

# Metoder för växtetablering på sandmagasinet vid Aitik – miljöeffekter av röttslam som jordförbättringsmedel

Stig Ledin



---

Sveriges Lantbruksuniversitet  
Institutionen för markvetenskap  
Avdelningen för hydroteknik

Rapport 5  
Report

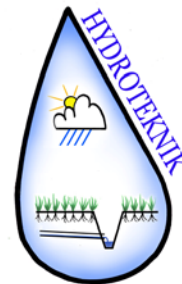
Swedish University of Agricultural Sciences  
Department of Soil Sciences  
Division of Hydrotechnics

Uppsala 2006  
ISSN 1653-6797 (online)

---

Denna serie rapporter (ISSN **1653-6797**) utges av Avdelningen för hydroteknik, Institutionen för markvetenskap vid Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala med början 2006. Serien publiceras endast elektroniskt och ersätter den tidigare tidskriftsserien Avdelningsmeddelanden (ISSN 0282-6569) utgiven mellan åren 1981-2004.

This series of Reports (ISSN **1653-6797**) is published by the Division of Hydrotechnics, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, starting in 2006. The reports are only published electronically and are replacing the former series of Communications (ISSN 0282-6569).



# **Metoder för växtetablering på sandmagasinet vid Aitik – miljöeffekter av rötslam som jordförbättringsmedel**

**Stig Ledin**

---

**Sveriges Lantbruksuniversitet  
Institutionen för markvetenskap  
Avdelningen för hydroteknik**

**Rapport 5  
Report**

**Swedish University of Agricultural Sciences  
Department of Soil Sciences  
Division of Hydrotechnics**

**Uppsala 2006**  
ISSN 1653-6797

---





## FÖRORD

Avsikten med studierna har varit att dels ta reda på hur man skall göra efterbehandling på sandmagasinet i framtiden, då gruvverksamheten vid Aitik avslutas, och dels vilka konsekvenser de framtida åtgärderna kommer att ha för markanvändningen och miljön. Arbetet startade 1996 och avrapporteras i år, 2006. Den i forskningssammanhang långa studieperioden har gynnat och utvecklat det goda samarbetet mellan uppdragsgivaren Boliden AB/New Boliden och Sveriges lantbruksuniversitet och framför allt institutionen för markvetenskap men också institutionen för landskapsplanering (Stad och land) vid Ultuna. Två forskarstuderande har varit verksamma inom forskningsområdet och flera examensarbeten har genomförts och uppsatser på grundutbildningsnivå har blivit resultatet av studier vid Aitik, framförallt beträffande sandmagasinet. Studenter med anknytning till Tyskland, England, Frankrike, Spanien har varit engagerade i tillägg till de svenska studenterna. De vetenskapliga avhandlingarna och uppsatserna som publicerats i internationella tidskrifter, uppsatser redovisade vid konferenser och examensarbetena, sammanfattas i denna rapport.

Rapporten omfattar i första hand:

- Målet för undersökningarna och den planerade vägen för att nå målet.
- Fördjupad karaktärisering av dels anrikningssanden, dels avloppsslam innefattande bland annat de nya kunskaperna som svepelektronmikroskoperingarna och analyserna med avseende på kolhydrater av olika slag har bidragit med.
- Sammanställning av resultat från hittills utförda studier under cirka 10 år.
- En översiktlig anvisning för praktiskt utförande vid efterbehandling av sandmagasinet med avloppsslam och växtetablering.
- En beskrivning av sandmagasinet, sådant det kan komma att se ut efter inblandning av slam och med etablerad växtlighet, samt en jämförelse av ett sådant sandmagasin med det omgivande landskapet, med avseende på vegetation och markegenskaper. Särskilt beskrivs markens kol- och kväveförråd per ytenhet i det åtgärdade sandmagasinet och kol- och kväveförrådet per ytenhet i den naturliga marken, varvid uppgifter om den senare marktypen hämtas ur befintliga databaser (riksskogstaxeringen mm).

Uppsala i oktober månad 2006  
Stig Ledin



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>ABSTRACT</b>	7
<b>SAMMANFATTNING GÄLLANDE ERFARENHETER UNDER PERIODEN 1996 – 2006</b>	8
Undersökningar på 1997-ytan och anslutande studier	9
Undersökningar på 1999-ytan	10
Undersökningar på 2000-ytan och anslutande studier	11
Undersökningar på 2002-ytan och anslutande studier	12
Undersökningar på 2003-ytan	17
<b>GENERELLA SLUTSATSER</b>	18
<b>FÖRBEREDELSE, JORDFÖRBÄTTRING OCH VÄXTETABLERING STEG FÖR STEG</b>	18
<b>DET VEGETATIONSTÄCKTA SANDMAGASINET OCH DEN OMGIVANDE NATURMARKEN</b>	20
<b>INLEDNING</b>	21
<b>MÅL FÖR HELA STUDIEN</b>	31
<b>MATERIAL OCH METODER</b>	32
Anrikningssanden	32
Avloppsslam som jordförbättringsmedel	37
Slammets egenskaper	39
Försöksplatsen och klimatet	46
<b>UNDERSÖKNINGAR PÅ 1997-YTAN OCH ANSLUTANDE STUDIER</b>	48
Material och metoder	48
Resultat och diskussion	52
Slutsatser	59
<b>UNDERSÖKNINGAR PÅ 1999-YTAN</b>	60
Material och metoder	60
Resultat	61
Slutsatser	71
<b>UNDERSÖKNINGAR PÅ 2000-YTAN OCH ANSLUTANDE STUDIER</b>	72
Material och metoder	72
Resultat	80
<b>UNDERSÖKNINGAR PÅ 2002-YTAN OCH ANSLUTANDE STUDIER</b>	110
Material och metoder	110
Resultat	115
Slutsatser	148
<b>UNDERSÖKNINGAR PÅ 2003-YTAN</b>	149
Jordförbättring och växtetablering illustrerad i en bildsvit	149
Slutsatser	156
<b>LITTERATURFÖRTECKNING</b>	157



## ABSTRACT

This report summarises the results from studies concerning vegetation establishment in mine tailings from the Aitik copper mine at Gällivare in Northern Sweden (67° 0,06' N; 20° 0,8' E ). The studies were carried out between the years 1996 and 2006. The tailings consist of the rest remaining after enrichment of metals from the crushed and milled copper ore. The material has been dispersed in water and pumped to the pond during somewhat more than 30 years. The deposit covers an area of about 1400 hectares and is enclosed by the slopes of a valley and by constructed dams. The tailings have the texture of fine sand and are prone to wind erosion when getting dry. Thus, there is a need to cover the surface when the tailings are no longer pumped into the pond. Since the area is so large, covering the tailings with soil from the surroundings is out of question. Covering the whole area with water is possible, because the climate is humid, but there is a risk of dam-break. Thus, to cover the deposit with vegetation probably is the most sensible action for erosion control.

The overall aim of the studies has been to find out how the establishing of vegetation should be performed, and to elucidate what consequences the measures taken at establishment will have for land use and the environment. The specific aims have been to get new knowledge on how trees, bushes, small bushes, herbs, grasses, lichens and mosses, naturally occurring in the Aitik area will develop in pure tailings and in tailings amended with organic material and alternatively mineral plant nutrients. Also a few plants from other environments were tried. Other specific aims were to find out which soil amendment that has the best positive and sustainable effect on development of plants, and to clarify the change over time in the amended tailings. The main environmental questions included how nitrogen and heavy metals behave at the plant establishment stage and later, and to state the risk of pollution of those elements. There were a number of field-, greenhouse- and laboratory trials performed to reach the goals.

Grass- and clover species are recommended as initial vegetation. Many species from the surrounding area were self seeded in the trials, indicating that the tailings deposit will be easily colonized by species naturally occurring in the area.

In several trials the pH decreased, due to the oxidation of pyrite occurring in the tailings, resulting in high solubility and plant availability of several metals, especially copper. This resulted in a low survival of the plants. However, the mining company has decided to alter the metal enrichment procedure, in order to remove as much pyrite as possible. It was also shown that only the additions of organic material to the tailings lead to a successful plant establishment. Digested sewage sludge was found to be suitable, and also potentially available in the large amounts needed. It was clear from the results that there is a risk of nitrogen pollution during the first growing season from the mineralized organic material. To prevent this, it is recommended that drainage water from the tailings pond should be taken care of during the first years. However, in the long run, the nitrogen pollution from the vegetated pond probably is smaller than from the surrounding natural land, due to a smaller total amount of carbon and nitrogen.

## **SAMMANFATTNING GÄLLANDE ERFARENHETER UNDER PERIODEN 1996 – 2006**

Studien rör sandmagasinet vid Aitik Gällivare (67° 0,06' N; 20° 0,80' E ). Anrikningssand, som utgör en rest efter metallanrikningen från krossad och mald kopparmalm vid Aitik, har pumpats uppslammad i vatten till ett magasin under något mer än 30 år. Längden på magasinet är cirka 7 km och bredden cirka 2 km. Just att området är så stort är en faktor som man måste ta hänsyn till hela tiden när man funderar över vad man skall göra med ytan efter avslutad gruvdrift. En annan faktor är att det är helt nödvändigt att hindra sandflykt från magasinet när ytan torkar upp. Verksamheten vid Aitikgruvan är, när detta skrivs år 2006, i högsta grad pågående och mycket tyder på att malmbrytningen och metallanrikningen kommer att pågå i många år framåt vid denna plats. Det innebär att sandmagasinet utökas ytterligare, eller att ett kompletterande magasin nyttjas. Avsikten med studierna har varit att dels ta reda på hur man skall etablera växter på sandmagasinet i framtiden, då gruvverksamheten vid Aitik avslutas, och dels vilka konsekvenser de framtida åtgärderna kommer att ha för markanvändningen och miljön.

Delmålen har varit att ta fram ny kunskap beträffande hur träd, buskar, ris, örter, gräs, lavar och mossor som naturligt finns i Aitiktrakten, samt valda växter från andra miljöer, utvecklas i ren anrikningssand och i sanden med olika tillsatser bestående av jordförbättringsmedel såsom organiskt material och mineralgödsel. Vidare ingick i delmålen att ta reda på vilka jordförbättringsmedel som har god och uthållig positiv effekt på växternas utveckling och hur förändring sker över tiden i anrikningssanden med och utan jordförbättringsmedel. Delmål med miljöaspekter var att klarlägga hur kväve och tungmetaller uppträder i samband med växtetableringen och efteråt och belysa riskerna för miljön.

Kunskapsuppbyggnaden för att nå målet med studierna kan beskrivas som en process, där nya insikter har lett till nya frågeställningar, vilka fått sina svar i nya undersökningar. Arbetet startade 1996 och har pågått under tio år.

Ett problem, eller i bästa fall ett lyckosamt förhållande, som kanske framträder tydligare när en undersökning löper under många år, är att grundförutsättningarna kan förändras med tiden. De viktigaste förutsättningarna vid växtetablering är klimatet på platsen, egenskaperna hos marken eller i detta fall det substrat där växrötterna skall utvecklas och slutligen egenskaperna hos växterna. I vanliga fall inräknas skötsel i förutsättningarna, men i det aktuella fallet med växtetablering på sandmagasinet vid Aitik kommer skötsel knappast in i bilden, utom möjligen i etableringsfasen. Växterna skall etableras och sedan klara sig framöver utan skötselinsatser. Av de nämnda förutsättningarna är egenskaperna hos växterna och klimatet de mest stabila, dvs. det som människan bara gradvis påverkar. I detta fall är växtsubstratet det som lättast förändras. I klartext handlar det om att en process i vilken man tar bort pyrit från anrikningssanden i större utsträckning än tidigare skall introduceras. Detta leder till att risken för försurning genom svavlets oxidation drastiskt minskar och att riskerna för metallutlakning likaså minskar. Samtidigt ökar chanserna påtagligt till en framgångsrik växtetablering och framförallt långsiktig överlevnad av växtsamhällen.

