-källa	Process	Mg:P:N ⁴	[NH ₄ -N] ₀ [mg/L]	[PO ₄ -P] ₀ [mg/L]	Avskilj- ningsgrad N [%]	Avskilj- ningsgrad P [%]	pH [-]	T [°C]	Tid	Referens
Artificiellt fram- ställt lösning	Mg(SO ₄) ₂	Satsvist	1:1:1	109	242	-	88	10,0	-	180 min	Stratful, <i>m.fl.</i> (2001)
Rejekt från an- aerobt lagrad svingödsel	MgCl ₂	Satsvist	1-1,6:1:-	142-533	50,5-63,8	-	91-96	7,5- 9,5	22-24	24 h	Nelson <i>m.fl.</i> (2003)
Lakvatten från deponi	MgCl ₂	Satsvist, magnetomrört, tillsats av P-källa	1:1,05:1	1811	-	94	-	9,5	-	-	Kabdasli <i>m.fl.</i> (2008)
Lakvatten från deponi	MgCl ₂	Satsvist, propellerom- rört, tillsats av P-källa	1,2:1,2:1	800-2200	1-45	90-98	-	8-11	rums- temp.	-	Kim <i>m.fl.</i> (2007)
Rejekt från anae- robt avloppsslam	Mg(NH ₃) ₂	Satsvist, propelle- romrört	varierande	-	-	-	33-76	8,5- 9,5	-	60- 120 min	Heldt (2005)
Syntetiskt fram- ställt lös- ning/biologiskt behandlat av- loppsvatten från grösgård	MgCl ₂ , havsvatten, bittern	Satsvist, propellerom- rört	-	60	120	39-54	75-81	9,6	20	10 min	Lee <i>m.fl.</i> (2003)
Processvatten från halvledarin- dustrin	MgCl ₂	Satsvist, propellerom- rört, tillsats av P-källa	1:1:1	155	-	89	-	9,2	20	30 min	Ryu <i>m.fl.</i> (2008)

⁴ Mg:P:N förhållandet anges som molförhållande mellan jonerna Mg²⁺, H₂PO₄³⁻ⁿ, NH₄⁺

Nelson m.fl. (2003) utförde försök med att fälla struvit i rejekt från anaerobt lagrad svingödsel (*anaerobic swine lagoon liquid*). Försöken utfördes i 250 mL glasbägare som täcktes med parafilm för att reducera ammoniakavgång. Som magnesiumkälla användes magnesiumklorid ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) och pH justerades med natriumhydroxid (1 M). Sammansättningen mellan Mg och P varierades och bägarna tilläts stå under 24 timmar innan vätskan analyserades med avseende på $\text{PO}_4\text{-P}$ och Mg^{2+} . För att bestämma reaktionskinetiken uppmättes fosfor och magnesiumkoncentrationerna med jämna intervall. Den maximala fosforreduktionen uppnåddes mellan pH 8,9 och 9,25 med ett Mg:P förhållande på 1,6:1. Reaktionskinetiken bestämdes till första ordningen med avseende på $\text{PO}_4\text{-P}$ -koncentration. Vid en initial $\text{PO}_4\text{-P}$ -koncentration på 51 mg/L uppnåddes "steady-state"-koncentrationen 7,6 mg/L $\text{PO}_4\text{-P}$ efter 30 minuters reaktion.

5.2 FÖRSÖK MED HUVUDSYFTE ATT AVLÄGSNA KVÄVE

Struvitfällning har även utvärderats som teknik för att avlägsna ammoniumkväve ur exempelvis lakvatten, rötrest eller andra processvatten med högt innehåll av ammoniumkväve. I dessa fall tillsattes förutom magnesium även fosfat.

Uludag-Demirer m.fl. (2005) utförde satsvisa experiment med rejekt från rötat kogödsel. Man jämförde två olika typer av rötrest, en enstegsrötad fraktion med en uppehållstid i rötkammare av tjugo dagar och en tvåstegsrötad fraktion där den acidogena steget hade en uppehållstid på två dagar och det metanogena steget åtta dagar. Rötresten avvattades och struvitfällningen utfördes med rejektet direkt efter rötning. Försöken utfördes i satsvisa magnetomrörda reaktorer. Lösningarna var mörka till färgen på grund av ett högt innehåll av suspenderade partiklar och filtrerades genom ett 1,19 mm filter inför försöken. Som fosforkälla användes Na_2HPO_4 och olika molförhållanden mellan $\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4\text{-P}$ utvärderades. Två magnesiumkällor, magnesiumklorid och magnesiumhydroxid, utvärderades. Till varje försök användes 50 mL lösning och omrörningen utfördes med magnetomrörare. pH justerades genom tillsats av natriumhydroxid. I samtliga fall såg man en plötslig pH-sänkning i början av försöken vilket ansågs bero på att struvitfällningen initierats. Systemet uppnådde jämvikt på knappt en timme. På grund av de små volymer som användes vid varje försök analyserade inte produkten och den kan således ha bestått av andra fällningar än ren struvit. För att avskilja 90 % eller mer av kvävet krävdes ett överskott av magnesium, uttryckt som ett $\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+$ -molförhållande på mellan 1,3-2,2:1. Magnesiumklorid ansågs vara mer effektivt än magnesiumhydroxid som magnesiumkälla vilket troligtvis beror på att magnesiumklorid är mer lösligt än magnesiumhydroxid.

Struvitfällning har även utvärderats med syfte att reducera ammoniumkväve i lakvatten från deponier. Kim m.fl. (2007) utförde satsvisa försök för att undersöka lämpligheten av struvitfällning för lakvattenbehandling, effekten av i vilken ordning kemikalierna tillsattes samt om tillförseln av små struvitkristaller som groddmaterial kunde förbättra processen. Försöken utfördes i 1 L propelleromrörda behållare. Som magnesiumkälla användes magnesiumklorid och fosfat tillsattes i form av KH_2PO_4 . Fällningen av kväve som struvit var markant högst när magnesium och fosfor tillsattes innan pH justerades. Detta kan troligtvis förklaras av att andra fällningar bildades när kemikalierna tillsattes i annan följd. Tillsats av stru-

vit som groddmaterial gav den lägsta NH_4^+ -koncentrationen då 98 % av ammoniumkvävet hade avlägsnats ur lösningen efter avslutat försök.

Även Kabdasli m.fl. (2008) undersökte lämpligheten av struvitfällning för kvävereduktion i lakvatten. Försöken utfördes satsvist i 500 mL E-kolvar med kork. Magnesiumklorid används som magnesiumkälla och $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ som fosforkälla. För att justera pH används natriumhydroxid. Resultaten från försöken visar att vid pH 9,5 kunde 94 % av kvävet i lakvattnet avlägsnas genom struvitfällning.

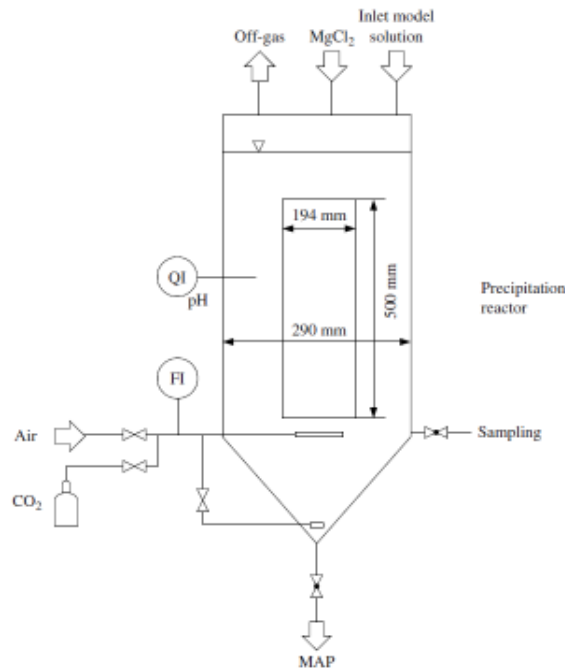
Ryu m.fl. (2008) använde struvitfällning för att rena processvatten från halvledarindustrin som ofta innehåller höga halter ammonium-, fosfat- och floridjoner. Försöken utfördes satsvist propelleromrört med magnesiumklorid som magnesiumkälla för att ge ett 1:1:1 molförhållande mellan Mg:P:N. I de fall som fosfat fanns i underskott tillsattes även K_2HPO_4 . pH justerades med natriumhydroxid. Man fann att optimalt pH för struvitfällning var vid pH 9,2 och att ett överskott av både magnesium- och fosfatjoner gynnade fällningen av ammoniumjoner som struvit. Detta berodde troligtvis på att en högre övermättnadsgrad kunde uppnås (Ryu m.fl., 2008).

Ganrot m.fl. (2008) visar hur struvitfällning med magnesiumoxid som magnesiumkälla kan kombineras med zeolit för att avlägsna fosfor och kväve ur urin genom en enda behandling. Zeolit har hög katjonbyteskapacitet och hög affinitet för ammoniumjoner. Studien visade att zeoliten endast adsorberade en mycket liten andel av fosfor, och att den mesta fosfor kunde fällas som struvit. Magnesiumoxid valdes som magnesiumkälla för att reducera kemikaliekostnaden samt att undvika kostnad för pH-justering. Försöken utfördes satsvist och zeolit (förbehandlad på olika sätt) tillfördes samtidigt som magnesiumoxid. Författarna visar att >97 % av fosfor kunde avlägsnas och mellan 50-60 % av kvävet. Man undersökte också växttillgängligheten av slutprodukten som bestod av en struvit och zeolimblandning och fann att den var av ”*slow release*”-typ.

5.3 FÖRSÖK DÄR PH JUSTERAS GENOM STRIPPING AV CO_2

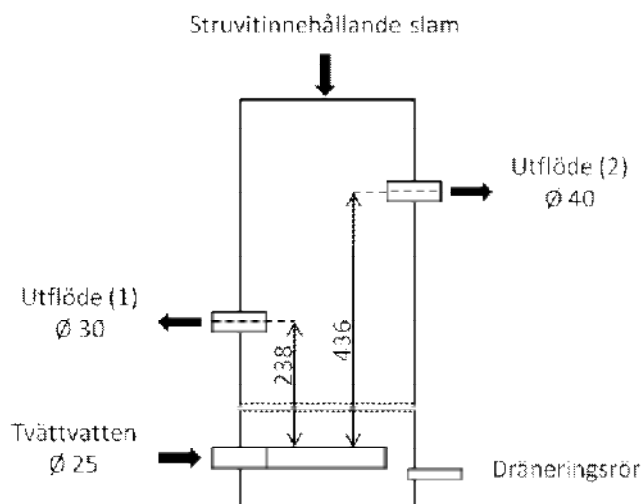
Flera författare beskriver möjligheten att använda CO_2 -stripping som ett alternativ för att öka pH och därmed minska kostnaden för pH-justeringen. Strippingen utförs ofta genom att behållaren som används för fällning luftas, vilket även kan medföra att kristalltillväxten gynnas eftersom kristallerna hålls kvar i lösningen längre innan de sedimenterar till botten.

Stumpf m.fl. (2009) utförde struvitfällning både på avvattnat och icke-avvattnat rötat avloppsslam. Försöken utfördes med slam från Berliener Wasserbetriebe i Tyskland. På anläggningen utförs detta i fullskala med syftet att minska risken för spontanutfälld struvit. Syftet med laboratoriestudien var att optimera processen. Försöken utfördes i en luftad 45 L behållare där luft tillfördes i den undre delen av reaktorn (se *Figur 1*). Tack vare strippingen behövdes ingen kemikalietillsats för att nå pH 7,5-8,7. Magnesiumklorid tillsattes som magnesiumkälla i toppen av reaktorn och fälld struvit sedimenterade till botten av behållaren, nedanför luftinläppet. Luftningen utförs för att strippa CO_2 och således öka pH men också för att hålla struvitkristallerna omrörda under längre tid och således bidra till ökad kristalltillväxt.



Figur 1. Laboratorieuppställning vid struvitfällning i icke avvattnat rötslam från VA-verk. Källa: Stumpf m.fl.(2009).

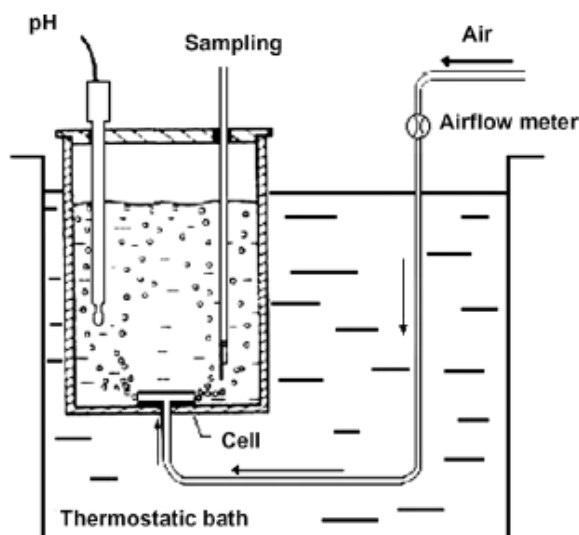
Försöken utfördes inledningsvis satsvist med tre olika luftningshastigheter. Vid den högsta hastigheten 500 L/h hade 85-90 % av fosfor avlägsnats inom en timme. Under samma tid hade enbart 58 % av fosfor avlägsnats vid försöket med den lägsta luftningshastigheten 100 L/h. De bildade struvitkristallerna var i genomsnitt större vid de lägre luftningshastigheterna då graden av övermättnad då var lägre vilket gynnar kristalltillväxten framför nybildningen av kristaller. För att struvit kristalliserad direkt i slam skall kunna användas som gödselmedel måste produkten tvättas. Detta utfördes i en tvättbehållare där slammet som innehåller struvit tillsattes från botten och tvättvatten tillsattes från toppen (se Figur 2). Tvättprocessen är mer effektiv ju större kristallerna är.



Figur 2. Tvättbehållare för tvätt av struvitinnehållande slam. Källa: Stumpf m.fl. (2009).

De laborativa försöken utfördes också kontinuerligt för att undersöka inverkan av uppehållstiden på kristallstorleken (Stumpf m.fl., 2009). Försöken utfördes med samma reaktor som tidigare och uppehållstiden varierades mellan tre och sexton timmar. Magnesiumkällan doserades för att uppnå övermättnad och man fann att kristallstorleken blev högst vid den längsta uppehållstiden (Stumpf m.fl., 2009).

Även Saidou m.fl. (2009) undersökte inverkan av lufthastigheten på struvitfällning i laboratorieskala. Försöken utfördes med syntetiskt framställda lösningar med ett Mg:P förhållande av 1:1. Magnesiumklorid användes som magnesiumkälla. Genom att blåsa luft genom en 1 L cylindrisk behållare av PVC kunde CO₂ strippas och pH höjas (se *Figur 3*). Högst avskiljningsgrad (78 %) av fosfor uppmättes vid lufthastigheter mellan 10 och 25 L/min (600-1500 L/h). Vid högre hastigheter minskade avskiljningsgraden troligtvis på grund av att flödesmekaniska effekter påverkar transporten av joner negativt. Den erhållna fällningen bestod av ren struvit.



*Figur 3. Laborarieuppställning med luftad bägare för att driva av koldioxid.
Källa: Saidou m.fl.(2009).*

5.4 FÖRSÖK MED ALTERNATIVA MAGNESIUMKÄLLOR

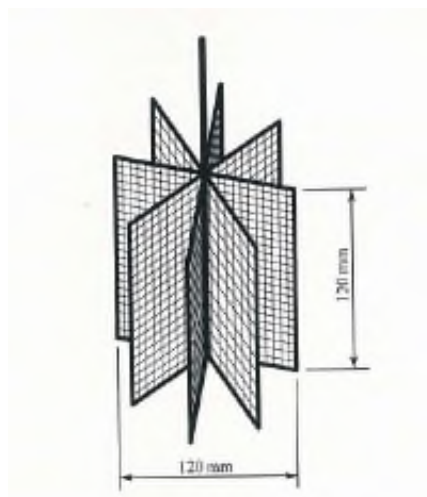
Som ett led i att reducera kemikaliekostnaderna för struvitfällning finns beskrivningar av försök utförda med alternativa magnesiumkällor.

I en studie av Quintana m.fl. (2008) användes olika typer av biprodukter från magnesiumindustrin. Biprodukterna hade olika kornstorleksfördelning och samtliga suspenderades i vatten inför fällningsförsöken. Största beståndsdelarna i restprodukten var MgO-Mg (68 %) och CaO-Ca (9,58 %). Försöken utfördes satsvist magnetomrört (120 rpm) i 5 L stora glasbehållare. Inför struvitfällningen luftades lösningen under ca 30 minuter för att öka pH. Förutom avgång av CO₂ berodde denna pH-ökning även på viss ammoniakavgång. Olika förbehandlingsmetoder av magnesiumkällan gav olika resultat där den maximala fosforreduktionen inträffade för det fall där man använde en mycket finkorning restprodukt som suspenderades och fick stå lång tid innan fällningsexperimentet. Fosforreduktionen i det fallet var 90 %.

Lee m.fl. (2003) utvärderade bittern, en restprodukt från tillverkning av havssalt som alternativ magnesiumkälla. I studien jämfördes bittern i vätskeform (3200 mg/L Mg^{2+} och 8000 mg/L Ca^{2+}), saltvatten (1200 mg/L Mg^{2+} och 400 mg/L Ca^{2+}) och magnesiumklorid. Försöken utfördes i propelleromrörda kärl. Reaktionen var mycket snabb i samtliga fall, den mesta fosfor hade avlägsnats efter en minut. Produkten visade sig bestå av en blandning av struvit, magnesiumfosfat och hydroxyapatit. Resultaten visar jämförbar fosforreduktion vid användning av bittern (76 %), havsvatten (81 %) och magnesiumklorid (75 %). Däremot var reduktionen av ammoniumkväve sämre vid användning av bittern (39 %) än vid användning av havsvatten (54 %) och magnesiumklorid (53 %).

5.5 ÖVRIGA FÖRSÖK I LABORATORIESKALA

Perera m.fl. (2009) undersökte om utbytet av struvit kan ökas genom att hålla pH konstant under hela fällningsprocessen. Försöken utfördes i en 3 L reaktor med magnetomrörning (500 rpm). I vissa försök användes förutom magnetomröraren även en roterande propeller av stål nät (50 rpm) som struviten fälldes på (se *Figur 4*).



Figur 4. Propellern av stål nät som användes för omrörning och struvitfällning i en studie av Perera m.fl.(2009).

Försöken utfördes med rejekt från rötda grisgödsel. Rejektet fick stå vid 4°C under 24 h innan försöken utfördes för att suspenderade partiklar skulle sedimentera. Därefter lagrades supernatanten vid 4°C fram till starten av experimenten. Det initiala molförhållandet mellan $NH_4^+ : Mg^{2+} : PO_4-P$ justerades till 1:1,2:1,2 genom tillsats av magnesiumklorid samt KH_2PO_4 . pH justerades till 9,0 i början av samtliga försök. I en reaktor hölls pH konstant vid 9,0 under den 15 h långa försöksperioden genom tillsats av natriumhydroxid (1 M). Detta försök gav ett 24 % högre utbyte av struvit än vid de försök där pH inte justerades lika noggrant under försökets gång. Detta kan förklaras med att fällning av struvit genererar protoner, vilket leder till att pH sjunker. När pH sjunkit till 8 upphörde struvitfällningen trots att det kunde finnas magnesium-, fosfat- och ammoniumjoner kvar i lösningen. Perera m.fl. (2009) undersökte även föroreningsgraden hos struviten med avseende på Cu^{2+} och Zn^{2+} . I de fall där man lät struvit fällas på stålpropellern var produktens renhetsgrad 96 %. När struviten i stället lätts sedimentera till botten

blev renhetsgraden sämre. Detta berodde på att 70 % respektive 48 % av den koppar och zink som fanns i jonform i ursprungslösningen också sedimenterade till botten. Dessa föreningar kunde inte separeras från struviten som således förorenades. Författarna påpekar att i lösningar där innehållet av oönskade metaller är högt finns risker för produktkvalitetsproblem.

5.6 SAMMANFATTNING AV FÖRSÖK I LABORATORIESKALA

De allra flesta försök i laboratorieskala har utförts satsvist. Omrörningen har skett antingen mitt i behållaren med olika typer av propellrar eller i botten med magnetloppa. Även luftomrörda reaktorer har använts. I de fall struvit fällts i rötrest/röt slam har man använt vattenfasen efter avvattningen i samtliga fall utom vid ett. Struvitfällning har också utvärderats för lakvatten och andra processvatten med högt innehåll av ammoniumkväve.

Försöken har i de allra flesta fall genererat en hög avskiljningsgrad med avseende på fosfat (upp till 97 %) och, i de fall där reduktion av kväve varit huvudsyftet, även med avseende på ammoniumkväve (upp till 98 %). Optimalt pH ligger i de allra flesta fall kring 9,0. I flera fall har man inte analyserat fällningen, utan fokuserat på reduktionen av näringsämnen i lösningen. I de fall fällningen har analyserats består den i vissa studier av ren struvit, medan man i andra studier sett en blandning av olika fällningar. Struvitfällningen gynnas av ett överskott av magnesium. Reaktionstiden varierar mellan 30 minuter och 24 timmar.

6. PILOTSKALEFÖRSÖK

Pilotskaleförsök i litteraturen kan delas in i två huvudgrupper efter de processlösningar som använts. Den ena kategorin har utförts med reaktorer där omröringen sker med hjälp av en roterande propeller eller liknande och i den andra kategorin används fluidiserade bäddreaktorer eller luftomblandning av annat slag. Fördelarna med fluidiserade bäddar eller luftomrörda reaktorer är att de kan designas så att struvitkristallerna hålls kvar i reaktorn tillräckligt länge för att uppnå en viss kristallstorlek. En annan fördel med reaktortypen är att tillsatsen av kemikalier för pH-justering minskar då luftningen även medför att koldioxid strippas och pH i reaktorn höjs. Processdata för samtliga studier beskrivna i detta kapitel finns sammanfattade i *Tabell 5*.

6.1 OMRÖRDA REAKTORER

Pastor m.fl. (2008) undersökte inverkan av en rad processparametrar på struvitfällning i pilotskala. Studien utfördes kontinuerligt i en 21 L glasbehållare som bestod av två delar, en nedre omrörd del för struvitfällning och en övre sedimentationskammare. Syftet med sedimentationskammaren var att hindra småpartiklar att medfölja utflödet. Omrörningen skedde med en propeller och kristallisationsreaktorn var utrustad med fyra bafflar för att optimera omrörningen. Sedimentationskammaren var konformad med en vinkel på 45°. Till reaktorn kopplades rostfria rör för inflöde av substrat och kemikalier. Som magnesiumkälla användes magnesiumklorid och pH justerades genom tillsats av natriumhydroxid.

Vid försöken användes syntetiskt framställda lösningar med en koncentration av ca 80 mg/L $\text{PO}_4\text{-P}$ och överskott av ammoniumjoner. Ca 80 % av fosfor kunde fällas. Genom att öka pH, molförhållandet Mg/P och molförhållandet N/P kunde effektiviteten öka. När pH höjdes från 8,2 till 9,5, ökade avskilningsgraden med avseende på fosfat från 40 % till 80 %. Effektiviteten ökade även när molförhållandet Mg/ $\text{PO}_4\text{-P}$ höjdes från 0,9 till 1,1 och molförhållandet $\text{NH}_4\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ höjdes från 1,6 till 2,4. Fällningen bestod av en blandning av struvit och amorft kalciumfosfat. Vid molförhållandet Ca/Mg över 2 fälldes den mesta fosfor som amorft kalciumfosfat. Pastor m.fl. (2008) studerade även inverkan av uppehållstiden och fann att den var betydelselös när det gällde mängden fosfor som kunde avlägsnas, däremot var den betydelsefull för kristallstorleken. Vid kort uppehållstid medföljde små kristallina partiklar i utflödet.

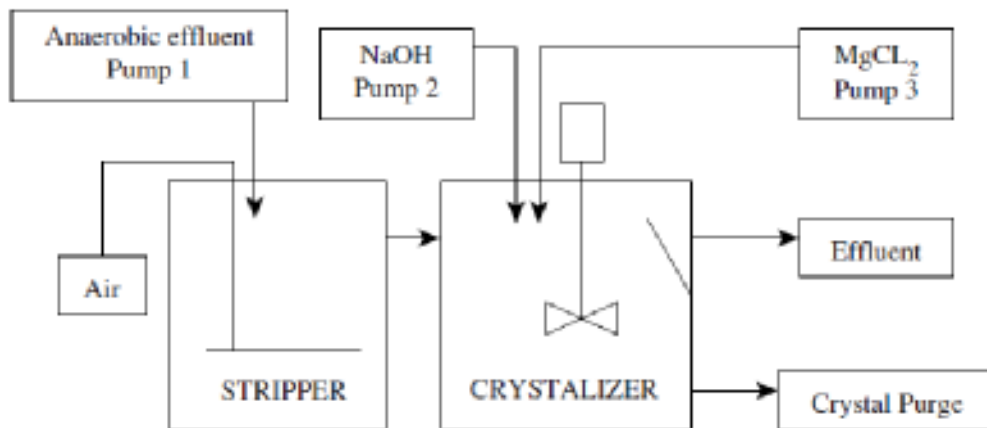
Vid några av försöken uppstod problem med fouling (igensättning) då struvit fälldes ut på propelleromröraren och medförde minskad omrörning. Detta uppkom troligtvis då lösningen blev kraftigt övermättad i vissa zoner kring omröraren. Författarna påpekar att fouling kan vara ett problem vid uppskalning av reaktorn och att resurser bör läggas på att designa reaktorn så att risken minimeras.

Tabell 5. Översikt av studier utförda i pilotskala.

Avfallstyp	Mg-källa	Process	Mg:P:N ⁵	[NH ₄ -N] ₀ [mg/L]	[PO ₄ -P] ₀ [mg/L]	Avskiljningsgrad N [%]	Avskiljningsgrad P [%]	pH [-]	Tid	Referens
Syntetiskt framställt	MgCl ₂	Kontinuerligt i omblandad reaktor med sedimentationskammare	0,9-1,1:1:-	54-87	75-81	-	≤80	8,2-9,5	HRT 2-11 h	Pastor <i>m.fl.</i> (2008)
Processvatten från potatisindustri	MgCl ₂	Kontinuerligt i omblandad reaktor med stripper	1,0-1,2:1:-	208-426	43-115		20-90	8,5-8,7	-	Moerman <i>m.fl.</i> (2009)
Rejekt från avloppsreningsverk	Ingen tillsats	Satsvist i fluidiserad bäddreaktor	-	-	12-48	-	61,17-89,6	-	100-210 min	Battistoni <i>m.fl.</i> (2000)
Rejekt från rötning av svingödsel	Mg(OH) ₂ , MgO	Satsvist i omblandad reaktor, tillsats av P-källa	1,25:1:1	1200	-	99	-	9,5	-	Miles & Ellis (2001)
Rejekt från centrifugerat rötat avloppsslam	MgCl ₂	Kontinuerligt i luftat kärl	≥1,05:1:-	478	167	-	97	9,0	HRT 3 h	Jaffer <i>m.fl.</i> (2002)
Rejekt från centrifugerat rötat avloppsslam	Mg(OH) ₂	Luftomrörd reaktor	1,3:1:-	790	61	-	94	8,5-9	-	von Münch & Barr (2001)
Rejekt från centrifugerat rötat avloppsslam	MgCl ₂	Fluidiserad bädd, utvärdering av olika övermåtnadsgrad	-	140-650	140-700	42	80	6,9-8	-	Britton <i>m.fl.</i> (2009)

⁵ Mg:P:N förhållandet anges som molförhållande mellan jonerna Mg²⁺, H_nPO₄³⁻ⁿ, NH₄⁺

Moerman m.fl. (2009) har utfört pilot- och fullskaleförsök på anaeroba processvatten från potatisindustrin. Vid pilotförsöken användes tre olika typer av processvatten. Fullskaleprocessen beskrivs i *Kapitel 7.6 NuReSys®*. Pilotförsöken utfördes kontinuerligt i en propelleromrörd tankreaktor (200 L) (se *Figur 5*). Processvattnet förbehandlades i en stripper (180 L) för att öka pH. Natriumhydroxid tillsattes för justering av pH till 8,5-8,7 i reaktorn.



