

Kväveberikning och skogsgödsling med torkat granulerat avloppsslam

Kenneth Sahlén

Margareta Söderström

Thomas Mård



Svenskt Vatten Utveckling

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

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Management

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

Agneta Granberg, ordförande	Göteborgs Stad
Daniel Hellström, sekreterare	Svenskt Vatten
Stefan Johansson	Skellefteå kommun
Charlotte Lindstedt	Göteborg Vatten
Lena Ludvigsson-Olafsen	Smedjebackens kommun
Margareta Lundin Unger	Kungsbacka kommun
Kenneth M. Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Mats Rostö	Gästrik Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Lena Söderberg	Svenskt Vatten
Ulf Thysell	VA SYD
Fred Ivar Aasand, adjungerad	Norsk Vann

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

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47 607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Kväveberikning och skogsgödsling med torkat granulerat avloppsslam
Title of the report:	Nitrogen enrichment and forest fertilization with dried granulated sewage sludge
Rapportnummer:	2011-09
Författare:	Kenneth Sahlén & Margareta Söderström, SLU, Institutionen för skogens ekologi och skötsel, Umeå; Thomas Mård, SYVAB, Himmerfjärdsverket, Grödinge
Projektnummer:	27-105
Projektets namn:	Skogsgödslingsegenskaperna för kväveberikat avloppsslam
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling, MittSverige Vatten AB, SYVAB
Rapportens omfattning	
Sidantal:	34
Format:	A4
Sökord:	Avloppsslam, kväveberikning, urea, skog, gödsling
Keywords:	Sewage sludge, nitrogen, fertilization, forest
Sammandrag:	Inblandning av urea-fettsyraester i avloppsslam före torkning och granulering, resulterar i höjd kvävehalt i slutprodukten. Det tillsatta kvävet löses lätt ut och blir växttillgängligt efter skogsgödsling. Med kväveberikade granuler kan gödseldoseringen minskas, vilket även resulterar i minskad tillförsel av tungmetaller och sänkt gödslingskostnad.
Abstract:	Mixing of urea fatty acid ester into sewage sludge before drying and granulation, results into raised nitrogen content in the end product. The added nitrogen is easily soluble and becomes plant available soon after forest fertilization. Nitrogen enriched sludge granules facilitates a lowered fertilizer application rate, also reducing the application of heavy metals and reduced application cost.
Målgrupper:	Avloppsreningsverk, skogsbruk, miljömyndigheter
Omslagsbild:	Skogsgödsling med traktorspridare. Foto Kenneth Sahlén, SLU, Institutionen för skogens ekologi och skötsel, Umeå.
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2011
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Skogsgödsling med avloppsslam bidrar till att uppfylla det svenska samhällets miljömål om återanvändning av avloppsslam som växtnäring och strävan att kraftigt öka utnyttjandet av förnyelsebar skogsråvara för ersättning av fossilt baserade råvaror. Hittills har dock inga ansträngningar gjorts för att slammets näringssammansättning ska motsvara växternas behov. Framförallt är kväveinnehållet alltför lågt i förhållande till innehållet av fosfor. Om slammets kvävehalt kunde ökas 2–3 gånger till 8–12 %, skulle den tillväxthöjande effekten öka kraftigt och slammet bli ett konkurrenskraftigt gödselmedel som kommunerna t o m skulle kunna få betalt för. I denna undersökning har därför praktiska möjligheter och konsekvenser av att öka kvävehalten i slam med hjälp av tillsats av urea fettsyraester, utvärderats. På grund av en brand i torkanläggningen hos SYVAB i december 2008, kunde inte de planerade försöken med tillsats av ammoniumsulfat genomföras.

Undersökningarna har finansierats av Svenskt Vatten Utveckling, MittSverige Vatten, Sundsvall och SYVAB. Margareta Söderström har ansvarat för laboratorieundersökningar, anläggning av fältförsök, planering av praktiska berikningsförsök hos SYVAB, provtagningar, analyser och sammanställning av försöksresultat. Thomas Mård har ansvarat för genomförandet av de praktiska försöken vid Himmerfjärdsverket. Kenneth Sahlén har varit ansvarig projektledare.

Umeå i april 2010

Kenneth Sahlén

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning.....	6
Summary.....	7
1 Bakgrund.....	8
1.1 Utnyttjandet av förnyelsebar skogsråvara kan ökas	8
1.2 Avloppsslam – en näringsresurs för ökad skogstillväxt	8
1.3 Miljöeffekter av skogsgödsling med avloppsslam.....	9
1.4 Pågående FoU-verksamhet med skogsgödsling med slam.....	10
1.5 Berikning av avloppsslam med kväverika biprodukter	10
2 Syfte med projektet	12
3 Genomförande	13
3.1 Laboratorieförsök med kväveberikning	13
3.2 Praktiska försök med kväveberikning hos SYVAB.....	16
3.3 Skogsgödslingsförsök med kväveberikat, granulerat slam	21
3.4 Utlakningsförsök med torkat slam	26
3.5 Tekniska, ekonomiska och miljömässiga konsekvenser av kväveberikning.....	28
4 Slutsatser och rekommendationer	31
5 Referenser.....	33

Sammanfattning

Användning av växtnäring från avlopp och minskad användning av fossila råvaror, är två viktiga åtgärder som bidrar till att skapa ett ekologiskt hållbart samhälle. Tidigare fältförsök har visat att en avsevärd tillväxtökning kan erhållas om slammets växtnäring används som skogsgödsel. På så sätt kan tillgången på skogsråvara öka, för ersättning av fossilt baserade råvaror. Slammets tillväxthöjande effekt skulle kunna ökas ytterligare om kvävehalten kunde höjas. Försök har därför utförts vid SYVAB, Himmerfjärdsverket, för att utvärdera möjligheterna att berika torkat och granulerat slam med ureafettsyraester (UF), en kväverik biprodukt från fiskindustrin. De framställda slamgranulerna har sedan testats i laboratorium och skogsgödslingsförsök och en utvärdering har gjorts av de tekniska, ekonomiska och miljömässiga effekterna av kväveberikning. Resultaten visade att:

Rötat avloppsslam kan berikas med UF och torkas under minst 5 timmar vid upp till 100 grader till över 90 % TS-halt, utan större kväveförlust än efter torkning av ej kväveberikat slam. Det tar minst 8 timmar av UF-dosering till det avvattnade slammet, innan kvävehalten i de färdiga torra slamgranulerna når upp till stabilt värde, vid torkning i Himmerfjärdsverkets tork- och granuleringsstrumma. En liten kväveförlust har påvisats under torkning i praktisk skala. Den kan förmodligen minskas med modifierad torkteknik. Särskild utrustning för mixning av avvattnat slam och UF-tillsats krävs förmodligen, om granuler med homogen näringssammansättning ska kunna framställas. UF-berikade slamgranuler från Himmerfjärdsverket går utmärkt att lagra i upp till ett år, utan att egenskaperna förändras, och att traktorsprida i skog. Det tillsatta UF-kvävet lakas lätt ut ur berikade slamgranuler i vatten. Ingen nämnvärd nitratutlakning till markvattnet sker under det första året efter skogsgödsling med UF-berikade slamgranuler i en dosering av 600 kg N/ha. Kvävehalten i tallarnas barr ökar snabbt efter gödsling med slamgranuler och är efter ett år avsevärt högre än i ogödslade träd.

Kväveberikning av torkat granulerat slam medför sänkt slamgiva per hektar och således även minskad tillförsel till marken av oönskade ämnen som tungmetaller och syntetiska organiska ämnen samt sänkta transport- och gödslingskostnader vid gödsling av skog. Utifrån tidigare erfarenheter av traktorspridning i praktisk skala, blir kostnaderna för transporter och spridning av de berikade slamgranulerna, räknat per ökad tillväxt i kubikmeter, hälften så stor som för skogsgödsling med mineralnäring.

De positiva erfarenheterna från dessa undersökningar motiverar fortsatt utvecklingsarbete med syfte att skapa en tillverkningsprocess som resulterar i ett slambaserat miljövänligt gödselmedel med högre kvävehalt och tillväxt-effekt. Det arbetet bör bland annat fokusera på att förbättra blandningen mellan slam och kvävetillsats, så att homogena gödselgranuler/pellets kan skapas, att minska kväveförlusterna under tillverkningsprocessen med hjälp av kortare torktid och lägre temperatur och att ytterligare undersöka effekter av slamdosering på kväveutlakning i skogsmark.

Summary

Reuse of nutrients from sewage and decreased utilization of non-renewable raw material are required to achieve an ecologically sustainable society. If sludge nutrients are used as forest fertilizer, a considerable increase in growth and supply of forest raw material would be achieved. The growth promoting effect would be further improved if the sludge nitrogen content could be increased. Therefore, experiments were carried out at SYVAB, Himmerfjärden WWTP, to evaluate the possibilities of enriching dried and granulated sewage sludge with urea fatty acid ester (UF), which is a by-product from the fishery industry. The produced sludge granules were tested in laboratory and in forest fertilization experiments, and an evaluation of the technical, economical and environmental effects of nitrogen enrichment was carried out. The results showed that :

Digested sewage sludge may be enriched with UF and dried for at least 5 hours at 100° C to more than 90% dry matter content, without higher nitrogen loss than after drying of not nitrogen enriched sludge. Time for reaching up to a stable nitrogen content in the produced dry sludge granules, was at least 8 hours after starting UF application in experiments at Himmerfjärden WWTP. Some nitrogen loss may occur during drying, as indicated by raised nitrogen content in the scrubber water. Modification of the drying technique may eliminate that. A more thoroughly mixing of sludge and UF before drying is required to get homogenous sludge granules. UF enriched sludge granules may be stored without changed properties and tractor applied in the forest without problem. In water, the added urea nitrogen was easily leached from dry sludge granules. No significant nitrate leaching to the soil water at 50 cm depth occurred after forest application at a rate of 600 kg N/ha. Tree needle nitrogen content increased within some months after sludge application.

Nitrogen enrichment of dried granulated sludge results in lowered sludge application rate and consequently, also lowered supply of undesired substances as heavy metals and synthetic organic compounds. Also the costs for transportation and application will be lowered. The total cost for nitrogen enrichment, transportation and sludge application per cubic meter increased tree growth, will be only half of that for mineral fertilizer.

The positive experiences from these investigations justify continued development, aiming at creating a production process resulting in a sludge based and environmentally friendly dry fertilizer with higher nitrogen content and growth promoting effect. Such efforts should be in line with the society goal of ecological sustainability.