I dagens läge kan många hävda att även klimatet kommer att förändras genom den ökade växthuseffekten och växternas egenskaper kan ändras genom genmodifiering.

Om klimatet ändras kommer en temperaturhöjning knappast vara ett problem. Innebär det däremot att det kommer att regna mindre kan det innebära problem för växtlighetens överlevnad. Hittills har inte ökenspridning i de svenska fjälltrakterna lyfts fram som ett framtida problem kopplat till klimatförändringen, och när det gäller genmodifiering är det något man kan välja att göra, eller låta bli att göra. Så därmed kvarstår växtsubstratet som den faktor som bör vara föremålet för den största uppmärksamheten i det aktuella sammanhanget.

### Undersökningar på 1997-ytan och anslutande studier

Undersökningar för att ta reda på hur man gör för att etablera vegetation på sandmagasinet vid Aitik startade med planering 1996 och med ett första fältförsök 1997 i torrt läge (grundvattenytan långt under rotzonen). De olika markbehandlingsleden var följande: A) anrikningssand, B) anrikningssand + mineralgödselkväve motsvarande 60 kg N/ha, C) anrikningssand + mineralgödsel N+PK motsvarande 60 kg N/ha, 30 kg P/ha och 60 kg K/ha, D) anrikningssand + avloppsslam från Gällivare (ungefär 20 volymprocent) infräst till cirka 20 cm djup i sanden och E) anrikningssand + insådd av rödklöver (i stället för 20 olika arter som etablerades i försöksleden A, B, C och D). (Den optimistiska tanken var att rödklöver skulle fungera som grüngödsling, som skulle berika sanden med organiskt material, och att man året därpå skulle kunna så in olika arter). Vedartade växter samt örter, gräs, lavar och mossor etablerades. Frösådd nyttjades i tillägg till plantering, där det var möjligt annars enbart plantering.

En summering av tre säsongers växtetableringsförsök visade att vegetationen varit mest livskraftig på ytan med slamtillsats. Arter av träd och ris var mest framgångsrika, med undantag av första säsongen, då björnmossa och renlav klarade sig bäst. Bland träden var överlevnaden högst hos tall (*Pinus sylvestris*), björk (*Betula pubescens*) och vide (*Salix ssp.*), i synnerhet hos de individer som etablerats som plantor. Dödligheten var högst hos al (*Alnus incana*). Frön av gran (*Picea abies*) lyckades inte ge plantor som etablerade sig. De risarter som överlevde var främst kråkris (*Empetrum nigrum*) och ljung (*Calluna vulgaris*). Samtliga risarter var dock i mycket dåligt skick. De gräs som såts på försöksytan var rödsvingel (*Festuca rubra* 'Lovisa'), ängsgröe (*Poa pratensis* 'Fylking') och rörfilen (*Phalaris arundinacea* 'Palaton'). Resultaten av gräsetableringen var mycket dåliga. Endast på yta D, med inarbetat avloppsslam i sanden, låg dödligheten under 100 %, men majoriteten av gräsen dog även där. Vissa örter som såddes var baljväxter. Av dem klarade sig rödklöver (*Trifolium pratense* 'Bjursele') bäst, men överlevde endast på ytan med slamtillsats.

Det stod alltså klart i ett tidigt skede att man måste genomföra någon form av jordförbättring, för att sådd eller planterad vegetation skulle överleva på sikt. Ett annat förhållande som blev ytterst tydligt, var att sanden innehöll så mycket pyrit att pH-värdet sjönk till närmare 3 efter tre år och all vegetation dog, utom där slam tillförts.

Anrikningssanden har egenskaper som är förknippade med både sand och grovmo. Sandjordar är alltför torra medan grovmojordar är gynnsamma odlingsjordar från markfysikalisk synpunkt. Sanden utan tillsats är näringsfattig. De ljusa mineralkornen, mest kvarts, dominerar. Det är välkänt att kvarts är ett svårvittrat mineral. Fältspaterna och plagioklaserna som också finns i sanden vittrar något lättare än kvarts. De mörka mineralen är mest lättvittrade och kan därför släppa ifrån sig en del metallkationer som växter behöver, som  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ . De skivformade biotit- och muskovitpar-

tiklarna kan ha en viss adsorption av katjonerna till sina ytor. Partiklarna med storlekar  $< 0,002$  mm finns representerade i sanden i genomsnitt upp till 6 %. Dessa småpartiklar har den största betydelsen för adsorption av joner.

Utöver tester av Gällivareslam i fältförsöket 1997, testades i kärlförsök tre olika organiska material: rötslam, torv och fiberslam från kartongfabrik. Inblandning av organiskt material förändrar sandens fysikaliska egenskaper i gynnsam riktning för växterna. Det organiska materialet ger sanden en ökad vattenhållande förmåga, eftersom ett finare porsystem skapas. Mängden lättillgängligt vatten för växterna ökade dock inte nämnvärt vid en tillsats av organiskt material, eftersom det främst var andelen små porer med icke växttillgängligt vatten som ökade. Av de tre undersökta typerna av organiskt material som studerats på laboratorium och i växthus var vitmosstorv det material som fungerade sämst som jordförbättringsmedel. Torven hade minst påverkan på porstorleksfördelningen och tillväxten var sämst i torvblandningarna, troligen p.g.a. torvens låga pH och näringsinnehåll. Användandet av slam, såsom avloppsslam eller avfall från pappersbruk (fiberslam) är mer rimligt än torv från både ekonomisk, miljömässig och fysikalisk synpunkt. Fiberslam ökar sandens totala porositet och har en buffrande effekt på sanden, vilket är önskvärt med tanke på risken för försurning. Avloppsslammet är det bästa substratet ur växtnäringssynpunkt, då det innehåller mycket kväve och fosfor och även andra ämnen som växter behöver.

### Undersökningar på 1999-ytan

År 1999 anlades ett fältförsök (för demonstration) i fuktigt läge (grundvattenytan så högt att kapillär upptransport av vatten till rotzonen är möjlig). Avsikten var att testa de arter som gått relativt bra på 1997-ytan med större tillgång till vatten, allt mot bakgrunden att vattenförhållandena kommer att variera i det stora sandmagasinet den dag växtetablering skall ske. Till halva 1999-ytan fördes slam och över hela ytan spreds NPK-mikro. Markbehandlingen var: 1) Sand + NPK-mikro (55kg N/ha, 30 kg P/ha och 66 kg K/ha), 2) Sand + slam från Gällivare reningsverk inarbetat med fräs till cirka 20 cm djup. NPK-mikron i samma mängder som i behandling 1, spreds och inarbetades samtidigt. Växterna var ängsgröe (*Poa pratensis* 'Fylking'), rödsvingel (*Festuca rubra* 'Lovisa'), gran (*Picea abies*) och björk (*Betula pubescens*). Växterna på ytan utan avloppsslam överlevde första växtsäsongen och en bit in i andra växtsäsongen, men dog sedan. I juni året efter etableringsåret levde omkring 22 % av björkarna och 80 % av granarna i försöksledet utan slam. I det slambehandlade ledet hade 72 % av björkarna överlevt och 96 % av granarna. Gräsarterna växte glest i försöksledet utan slam och täckningsgraden varierade mellan 5-50 % och med tiden dog allt gräs liksom trädplantorna. I slambehandlat led hade gräset en täckningsgrad omkring 50 % i juni, men senare ökade täckningsgraden i detta led. Där uppträdde också spontan etablering av skräppor och nässlor från frön som följt med i slammet. De följande åren levde både gräs och trädplantor vidare under hela studieperioden och bland annat mossa etablerade sig spontant i slambehandlat led. I försöksled utan slam var marken fullkomligt fri från vegetation ett par år efter etableringsåret och framåt.



## Undersökningar på 2000-ytan och anslutande studier

År 2000 anlades ytterligare ett fältförsök i torrt läge. Ett av målen var att utröna hur stora mängder slam som behövs och vilket nedbrukningsdjup som är önskvärt för god växtetablering och överlevnad på sikt. Ett annat mål var att få erfarenhet av hur storskalig växtetablering på sandmagasinet kan gå till. Markbehandlingen innebar tillförsel av 30 volymprocent avloppsslam (från Gällivare reningsverk) och inarbetning till tre olika djup, nämligen 10, 20 och 30 cm. Tillförseln motsvarade ungefär 30, 60 och 90 ton kol per hektar. Kontrollbehandlingen var utan tillsats av slam. I tillägg fanns två försöksled med tillsats av enbart mineralnäring, inarbetad till dels 20, dels 30 cm djup. Rötter utvecklas främst där det finns vatten och näring, och det större inarbetningsdjupet skulle leda till större mängd växttillgängligt vatten för växterna. Ängsgröe och rödsvingel samt rödklöver (Bjursele) såddes in i korn som skyddsgröda. Kornet såddes med 15 cm mellan raderna på cirka 7 cm djup. Övriga frön myllades ytligt. Särskilt under etableringsåret och de närmast följande åren, var tillväxten god i slambehandlade försöksled, och bäst i de rutor, som fått den största tillförseln av slam. Vegetationen kan beskrivas som frodig. Biomassaproduktionen ovan mark av korn var omkring 10 gånger högre i slambehandlade led än i kontrolleret (i medeltal 3,2 kg/m<sup>2</sup> färskvikt mot 0,35 kg/m<sup>2</sup>). Biomassaproduktionen i försöksled med mineralgödsel (0,87 kg/m<sup>2</sup> färskvikt) var bara omkring tre gånger högre än i kontrolleret. I kontrolleret utan tillsatser dog växterna före etableringssäsongens slut. I försöksled med enbart mineralnäring överlevde växterna den första säsongen. Kornet är ettårigt. De fleråriga gräsen dog i början av andra växtsäsongen i detta led med mineralnäring tillförd etableringsåret. Näringen och sannolikt särskilt kvävet räckte bara första växtsäsongen. Näringsbrist är alltså den uppenbara orsaken till att plantorna dör och med tiden var lågt pH det överskuggande problemet. För försöksled med slam visade det sig att för varje år som följde, avtog frodigheten och rödklövern minskade i andel. Denna utveckling speglar främst hur växtnäringstillgången avtar med åren. Med tiden är pH-sänkningen i växtsubstratet den viktigaste faktorn på grund av att under ett visst pH-värde dör de flesta växter.

Studier av nedbrytningen av det organiska materialet visade att 20-30 % av det tillförda slammet bröts ner under första växtsäsongen och att nedbrytningen sedan bromsades upp betydligt. Efter fem växtsäsonger fanns 54-64 % av det tillförda slammet kvar (mätt som kol). Värdena för pH sjönk från mellan 6-7 vid etableringstillfället ner till omkring 5 vid början av andra växtsäsongen och efter 5 växtsäsonger var pH omkring 3 i ledet utan slam tillsats och omkring 4 i det övre skiktet av det försöksled som fått mest slam.