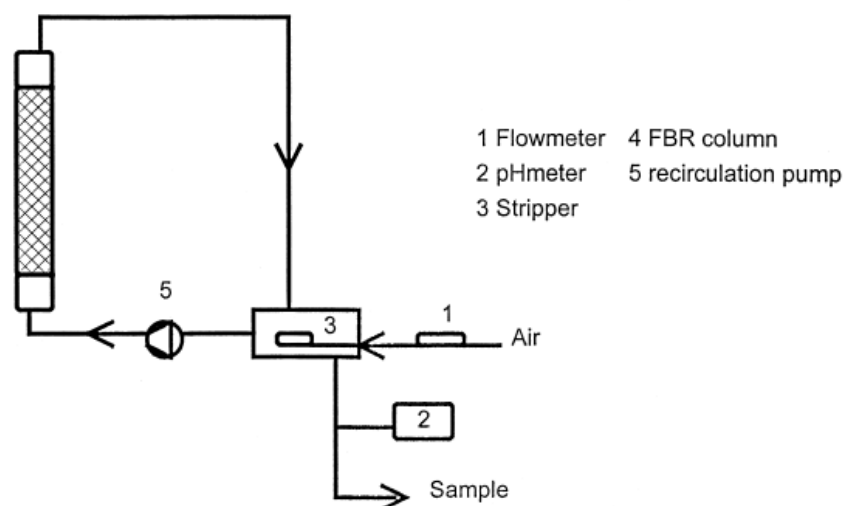
Figur 5. Schematisk bild över pilotskalanläggning använd för struvitfällning av processvatten i potatisindustrin. Källa: Moerman m.fl.(2009).

Avskiljningsgraden av fosfat skiljde markant mellan olika processvatten. Den högsta avskiljningsgraden som uppnåddes var 90 %, och den lägsta endast 20 %. Vid det sistnämnda försöket bildades ingen fällning i botten, utan det skedde snarare en flockulering av amorft kalcium och/eller magnesiumfosfat. Den sämre avskiljningen uppstod i ett fall där kalciumkoncentrationen var relativt hög (65 mg Ca^{2+} /L) och den molära $\text{Ca}^{2+}/\text{PO}_4\text{-P}$ -kvoten var 1,25. I de övriga fallen låg samma kvot mellan 0,27 och 0,62. I de fall där avskiljningen var hög analyserades produkten med röntgendiffraktion (*x-ray diffraction*, XRD) och man fann att den bestod av struvit med mycket hög renhetsgrad.

Miles & Ellis (2001) använde rejekt efter avvattning av rötad svingödsel för att fälla struvit. Initialt utfördes satsvisa försök i labbskala och därefter försök i pilotskala med en reaktorvolym av 84 L. För att reducera ammonium (som fanns i överskott) tillsattes både fosforgödselmedel som 50 % vattenlösning och kaliumfosfat (50 % lösning). Som magnesiumkälla användes både magnesiumhydroxid och magnesiumoxid. Initialt valdes magnesiumhydroxid och fosfatgödsel eftersom dessa var enkla att tillsätta och ekonomiskt fördelaktiga. Dessa visade sig dock ge upphov till igensättning i rör vilket ledde till att de byttes mot magnesiumoxid (1M) och kaliumfosfat K_2HPO_4 (1 M). Optimala betingelser för reduktion av ammoniumkväve uppnåddes vid $\text{NH}_4\text{:Mg:PO}_4$ molförhållande 1:1,25:1 och pH 9,5 då 99 % av de lösta ammoniumjonerna avlägsnades.

6.2 FLUIDISERADE BÄDDREAKTORER ELLER LUFTOMRÖRDA REAKTORER

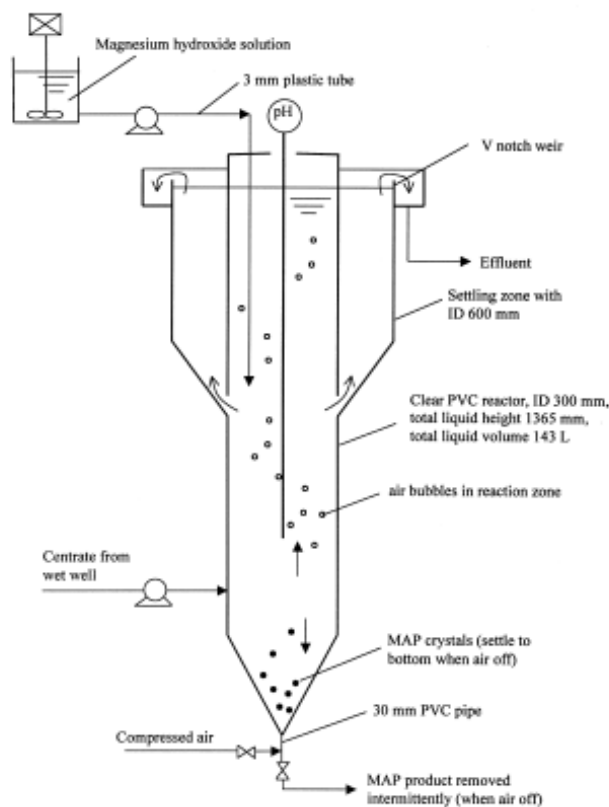
Battistoni m.fl. (2000) undersökte fällning av struvit och hydroxyapatit i rejektvatten från avvattnat rötat avloppsslam. Man använde en 0,42 m hög fluidiserad bäddreaktor för satsvis fällning (se *Figur 6*). Sand användes som groddmaterial i reaktorn och innan lösningen pumpades in i reaktorn genomgick den ett strippingsteg för att justera pH. Detta steg visade sig vara tillräckligt för att justera pH till intervallet 8,4-8,7. Genom att använda sand som groddmaterial behövde inte lösningen vara övermättad. Inom tidsintervallet 100-210 minuter hade mellan 61,7 och 89,6 % av all fosfor kristalliserat och/eller fällt. Fällningen bestod av en blandning av hydroxyapatit och struvit. Tack vare relativt höga kalciumhalter (180-456 mg/L) och magnesiumhalter (36-64 mg/L) i rejektvattnet, samt inga krav på att enbart struvit skulle fällas krävdes ingen tillsats av magnesium. Eftersom stripping var tillräckligt för att höja pH till den önskade nivån krävdes inte heller kemikalietillsats för pH-justeringen.



Figur 6. Laborarieuppsättning med fluidiserad bäddreaktor.

Källa: Battistoni m.fl.(2000).

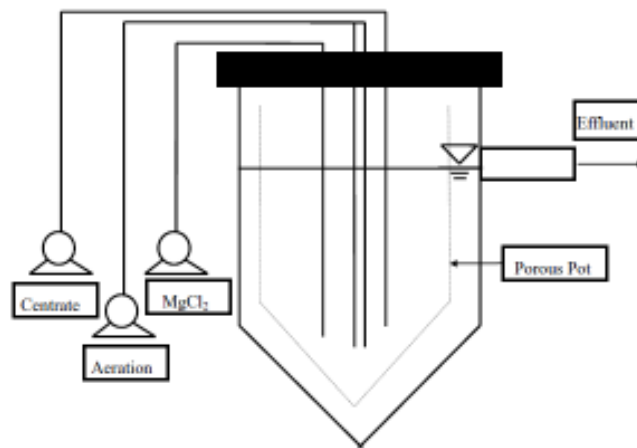
von Münch & Barr (2001) utvärderade struvitfällning i pilotskala baserad på den japanska fullskaleprocessen Phosnix (*Figur 7*, se även *Kapitel 7.2 Phosnix*). Försöken utfördes med rejekt från centrifugerat avloppsslam i en 143 L stor luftomrörd reaktor. Reaktorn var indelad i två zoner, en reaktionszon och en sedimentationszon. Reaktorns totala höjd var 1365 mm. Magnesiumhydroxid användes både som magnesiumkälla och för att höja pH till 8,5-9. Molförhållandet Mg:P var ca 1,3:1. Krossad struvit ($d=1$ mm) användes som groddmaterial för att förbättra kristallisationsprocessen. Luft tillfördes i botten av reaktorn för att skapa omrörning. Kristallerna hölls kvar i reaktorn tills de vuxit tillräckligt för att sedimentera. De avlägsnades från botten ca var 5:e dag och avvattnades genom filtrering eller torkade i rumstemperatur. I försöken producerades 320 g torkad struvit per dag vilket var något lägre än det teoretiskt möjliga. En del finkristallin struvit medföljde flödet ut ur reaktorn. Fällningen analyserades med röntgendiffraktion och bestod till 90 % av struvit. Uppehållstiden utvärderades och 1-2 timmar ansågs tillräcklig. 94 % av fosfor kunde avskiljas.



*Figur 7. Pilotskaleppställning baserad på Phosnix-processen.
Källa: von Münch & Barr (2001).*

Jaffer m.fl. (2002) utförde fällningsförsök med rejekt från centrifugerat avloppsslam. Försöken utfördes kontinuerligt i en luftad reaktor med uppehållstiden (HRT) 3 h (Jaffer m.fl., 2002) (se *Figur 8*). pH höjdes till 9,0 genom tillsats av natriumhydroxid. Initialt tillsattes ingen extra magnesiumkälla, men då fann man att kalcium reagerade i större grad än magnesium. För att maximera produktionen av struvit fick magnesiumklorid tillsättas. Vid en Mg:P-kvot av 1,05:1 eller högre avlägsnades 95 % av fosfor ur lösningen. Rejektet hade hög buffringskapacitet vilket medförde att kostnaden för natriumhydroxid som krävdes för pH-ökningen stod för 97 % av den totala kemikaliekostnaden vid försöken. Renhetsgraden i produkten undersöktes med XRD och man fann att produkten bestod av ren struvit.

Britton m.fl. (2009) undersöker inverkan av övermättnadsgraden i en fluidiserad bäddreaktor i pilotskala. Processen är utvecklad vid University of British Columbia i Kanada och senare av Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc. (se även fullskaleprocessen i *Kapitel 7.1 Ostara*). Försöken utfördes med rejekt från centrifugerat avloppsslam. Vid pilotskaleförsöken hölls pH inom intervallet 6,9-8,0, det vill säga lägre än vad som är brukligt vid struvitfällning. Graden av övermättnad (Ω) varierades mellan 2,2 och 5. Vid studien visades att struvit kunde bildas även vid dessa pH-värden förutsatt att övermättnadsgraden optimerades. Genom att hålla pH lågt kunde kostnaden för natriumhydroxid för pH-justering minimeras. I genomsnitt kunde 80 % av fosfor och 42 % av kvävet avlägsnas vid försöken.



Figur 8. Schematisk skiss av uppställning i pilotskala från en studie av Jaffer m.fl.(2002).

6.3 SAMMANFATTNING AV PILOTSKALEFÖRSÖK

Studierna bekräftar fynden från laboratorieskalestudierna att själva fällningsreaktionen är snabb medan kristalltillväxten tar längre tid. I fluidiserade bäddar och luftade reaktorer sker avskiljningen av struvit oftast genom sedimentation. Luftningshastigheten är en mycket viktig designparameter som måste optimeras noggrant för att skapa lagom grad av övermättnad och således gynnsamma förhållanden för kristalltillväxt, istället för en alltför snabb kristallisation som kan medföra att många små kristaller medföljer utflödet.

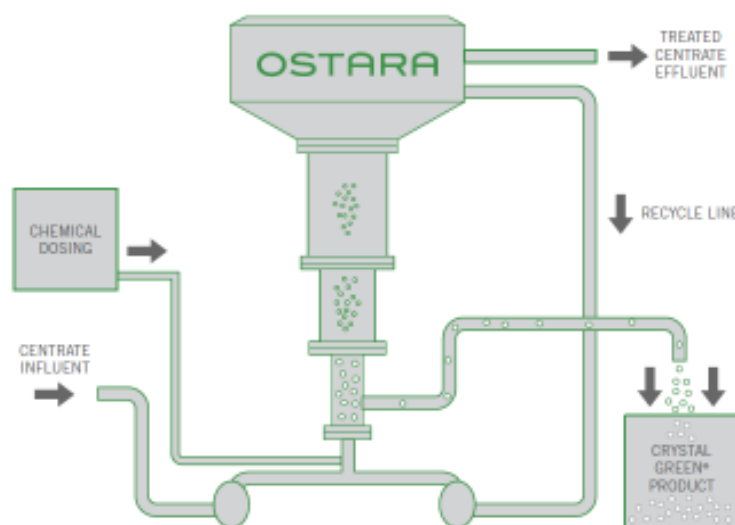
Några författare uppmärksammar problemen med små kristaller som kan skapa igensättning både på delar av reaktorn och vid utflödet. Avskiljningsgraden av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ är ofta hög i pilotskalestudierna. pH har justerats till intervallet 8,5-9,5. Flera studier bekräftar att fällningsprodukten består av struvit, medan det i andra fälls blandningar. I några av pilotskalestudierna påvisas problem med amorfa fällningar.

7. FULLSKALEPROCESSER

De fullskaleprocesser som beskrivs i detta kapitel har hittats både genom sökning av vetenskaplig litteratur och genom sökning på internet. Till följd av detta är informationen som ligger till grund för beskrivningarna i detta kapitel mycket varierade. Vissa processer är väldokumenterade i vetenskaplig litteratur medan det för andra främst finns försäljningsinriktade hemsidor att tillgå.

7.1 OSTARA

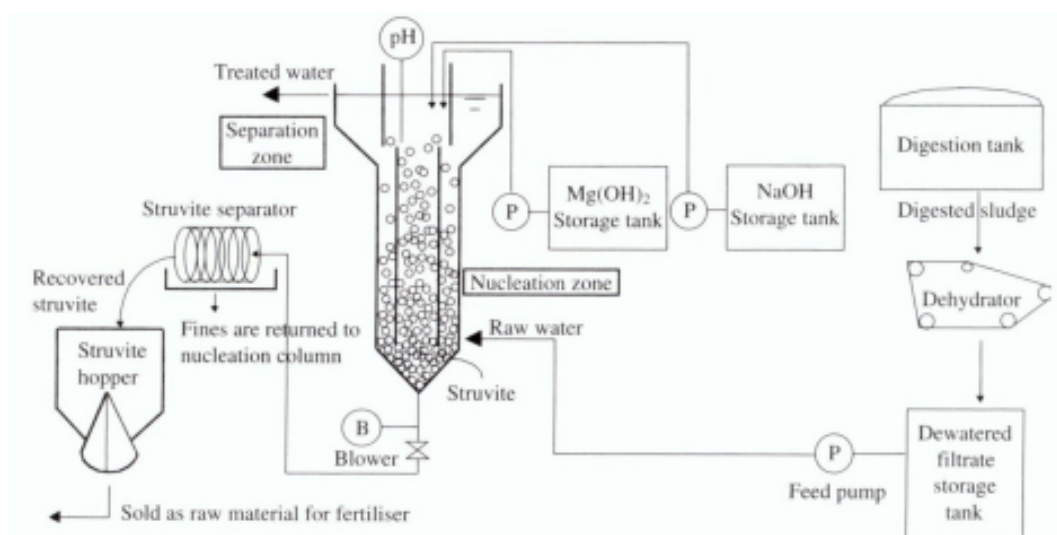
Det kanadensiska företaget Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc. har i samarbete med University of British Columbia utvecklat en patenterad teknik (PEARL™) för struvitfällning. Fällningen sker i en fluidiserad bäddreaktor som består av flera reaktionszoner med ökande diameter (Britton m.fl., 2009), se *Figur 9*. Reaktordesignen möjliggör att stora struvitkorn stannar i den nedre delen av reaktorn samtidigt som små partiklar inte följer med rejektet ut från reaktorn. Upp till 8 mm stora struvitkorn bildas (Britton m.fl., 2009). Designen medför att struvitprodukten har en jämn kornstorleksfördelning och kan utvinnas ur den nedersta zonen. Den struvitbaserade gödselprodukten Crystal Green® kan avskiljas utan ytterligare behandling. Anläggningen kopplas till ett avloppsreningsverk, vanligtvis efter att det rötade Bio-P slammet har avvattnats med centrifug. Det finns idag två fullskaleanläggningar i drift. Den första fullskaleanläggningen byggdes 2007 som en demonstrationsanläggning i Edmonton, Kanada. Den första kommersiella fullskaleanläggningen sattes i drift våren 2009 i närheten av Portland, Oregon i USA och ytterligare en förväntas tas i drift i Pennsylvania, USA, under våren 2010 (Ostara, Nutrient Technologies Inc, 2010). Reaktorns dimensioner varierar beroende på VA-verkets storlek. På anläggningen i Edmonton avlägsnas ca 80 % av fosfor och 15 % av ammoniumkvävet ur ett flöde av ca 500 000 L/dygn samtidigt som ca 500 kg Crystal Green® produceras (Ostara, Nutrient Technologies Inc, 2010).



*Figur 9. Översiktlig processbild av Ostaras struvitfällningsprocess.
Källa: Britton m.fl.(2009).*

7.2 PHOSNIX

I Japan har företaget Unitika Ltd. (Unitika, 2009) utvecklat fullskaleanläggningar för struvitfällning på VA-verk. 2004 fanns två anläggningar i drift, information om hur utvecklingen har varit sedan dess har inte kunnat hittas till denna rapport. Den första anläggningen är från 1997 och den andra från 1998, tillbyggd 2001 (Ueno, 2004). Den senast byggda anläggningen finns i Lake Shinji East Clean Centre (SECC), se *Figur 10*. Anläggningen består av tre fluidiserade bäddreaktorer med en kapacitet av 500, 500 respektive 150 m³/dygn, det vill säga totalt 1150 m³ rejekt från mekanisk avvattning av rötat avloppsslam per dygn. De större reaktorerna har en total höjd på 9000 mm, och diametern i kärnbildnings- och separationszonen är 1430 mm respektive 3600 mm. Den mindre reaktor är 5500 mm hög och kärnbildningszonens diameter är 960 mm, medan separationszonens diameter är 2600 mm. Rejektet matas kontinuerligt in i botten av reaktorerna. Magnesiumhydroxid tillsätts med ett Mg:P-förhållande på 1:1 och pH justeras till intervallet 8,2-8,8 med natriumhydroxid (Ueno, 2004). Kristalltillväxten sker i den fluidiserade bädden, som tillförs luft från botten. Struvitpartiklar avlägsnas från botten av reaktor ca var tionde dag. Större partiklar avskiljs från de mindre som återcirkuleras till reaktorn för att tjäna som groddar för fortsatt kristallisation. Struvitprodukten lagras och avvattnas till 10 % vatteninnehåll innan den säljs till gödselproducent (Ueno, 2004) under namnet Green MAP II (von Münch & Barr, 2001). Produkten innehåller magnesium, kväve och fosfor jämförbara med det teoretiska värdet för struvit och försumbara mängder tungmetaller (0,000006 % Cd, 0,000048 % As samt icke detekterbara mängder Pb, Hg, Ni och Cr) (Ueno, 2004). Gödselmedelsproducenten säljer inte struviten direkt som gödselmedel utan justerar förhållandet mellan kväve, kalium och fosfor.



*Figur 10. Schematisk bild av fullskaleanläggningen i SECC, Japan.
Källa: Ueno (2004).*

Tabell 6 redovisar några processparametrar för anläggningen i SECC. Fosforkoncentrationen i inflödet till reaktorn varierar mellan 89 och 149 mg/L PO₄-P, och NH₄-N-koncentrationen mellan 194 och 329 mg/L (Ueno, 2004). Avskiljningsgraden av fosfor är mycket god, ca 90 %, och avskiljningsgraden av ammonium-

kväve är ca 20 %. Detta är något högre än det teoretiska värdet om all fosfor fälls som struvit och indikerar att en del kväve avgår som ammoniak i processen.

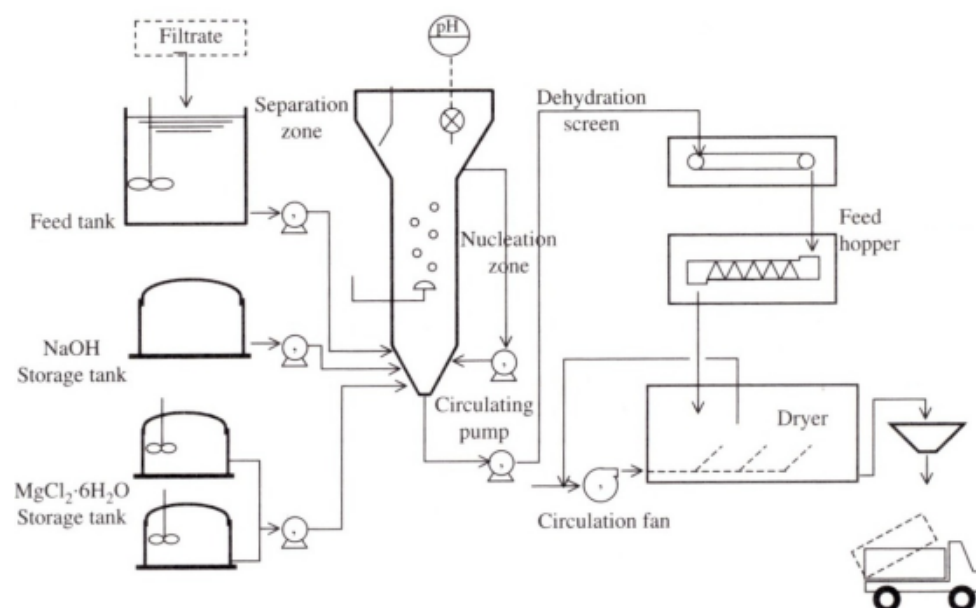
Tabell 6. Processparametrar vid struvitfällningsanläggningen SECC i Japan.

Källa: Ueno (2004).

pH intervall [-]	PO ₄ -P i inflödet [mg/L]	NH ₄ -N i inflödet [mg/L]	Avskiljningsgrad P [%]	Avskiljningsgrad N [%]
8,2-8,8	89-149	194-329	90	20

Ytterligare en fullskaleanläggning finns i drift i Japan, Fukuoka City West Waste Water Treatment Center (Ueno, 2004), se *Figur 11*.

Anläggningen liknar den tidigare beskrivna och består av sex stycken fluidiserade bäddreaktorer, med en kapacitet av vardera 170 m³ reakt per dygn (totalt 1020 m³/dygn). Kärnbildningszonen i reaktorerna är 200 mm hög, diametern i separationszonen 600 mm och den totala höjden är 7000 mm. Vid denna process används magnesiumklorid som magnesiumkälla och pH justeras med natriumhydroxid.



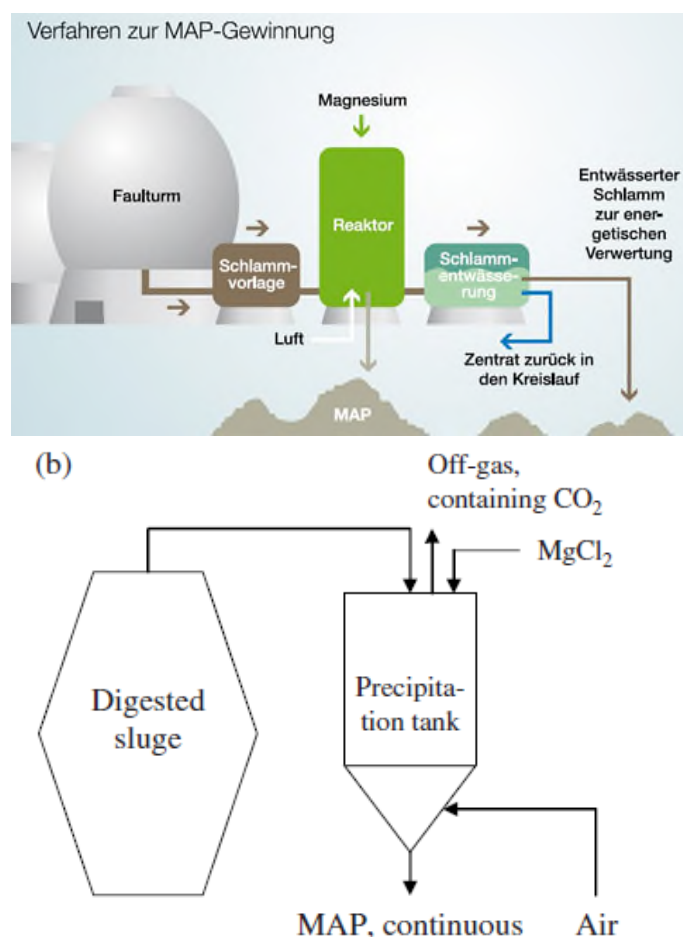
Figur 11. Schematisk bild av fullskaleanläggningen i Fukuoka City, Japan.

Källa: Ueno (2004).

7.3 BERLIENER WASSERBETRIEBE

På VA-verket Berliener Wasserbetriebe har man utvecklat och patenterat en process för fällning av struvit som till skillnad från de flesta andra tekniker fäller struviten i slam direkt efter rötkammaren (Wasserbetriebe, 2010). Detta gjordes främst för att förhindra icke önskvärd struvitfällning på VA-anläggningen, men har resulterat i att man idag säljer den producerade struviten som gödselmedel. Den dagliga produktionen gödselmedel ligger på mellan 3-4 ton (Wasserbetriebe, 2010).

Processen, som även beskrivs i labbskala i *Kapitel 5.3 Försök där pH justeras genom stripping av CO₂*, går ut på att rötslammet förs direkt från röt-kammaren, via ett slamlager till fällningsreaktorn (Stumpf m.fl., 2009), se *Figur 12*. Reaktorn tillförs luft från botten vilket medför att koldioxid strippas. Magnesiumklorid används som magnesiumkälla. Struvitprodukten avlägsnas från botten av reaktorn och slammet, som nu innehåller struvitkristaller, förs över till en tvättanläggning (Wasserbetriebe, 2010). För att tvättprocessen skall fungera är det viktigt att kristallstorleken kan optimeras. Tvättningen förenklas av större kristaller (Stumpf m.fl., 2009).

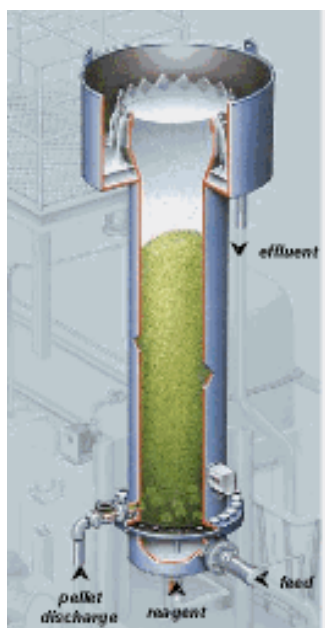


Figur 12. Två bilder som illustrerar struvitfällningsprocessen på Berliener Wasserbetriebe. Den översta bilden visar hur processen integreras på reningsverket (Källa: Wasserbetriebe (2010)), medan den nedre visar den konformerade reaktorn som luftas från botten (Källa: Stumpf m.fl.(2009)).