1 Bakgrund

1.1 *Utnyttjandet av förnyelsebar skogsråvara kan ökas*

Den pågående energiomställningen i Sverige från fossila energikällor till förnyelsebara, innebär att behovet av råvara från skogen ökar. Enligt Regeringen Perssons Oljekommission måste den svenska skogens tillväxt ökas med 20% fram till 2015 med hjälp av bl a gödsling, för att ersätta fossila bränslen (På väg mot ett oljefritt Sverige 2006). Regeringens bedömning i Skogspropositionen 2007 var att gödsling av skogsmark är en åtgärd som snabbt ökar skogens tillväxt, och att omfattningen av gödsling i skogen bör kunna öka (En skogspolitik i takt med tiden 2007). Det viktigaste näringsämnet för ökad trädttillväxt är kväve, men även andra näringsämnen som fosfor, kalium, kalcium, magnesium, svavel och bor, är i viss mån nödvändiga. Skogsgödsling av barrträd med kvävegödselmedel har tillämpats i Sverige under många år. Den beräknade tillväxtökningen är 40–50%, eller 14–20 m³sk/ha under en tioårsperiod. Sammanlagt ungefär 3,5 miljoner hektar skogsmark har gödslats sedan mitten av 1960-talet, och för närvarande gödslas årligen ca 60 000 ha på detta sätt (Skogsstatistisk årsbok 2009). Vid uttag av trädbiomassa för energiframställning kan hela träden inklusive rot, stam och grenar tas tillvara. Då förs så stora mängder näring bort att det kan leda till tillväxtförluster på grund av bland annat kvävebrist (Jacobson & Kukkola 1999). Skogsstyrelsen rekommenderar att skogen kompenseras för sådana näringsuttag, med hjälp av träaska (Skogsstyrelsen 2008). Askan innehåller dock inget kväve och kan på mindre bördiga marker t o m orsaka tillväxtminskningar (Jacobson 1997).

1.2 *Avloppsslam – en näringsresurs för ökad skogstillväxt*

I Sverige produceras årligen ca 240 000 ton TS avloppsslam i reningsverken (Statistiska Centralbyrån 2010). Slammet innehåller alla nödvändiga näringsämnen för växter, och utgör därför en växtnäringsresurs, även om relationerna mellan flera näringsämnen inte är optimala. I ett av de svenska miljömålen uttrycks målsättningen att minst 60 % av slammet ska återanvändas som växtnäring (Naturvårdsverket 2002). Hygieniserat avloppsslam får enligt Naturvårdsverkets förslag till slamförordning användas på skogsmark (Naturvårdsverket 2009). Kväveinnehållet i slam är 4–4,5 % av TS (torrsubstans), av vilket ca 15 % är ammoniumkväve, som är direkt upptagbart för träden. Den resterande delen är organiskt bundet kväve, som successivt under ett antal år ammonifieras via mineralisering och blir växttillgängligt. Den maximalt rekommenderade kvävegivan under en skoglig omloppstid (80–100 år) i norra Sverige är för närvarande 450 kg/ha (Skogsstyrelsen 2007). På grund av slammets höga halt av ej vattenlösligt organiskt kväve kan hela den givan gödglas vid ett tillfälle, utan att det uppstår kväve-

läckage till markvattnet (Sahlén in prep). Den möjliga slamdoseringen blir då ca 10 ton TS per ha. Gödsling med avloppsslam har således karaktären av förrådsgödsling, med mineralisering av bland annat kväve och fosfor och upptag i träden under många år. I äldre skogsgödslingsförsök med avloppsslam i Nordamerika har gödslingseffekter uppmätts mer än 15 år efter gödsling (Henry et al 1993). Slammets kväve används av träden för att öka den totala mängden barr, som sedan via ökad fotosyntes ger ökad träd tillväxt. Även slammets fosfor utnyttjas av träden, och halten fosfor i barren kan öka med 20 % under flera år efter gödsling (Sahlén in prep). Det stora innehållet av organiskt material, ökar skogsmarkens förmåga att långsiktigt lagra andra näringsämnen som till exempel kalium och magnesium. Slammets innehåll av de flesta näringsämnena, inklusive kväve, gör det även användbart för kompensation av bortförda näringsämnena vid uttag av hela träd. Kvoten mellan kväve- och fosforinnehåll är dock avsevärt lägre än optimalt för växter.

I kontrollerade skogsgödslingsförsök med torkat, granulerat slam har tillväxtökningar på åtminstone 50 % erhållits i tallskog efter 5 år (Sahlén in prep). De senaste preliminära resultaten från gödsling, utförd i praktisk skala i Norrbotten 2006, med torkat granulerat slam från Himmerfjärdsverket, visar att tillväxtökningen två år efter gödsling kan uppgå till mellan 70 och 150 % (Lundbäck 2010).

1.3 Miljöeffekter av skogsgödsling med avloppsslam

Tillverkningen av mineralgödselkväve beräknas orsaka utsläpp av 4 kg koldioxid per kg kväve (Börjesson 2006). Om all mineralgödsel som används i svenskt skogsbruk kunde ersättas av slam, skulle koldioxidutsläppen vid mineralgödsetillverkning årligen minska med 36 000 ton. Andelen slam som hygieniseras och torkas, och därför lämpar sig för skogsgödsling, ökar i Sverige. Om allt slam i Sverige skulle användas som skogsgödsel, skulle det räcka till ca 20 000 ha årligen. Varje års gödsling skulle då resultera i en ökad koldioxidbindning i skogen på 1 350 000 ton CO₂. Efter 15 år skulle ändå inte mer än 300 000 ha eller 1,5 % av all skogsmark ha gödslats. Drygt 70 % av allt slam uppfyller samtliga gräns- och riktvärden för tungmetaller och syntetiska organiska ämnen för tillåten användning på jordbruksmark (Statistiska centralbyrån 2010). Omfattande undersökningar av miljöeffekterna av skogsgödsling, med både avvattnat och torkat slam i Sverige och Nordamerika, har visat att sannolikheten är mycket liten att oacceptabelt negativa miljöeffekter skulle uppstå vid skogsgödsling med det slam som nu produceras i svenska reningsverk (Sahlen 2006).

En användning av avloppsslam som skogsgödsel borde alltså vara i linje med samhällets strävan mot ekologiskt hållbarhet, kretsloppstänkande och ökat utnyttjande av förnyelsebara råvaror. Fortsatta undersökningar av tillväxt- och miljöeffekter pågår därför i några forskningsprojekt, med syfte att utveckla praktiskt tillämpbara metoder för skogsgödsling med slam i praktisk skala.

1.4 Pågående FoU-verksamhet med skogsgödsling med slam

1.4.1 Kolsänkor Norrbotten

Sedan 2006 har sammanlagt 800 ha praktiska skogsgödslingsförsök anlagts av SLU, varav 300 ha med torkat granulerat slam från SYVAB och torkat pelletterat slam från UMEVA. Syftet med försöken är att jämföra effekterna på koldioxidbindning och trädttillväxt av mineralgödsling och gödsling med slam. Vissa miljöeffekter undersöks även. Sveaskog är markägare och försöken omfattar 22 bestånd med tall, gran, björk och contortatall av olika åldrar. Totalt finns ca 1 000 fasta provtytor. Fortsatt uppföljning är planlagd till i första hand 2012.

1.4.2 Från Bioavfall till Bionäring – hållbara kretslopp med rötning och gödsling

I samarbete mellan SLU i Umeå och Yrkeshögskolan Novia och Kustens Skogscentral i Vasa, Finland drivs sedan 2009 ett treårigt FoU-projekt med syfte att höja kvävehalten i rötrest och att, via praktiska skogsgödslingsförsök i Sverige, utveckla effektiva och miljöriktiga metoder och system för ett praktiskt utnyttjande av rötrest som skogsgödsel. I projektet ingår bl.a. logistik, tillväxt- och miljöeffekter och certifiering

1.4.3 Syntetiska organiska ämnen i avloppsslam – effekter vid skogsgödsling

I samarbete mellan Umeå universitet och SLU har förekomsten av en mängd syntetiska organiska ämnen undersökts på barr och i luft, mark och markvatten efter gödsling med slamgranuler från SYVAB, under tre år, och en riskbedömning har gjorts (Lindberg, Tysklind & Sahlén 2010)

1.5 Berikning av avloppsslam med kväverika biprodukter

Om kvävehalten i slammet kunde ökas till exempelvis 8 % skulle det teoretiskt innebära att slamdoseringen vid skogsgödsling kunde sänkas från 11 till ca 4 ton TS/ha och att därmed även gödslingskostnaderna per kg kväve skulle sänkas, och bli avsevärt lägre än för mineralgödsel. En lägre dosering skulle dessutom innebära att den tillgängliga mängden slam skulle räcka till en större areal, och att den tillförda mängden av önskade ämnen som tungmetaller och syntetiska organiska ämnen vid gödsling skulle minska avsevärt. En högre kvävehalt skulle dessutom ge en, ur näringssynpunkt, mera lämplig balans mellan P och N i slammet.

Ett sätt att öka kvävehalten, vore att tillsätta slammet någon kvävehaltig biprodukt, som kan erhållas till låg kostnad. Exempel på sådana biprodukter är ureafettsyraester (UF) med 33 % kvävehalt, som uppstår i fiskindustrin och ammoniumsulfat (21% kväve), som är en restprodukt från stålindustrin (Bilaga 1 & 2). Båda produkterna är klassificerade och får användas som gödselmedel. Tillgången per år är för närvarande ca 15 000 ton av UF och

5 000 ton av ammoniumsulfat, som teoretiskt kan tänkas bli tillgängligt för kväveberikning av slam. Vid en höjning av kvävehalten från 4 till 8 %, skulle tillgången på UF räcka till berikning av ca 94 000 ton slam TS och ge 110 000 ton kväveberikat slam. Detta skulle räcka till årlig gödsling av ca 27 000 ha skogsmark, 45 % av den areal som för närvarande årligen skogsgödslas i Sverige. Urea har tidigare använts som skogsgödsel i praktisk skala i Sverige, men har senare ersatts av ammoniumnitrat. Om ammoniumsulfat skulle användas på samma sätt skulle det räcka till ytterligare ca 5 000 ha gödsling. UF finns för närvarande bara i pulverform som inte är möjligt att sprida med tillgänglig spridningsutrustning. Om UF kunde tillsättas i samband med torkning och granulering av slam, skulle en spridbar gödselprodukt med högre kvävehalt erhållas. Dessutom skulle slammets organiskt bundna kväve, som successivt blir växttillgängligt på lång sikt, kompletteras med den mera lösliga och snabbverkande urean. Totalkostnaden för en kväveberikning med UF beräknas till 8 kr/kg kväve i slutprodukten. Motsvarande pris är ca 14 kr/kg kväve för det ammoniumnitrat (SkogCan) som nu används som skogsgödsel. Förberedande laboratorieförsök i torkskåp med UF har visat att det mesta av tillsatt kväve stannar kvar i slammet vid uppvärmning/torkning till 100 grader. Det är därför sannolikt att kvävet även under praktiska förhållanden i befintliga slamtorkar, skulle bli kvar i slammet.