I ledet med 30 cm inarbetningsdjup (störst mängd slam) uppträdde mycket gårdsskräppa (*Rumex longifolius*, *R. domesticus*). Fröna av gårdsskräppa fanns med största sannolikhet i slammet från Gällivare reningsverk. Ju mer slam, desto mer skrappfrö och desto fler plantor. Det kan också vara så att den djupare växtbädden är särskilt gynnsam för skrappan. Det fanns också ett inflytande av det faktum att mer halm täckte ytan efter första växtsäsongen och hindrade gräs och klöver att konkurrera med skrappan. Det låg nämligen särskilt mycket halm kvar på rutorna med 30 volymprocent slam inarbetat till 30 cm, där tillväxten av korn varit mest kraftfull. Halmen gjorde att klöver och gräs kvävdes och skrappan hann etablera sig innan gräs och klöver hade blivit konkurrenskraftiga under andra säsongens första veckor. Det blev uppenbart att kornrader med 15 cm mellanrum ledde till så stor halmmängd att gräset

kvävdes under säsongen efter etableringsåret. I jordbrukssammanhang skördas kornet, men i det här fallet ingick inte skörd i bilden av den anledningen att man vid storskalig etablering inte räknar med att markförhållandena medger skörd av skyddsgrödan och skörd kan också ses som en kostnad som helst undviks.

Under första växtsäsongen sjönk marken ihop efter den initiala uppluckringen med fräs och inblandning av organiskt material. De ursprungliga, avsedda nedbrukningsdjupen gällde inte längre. Konsolidering efter jordbearbetning är helt naturligt och väl undersökt i jordbrukssammanhang. En studie av rötterna i början på andra växtsäsongen (första veckan i juli) visade att rotdjup ökar med ökat inblandningsdjup av slam. Medelvärdet för det maximala rotdjupet var 17,5 cm (10 cm inbrukning), 18,6 cm (20 cm inbrukning) och 20,4 cm (30 cm inbrukning). Detta kan jämföras med det synliga inblandningsdjupet av slam som varierade enligt följande: 5,6 cm, 10,1 cm och 10,8 cm. Rötterna har alltså nått djupare än de befintliga inblandningsdjupen av slam. Rötter från både korn, gräs och klöver kunde ses i profilen. Kornrötterna utgjorde dock en stor del av rotbeståndet och dessa har uteslutande bildats under etableringssäsongen. I försöksleden utan tillsats och de med NPK-mikro var det maximala rotdjupet 14,2 cm (10 cm fräsning) 18,7 cm (20 cm inbrukning av mineralgödsel) och 23,3 cm (30 cm inbrukning av mineralgödsel). Rotdjupet var alltså minst i rutorna utan tillsats av näring och i samma storleksordning i försöksleden med tillsats av NPK-mikro som med tillsats av slam. Att rötter överhuvud taget växte i sanden utan någon tillsats, beror på att fröna bär med sig näring för initial tillväxt.

En undersökning av koppar- och kadmiumupptaget i grödan vid slutet av etableringssäsongen visade att växtupptaget var 0,38 % för Cd och 0,68 % för Cu av det totala metallinnehållet i växtsubstratet (extraherat med 2 M salpetersyra). Växttillgängliga kadmiumkoncentrationer i marken var i området 5,47 µg Cd/kg till 12,27 µg Cd/kg, och högst i leden med slam medan kopparkoncentrationerna varierade mellan 0,82 mg Cu/kg till 3,29 mg Cu/kg också högst i leden med slam. Trots att kadmiumkoncentrationerna i växterna ökade när slam förts till växtsubstratet var koncentrationerna i växtvävnad fortfarande under det hygieniska gränsvärdet på 100 µg Cd/kg biomassa (färskvikt, med antagande av 15 % vatteninnehåll enligt FAO/WHO, 1993). Kopparkoncentrationerna i kornbiomassan var under det kritiska värdet 20 mg Cu/kg (phytotoxisk). Påförseln av avloppsslam ledde till ett ökat upptag av metaller totalt sett, och det stod klart att ytterligare undersökningar behövde genomföras för att få en säker bild av hur slammet påverkar tungmetallupptaget.

## **Undersökningar på 2002-ytan och anslutande studier**

År 2002 startades ett fältförsök i torrt läge med det övergripande målet att ta reda på hur olika jordförbättringsmedel fungerar när det gäller rörelser av växtnäringsämnen, främst kväve. Vidare var målet att studera rörelser av tungmetaller i växtsubstratet och upptag i växten. Studierna skulle belysa riskerna för att den närliggande och omgivande miljön tar skada av kväve och tungmetaller som lämnar odlingsområdet i avrinnande vatten eller genom att betande, vilda djur nyttjar växtligheten. Fältförsöket kompletterades med studier i växthus och på laboratoriet. Undersökningarna inriktade sig på kvävet dynamik och transport i mark-växtsystemet, flödesstudier av tungmetaller i mark-växtsystemet, vittringsintensiteten i anrikningssanden och vegetations tillväxt och utveckling. I fältförsöket studerades också hur problemet med

kvävning av gräset genom alltför rikligt med kornhalm kunde minskas med större mellanrum mellan kornraderna. De växter som nyttjades var framförallt rödsvingel och korn. Jordförbättringsmedel var dels röttslam från Henriksdalsverket i Stockholm, dels mineralnäring för växterna (200 kg N/ha; 80 kg P/ha; 160 kg K/ha när enbart gödsel tillfördes och 100 kg N/ha, 40 kg P/ha; 80 kg K/ha när det var blandning av mineralgödsel och röttslam). Fältförsöket innehöll följande försöksled:

A: Kontroll, inga tillsatser, korn och gräs.

B: Kontroll, inga tillsatser, gräs.

C: Slam, 20 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, korn och gräs.

D: Slam, 20 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, gräs.

E: Mineralgödsel, korn och gräs.

F: Mineralgödsel, gräs.

G: Slam, 10 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, mineralgödsel, korn och gräs.

H: Slam, 10 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, mineralgödsel, gräs.

Under den första växtsäsongen fanns tydliga skillnader i växtproduktion mellan varje försöksled. Vid skörd av biomassa ovan jord i mitten av september visade det sig att tillväxten av gräs var högre då det växte ensamt, utan skyddsgrödan korn. Det innebär att kornet, som såtts med 30 cm radavstånd, konkurrerar starkt med gräset som det skall skydda. Man blir då nyfiken på hur detta inverkar på gräsvegetationens utveckling längre fram och det visade sig att gräset på sikt klarar sig mycket bra under senare växtsäsonger. Rangordningen i växtproduktion mellan försöksleden vid skördetillfället efter första växtsäsongen var för gräs utan korn: 20 volymprocent slam > 10 volymprocent slam + mineralgödsel > enbart mineralgödsel >> kontroll utan tillsatser. Rangordningen när gräs växte med korn var: 10 volymprocent slam + mineralgödsel > 20 volymprocent slam > enbart mineralgödsel >> kontroll utan tillsatser.

Tillväxten av korn var högst i slamledet, drygt 20 % högre än i ledet med slam + mineralgödsel. Ledet med enbart mineralgödsel gav betydligt lägre skörd, endast 50 % av slamledets produktion. I kontrolledet, där kornet endast har vuxit av näringen lagrad i kärnan var produktionen mycket låg.

I början på andra växtsäsongen var det bara i försöksled med slam som gräset överlevt och var grönt. Mellan slamleden fanns det skillnader beträffande frodigheten hos gräset. Kornet hade haft en skyddande effekt för gräset även i ledet med 20 volymprocent slam, där skördesiffrorna året innan visade på stark konkurrens från kornet. Gräset växte bäst i detta led, när nu kornet inte fanns med i bilden längre. Vid mitten av augusti var bilden densamma och gräset hade växt bra, bäst i försöksledet med 20 volymprocent slam och med korn som skyddsgröda under första växtsäsongen.

Vid slutet av augusti år 2005, då fyra växtsäsonger var till ända, växte gräset fortfarande bra i det försöksled som fått 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm och vegetationen var i stort sett heltäckande. Effekten av kornet som skyddsgröda var inte märkbar efter fyra säsonger, vilket ger besked om att gräset kan etableras utan skyddsgröda. Men i det aktuella sammanhanget på sandmagasinet, måste man ändå ha med korn som gror och växer snabbt, för att minska risken för sandflykt i början på första vegetationssäsongen. I försöksledet med 10 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup växte gräs fortfarande efter 4 växtsäsonger, men beståndet var mycket luckigt och täckningsgraden var mindre än 50 %. Resultatet ger ett tydligt besked om att 10

volymprocent slam är för lite och 20 volymprocent slam är tillräckligt, åtminstone för de första åren efter etableringen.

pH i substratet förändrades från omkring 6,5 vid tiden för växtetableringen av försöket till nära 3 vid slutet av den tredje växtsäsongen. Det framgick att slammet hade en buffrande verkan, men det var också tydligt att buffringskapaciteten inte var tillräcklig för att hålla pH-värdet uppe över en längre tidsperiod. Observation av det rotgenomvävda substratet med blotta ögat vid slutet av den tredje växtsäsongen, visade att rötterna utvecklades enbart där organiskt material fanns kvar. Med det låga pH-värdet i växtsubstratet är det sannolikt att organismer som bryter ner avloppsslammet är negativt påverkade.

Tjockleken hos det skikt som innehöll inblandat organiskt material minskade från cirka 15 cm efter anläggningen av försöket till strax under 10 cm efter tre växtsäsonger. Denna minskning var resultatet av en kombination av hopsjunkning, konsolidering av blandningen och en omsättning av det organiska materialet. Nedbrytningen av slam under den första växtsäsongen motsvarade cirka 20 % av tillförd mängd. De följande två växtsäsongerna var nedbrytningshastigheten mycket lägre. Den mängd kol som förvandlats till koldioxid och avgått till atmosfären motsvarar sammanlagt för säsongerna två och tre cirka 16 %. Uppenbarligen minskar nedbrytningen starkt under den andra växtsäsongen. Detta gör det intressant att ta reda på om rotförnan från vegetationen har bidragit påtagligt till förrådet av organiskt material. Den totala ovanjordiska biomassan från första säsongen var omkring 6500 kg torrs substans per hektar. Om rotbiomassan utgör 20 % av ovanjordisk massa är rotbiomassan omkring 1300 kg torrs substans per hektar. Hur fort rotförnan bryts ner är inte känt i det här fallet men det är troligt att den bidrar till att öka kolförrådet i substratet i någon mån. Vid provprepareringen togs urskiljbara rötter bort innan substratet analyserades. Vid slutet av den första växtsäsongen fanns det färskorötter i stora mängder och de avlägsnades, men efter ytterligare en säsong var rötterna döda och de kunde då bidra till det organiska förrådet och ingick i de analyserade proverna. Kornhalmen avlägsnades vid slutet av den första vegetationsperioden och enbart gräs växte de följande två säsongerna. Rotförnatillförseln från gräs under andra och tredje växtsäsongen, var mycket mindre.

Sett över tre växtsäsonger, frigjordes lika stor andel kväve som kol från substratet i 2002-ytan, dvs. 30-35 % . Under den första säsongen frigjordes dock en betydligt större andel kol i förhållande till det kväve som mineraliserades. Medan 20 % kol frigjordes i led C och 30 % kol i led G, rörde det sig bara om 10 % kväve. (C = 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup, G = 10 volymprocent slam + NPK inblandat till 20 cm djup). Det är i detta övre skikt som den största delen av omsättningen sker. En orsak till att man uppmäter låga mängder, kan vara att frigjort kväve återanvänds omedelbart av mikroorganismerna under första växtsäsongen. Mikroorganismerna använder de stora mängderna kolrika utsöndringarna från växande rötter samt rotrester som energikälla och kvävet för egen tillväxt. Trots att betydande kolmängder sannolikt har tillförts substratet via rötterna, har vi en indikation på en relativt större kolomsättning än förändring av kväveförråd under den första växtsäsongen, då kornet stod för den dominerande biomassaproduktionen. En förklaring kan alltså vara att en stor andel av det organiska kvävet byggs in i den mikrobiella biomassan för tillväxt. Detta kallas immobilisering av kvävet. Att det kan förhålla sig så, styrks också av data från led D (enbart gräs som vegetation med 20 volymprocent slam) och

H (enbart gräs, 10 procent slam + mineralgödsel). I dessa försöksled framträder nämligen en betydligt större frigörelse av kväve under första växtsäsongen än i leden C och G, närmare 40 %. Frånvaro av skyddsgrödan (kornet) indikerar alltså att ganska stora mängder kväve kan frigöras under den första säsongen. Kornet växte enbart den första säsongen och det andra och tredje året efter etablering ökar kvävemineralkvämningen i leden C och G. Kornet spelar alltså en dubbelroll vid etableringen, dels ger det snabbt skydd mot vinderosion, dels binds kväve direkt och indirekt av kornet.