7.4 CRYSTALACTOR®

Crystalactor® är en teknik utvecklad av DHV Water BV, Amersfoort i Nederländerna med syfte att avlägsna metaller och anjoner från förorenat vatten genom att fälla dessa och producera pellets (DHV, 2008). Tekniken har utvärderats i fullskala för bland annat återvinning av fosfat från avloppsvatten på VA-verk samt återvinning av fosfat och ammonium från processvatten i livsmedelsindustrin (Giesen & van der Molen, 1996). Fosfat kan fällas som kalciumfosfat, magnesiumfosfat, struvit eller kaliummagnesiumfosfat (Giesen, 2009). Genom att tillföra kalcium

eller magnesiumsalt till lösningen (i form av exempelvis kalk, kalciumklorid eller magnesiumklorid) så att lösligheten för respektive fällning överskrider kan fosfor fällas eller kristallisera i önskad form. Kristallisationen sker i en cylindrisk reaktor som är delvis fylld med groddmaterial, exempelvis sand eller mineral, se *Figur 13*. Avloppsvattnet pumpas in genom botten med en sådan hastighet att sand/mineralbädden hålls fluidiserad. pH kan också justeras i de fall detta krävs (Giesen, 2009). Processen har utvärderats i fullskala vid några anläggningar i Nederländerna, varav någon är i gång idag och andra har lagts ner på grund av dålig lönsamhet.



Figur 13. Bild av Crystalactor-anläggningen.

Källa: Giesen & van der Molen (1996).

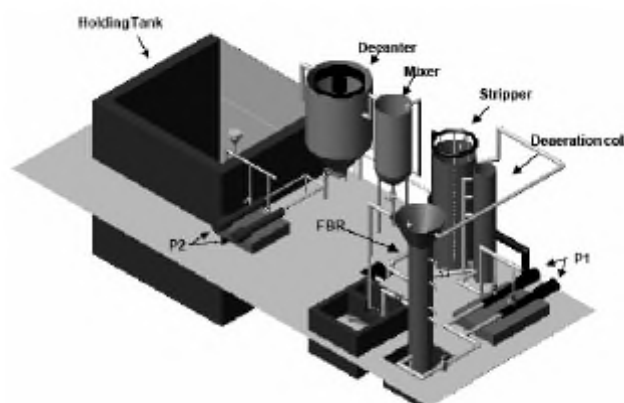
7.5 TREVISO, ITALIEN

På ett VA-verk av storleken 50 000 PE (personequivallenter) i Treviso, Italien, har man utvärderat fällning av näringsämnen som fosforinnehållande mineral i stor skala (Battistoni, 2004). Fällning har utförts i fluidiserad bäddreaktor med sand som groddmaterial. Processen bestod av tre delar; förbehandling, stripping och en fluidiserad bäddreaktor. Förbehandlingen fyllde två funktioner, dels avlägsnades fina partiklar och dels användes förbehandling för att utjämna variationer i det ingående flödet. I strippingsteget höjdes pH genom att löst koldioxid avlägsnades och i den fluidiserade bäddreaktorn fälldes fosfor på sandkornen. I *Tabell 7* finns en översikt av processparametrar och *Figur 14* visar en översikt av processen.

Tabell 7. Sammanställning av processparametrar över en längre försöksperiod på fullskaleanläggningen i Treviso, baserad på tabell i Battistoni (2004).

	Medelvärde	Standardavvikelse
P i inflödet [mg/L PO₄-P]	110	66
Flödet in [m³/h]	1,3	0,5
pH [-]	8,5	0,2
P i utflödet [mg/L PO₄-P]	48	31
Avskiljningsgrad P [%]	61	14

Analysen av fällningen visar att den bestod till 13 % av struvit och till 65 % av kalciumfosfat (bl.a. hydroxyapatit). Eftersom man varken justerar pH eller magnesiuminnehållet kan man hålla nere processkostnaden på bekostnad av att man inte optimerar bildandet av just struvit.



*Figur 14. En tredimensionell bild av processen i Treviso, Italien.
Källa: Battistoni (2004).*

7.6 NURESYS®

NuReSys® är en teknik för struvitfällning utvecklad i Belgien. Det finns två fullskaleanläggningar i drift. Den första fullskaleanläggningen uppfördes inom mjölkindustrin 2005 och den senast byggda anläggningen är från 2008 och finns på en potatisindustri (se *Figur 15*) (NuReSys, 2010). NuReSys® består av en stripper för att driva av koldioxid och höja pH, en kristallisationsreaktor med omrörning samt en sedimentationszon. pH justeras, förutom genom stripping, även genom tillsats av natriumhydroxid. Magnesiumklorid används som magnesiumkälla. Baserat på de pilotskaleexperiment som finns beskrivna i *Kapitel 6.1 Omrörda reaktorer* samt *Figur 5* har man utfört fullskaleförsök på anläggningen som finns på mjölkindustrin (Moerman m.fl., 2009). Den anläggningen har en 200 m³ stripper och en 125 m³ stor omrörd kristallisationsreaktor, och har en genomsnittlig kapacitet av 100 m³/h och 3,25 h uppehållstid. Den andra anläggningens kapacitet är 60 m³/h och uppehållstiden är 2,23 h (Moerman m.fl., 2009). Den producerade struviten samlas i en sedimentationskammare och torkas. Enligt hemsidan består produkten av 100 % ren struvit och saluförs som gödselmedel under namnet BIO-STRU® (NuReSys, 2010). Processen har visat sig kunna reducera fosfatkoncentrationen med 78 % (Moerman m.fl., 2009).

Precis som vid pilotskaleförsöken (se *Kapitel 6.1 Omrörda reaktorer*) har man sett att processen fungerar väldigt olika beroende på kalciuminnehållet i processvattnet. I ett inledande försök fann man att 70-75 % av fosfaten avlägsnades, men att den bildade fällningen, som innehöll stora mängder kalcium, var amorf och flockulerade (Moerman m.fl., 2009).



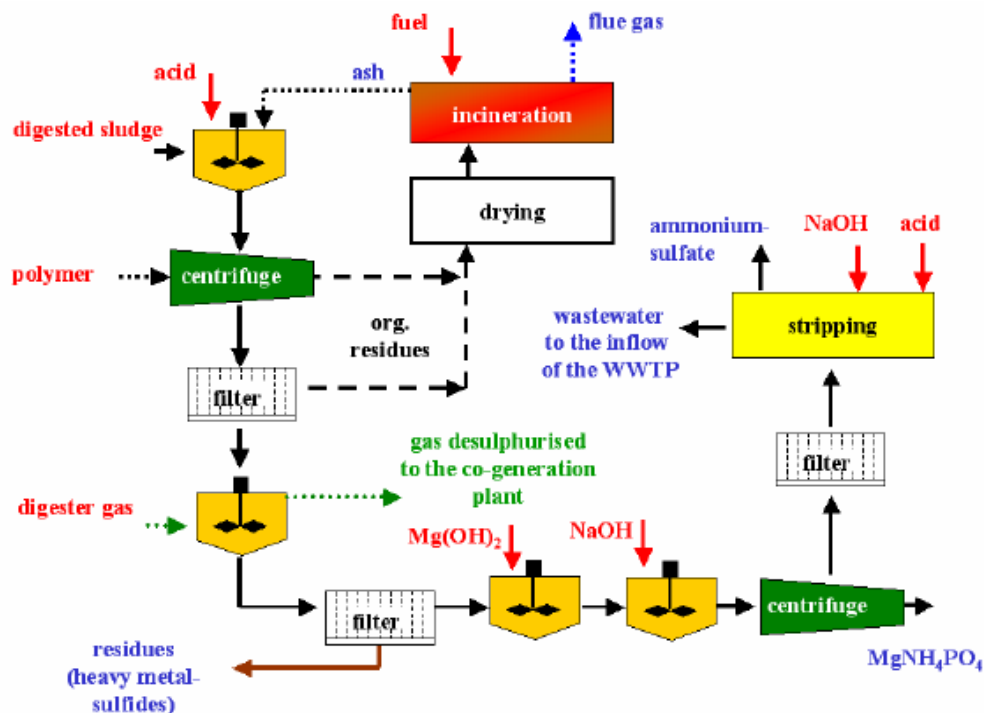
*Figur 15. En bild av NuReSys® anläggning på potatisindustri.
Källa: NuReSys (2010).*

7.7 SEABORNE

Det tyska företaget Seaborne-ERL har utvecklat en fullskaleprocess för återvinning av näringsämnen delvis baserad på struvitfällning (Seaborne Umwelttechnik, 2009). En fullskaleanläggning har varit i drift på avloppsverket i Gifhorn, Tyskland, sedan 2005. Anläggningen används i forskningssyfte av Tekniska Universitetet i Braunschweig och Universitetet i Hannover (Günther m.fl., 2008).

Seaborneprocessen består av några olika delar, se *Figur 16*. Inledningsvis centrifugeras rötslammet. I den första delen, RoHM (**R**emoval **o**f **H**eavy **M**etals), surgörs centrifugatet varpå den rötade biogasen, som har ett högt innehåll av vätesulfat på grund av en hög andel fett i rötammaren, leds genom centrifugatet för att fälla tungmetaller (Günther m.fl., 2008). Biogasen blir avsvavlad och tungmetallfällningarna kan separeras från centrifugatet genom filtrering. Lösningen som går vidare genom processen är således fri från tungmetaller.

I nästa steg, NRS1 (**N**utrient **R**emoval **S**ystem), utvinns kväve och fosfor. Fosfor utvinns genom struvitfällning efter tillsats av magnesiumoxid och pH-justering med natriumhydroxid. Struviten separeras genom filtrering och lösningen fortsätter till ett strippingsteg (NRS2) där ammoniumkvävet utvinns som diammoniumsulfat (Günther m.fl., 2008). Under en utvärderingsperiod 2008 kunde 50 % av fosfor från rötslammet återvinnas och struvitprodukten innehöll endast mycket låga tungmetallhalter (Phan m.fl., 2009). Bedömningen är dock att om processen optimeras kan 95 % av fosfor och 85 % av ammoniumkvävet avlägsnas (Phan m.fl., 2009).



*Figur 16. En schematisk figur över de olika delarna av Seaborneprocessen.
Källa: Günther m.fl.(2008).*

7.8 SAMMANFATTNING AV FULLSKALESTUDIER

Sammanställningen av fullskaletekniker visar att det finns och har funnits flera anläggningar för struvitfällning igång runt om i världen. I Europa finns anläggningarna i Tyskland, Belgien, Nederländerna och Italien. Utanför Europa finns anläggningar i Kanada, USA och Japan. Beskrivningarna visar på god avskiljningsgrad och välfungerande processer, men informationen om exakt vilka anläggningar som är igång i dagsläget och hur de fungerar är bitvis bristfällig.

8. EKONOMI VID STRUVITFÄLLNING

Struvitfällning kräver en del kemikalier vilket medför att kostnaden för processen i många beräkningar har överskuggat nyttan av tekniken (t.ex. Heldt, 2005). I de flesta fall utpekas kostnaden för magnesiumkällan som den dominerande. Det finns dock undantag, Jaffer m.fl. (2002) visar att kostnaden för pH-höjning genom tillsats av natriumhydroxid stod för 97 % av kemikaliekostnaden för struvitfällning på det VA-verk där studien genomfördes. Troligtvis kan kostnaden för pH-justeringen variera kraftigt från fall till fall beroende på buffringskapaciteten hos den lösning där struvit ska fällas.

Ett vanligt sätt att minska kemikalieåtgången är att öka pH genom att strippa koldioxiden. Detta görs både som ensam åtgärd och tillsammans med tillsatt natriumhydroxid. Fattah m.fl. (2008) visar att åtgången av natriumhydroxid kunde reduceras med ca 30 % genom CO₂-stripping. Författarna påpekar att det samtidigt kommer att avgå en del ammoniumjoner. Hur stor förlusten av kväve som ammoniak är finns varken dokumenterat av Fattah m.fl. (2008) eller i övrig litteratur som studerats i denna sammanställning. Om detta beror på att den ekonomiska förlusten är liten eller på att fokus i de allra flesta studier är på att reducera fosfat som nästan alltid finns i överskott, är svårt att säga.

Ett annat sätt att minska kostnaden för struvitfällning är att finna alternativa magnesiumkällor som kan ersätta den dyra magnesiumkloriden. Flera olika försök har utförts, en del finns beskrivna i *Kapitel 5.4 Försök med alternativa magnesiumkällor*. Exempelvis kan användning av magnesiumhydroxid och magnesiumoxid, som även höjer pH, minska den totala kemikaliekostnaden. Dessa magnesiumkällor är dock mer svårslösliga vilket medför att uppehållstiden kan behöva förlängas. Vid design av fullskaleprocesser är uppehållstiden en viktig faktor. Ju högre uppehållstid, desto större anläggning krävs vilket i sin tur påverkar den totala investeringskostnaden (von Münch & Barr, 2001).

Ekonomi för en struvitfällningsanläggning beror förstås också på vilken avsättning man finner för den slutliga produkten. Det är svårt att hitta aktuella siffror för detta i litteraturen. I en studie från 2001 skriver von Münch & Barr (2001) att intäkten borde ligga kring 300 USD per ton, vilket motsvarar ca 2200 SEK (valutakurs januari 2010).

Se vidare *Kapitel 13. Fällningarnas värde som gödselmedel* för diskussion kring hur värdet av struvit som gödselmedel bedöms.

DEL 2. LABORATIV STUDIE

9. DESIGN AV DEN LABORATIVA STUDIEN

Valet av försöksbetingelser och designen av den laborativa studien baserades på de satsvisa laboratorieskaleförsök som studerats i kunskapssammanställningen, den första delen av denna rapport. I detta kapitel kopplas valet av försöksbetingelser till teorin.

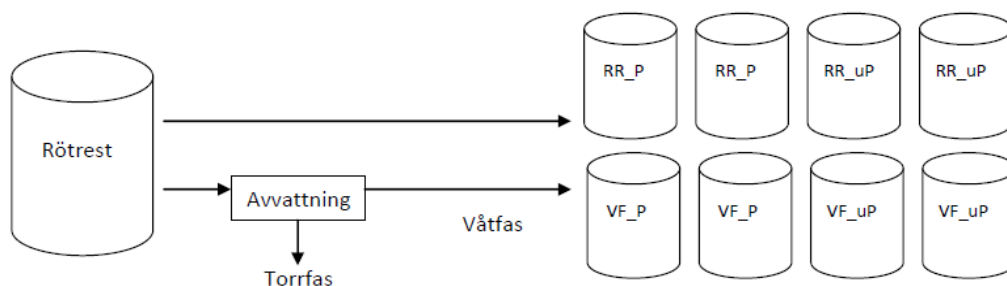
I litteraturen har satsvisa försök i laboratorieskala i huvudsak genomförts i omrörda eller luftade reaktorer. Eftersom flera olika rötrest, behandlade på flera olika sätt, skulle utvärderas i denna studie valdes en enkel försöksuppställning. Försöken utfördes i 1 L glasbägare som omrördes med magnetomrörare (magnetloppa). Samtliga försök utfördes i duplikat. Mellan leverans och försök samt efter avslutat försök förvarades rötresterna vid $<4^{\circ}\text{C}$ för att begränsa nedbrytning.

Som magnesiumkälla valdes MgCl_2 framför $\text{Mg}(\text{OH})_2$ och MgO . MgCl_2 är vanligast förekommande i litteraturen (se *Kapitel 4.2.6 Val av magnesiumkälla*). Den är den mest lösliga och också den som gett bäst utbyten. Flera av studierna beskrivna i *Tabell 4*, av bland annat Stratful m.fl. (2001) och Uludag-Demirer m.fl. (2005), visar att struvitutbytet gynnas av ett överskott av magnesium. Därför doserades MgCl_2 med 30 % överskott i denna studie.

Eftersom molförhållandet i struvit är 1:1 mellan $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ och eftersom $\text{NH}_4\text{-N}$ finns i överskott i de allra flesta lösningar som kan vara aktuella för struvitfällning kan man tillsätta extra fosfor för att öka struvitutbytet och reduktionsgraden av $\text{NH}_4\text{-N}$. I denna studie tillsattes fosfor vid hälften av försöken. Som fosforkälla valdes $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, som är ett salt av fosforsyra. $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ är en av flera olika fosfatkällor som förekommer i litteraturen, se *Tabell 3*.

I litteraturen har de flesta försök utförts med rejekt från industriell avvattnings genom centrifugering (se *Tabell 4*). En del rötrest har dock filtrerats (bl.a. Uludag-Demirer, 2005). En intressant teknik beskriven i litteraturen utgår från icke avvattnat rötslam (Stumpf m.fl., 2009). Vid designen av denna studie bestämdes därför att hälften av försöken skulle utföras med obehandlad rötrest och hälften med våtfasen efter avvattnings. Som avvattningssteknik valdes filtrering.

Totalt utfördes 32 satsvisa försök, 8 st per rötrest, varav 4 utfördes på obehandlad rötrest och 4 på våtfasen efter avvattnings av rötresten, enligt *Figur 17*. Senare tillkom ytterligare tre satsvisa försök. Vid varje försök tillsattes först den eventuella fosforkällan och därefter doserades magnesiumklorid. Först när dessa hade löst sig höjdes pH. Ordningen var viktig eftersom sannolikheten för att just struvit ska fällas framför andra fosforinnehållande föreningar ökar om magnesium finns närvarande vid pH-höjningen (se *Kapitel 5.2 Försök med huvudsyfte att avlägsna kväve*). pH-intervallet för struvitfällning ligger mellan 7 och 11 (von Münch & Barr, 2001), medan optimala pH i de flesta laborieförsök ligger kring 8,5-9,0 (se *Tabell 4*).



Figur 17. Bild över de satsvisa försök som utfördes på varje rötrest. I figuren står RR för obehandlad rötrest, och VF för våtfas efter avvattning. Beteckningarna P respektive uP visar om försöken utfördes med fosfortillsats (P) eller utan fosfortillsats (uP).

De flesta tidigare försök vittnar om att fällningen av struvit sker väldigt snabbt, däremot krävs längre tid för att kristallerna ska växa (se *Tabell 4* samt *Kapitel 4.2.4 Reaktionsid*). Kristalltillväxten är också känslig för störningar i form av närvaro av små partiklar (se *Kapitel 4.1.2 Fällningsreaktionens faser och kristalltillväxt*). Inom ramen av denna laborativa studie optimerades inte kristalltillväxten och därför ansågs en reaktionstid på 60 minuter, under vilken rötresten rördes om, följt av ytterligare 60 minuters sedimentationstid vara tillräcklig.

Efter försöken filtrerades fällningarna och torkades. Kvarvarande fosfor och kväve i lösningen analyserades för att bestämma hur effektiv avskiljningen hade varit. Även sammansättningen av den torkade produkten analyserades.

Inför försöken med rötresterna verifierades valda försöksbetingelser med syntetiska lösningar (vatten + salter), se *10.4.1 Verifiering av försöksbetingelser genom satsvisa försök med syntetiska lösningar*.

10. MATERIAL OCH METODER

I detta stycke presenteras inledningsvis de rötresterna som användes i den laborativa studien av detta projekt samt hur dessa behandlades inför och under de laborativa försöken. Följande stycken behandlar de laborativa utföranden för de olika delmomenten; avvattning, inledande karakterisering, satsvisa försök samt stripping.

Se *Appendix 2. Laboratorieutrustning* för komplett lista av den lab-utrustning som användes i försöken.

10.1 MATERIAL

I *Tabell 8* visas vilka anläggningar de fyra rötresterna som använts i försöken kommer ifrån, vilka substrat de är baserade på, vilken typ av rötningsprocess de har genomgått samt vilken uppehållstid de har haft i röt-kammaren.

De fyra rötresterna benämns fortsättningsvis i denna rapport som *RR hushåll/beta/gödsel/drunk*.

Tabell 8. Data för de fyra rötresterna.

Rötrest	Anläggning	Substrat	Process	Upphållstid
RR hushåll	NSR, Helsingborg	31 % hushållsavfall, 28 % avfall från livsmedelsindustrin, 21 % potatisskal + övriga rotfrukter, 12 % slakteriavfall, 8 % gödsel	Mesofil	30 dygn + 5 dygn i efterrötningstank
RR beta	E.ON, Knisslinge*	Ingen uppgift	Mesofil	Ingen uppgift
RR gödsel	E.ON, Falkenberg	84 % svin-/nöttgödsel, 8 % slakteriavfall, 4 % foderrester, 1 % hushållsavfall	Mesofil	27 dygn + 2-3 dygn i efterrötningstank
RR drunk	Swedish Biogas International, Norrköping	90 % drunksirap, 10 % kvarnat spannmål	Mesofil	40-50 dygn

*pilotskalanläggning

Rötresterna provtogs den 2-9 februari 2010 och levererades med bil (RR hushåll, RR beta, RR gödsel) respektive post (RR drunk). Provtagningen skedde enligt instruktion (se *Appendix 3. Provtagningsinstruktion*). Samtliga rötresterna förvarades i kylskåp vid ca 3°C från att de anlände till labbet.

10.2 AVVATTNING

Avvattning av samtliga rötresten utfördes i tre steg. Totalt behövdes ca 4 L avvattnad rötrest av varje substrat. Först filtrerades rötresten genom ett grovt metallfilter (~1,5-2 mm i diameter), sedan ett grovt polyamidfilter (~0,5 mm i diameter) och slutligen ett fint polyamidfilter (~0,1-0,2 mm i diameter).

En liten mängd (ca 50 mL) av rötresten från beta respektive drank filtrerades dessutom, efter de tre inledande filtreringsstegen, genom en büchnertratt (145 mm i diameter) kopplad till vakuum, med Munktellfilter (med porstorleken 12-15 µm för betan och >20 µm för dranken). Större mängder var tidsmässigt orimligt att filtrera genom Munktellfilter på grund av igensättning, och våtfaserna från hushållsavfall och gödsel efter de tre inledande filtreringsstegen gick inte igenom alls.

De mängder våtfas från beta och drank som filtrerades genom büchnertratt var alldeles för små för att kunna utföra de satsvisa försöken på. Dessa våtfaser skickades därför enbart till analys för att jämföra avvattningen i tre filtreringssteg med filtrering genom büchnertratt.

Då avvattningen med filtrering i tre steg inte tycktes ge någon större skillnad mellan våtfasen och den obehandlade rötresten för dranken (se *Kapitel 11.1.1 Avvattning genom filtrering och visuell karakterisering*) centrifugerades våtfasen i 20 minuter på 10 000 rpm. Det är denna våtfas som sedan användes vid de satsvisa försöken med drank.

De avvattnade rötresterna kommer fortsättningsvis i denna rapport att benämnas som *VF hushåll/beta/gödsel/drank* (OBS! VF drank refererar till den centrifugerade dranken. I de fall där våtfasen från trestegsfiltreringen av RR drank avses benämns detta med *VF drank ej centr.*). De två våtfaserna från beta och drank som även filtrerades genom büchnertratt benämns *VF beta büchner* respektive *VF drank büchner*.

10.3 INLEDANDE KARAKTERISERING

Den inledande karakteriseringen bestod dels av en visuell bedömning av rötresterna och våtfaserna efter avvattning samt en bestämning av kemiska och fysikaliska parametrar. De kemiska analyserna av rötresten och våtfaser från avvattningen skickades till analys på Växtekologens laboratorium, Biologiska Institutionen vid Lunds Universitet. Torrsubstans-, densitets- och pH-bestämning utfördes av Ekobalans Fenix AB. *Tabell 9* visar vilka parametrar som analyserades samt vilka metoder som användes för analyserna.

Analyserna utfördes på samtliga rötresten och våtfaser inklusive de våtfaser av beta och drank som filtrerades genom büchnertratt (*VF beta büchner* och *VF drank büchner*).

Tabell 9. Tabellen visar vilka parametrar som analyserades för rötresterna och våtfaserna samt vilka metoder som användes.

	Parameter	Enhet	Metod
RR hushåll RR beta RR gödsel RR drank	Tot-N	mg/L	TOC/IC/TN-analysator
	Tot-P	mg/L	ICPMS/ICPAES
	Mg, Ca, K, Na	mg/L	ICPMS/ICPAES
	Cd, As, Pb, Cr, Co, Zn, Ni, Cu, Hg, Fe	mg/L	ICPMS/ICPAES
	TOC	mg/L	TOC/IC/TN-analysator
	Alkalinitet	mmol HCO ₃ ⁻ /L	TOC/IC/TN-analysator
	Suspenderade partiklar	mg/L	SS-EN 12880
	Torrsubstans	%	SS-EN 12880
	pH	-	pH-meter
	Densitet	g/L	viktbestämning av en bestämd volym
VF hushåll VF beta VF beta büchner VF gödsel VF drank ej centr. VF drank büchner VF drank**	Tot-N	mg/L	TOC/IC/TN-analysator
	NH ₄ -N	mg/L	FIA*
	Tot-P	mg/L	ICPMS/ICPAES
	PO ₄ -P	mg/L	FIA*
	Mg, Ca, K, Na	mg/L	ICPMS/ICPAES
	Cd, As, Pb, Cr, Zn, Ni, Cu, Hg	mg/L	ICPMS/ICPAES
	TOC	mg/L	TOC/IC/TN-analysator
	Alkalinitet	mmol HCO ₃ ⁻ /L	TOC/IC/TN-analysator
	Suspenderade partiklar	mg/L	SS-EN 12880
	Torrsubstans	%	SS-EN 12880
	pH	-	pH-meter
	Densitet	g/L	viktbestämning av en bestämd volym

* Inför analyserna med FIA (Flow Injection Analysis) filtrerades proverna genom 0,45 µm filter.

** Analyserades endast med avseende på vissa av parametrarna.

10.4 SATSVISA FÖRSÖK

10.4.1 Verifiering av försöksbetingelser genom satsvisa försök med syntetiska lösningar

För att verifiera försöksbetingelserna inför de satsvisa försöken med rötresterna och våtfaserna samt för att bedöma inverkan av några olika parametrar bereddes två olika syntetlösningar baserade på analysvaren för NH₄-N och PO₄-P från VF beta respektive VF gödsel från den inledande karakteriseringen. Med dessa syntetlösningar utfördes satsvisa försök för att:

- undersöka om pH 8,5 var lämpligt
- undersöka om 60 minuters reaktionstid var tillräcklig
- undersöka om 60 minuters sedimentationstid var tillräcklig
- jämföra lutångång för fosfortillsatsen NaH₂PO₄•2H₂O respektive fosforsyra, H₃PO₄
- undersöka utbytet av struvit samt reduktionen av NH₄-N och PO₄-P
- undersöka hur kristallstorleken påverkades av längre uppehållstid.

Tabell 10 visar de koncentrationer av $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ som användes för att bereda syntetlösningarna. De syntetiska lösningarna bereddades genom att tillsätta NH_4Cl samt $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ till kranvatten. Kranvatten valdes framför avjonat vatten för att få en jonstyrka som mer liknar den hos rötresterna. Lösningarna omrördes med magnetloppa tills alla salter hade löst sig.

Tabell 10. Data för VF beta och VF gödsel som användes till de syntetiska lösningarna.