2 Syfte med projektet

Syftet, med detta projekt var därför att testa tillverkning och egenskaper för kväveberikat, torkat och granulerat avloppsslam och utvärdera :

- tillverkningsprocessen för kväveberikat torkat slam
- gödslingsegenskaperna hos kväveberikat, granulerat, torrt slam
- tekniska, ekonomiska och miljömässiga effekter vid användning av kväveberikat slam som skogsgödsel

3 Genomförande

Försök har genomförts med rötat slam från Himmerfjärdsverket och Tivoliverket i Sundsvall. Båda verken har mekanisk, kemisk och biologisk avloppsvattenrening. Som fällningskemikalie för fosfor används järnsulfat i Himmerfjärdsverket och polyaluminiumklorid i Tivoliverket. Rötningen görs i båda verken vid +37 grader.

3.1 Laborieförsök med kväveberikning

3.1.1 Syfte

Syftet med laborieförsöken var att undersöka effekterna av slamtyp, torktemperatur och torktid för avloppsslam, på kvävehalten i det torkade slammet, efter Berikning med Urea (BU) med hjälp av UreaFettsyraester (UF).

3.1.2 Material och metoder

Två försök utfördes i laboratorieskala hos SYVAB, Himmerfjärdsverket.

Försök 1

I försök 1 användes avvattnat slam från Himmerfjärdsverket. Först bestämdes torrsubstanshalterna (+105° C, 16 timmar) i avvattnat slam efter dekantercentrifugering och i UF till 22,5 % och 93 %, respektive. Slam och UF blandades sedan för hand i tre koncentrationer där UF tillsattes med 5 (BU5, 10 (BU10) och 20 % (BU20) av slammets torrsvikt. Varje slam/UF-blandning delades upp på fyra aluminiumformar (15 x 9 x 6 cm) per torktemperatur och fördelades ut jämnt. Det blev ett ca 1 cm tjockt lager i varje form. Proverna torkades i värmeskåp (SS, Buch&Holm, Venticell) vid temperaturerna 80, 90 och 100° C. Torrsubstansvikten för varje prov beräknades med hjälp av uppmätt TS-halt och blandningsförhållande. Under torktiden vägdes två prover per koncentration varje timme för bestämning av när minst 90 % TS-halt uppnåddes. Efter 300 minuter var den beräknade TS-halten över 90% för alla blandningar och torkningen avbröts. Analys av totalkväve och ammoniumkväve gjordes vid Alcontrol i Linköping av prov uttagna efter 90 och 300 minuters torkning. Kvävehalten i ej berikat slam(B0) analyserades även, och användes för beräkning av kvävehalt före torkning i de tre proven av BU.

Försök 2

I försök 2 användes avvattnat slam från Himmerfjärdsverket (29 % TS) och från Tivoliverket i Sundsvall (21 % TS), för att se om det fanns skillnader i kväveförlust mellan slam från olika verk med olika fällningskemikalie. Förfarande och utrustning var likadan som i försök 1, men torktemperaturerna var 80, 100 och 120° C och tillsatserna av UF var högre (tabell 3-1). För bestämning av TS-halt under torkningen vägdes några prover varje timme. Det tog tre timmar vid 120 grader och ca fem timmar vid 80 och 100 gra-

der innan TS-halten nådde över 90 %. Prover togs ut efter 45, 90 och 300 minuter (avslutning av försöket) för bestämning av kvävehalt.

Tabell 3-1 Beteckningar och blandningsförhållanden för torkningsförsök 2. B0=ingen tillsats av UF. BUx=tillsats av UF till kvävehalt x% före torkning.

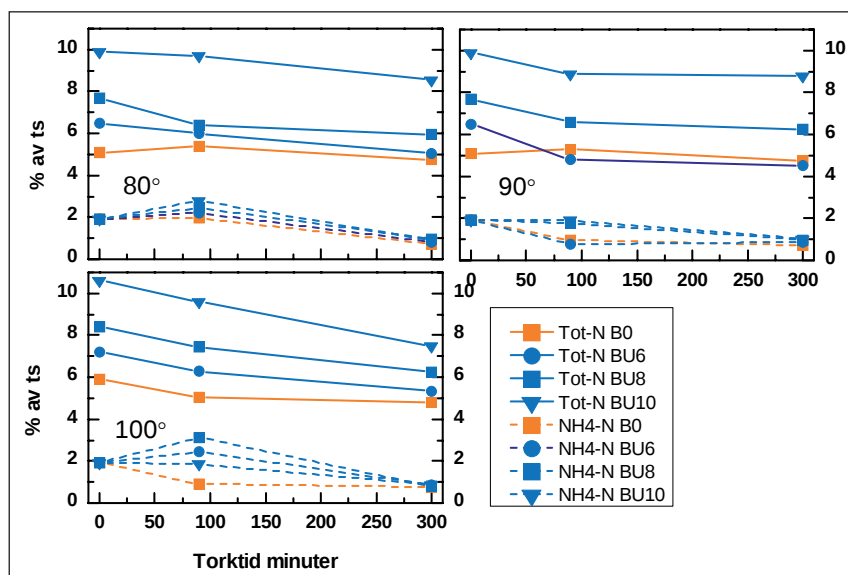
Beteckning		Tillsatt UF ³ i % av slammets torrsvikt					
		80° C		100° C		120° C	
H ¹	T ²	H	T	H	T	H	T
B0	B0	0	0	0	0	0	0
BU12	BU16	41	69	41	57	41	58
BU8	BU11	19	31	19	26	-	-

¹ Himmerfjärdsverket ² Tivoliverket ³ Ureafettsyraester

3.1.3 Resultat, diskussion och slutsatser

Försök 1

Totalkvävehalten sjönk i B0 från 6 till 5 % (16 % minskning) av TS vid 100° efter 5 timmar, men mindre för lägre temperaturer (figur 3-1). I BU sjönk kvävehalten med som mest ca 3 %-enheter (19% minskning) för den högsta inblandningen vid 100 grader. Tendensen var att kväveminskningen var störst under de första 90 minuterna och senare avtog, och var mindre vid 80 grader än vid 100 grader. Ammoniumkvävehalten hade ökat något för alla BU behandlingar efter 90 minuter, men ej för B0. Det tyder på att en del av urean ombildats till ammoniumkväve under torkningens första fas. Senare sjönk ammoniumkvävet och låg på en minskning på 1 %-enhet för alla behandlingar efter 5 timmar. Förmodligen utgörs den minskade kvävehalten för B0 i stort sett bara av ammoniumkväve, som avgår som ammoniak och att det sedan återstår en resthalt ammoniumkväve, som inte påverkas av torkningen för vare sig B0 eller BU.

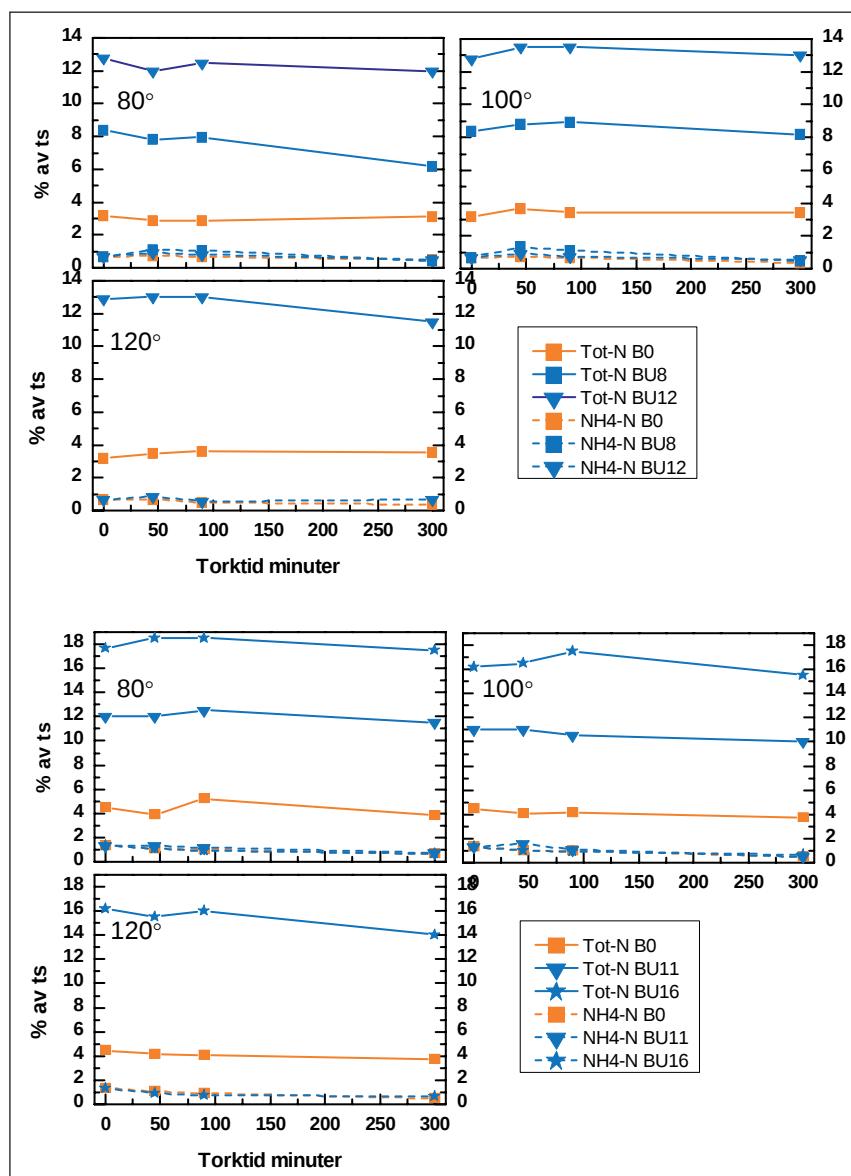


Figur 3-1 Halt av totalkväve (Tot-N, heldragen linje) och ammoniumkväve (NH4-N, streckad linje) under torkning vid tre olika temperaturer för oberikat (B0) slam och slam UF-berikat (BUx) till ca x% kvävehalt, före torkning. Slam från Himmerfjärdsverket,

Försök 2

Kvävehalterna i B0 var 3,2 % och 4,5 %, respektive, för slam från Himmerfjärdsverket och Tivoliverket (Figur 3-2). Efter ureaberikning var halterna drygt 11 % och 16 % för Tivoliverket och 8 och ca 12 % för Himmerfjärdsverket. De stora skillnaderna mellan verken berodde på att kvävehalten före berikning var oväntat låg i det avvattnade slammet från Himmerfjärdsverket. Orsaken till det är inte känd. Under torkningen var kvävehalten i stort sett oförändrad för B0 vid alla temperaturer och för båda slamtyperna. För BU sjönk kvävehalten med som mest 2 %-enheter vid torkning vid den högsta temperaturen +120°.