I substratproven som togs direkt efter etableringen i juni var mängderna av mineralkväve (ammonium + nitrat) 39 % av de totala kvävemängderna som påfördes med slam. Så stor del av kvävet kan alltså föreligga som mineralkväve i förhållandevis färskt slam. Analyserna visade att den största delen, nämligen >90 % av mineralkvävet, föreligger som ammonium. Då växterna kommer på plats kommer rötterna att absorbera en del av det mineralkväve som ligger tillgängligt. Upptaget sker i konkurrens med mikrober. Det föreligger dock en risk för läckage av i första hand nitrat om förhållanden för bildandet av nitrat är goda, dvs. tillgången på ammonium är hög, om konkurrensen från växterna är liten och aktiviteten hos nitrifikationsbakterierna är hög. Läckaget sker bara om det föreligger en nettorörelse av vatten nedåt i markprofilen. Andelen mineralkväve i prov tagna i september 2004, vid slutet av tredje växtsäsongen, var obefintlig, vilket innebär att risken för kväveläckage är störst under etableringsåret och sedan minskar betydligt.

Utöver mätningarna av nedbrytningen av slam som blandats med anrikningssand i fält, studerades omsättningen av organiskt material och frigörelsen av kväve också i ett inkubationsförsök på laboratoriet. Studien genomfördes under tre månader med 16 kombinationer av temperatur (-1, 5, 10 och 15 °C) och fuktighet (2, 8, 14 och 24 viktsprocent vatten). Koldioxidavgången och nettomängden av frigjort kväve mättes vid ökande tidsintervall. En modellekvation anpassades till koldioxidflödena, varvid icke linjär regressionsanalys användes. Slammet antogs innehålla en fraktion som var lätt nedbrytbar och en annan, mera långlivad fraktion. Det uppskattade  $Q_{10}$ -värdet (den faktor med vilken nedbrytningshastigheten ökar när temperaturen stiger 10 °C) var 2,55. Inom det temperatur- och fuktighetsområde som studerades och som motsvarar naturliga förhållanden i Sverige, var koldioxidutvecklingen starkare kontrollerad av fuktigheten än av temperaturen. Emellertid visade det sig att inflytandet av temperatur och fuktighet på nettofrigörelsen av kväve var mindre tydlig än när det gällde koldioxidfrigörelsen från slammet. Detta beror sannolikt på denitrifikation vid de högre temperaturerna och fuktighetshalterna. Nitrat bildades efter ungefär två veckor, men bara vid 10 och 15 °C. Baserat på kunskapen som erhöles genom inkubationsförsöket och med kännedom om förhållandena i fält, kan man göra antagandet att cirka 10 % av organiskt kväve som fanns i det tillförda slammet i fält frigörs under det första året efter tillsats. Mängden slam som tillfördes i fält var 65 ton per hektar och det motsvarar 2,2 ton kväve/ha. Därav är 0,4 ton mineralkväve och 1,8 ton organiskt bundet kväve. Detta innebär att 580 kg mineralkväve kan finnas tillgängligt för upptag under första säsongen. Men det faktiska upptaget i korn och rödsvingel var mindre än 100 kg N/ha. Som en konsekvens måste man räkna med att kväve kan komma att läcka ut till omgivningen under första vegetationssäsongen.

I ett kärleförsök studerades koppar och kadmiumupptaget i vedartade växter odlade dels i anrikningssand med inblandat avloppsslam, dels i anrikningssand med tillsats av NPK i form av flytande mineralnäring. För jämförelse analyserades växter som häm-

tats från den omgivande naturmarken och från den fältförsöksyta vid Aitik som anlades år 1999 (björk och gran). Övriga växter kom från plantskola. Växterna som analyserades i försöket var: tall (*Pinus sylvestris*), glasbjörk (*Betula pubescens*), vårtbjörk (*Betula pendula*), och gran (*Picea maritima* och *Picea abies*).

De lägsta halterna av både koppar och kadmium återfanns i de referensplantor av tall som växt på vanlig skogsmark. I tall som vuxit på dels en blandning av anrikningssand och slam och dels på anrikningssand gödslad med näringslösning, fanns både koppar och kadmium i betydligt högre halter i rötterna än i stamdelar och barrmassa

Liksom i tall fanns i gran de högsta halterna av både kadmium och koppar i rötterna. De granar som hade de högsta halterna var de plantor som växt på 1999-ytan inom Aitikområdet, de följs av plantorna från slambehandlingen i kärlförsöket. De minsta halterna återfinns även för granen i referensplantorna.

De allra högsta värdena för koppar fanns något överraskande i plantor som växt i anrikningssand med tillförd näringslösning. De minsta halterna av koppar i gran återfanns i referensplantorna.

Kadmiumhalterna i björk följer för slam- och NPK-behandlingen samma mönster som för tall och gran, med de högsta värdena i rötterna följt av stamdelen och därefter bladmassan. För de plantor som växt på 1999-ytan såg mönstret annorlunda ut. I dessa återfanns de högsta halterna i bladen följt av liknande värden för stamdel och rötter.

Effekten av röttslam på pH och växttillgängligheten hos metaller studerades på fältförsöksytan som anlades 2002 med korn och rödsvingel som gröda under första växtsäsongen. Jämförelserna gjordes mellan det försöksled som fått 20 volymprocent röttslam inarbetat till 20 cm och försöksledet som fått enbart mineralgödsel, vilken brukats in i anrikningssanden till samma djup. Jordprover togs vid början och slutet av växtsäsongen och växtdelarna ovanför markytan skördades i slutet av säsongen och analyserades. Jordproverna extraherades i en sekvens med ammoniumnitrat, ammoniumacetat-EDTA samt salpetersyra. pH-värdet sjönk under säsongen från 6,6 till 4,3 i försöksledet med mineralgödsel och från 6,4 till 4,8 i slambehandlad anrikningssand, troligtvis huvudsakligen beroende på sulfidoxidation. pH-sänkningen resulterade i ökade mängder lösta metaller i alla försöksled som studerades. Tillförseln av röttslam gav upphov till högre halter av lösligt zink i jorden och lägre halter av lösligt arsenik och kadmium i jorden innan vittring skett, men sedan vittring startat var halterna högre av specifikt adsorberat koppar, nickel och arsenik. Halterna i jorden speglades till en del i halterna i växterna, då slamblandningen resulterade i 67 mg Zn kg<sup>-1</sup> i kornet och 60 mg Zn kg<sup>-1</sup> i rödsvingelskotten, båda värdena dubbelt så höga som motsvarande värden i ledet som fått enbart mineralgödsel. Arsenikinnehållet var lägre i både strå (0,3 mg kg<sup>-1</sup>) och korn (0,06 mg kg<sup>-1</sup>) hos kornplantorna jämfört med det mineralgödselade ledet (0,6 och 0,2 mg kg<sup>-1</sup>, respektive). Rödsvingel som hade växt i den slambehandlade anrikningssanden innehöll signifikant högre halter av Al, Cu, Pb, As och Cr jämfört med gräs som hade växt på anrikningssand med inblandad mineralgödsel. Koncentrationerna av flera metaller i korn och rödsvingel som växt i båda försöksleden överskred de bakgrundsvärden som finns i litteraturen. Kopparkoncentrationen i kornhalm överskred 100 mg kg<sup>-1</sup> i båda behandlingarna och kan vara toxisk för betande djur. Studien visade alltså att röttslam som tillförs anrikningssand som har

potential att oxidera inte räcker som buffrande ämne och vidare att rötslaminblandning kan öka rödsvingelns upptag av metaller.

Under 2006 har klimatkammarförsök pågått med syftet att ta reda på orsaken till rötslammets inverkan. I dessa försök har slammets effekter på pH, lösligheten hos tungmetaller och tungmetallupptaget i växter studerats. Man har också studerat det lösta organiska kolet som avloppsslammet tillför, och som kan ha stor betydelse för metallernas löslighet och biotillgänglighet. I klimatkammarförsök och kolonnförsök har man undersökt om slammets effekter på ovanstående parametrar förändras med tiden, d.v.s. med graden av vittring och omsättning av det organiska materialet, och om effekterna skiljer sig mellan svavelhaltig och avsvavlad sand. Resultaten från klimatkammarförsöket är dock ännu inte fullständigt utvärderade och kommer att presenteras i en doktorsavhandling under år 2008.

### **Undersökningar på 2003-ytan**

År 2003 anlades en demonstrationsyta i torrt läge. Anläggningsförfarandet representerade en utveckling som byggde på erfarenheter från de tidigare fältförsöken. I princip genomfördes etableringen på samma sätt som för det mest lyckade försöksledet i 2002-ytan och i tillägg såddes klöverarter in för att introducera kvävesamlade växter och därmed öka möjligheterna till långsiktig överlevnad hos vegetationen. En ytterligare modifiering var att kornrader lades en meter från varandra i en riktning och med en meters mellanrum i en annan riktning 90 grader mot den första riktningen, så att ett rutsystem uppstod med kvadratmeterstora gräsytor mellan kornraderna. Tanken var att kornhalmen inte skulle skördas och heller inte ha en kvävande effekt på gräset. Att korn överhuvud taget nyttjades som skyddsgröda hänger samman med behovet att så fort som möjligt skapa ett vindskydd med hjälp av växterna.

Inblandningen av slam i 2003-ytan genomfördes maskinellt av entreprenörer (till skillnad från mer manuella, men exakta metoder i ytorna för forskning och demonstration). Det visade sig att slamblandningen blev ojämn med tunnare och tjockare blandningar slumpvist fördelade över ytan. Detta hade ett inflytande på växtetableringen under första växtsäsongen. Vegetationen etablerade sig sämre där det var tunna skikt av inblandat slam. Men följande säsonger etablerade sig gräset och gav 100 % täckning över hela fältförsöksytan. Systemet med glesare kornrader i två riktningar fungerade. Kornet gav snabbt vindskydd och halmen kvävde inte senare gräset, så som var fallet i 2000-ytan. Men en konsekvens av glesare rader under första växtsäsongen är att kväveupptaget blir lägre per ytenhet under första växtsäsongen. För att undvika negativa miljöeffekter som en följd av kväveläckage och eventuellt tungmetall-läckage rekommenderas att det vatten som rinner från sandmagasinet, efter växtetableringen, avleds till dagbrottet under det år som vegetationen etableras efter jordförbättring. Ett alternativ till avledning till dagbrottet är avledning till myrmark, där kvävet och eventuella metaller kan bindas i torven. Men denna senare åtgärd kräver nya studier gällande förfarandet och de långsiktiga miljökonsekvenserna. Om de berörda tillsynsmyndigheterna finner det rådligt, kan vatten från det vegetationstäckta sandmagasinet efter några år av uppföljning och fortlöpande miljöanalys tillåtas rinna vidare nedströms.