	$\text{NH}_4\text{-N}$ [mg/L]	$\text{PO}_4\text{-P}$ [mg/L]
Syntetlösning baserad på VF beta	157	28,1
Syntetlösning baserad på VF gödsel	523	107

Vid samtliga försök användes 0,75 L syntetlösning som hälldes i en 1 L glasbägare och sattes på omrörning på magnetomrörare (~400 rpm). pH mättes kontinuerligt. Försöken utfördes vid rumstemperatur. I de fall där allt ammoniumkväve önskades avlägsnas som struvit tillsattes fosforkälla (så att molförhållandet mellan fosfatjoner och ammoniumjoner i lösningen blev 1:1). När denna löst sig och pH stabiliserats mättes pH. Därefter tillsattes $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ med 30 % överskott. När Mg-saltet löst sig och pH stabiliserats mättes återigen pH. Därefter höjdes pH till 8,5 genom tillsats av 0,1 M NaOH. Under hela pH-höjningen var kärlet övertäckt med parafilm förutom ett litet hål för pH-elektroden och en pipett för tillsats av NaOH. När pH stabiliserats avlägsnades elektroden och hela bägaren täcktes med parafilm och hölls övertäckt under resten av försöket. Bägaren hölls omrörd under 60 minuter och fällningen fick därefter sedimentera under ytterligare 60 minuter. Lösningarna filtrerades slutligen genom en büchnertratt med Munktellfilter (porstorlek 2-3 μm) (se Figur 18) och den vita kristallina fällningen torkades i rumstemperatur.

Inledningsvis utfördes två försök med fosforsyra (H_3PO_4) som fosfortillsats (försök 1 och 2 i Tabell 11). Syftet var att grovt kvantifiera skillnaden i lutåtgång då man använder fosforsyra respektive natriumdivätefosfat ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (försök 3 och 5 i Tabell 11). Dessa båda fosforkällor har förekommit vid tidigare lab-/pilotstudier (se Kapitel 4.2.5 Rötrestens sammansättning). Natriumdivätefosfat, som är ett salt av fosforsyra, är ett ofarligt salt och därmed arbetsmiljömässigt enkelt att hantera, medan fosforsyra är en starkt frätande syra. Fosfat i båda formerna bör vara likvärdiga när det gäller struvitfällning, däremot kommer det att bli skillnader i pH efter fosfattillsats.



Figur 18. Filtrering genom büchnertratt.

För att undersöka utbytet av struvit samt reduktionen av $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ under valda försöksbetingelser utfördes fyra satsvisa försök (försök 3-6 i *Tabell 11*). Jämfört med de satsvisa försöken på rötrest och våtfas kan dessa försök ses som optimala betingelser för struvitfällning, då förekomsten av partiklar och interfererande jonslag eliminerats. Två försök utfördes på syntetlösningen som baserats på VF beta, och två på den syntetlösning som var baserad på VF gödsel. För varje syntetlösning utfördes ett försök med fosfortillsats ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) och ett utan. Se *Tabell 11* för översikt över försöken.

Tabell 11. Översikt över försöken med syntetiska lösningar.

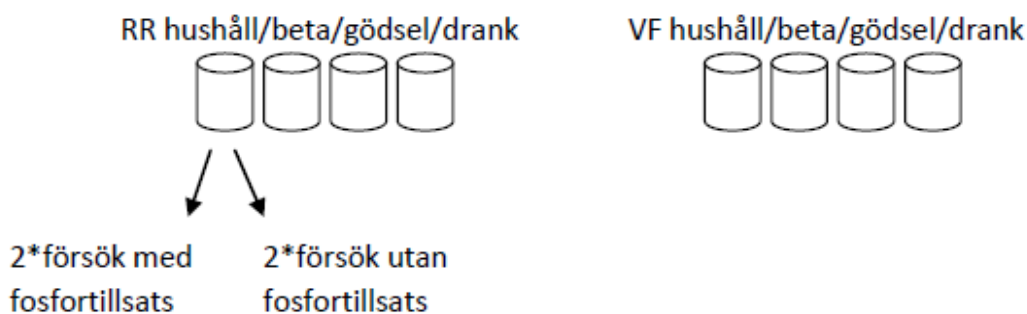
	Syntetlösning baserad på	$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - tillsats	H_3PO_4 -tillsats
Försök 1	VF beta	—	JA
Försök 2	VF gödsel	—	JA
Försök 3	VF beta	JA	—
Försök 4	VF beta	—	—
Försök 5	VF gödsel	JA	—
Försök 6	VF gödsel	—	—
Försök 7	VF gödsel	—	—

Efter avslutat försök filtrerades lösningarna genom büchnertratt med Munktell-filter (porstorlek 2-3 μm). Filtret vägdes före och efter filtreringen för att kunna bestämma utbytet av struvit för samtliga fyra försök. Vattenfasen provtogs och skickades till analys för koncentrationerna av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$, enligt *Kapitel 10.4.3 Analyser*.

Försök 7 utfördes på samma sätt som försök 6 med skillnaden att den övertäckta bägaren stod omrörd under 18 timmar för att undersöka om en längre reaktionstid påverkade kristallstorleken.

10.4.2 Rötrest och våtfaser

För varje avvattning och icke avvattning rötrest utfördes 4 satsvisa försök; med respektive utan fosfortillsats samt dubbelprov på dessa. Detta innebär totalt 32 satsvisa försök. Se *Figur 19*. Försöken kompletterades senare med ytterligare tre satsvisa försök, vilket beskrivs i *Kapitel 11. Resultat och diskussion*.



Figur 19. 2 försök med och 2 försök utan fosfortillsats utfördes på varje rötrest och våtfas. Totalt 32 satsvisa försök.

Försöken utfördes på 0,75 L RR/VF förutom för VF drunk där 0,5 L användes. Detta eftersom centrifugens kapacitet begränsade avvattningen.

Samtliga lösningar, förutom VF beta, skakades, för att få en så homogen lösning som möjligt, innan den volym som skulle användas i försöken mättes upp. Under lagring skedde en tydlig sedimentering hos VF beta, och vid försöken användes den övre vätskefasen för denna lösning.

Vid samtliga försök, på rötresterna såväl som på våtfaserna, överfördes lösningen till en 1 L glasbägare som stod under omrörning på magnetomrörare (~1000 rpm). pH mättes kontinuerligt och försöken utfördes vid rumstemperatur. I de fall fosfor skulle tillsättas tillsattes $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Därefter tillsattes $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ med 30 % överskott. pH höjdes sedan genom tillsats av 0,1 M NaOH. För försöken med våtfaserna höjdes pH till 8,5, som för syntetlösningarna (se *Kapitel 10.4.1 Verifiering av försöksbetingelser genom satsvisa försök med syntetiska lösningar*). I försöken med de obehandlade rötresterna höjdes pH till 9,0. Detta eftersom de obehandlade rötresterna är mer komplexa än våtfaserna, och har mindre optimala betingelser för struvitfällning. Dock mättes den NaOH-tillsats som krävdes för att nå både pH 8,5 och 9,0.

I samtliga försök på de obehandlade rötresterna och våtfaserna mättes pH-värdet mellan varje tillsats av $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ och NaOH. Under pH-höjningen täcktes kärlet med parafilm och hölls därefter under omrörning i 60 minuter. Se *Figur 20* för bild av försöksupställningen.

Efter att lösningen omrörts i 60 minuter fick den sedimentera under ytterligare 60 minuter. Därefter filtrerades en liten mängd av den översta delen av lösningen genom samma fina polyamidfilter som användes som sista steg vid avvattningen. Denna del skickades sedan till analys. Bottensatsen av lösningen torkades vid max 40 °C och analyserades.



Figur 20. Försökupställningen.

10.4.3 Analyser

Våtfasen från sedimenteringen, och i vissa fall den torkade produkten, skickades till analys. Våtfasen analyserades med avseende på $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ med *flow injection analysis*, FIA, på samma sätt som i den inledande karakteriseringen, se 10.3 Inledande karakterisering. Inför analysen filtrerades proven genom $0,45\ \mu\text{m}$ filter och späddes. Proverna analyserades även med avseende på Ca, Mg, K och total-P genom ICP-MS/AES.

Struvitprodukten upplöstes och analyserades med ICP-MS/AES med avseende på P, As, Ca, K, Zn, Cd, Cr, Mg, Cu, Hg och Ni. Dessutom analyserades innehållet av C och N med C/N-analysator (vario MAX).

10.5 STRIPPING

För att testa hur mycket man kan minska NaOH-tillsatsen utfördes några försök där pH höjdes med hjälp av CO_2 -stripping kombinerat med NaOH-tillsats (enligt Kapitel 5.3 Försök där pH justeras genom stripping av CO_2). Försöken utfördes på samtliga obehandlade rötrest; RR hushåll, RR beta, RR gödsel och RR drank. För att jämföra NaOH-tillsatserna utfördes ytterligare 4 försök, med samma rötrest, där pH höjdes enbart med NaOH.

Då det enbart var pH-höjningen som skulle analyseras i dessa experiment gjordes inga tillsatser av fosfor och magnesium. Varje försök utfördes på 400 mL rötrest vid rumstemperatur.

Strippingförsöken utfördes genom att bubbla luft genom lösningarna under 20 minuter. Detta utfördes med hjälp av en luftpump för akvarium som fördes ner i bägaren. CO_2 avgick då och pH ökade. pH mättes före och efter strippingen. Därefter tillsattes NaOH (0,1 M) tills lösningens pH nådde 8,5.

I de jämförande fyra försöken tillsattes NaOH direkt tills lösningen nådde pH 8,5.

11. RESULTAT OCH DISKUSSION

Detta kapitel behandlar resultaten från den inledande karakteriseringen samt de laborativa försöken. Inledningsvis diskuteras avvattningen och den inledande karakteriseringen. Därefter de satsvisa försöken, först de som utförts med syntetiska lösningar, och sedan försöken med rötrester och våtfaser. Slutligen utvärderas resultaten från försöken med CO₂-stripping.

11.1 AVVATTNING OCH INLEDANDE KARAKTERISERING

11.1.1 Avvattning genom filtrering och visuell karakterisering

Samtliga rötresters avvattnades genom flerstegsfiltrering. Vid planeringen av försöken var tanken att det sista filtreringssteget skulle vara genom Munktellfilter i büchnertratt kopplad till vakuum, men eftersom lösningarna innehöll en så stor del små partiklar satte filtret igen direkt. En liten mängd RR beta och RR drank gick dock att filtrera genom Munktellfilter (med porstorlekarna 12-15 respektive >20 µm), men större mängder hade varit tidsmässigt orimligt. RR hushåll och RR gödsel gick inte igenom Munktellfilter över huvud taget.

I *Tabell 12* beskrivs rötresternas och våtfasernas utseende med ord. Avvattningen avskiljde partiklar i olika stor utsträckning för de olika rötresterna.

För RR hushåll och RR gödsel avskiljdes en del större partiklar i filtreringssteg 1, som till exempel plastbitar, gödselfibrer och större geléartade partiklar som liknade agglomererade fettpartiklar. I det andra filtreringssteget fastnade en del partiklar av mindre storlek och i det sista steget fastnade ytterligare en del små partiklar, men en stor andel partiklar passerade genom filtret vid det sista filtreringssteget.

För RR beta avskiljdes det mesta i filtreringssteg 1, då stora bitar av beta avlägsnades. I övriga filtreringssteg avskiljdes en liten del mindre partiklar, exempelvis sand, men en del partiklar passerade det finaste filtret. För den lilla mängd som dessutom filtrerades genom Munktellfilter (som enbart användes för att jämföra trestegsfiltreringen med Munktellfiltrering) kunde ytterligare en del partiklar, mestadels sand och jord, avskiljas. RR beta skilde sig markant från de övriga rötresterna. Rötresten var från början klarare och mindre viskös än övriga rötresters och var brun till färgen till skillnad från de övriga som var svarta. Både före och efter avvattningen var innehållet av organiskt material lägre än för övriga rötresters (se TOC-analys i *Tabell 13*).

I RR drank fanns inga stora partiklar från början så det första filtreringssteget innebar ingen avskiljning av partiklar. I de finare filtren fastnade en mycket liten mängd partiklar. Det kunde slutligen konstateras att det inte var någon större skillnad på RR drank och den avvattnade dranken, vilket senare bekräftades av TS- och SS-mätningar (se *Tabell 12* och *Tabell 13*). För den lilla mängd som filtrerades genom Munktellfilter, för jämförelse av filtreringsmetoderna, kunde en hel del partiklar avskiljas, men det var inte rimligt att avvattna större mängder på det sättet på grund av att filtret satte igen. För att få någon form av våtfas från RR drank som skulle kunna användas till de satsvisa försöken fick lösningen gå ige-

nom ett extra avvattningssteg; centrifugering. En hel del partiklar kunde då avskiljas, men fortfarande fanns mycket partiklar kvar i våtfasen och lösningen hade fortfarande samma svarta färg. De partiklar som hade centrifugerats ner liknade en kompakt lera.

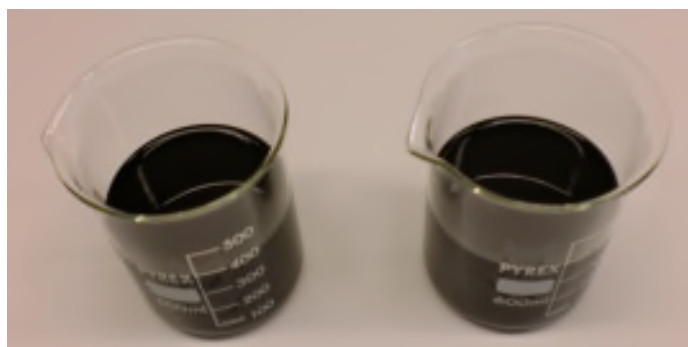
Figur 21 och Figur 22 visar hur rötresterna såg ut före respektive efter avvattningen (observera att våtfasen från drank i Figur 22 är före centrifugering). Figur 23 visar skillnaden mellan icke centrifugerad och centrifugerad VF drank.



Figur 21. De obehandlade rötresterna. Från vänster: RR hushåll, RR beta, RR gödsel, RR drank.



Figur 22. Våtfaserna efter avvattning av rötresterna. Från vänster: VF hushåll, VF beta, VF gödsel, VF drank ej centr.



Figur 23. Jämförelse mellan våtfaserna efter avvattning för drank. Från vänster: VF drank ej centr. (trestegsfiltrerad), VF drank (centrifugerad).

Sammanfattningsvis hade det varit önskvärt att avvattningen hade varit mer effektiv så att det hade varit större skillnader mellan RR och VF. Dock fanns inte möjligheten att optimera avvattningen inom ramen av denna studie.

11.1.2 pH, TS och suspenderade partiklar

I *Tabell 12* redovisas uppmätt torrsubstans, pH och densitet. *Tabell 13* visar rötresternas kemiska sammansättning samt suspenderade partiklar.

Tabell 12. Tabellen visar resultaten från den inledande karakteriseringen för rötresterna och de motsvarande våtfaserna.

	Utseende	TS [%]	pH [-]	Densitet [g/L]
RR hushåll	Svart vätska med en mycket stor del små partiklar samt en liten del större partiklar (t.ex. plast). Något mer viskös än vatten.	3,9	7,8	999
VF hushåll	Svart vätska med en stor del små partiklar. Något mer viskös än vatten.	3,6	8,0	1009
RR beta	Brun vätska med en del stora bitar samt en del små partiklar, typ sand. Skummade en del. Klarare än övriga. Ej viskös.	4,1	6,5	1030
VF beta	Brun vätska med en del små partiklar. Klarare än övriga. Ej viskös.	1,2	6,5	1038
RR gödsel	Svart vätska med en mycket stor del små partiklar samt en liten del större partiklar. Något mer viskös än vatten.	4,9	8,0	1013
VF gödsel	Svart vätska med en stor del små partiklar. Något mer viskös än vatten.	3,2	7,9	1011
RR drank	Svart vätska med en stor del små partiklar. Inga större partiklar. Något mer viskös än vatten.	4,6	7,7	1010
VF drank ej centr.	Svart vätska med en del små partiklar. Något mer viskös än vatten.	4,9	8,0	1020
VF drank	Svart vätska med en del små partiklar. Mindre viskös än VF drank ej centr.	3,3	8,1	-

Torrsubstansbestämningarna i *Tabell 12*, och även mängden suspenderade partiklar i *Tabell 13*, kan ses som ett mått på avvattningen. Avvattningen, genom filtrering i tre steg, för RR beta och RR gödsel verkar ha fungerat relativt bra, då TS-halterna för RR och VF skiljer sig en del (TS minskade från 4,1 % till 1,2 % för beta och för gödsel minskade den från 4,9 % till 3,2 %). För hushåll och drank (vid jämförelse av den våtfas som *inte* är centrifugerad) är det däremot ingen större skillnad mellan RR och VF (3,9 % till 3,6 % respektive 4,6 % till 4,9 %). För dranken är dessutom både torrhalten och mängden suspenderade partiklar högre för VF drank ej centr. jämfört med RR drank. Detta beror förmodligen på att i princip inga partiklar avlägsnades vid avvattningen med trestegsfiltrering utan istället förlorades en del vatten. Dock kan man se att den kraftiga centrifugeringen

reducerade andelen partiklar (TS minskade till 3,3 %). Motsvarande trender som för TS-halterna kan ses för mängden suspenderade partiklar (se *Tabell 13*).

pH-värdena för RR hushåll, RR gödsel och RR drank ligger på 7,8, 8,0 respektive 7,7. pH för motsvarande VF skiljer som mest 0,4 enheter. Den rötrest som utmärker sig mest är RR beta där pH för RR och VF ligger på 6,5. Samma trend kan urskiljas när man ser på alkaliniteten (se *Tabell 13*). Alkaliniteten, och därmed buffringsförmågan, ligger mellan 160 och 220 mmol HCO_3^-/L för samtliga rötrest-ter och våtfaser för hushåll, gödsel och drank men bara runt 20 mmol HCO_3^-/L för betan.

Densiteterna för samtliga rötrest-ter och våtfaser är väldigt nära vattnets densitet (se *Tabell 12*). Därför antas samtliga densiteter för rötresterna och våtfaserna i fort-sättningen av denna studie vara samma som vatten, 1000 g/L.

11.1.3 Kemisk sammansättning

Från analysdatan i *Tabell 13* är det tydligt att RR drank innehåller betydligt mer totalkväve än övriga rötrest-ter. RR hushåll och RR gödsel innehåller ungefär hälften så mycket som RR drank, och RR beta knappt en femtedel. Ungefär samma fördelning gäller för totalfosfor. RR drank innehåller klart mest, medan RR hushåll och RR gödsel innehåller runt hälften så mycket. Mängden fosfor i RR beta är ungefär 15 % av den i RR drank.

Intressant att notera är också mängden löst ammoniumkväve jämfört med det totala innehållet av kväve i rötresten. Av den totala mängden kväve fanns mellan 7 och 11 % i form av lösta ammoniumjoner. Motsvarande jämförelse för fosfor visar att endast 4 % av det totala fosforinnehållet i rötresten från hushållsavfallet förekom som lösta fosfatjoner. För övriga rötrest-ter var siffran 16 % för beta, 20 % för gödsel och 58 % för drank.

Innehållet av ammoniumkväve i lösning är mycket lägre än vad som tidigare uppmätts på respektive anläggning. Detta beror på att den analysmetod som valdes i denna studie inte mäter det ammoniumkväve som finns kemiskt och/eller fysikaliskt bundet i det organiska materialet utan endast det $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ som finns som *lösta joner i vattenfasen*. Valet av analysmetod är inte helt självklar när det gäller ammoniumkväve i en komplex matris som rötrest. Det kemiskt/fysikaliskt adsorberade ammoniumkvävet står konstant i jämvikt med det som finns löst i jonform. Detta innebär förenklat att när koncentrationen ammoniumkväve i vattenfasen minskar, till exempel genom en struvitfällningsreaktion, kommer en ny jämvikt att ställa in sig vilket kan innebära att tidigare organiskt bundet ammoniumkväve frigörs till vattenfasen. Likaså gäller att om lösningen skulle tillföras ammoniumkväve i jonform kan mer adsorberas organiskt. Hur fort den nya jämvikten ställer in sig beror på hur ammoniumkvävet är bundet i den organiska matrisen.

Tabell 13. Tabellen redovisar analysvaran för de obehandlade samt de avvattnade rötresterna. Siffrorna anges i enheten mg/L om inget annat nämns. I tabellen står SS för suspenderade partiklar och TOC för totalt organiskt kol.

	N-tot	NH ₄ -N	P-tot	PO ₄ -P	Mg	Ca	K	Na	Al	As	Cd
RR hushåll	5472	-	630	-	187	1021	1336	759	533	0,13	0,01
VF hushåll	5780	588	492	23,6	152	814	1170	692	341	-	-
RR beta	1848	-	179	-	228	465	1579	196	147	0,05	0,03
VF beta	1040	157	74	28,1	185	291	1330	193	13	-	-
VF beta bückner	967	155	63	26,8	172	267	1264	188	12	-	-
RR gödsel	5459	-	522	-	319	1003	2663	574	36	0,03	0,02
VF gödsel	5600	523	330	107	182	822	2420	551	20	-	-
RR drank	10374	-	1094	-	170	257	2895	992	10	0,04	0,02
VF drank ej centr.	10780	807	864	635	76	217	2440	872	8	-	-
VF drank bückner	7976	707	622	509	5	114	2180	810	5	-	-
VF drank ⁶	-	-	700	-	4	30	2631	-	-	-	-
	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	Zn	SS	Alkalinitet [mmol HCO ₃ /L]	TOC
RR hushåll	0,08	0,54	2,5	450	0,0024	0,8	0,11	13,4	41550	165	13380
VF hushåll	0,07	-	0,6	307	-	0,3	-	9,5	34250	162	12680
RR beta	0,05	2,33	1,0	184	0,0015	0,7	0,23	4,3	29350	19,0	9570
VF beta	0,05	-	0,3	42	-	0,2	-	1,0	10450	21,5	5120
VF beta bückner	0,03	-	0,3	35	-	0,2	-	0,8	10950	19,3	4640
RR gödsel	0,07	0,22	5,8	400	0,0011	0,7	0,05	21,5	51800	203	13074
VF gödsel	0,10	-	2,5	276	-	0,2	-	16,8	31750	202	12740
RR drank	0,52	0,42	1,4	2290	0,0004	0,6	0,02	14,3	46350	216	17682
VF drank ej centr.	0,37	-	0,8	1548	-	0,6	-	11,4	48150	205	18158
VF drank bückner	0,20	-	1,1	532	-	0,3	-	4,4	27100	175	9840
VF drank ⁶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

⁶ Detta prov analyserades inte samtidigt som övriga i denna tabell. Se analysvar för NH₄-N och PO₄-P i Tabell 14.

I denna studie har rötresterna konstant lagrats vid ca 3 °C. Vid denna temperatur är den mikrobiella aktiviteten mycket låg, och under lagring kommer troligtvis en del av de bakterier som verkar vid mesofil rötning att dö. Även detta kan höja både ammonium- och fosfatjonkoncentrationen i vattenfasen då de döda bakteriernas cellväggar med tiden blir permeabla för ammonium- och fosfatjoner som på så vis transporteras ut i vattenfasen.

Det finns således en risk att den metod som valdes i denna studie kan underskatta tillgången främst av ammoniumkväve men även till viss del av fosfatfosfor. Alternativet hade varit att välja en metod där allt bundet $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ först extraheras till vattenfasen och sen analyseras. En sådan metod skulle med största sannolikhet överskatta den mängd som finns tillgänglig för struvitfällning. Detta medför att det är svårt att dosera rätt mängd kemikalier för att fälla allt fosfat och ammonium.

Resultatet från den inledande karakteriseringen användes för att beräkna doseringen av fällningskemikalien magnesiumklorid och tillsatsen av fosforkälla i de fall där man ville tillföra fosfor för att även reducera allt ammoniumkväve.

I samband med att lösningarna från de satsvisa försöken efter fällning skulle analyseras skickades även fyra nya prover av avvattnad rötrest in för en ny analys (se *Tabell 14*). Här är det tydligt att mängden ammoniumkväve och fosfatfosfor som finns fritt i jonform har ökat under lagring särskilt i de lösningar som innehöll en stor andel organiskt material/partiklar, det vill säga VF hushåll, VF gödsel och VF drank. För VF beta, som var en klar lösning jämfört med de övriga och där det organiska innehållet var betydligt lägre, är värdena från den första och den andra analysomgången jämförbara, vilket ytterligare styrker resonemanget ovan.

Tabell 14. Jämförelse av ammonium- och fosfatkoncentrationer för de olika våtfaserna vid olika tidpunkter.

	Analys i samband med den inledande karakteriseringen		Analys i samband med analys av de satsvisa försöken	
	$\text{NH}_4\text{-N}$ [mg/L]	$\text{PO}_4\text{-P}$ [mg/L]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [mg/L]	$\text{PO}_4\text{-P}$ [mg/L]
VF hushåll	588	24	2126	255
VF beta	157	28	164	62
VF gödsel	523	107	2272	197
VF drank	807	635	4483	699

Eftersom den senare analysen utfördes vid samma tidpunkt som de satsvisa försöken, och således efter lika lång lagring, kommer de senare, högre värdena att användas vid bestämning av reduktionsgrad av $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ vid de satsvisa försöken. Doseringen av kemikalietillsatserna vid de satsvisa försöken med RR och VF hushåll, gödsel och drank, särskilt i de fall där fosforkälla skulle tillsättas, kommer dock att vara för låg för att reducera allt $\text{NH}_4\text{-N}$. För VF och RR beta kommer inte tillsatsen att skilja märkbart.

För att ändå kunna säga något om möjligheten att använda fosforkälla för att reducera allt ammoniumkväve i lösning utfördes ytterligare 3 satsvisa försök (1 per

VF för hushåll, gödsel och drank) med fosfor- och magnesiumtillsats baserad på de senare, högre värdena. Se *Kapitel 11.2.2 Rötresten och våtfaser*.

Det totala innehållet av fosfor är något lägre i våtfaserna efter avvattning än i de obehandlade rötresterna för samtliga fyra rötresten (se *Tabell 13*). Procentuellt sett är minskningen störst vid avvattningen av rötresten från beta då ca 40 % av det totala fosforinnehållet avskiljs vid avvattning. Detta stämmer väl överens med iakttagelsen att det mesta organiska materialet i rötresten utgjordes av relativt stora betbitar som avskiljdes vid filtreringen och att avvattningen var effektiv med avseende på att avskilja organiskt material. För rötresten från beta minskar även det totala innehållet av kväve vid avvattningen, med 56 %, medan innehållet höjs något för övriga rötresten. Förklaringen till höjningen är troligtvis att det mesta av kvävet sitter i det organiska materialet. Endast en liten andel av det organiska materialet kunde avskiljas och avvattningen medförde en förlust av vatten.

Innehållet av näringsämnen Mg, Ca och K varierar mellan de olika rötresterna (se *Tabell 13*). Magnesiuminnehållet var högst i RR/VF från gödsel och lägst i RR/VF från drank. Detsamma gäller innehållet av kalcium. I samtliga fall var magnesium och kalciuminnehållet högre i rötresterna än i våtfasen efter avvattning. Kaliuminnehållet var högst i RR drank, tätt följt av RR gödsel. En stor andel av det kalium som finns i rötresten medföljde till våtfasen efter avvattning för samtliga rötresten.