I genomsnitt minskade kvävehalten med högst ca 1%-enhet för BU. Inga tydliga skillnader förelåg mellan slamtyper, inblandningsgrader eller tem-



Figur 3-2 Halter av totalkväve (Tot-N, heldragen linje) och ammoniumkväve (NH4-N, streckad linje) i avvattnat slam (B0) och avvattnat slam, berikat med UF (BUx) till totalkvävehalten x%, under torkning i torkskåp vid olika temperaturer. Slam från Himmersfjärdsverket (överst) och Tivoliverket (underst).

peraturerna 80 och 100°. Ammoniumkvävehalten låg under 1 % i samtliga fall och förändrades inte nämnvärt under torkningen. Resultaten från försök 2 uppvisar alltså en genomsnittligt något lägre kväveförlust än försök 1.

Slutsatserna av laboratorieförsöken är att kväveförlusterna från slam, UF-berikat till totalkvävehalter på upp till 16 %, under torkning vid +80 till +120° C, är i genomsnitt ca 1 %-enhet. Det innebär att den absoluta kväveförlusten från kväveberikat slam är av ungefär samma storleksordning som för oberikat slam, för torktider som ungefär motsvarar vad som är fallet vid torkning i praktisk skala i Himmerfjärdsverkets torkanläggning.

3.2 Praktiska försök med kväveberikning hos SYVAB

3.2.1 Himmerfjärdsverkets avloppsrening och slamtorkningsanläggning

Himmerfjärdsverket tar årligen emot och renar ca 40 milj m³ avloppsvatten med ett innehåll på drygt 200 ton fosfor och 1200 ton kväve. Fosfor fälls med järnsulfat. Det slam som bildas vid reningen av avloppsvattnet rötas vid +37° C. Rötresten resulterar efter centrifugering i 3 650 ton avvattnad slam, med en TS-halt på 27 %. En del av detta torkas och granuleras till en TS-halt på över 90 %. Det avvattnade slammet används för deponiåterställning och till jordbruk. Det torkade slammet används i huvudsak som skogsgödsel. Det rötade och avvattnade slammet innehöll 2009 bl. a följande näringsämnen och tungmetaller, angivna som halt av torrsvikt:

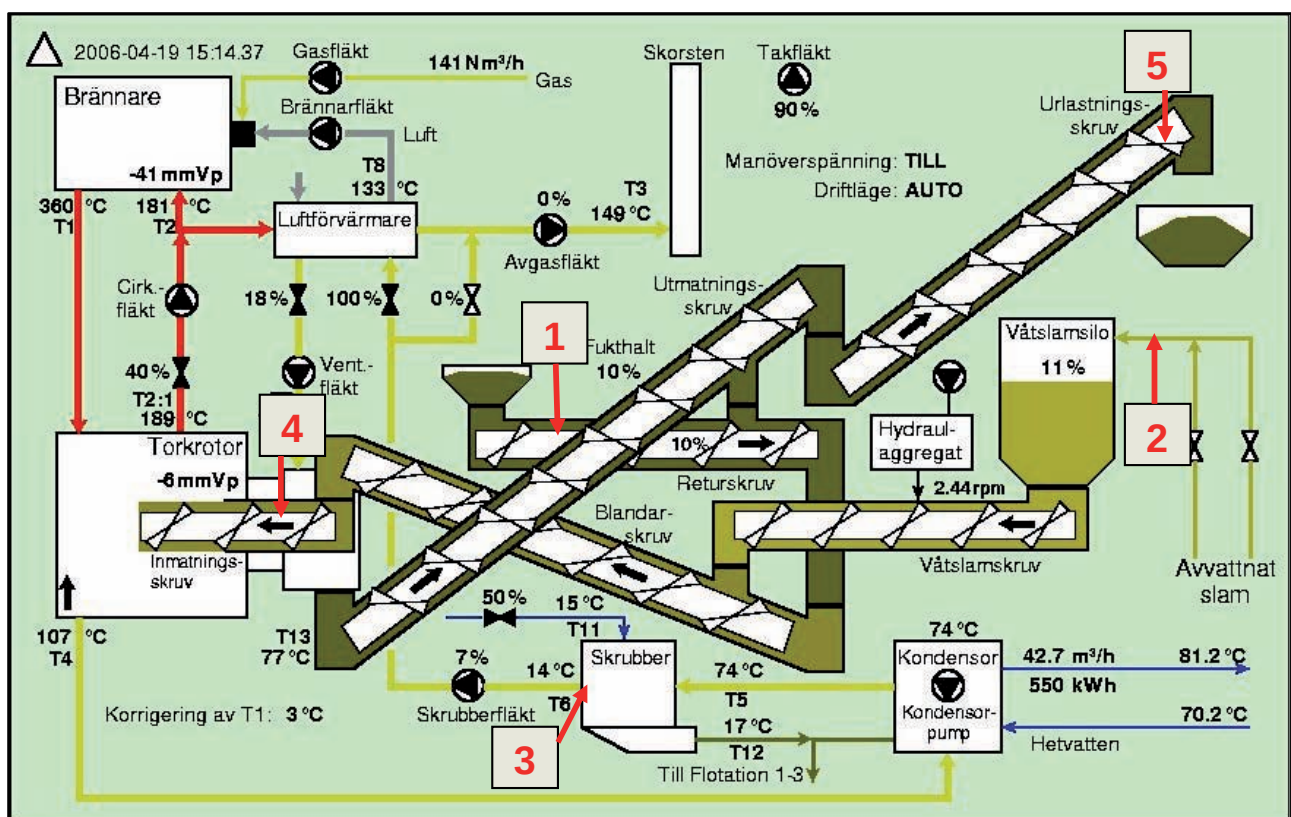
- Totalväve 4,6 %
- Fosfor 2,9 %
- Ammoniumkväve 1,0 %
- Kalium 0,15 %
- Kalcium 2,2 %
- Magnesium 0,33 %
- Bly 17 mg/kg
- Kadmium 0,67 mg/kg
- Koppar 313 mg/kg
- Krom 29 mg/kg
- Kvicksilver 0,63 mg/kg
- Nickel 26 mg/kg
- Zink 608 mg/kg

Torkanläggningen är en tubulär indirekt torktrumma med längd 6,5 m och 2,6 m i diameter (figur 3-3). Trumman har levererats av Torkapparater AB, och biogas används som bränsle för uppvärmningen. Ett återvinningssteg i torken återför ca 70 % av tillförd energi till värmesystemet. I den långsamt roterande torktrumman granuleras slammet till kulor samtidigt som det torkar. Slamvolymen i torktrumman är ca 9 m³ och slammets genomsnittliga uppehållstid i trumman är 4 timmar. Från trummans utloppssida går en ström av torra (TS-halt 96 %) slamgranuler, som delar sig i en utgående ström på 350 kg/timme med en utmatningsskruv till lager (Figur 3-4; (5)) och i en returström på 1 000 kg/timme med en returskruv (Figur 3-4; (1)). Denna returström blandas i en blandarskruv med det avvattnade slammet



Figur 3-3 Trumma för torkning och granulering av avvattnat slam vid Himmerfjärdsverket.

som kommer via en våtslamsskruv från en slamsilo, dit det skruvtransporteras efter centrifugering till 25 % TS-halt. Blandningsproportionerna är 1 000 kg torra granuler och 1 400 kg avvattnat slam per timme, vilket resul-



Figur 3-4 Schema över slambehandlingsanläggningen. 1: Returskruv för torra granuler. 2: Våtslamsskruv från centrifug. 3: Vattenskrubber för rening av torkluft. 4: Inmatningskruv till torktrumma. 5: Utmatningskruv från torktrumma

terar i en blandning med ca 55 % TS-halt, som matas in i torktrummans inloppsgavel med 2 400 kg/timme med en inmatningsskruv (Figur 3-4; (4)). Ingen beräkning har gjorts av energiåtgång och kostnader för torkning och granulering av slammet.

Temperaturerna i torken är +350° C i inloppet till uppvärmningstuberne och +180° i utloppet. Luften, som kontinuerligt ventileras ut ur trumman, har temperaturen 90–100° C och renas i en vattenskrubber (Figur 3-4; (3)). Temperaturen på de utmatade torra slamgranulerna är +80–90°.

3.2.2 Syfte med de praktiska försöken

Efter att laboratorieförsöken visat att det är möjligt att torka slam, berikat med Urea Fettsyraester (UF) utan att de absoluta kväveförlusterna blir större än vid torkning av av oerikat slam, vid temperaturer och torktider som kan förekomma i praktisk drift av torktrumman i Himmerfjärdsverket, var syftet med de praktiska försöken att undersöka:

- möjligheterna att dosera UF till slammet före torkning vid kontinuerlig drift av torkanläggningen,
- vilken kvävehalt som kan erhållas i de producerade slamgranulerna,
- granulernas kvävehalt under lagring,
- kväveavgång under torkningen via analys av kvävehalten i skrubbevattnet.

Syftet var även att producera en större mängd UF-berikade slamgranuler för fältförsök.

3.2.3 Material och metoder

Två praktiska doseringsförsök utfördes, den 5 mars 2008 och den 5–6 juni 2008.

Försök den 5 mars, genomförande.

UF fylldes i en stor plåtratt med en Tomal kalkdoserare i botten, som matade ut urean till den underliggande returskruven för torra granuler (figur 3-5). Doseringen ställdes in på i genomsnitt 2 kg per minut och kontrollerades var 15:e minut med hjälp av uppsamling och vägning av utmatad mängd. För att matningen fram till kalkdoserarens utmatningsskruvar skulle fungera, måste UF röras om manuellt. Annars bildades det hålrum runt skruvarna och doseringen upphörde. Det var inte praktisk möjligt att mäta flödet av avvattnat slam från våtslamsilon under försöket. Försöket pågick under 8 timmar och provtagning av skrubbevatten och färdiga slamgranuler gjordes (vid utmatningsskruven (figur 3-6)) vid upprepade tillfällen för analyser av kväveinnehåll. Analyser av slamgranuler utfördes vid Eurofins Food & Agro Sweden laboratorium i Lidköping och vattenproverna analyserades vid Himmerfjärdsverkets eget laboratorium.

Försök den 5/6 juni, genomförande

Vid det andra försöket ändrades proceduren så att UF doserades i skruven som transporterar slammet från dekantercentrifugen till slamsilon (Figur 3-4; (2)). Doseringen ställdes in på 2 kg UF per minut och försöket pågick i 24 timmar. Det var inte heller nu praktisk möjligt att mäta flödet av avvattnat slam. Provtagning gjordes av skrubbevatten och färdiga torra slamgra-



- a: UF.
- b: plåtratt med kalkdoserare i botten.
- c: kalkdoserare.
- d: omrörning, ureaesterns konsistens gjorde att det lätt bildades hålrum om den inte rördes om kontinuerligt.
- e: provtagning för kontroll av dosering.
- f: slamprovtagning för kväveanalyser.