## GENERELLA SLUTSATSER

- Växtetablering på sandmagasinet och uthållig växtlighet är möjlig endast om organiskt jordförbättringsmedel tillförs sanden.
- Röttslam kan rekommenderas som jordförbättringsmedel.
- För att etablerade växtsamhällen skall finnas kvar framöver på sandmagasinet, måste pyrithalten i sanden vara så låg att vittring inte någonsin leder till sänkning av pH-värdet under värdet 5.
- På grund av de stora mängder röttslam som kommer att behövas blir det nödvändigt att lägga upp mellanlager av slam inför växtetableringsåtgärderna.
- Röttslam skall blandas in i sanden i ett ytligt skikt med cirka 25 cm tjocklek. Mängden slam bör motsvara 25-30 volymprocent i detta skikt. Som vägledning vid mängdberäkningar kan man räkna med en skiktjocklek hos påfört slam om 8 cm vilket motsvarar 80 liter/ kvadratmeter och 800 kubikmeter per hektar.
- Inblandningen bör genomföras med kraftfull, traktorburen fräs.
- Korn, som är skyddsgröda under första växtsäsongen, skall sås med stora radavstånd, minst 1 m. Rader i två mot varandra vinkelräta riktningar rekommenderas för att få effektivt vindskydd. Kornet kan skördas, men det är inte nödvändigt.
- Gräs och klöver bredsås, eller radsås med de avstånd som är traditionella i jordbrukssammanhang.
- Både kornet och det inblandade slammet skyddar ytan mot vinderosion. Efter etableringsåret skyddar gräset och klöverna mot vinderosion och i viss utsträckning mot vattenerosion.
- Under första växtsäsongen efter det att slammets brukats in i sanden och sådd av gräs, korn och klöver skett, måste man räkna med att kväve frigörs från slammet i så stora mängder att nitrat kommer att rinna av med vatten till omgivningarna.
- Det avrinnande vattnet skall tas om hand åtminstone under första växtsäsongen, till exempel genom att avleda det ner i gruvhålet. Därvid kommer inga föroreningar ut nedströms magasinet.
- Om växtetablering sker på det stora sandmagasinet och gruvdriften fortsätter med utnyttjande av ett nytt sandmagasin, söks andra lösningar för att ta hand om avrinnande vatten. Därvid diskuteras återcirkulation som en metod, reningsfilter som en annan. Reningsfilter kan eventuellt utgöras av närliggande myrmark. Emellertid har den aktuella studien inte behandlat en sådan lösning.

## FÖRBEREDELSE, JORDFÖRBÄTTRING OCH VÄXTETABLERING STEG FÖR STEG

- Bestäm landskapsformer och avvattningssystem på sandmagasinet. Det är möjligt att det behövs förstärkt dränering på vissa områden. Räkna med att avrinnande vatten skall kunna tas om hand de första åren efter jordförbättring och växtetablering. Det kan röra sig om avledning av vatten till gruvhålet eller återcirkulering till magasinet om gruvdriften fortsätter med ett nytt magasin. Avledning till reningsfilter i form av myrmark kan genomföras om tillstånd erhålls.



- Planera för och kom överens om slamleveranser.
- Leveranser av rötslam måste planeras flera år före växtetableringsåret på grund av att ytan som skall besås är så stor.
- Utse lämpliga platser för mellanlagring av rötslam.
- Detaljplaneringen av växtetableringen bör ligga minst ett år före åtgärderna bland annat för att vara säker på att rätt utsäde kommer att vara tillgängligt och att jordförbättringsmedel, dvs. rötslam, finns tillgängligt.
- Bärighetsundersökningar för maskiner och redskap genomförs senast sommaren innan etableringsåret. Åtminstone dubbelmontage av hjul på traktorer och släp kan komma att behövas. Den typ av fordon som används vid torvbrytning/fräsning kan behövas om bärigheten är så låg att traditionella traktorer inte kan användas.
- Bestäm arealen av den yta som skall jordförbättras och besås.
- Beräkna åtgången av utsäde för kornsådd och frö för gräs och klöver.
- Beställ utsäde och frö.
- Jordförbättringen genomförs så fort det är möjligt efter snösmältningen.
- Räkna med att det påförda slammets tjocklek skall vara 8 cm. Det kommer att gå åt 800 kubikmeter slam per hektar.
- Upprätta alternativa strategier för etableringsförfarandet om beräkningarna visar att det är nödvändigt, exempelvis om det blir tvunget att dela upp växtetableringen på flera år. Om mer än ett år krävs, måste man vara beredd på att bevattna den yta som inte åtgärdats, för att undvika sandflykt med vinden.
- Gruvnäringens planerare, inte minst vid Aitik, är vana vid stora mängder material som transporteras effektivt. Använd den kompetensen för att planera slamtransporterna och uppläggen.
- Sprid slammet i ett skikt med den teknik som är mest effektiv. Det är troligt att jordbrukstekniken med stallgödselspridare är för ineffektiv. Sannolikt är det bättre att tippa lass i strängar eller högar, som sedan jämnas ut med schaktande maskiner. Det blir möjligt att beräkna volymer per ytenhet med den tekniken.
- Använd traktorburna fräsar för att blanda in slammet till ett visst djup. Djupet bör vara mellan 20-30 cm. Ju djupare, desto större chans för växterna att fånga upp vatten, eftersom rötterna huvudsakligen utvecklas där slammet finns. Fräsningen utförs med fördel av jordbrukare med stor odlingserfarenhet. Det är viktigt att ha rätt kompetens för de olika momenten. Med lång odlingserfarenhet undviker man misstag.
- Efter fräsningen kan sådden ske. Mycket god odlingskompetens är oerhört viktig vid sådden. Exempelvis kan en grupp lantbrukare från södra Sverige engageras i god tid för planering och genomförande. I Skåne kan sådd börja i februari och vara färdig i mars. Det innebär att jordbrukare från spannmålsgårdar kan vara fria att genomföra sådden vid Aitik i juni. Det finns gårdar i Skåne som omfattar 1000 ha, så storleken på projektet är hanterligt. Hur många jordbrukare som skall engageras kan man diskutera, men det är uppenbart att man vill ha problemlösare och handlingskraftiga individer med öppna sinnen. Det skall vara klart att det inte handlar om produktionsodling. När man väl är på plats, skall man genomföra. Diskussioner om hur, får man ha i god tid innan. Kanske fem jordbrukare sätter sig in i projektet under vintern och genomför det efter vad väderförhållandena medger. Eftersom projektet är förhållandevis unikt - på grund av ytans storlek - kan man fråga sig om dokumentation ge-

nom filmning av planeringsprocessen och genomförandet är av intresse för någon av TV-kanalerna.

- Detaljerna för sådd av korn diskuteras särskilt av gruppen som skall genomföra åtgärden. Korn, som är skyddsgröda under första växtsäsongen, skall sås med stora radavstånd, minst 1 m. Rader i två mot varandra vinkelräta riktningar rekommenderas för att få effektivt vindskydd. Den mängd korn som sås (cirka 60 kg) är bara cirka 30 % av vad man sår i produktionsodlingar. Gräs och klöver sås med normala såmängder per ytenhet, viket rör sig om 12- 14 kg/ha för rödsvingel, 8-10 kg/ha för ängsgröe och 10 kg/ha av klöver.
- Normalt vältas den sådda ytan för att få bättre kontakt mellan markpartiklar och frö och säkrare uppfuktning av fröet för groningen. Emellertid vill man i det här sammanhanget bevara små ojämnheter i ytan, eftersom det minskar risken för vinderosion. Det är troligt att man bestämmer sig för att avstå från vältning. Försöksodlingarna har visat att groningen sker också utan vältning.
- När sådden är genomförd sköter naturen resten.
- Det avrinnande vattnet tas om hand på det sätt man kommit överens om, och vattnets innehåll av kväve, fosfor och tungmetaller analyseras efter ett överenskommet schema. När närings- och tungmetallhalter är jämförbara med och inte högre än det som gäller för vatten som rinner från omgivande mark, bör vattnet kunna avrinna nedströms, om det är önskvärt. Det är möjligt att detta kan ske efter tre år. Detta avgörs av tillsynsmyndigheterna och de avtal som gäller.

## **DET VEGETATIONSTÄCKTA SANDMAGASINET OCH DEN OMGIVANDE NATURMARKEN**

Den mark som omger sandmagasinet är framförallt morän med skogsvegetation, men också myrmark. På moränmarken växer tall, gran och björk i trädskiktet, lingon, blåbär, odon, kråkris i fältskiktet och mossor och lavar i bottenskiktet. Kolförrådet i den marken är cirka 80 ton/ha (Lars Lundin, personlig referens, 2006). Om man räknar med en genomsnittlig kol/kvävekvote på cirka 10, är kväveförrådet 8 ton/ha.

På sandmagasinet kommer man att tillföra cirka 16-20 ton kol/ ha och efter några år finns omkring 50 % kvar vilket innebär omkring 10 ton kol/ha av det som tillförts. Därefter kommer kolförrådet att ställa in sig på ett värde som motsvarar en jämvikt mellan tillförsel från vegetationen och omsättning av det organiska materialet. Vegetationen kommer att bestå av gräs och klöverarter till att börja med, och så småningom kommer självsådd av många arter som finns i omgivningen. Under de första åren, och sannolikt också på sikt, kommer kol och kväveförråden på det vegetationstäckta sandmagasinet att vara lägre än i omgivande naturmark. Det borde innebära att risken för kväveläckage är mindre än från naturmarken, men det är viktigt att notera att risken för kväveläckage är stor under det år då jordförbättringen sker, och det är det som föranleder rekommendationen att ta hand om allt avrinnande vatten de första åren, tills man vet vad som gäller både för kväve och för tungmetaller.

## INLEDNING

Anrikningssand, som utgör en rest efter metallanrikningen från krossad kopparmalm vid Aitik, har pumpats uppslammad i vatten till ett magasin under något mer än 30 år. Det skall sägas från början att Aitiks sandmagasin skiljer sig från många andra sandmagasin i Sverige. Det är större än alla andra. Längden är cirka 7 km och bredden cirka 2 km. Det innebär 14 kvadratkilometer, eller 1400 hektar. Man brukar jämföra med fotbollsplaner, som är 100x60 m. Sandmagasinet motsvarar 2300 fotbollsplaner. Just att området är så stort är en faktor som man måste ta hänsyn till hela tiden när man funderar över vad man skall göra med ytan efter avslutad gruvdrift. En annan faktor är att det är helt nödvändigt att hindra sandflykt från magasinet när ytan torkar upp. Detta blir uppenbart för var och en som besöker sandmagasinet en torr och blåsig sommardag, då sanden flyger med vinden i en veritabel sandstorm (figur 1-4b).

Uppe på sandmagasinets östra dammvall ligger vindtransporterad sand (figur 3). Men sanden flyger också långa sträckor med vinden, och det är det som är det stora problemet. Skogarna, sjöarna, myrarna och byarna får ta emot sand. Särskilt för de boende i byarna är detta oacceptabelt. Längre fram i rapporten beskrivs egenskaperna hos sanden. Den är i sig i stort sett harmlös för miljön, men den har exempelvis högre kopparhalter än natursand. Kort uttryckt, sanden måste bindas och stanna kvar på



**Figur 1.** Bilden är tagen i juni 1999. Den mörka sanden bortom spaden är bevattnad med vattenspridare. Närmast kameran är sanden torr. Vid horisonten, nära vällen, ser man ett rör ur vilket den vattenuppslammade anrikningssanden rinner. Samtidigt, till vänster om röret, kan man ana att sand flyger i luften.

magasinet. Under år 2006 har man infört en ny metod för att lägga ut sanden på magasinet, ett s.k. spigotts-system. Det innebär att sanden släpps ut på flera punkter samtidigt. Detta gör att en större del av sandytan kan hållas fuktig och man byter utsläppspunkter med jämna tidsmellrum. Detta har visat sig mycket effektivt för att minimera sandflykt från magasinsytan under exploateringsfasen. I figur 3 syns dels slangen som transporterar bevattningsvatten, dels rören som transporterar anrikningssanden. På lång sikt kan man inte binda sanden enbart med bevattning. Ytan är för stor för täckning med annat material. Växtetablering och täckning med vegetation kvarstår som den enda åtgärden. Att sätta magasinet under vatten har avskrivits av säkerhetsskäl.