Innehållet av metallerna aluminium, arsenik, och nickel är högst i RR och VF från hushållsavfall (se *Tabell 13*). Störst är skillnaden för aluminium där RR hushåll innehåller 533 mg/L jämfört med 147 mg/L för RR beta, 36 mg/L för RR gödsel och 10 mg/L för RR drank. Innehållet av kadmium är högst för RR beta och för metallerna koppar och zink är halterna högst i RR gödsel. Det är svårt att säga om metallinnehållet är ett problem eller ej baserat på resultaten från den inledande karakteriseringen. Eventuella problem kan uppstå om halterna i fällningen och därmed gödselprodukten skulle bli höga.

Våtfaserna som filtrerades genom büchnertratt uppvisar lägre värden för samtliga analyserade parametrar (se *Tabell 13*). Skillnaden mellan VF drank ej centr. och VF drank büchner är större än mellan VF beta och VF beta büchner vilket inte är överraskande då en större andel partiklar fastnade på Munktellfiltret vid filtrering av VF drank än VF beta.

11.2 SATSVISA FÖRSÖK

11.2.1 Syntetiska lösningar

I samtliga försök som utfördes med syntetiska lösningar var det väldigt enkelt att få ut struvit. Då pH var runt 7 kunde man se att lösningen blev grumligt vit men den bildade struviten löstes snabbt upp igen. Vid något högre pH bildades struvit utan att lösas upp igen. Det var tydligt att reaktionen var igång då pH höjdes ytterligare. Dels gick det att se med blotta ögat, och efter varje NaOH-tillsats sjönk pH snabbt, vilket är en följd av att vätejoner frigörs vid bildandet av struvit (se *Kapitel 4.1 Kemisk fällning och kristallisation*). När reaktionen hade avstannat efter

några minuter stabiliserades också pH-värdet vid 8,5. Eftersom reaktionen så tydligt hade avstannat sågs ingen anledning att höja pH ytterligare.

Enligt *Kapitel 4.2.4 Reaktionstid* är struvitreaktionen en snabb reaktion, vilket kunde styrkas från försöken. Från att reaktionen startade till pH-värdet hade stabiliserats vid 8,5 tog det endast några minuter. En reaktionstid på 60 minuter ansågs ändå rimlig för att se till att så många ammonium- och fosfatjoner i lösning som möjligt reagerade.

Efter 60 minuters reaktionstid fick lösningen sedimentera i ytterligare 60 minuter. Efter ungefär 15 minuter hade den mesta struviten sjunkit till botten. För att vara säker på att få en ordentlig sedimentering ansågs dock 60 minuter vara en rimlig tid för detta.

Figur 24 visar hur den struvit vi fick ut från de syntetiska lösningarna såg ut.



Figur 24. Struvit från försöken med syntetiska lösningar.

Tabell 15 visar hur stora tillsatser av kemikalier som krävdes samt pH-värdena mellan varje tillsats för de 7 syntetiska lösningarna. Observera att tillsatserna i tabellen är per liter lösning. För de exakta tillsatserna till de volymer försöken utfördes i, se *Appendix 4. Kemikalietillsatser och pH-värden för de syntetiska lösningarna*.

Tabell 15. Tillsatta mängder kemikalier per liter lösning samt pH-värden för syntetlösningarna.

	Lösning baserad på	Tillsatt H_3PO_4 [g]	Tillsatt NaH_2PO_4 $\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [g]	Tillsatt MgCl_2 $\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [g]	pH vid start [-]	pH efter P- tillsats [-]	pH efter Mg- tillsats [-]	Tillsatt NaOH [mL]
Försök 1	VF beta	1,229	-	2,971	6,73	2,44	2,35	31
Försök 2	VF gödsel	3,921	-	9,873	6,33	2,10	1,94	96
Försök 3	VF beta	-	1,611	2,964	6,95	5,95	5,66	20
Försök 4	VF beta	-	-	0,233	7,00	-	6,99	3
Försök 5	VF gödsel	-	5,285	9,867	6,58	5,53	4,96	73
Försök 6	VF gödsel	-	-	0,919	6,52	-	6,43	13
Försök 7	VF gödsel	-	-	0,919	6,52	-	6,43	13

Från *Tabell 15* kan man se att pH sjunker efter fosfortillsats i samtliga försök där fosfor tillsattes. Dock är det en tydlig skillnad mellan de olika fosfortillsatserna.

Vid jämförelse av pH-sänkningen i *Tabell 16* mellan försök 1 och 3, som är baserade på VF beta, kan man se att fosforsyran sänkte pH till 2,44 och $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sänkte pH till 5,95. Motsvarande jämförelse för försök 2 och 5, som är baserade på VF gödsel, visar att fosforsyran sänkte pH till 2,10 och fosforsaltet sänkte pH till 5,53. Att använda H_3PO_4 som fosforkälla innebär alltså att betydligt mer NaOH behöver tillsättas för att nå det pH som är önskvärt för struvitfällning. För försöken baserade på VF beta medförde användningen av fosforsyra en ökning av mängden tillsatt NaOH med 55 % jämfört med användningen av $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Motsvarande ökning för försöken baserade på VF gödsel var 31 %.

Tabell 16. Jämförelse av pH mellan fosfortillsatserna H_3PO_4 och $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

	P-tillsats	pH före P-tillsats [-]	pH efter P-tillsats [-]
Försök 1	H_3PO_4	6,73	2,44
Försök 3	$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	6,95	5,95
Försök 2	H_3PO_4	6,33	2,10
Försök 5	$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	6,58	5,53

I *Tabell 15* går det också att avläsa att pH sjunker något ytterligare efter magnesi-umtillsatsen.

Tabell 17 visar jämförelsen mellan den teoretiska mängd struvit som skulle erhållas i försök 3-6 och den uppmätta mängden, samt utbytet. Dessutom visas reduktionen av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ för försök 3 och 4. Försök 5 och 6, som var baserade på VF gödsel, fick väldigt höga utbyten, 98 respektive 97 %. Utbytet för försök 3, som var baserad på VF beta, blev 86 %, vilket får anses ligga i samma storleksordning. Utbytet för försök 4, som också var baserad på VF beta, blev 47 %, vilket verkar lågt i jämförelse med övriga försök. Detta beror troligtvis på att det var svårt att tillvarata all bildad struvit. Då det teoretiskt bara skulle kunna bildas 0,17 g struvit blir effekten på utbytet större om inte all bildad struvit fångas upp jämfört med om den teoretiska mängden skulle varit större.

Tabell 17. Jämförelse mellan teoretisk respektive uppmätt mängd struvit från försök 3-6 samt reduktion av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ för försök 3 och 4.

	Teoretisk mängd struvit [g]	Uppmätt mängd struvit [g]	Utbyte [%]	$\text{PO}_4\text{-P}$ -reduktion [%]	$\text{NH}_4\text{-N}$ -reduktion [%]
Försök 3	2,06	1,77	86	98	84
Försök 4	0,17	0,08	47	96	5
Försök 5	6,87	6,74	98	-	-
Försök 6	0,64	0,62	97	-	-

För försöken som utfördes med VF beta utan respektive med fosfortillsats i form av $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (försök 3 och 4) analyserades $\text{PO}_4\text{-P}$ - och $\text{NH}_4\text{-N}$ -koncentrationerna före och efter fällning. I det fallet då försöket utfördes utan fosfortillsats (försök 4) minskade innehållet av $\text{PO}_4\text{-P}$ med 96 % och $\text{NH}_4\text{-N}$ -innehållet med 5 %. Vid försöket med fosfortillsats (försök 3) reducerades $\text{PO}_4\text{-P}$ -innehållet med 98 % och $\text{NH}_4\text{-N}$ -innehållet med 84 %.

Vid jämförelse av den struvit som erhöles från försöket då lösningen fick stå under omrörning över natten jämfört med övriga försök kunde ingen skillnad i kristallstorlek urskiljas.

11.2.2 Rötresten och våtfaser

Förutom de 32 satsvisa försöken (försöksomgång 1), som beskrivs i *Kapitel 10.4.2 Rötresten och våtfaser*, utfördes, som nämnts tidigare, ytterligare ett satsvist försök per våtfas för hushåll, gödsel och drank, med fosfortillsats. Anledningen till detta är att tillsatsen av kemikalier ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ och $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vid försöksomgång 1 byggde på de koncentrationer av $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ som uppmättes vid den inledande karakteriseringen. Såsom beskrivs i *Kapitel 11.1 Avvattning och inledande karakterisering* frisläpptes ammonium- och fosfatjoner till vattenfasen under lagringen varvid mängden ammonium- och fosfatjoner som fanns tillgängliga för struvitfällning ökade.

Skillnaden i $\text{PO}_4\text{-P}$ -koncentrationerna mellan de två analysomgångarna (se *Tabell 14*) är generellt betydligt mindre än för $\text{NH}_4\text{-N}$ -koncentrationerna. Detta medför att magnesiumtillsatsen, i de fall extra fosfor tillsatts (försök med beteckning P), har varit tillräckligt hög för att teoretiskt reducera 100 % av allt $\text{PO}_4\text{-P}$ i lösningarna även i försöksomgång 1 (det vill säga försöken RR/VF hushåll P, RR/VF beta P, RR/VF gödsel P och RR/VF drank P). Detsamma gäller för RR respektive VF drank uP (försök utan P-tillsats). Detta kan utläsas i *Tabell 18* som redovisar de molförhållanden mellan $\text{Mg}:\text{PO}_4\text{-P}:\text{NH}_4\text{-N}$ som förelåg vid starten av respektive försök. I en ren struvitprodukt är molförhållandet $\text{Mg}:\text{P}:\text{N}$ 1:1:1. Vid de försök där $\text{Mg} > 1$, enligt *Tabell 18*, har tillräckligt med magnesium doserats för att teoretiskt kunna fälla allt $\text{PO}_4\text{-P}$ i lösning.

Däremot har varken fosfortillsats eller magnesiumsalt doserats i tillräckligt hög grad för att reducera allt $\text{NH}_4\text{-N}$ i försöksomgång 1, förutom i fallet VF/RR beta P. Även detta kan utläsas från *Tabell 18* där man ser att antalet mol $\text{NH}_4\text{-N}$ i de flesta fall är mycket högre än antalet mol $\text{PO}_4\text{-P}$ och Mg. De tre kompletterande försöken ("omg2") tjänar till att ändå kunna säga någonting om möjligheten att använda struvitfällning som teknik att reducera allt *ammoniumkväve* även för övriga rötresten. De kompletterande försöken (försöksomgång 2) benämns VF hushåll P_omg2, VF gödsel P_omg2 och VF drank P_omg2. Vid dessa försök är molförhållandet mellan $\text{Mg}:\text{P}:\text{N}$ 1,3:1:1.

Resultaten från de första 32 satsvisa försöken kommer att utvärderas utifrån reduktionsgrad av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$, fällningens utseende och kemiska sammansättning, medan kemikaliemängderna som behövdes vid den andra omgången kommer att vara viktiga vid kostnadsuppskattningen.

Tabell 18. Molförhållanden mellan Mg, PO₄-P och NH₄-N i samband med att de satsvisa försöken inleddes. I struvit är molförhållandet mellan Mg, PO₄-P och NH₄-N 1:1:1.

	Mg [-]	P [-]	N [-]
RR hushåll P	1,1	1,0	3,1
RR hushåll uP	0,1	1,0	18,4
RR beta P	1,2	1,0	1,0
RR beta uP	0,6	1,0	5,9
RR gödsel P	1,2	1,0	4,0
RR gödsel uP	0,7	1,0	25,5
RR drank P	1,3	1,0	5,4
RR drank uP	1,2	1,0	14,2
VF hushåll P	1,1	1,0	3,1
VF hushåll uP	0,1	1,0	18,4
VF beta P	1,2	1,0	1,0
VF beta uP	0,6	1,0	5,9
VF gödsel P	1,2	1,0	4,0
VF gödsel uP	0,7	1,0	25,5
VF drank P	1,3	1,0	5,4
VF drank uP	1,2	1,0	14,2
VF hushåll P_omg2	1,3	1,0	1,0
VF gödsel P_omg2	1,3	1,0	1,0
VF drank P_omg2	1,3	1,0	1,0

I Tabell 19 finns data över hur stora kemikaliemängder som behövde tillsättas per liter RR/VF och hur pH ändrades vid kemikalietillsats för de första 32 satsvisa försöken i försöksomgång 1, samt motsvarande data för proverna vid de 3 satsvisa försöken i försöksomgång 2. Tabellen baseras på rådata från försöken, som finns redovisade i Appendix 5. Kemikalietillsatser och pH-värden för de satsvisa försöken.

I samtliga fall sjönk pH i lösningen både efter tillsats av NaH₂PO₄•2H₂O och MgCl₂•6H₂O. I de fall pH sjönk till ca 6,5 eller därunder skummade lösningarna mycket kraftigt. Volymen kunde i vissa fall tillfälligt öka till det dubbla.

I de fall fosforkälla tillsattes sjönk pH för RR hushåll till 6,88, RR beta till 6,05, RR gödsel till 6,95 och RR drank till 7,14. Tillsatsen av magnesiumsalt sänkte pH ytterligare till 6,52, 5,97, 6,62 respektive 6,77. Motsvarande sänkningar med tillsatt fosforkälla för våtfaserna i försöksomgång 1 var för VF hushåll till pH 6,86, för VF beta till 6,37, för VF gödsel till 7,02 och för VF drank till 7,17. Tillsatsen av magnesiumsalt sänkte pH ytterligare till 6,44, 6,27, 6,59 respektive 6,72. Utan fosfortillsats var pH-sänkningen i samtliga fall mindre.

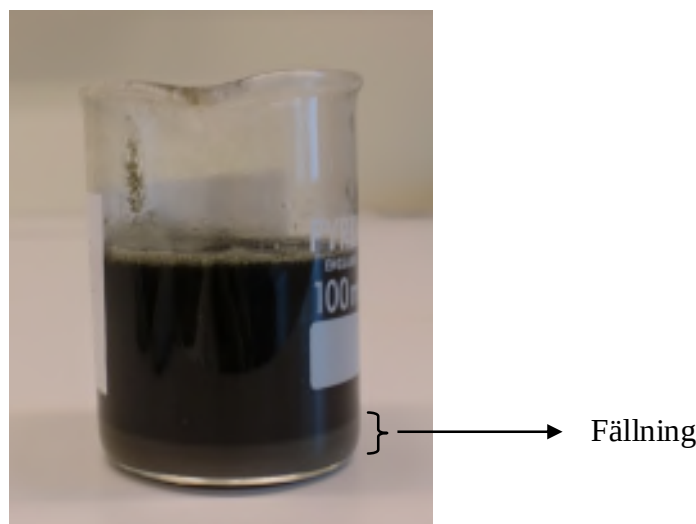
Eftersom kemikalietillsatserna var större vid försöken i omgång 2 sjönk pH ännu mer för dessa försök. VF hushåll sjönk till pH 5,45, VF gödsel till 5,52 och VF drank till 4,84.

Tabell 19. Tillsatta mängder kemikalier per liter lösning samt pH-värden för RR/VF-lösningarna. Tabellen visar medelvärden för försöken som utfördes i duplikat med undantag av de tre sista som utfördes som enkla försök.

	Tillsatt $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [g]	Tillsatt $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [g]	pH vid start [-]	pH efter P-tillsats [-]	pH efter Mg- tillsats [-]	Tillsatt NaOH (till pH 8,5) [mL]	Tillsatt NaOH (från pH 8,5 till 9,0) [mL]	Totalt till- satt NaOH (för RR) [mL]
RR hushåll P	6,428	11,094	7,61	6,88	6,52	77	45	122
RR hushåll uP	-	0,204	7,57	-	7,56	40	53	93
RR beta P	1,605	2,963	6,17	6,05	5,97	41	7	48
RR beta uP	-	0,238	6,21	-	6,20	28	11	39
RR gödsel P	5,282	9,865	7,58	6,95	6,62	83	50	133
RR gödsel uP	-	0,911	7,64	-	7,59	47	67	113
RR drank P	5,793	15,221	7,78	7,14	6,77	80	60	140
RR drank uP	-	5,416	7,72	-	7,21	61	67	128
VF hushåll P	6,429	11,093	7,80	6,86	6,44	90	-	-
VF hushåll uP	-	0,212	7,90	-	7,82	27	-	-
VF beta P	1,608	2,962	6,52	6,37	6,27	40	-	-
VF beta uP	-	0,240	6,43	-	6,46	23	-	-
VF gödsel P	5,285	9,873	7,78	7,02	6,59	89	-	-
VF gödsel uP	-	0,917	7,89	-	7,88	23	-	-
VF drank P	5,785	15,227	7,92	7,17	6,72	90	-	-
VF drank uP	-	5,419	7,94	-	7,33	60	-	-
VF hushåll P_omg2	22,390	40,098	7,80	6,69	5,45	122	-	-
VF gödsel P_omg2	24,311	42,867	7,72	6,69	5,52	156	-	-
VF drank P_omg2	46,400	84,578	7,82	6,52	4,84	311	-	-

Lutillsatserna för att höja pH till 8,5 för VF och 9,0 för RR var ganska stora. Den extra lut som behövde tillsättas för att öka pH från 8,5 till 9,0, för försöken med RR, var betydande (mellan 118 och 240 % ökning) och indikerar att det finns stora kostnader att spara om man kan utföra fällningen vid ett lägre pH. Lutillsatsen, liksom tillsatsen av övriga kemikalier, var markant högre vid försöken VF hushåll P_omg2, VF gödsel P_omg2 samt VF drank P_omg2.

Vid de satsvisa försöken gick det inte att se med blotta ögat att struvit bildades på samma sätt som vid försöken med de syntetiska lösningarna, eftersom lösningarna var färgade och innehöll en hel del partiklar. Under tillsatsen av NaOH noterades dock ofta en initial pH-ökning som följdes av en pH-sänkning, vilket, som nämnts tidigare, kan ses som ett tecken på att struvit bildas. Efter att lösningarna hade stått i 60 minuter för att sedimentera kunde man inte heller då se någon produkt som hade sedimenterat, med undantag för VF drank i omgång 2, där en tydlig fällning kunde urskiljas. Se *Figur 25*.



Figur 25. Bilden visar sedimenterad fällning från försöket med VF drank i omgång 2.

I *Tabell 20* redovisas de koncentrationer av kemiska ämnen som uppmättes för respektive försök efter fällning. Koncentrationerna kan inte användas direkt för att utvärdera reduktionsgrad eftersom både ursprungsvolymlerna och lutillsatserna varierade vid försöken.

I *Tabell 21* redovisas hur innehållet av löst $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ påverkades under de satsvisa fällningsförsöken. Siffrorna i de två kolumnerna till vänster visar hur mycket löst $\text{PO}_4\text{-P}$ respektive $\text{NH}_4\text{-N}$ som reducerats, det vill säga "försvunnit" vid försöken. De två kolumnerna till höger visar de *teoretiskt* maximala reduktionerna av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$, baserat på magnesiumtillsatsen. Det innebär att värden på över 100 % förekommer, vilket beror på att det i dessa fall fanns överskott av magnesium.

Beräkningarna bygger på rådata samt analysresultat för respektive försök, vilka finns i *Appendix 5. Kemikalietillsatser och pH-värden för de satsvisa försöken* och *Appendix 6. Analysresultat efter fällning från de satsvisa försöken*.

Tabell 20. Analysresultat som visar innehållet av Ca, K, Mg, total-P, NH₄-N samt PO₄-P efter fällning. Tabellen visar medelvärden för försöken som utfördes i duplikat med undantag av de tre sista som utfördes som enkla försök.

	Ca [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	P [mg/L]	NH₄-N [mg/L]	PO₄-P [mg/L]
RR hushåll P	655	1217	1227	1450	2102	1297
RR hushåll uP	717	1166	142	417	2156	232
RR beta P	215	1442	285	85	64	50
RR beta uP	187	1515	195	67	142	46
RR gödsel P	141	2458	310	107	1557	44
RR gödsel uP	667	2508	185	215	1915	56
RR drank P	194	2604	1097	1130	3248	637
RR drank uP	207	2681	570	768	3715	636
VF hushåll P*	809	1207	1236	1583	2037	1562
VF hushåll uP	843	1180	167	483	2209	239
VF beta P	239	1305	364	162	76	48
VF beta uP	188	1430	211	66	165	41
VF gödsel P	780	2545	1124	1123	1756	197
VF gödsel uP	865	2623	222	254	2118	144
VF drank P	32	2712	337	103	3610	91
VF drank uP	35	2664	243	315	4113	297
VF hushåll P_omg2	-	-	-	-	1809	2827
VF gödsel P_omg2	-	-	-	-	1630	3264
VF drank P_omg2	-	-	-	-	1181	574

*Dessa värden baseras på endast ett försök, eftersom ett analyssvar eliminerats som outlier. Se Appendix 6. Analysresultat efter fällning från de satsvisa försöken.

Tabell 21. Reduktion av PO₄-P- och NH₄-N-innehåll vid de satsvisa försöken. Tabellen visar medelvärden för försöken som utfördes i duplikat med undantag av de tre sista som utfördes som enkla försök. Negativ reduktion innebär en ökning. Tabellen visar också den teoretiskt maximala reduktionsgraden av PO₄-P och NH₄-N förutsatt att allt tillsatt magnesium hade fällt som struvit. Reduktionerna anges i vikts%.

	Reduktion av PO ₄ -P	Reduktion av NH ₄ -N	Teoretisk maximal PO ₄ -P- reduktion	Teoretisk maximal NH ₄ -N- reduktion
RR hushåll P	5 %	-11 %	110 %	36 %
RR hushåll uP	1 %	-11 %	12 %	1 %
RR beta P	86 %	59 %	119 %	124 %
RR beta uP	23 %	10 %	59 %	10 %
RR gödsel P	96 %	22 %	121 %	30 %
RR gödsel uP	68 %	6 %	70 %	3 %
RR drank P	61 %	17 %	125 %	23 %
RR drank uP	-3 %	7 %	118 %	8 %
VF hushåll P	-10 %	7 %	110 %	36 %
VF hushåll uP	4 %	-7 %	12 %	1 %
VF beta P	87 %	52 %	119 %	124 %
VF beta uP	32 %	-3 %	59 %	10 %
VF gödsel P	83 %	16 %	121 %	30 %
VF gödsel uP	25 %	5 %	70 %	3 %
VF drank P	95 %	12 %	125 %	23 %
VF drank uP	55 %	3 %	118 %	8 %
VF hushåll P_omg2	33 %	5 %	130 %	130 %
VF gödsel P_omg2	25 %	17 %	130 %	130 %
VF drank P_omg2	92 %	65 %	130 %	130 %

RR/VF hushåll

Kemikalietsatsen i RR och VF hushåll uP baserades på att endast en mycket liten andel fosfat fanns i lösning (se Tabell 13), varför utbytet och reduktionsgraden av PO₄-P vid försöken inte kan bli särskilt hög. Vid försök RR hushåll uP reducerades innehållet av PO₄-P med 1 % och med 4 % för försök VF hushåll uP. Den teoretiskt maximala reduktionsgraden om allt tillsatt magnesiumsalt hade reagerat som struvit vid dessa två försök var något högre, 12 %.

Vid försöket med RR med fosfortillsats (RR hushåll P) erhöles en reduktionsgrad med avseende på PO₄-P av 5 %. Även detta är mycket lägre än den teoretiskt maximala reduktionsgraden som på grund av att magnesium doserades i överskott ligger på över 100 % PO₄-P-reduktion. Vid motsvarande försök med VF ses en ökning av PO₄-P-innehållet. I Tabell 20 kan man se att den totala magnesium- och fosforkoncentrationen vid försöken med tillsatt fosforkälla är mycket högre än vid försöken utan fosfortillsats, vilket visar att det finns fosfor och magnesium som skulle kunnat fällas. Troligtvis ligger förklaringen till varför PO₄-P-innehållet ökar för VF hushåll i att osäkerheter vid försöken och vid analysen överskuggar möjligheten att detektera en liten reduktion.

När det gäller innehållet av $\text{NH}_4\text{-N}$ i lösning har mängden ökat med 11 % för RR hushåll P och RR hushåll uP, ökat med 7 % för VF hushåll uP och minskat med 7 % för VF hushåll P. Vid försöken utan tillsatt fosfor (uP) var den teoretiskt maximala reduktionsgraden för $\text{NH}_4\text{-N}$ så låg som 1 %, och när fosforkälla tillsattes 36 %. Eftersom relativt lite $\text{PO}_4\text{-P}$ reducerats och därmed lite struvit bildats beror den uppmätta ökningen av $\text{NH}_4\text{-N}$ -innehåll troligtvis på att osäkerheter vid försöken och i analysen överskuggar möjligheten att detektera den lilla förändringen av ammoniumkväve. Det är även möjligt att $\text{NH}_4\text{-N}$ frigjorts från det organiska materialet under försökets gång, men eftersom den maximala struvitfällningen är så pass liten vid dessa försök är det svårt att dra några slutsatser om varför $\text{NH}_4\text{-N}$ -innehållet ökat.

$\text{PO}_4\text{-P}$ - och $\text{NH}_4\text{-N}$ -reduktionen är låg även för försöket VF hushåll P_omg2 där endast 33 respektive 5 % reducerats. I detta fall doserades fosfortillsats och magnesiumsalt med 30 % överskott, vilket innebär att både $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ hade kunnat reduceras 100 %.

Sammanfattningsvis fungerade inte struvitfällning särskilt bra för RR respektive VF hushåll. Eftersom $\text{PO}_4\text{-P}$ -innehållet bara minskade marginellt fällde inte heller fosfat som andra föreningar i nämnvärd utsträckning. Då analysresultaten visar att det finns $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ och Mg i lösningarna som borde vara tillgängligt för struvitfällning är det osannolikt att de dåliga resultaten skulle bero på att fel begåtts vid utförandet av försöken. Det är mer troligt att orsaken till att struvit inte faller ligger i att övermättnad inte kan nås. Detta kan i sin tur bero på negativ inverkan av andra joner vilket minskar aktiviteterna av de för struvitfällning nödvändiga jonerna. Alternativt skulle förklaringen kunna ligga i att lösningens fysikaliska egenskaper på något vis hindrar jonerna från att reagera. Försöksunderlaget i denna studie är för litet för att uttala sig närmre om orsaken.

RR/VF beta

Eftersom analysvärdena mellan de två analysomgångarna skiljde relativt lite för beta (se *Tabell 14*) är kemikalietillsatserna teoretiskt tillräckligt höga för att reducera både allt $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ i lösning vid försöken RR beta P och VF beta P. Resultaten visar att vid fosfortillsats reducerades $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ innehållet med 86 respektive 59 % när försöket utförde med RR, och motsvarande siffror för VF var 87 respektive 52 %. Vid försöken utan fosfortillsats var den högsta teoretiskt möjliga reduktionsgraden 59 % på grund av underdosering av magnesium. Vid dessa försök reducerades $\text{PO}_4\text{-P}$ -innehållet med 23 % för RR beta uP och 32 % för VF beta uP. Innehållet av $\text{NH}_4\text{-N}$ minskade med 10 % för försöket RR beta uP, men ökade med 3 % vid försöket VF beta uP.