Figur 3-5 Försök den 5 mars



Figur 3-6 Utmatning av färdiga UF-berikade slamgranuler.

nuler under 18 timmar. Proverna analyserades som i försöket den 5 mars. Sammanlagt tillverkades ca 9 ton av ureaberikade slamgranuler (BU) En del användes i ett lagringsförsök, där BU och B0 lagrades i öppna hinkar vid rumstemperatur och i kylskåp, samt utomhus i storsäck under 11 månader.

En del användes till ett skogsgödslingsförsök i Lyckseletrakten, och resten, ca 7 ton, för test av spridbarhet vid skogsgödsling i praktisk skala med traktorspridare i trakten av Morjärv i Norrbotten.

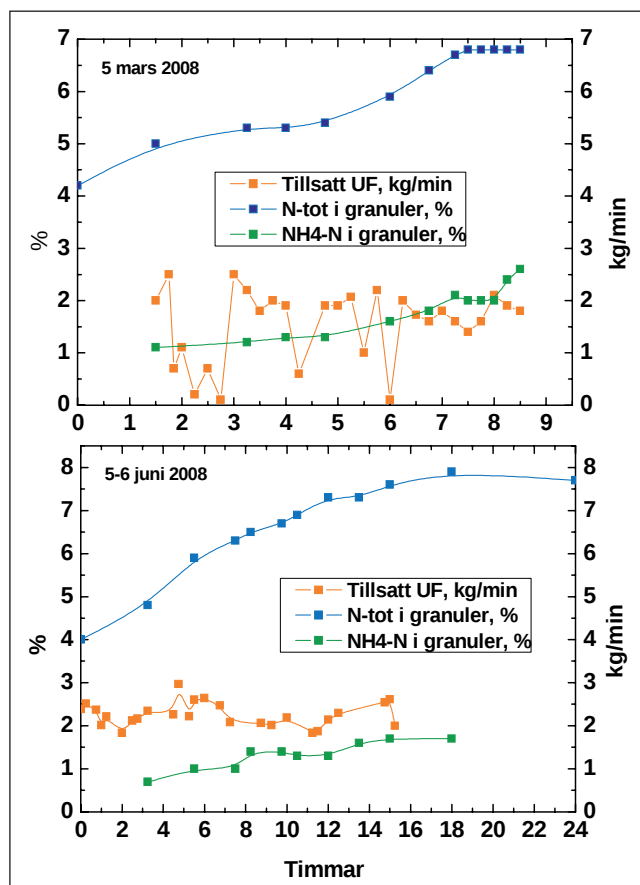
Vid båda försöken skedde ingen aktiv blandning av avvattnat slam och UF till en homogen massa före torkningen, utan UF doserades in i en transportskruv, som förde slammet vidare mot torktrumman. Med tanke på slammets konsistens är det därför sannolikt att mängden UF och kvävehalten kan variera en del mellan granuler.

3.2.4 Resultat, diskussion och slutsatser

UF-dosering och kvävehalter

Vid det första försöket i mars ökade kvävehalten i de färdiga granulerna kontinuerligt från 4,2 % före starten av ureadoseringen till 6,8 % efter 7,5 timmar, och verkade stabiliseras på den nivån (figur 3-7). Under samma tid ökade ammoniumkvävehalten från 1 till 2,5 %, vilket tyder på att den ökade totalkvävehalten till viss del består av ammoniumkväve. Det beror förmodligen på att en del av tillsatt UF bryts ner. Doseringen av UF varierade kraftigt, beroende på matningsproblem, och blev i genomsnitt ca 1,6 kg/minut stället för planerade 2 kg/minut. Under körningen steg kvävehalten i skrubbevattnet från 55 före försökets start till 80 mg/l, vilket visar att gasformigt kväve avgick från UF-slamblandningen under torkningen.

Vid det andra försöket ökade totalkvävehalten kontinuerligt från 4 till 7,9 % efter 18 timmar och stabiliserade sig på 7,7 %. Ammoniumkvävehalten ökade inte lika mycket som i första försöket, utan stannade på 1,8 %



Figur 3-7

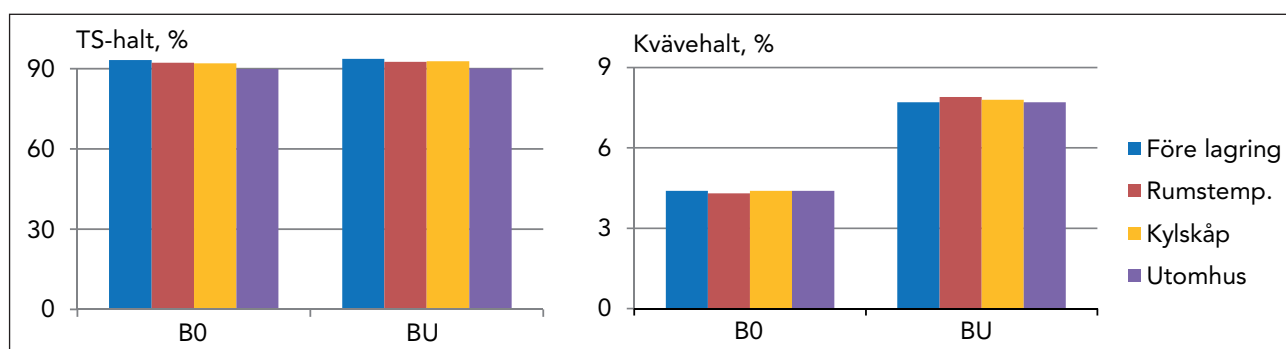
Tillsatt mängd UF till avvattnat slam före torkning och granulering (U), och kvävehalter beräknade på TS i färdiga slamgranuler vid praktiska inblandningsförsök hos SYVAB, Himmersfjärdsverket i mars och juni 2008.

efter 18 timmar. Under tillverkningen steg kvävehalten i skrubbevattnet från 50 innan försöket påbörjades, till 110 mg/l, alltså högre än i första försöket. Det tyder på en ökad kväveavgång, som kan förklara den lägre halten av ammoniumkväve i de färdiga granulerna. En nackdel med granuleringsprocessen är att granulerna via returströmmen utsätts för upprepade uppvärmningar, vilket förmodligen ökar risken för kväveavgång.

Effekter av lagring

TS-halten var 93 % för både B0 och BU före lagring (figur 3-8). Efter 11 månaders lagring var TS-halten fortfarande minst 90 %, även i de granuler som lagrats utomhus i storsäck under presenning, där luftväxlingen var mycket begränsad. Risken för självantändning av granulerna till följd av sänkt TS-halt bedöms därför vara liten. Det var ingen skillnad i TS-halt mellan B0 och BU. Kvävehalten i granulerna påverkades inte heller av lagringssättet. UF-berikade granuler kan därför lagras under lång tid utan att kvävehalten förändras. Det är betydelsefullt, eftersom en stor del av de tillverkade torra slamgranulerna måste lagras fram till sommaren då gödsling kan utföras.

Slutsatserna av försöken är att det går att tillsätta UF och framställa slamgranuler med höjd kvävehalt i praktisk skala, som kan lagras utan att förändras. En viss men liten kväveförlust sker under torkningen/granuleringen.



Figur 3-8 Ts-halt och kvävehalt i ej berikade(B0) och UF-berikade granuler (BU) före och efter lagring i 11 månader

3.3 Skogsgödslingsförsök med kväveberikat, granulerat slam

3.3.1 Syfte

Syftet med fältförsöken var att för oberikade (B0) och UF-berikade (BU) slamgranuler undersöka:

- slamgranulernas nedbrytning och kväveinnehåll,
- konduktiviteten i markvattnet,
- kväveinnehållet i tallbarr,
- spridbarhet med traktorspridare,
- trädutväxten.

3.3.2 Material och metoder

Ett gödslingsförsök anlades på Hemberget (X-koordinat 164471, Y-koordinat 717099, höjd över havet 290 m) i Lycksele kommun. Sveaskog är mark-

ägare, beståndet domineras av tall och är ca 45 år (figur 3-9). Medelhöjden är 15 m, medeldiametern 23 cm och stamantalet 770 per ha i medeltal. Jordarten är sandig morän, fuktighetsklassen är frisk och ståndortsindex är T18.



Figur 3-9 Försökslokalen Hemberget

Två försöksytor om 46 x 46 m mättes upp. Dessa delades sedan i vardera fyra ytor om 23 x 23 m. I centrum av varje sådan yta grävdes en undertryckslysimeter (slangförsedd porslins kropp) ner på 50 cm djup för uppsugning av markvattenprover.. De åtta försöksleden fördelades med lottning på dessa totalt 8 ytor. Försöksleden var B0 och BU från de praktiska försöken hos SYVAB i juni 2008, i tre doseringar, mineralgödsel (dosering som vid praktisk skogsgödsling) och ogödslad kontroll (tabell 3-2). Kvävehalten var 4,4 % och 7,7 %, respektive, för B0 och BU. Gödsling utfördes manuellt med hinkar den 11 juli 2008, från storsäckar som transporterats från Himmerfjärdsverket.

Tabell 3-2 Försöksledsbeskrivning för skogsgödslingsförsöket i Hemberget

Försöksled	Dosering, kg N/ha	Beteckning	Halt N-tot, % av TS	Halt NH ₄ -N, % av TS	TS-halt, %
Ogödslat	0	Kontroll	-	-	-
Slamgranuler	150	B0:150	4,4	0,5	93,3
"	310	B0:300	4,4	0,5	93,3
"	616	B0:600	4,3	0,5	95,7
UF-berikade slamgranuler	150	BU:150	7,5	1,7	93,8
"	310	BU:300	7,7	1,7	93,8
"	618	BU:600	7,7	1,7	93,4
Mineralgödsel, SkogCan	150	Min:150	27,2	13,6	-

I samband med gödslingen placerades nätpåsar av finmaskigt nylontyg, fyllda med ca 50 g av B0 och BU i humusskiktet utanför de gödslade provytorna (figur 3-10). Syftet med detta var att undersöka granulernas nedbrytning och kväveförlust i marken. Tre sidor av en ca 15 x 20 cm stor rektangel



Figur 3-10 Nätpåsar med slamgranuler, begravda i humustäcket. Den uppfläktade rotmattan och vegetationen återställdes så att påsarna var fullständigt täckta.

skars ner genom humusskiktet och till ett djup omedelbart under rötter från bl.a gräs, blåbärsris och örter, där nätpåsen placerades. Djupet varierade mellan 5 och ca 10cm beroende på humusskiktets tjocklek. Den uppfläktade markbiten lades sedan tillbaka över nätpåsarna. Totalt 18 påsar av vardera B0 och BU placerades ut. Vid tre tillfällen, i oktober 2008 och i juni och oktober 2009, samlades sex slumpvis valda påsar av B0 och BU in. Påsarna tömdes, eventuellt skräp rensades bort, och innehållet vägdes. TS-halten i slamgranulerna bestämdes för alla insamlade påsar. På tre slumpvis valda påsar av B0 och BU bestämdes dessutom totalkväve och ammoniumkväve. Analyserna utfördes vid Eurofins laboratorium i Lidköping.