**Figur 2.** Vid sandstorm fylls luften med sandpartiklar. Då sträcker sig sikten bara några få meter.



**Figur 3.** Uppe på sandmagasinets östra damm vall ligger vindtransporterad sand.

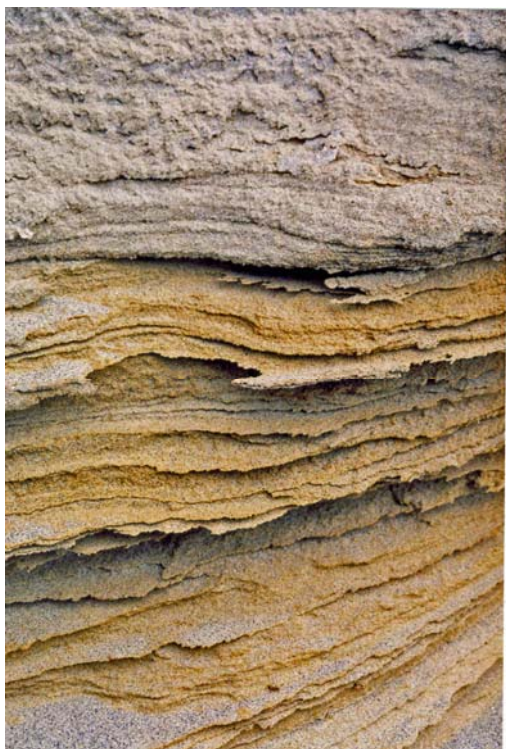




**Figur 4 a.** Den sand som syns på östra dammvallens östsida har transporterats med vinden. Erosion vid regn och snösmältning sker när marken ligger bar.



**Figur 4 b.** Efter varje sandstorm bildas ett skikt av sedimenterad flygsand.



**Figur 4 c.** Färgskiftningarna med rostfärgade stråk i sandavlagringarna indikerar att kemiska processer sker i sanden.



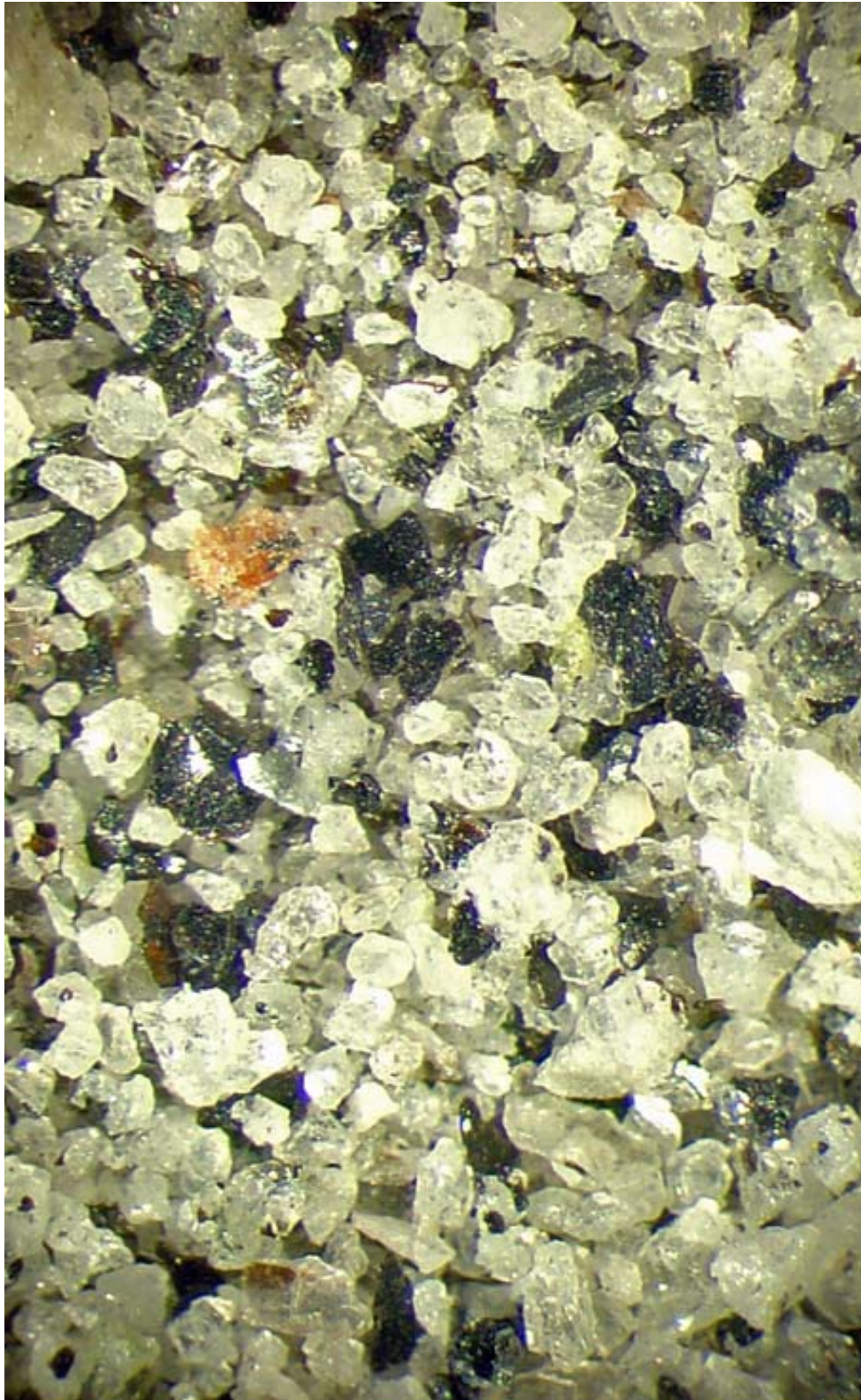
**Figur 4 d.** I mikroskop kan man se hur en del partiklar i ett rostfärgat skikt har täckts av en tunn hinna av järnhydroxid, rost.

Färgskiftningarna (fig. 4c) med rostfärgade stråk i sandavlagringarna indikerar att kemiska processer sker i sanden. Vid regn fuktas sanden, reducerande betingelser uppstår i skikt med tillfällig vattenmättnad och tvåvärt järn kan gå i lösning. Vid upptorkning och lufttillträde oxideras järnet och läggs fast som järnhydroxid, rost på sandpartiklarna. Järnhydroxiden är en förhållandevis stabil förening och löses inte upp vid nästa tillfälle med vattenmättnad.

I mikroskop (fig. 4 d) kan man se hur en del partiklar i ett rostfärgat skikt har täckts av en tunn hinna av järnhydroxid, rost. Järnet har sitt ursprung i bland annat mineralet pyrit, som är en förening av järn och svavel,  $\text{FeS}_2$ . Vid oxidationen bildas svavelsyra och pH-värdet sjunker i sanden.

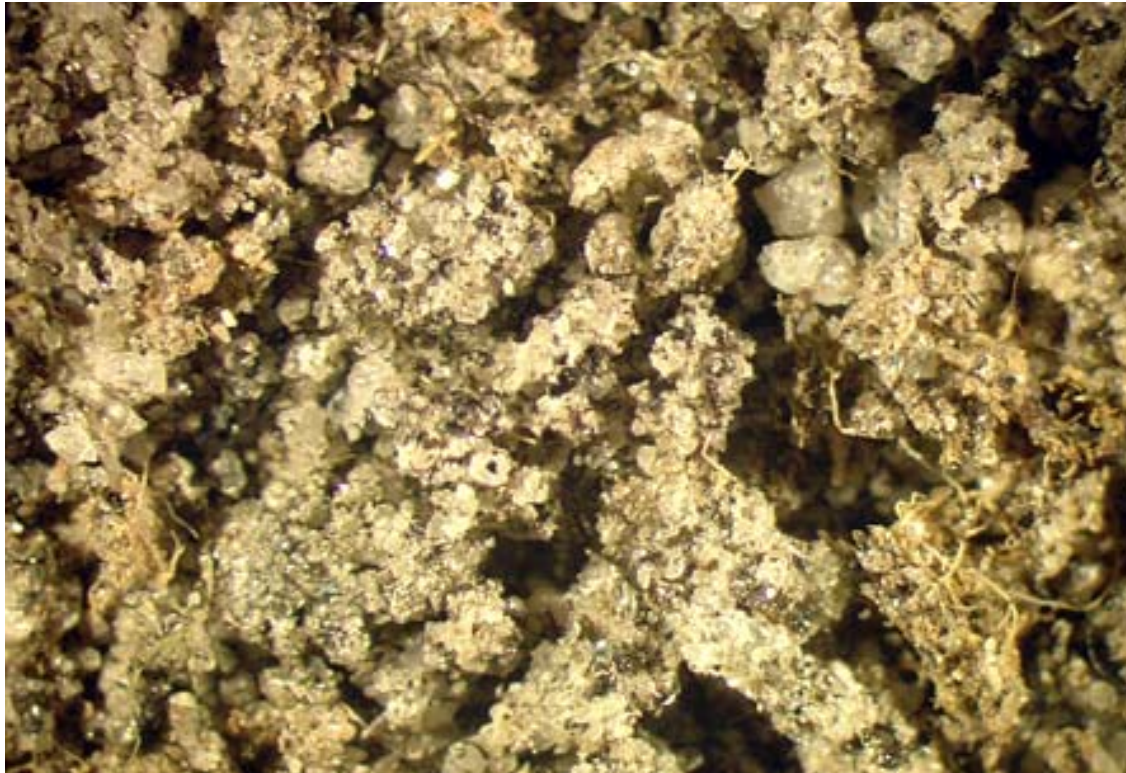
I framtiden kommer pyriten att tas bort vid anrikningsprocessen vid verket i Aitik (figur 5) och pH-värdet kommer inte att sjunka i sanden som då ligger som det översta skiktet på sandmagasinet. Detta skikt bör få en tjocklek av minst en meter och gärna mer. Det kommer att vara gynnsamt för växterna och minskar också risken för metallutlakning. Men anrikningssanden är näringsfattig. Kornen ligger intill varandra utan att hänga ihop på något sätt. Detta kallas enkelkornstruktur. I figur 6, 7 och 8 illustreras hur det ser ut när rötslam blandas in i sanden. Ett mera heterogent material skapas och växtrötter utvecklas lättare än i ren sand. Små aggregat bildas av sandkorn och organiskt material. Detta kallas aggregerad struktur.





**Figur 5.** Bild av avsvavlad sand.





**Figur 6.** Bilden illustrerar hur det ser ut när röttslam blandas in i sanden. Ett mera heterogent material skapas och växtrötter utvecklas lättare än i ren sand. Små aggregat bildas av sandkorn och organiskt material. Detta kallas aggregerad struktur



**Figur 7** Slammet ligger också som små klumpar i blandningen och vid mikroskopering kan man se hur växtrötter utvecklas i dessa aggregat som består mest av organiskt material.





**Figur 8a t.v. och 8b.** Bilderna visar hur det inblandade slammet utgör ett tydligt, övre skikt. Gräset växer tätt och rötterna väver igenom substratet, men går inte vidare ner i sanden, mer än någon cm. Bilden är tagen vid kanten av den yta som etablerades 1999. Fotograferingen skedde den 18 juni år 2004.