Reduktionsgraden av både $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ vid försöken kan anses som relativt god. $\text{NH}_4\text{-N}$ reducerades något sämre än $\text{PO}_4\text{-P}$ vilket troligtvis innebär att fosfat fälldes som andra föreningar än struvit. Liknande skillnader är vanligt förekommande vid de satsvisa försök som rapporteras i litteraturen (se *Tabell 4*). Det är svårt att uttala sig om varför innehållet av $\text{NH}_4\text{-N}$ vid försöken med VF beta uP ökar. Möjligheten att fosfat bara fälls som andra föreningar än struvit och att $\text{NH}_4\text{-N}$ -innehållet i lösningen ökar av andra skäl kan inte uteslutas, men eftersom den maximalt möjliga minskningen av $\text{NH}_4\text{-N}$ är liten, är det vanskligt att dra sådana slutsatser baserat på så få försök.

RR/VF gödsel

Reduktionen av $\text{PO}_4\text{-P}$ -innehållet för RR gödsel P och VF gödsel P var hög, 96 respektive 83 %. Däremot sjönk innehållet av $\text{NH}_4\text{-N}$ bara med 22 respektive 16 %, vilket är en mindre sänkning än om allt $\text{PO}_4\text{-P}$ hade fällts som struvit och skulle kunna tyda på att fosfat även fällts som andra föreningar. I *Tabell 20* kan man se att kalciumkoncentrationen efter fällning för RR gödsel P är betydligt lägre än för RR gödsel uP, vilket skulle kunna tyda på att en del av fosfor i lösning fällts som kalciumfosfat snarare än som struvit.

Vid försöken utan fosfortillsats sjönk $\text{PO}_4\text{-P}$ -innehållet med 68 % för RR gödsel uP och 25 % för VF gödsel uP. För RR gödsel uP är detta nära det teoretiskt maximala (70 %), baserat på det magnesium som tillsattes, medan reduktionen teoretiskt kunde ha varit högre för VF gödsel uP. Underlaget är för litet för att kunna säga något om varför skillnaden uppstått. Reduktionen av $\text{NH}_4\text{-N}$ vid försöket med RR gödsel uP och VF gödsel uP var 6 respektive 5 %. Båda dessa värden är högre än det teoretiskt maximala (3 %), baserat på det tillsatta magnesiumet och innebär att ammoniumjoner måste ha adsorberats av det organiska materialet eller avgått som NH_3 , alternativt att skillnaden är så liten att osäkerheterna i utförandet och analyserna överskuggar resultatet.

Vid försöket VF gödsel P_omg2 är reduktionen av $\text{PO}_4\text{-P}$ mycket sämre än vid de övriga försöken, enbart 25 % och reduktionen av $\text{NH}_4\text{-N}$ är 17 %. Varför detta försök uppvisar ett sämre resultat än övriga försök utförda med RR/VF gödsel kan inte förklaras baserat på ett enda försök.

VF/RR drank

RR och VF drank är de lösningar som innehöll de klart högsta halterna $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ i lösning före fällning. Vid de inledande försöken med fosfortillsats (RR drank P och VF drank P) reducerades innehållet av $\text{PO}_4\text{-P}$ med 61 % för RR drank P och 95 % för VF drank P. I båda fallen var den teoretiska reduktionsgraden över 100 %. Vid dessa försök reducerades $\text{NH}_4\text{-N}$ med 17 % för RR drank P och 12 % för VF drank P. Den maximala reduktionsgraden av $\text{NH}_4\text{-N}$ -innehållet baserat på kemikalietillsatsen var 23 %, vilket pekar på att fällningen av struvit i detta fall fungerade relativt bra.

Försöket med RR drank uP uppvisade en ökning av $\text{PO}_4\text{-P}$. Förklaringen till det är troligtvis densamma som förklaringen till öknings beskrivna för de andra rötresterna. $\text{NH}_4\text{-N}$ i samma försök reducerades med 7 %. När försöken utfördes med VF drank uP minskade $\text{PO}_4\text{-P}$ - och $\text{NH}_4\text{-N}$ - innehållet med 55 respektive 3 % när försöken utfördes med VF drank uP. I båda dessa fall var den teoretiskt maximala reduktionen av $\text{PO}_4\text{-P}$ över 100 % och den maximala reduktionen av $\text{NH}_4\text{-N}$ 8 %.

Vid försöket VF drank P_omg2 reducerades hela 92 % av $\text{PO}_4\text{-P}$ -innehållet medan motsvarande reduktion av $\text{NH}_4\text{-N}$ var 65 %. Underlaget är för litet för att förklara varför $\text{NH}_4\text{-N}$ -reduktionen inte var högre, men resultatet indikerar ändå att man genom struvitfällning även kan reducera ammoniumkväve i relativt hög utsträckning. Detta försök var det enda försöket under vilket man verkligen kunde urskilja en tydlig fällningsprodukt. Det beror på kombinationen av att en stor mängd struvit bildades och att VF drank var en centrifugerad lösning, vilket med-

förde att lösningen inte var tjockflytande och att kristallerna därmed sedimenterade snarare än hölls kvar i lösning.

Sammanfattning av reduktionsgrader för VF/RR

Sammanfattningsvis för samtliga rötresters kan man säga att reduktionen av $\text{PO}_4\text{-P}$ vid försöken låg mellan 1 och 96 %. I många fall reducerades $\text{PO}_4\text{-P}$ med över 50 %. Högst reduktion uppnåddes för RR gödsel P (96 %), VF drank P (95 %), VF drank P_omg2 (92 %) och RR beta P (86 %).

Variationen av $\text{NH}_4\text{-N}$ -reduktion är större, och inte vid något försök med fosfortillsats har ammoniumkvävet reducerats i lika stor omfattning som $\text{PO}_4\text{-P}$. Detta kan bero på flera olika orsaker. En trolig förklaring är att $\text{PO}_4\text{-P}$ har fällts i form av andra föreningar än just struvit. Det är även svårare att dra enkla slutsatser om ammoniumkvävet eftersom det interagerar så kraftigt med det organiska materialet och kan avgå som NH_3 vid de pH-värden som är aktuella för struvitfällning. Motsvarande skillnader mellan reduktionsgraderna av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ redovisas i litteraturen (se *Tabell 4*). Vid några av försöken kan man tydligt se att struvitfällning fungerade bra då reduktionen av både $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ var hög, exempelvis vid försöken RR beta P (86 respektive 59 %), VF beta P (87 respektive 52 %) samt VF drank P_omg2 (92 respektive 65 %).

Vid vissa försök visar resultaten att $\text{PO}_4\text{-P}$ - respektive $\text{NH}_4\text{-N}$ -innehållet ökar under försökets gång. När det gäller $\text{NH}_4\text{-N}$ skulle man teoretiskt kunna förklara ökningen med att organiskt bundet $\text{NH}_4\text{-N}$ frisläppts till lösningen. Mer troligt är att ökningarna för båda jonslagen, som främst förekommit vid försök där mycket lite struvit har bildats, beror på att osäkerheter vid analyserna och utförandet över-skuggar möjligheten att detektera en liten förändring. Trots att RR och VF skakats inför varje försök kan man inte förhindra att det förekommer variationer i innehållet i olika prover tagna från samma dunk av så komplext sammansatta material som rötresters.

Jämfört med de försök som utfördes på syntetiska lösningar är reduktionsgraderna sämre vid försöken med RR och VF. Detta beror på att fällning i RR/VF sker i en mycket komplex matris med stark inverkan av organiskt material samt konkurrerande jonslag och jämvikter. Liknande skillnader är beskrivna i litteraturen och reduktionsgraderna av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ i denna studie är klart jämförbara med de reduktionsgrader som uppmätts vid motsvarande försök i litteraturen (se *Tabell 4*).

Fällningsprodukterna

Efter torkning av bottensatsen i de flesta försök utförda med VF kunde man urskilja en fällningsprodukt bestående av två lager; ett undre lager av gråfärgad fällning (troligtvis innehållande struvit) och ett övre tunt, mörkt lager av organiskt material. Vid försöken med RR kunde man se motsvarande gråa lager, men här var det mer uppblandat med annat grövre material som härstammade från rötresten. *Figur 26* visar fällningsprodukter baserade på VF respektive RR drank. Motsvarande skillnader sågs för flera av de övriga rötresterna.



Figur 26. Fällningsprodukter från försöken VF drank P (till vänster) och RR drank P (till höger).

I Tabell 22 redovisas innehållet av näringsämnen och tungmetaller för de fyra olika fällningsprodukterna som analyserades (en för varje VF), sammansättningen i ren struvit samt Naturvårdsverkets gränsvärden för tungmetaller i slam vid spridning på jordbruksmark. Kväveinnehållet i de fyra fällningarna var 49-82 % av innehållet i struvit. Motsvarande för fosfor var 17-56 %. Utav de fyra analyserade produkterna överensstämmer fällningen från VF drank bäst med sammansättningen i en ren struvitprodukt. Innehållet av fosfor i fällningarna ligger nära fosforinnehållet i flera sammansatta gödselmedel, exempelvis NPK 21:4:7 (vikts%-andelar), medan innehållet av kväve är betydligt lägre.

Jämfört med en ren struvitprodukt är innehållet av N för högt relativt innehållet av P i samtliga fall. Endast i fällningen från VF drank är P-innehållet större än N-innehållet. Innehållet av kol i de analyserade produkterna är relativt högt vilket tyder på att fällningsprodukterna innehåller en hel del organiskt material och det är troligt att en del av kvävet också härstammar från det organiska materialet. Men det räcker inte som förklaring eftersom kväveinnehållet faktiskt är störst i fällningen från VF drank som innehåller betydligt mindre organiskt material jämfört med de övriga tre analyserade fällningarna. Det innebär att en del av kvävet i fällningarna sannolikt föreligger som andra oorganiska former än struvit, som till exempel nitrater.

Innehållet av tungmetaller är i samtliga fall mycket lågt jämfört med Naturvårdsverkets gränsvärden för slam vid spridning på jordbruksmark (Statistiska meddelanden, 2010). För kadmium är innehållet 0,8-13 % av tillåten koncentration och för kvicksilver är motsvarande innehåll 0,2-1,9 %. De låga siffrorna gäller för fällningen från VF drank. Observera att gränsvärdena gäller för mg/kg TS, det vill säga efter torkning till 105 °C. Eftersom fällningarna torkats vid max 40 °C innebär det att tungmetallhalterna är något lägre än de skulle ha varit efter torkning till 105 °C.

I Tabell 24 redovisas innehållet av tungmetaller som mg/kg P i jämförelse med medelvärden för olika konstgödselprodukter från en studie av Eriksson (2001). Värdena för fällningen från VF drank är i samma storleksordning som för NPK, utom för koppar och zink där fällningen har tydligt högre värden. Koppar och zink är dock båda näringsämnen som växterna behöver i låga koncentrationer i motsats till de övriga metallerna. Ett visst innehåll av dem är mer till nytta än skada i ett gödselmedel och många sammansatta gödselmedel innehåller betydligt mer koppar och zink.

De högre halterna av tungmetaller i de övriga fällningarna beror sannolikt på det högre innehållet av organiskt material i dessa. Tungmetallerna har hög affinitet för organiskt material och koncentrationen av dessa förväntas därför vara högre vid ett högre organiskt innehåll. Det innebär också att åtgärder som minskar det organiska innehållet i en fällningsprodukt samtidigt ger lägre tungmetallinnehåll.

Produkten diskuteras ytterligare i *Kapitel 13. Fällningarnas värde som gödselmedel*.

Tabell 22. Sammansättning (i vikts% och mg/kg) i analyserade fällningsprodukter, i en ren struvitprodukt, samt Naturvårdsverkets gränsvärden för tungmetaller i slam vid spridning på jordbruksmark. Källa: Statistiska meddelanden (2010).

	N [%]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	C [%]	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Zn [mg/kg]
Fällning VF hushåll P	3,9	2,4	2,7	2,1	1,1	19,9	1,8	0,15	5,64	29,9	0,04	5,35	146,5
Fällning VF beta P	2,8	3,2	7,6	3,7	1,3	18,9	1,2	0,26	19,17	13,2	0,05	5,34	41,5
Fällning VF gödsel P	3,5	2,2	4,8	2,2	1,5	22,5	0,6	0,26	3,00	97,9	0,02	4,08	327,7
Fällning VF drank P	4,7	7,1	4,0	6,1	0,03	5,3	0,5	0,02	2,05	1,9	0,01	1,61	10,9
Struvit	5,7	12,7		9,8									
Gränsvärden								2*	100*	600*	2,5*	50*	800*

* anges i mg/kg TS

Tabell 23. Innehållet av tungmetaller i analyserade fällningsprodukter och medelvärden av tungmetallinnehåll för olika sammansatta konstgödselprodukter (NPK) (i mg/kgP). Källa: Eriksson (2001).

	Cd [mg/kg P]	Cr [mg/kg P]	Cu [mg/kg P]	Hg [mg/kg P]	Ni [mg/kg P]	Zn [mg/kg P]
Fällning VF hushåll P	6	231	1224	2	219	6005
Fällning VF beta P	8	595	409	1	166	1289
Fällning VF gödsel P	12	138	4501	1	188	15063
Fällning VF drank P	0,2	29	27	0,1	23	153
Medelvärden för NPK	0,24	37	6,9	0,04	22	76

11.3 STRIPPING

CO₂-strippingen som utfördes på rötresterna medförde en tydlig pH-höjning för samtliga lösningar. Efter 20 minuters stripping uppnåddes dock inte pH 8,5, men det innebar en relativt stor reducering av NaOH-tillsats.

Tabell 24 visar pH-värdena före och efter stripping, NaOH-tillsatsen per liter samt vilken procentuell reduktion av NaOH-tillsats strippingen gav. För rådata, se Appendix 7. *pH-värden och NaOH-tillsatser för strippingförsöken.*

Siffrorna visar att pH höjdes relativt mycket enbart med hjälp av CO₂-stripping. Som en följd av detta går det också att se att en betydligt mindre mängd NaOH krävdes för dessa lösningar för att höja pH till 8,5. NaOH-tillsatserna reducerades med 57 % för RR hushåll, 67 % för RR beta, 30 % för RR gödsel, och 47 % för RR drank.

Tabell 24. Tabellen visar pH-värdena före och efter stripping, hur mycket NaOH som behövde tillsättas per liter lösning för att pH skulle nå 8,5 samt vilken reduktion av NaOH-tillsats strippingen gav.

	pH vid start [-]	pH efter stripping [-]	Tillsatt NaOH [mL]	Reduktion av NaOH-tillsats [%]
RR hushåll med stripping	7,68	8,16	13	57
RR hushåll utan stripping	7,68	-	30	
RR beta med stripping	6,36	7,02	5	67
RR beta utan stripping	6,37	-	15	
RR gödsel med stripping	7,65	7,95	23	30
RR gödsel utan stripping	7,65	-	33	
RR drank med stripping	7,79	8,21	20	47
RR drank utan stripping	7,79	-	38	

12. KOSTNADSUPPSKATTNING

Utifrån de laborativa försöken i denna studie presenteras i detta kapitel en uppskattning av kemikaliekostnaderna om processerna skulle utföras i stor skala. Vid en uppskalning tillkommer investerings- och driftskostnader etc., men i denna rapport beräknas *enbart kemikaliekostnaderna*. Baserat på tillsatserna i de satsvisa försöken med våtfaserna beräknades kostnaderna för $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ samt NaOH . Dessutom uppskattades kostnaderna för att använda H_3PO_4 som fosforkälla.

Det är viktigt att poängtera att detta är en *grov uppskattning* som enbart baserar sig på kemikalietillsatserna vid de i sammanhanget fåtal laborativa försök som utförts i denna studie. För att kunna ge en mer reell kostnadsbild skulle försöken behöva optimeras för respektive rötrest samt utföras i pilotskala.

Uppskalningen baserades på struvitfällning med tillsatt fosforkälla, både i form av $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ och H_3PO_4 för samtliga fyra rötresten. Dessutom uppskattades kemikaliekostnaderna för försöket med VF drank utan fosfortillsats. Vid övriga försök utan fosfortillsats visade sig kemikalietillsatserna vara för låga för att kunna reducera allt fosfor. Det ansågs därför inte meningsfullt att beräkna kostnader baserat på dessa försök. Syftet med att tillsätta fosforkälla är att man kan reducera allt ammoniumkväve i rötresterna. Kemikalietillsatserna blir mycket större, men skulle eventuellt kunna vägas upp mot att mer struvitprodukt erhålls och att man slipper kostnader för att hantera överskottet av ammoniumkväve.

Kemikalietillsatserna i uppskalningen av försöken med fosfortillsats baserades på de satsvisa försöken med våtfaserna i den andra försöksomgången (VF hushåll P_{omg2} , VF gödsel P_{omg2} , VF drank P_{omg2}), förutom för beta, där tillsatserna från försök VF beta P användes. I fallet utan fosfortillsats, för drank, baserades kemikalietillsatserna på VF drank uP (se *Tabell 19*).

Kostnadsuppskattningen för att använda H_3PO_4 som fosfortillsats utfördes genom att beräkna hur mycket H_3PO_4 den tillsatta mängden $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ motsvarade. Vid användning av H_3PO_4 som fosforkälla tillkommer dessutom en ökad NaOH -tillsats, enligt *Kapitel 11.2.1 Syntetiska lösningar*.

Då kemikalietillsatserna är baserade på värden från de satsvisa försöken med våtfaser innebär det att uppskalningen och kostnadsuppskattningen för NaOH gäller för att höja pH till 8,5.

Kostnaderna för kemikalierna jämfördes med hur mycket struvit som teoretiskt var möjligt att få ut från respektive våtfas, och inte den mängd som erhöles vid respektive försök. Ett utbyte på 80 % antogs.

Tabell 25 visar prisuppgifter från Brenntag Nordic AB för kemikalierna som använts i denna studie⁷. Då prisuppgifter för $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ inte gick att få tag på

⁷ Priserna från Brenntag Nordic AB är riktpriiser och gäller bara som indikation. Priserna är framtagna baserat på följande årsförbrukningar; 8500 ton $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 5000 ton $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,

används priset för $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, vilket antas vara likvärdigt med priset för $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ i denna kostnadsuppskattning. Observera att priserna är exklusive frakt och eventuell hyra för IBC-container⁸.

Tabell 25. Prisuppgifter för tillsatskemikalierna.

	Pris [kr/kg]
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	17,50
H_3PO_4 (85 vikts %)	8,95
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3,95
NaOH (45 vikts %)	3,25

Kostnadsuppskattningen i detta kapitel är uppdelad i två delar. Den första delen tar hänsyn till hur mycket rötrest som produceras vid respektive biogasanläggning idag. Kemikaliekostnaderna för respektive rötrest beräknades baserat på denna kapacitet. I den andra delen beräknades kemikaliekostnaderna baserat på en bestämd storlek på anläggning; 100 000 $\text{m}^3/\text{år}$, så att resultaten för de olika rötresterna kan jämföras.

12.1 INDIVIDUELLA FULLSKALEANLÄGGNINGAR

Tabell 26 visar hur stora mängder rötrest de fyra anläggningarna i studien producerar per år (då ingen uppgift fanns för pilotskaleanläggningen för beta antogs en kapacitet på 5000 m^3 per år).

Tabell 26. Tabellen visar hur mycket rötrest som produceras från de fyra anläggningarna i dagsläget.

Anläggning	Dominerande substrat	Producerad rötrest per år
NSR, Helsingborg	Hushåll	67 000 m^3
E.ON, Knisslinge	Beta	5 000 m^3 *
E.ON, Falkenberg	Gödsel	100 000 ton
Swedish Biogas International, Norrköping	Drank	16 000 ton

*Uppskattat värde

I Tabell 27 visas de uppskalade kemikalietillsatserna samt den mängd struvit som kan produceras för struvitfällning utan fosfortillsats för drank.

Tabell 27. Kemikalietillsatser per år för struvitfällning utan fosfortillsats för drank baserat på den individuella anläggningsstorleken.

	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [ton/år]	NaOH (45 vikts %) [ton/år]	Producerad struvit [ton/år]
Drank	86,7	85,3	64,4

3500 ton H_3PO_4 samt 3000 ton NaOH . Prisuppgifterna gäller för $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ och $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ som 25 kg säckar, samt för H_3PO_4 och NaOH som 1350 respektive 1160 kg IBC-containerar.

⁸ Gäller för H_3PO_4 och NaOH .

Utifrån värdena i *Tabell 25* och *Tabell 27* kunde sedan den årliga kostnaden för varje kemikalie beräknas. Se *Tabell 28*. Där kan även den totala kemikaliekostnaden utläsas.

Tabell 28. Kemikaliekostnader per år för struvitfällning utan fosfortillsats för drank baserat på den individuella anläggningsstorleken.

	MgCl₂•6H₂O [kr/år]	NaOH (45 vikts %) [kr/år]	Totalt [kr/år]
Drank	342 000	277 000	619 000

Tabell 29 och *Tabell 30* visar kemikalietillsatser respektive kemikaliekostnader per år för varje anläggning för struvitfällning med NaH₂PO₄•2H₂O som fosfortillsats, baserat på de individuella anläggningsstorlekarna. *Tabell 29* visar dessutom hur mycket struvit som kan produceras.

Tabell 29. Kemikalietillsatser per år för struvitfällning med NaH₂PO₄•2H₂O som fosfortillsats baserat på individuella anläggningsstorlekar.

	NaH₂PO₄•2H₂O [ton/år]	MgCl₂•6H₂O [ton/år]	NaOH (45 vikts %) [ton/år]	Producerad struvit [ton/år]
Hushåll	1 500	2 690	727	1 200
Beta	8,04	14,8	17,8	11,0
Gödsel	2 430	4 290	1 390	3 190
Drank	742	1 350	442	1 000

Tabell 30. Kemikaliekostnader per år för struvitfällning med NaH₂PO₄•2H₂O som fosfortillsats baserat på individuella anläggningsstorlekar.

	NaH₂PO₄•2H₂O [kr/år]	MgCl₂•6H₂O [kr/år]	NaOH (45 vikts %) [kr/år]	Totalt [kr/år]
Hushåll	26 300 000	10 600 000	2 360 000	39 300 000
Beta	141 000	58 500	57 900	257 000
Gödsel	42 500 000	16 900 000	4 520 000	63 900 000
Drank	13 000 000	5 330 000	1 440 000	19 800 000

I *Tabell 31* jämförs fosfortillsatserna NaH₂PO₄•2H₂O och H₃PO₄ (85 vikts%). De mängder H₃PO₄ som visas i tabellen är de mängder som motsvarar tillsatsen av fosforsaltet, det vill säga som innehåller lika många mol P som NaH₂PO₄•2H₂O-tillsatsen.

Tabell 31. Jämförelse mellan kemikalietillsatser och kemikaliekostnader mellan NaH₂PO₄•2H₂O och H₃PO₄ baserat på individuella anläggningsstorlekar.

	NaH₂PO₄•2H₂O [ton/år]	NaH₂PO₄•2H₂O [kr/år]	H₃PO₄ (85 vikts %) [ton/år]	H₃PO₄ (85 vikts %) [kr/år]
Hushåll	1 500	26 300 000	1 110	9 930 000
Beta	8,04	141 000	5,94	53 200
Gödsel	2 430	42 500 000	1 800	16 100 000
Drank	742	13 000 000	549	4 910 000

Genom att jämföra kostnaderna för de två fosforkällorna i *Tabell 31* är det tydligt att fosforsyra är det billigare alternativet. Från *Kapitel 11.2.1 Syntetiska lösningar* är det dock känt att fosforsyra sänker pH mer jämfört med $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, vilket medför att mer NaOH måste tillsättas för att höja pH till 8,5. För att kunna jämföra de totala kostnaderna för de två alternativen beräknades den extra mängd NaOH som skulle behöva tillsättas för att nå samma pH. I beräkningarna antogs att 55 % mer NaOH behövde tillsättas då fosforsyra användes som fosfortillsats (se *Kapitel 11.2.1 Syntetiska lösningar*). I *Tabell 32* visas hur stora NaOH-tillsatser som krävs då H_3PO_4 används som fosforkälla. I samma tabell sammanställs de totala kemikalietillsatserna för H_3PO_4 och $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, samt hur stor mängd struvit som kan bildas för respektive rötrest. *Tabell 33* visar kemikaliekostnaderna då H_3PO_4 används som fosfortillsats.

Tabell 32. Kemikalietillsatser per år för struvitfällning med H_3PO_4 som fosfortillsats baserat på individuella anläggningsstorlekar.

	H_3PO_4 (85 vikts %) [ton/år]	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [ton/år]	NaOH (45 vikts %) [ton/år]	Producerad struvit [ton/år]
Hushåll	1 110	2 690	1 130	1 200
Beta	5,94	14,8	27,6	11,0
Gödsel	1 800	4 290	2 150	3 190
Drank	549	1 350	685	1 000

Tabell 33. Kemikaliekostnader per år för struvitfällning med H_3PO_4 som fosfortillsats baserat på individuella anläggningsstorlekar.

	H_3PO_4 (85 vikts %) [kr/år]	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [kr/år]	NaOH (45 vikts %) [kr/år]	Totalt [kr/år]
Hushåll	9 930 000	10 600 000	3 660 000	24 200 000
Beta	53 200	58 500	89 700	201 000
Gödsel	16 100 000	16 900 000	7 000 000	40 000 000
Drank	4 910 000	5 330 000	2 230 000	12 500 000

12.2 GENERELL FULLSKALEANLÄGGNING

På samma sätt som i föregående kapitel beräknades kemikalietillsatser och kemikaliekostnader för de olika rötresterna. För att kunna jämföra tillsatserna och kostnaderna rötresterna emellan utfördes samtliga beräkningar denna gång på en anläggningskapacitet av $100\,000\text{ m}^3$ rötrest per år.

I *Tabell 34* och *Tabell 35* visas de uppskalade kemikalietillsatserna, den mängd struvit som kan produceras samt kemikaliekostnaderna för struvitfällning utan fosfortillsats för drank baserat på en fullskaleanläggning på $100\,000\text{ m}^3/\text{år}$.

Tabell 34. Kemikalietillsatser per år för struvitfällning utan fosfortillsats för drank baserat på en fullskaleanläggning på $100\,000\text{ m}^3/\text{år}$.

	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [ton/år]	NaOH (45 vikts %) [ton/år]	Producerad struvit [ton/år]
Drank	542	533	403

Tabell 35. Kemikaliekostnader per år för struvitfällning utan fosfortillsats för drank baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år.

	MgCl₂•6H₂O [kr/år]	NaOH (45 vikts %) [kr/år]	Totalt [kr/år]
Drank	2 140 000	1 730 000	3 870 000

Tabell 36 och Tabell 37 visar kemikalietillsatser respektive kemikaliekostnader per år för respektive rötrest för struvitfällning med NaH₂PO₄•2H₂O som fosfortillsats, baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år. Tabell 36 visar också vilken mängd struvit som kan produceras för varje rötrest.

Tabell 36. Kemikalietillsatser per år för struvitfällning med NaH₂PO₄•2H₂O som fosfortillsats baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år.

	NaH₂PO₄•2H₂O [ton/år]	MgCl₂•6H₂O [ton/år]	NaOH (45 vikts %) [ton/år]	Producerad struvit [ton/år]
Hushåll	2 240	4 010	1 080	2980
Beta	161	296	356	220
Gödsel	2 430	4 290	1 390	3 190
Drank	4 640	8 460	2 760	6 280

Tabell 37. Kemikaliekostnader per år för struvitfällning med NaH₂PO₄•2H₂O som fosfortillsats baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år.

	NaH₂PO₄•2H₂O [kr/år]	MgCl₂•6H₂O [kr/år]	NaOH (45 vikts %) [kr/år]	Totalt [kr/år]
Hushåll	39 200 000	15 800 000	3 510 000	58 500 000
Beta	2 820 000	1 170 000	1 160 000	5 150 000
Gödsel	42 500 000	16 900 000	4 520 000	63 900 000
Drank	81 200 000	33 400 000	8 970 000	124 000 000

I Tabell 38 jämförs fosfortillsatserna NaH₂PO₄•2H₂O och H₃PO₄ (85 vikts%) för de olika rötresterna för en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år.