Markvattenprover togs vid 3 tillfällen 2008 och vid 5 tillfällen 2009 från de nedgrävda lysimetrarna. Konduktivitet i vattnet mättes med Jenway 4010 och pH med Mettler Toledo MP220 pH-meter, vid SLU i Umeå.

Prover av ett år gamla barr togs från tre slumpvist valda tallar per provyta i oktober 2008 och i september 2009. Alla provtagna träd stod på ett avstånd av minst 5 m från provytans yttergräns. Samma träd provtogs vid båda tillfällena. Barrn analyserades med avseende på innehåll av kväve med iCAP 6000 icp-oes, Thermo Scientific, vid Helsingin Yliopisto, Metsäekologian laitos i Helsingfors.

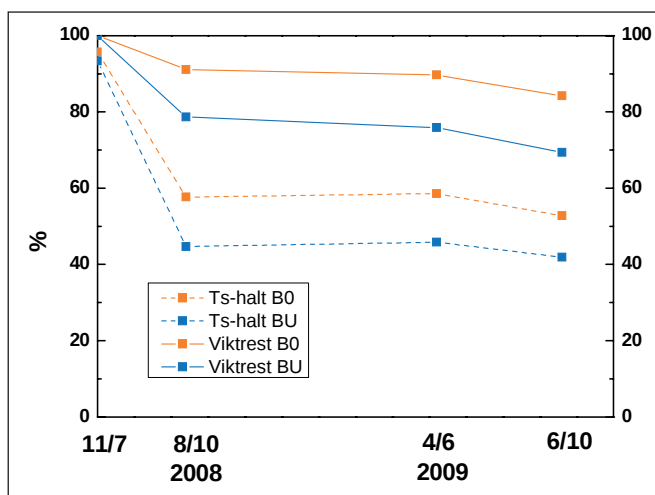
I ett tallbestånd nära Morjärv i Norrbotten traktorgödslades 7 ton UF-berikade slamgranuler (6 ton/ha) och oberikade granuler (12 ton/ha) den 17 september 2008. Doseringen i båda fallen motsvarande 480 kg N/ha. Inga resultat föreligger ännu från detta försök, men de UF-berikade granulernas hållfasthet var tillräcklig för att tåla spridning med traktorspridare.

3.3.3 Resultat, diskussion och slutsatser

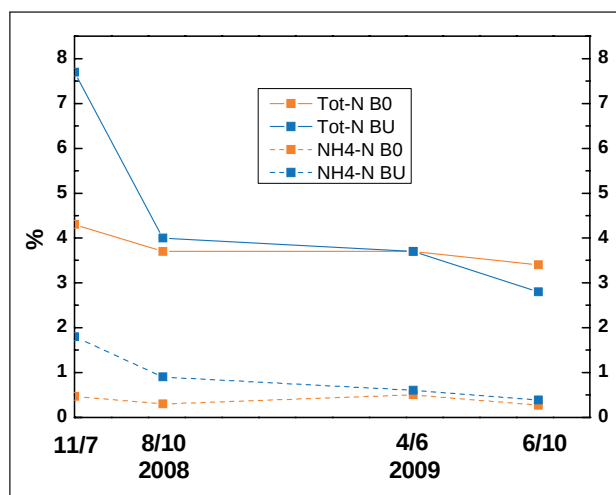
Nedbrytning och kväveinnehåll i slamgranuler i humustäcket

Efter tre månader i humustäcket hade slamgranulernas TS-halt sjunkit till ca 60 % för B0 och till 45 % för BU (figur 3-11), vilket visar att de tog upp vatten, och att det således var möjligt att vattenlösliga näringsämnen skulle kunna frigöras. Under vintern förändrades inte TS-halten nämnvärt, men sjönk ytterligare till ca 40 % för BU och till 50 % för B0 under sommaren 2009. På hösten 2008, efter 15 månader, återstod 90 % av granulernas vikt för B0 och 80% för BU. Under vintern var det ingen nämnvärd viktminskning, men efter sommaren 2009 återstod 85 % av granulvikten för B0 men bara 70 % för BU.

Halten totalkväve sjönk under de första tre månaderna till ca 4 % för både B0 och BU (Figur 3-12). Uppenbarligen löstes allt tillsatt UF ut, så att det mesta kvarvarande kvävet sedan utgjordes av det ursprungliga organiskt bundna kvävet i slammet, som mineraliserar och blir växttillgängligt senare. I oktober 2009 var totalkvävehalten 2,7 % för BU och 3,4 % för B0. För BU minskade även halten ammoniumkväve snabbt, från 1,8 till 1 % under den första sommaren/hösten. Halterna var ungefär lika för B0 och BU i oktober 2009.



Figur 3-11 Ts-halt och vikt i % av ursprungsvikt, vid olika tidpunkter, för slamgranuler i nylonnät påsar, begravda i humustäcket



Figur 3-12 Kvävehalt i slamgranuler i nätpåsar i humustäcket

Markvattenegenskaper

Konduktiviteten i markvattnet på 50 cm djup i marken indikerar förekomsten av joner som inte tagits upp av trädrötterna, utan läcker ut. I samband med kvävegödning är det framförallt de negativt laddade nitratjonerna (efter nitrifikation av ammoniumjoner) som kan läcka, medan de positivt laddade ammoniumjonerna lättare binds till markpartiklarna. En sänkning av pH-värdet i samband med gödning med slam, ökar risken för utlakning av bl a kadmium.

Tyvärr gick det inte att erhålla markvattnet från alla lysimetrar vid alla insamlings-tillfällen. Konduktiviteten var ca 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i vattnet från den ogödslade ytan (tabell 3-3). För B0 varierade konduktiviteten mellan 17

Tabell 3-3 Konduktivitet och pH i insamlade markvattenprover

Försöksled	2008, 08-10		2009, 06		2009, 08-10	
	Kond ¹	pH	Kond	pH	Kond	pH
Kontroll	13	5,8	8	6,3	10	6,3
B0:150	- ²	-	-	-	-	-
B0:300	-	-	42	5,8	17	6,2
B0:600	70	5,4	-	-	31	6,0
BU:150	27	5,8	16	6,3	17	6,0
BU:300	-	-	-	-	-	-
BU:600	17	6,2	11	6,4	-	-
Min:150	21	5,7	11	6,3	11	6,3

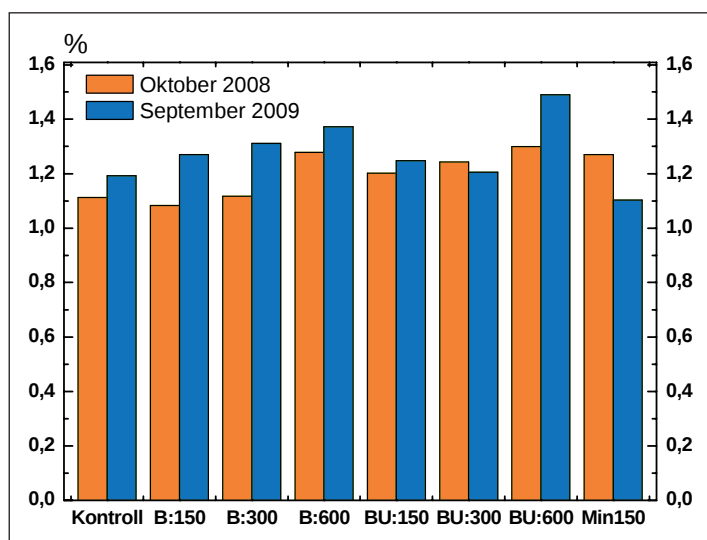
¹ µS/cm ² Inget vatten har erhållits

och 70 och för BU mellan 11 och 27 µS/cm. Erfarenheter från tidigare mätningar och analyser av markvatten efter skogsgödsling, är att det finns ett tydligt positivt samband mellan konduktiviteten och nitrathalten i markvattnet, och att konduktiviteter på under 100 µS/cm motsvarar en nitratkvävehalt på högst 2 mg/l. Resultaten i detta fall tyder på att det inte finns någon skillnad i nitrathalt i markvattnet mellan B0 och BU, trots att kvävehalten i BU hade minskat kraftigt under de tre första månaderna efter gödsling. Därför kommer analyser av totalkväve i de insamlade vattenproverna att utföras. För pH fanns det ingen tydlig skillnad mellan försöksleden.

Kväveinnehåll i barr

Tre månader efter gödsling i oktober var kvävehalten i barren förhöjd från 1,1 % utan gödsling, till 1,2–1,3 % för alla försöksled utom B:150 och B:300 (figur 3-13). Det visar att träden snabbt kan ta upp tillförd näring efter gödsling, men att mängden växttillgängligt kväve i de lägsta doseringarna av B0 inte var tillräckligt stor för att ge en höjd barrkvävehalt.

Ett år senare hade barrkvävehalten för B0 ökat till 1,3–1,4% för alla doseringar. För BU gav den högsta doseringen en kraftigt ökad kvävehalt till 1,5 %, den högsta av alla försöksled, medan halten i de två lägsta doseringarna av BU var i stort sett oförändrad sedan hösten 2008. För mineralgödsel



Figur 3-13
Kvävehalt i tallbarr för olika försöksled.

sjönk kvävehalten oväntat mellan 2008 och 2009 och var avsevärt lägre än för B0 och BU. De ökade kvävehalterna för slamgranulerna var av samma storleksordning som vanligen erhålls med kväve mineralgödsel.

Slutsatserna av fältförsöken var att :

- Den största delen av det tillförda UF löses ut i fält ur granulerna inom 2–3 månader efter gödsling.
- Konduktiviteten i markvattnet tyder på att ingen nämnvärd nitratutlakning inträffar efter gödsling och att det inte är någon skillnad i det avseendet mellan B0 och BU.
- Kvävehalten i barren ökar inom några månader efter gödsling
- De UF-berikade slamgranulerna är hållfasta nog att spridas med traktorspridare

3.4 Utlakningsförsök med torkat slam

3.4.1 Syfte

Syftet med utlakningsförsöken var att jämföra utlakningen i vatten av kväve och fosfor från några olika typer av UF-berikade och oberikade torra slamtyper.