Ett sätt att stoppa sandflykten är etablering av en marktäckande vegetation. Ett annat sätt är att hålla sanden fuktig eller under vatten. Visst kan man låta vatten täcka magasinet. Det är fullt möjligt i det humida klimatet. Det regnar inte mycket, men det regnar mer än det avdunstar och det är grunden för att bygga upp ett ytligt förråd av vatten. Men med stora vattensamlingar kommer stora hydrostatiska tryck och risker för dammbrott i framtiden när människor har lämnat området att sköta sig självt. I raden av grundförutsättningar inför lösning av problemet med sandflykt och även problemet med eventuella vattenlösliga föroreningar från magasinet till omgivningen, finns klimatet och givetvis egenskaper hos sanden i magasinet.

Vid en undersökning av anrikningssanden år 1999 (Stjernman, 2000), var partikelstorleksfördelningen följande: sand 87-89 %, silt 7-8 % och partiklar i lerstorlek 4-6 % och uttryckt i svensk terminologi i jordbrukssammanhang, är det grovmon som dominerar. Den totala porositeten mätt på prov tagna i fält varierade mellan 43-50 %, med porstorlekar från 5 till 300  $\mu\text{m}$  dominerande (Stjernman Forsberg och Ledin, 2003). Eftersom sanden huvudsakligen ligger i enkelkornstruktur är det partikelstorleksfördelningen som är avgörande för porstorleksfördelningen. Sanden kan konsolideras, bli tätare, genom packningsprocesser eller vibrationer. Intresset för porstorleksfördelningen i växtetableringssammanhang, beror på att det är i porerna som rötterna växer fram, som markvattnet med lösta näringsämnen finns. Porstorleksfördelningen avgör hur mycket växttillgängligt vatten och markluft som finns i jorden. Förhållandet mellan luft och vatten i porerna förändras hela tiden med växtens vattenupptagning och avdunstning från markytan, regn eller bevattning, men mängden vatten som kan lagras i marken hänger direkt samman med porstorleksfördelningen, som är karakteristisk för varje jord (Ledin, 1999).

Heinonen (1975) beskrev brukningsegenskaperna hos olika jordarter och eftersom grovmon dominerar i anrikningssanden, är det egenskaperna hos denna jordart som är mest intressant. Heinonen konstaterar att en blandning av finmo och grovmo utgör

den från markfysikalisk synpunkt idealiska jordarten. Men i anrikningssanden är partikelstorleken 2-0,2 mm, det man i jordbruksterminologin kallar sand, representerad upp till 25-40 procent, ibland dominerar grovmon och finmon är bara representerad med 3-7 procent. Det innebär att anrikningssanden har egenskaper som är förknippade med både sand och grovmo. Sandjordar är ofta alltför torra medan grovmojordar är gynnsamma odlingsjordar. Om anrikningssanden förbättras genom tillförsel av organiskt material, så blir den ett utmärkt odlingssubstrat. Dess odlingssegenskaper närmar sig då blandningen av finmo och grovmo, där växterna alltså trivs och utvecklas utmärkt. Ytterligare intressant information i sammanhanget ger Heinonen, då han beskriver att visserligen ökar finmo- och mjälainslag mojordens vattenhållande förmåga ytterligare, men samtidigt börjar det förekomma dränerings- och bärighetsproblem. I tillägg är det också så, att när den vattenhållande förmågan och kapillari-teten ökar, ökar också tendensen till igenslamning, uppfrysning, vattenerosion och försenad uppvärmning på våren. Denna negativa påverkan har knappast organiskt material, som bidrar med grövre likaväl som finare porer. Så, om den framtida anrikningssanden också domineras av grovmofractionen med ett stort inslag av sandfraktionen, kommer förutsättningarna för växtetablering att vara gynnsamma, under förutsättning att man kan tillföra organiskt material.

Undersökningar för att ta reda på hur man gör för att etablera vegetation på sandmagasinet vid Aitik startade med planering 1996 och med ett första fältförsök 1997. Det stod klart i ett tidigt skede att man måste genomföra en jordförbättring, för att sådd eller planterad vegetation skulle överleva. Redan i det första fältförsöket användes avloppsslam i ett av behandlingsleden. Slammet som kom från Gällivare reningsverk blandades in i sanden före sådd och plantering.

Ett fältförsök med och utan slam anlades i ett fuktigt läge 1999, och ytterligare försök i torra lägen anlades åren 2000, 2002 och 2003. Fältförsöken från 1999 och 2003 var utlagda för demonstration och försöken från åren 2000 och 2002 var för både demonstration och forskning. Arbetsinsatserna har varierat och särskilt år 2000 var insatserna, när det gällde uppföljning under växtsäsongen, mer begränsade som en effekt av den ekonomiska situationen just det året. Trots variationer i arbetsinsatserna har den information som fältförsöken givit varit ytterst användbar för att klargöra vad som behövs i form av åtgärder före och i samband med växtetablering på sandmagasinet (Ledin, 1999, Stjernman och Ledin, 2001, Stjernman Forsberg och Ledin, 2003, Wennman, 2004). Skötsel har det inte varit fråga om, annat än i liten utsträckning, exempelvis att skörda korn för att hindra kvävning av gräset.

När försöken startade 1997 var det ett förhållande som inte var helt klart från början, nämligen att pyritinnehållet i anrikningssanden ledde till att pH-värdet i sanden sjönk i takt med att svavlet oxiderades. Förväntningarna var att buffring genom basiska komponenter i sanden skulle ske i tillräcklig utsträckning, så att pH bevarades nära neutralt. Under åren som har gått sedan första fältförsöket etablerades, har det blivit klart att man i framtiden måste ta bort mer av pyriten, innan sanden deponeras på magasinet. Detta framträder som nödvändigt för att växtetablering skall leda till uthålligt vegetationstäck och också för att undvika utlakning av tungmetaller från sandens ytskikt, där oxidation och därmed ökad vätejonaktivitet sker. När denna rapport skrivs hösten 2006, finns erfarenheter av avsvavling i pilotskala vid anrikningsverket vid Aitik sedan omkring ett år tillbaka.

När det stod klart att man behövde tillföra organiskt material för att få en lyckad växtetablering på sandmagasinet och att det var möjligt att transportera stora mängder rötat slam till Aitik för ändamålet, började man fundera över vilka miljökonsekvenser som skulle komma att vara förknippade med slamanvändningen. Första frågan gällde hur mycket kväve i vattenlöslig form, som skulle kunna rinna ut med vatten som lämnar sandmagasinet. Andra frågan var hur det förhöll sig med fosforutlakningen från det omsatta slammet. Det fanns också en medvetenhet om att metallernas löslighet kunde påverkas av slam som blandades in i sanden. Även slammets innehåll av metaller kunde vara ett problem då metallerna frigjordes i och med slammets nedbrytning.

I denna rapport beskrivs hur växtetablering med olika metoder lyckades i fält och en redovisning ges av kunskaper som erhöles genom undersökningar i växthus och laboratorium. Specifikt beskrivs hur avloppsslam, som blandats in i sanden, bryts ner med tiden. Nedbrytningen är en process där markorganismer, framförallt mikroorganismer, använder den energi som finns i slammet, samt de ämnen som behövs för organismernas uppbyggnad. Vid nedbrytningen frigörs de ämnen som var bundna i slammet. Eftersom det är troligt att nedbrytningen av det organiska materialet påverkas av vätejonaktiviteten i substratet, har pH-värdena undersökts.

En översikt av verksamheterna och rapporteringen under perioden 1996-2006 i anslutning till främst vegetationsetablering på anrikningssand, ges i tabell 1.

**Tabell 1.** Översikt över verksamheter, rapporter och uppsatser med direkt eller stark anknytning till vegetationsetablering vid Aitik under perioden 1996-2006

Årtal	Verksamheter, rapporter/uppsatser, medverkande personer
1996	Uppdrag från Boliden AB och planering av undersökningarna. Stig Ledin, SLU, Manfred Lindvall, Boliden AB
1997	Anläggning av pilotförsök i fält i torrt läge (1997-ytan). Avloppsslam från Gällivare i ett av försöksleden. Mineralgödsel i form av N, NPK, NPK-mikro i andra led och enbart sand som kontroll-led. Många vedartade växter, samt gräs och örter testade. Stig Ledin, SLU, Peter Richardsson, Boliden AB
1998	Uppföljning av fältförsöket anlagt 1997. Adeline Ries, Boliden AB, Stig Ledin och Clas Florgård, SLU
1999	Uppföljning av 1997-försöket samt anläggning av fältförsök i fuktigt läge (1999-ytan, Josefin Kofoed, Boliden AB/SLU, Iris Takala, Boliden AB) Lovisa Stjernman, SLU, startar undersökning om markfysikaliska egenskaper för examensarbete. Rapport: Växtetablering på störda marker – särskilt på deponier för gruvavfall, Stig Ledin, Rapport 5026 i Naturvårdsverkets rapportserie.
2000	Anläggning av fältförsöksyta (2000-ytan). Avloppsslam från Gällivare. Variation i mängder och inarbetsdjup, 20 volymprocent slam, 10, 20, 30 cm nedbrukningsdjup. Handelsgödsetillsatser, NPK i vissa försöksled. Lovisa Stjernmans examensarbete. Sonja Preuss' provtagning av vegetation på 2000-ytan. Iris Takala och Anna-Karin Bohm, Boliden AB
2001	Uppföljning av tidigare anlagda ytor. Sonja Preuss uppsats om tungmetaller i korn. Föredrag vid Securing the Future, (Stjernman och Ledin). Start av Julia Fors' examensarbete (SLU) om upptag av tungmetaller i vedartade växter. Start av forskarutbildning för Lovisa Stjernman Forsberg (tungmetallaspekter) och Pär Wennman (kväveaspekter). Iris Takala, Boliden AB
2002	Uppföljning av 2000-ytan. Anläggning av fältförsök (2002-ytan) Röttslam från Stockholm, Henriksdalsverket. Enhetligt inarbetsdjup, 20 cm, 20 volymprocent slam. Kombination med kväve och fosfor i vissa försöksled. Julia Fors' examensarbete. Uppsats Stjernman Forsberg och Ledin. Kärlförsök i växthus, inkubationstest i laboratorium. Iris Takala, Gunnel Nilsson och Lena Fjällström, Boliden AB.
2003	Uppföljning av 2000- och 2002-ytorna (Ledin och Wennman). Anläggning av fältförsök (2003-ytan), Stig Ledin och Sixten Gunnarsson, SLU, Juan M G Santos examensarbete (SLU), som behandlar vattenavrinning från den täckta delen av gråbergsupplaget (T5).
2004	Studier av nedbrytning av organiskt material på 2000- och 2002-ytorna. Ledin och Wennman, SLU. Gunnel Nilsson och Iris Takala, Boliden AB
2005	Rapportering av nedbrytningsstudien. Per Wennmans licentiatavhandling. Föredrag vid Securing the Future, Wennman; Ledin, Wennman; uppsats Stjernman Forsberg och Ledin. Gunnel Nilsson och Iris Takala, Boliden AB
2006	Rapportering av växtetableringsstudierna under hela perioden (Stig Ledin). Simon Fogelqvists examensarbete. Uppsats Wennman och Kätterer. Uppsats Stjernman Forsberg och Ledin.