Tabell 38. Jämförelse mellan kemikalietillsatser och kemikaliekostnader mellan NaH₂PO₄•2H₂O och H₃PO₄ baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år.

	NaH₂PO₄•2H₂O [ton/år]	NaH₂PO₄•2H₂O [kr/år]	H₃PO₄ (85 vikts %) [ton/år]	H₃PO₄ (85 vikts %) [kr/år]
Hushåll	2 240	39 200 000	1 650	14 800 000
Beta	161	2 820 000	119	1 070 000
Gödsel	2 430	42 500 000	1 800	16 100 000
Drank	4 640	81 200 000	3 430	30 700 000

Tabell 39 och Tabell 40 visar kemikalietillsatser respektive kemikaliekostnader per år för respektive rötrest för struvitfällning med H₃PO₄ som fosfortillsats, baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år. NaOH-tillsatsen är justerad för den extra pH-sänkning som tillsatsen av H₃PO₄ medför. Tabell 39 visar dessutom hur stor mängd struvit som kan produceras för varje rötrest.

Tabell 39. Kemikalietillsatser per år för struvitfällning med H_3PO_4 som fosfortillsats baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år.

	H₃PO₄ (85 vikts %) [ton/år]	MgCl₂•6H₂O [ton/år]	NaOH (45 vikts %) [ton/år]	Producerad struvit [ton/år]
Hushåll	1 650	4 010	1 670	2980
Beta	119	296	552	220
Gödsel	1 800	4 290	2 150	3 190
Drank	3 430	8 460	4 280	6 280

Tabell 40. Kemikaliekostnader per år för struvitfällning med H_3PO_4 som fosfortillsats baserat på en fullskaleanläggning på 100 000 m³/år.

	H₃PO₄ (85 vikts %) [kr/år]	MgCl₂•6H₂O [kr/år]	NaOH (45 vikts %) [kr/år]	Totalt [kr/år]
Hushåll	14 800 000	15 800 000	5 440 000	36 000 000
Beta	1 070 000	1 170 000	1 790 000	4 030 000
Gödsel	16 100 000	16 900 000	7 000 000	40 000 000
Drank	30 700 000	33 400 000	13 900 000	78 000 000

12.3 DISKUSSION

Från beräkningarna med individuella fullskaleanläggningar för varje rötrest, baserat på hur mycket rötrest respektive biogasanläggning producerar idag, följer kemikaliekostnaderna storleken på anläggningen. Anläggningen med rötrest från gödsel blir dyrast. Därefter kommer anläggningen för hushåll, drank och sist beta.

Då storleken på fullskaleanläggningen bestämdes till 100 000 m³/år för samtliga rötresten blev dranken istället den anläggning med dyrast kemikaliekostnader. Därefter kom gödsel, hushåll och sist beta.

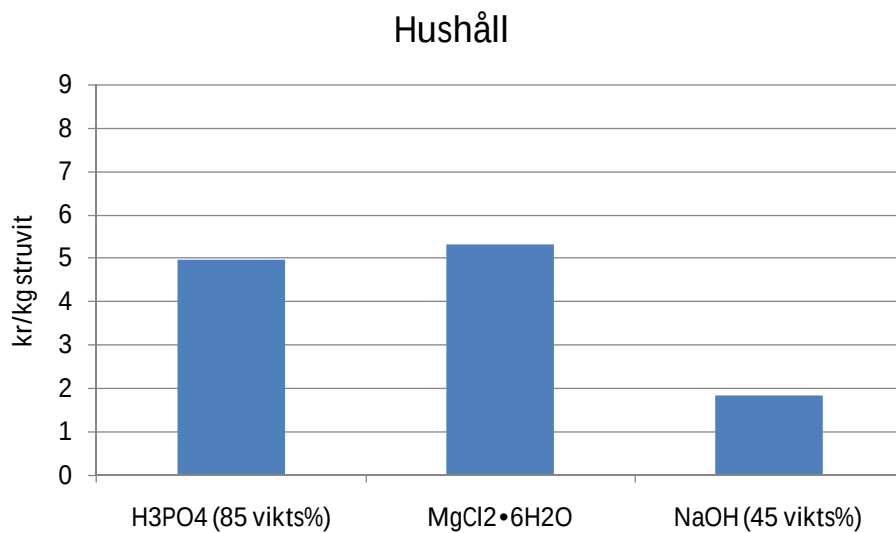
För att kunna dra några slutsatser kring kemikaliekostnaderna måste hänsyn tas till hur mycket struvit som kan produceras. *Tabell 41* visar den totala kemikaliekostnaden per kilo struvit för alla tre processalternativ.

Tabell 41. Tabellen visar kemikaliekostnaderna per mängd producerad struvit för de olika rötresterna.

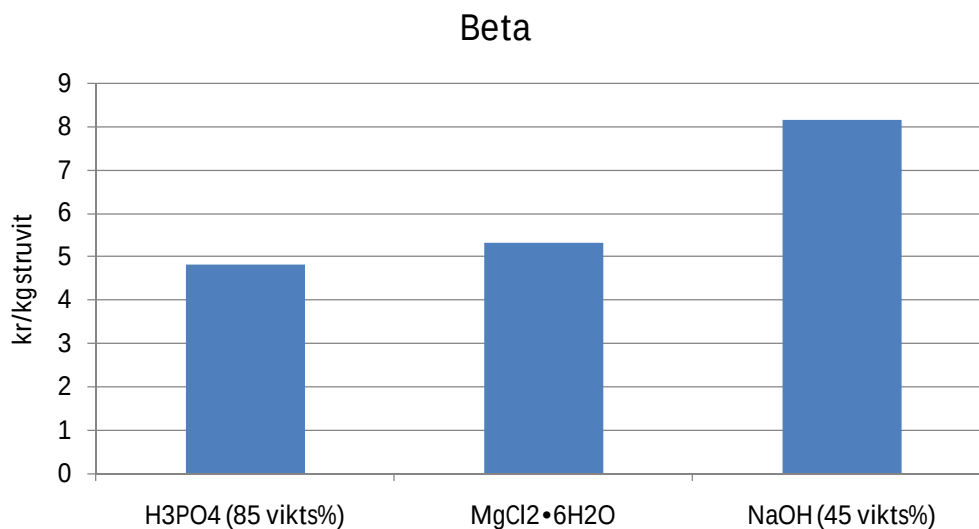
	Kemikaliekostnad per kg producerad struvit [kr/kg struvit]		
	Struvitfällning utan fosfortillsats	Struvitfällning med NaH₂PO₄•2H₂O	Struvitfällning med H₃PO₄
Hushåll	-	19,6	12,1
Beta	-	23,4	18,3
Gödsel	-	20,0	12,5
Drank	9,6	19,8	12,5

Från *Tabell 41* kan det utläsas att kemikaliekostnaderna för struvitfällning från hushåll, gödsel och drank generellt är ungefär lika stora per kilo producerad struvit. Kostnaderna för beta ligger något högre. Vid jämförelse mellan de två olika fosfortillsatserna är, som visats tidigare, fosforsyra det billigare alternativet. Kostnaden för drank vid struvitfällning utan fosfortillsats är lägst.

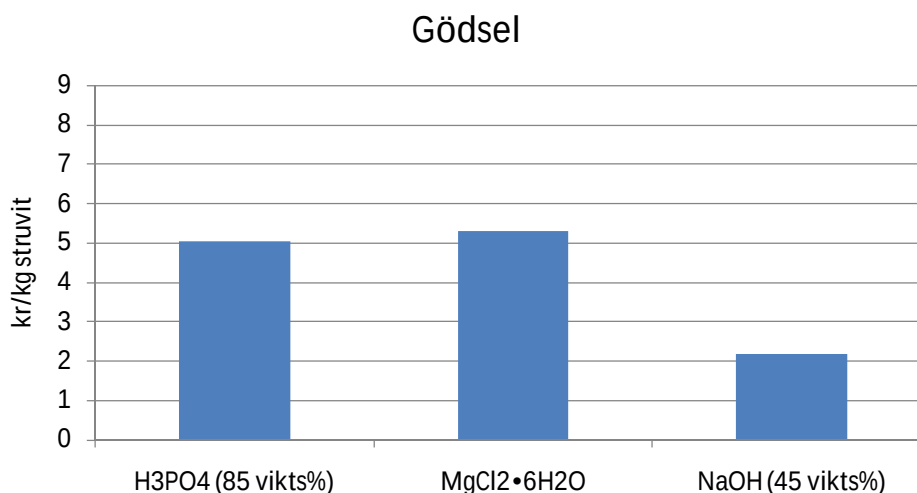
Figur 27 till Figur 30 visar kostnaderna för varje kemikalie per kilo producerad struvit, med fosforsyra som fosfortillsats (då denna är mer lämplig än $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ att använda i storskala), för de olika rötresterna. Figur 30 visar även kemikaliekostnaderna för struvitfällning utan fosfortillsats för drank (gula staplar).



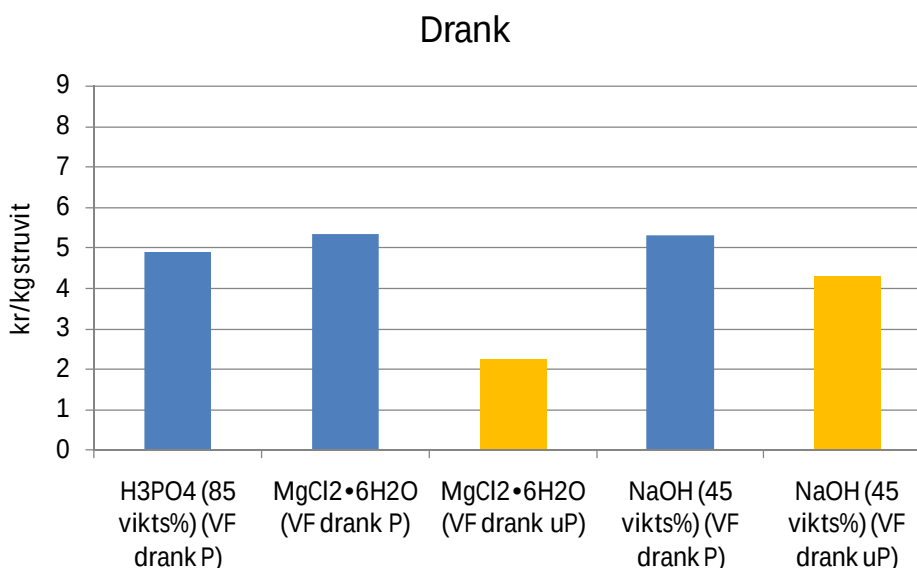
Figur 27. Kemikaliekostnader per kilo producerad struvit för hushåll med fosfattillsats.



Figur 28. Kemikaliekostnader per kilo producerad struvit för beta med fosfattillsats.



Figur 29. Kemikaliekostnader per kilo producerad struvit för gödsel med fosfattillsats.



Figur 30. Kemikaliekostnader per kilo producerad struvit för drank med respektive utan fosfortillsats.

Figuren visar att kostnaderna för H₃PO₄ och MgCl₂•6H₂O per kilo producerad struvit ligger på ungefär samma nivå för samtliga rötrest. Kostnaden för NaOH däremot varierar mycket. För hushåll och gödsel är kostnaden relativt låg (ca en tredjedel jämfört med fosfor- och magnesiumtillsatserna) och för beta står NaOH-tillsatsen för den största kostnaden (ca 30 % mer än övriga tillsatser). För drank med fosfortillsats ligger kostnaderna för samtliga tre kemikalietillsatser på ungefär samma nivå. För struvitfällning med drank utan fosfortillsats sjunker magnesiumkostnaden till en tredjedel jämfört med vad det skulle kosta med fosfortillsats. Kostnaden för NaOH blir också något lägre utan fosfortillsats.

Slutligen bör det påpekas ytterligare en gång att denna kostnadsuppskattning är *väldigt grov* och enbart baserad på de *fåtal försök* i laborativ skala som utförts i denna studie.

13. FÄLLNINGARNAS VÄRDE SOM GÖDSELMEDEL

Det kommersiella värdet på ett gödselmedel beror på flera faktorer, som till exempel innehållet av kväve, fosfor och andra näringsämnen, fördelningen mellan näringsämnen och växttillgängligheten. Bland sammansatta gödselmedel, det vill säga gödselmedel som innehåller flera näringsämnen, är olika kombinationer av kväve, fosfor och kalium, NPK, helt dominerande. Eftersom kväve behövs i störst mängd och drar mycket energi i framställningen och råvaran för fosfor, apatit, är dyr är det främst innehållet av kväve och fosfor som styr prisnivån på lång sikt. Världsmarknadspriserna varierar men den långsiktiga trenden är en ökning, särskilt för fosfor (Cordell, 2009). Det beror på att tillgången på fosfor är ändlig och att fosfor inte är substituerbart, det vill säga det kan inte ersättas med ett annat alternativ så som till exempel biodrivmedel kan ersätta bensin. De globala fosforreserverna beräknas räcka i ca 80 år till, men sjunkande tillgång påverkar redan priset. Idag ligger priserna på ca 10 kr/kg kväve och 30 kr/kg fosfor (i färdig gödningsprodukt). Det innebär inte att man kan beräkna priset på ett sammansatt NP-gödselmedel genom att multiplicera N- respektive P-koncentrationen med 10 respektive 30 och summera. Priset för de vanligaste NPK-varianterna ligger idag på ca 3300 kr/ton. Det är tillgång och efterfrågan på de enskilda produkterna, inte på innehållet av N och P, som styr priset på kort sikt. Nischprodukter framtagna för en specifik sorts odling med begränsad marknad, eller för korrigering av näringsbrist i enskilda fall, har nästan alltid ett betydligt högre pris än vad som kan förväntas med utgångspunkt i näringsinnehållet. Det är alltid dyrare att producera och marknadsföra små jämfört med stora mängder och priskänsligheten hos konsumenter av specialprodukter är oftast lägre än för konsumenter av basprodukter, vilket ger en högre prissättning. Den begränsade konkurrenssituationen på gödselmarknaden i Sverige, med en leverantör som har ca 70 % av marknaden, innebär också ett högre prisläge än globalt.

Fördelningen i NPK brukar vara 18-27 % N, 3-5 % P och 3-10 % K. Det innebär ett betydligt högre kväveinnehåll, ett ungefär lika stort fosforinnehåll och ett något högre kaliuminnehåll än i fällningen från drank, som hade det högsta näringsinnehållet av de analyserade fällningarna från de laborativa försöken i denna studie (se *Tabell 22*). Detta innebär att en produkt med samma fördelning av NPK som i fällningsprodukterna i denna studie kommer att behöva kompletteras med exempelvis en ren kvävegödslingsprodukt i de odlingssystem där den nyttjas. Därför är det också svårt att beräkna ett marknadspris på en produkt med en näringsammansättning som i dessa fällningsprodukter. De struvitprodukter som finns på marknaden idag, till exempel Ostaras Crystal Green®, har ett betydligt högre pris än de konventionella alternativ som finns. Produkterna marknadsförs i första hand för konsumtion inom nischade segment, exempelvis för parkskötsel, och inte för den, i konsumerade ton räknat, helt dominerande jordbruksmarknaden. Om man istället använder fälld struvit/apatit som råvara för produkter med en näringsammansättning som ligger betydligt närmare dagens konventionella konstgödselmedel, blir prisbedömningen något enklare, men det finns andra faktorer som kommer att ha stor betydelse, inte minst miljöprofilen.

På grund av sin miljöprofil kommer det sannolikt att vara möjligt att ha en högre prissättning på struvit/apatit-baserade gödselmedel jämfört med konventionella.

Hur hög denna så kallade miljöpremien kan vara är mycket svårt att förutsäga i dagsläget. De ”miljövänliga” alternativ som finns på marknaden idag innehåller en stor organisk fraktion, till exempel torkad hönsgödsel, med betydligt lägre näringskoncentrationer och näringsämnen i andra kemiska former än i konstgödsel. Dessutom är marknaden för sådana alternativ så liten i förhållande till konstgödselmarknaden att det är svårt att göra en marknadsmässig jämförelse. Detta gör sammantaget att prisbilden för dagens ”miljöprodukter” knappast är relevant vid värdering av struvit/apatit-baserade alternativ.

Miljöprofilen är sannolikt olika viktigt i olika kundsegment. Om man väljer att sälja en produkt på en marknad där miljöprofilen har stor betydelse för kundens val kommer man sannolikt att kunna ta ut ett betydligt högre pris än på marknader där kunden är mindre villig att betala miljöpremien.

Struvit har ofta betecknats som en så kallad ”*slow release fertilizer*”, vilket antyder att näringen frigörs långsamt ur produkten. Orsaken till beteckningen är sannolikt att struvit är en kristallin förening med låg löslighet i vatten. Av detta drar man slutsatsen att växttillgängligheten är låg jämfört med de flesta NPK-alternativ som enkelt kan lösas upp i vatten. Men det finns inget enkelt samband mellan hur löslig produkten är i vatten och hur växttillgänglig näringen i den är. I de försök som gjorts har man inte funnit någon skillnad i växters fosforupptag vid gödsling med struvit jämfört med konventionella fosforgödselmedel (Cabeza Pérez m.fl., 2009) (se Kapitel 4.3.2 *Värdet av struvit som gödselprodukt*). Det verkar alltså som att växterna i försöken kunde tillgodogöra sig fosfor ur struviten lika bra som fosfor ur vattenlöslig NPK. Men tidsfaktorn, alltså hur lång tid odlingsförsöken löper och därmed hur lång tid som finns tillgänglig för upplösning av tillförd produkt, kan vara avgörande för resultatet. Det är troligt att i försök med kort responstid, det vill säga tiden mellan näringstillförseln i odlingsförsöket och uppmätt respons i växten, kommer produktens upplösningshastighet att vara mer utslagsgivande för resultatet än i försök med lång responstid. En bedömning av fosfors växttillgänglighet i en viss produkt är också beroende av markförhållanden och gröda. Det innebär att det behövs gödslingsförsök med olika kombinationer av jordtyp och gröda och med varierad tid mellan gödsling och mätning av respons (fosforupptag, tillväxt, m.m.) för att kunna säga något generellt om växttillgängligheten i en struvit/apatit-produkt jämfört med NPK. Men, det är sannolikt att produktens upplösningshastighet i många fall kommer att ha betydelse för växtresponsen. Stora, hårda kristaller av ren struvit kan ge mindre växttillgängligt fosfor på kort sikt jämfört med en porös granul eller pellets som framställts av mer finpartikulär struvit/apatit.

En struvitprodukt innehåller betydligt mer magnesium än NPK. Om man skulle gödsla kontinuerligt med enbart struvit skulle det innebära betydligt högre tillförsel av Mg än vid gödsling med olika NPK-alternativ eller biogödselalternativ, som till exempel obehandlad rötrest. Kan det då bli för mycket Mg vid upprepad gödsling med struvit så att växter eller mark skadas? Mg är ett näringsämne som växterna behöver i ganska låga koncentrationer, å andra sidan krävs mycket höga nivåer för att toxicitet ska uppstå och brist är betydligt vanligare än överskott. Trots det bör man inte helt avfärda risken för Mg-toxicitet eller markskador i avsaknad av försök. Men eftersom struvit sannolikt kommer att användas i kombination med andra gödselmedel, vilket kommer att ge en sammantaget betydligt lägre Mg-

tillförsel än om bara struvit hade använts, är det ändå osannolikt att problem orsakade av högt Mg-innehåll ska uppstå.

Lågt innehåll av tungmetaller i en struvit/apatit-baserad produkt kommer att vara avgörande för avsättningsmöjligheterna. Hög belastning av främst kadmium är ett problem på jordbruksjordar som brukats/gödslats länge. Det beror på att det medföljer kadmium med fosforråvaran vid produktion av NPK. Idag finns därför gränsvärden för innehållet av kadmium och andra näringsämnen. Flera av tungmetallerna har hög affinitet för organiskt material, därför ökar risken för högt tungmetallinnehåll i produkter med hög organisk halt. Ju högre tungmetallinnehåll i råvaran för struvitframställning är desto viktigare är det att avskilja organiskt material före fällning. Försöken i denna studie visar att det med mycket enkel teknik är möjligt att producera struvit/apatit med mycket lågt tungmetallinnehåll (se *Tabell 22*). Det är sannolikt att tungmetallinnehållet inte kommer att vara ett större problem vid produktion av struvit/apatit-baserade produkter ur de flesta rötresten.

14. SLUTSATSER

I takt med att intresset för att återvinna den ändliga resursen fosfor ökat har struvitfällning blivit väldokumenterat i litteraturen under det senaste decenniet. De mekanismer som påverkar fällning är väl kartlagda. Ett stort antal lab- och pilot-skaleförsök med struvitfällning finns dokumenterat i den vetenskapliga litteraturen. Försöken visar att struvit kan fällas ur avvattnad och icke avvattnad rötrest från VA-verk, rötrest från rötning av gödsel, urin, processvatten från exempelvis livsmedelsindustrin samt lakvatten från deponier.

Att ett tiotal fullskaletekniker för struvitfällning finns, eller har funnits, på VA-anläggningar i Europa (Tyskland, Belgien, Nederländerna och Italien) samt i Kanada och Japan antyder att processen är, eller har bedömts vara, ett kostnadseffektivt alternativ för hantering av näringsrika restflöden. Det understryks ytterligare av att några av de kommersiella anläggningarna producerar och säljer gödselprodukter.

I den laborativa delen av denna studie visades att det var mycket enkelt att få struvitfällning i syntetiska lösningar. Struvitutbytet blev högt och reduktionsgraden av $\text{PO}_4\text{-P}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ likaså, vilket var förväntat då lösningarna inte innehöll så mycket störande joner.

Jämfört med de syntetiska lösningarna är rötresterna oerhört komplexa. Den stora variationen i hur väl fällningarna fungerade för att reducera kväve och fosfor ur rötresterna illustrerar att olika rötrest kan ha mycket olika egenskaper samt att det är viktigt att anpassa processen efter varje rötrest. Därav följer att noggrann karakterisering av rötrest är avgörande för utfallet vid fällning. Från försöken kunde man se att $\text{PO}_4\text{-P}$ generellt reducerades i högre grad än $\text{NH}_4\text{-N}$. Sådana skillnader är även vanligt förekommande i litteraturen. Möjliga förklaringar är att närvaron av organiskt material stör fällningsprocessen, att fosfor och kväve faller som annat än struvit (exempelvis kalciumfosfater och nitrater) samt att kväve kan avgå som ammoniak.

I rapporten diskuterades det angående valet av analysmetod vid analys av $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$. Lagringstiden har troligtvis en stor inverkan på hur mycket ammonium- och fosfatjoner som finns i lösning (och därmed är tillgängliga för struvitfällning), vilket medför att det är svårt att dosera rätt mängd kemikalier för struvitfällning. En analysmetod som analyserar enbart de joner som finns i lösning skulle sannolikt medföra en underdosering av kemikalier medan en analysmetod som analyserar *alla* ammonium- och fosfatjoner, såväl i lösning som bundna, förmodligen skulle medföra att kemikalierna överdoseras. Detta är något som bör undersökas närmre då en felaktig kemikaliedosering kan medföra att en stor mängd fosfat- och ammoniumjoner inte fälls som struvit eller att kostnaderna för tillsatskemikalierna blir högre än nödvändigt.

Från de flesta satsvisa försök kunde någon form av fällning urskiljas efter torkning. Att de analyserade fällningsprodukterna (en från varje våtfas) visade sig innehålla mer kväve i förhållande till fosfor jämfört med ren struvit beror troligtvis på att kväve också föreligger i andra oorganiska former, och inte enbart som

struvit. Det höga kväveinnehållet kunde inte förklaras av innehållet av organiskt material. Att fällningarna innehöll ”för mycket” kväve är dock positivt ur gödselproduktssynpunkt. De låga halterna av tungmetaller i fällningarna tyder på att tungmetallinnehållet sannolikt inte kommer att vara något problem vid avsättning av produkten.

I denna studie behandlades samtliga rötrest, trots deras stora olikheter, på samma vis, vilket innebär att behandlingen inte var optimal för någon av rötresterna. Det finns mycket att göra för att optimera processen för respektive rötrest. Exempelvis behöver avvattning, kemikalietillsatser och försöksbetingelser skräddarsys för varje rötrest.

Från försöken med CO₂-stripping visade det sig att rötresternas pH gick att höja genom att driva av CO₂. Vid en kombination av NaOH-tillsats och CO₂-stripping kunde tillsatsen av NaOH reduceras med mellan 30 och 67 % jämfört med pH-höjning med enbart NaOH-tillsats. Även detta är något man bör tänka på vid optimering.

Baserat på kemikalietillsatserna i de satsvisa försöken med våtfaserna från samtliga rötrest med fosfortillsats samt våtfasen från drank utan fosfortillsats uppskattades kemikaliekostnaderna. Här har endast grova uppskattningar kunnat göras eftersom kostnaderna är baserade på ett fåtal försök i labbskala med liten optimering för enskilda rötrest och priser från endast en leverantör. Kostnadsuppgifterna bör därför hanteras med stor försiktighet. Uppskattningarna som gjordes visade att kostnaden per mängd producerad struvit, med fosfortillsats, låg på ungefär samma nivå för hushåll, gödsel och drank, medan den låg något högre för beta. Struvitfällning utan fosfortillsats för drank uppskattades bli mindre kostsam än fällning med tillsatt fosforkälla. Det är troligt att kostnaden för NaOH blir utslagsgivande vid en jämförelse av kemikaliekostnader för olika rötrest eftersom kostnaden för MgCl₂•6H₂O och H₃PO₄ (vilken passar bättre än NaH₂PO₄•2H₂O att använda i storskala) per mängd producerad struvit låg på ungefär samma nivå för samtliga rötrest, medan kostnaden för NaOH varierade kraftigt.

Det är svårt att säga något om gödselmedelsvärdet för de struvitfällningar som kan produceras från rötrest idag främst beroende på att det är en dålig korrelation mellan innehållet av olika näringsämnen och marknadspris för sammansatta gödselmedel. Att räkna fram ett produktvärde baserat på marknadsvärdet på enskilda ingående näringsämnen ger som bäst en vink om ett möjligt värde. Det är dock sannolikt att värdet kommer att öka med tiden då fosforreserverna är ändliga och framställningen av kvävegödselmedel är energikrävande och kopplat till oljepriset. Man kan dessutom tänka sig att den miljöprofil som gödselmedel baserade på rötrest får kan bidra till ett högre värde.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att trots att rötresterna är oerhört komplexa lösningar med mycket som kan störa fällningsreaktionen är det möjligt att fälla struvit i de fyra rötresterna som har studerats i denna studie. Då samtliga rötrest har behandlats på samma vis i denna studie, trots att de är så väldigt olika, går struvitfällningen troligtvis att optimera för varje rötrest, vilket skulle leda till högre reduktion av PO₄-P och NH₄-N. Dessutom skulle optimeringen sannolikt innebära stora kostnadsbesparingar.