3.4.2 Material och metoder

Fyra olika torra slamtyper undersöktes:

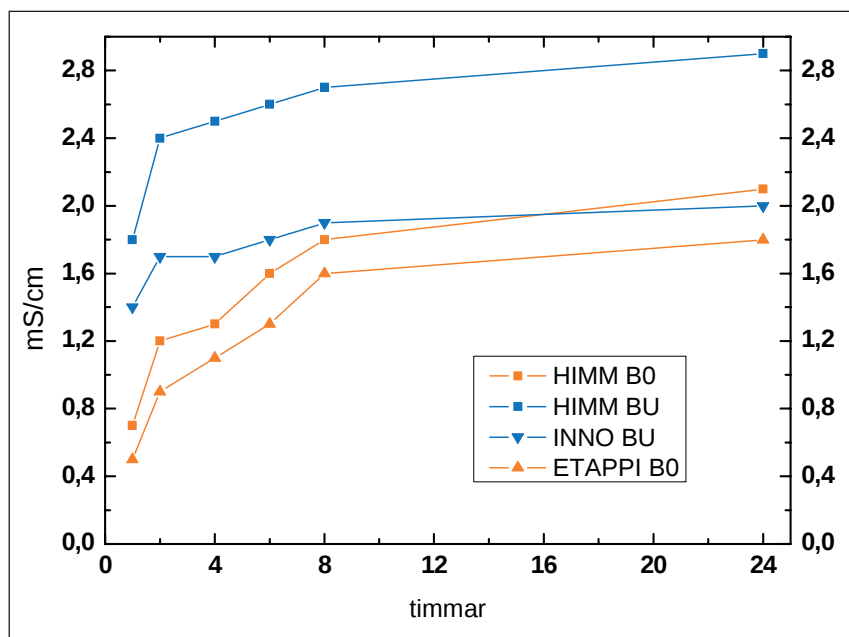
- oberikade slamgranuler från Himmerfjärdsverket (HIMM B0)
- UF-berikade slamgranuler från Himmerfjärdsverket (HIMM BU)
- UF-berikade avloppsslampellet från Innoplana, Schweiz (INNO BU)
- slampellet från rötat matavfall från Etappi OY, Ilmajoki (ETAPPI B0)

Undersökningen gjordes enligt Nordtest Methodic NT ENVIR 005 COMPILANCE LEACHING TEST (<http://www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/envir005.pdf>).

50 g torrs substans av respektive slamprov blandades med 400 ml avjoniserat vatten. Kontinuerlig jämn omrörning med magnetomrörare pågick i 24 timmar. Efter 1, 2, 4, 6, 8 timmar fick partiklarna sjunka ca 10 min och vätskan filtrerades med vattensug och konduktiviteten mättes på filtratet med konduktivitetmätare JENWAY 4010. Efter mätning återfördes provet till fortsatt omrörning. Efter 24 timmars slamning och kontinuerlig omrörning filtrerades större delen av vätskan med vattensug. Slutligen centrifugerades den fasta återstoden i 15 min vid 7 000 v/min med Beckman Coulter Avanti J-20XP centrifug. Filtratet och vätskefasen från centrifugeringen blandades och konduktiviteten mättes. Analyser av tot-N, $\text{NH}_4\text{-N}$ och tot-P i torrt slam och i vattenfasen efter 24 timmars utlakning gjordes vid Eurofins laboratorium i Lidköping.

3.4.3 Resultat, diskussion och slutsatser

Som konduktiviteten i vattnet visade, ökade mängden utlakade ämnen snabbt från de UF-berikade slamtyperna, medan det gick avsevärt långsammare för ej berikat slam (Figur 3-14). Efter 8 timmar avtog konduktivitets-



Figur 3-14 Konduktivitet i avjoniserat vatten under utlakningsförsök med olika typer av oberikade (B0) och UF-berikade (BU) torra slamgranuler och pellets.

ökningen. Efter 24 timmar var konduktiviteten allra högst (2,9 mS/cm) för de UF-berikade slamgranulerna från Himmerfjärdsverket, medan konduktiviteten för de andra tre slamtyper var omkring 2 mS/cm.

Tabell 3-4 Analysdata för torrt slam före lakning i avjoniserat vatten och för vattenfasen efter 24 timmars lakning.

		HIMM B0	HIMM BU	INNO BU	ETAPPI B0
Före lakning	TS-halt, %	93,6	93,1	93,7	91,2
"	Tot-N, %	4,3	7,3	6,0	2,6
"	NH ₄ -N, %	0,9	2,3	2,5	0,7
"	Tot-P, %	4,1	3,7	2,5	3,2
Efter 24 tim lakning	Konduktivitet, mS/cm	2,1	2,9	2,1	1,8
"	Tot-N, mg/l	840	4 000	4 700	350
"	NH ₄ -N, mg/l	260	410	190	140
"	Utlakat tot-N, % ¹	16	44	63	11
"	Tot-P, mg/l	46	81	35	18
"	Utlakat tot-P, % ¹	0,9	1,8	1,1	0,5

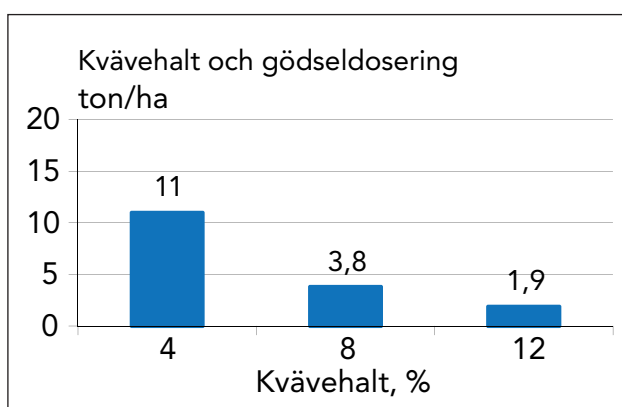
¹ Av ursprunglig mängd i torrt slam

TS-halten låg över 90 % för alla slamtyperna före lakning (Tabell 3-4). Totalkvävehalten var 6–7 % för BU och 2,6–4,3 % för B0. Fosforhalten låg mellan 2,5 och 4 %. Efter lakning var totalkvävehalten över 4 000 mg/l för BU och under 1 000 mg/l för B0. Uppenbarligen löstes det tillsatta UF-kvävet för BU lätt ut ur slammet, men kunde inte avläsas som ökad konduktivitet. Skillnaderna i ammoniumkvävehalt mellan B0 och BU är inte lika tydliga. För B0 från Himmerfjärden är ammoniumkvävehalten högre än för INNO BU. UF-berikningen verkar leda till en ökad vattenlöslighet

för slammets fosfor. Halten fosfor i lakvattnet var nästan dubbelt så stor i BU som i B0 för slammet från Himmerfjärdsverket. Samma tendens visade de två andra slamtyperna. Fosforhalten i lakvattnet var avsevärt högre för INNO BU än för ETAPPI B0, trots att fosforhalten i det torra slammet var 20 % lägre för INNO BU. Orsaken till den högre fosforutlakningen kan vara att slamgranulerna för BU har sämre hållfasthet och lättare faller sönder och löses upp i vatten. Av kväveinnehållet löstes nästan tre gånger så mycket ut från BU som från B0 för slamgranulerna från Himmerfjärden. För INNO BU var kväveutlakningen ännu högre, över 60 %, medan bara 11 % av kvävet i slampellet från Etappi, lakades ut. Mindre än 2 % av fosfor i de olika slamtyperna, lakades ut. Slutsatserna är att utlakningen av totalkväve och fosfor är mycket högre för UF-berikat än för ej berikat slam. Det ökar tillgången på växttillgängligt N och P i slamgranulerna i jämförelse med ej berikat slam, och bör därför ge en snabbare tillväxteffekt efter gödsling.

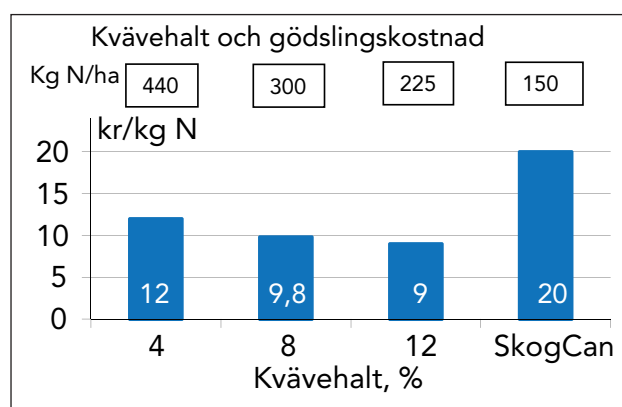
3.5 Tekniska, ekonomiska och miljömässiga konsekvenser av kväveberikning

En ökning av slammets kvävehalt med hjälp av tillförd UreaFettsyraester leder till att gödseldoseringen per hektar kan sänkas för samma tillförd mängd kväve. Det leder till lägre transport- och spridningskostnader, och slammet räcker till större gödslingsareal. Den högsta doseringen av slamgranuler per hektar vid gödsling, sjunker med ökande kvävehalt i granulerna. Doseringen begränsas av den rekommenderade högsta kvävedosen på 450 kg kväve per ha under en hel omloppstid, och den rekommenderade högsta dosen av lättlösligt kväve på 200 kg kväve per ha vid varje gödslingstillfälle (Skogstyrelsen 2007). För ej berikat slam med en kvävehalt på ca 4 %, varav 15 % är lättlösligt ammoniumkväve, motsvaras doseringen 450 kg N/ha av 11 ton slam/ha (Figur 3-15). Om slammet berikas med UF till



Figur 3-15

Beräknad maximalt rekommenderad slamdosering per ha för oberikade slamgranuler och UF-berikade till 8 och 12 % Tot-N.



Figur 3-16

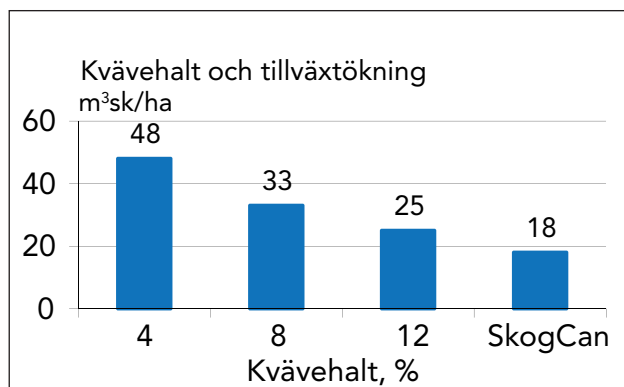
Gödslingskostnad per kg kväve vid traktorgödsling vid transportavstånd 200 km och kostnad för UF-berikning 7,5 kr per kg tillsatt N. I beräkningen har priset för slamgranulerna satts till 0. Transport- och spridningskostnader är hämtade från storskaliga gödslingsförsök 2006–2008 hos Sveaskog i Norrbotten

8 % totalkvävehalt, kommer det att innehålla 5,1 % lösligt kväve. Den maximala doseringen enligt ovan vid gödsling blir då ca 3,8 ton per ha. För slam som berikas till 12 % kvävehalt blir med samma beräkningssätt den maximala doseringen 1,9 ton per hektar.

Gödslingskostnaden är 12 kr per kg kväve för oberikade slamgranuler och blir drygt 30 % lägre om de UF-berikas till 12 % kvävehalt (Figur 3-16). Gödslingskostnaden för mineralgödsel är mer än dubbelt så hög som för UF-berikade slamgranuler.