15. LITTERATURFÖRTECKNING

- Barnard, J. (2009). Elimination of eutrophication through resource recovery. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams* (ss. 1-22). Vancouver, Kanada: IWA Publishers.
- Battistoni, P. (2004). Phosphorous recovery trials in Treviso, Italy - theory, modelling and application. i E. Valsami-Jones (Red.), *Phosphorous in Environmental Technologies, Principles and Applications* (ss. 429-469). IWA Publishers.
- Battistoni, P., Pavan, P., Prisciandaro, M., & Cecchi, F. (2000). Struvite Crystallization: a feasible and reliable way to fix phosphorus in anaerobic supernatants. *Water Research* , 34, ss. 3033-3041.
- Bouropoulos, N., & Koutsoukos, P. (2000). Spontaneous precipitation of struvite from aqueous solutions. *Journal of Crystal Growth* , 213, ss. 381-388.
- Britton, A., Prasad, P., Balzer, B., & Cubbage, L. (2009). Pilot testing and economic evaluation of struvite recovery from detwatering centrate at HRSD's Nansemond WWTP. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Waste Waster Streams* (ss. 193-202). Vancouver, Kanada: IWA Publishers.
- Cabeza Pérez, R., Steingrobe, B., Römer, W., & Claassen, N. (2009). Plant availability of P fertilizers recycled from sewage sludge and meat-and-bone meal in field and pot experiments. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams* (ss. 215-224). Vancouver, Kanada: IWA Publishers.
- Cordell, D., Schmid-Neset, T., White, S., & Drangert, J.-O. (2009). Preferred future phosphorous scenarios: A framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams* (ss. 23-43). Vancouver, Kanada: IWA Publishers.
- de-Bashan, L., & Bashan, Y. (2004). Recent advances in removing phosphorous from wastewater and its future as a fertilizer (1997-2003). *Water Research* , 4222-4246.
- DHV (2008). *Crystalactor*. Hämtat från http://water.dhv.com/EN/Water_treatment/industrialwastewater/Pages/Crystalactor.aspx den 25 januari 2010
- Doyle, J., & Parsons, S. (2002). Struvite formation control and recovery. *Water Research* , 36, ss. 3925-3940.

Eriksson, J., 2001, Halter av 61 spårelement i avloppsslam, stallgödsel, handelsgödsel, nederbörd samt i jord och gröda. Naturvårdsverket Rapport 5148, ISBN 91-620-5148-2, ISSN 0282-7298

Esemen, T., Rand, W., Dockhorn, T., & Dichtl, N. (2009). Increasing cost efficiency of struvite precipitation by using alternative precipitants and P-remobilization from sewage sludge. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams* (ss. 269-279). Vancouver, Kanada: IWA Publishing.

Fattah, K., Sabrina, N., Mavinic, D., & Koch, F. (2008). Reducing operating costs for struvite formation with a carbon dioxide stripper. *IWA World Water Congress and Exhibition*. Wien, Österrike: IWA.

Galbraith, S., & Schneider, P. (2009). A review of struvite nucleation studies. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams* (ss. 69-78). Vancouver, Kanada: IWA Publishing.

Ganrot, Z., Slivka, A., & Dave, G. (2008). Nutrient recovery from human urine using pretreated zeolite and struvite precipitation in combination with freezing-thawing and plant availability tests om common wheat. *Clean* , 36, ss. 45-52.

Giesen, A. (2009). *P-recovery technologies CRYSTALACTOR*. Hämtat från Phosphorous Recovery: http://www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de/index.php?option=com_content&task=view&id=41&Itemid=49 den 30 oktober 2009

Giesen, A., & van der Molen, J. (1996). *The Crystalactor, Waste water treatment by crystallization without waste production*. DHV Water BV.

Günther, L., Dockhorn, T., Dichtl, N., Müller, J., Phan, L., Weichgrebe, D., o.a. (2008). Technical and scientific monitoring of the large-scale Seaborne technology at the WWTP Gifhorn. *Water Practice & Technology* , 3, 1-9.

Heldt, D. (2005). *Återvinning av fosfor från avloppsvatten som behandlas med biologisk fosforrening: en studie i att fälla ut struvit ur rejektivatten från rötat bio-P slam*. Examensarbete utfört vid Industriell Ekologi, KTH. Stockholm Vatten Projektpublikation nr 33.

Jaffer, Y., Clark, C., Pearce, P., & Parsons, S. (2002). Potential phosphorous recovery by struvite formation. *Water Research* , 36, ss. 1834-1842.

Jordbruksverket. (den 14 september 2009). *Det här gäller för handel och tillverkning av mineralgödsel och kalk*. Hämtat från Jordbruksverket: <http://www.jordbruksverket.se/amnesomraden/handel/mineralgodsel.106.6beab0f111fb74e78a78000486.html> den 26 januari 2010.

- Kabdasli, I., Safak, A., & Tünay, O. (2008). Bench-scale evaluation of treatment scheme incorporating struvite precipitation for young landfill leachate. *Waste Management* , 28, ss. 2386-2392.
- Kim, D., Ruy, H.-D., Kim, M.-S., Kim, J., & Lee, S.-I. (2007). Enhancing struvite precipitation potential for ammonia nitrogen removal in municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials* , 146, ss. 81-85.
- Koutsoukos, P., & Valsami-Jones, E. (2004). Principles of phosphate dissolution and precipitation. i E. Valsami-Jones (Red.), *Phosphorous in environmental technology* (ss. 195-248). IWA Publishing.
- Le Corre, K., Valsami-Jones, E., Hibbs, P., Jefferson, B., & Parsons, S. (2007). Agglomeration of struvite crystals. *Water Research* , 41, ss. 419-425.
- Le Corre, K., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., & Parsons, S. (2005). Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity. *Journal of Crystal Growth* , 283, ss. 514-522.
- Le Corre, K., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., & Parsons, S. (2009). Phosphorous recovery from wastewater by struvite crystallisation: a review. *Critical reviews in environmental science and technology* , 39, ss. 433-477.
- Lee, S., Weon, S., Lee, C., & Koopman, B. (2003). Removal of nitrogen and phosphate from wastewater by addition of bittern. *Chemosphere* , 51, 265-271.
- Marti, N., Bouzas, A., Seco, A., & Ferrer, J. (2008). Struvite precipitation assessment in anaerobic digestion processes. *Chemical Engineering Journal* , 141, ss. 67-74.
- Miles, A., & Ellis, T. (2001). Struvite precipitation potential for nutrient recovery from anaerobically treated wastes. *Water Science and Technology* , 43, ss. 259-266.
- Moerman, W., Carballa, M., Vandekerckhove, A., & Derycke, D. (2009). Phosphate removal in agro-industry: pilot and full-scale operational considerations of struvite crystallization. *Water Research* , 43, ss. 1887-1892.
- Moerman, W., Carballa, M., Vandekerhove, A., Derycke, D., & Verstraete, W. (2009). Phosphate removal in agro-industry: pilot and full-scale operational considerations of struvite crystallization. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams* (ss. 245-255). Vancouver, Kanada: IWA Publishers.
- Nelson, N., Mikkelsen, R., & Hesterberg, D. (2003). Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg:P ratio and determination of rate constant. *Bioresource Technology* , 89, ss. 229-236.

NuReSys. (2010). *NuReSys*. Hämtat från http://nuresys.org/start_du.html den 25 januari 2010

Ostara, *Nutrient Technologies Inc.* (2010). Hämtat från www.ostara.com den 22 januari 2010

Pastor, L., Mangin, D., Barat, R., & Seco, A. (2008). A pilot-scale study of struvite precipitation in a stirred tank reactor: Conditions influencing the process. *Bioresource Technology* , 99, ss. 6285-6291.

Pastor, L., Marti, N., Bouzas, A., & Seco, A. (2008). Sewage sludge management for phosphorous recovery as struvite in EBPR wastewater treatment plants. *Bioresource Technology* , 99, 4817-4824.

Perera, P., Wu, W.-X., Chen, Y.-X., & Han, Z.-Y. (2009). Struvite Recovery from Swine Waste Biogas Digester Effluent through a Stainless steel device under constant pH conditions. *Biomedical and Environmental Sciences* , 22, ss. 201-209.

Phan, L.-C., Weichgrebe, D., Urban, I., Rosenwinkel, K.-H., Günther, L., Dockhorn, T., o.a. (2009). Empirical Evaluation of nutrient recovery using Seaborne technology at the wastewater treatment plant Gifhorn. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams* (ss. 567-577). Vancouver, Kanada: IWA Publishing.

Quintana, M., Colmenarejo, M., Barrera, J., Sanchez, E., Garcia, G., Travieso, L., o.a. (2008). Removal of phosphorous through struvite precipitation using a by-product of magnesium oxide production of BMP preparation. *Chemical Engineering Journal* , 136, ss. 204-209.

Ronteltap, M., Maurer, M., & Gujer, W. (2007). The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. *Water Research* , 41, ss. 1859-1868.

Ryu, H.-D., Kim, D., & Lee, S.-I. (2008). Application of struvite precipitation in treating ammonium nitrogen from semiconductor wastewater. *Journal of Hazardous Materials* , 163-169.

Saidou, H., Ben Moussa, S., & Ben Amor, M. (2009). Struvite Precipitation by the dissolved CO₂ degasification technique: Impact on the airflow rate and pH. *Chemosphere* , 74, ss. 338-343.

Seaborne Umwelttechnik. (2009). *Technology*. Hämtat från <http://www.seaborne-erl.de/> den 26 oktober 2009

Statistiska meddelanden, 2001, Sveriges officiella statistik, MI 22 SM 1001, Utsläpp till vatten och slamproduktion 2008. Kommunala reningsverk, skogsindustri samt viss övrig industri, ISSN 1403-8978, Serie MI-Miljövård. Utkom den 15 mars 2010.

- Steen, I. (2004). Phosphorous recovery in the context of industrial use. i E. Valsami-Jones (Red.), *Phosphorous in Environmental Technology: Principles and Applications* (ss. 339-357). IWA Publishing.
- Stratful, I., Scrimshaw, D., & Lester, J. (2001). Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate. *Water Research* , 35 (17), ss. 4191-4199.
- Stumpf, D., Heinzmann, B., Schwarz, R.-J., Gnirss, R., & Kraume, M. (2009). Induced struvite precipitation in an airlift reactor for phosphorous recovery. i K. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Red.), *International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams* (ss. 178-192). Vancouver, Kanada: IWA Publishing.
- Stumpf, D., Villwock, J., Heinzmann, B., & Kraume, M. (2009). Induced MAP-precipitation in digested sludge for reuse as magnesium ammonium phosphate fertilizer. *Poster presentation, Baltic 21 Conference, Berlin September 2009*. Berlin, Germany.
- Ueno, Y. (2004). Full scale struvite recovery in Japan. i E. Valsami-Jones (Red.), *Phosphorous in Environmental Technologies - Principles and Applications* (ss. 496-506). IWA Publishers.
- Uludag-Demirer, S., Demirer, G., & Chen, S. (2005). Ammonia removal from anaerobically digested dairy manure by struvite precipitation. *Process Biochemistry* , 40, ss. 3667-3674.
- Unitika, (2009). *Unitika Ltd*. Hämtat från <http://www.unitika.co.jp/e/home.htm> den 16 12 2009
- Wasserbetriebe, (2010). *Phosphorrückgewinnung - Entlastung von Gewässern und Rückgewinnung eines Rohstoffes*. Hämtat från <http://www.bwb.de/content/language1/html/4951.php> den 26 januari 2010
- von Münch, E., & Barr, K. (2001). Controlling struvite crystallisation for removing phosphorous from anaerobic digester sidestreams. *Water Research* , 35, ss. 151-159.
- Zumdahl, S. (1992). *Chemical Principles*. Lexington, Massachusetts, Toronto: D.C. Health and Company.

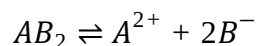
16. FÖRKORTNINGAR

FIA	<i>Flow Injection Analysis</i> . Analysmetod för att mäta $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{PO}_4\text{-P}$ i lösning.
HAP	<i>Hydroxyapatit</i> ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$).
HRT	<i>Hydraulic Retention Time</i> . Anger hur länge en viss volymsenhet i genomsnitt uppehåller sig i en reaktor.
ICP-MS	<i>Inductively Coupled Plasma - Mass Spectroscopy</i> . Analysmetod för att mäta ett stort antal grundämnen.
ICP-AES	<i>Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy</i> . Analysmetod för att mäta grundämnen, främst spårämnen.
MAP	<i>Magnesium Ammonium Phosphate</i> , struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).
RR	<i>Rötrest</i> . RR hushåll/beta/gödsel/dränk anger vilket substrat rötresten är baserad på.
SS	<i>Suspended Solids</i> . Innehållet av suspenderade partiklar i lösning.
TOC	<i>Total Organic Carbon</i> . Anger innehållet av totalt organiskt kol i vattenlösningar, både i löst och partikulär form.
TS	<i>Torrsubstans</i> . Anger hur mycket torrt material som finns kvar i ett prov efter torkning vid 105°C .
VF	<i>Våtfas</i> . VF hushåll/beta/gödsel/dränk anger vilket substrat den avvattnade rötresten är baserad på.
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i> , röntgendiffraktion. Analysmetod för att bestämma mineral.

APPENDIX 1. LÖSLIGHETSEKVATIONER

Källa: (Le Corre K. , Valsami-Jones, Hobbs, & Parsons, 2009) och (Zumdahl, 1992).

Lösligheten av saltet AB_2 i vatten kan beskrivas som:



När jämvikt inträtt är lösningen mättad och mer salt kan inte lösas upp.

Löslighetsprodukten K_{sp} beskrivs enligt:

$$K_{sp} = [A^{2+}] \times [B^{-}]^2$$

där $[A^{2+}]$ och $[B^{-}]$ är jämviktskoncentrationerna.

Övermättnad och fällning av saltet sker när koncentrationen av de ingående jonerna i lösning är $>K_{sp}$.

För struvit tecknas löslighetsprodukten K_{sp} enligt:

$$K_{sp} = [Mg^{2+}] \times [NH_4^{+}] \times [HPO_4^{2-}]$$

där de ingående koncentrationerna betecknar jämviktskoncentrationer.

Övermättnad med avseende på struvit inträffar då produkten av koncentrationerna i en viss lösning är högre än K_{sp} :

$$[Mg^{2+}] \times [NH_4^{+}] \times [HPO_4^{2-}] > K_{sp}$$

Ekvationerna ovan gäller dock utspädda lösningar utan konkurrerande jonslag. Om man ska beräkna övermättnad i verkliga lösningar bör man ta hänsyn till aktiviteten av enskilda joner och i stället beräkna en löslighetsprodukt som innehåller aktiviteter, K_{so} . K_{so} är lägre än K_{sp} vilket medför att det krävs en högre produkt av de ingående jonerna Mg^{2+} , NH_4^{+} och HPO_4^{2-} för att ge en övermättnad med avseende av struvit i verkliga fall:

$$K_{so} = a_{Mg^{2+}} \cdot a_{NH_4^{+}} \cdot a_{HPO_4^{2-}}$$

Där aktiviteten a_i av jonslaget i definieras om en produkt av aktivitetskoefficienten γ_i och koncentrationen C_i :

$$a_i = \gamma_i \times [C_i]$$

Vid utspädda lösningar är $\gamma_i = 1$, vilket ger att $K_{so} = K_{sp}$ praktiken kan man definiera utspädda lösningar som lösningar där summakoncentrationen av samtliga joner i är under 1 mM. I övriga fall måste aktivitetskoefficienten γ_i bestämmas, vilket kan göras med en rad olika ekvationer beroende på bland annat jonstyrka.

pK_{sp} och pK_{so} definieras enligt följande:

$$pK_x = -\log_{10} K_x$$

APPENDIX 2. LABORATORIEUTRUSTNING

Avvattning

Grovt metallfiter (porstorlek ~1,5-2 mm)
Grovt polyamidfilter (porstorlek ~0,5 mm)
Fint polyamidfilter (porstorlek ~0,1-0,2 mm)
Büchnertratt (Ø 145 mm)
Sugflaska (2000 mL)
Vattensug
Munktellfilter (12-15 µm)
Munktellfilter (>20 µm)
Centrifug (Du Pont Instrument, Sorvall RC5B)

TS-bestämning

Aluminiumform
Torkskåp (KIFA Elektro-Helios)
Våg (TP303i Denver Instrument)

Densitetsbestämning

Mätglas (100 mL)
Glasbägare (1000 mL)
Våg (TP303i Denver Instrument)

pH-mätning

pH-meter (Jenway 3510 pH Meter)

Satsvisa försök

Glasbägare (1000 ml)
Magnetomrörare (IKA RCT basic)
Magnetloppa
pH-meter (Jenway 3510 pH Meter)
Vågskepp
Våg (TP303i Denver Instrument)
Parafilm
Büchnertratt (Ø 145 mm)
Sugflaska (2000 mL)
Vattensug
Fint polyamidfilter (porstorlek ~0,1-0,2 mm)
Aluminiumform
Torkskåp (KIFA Elektro-Helios)

Stripping

Glasbägare (1000 mL)
Luftpump för akvarium (Elite 799, Zolux)
pH-meter (Jenway 3510 pH Meter)

APPENDIX 3. PROVTAGNINGSSINSTRUKTION



Instruktioner för provtagning av rötrest

Inom SGC-projekt 09:35 "Återvinning av näringsämnen från rötrest genom struvitfällning", skall struvitfällning med fyra olika typer av rötrest utvärderas. Dessa fyra finns i tabellen nedan.

Typ av rötrest	Anläggning	Organisation ansvarig för provtagning
Drank	Norrköping	Swedish Biogas International AB
Betor	Försöksanläggning	E.ON
Gödsel	Falkenberg	E.ON
Hushållsavfall	NSR Helsingborg	NSR

Till försöken behövs ca 20 L rötrest. Provet skall hållas i rena kärl. För att bibehålla den anaeroba miljön bör kärlet fyllas ända upp. För att begränsa nedbrytning bör rötresten kylas ner så fort som möjligt efter provuttag.

Provet bör förvaras kylt under transporten, förslagsvis i kylväska eller frigolitväska med kylklampar.

Provtagningen skall om möjligt ske vecka 5. Helst skall provtagningen ske i början av veckan så att försändelsen inte blir stående varmt under helgen.

Rötresten, tillsammans med ifylld följesedel, skickas till:

Liisa Fransson, Ekobalans Fenix AB, 223 70 i Lund.

Meddela gärna Liisa på 0703-79 48 08 eller liisa.fransson@ekobalans.se när rötresten skickas iväg så att vi kan se till att vi är beredda att ta hand om den då fort den anländer. Kontakta även Liisa med eventuella frågor om provtagningen, eller om provtagning inte skulle vara möjlig vecka 5.

Följesedel rötrest

Provtagningsdatum: _____

Tidpunkt för provtagning: _____

Anläggningens namn: _____

Substrat in till anläggningen: _____

Ev övrig information: _____

Kontaktuppgifter provtagare:

Namn: _____

Telefon _____

E-post: _____

APPENDIX 4. KEMIKALIE TILLSATSER OCH PH-VÄRDEN FÖR DE SYNTETISKA LÖSNINGARNA

	Lösning baserad på	Volym lösning [mL]	Tillsatt H_3PO_4 [g]	Tillsatt $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [g]	Tillsatt $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [g]	pH vid start [-]	pH efter P-tillsats [-]	pH efter Mg-tillsats [-]	Tillsatt NaOH [mL]
Försök 1	VF beta	750	0,922	-	2,228	6,73	2,44	2,35	23
Försök 2	VF gödsel	750	2,941	-	7,405	6,33	2,10	1,94	72
Försök 3	VF beta	750	-	1,208	2,223	6,95	5,95	5,66	15
Försök 4	VF beta	750	-	-	0,175	7,00	-	6,99	2
Försök 5	VF gödsel	750	-	3,964	7,400	6,58	5,53	4,96	55
Försök 6	VF gödsel	750	-	-	0,689	6,52	-	6,43	10
Försök 7	VF gödsel	750	-	-	0,689	6,52	-	6,43	10

APPENDIX 5. KEMIKALJETILSATSER OCH PH-VÄRDEN FÖR DE SATSVISA FÖRSÖKEN

Satsvisa försök med rötresten (RR), våtfaser (VF) samt extraförsök med våtfaser ("omg2"). Siffrorna 1 respektive 2 indikerar försöksnummer i de fall försöken utfördes i duplikat. Beteckningen P respektive uP indikerar om försöket utfördes med (P) eller utan (uP) fosfortillsats.

	Volym vid start [mL]	Tillsatt $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [g]	Tillsatt $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [g]	pH vid start [-]	pH efter P-tillsats [-]	pH efter Mg-tillsats [-]	Tillsatt NaOH (till pH 8,5) [mL]	Tillsatt NaOH (från pH 8,5 till 9,0) [mL]	Totalt tillsatt NaOH [mL]	Volym vid slut [mL]
RR hushåll P_1	750	4,822	8,319	7,62	6,88	6,51	60	35	95	845
RR hushåll P_2	750	4,820	8,322	7,60	6,89	6,53	55	33	88	838
RR hushåll uP_1	750	-	0,150	7,55	-	7,54	30	45	75	825
RR hushåll uP_2	750	-	0,156	7,60	-	7,58	30	35	65	815
RR beta P_1	750	1,205	2,221	6,14	6,04	5,94	31	6	37	787
RR beta P_2	750	1,203	2,223	6,21	6,07	6,01	30	5	35	785
RR beta uP_1	750	-	0,178	6,18	-	6,16	27	11	38	788
RR beta uP_2	750	-	0,179	6,25	-	6,24	15	5	20	770
RR gödsel P_1	750	3,963	7,397	7,54	6,90	6,63	64	40	104	854
RR gödsel P_2	750	3,960	7,400	7,63	7,00	6,62	60	35	95	845
RR gödsel uP_1	750	-	0,683	7,68	-	7,63	30	55	85	835
RR gödsel uP_2	750	-	0,683	7,61	-	7,56	40	45	85	835
RR drank P_1	750	4,344	11,419	7,77	7,13	6,77	60	45	105	855
RR drank P_2	750	4,346	11,412	7,79	7,15	6,78	60	45	105	855
RR drank uP_1	750	-	4,064	7,72	-	7,27	40	42	82	832
RR drank uP_2	750	-	4,060	7,72	-	7,15	52	58	110	860

	Volym vid start [mL]	Tillsatt $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [g]	Tillsatt $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [g]	pH vid start [-]	pH efter P-tillsats [-]	pH efter Mg-tillsats [-]	Tillsatt NaOH (till pH 8,5) [mL]	Volym vid slut [mL]
VF hushåll P_1	750	4,823	8,322	7,82	6,86	6,40	77	827
VF hushåll P_2	750	4,820	8,318	7,78	6,87	6,49	58	808
VF hushåll uP_1	750	-	0,159	8,08	-	7,90	20	770
VF hushåll uP_2	750	-	0,159	7,78	-	7,76	20	770
VF beta P_1	750	1,207	2,220	6,40	6,23	6,12	30	780
VF beta P_2	750	1,205	2,223	6,70	6,57	6,49	30	780
VF beta uP_1	750	-	0,178	6,44	-	6,44	20	770
VF beta uP_2	750	-	0,182	6,43	-	6,48	15	765
VF gödsel P_1	750	3,965	7,409	7,78	7,01	6,51	75	825
VF gödsel P_2	750	3,962	7,400	7,78	7,03	6,68	58	808
VF gödsel uP_1	750	-	0,690	7,93	-	7,92	15	765
VF gödsel uP_2	750	-	0,685	7,85	-	7,84	20	770
VF drank P_1	500	2,894	7,613	7,83	7,11	6,71	45	545
VF drank P_2	500	2,891	7,614	8,04	7,25	6,74	45	545
VF drank uP_1	500	-	2,711	7,94	-	7,30	35	535
VF drank uP_2	500	-	2,708	7,94	-	7,37	25	525

	Volym vid start [mL]	Tillsatt $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [g]	Tillsatt $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [g]	pH vid start [-]	pH efter P-tillsats [-]	pH efter Mg-tillsats [-]	Tillsatt NaOH (till pH 8,5) [mL]	Volym vid slut [mL]
VF hushåll P_omg2	41	0,918	1,644	7,8	6,69	5,45	5	46
VF gödsel P_omg2	45	1,094	1,929	7,72	6,69	5,52	7	52
VF drank P_omg2	45	2,088	3,806	7,82	6,52	4,84	14	59

APPENDIX 6. ANALYSRESULTAT EFTER FÄLLNING FRÅN DE SATSVISA FÖRSÖKEN

Siffrorna 1 respektive 2 indikerar försöksnummer i de fall försöken utfördes i duplikat. Beteckningen P respektive uP indikerar om försöket utfördes med (P) eller utan (uP) fosfortillsats.

	Ca [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	P [mg/L]	NH ₄ -N [mg/L]	PO ₄ -P [mg/L]
RR hushåll P_1	637	1239	1218	1434	2101	1304
RR hushåll P_2	673	1195	1237	1466	2103	1289
RR hushåll uP_1	700	1188	142	409	2147	226
RR hushåll uP_2	733	1143	143	426	2164	237
RR beta P_1	233	1476	301	101	56	50
RR beta P_2	196	1407	270	68	73	50
RR beta uP_1	202	1568	201	72	146	43
RR beta uP_2	173	1461	189	61	138	48
RR gödsel P_1	139	2507	278	55	1512	43
RR gödsel P_2	142	2408	343	158	1602	44
RR gödsel uP_1	656	2498	188	216	1943	45
RR gödsel uP_2	677	2519	182	213	1887	67
RR drank P_1	195	2606	1107	1131	3316	714
RR drank P_2	194	2602	1087	1130	3179	560
RR drank uP_1	204	2567	571	766	3758	610
RR drank uP_2	211	2795	568	770	3671	661
VF hushåll P_1	715	1213	1180	1420	1801	24*
VF hushåll P_2	809	1207	1236	1583	2037	1562
VF hushåll uP_1	770	1070	151	433	2236	228
VF hushåll uP_2	917	1289	182	533	2181	249
VF beta P_1	253	1213	360	177	76	56
VF beta P_2	225	1397	368	147	77	39
VF beta uP_1	112	1489	210	59	155	32
VF beta uP_2	264	1371	211	73	174	50
VF gödsel P_1	745	2390	1065	1058	1695	35
VF gödsel P_2	815	2699	1183	1188	1817	359
VF gödsel uP_1	850	2651	214	242	2061	136
VF gödsel uP_2	880	2595	229	267	2175	151
VF drank P_1	35	2728	370	146	3630	127
VF drank P_2	30	2697	303	59	3590	55
VF drank uP_1	33	2656	359	488	4145	479
VF drank uP_2	37	2671	127	143	4082	114
VF hushåll P_omg2	-	-	-	-	1809	2827
VF gödsel P_omg2	-	-	-	-	1630	3264
VF drank P_omg2	-	-	-	-	1181	574

*Detta värde anses vara en outlier och elimineras.

APPENDIX 7. PH-VÄRDEN OCH NAOH-TILLSATSER FÖR STRIPPINGFÖRSÖKEN

	Volym lösning [mL]	pH vid start [-]	pH efter stripping [-]	Tillsatt volym NaOH [mL]
RR hushåll med stripping	400	7,68	8,16	5
RR hushåll utan stripping	400	7,68	-	12
RR beta med stripping	400	6,36	7,02	2
RR beta utan stripping	400	6,37	-	6
RR gödsel med stripping	400	7,65	7,95	9
RR gödsel utan stripping	400	7,65	-	13
RR drank med stripping	400	7,79	8,21	8
RR drank utan stripping	400	7,79	-	15



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69
www.sgc.se • info@sgc.se