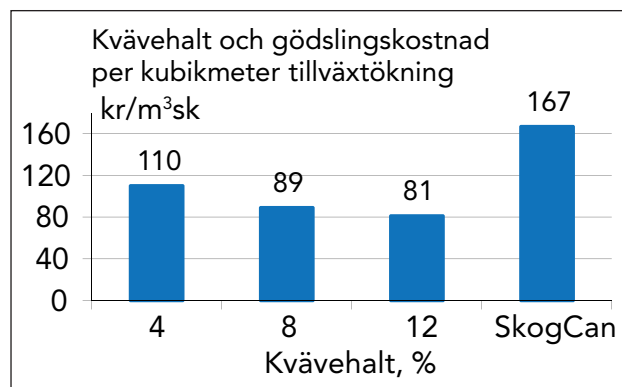
Den totala tillväxtökningen efter gödsling är nästan 50 m³sk/ha för oberikade slamgranuler (450 kg N/ha) och minskar med ökande kvävehalt till ungefär hälften för UF-berikade slamgranuler med 12 % kvävehalt (225 kg N/ha) (figur 3-17). Mineralgödsel i den praktiskt tillämpade dosen på 150 kg N/ha, ger den lägsta tillväxtökningen.

Gödslingskostnaden är drygt 100 kr per kubikmeter tillväxtökning för oberikade slamgranuler, och sjunker med ökande kvävehalt efter UFberikning till ca 80 kr vid 12 % kvävehalt (Figur 3-18). Kostnaden för mineralgödsel är dubbelt så hög som för UF-berikade slamgranuler. Den viktigaste



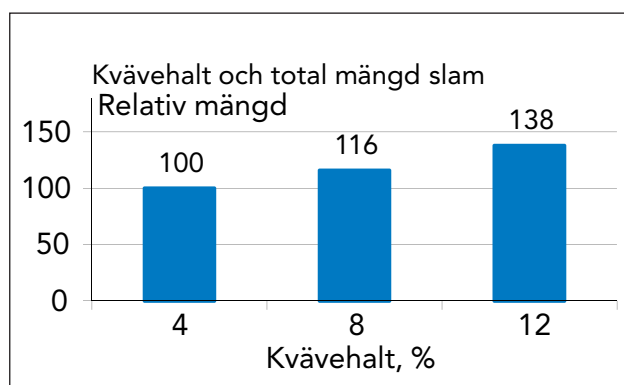
Figur 3-17

Tillväxtökning i barrskog efter gödsling med olika gödselmedel. För slamgranuler har tillväxtökningen satts till 11 m³ per 100 kg N och för mineralgödsel SkogCan till 12 m³ per 100 kg N.



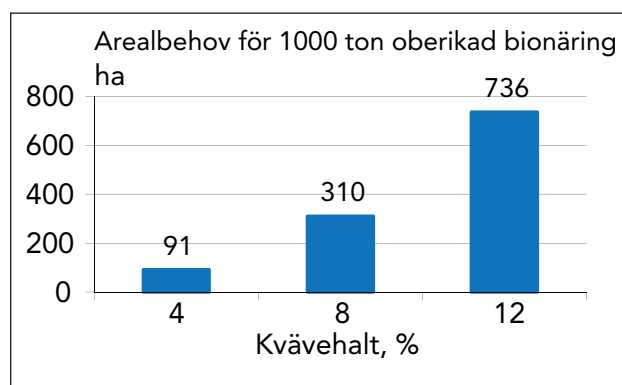
Figur 3-18

Gödslingskostnad per kubikmeter tillväxtökning.



Figur 3-19

Relativ mängd (vikt) slamgranuler med och utan UF-berikning.



Figur 3-20

Areal skogsmark som krävs för avsättning av 1 000 ton oberikat slam och efter berikning med UF till olika total kvävehalt.

orsaken till kostnadsskillnaderna är att det inte finns någon inköpskostnad för slamgranulerna, utan bara kostnader för UF-berikning, transport och spridning.

Vid UF-berikning av slam tillsätts UF, vilket ökar mängden slamgranuler (figur 3-19). Vid 8 % kvävehalt blir totalmängden slamgranuler 16 % större och vid 12 % kvävehalt blir mängden nästan 40 % större än om ingen UF-tillsats alls görs.

Skogsgödsling av 1000 ton oberikat slam med kvävehalt 4 %, kräver ca 90 ha (Figur 3-20). Om samma mängd slam UF-berikas till 8 % kvävehalt, krävs drygt 300 ha med den göseldosering som tidigare antagits. Vid 12 % kvävehalt behövs över 700 ha. Detta kan både ses som ett problem och en möjlighet. Om man betraktar slammet som ett kvittblivningsproblem, kan det vara bättre ju mindre areal som behövs för att bli av med slammet. Om man istället betraktar slammet som en näringsresurs, så är det en fördel om en höjning av kvävehalten gör att det räcker till gödsling av större areal. En UF-berikning innebär också att mängden tillförda oönskade ämnen, såsom tungmetaller och syntetiska organiska ämnen, minskar avsevärt vid gödsling. Minskningen blir 67 % vid 8 % kvävehalt och 88 % vid 12 % kvävehalt, vid varje gödslingstillfälle.

4 Slutsatser och rekommendationer

Följande slutsatser kan dras av de genomförda försöken och andra erfarenheter :

- Rötat avloppsslam kan berikas med Urefettsyraester och torkas under minst 5 timmar vid upp till 100 grader till över 90 % TS-halt, utan nämnvärd kväveförlust.
- Det tar minst 8 timmar av UF-dosering till det avvattnade slammet, innan kvävehalten i de färdiga torra slamgranulerna når upp till stabilt värde, vid torkning i Torkapparaters trumma på Himmerfjärdsverket.
- Kväveförlusten under torkning i praktisk skala kan förmodligen minskas med annan torkteknik, där de berikade och torra slamgranulerna inte utsätts för de upprepade torkförlopp som granulerna i returströmmen utsätts för i Torkapparaters trumma.
- Med särskild utrustning för mixning av avvattnat slam och UF-tillsats skulle förmodligen granuler med ännu mera homogen näringssammansättning kunna framställas.
- UF-berikade slamgranuler från Himmerfjärdsverket går utmärkt att traktorsprida och att lagra i upp till ett år, utan att TS-halt och kväveinnehåll förändras.
- Det tillsatta UF-kvävet lakas lätt ut ur berikade slamgranuler i vatten
- Ingen nämnvärd utlakning av kvävejoner till markvattnet sker under det första året efter skogsgödsling med UF-berikade slamgranuler i dosering upp till 600 kg N/ha.
- Kvävehalten i tallarnas barr ökar snabbt efter gödsling med slamgranuler och är efter ett år avsevärt högre än i ogödslade träd.
- UF-berikning av torkat granulerat slam ger sänkt gödseldosering, sänkta transport- och gödslingskostnader och minskad tillförsel till marken av tungmetaller och syntetiska organiska ämnen vid gödsling av skog, i jämförelse med ej berikade slamgranuler.
- Gödslingskostnaden per ökad tillväxt i kubikmeter, hälften så stor för UF-berikade slamgranuler som för mineralgödsling av skog.

Utifrån de positiva erfarenheterna från dessa undersökningar, rekommenderas ytterligare försöksverksamhet med berikning av slam med kväverika biprodukter. Målet bör vara att av avvattnat slam/rötrest skapa ett konkurrenskraftigt gödselmedel med förbättrad P/N-kvot, som kan få ett marknadspris. Följande bör fokuseras på:

- förbättra blandningen mellan slam och kvävetillsats, så att homogena gödselgranuler/pellets kan skapas,
- minska på kombinationer av lång tid och höga temperaturer, som leder till kväveförluster under tillverkningsprocessen,
- testa egenskaper som skrymdensitet, volymvikt, hållfasthet, dammning mm,
- undersöka utlakningsegenskaperna för kväveberikat slam,
- undersöka effekter av slamdosering på kväveutlakning i skogsmark i försöksskala,

- fortsätta uppföljningen av trädttillväxt och markvatteninnehåll i de anlagda gödslingsförsöken med UF-berikade slamgranuler i Hemberget och Morjärv,
- sökning av andra lämpliga kvävekällor för höjning av slammets kvävehalt.

5 Referenser

- Börjesson, P. 2006. Livscykelanalys av Salixproduktion. Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, Institutionen för teknik och samhälle, Avdelningen för miljö- och energisystem, Rapport nr 60, 21 p.
- En skogspolitik i takt med tiden. 2007. Regeringens proposition 2007/08:108, 142 p.
- Henry, C. L., D. W. Cole, et al. 1993. The use of municipal and pulp and paper sludges to increase production in forestry. *J. Sust. For.* 1(3): 41–55.
- Jacobson, S. 1997. Återföring av aska kan ge tillväxtförluster. *SkogForsk Resultat* nr 23, 4 p.
- Jacobson, S & Mikko Kukkola 1999. Skogsbränsleuttag i gallring ger kännbara tillväxtförluster. *SkogForsk Resultat* nr 13, 4 p.
- Lindberg, R., Tysklind, M., Sahlén K. 2010. Miljöriskbedömning av skogsgödsling med pelletterat/granulerat avloppsslam - syntetiska organiska ämnen. Slutrapport STEM projekt P30686-1, 2007–2009, 19p.
- Lundbäck, J. 2010. Stamtillväxt, biomassaproduktion och koldioxidbindning i Norrbotten efter gödsling med mineralnäring och bionäring i tallskog. SLU, Institutionen för skogens ekologi och skötsel. Examensarbete 2010:25. 27 p.
- Naturvårdsverket 2002. Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp. Rapport 12, 204 p.
- Naturvårdsverket 2009. Förslag till förordning återföra mera fosfor i kretsloppet, 8 p.
- Nordtest Methodic NT ENVIR 005 COMPLIANCE LEACHING TEST (Elektroniskt) <http://www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/envir005.pdf>
- På väg mot ett oljefritt Sverige. 2006. Betänkande från Regeringen Perssons kommission mot oljeberoende. 45 p.
- Sahlén, K. 2006. Sewage sludge fertilization of conifer forests in the Nordic countries and North America. Nordic Council of Ministers. Copenhagen. TemaNord 2006:501. 67 p.
- Sahlén, K. (in prep) Tillväxteffekter efter skogsgödsling med torkat granulerat/pelletterat avloppsslam.
- Skogsstatistisk årsbok 2009.
- Skogsstyrelsen 2007. Skogsstyrelsens allmänna råd till ledning för hänsyn enligt 30 § skogsvårdslagen vid användning av kvävegödselmedel på skogsmark. 3 p.
- Skogsstyrelsen 2008. Rekommendationer vid uttag av avverkningsrester och askåterföring. Meddelande 2008:2, 22 p.
- Statistiska centralbyrån 2010. Utsläpp till vatten och slamproduktion 2008, Sveriges officiella statistik, Statistiska meddelanden, MI 22 SM 1001, 30 p.



Box 47607, 117 94 Stockholm

Tel 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se