## MÅL FÖR HELA STUDIEN

Det övergripande målet har varit att ta reda på

- hur man skall göra efterbehandling på sandmagasinet i framtiden, då gruvverksamheten vid Aitik avslutas
- vilka konsekvenser de framtida åtgärderna kommer att ha för markanvändningen och miljön

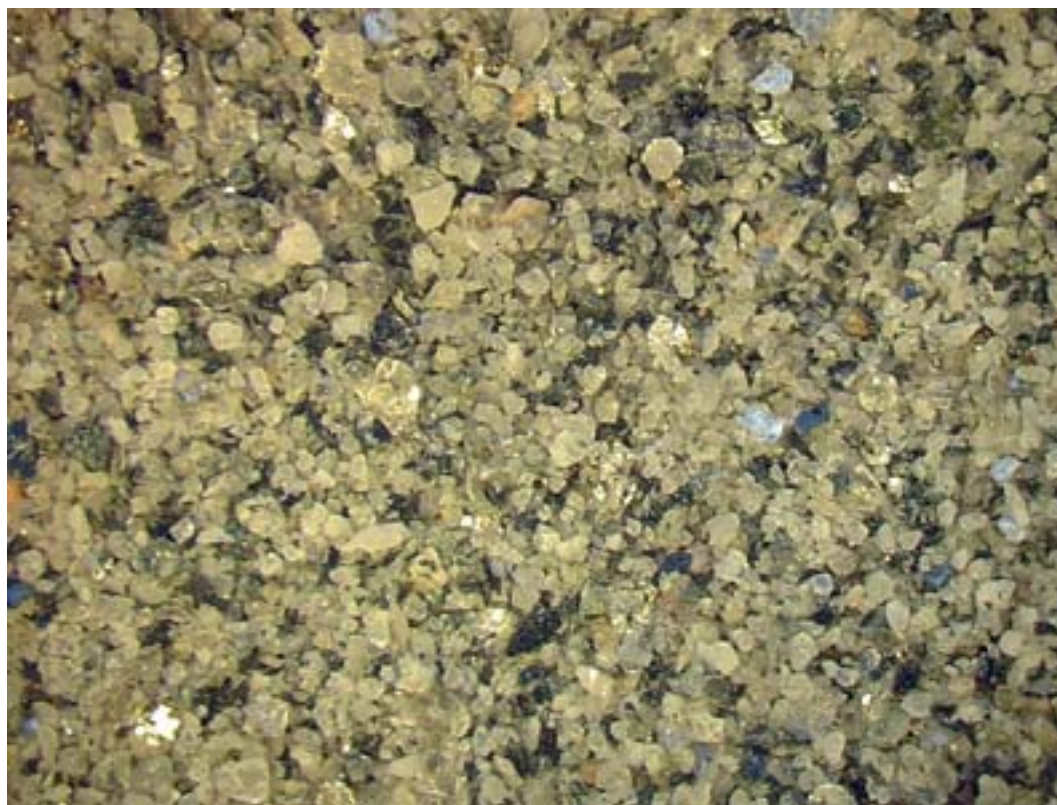
Delmålen har varit att ta fram ny kunskap beträffande

- hur träd, buskar, ris, örter, gräs, lavar, mossor som naturligt finns i Aitiktrakten utvecklas i ren anrikningssand och i sanden med olika tillsatser, jordförbättringsmedel såsom organiskt material och mineralgödsel
- hur valda växter från andra miljöer utvecklas i anrikningssanden och i sanden med olika tillsatser, jordförbättringsmedel såsom organiskt material och mineralgödsel
- vilka jordförbättringsmedel som har god och uthållig positiv effekt på växternas utveckling
- förändring över tiden hos anrikningssanden med och utan jordförbättringsmedel
- kvävetts dynamik och transport i mark-växtsystemet
- flöde av tungmetaller i mark- växtsystemet, vittringsintensiteten i anrikningssanden

## MATERIAL OCH METODER

### Anrikningssanden

Anrikningssanden utgör, som framgått tidigare, en rest efter metallanrikningen från krossad malm. Malmen består huvudsakligen (omkring 92 %) av mineralen kvarts, fältspat, plagioklas, muskovit och biotit (Abrahamsson, 1994). Abrahamsson anger också att övriga mineral som påträffas i malmzonen är turmalin (1 %), granat (1,5 %), skarnmineral (1,5 %), opaka mineral (2 %) plus en del sporadiskt förekommande mineral (2 %). Till skarnmineral räknas kalcit, amfibol, epidot och titanit. Det är dessa mineral som till största delen står för CaO-innehållet. De opaka mineralen är de s.k. malmmineralen. Av dessa är kopparkis och pyrit klart dominerande. I denna grupp ingår också magnetit och magnetkis. Sporadiskt har man påträffat molybdenglans, bornit och kopparglans (Abrahamsson, 1994). Mikroskopbilden av sanden, där det mesta av malmmineralen är avlägsnade, (figur 9) bekräftar att ljusa mineral, kvarts, muskovit, plagioklas dominerar, men att inslaget av mörka mineral, främst biotit men även amfibol, är tydligt märkbart.



**Figur 9** Anrikningssanden som den ser ut vid låg förstoring i mikroskop. De ljusa mineralen är kvarts, muskovit, plagioklas. Ett fåtal korn av kalifältspat (rödaktig) finns. Biotit utgör huvuddelen av de mörka mineral man kan se.

Som beskrivits i inledningen visade en undersökning av anrikningssanden år 1999 (Stjernman, 2000), följande partikelstorleksfördelning: sand 87-89 %, silt 7-8 % och partiklar i lerstorlek 4-6 %. Den totala porositeten mätt på prov tagna i fält varierade mellan 43 och 50 %, med porstorlekar från 5 till 300  $\mu\text{m}$  dominerande (Stjernman Forsberg och Ledin, 2003).

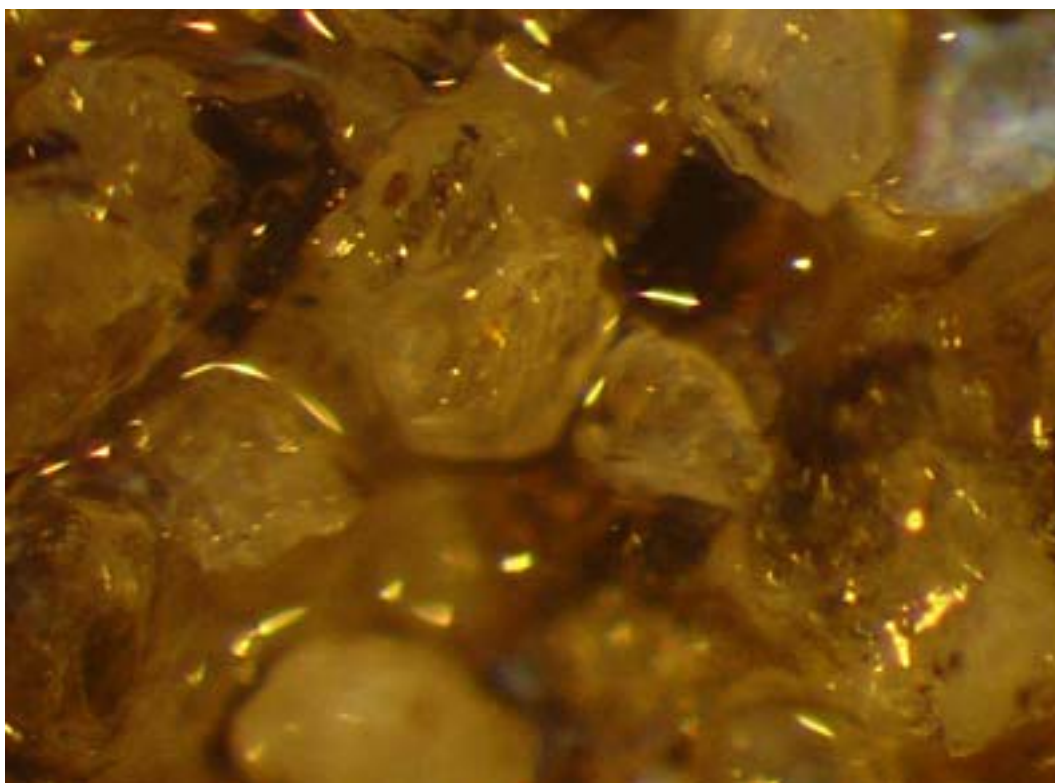


I jordbrukssammanhang gör man en klassifikation av partikelstorlekarna enligt tabell 2. I tekniska sammanhang slår man samman sand + grovmo till sand, finmo + mjåla till silt. Anledningen till skilda klassifikationer är att egenskaper kopplade till växtodling beskrivs bättre med jordbruksklassifikationen, och tekniska egenskaper beskrivs bättre med den tekniska texturklassifikationen.

**Tabell 2.** Partikelstorleksfördelningen i viktsprocent med den klassifikation som används i jordbrukssammanhang, hos prov av anrikningssanden, som togs i juni 1999 och redovisades i Lovisa Stjermans examensarbete (Stjerman, 2000)

Prov-plats	Djup (cm)	Viktprocent av fraktionen, mm						Glöd-förlust %
		Sand 2,0- 0,2	Grovmo 0,2-0,06	Finmo 0,06- 0,02	Grovmjåla 0,02- 0,006	Finmjåla 0,006- 0,002	Ler <0,002	
D6	0-10	36,7	50,4	5,4	0,8	0,07	6,5	2,0
	10-20	35,4	48,9	6,7	2,4	0,8	,8	1,6
	20-30	39,4	48,1	4,7	1,4	1,5	4,3	1,3
D3	0-10	34,4	51,7	8,4	1,3	1,7	7,7	2,2
D1	0-10	49,5	35,7	3,4	2,8	0,2	7,2	2,2
A6	0-10	37,4	52,4	4,8	2,1	0,7	3,9	0,3
	10-20	32,0	57,4	5,5	2,4	1,3	7,7	0,1
	20-30	32,6	55,6	6,8	1,8	0,9	4,7	0,1
A3	0-10	41,0	46,5	6,4	1,9	0,8	6,1	1,4
C3	0-10	39,5	46,9	6,6	1,9	0,7	5,8	0
Ö:a sandmag.								
	0-10	24,2	64,7	3,8	3,4	0,03	6,0	0
	10-20	24,4	61,8	6,4	2,2	0,60	4,6	0
	20-30	39,2	49,8	3,8	1,5	1,2	4,5	0
V:a sandmag.								
	0-5	0,2	7,3	2,1	34,8	15,0	14,0	0
	5-15	7,0	69,0	14,4	3,9	1,1	4,6	0

Som konstaterades i inledningsavsnittet har anrikningssanden egenskaper som är förknippade med både sand och grovmo. Sandjordar är alltför torra medan grovmojordar är gynnsamma odlingsjordar från markfysikalisk synpunkt. I figur 10, där sanden avbildas vid 50 ggr förstoring, illustreras hur rotmiljön kan se ut. En tolkning av det man ser är att sanden utan tillsats är näringsfattig. De ljusa mineralkornen, mest kvarts, dominerar. Det är välkänt att kvarts är ett svårvittrat mineral. Däremot är de mörka mineralen mera lättvittrade och kan därför släppa ifrån sig en del metallkationer som växter behöver, som  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  och  $Ca^{2+}$ . De skivformade biotit- och muskovitpartiklarna kan ha en viss adsorption av kationerna till sina ytor. Partiklarna med storlekar  $< 0,002$  mm, syns inte vid den upplösning som bilden ger, men partikelstorleksanalysen (tabell 2) visade att sådana partiklar finns representerade i sanden i genomsnitt upp till 6 procent. Dessa småpartiklar har den största betydelsen för adsorption av joner.



**Figur 10.** Vid 50 ggr förstoring i mikroskopet och med vatten i sanden, kan man få en viss uppfattning om den miljö som växrötterna möter om sanden nyttjas utan tillsatser av jordförbättringsmedel. Man ser kvartskornen som dominerar och det är uppenbart att rotmiljön är näringsfattig.

Abrahamsson beskriver bland annat den kemiska sammansättningen hos bergarterna, som krossas till sand inför uttaget av koppar, guld och silver. Bergarterna i malmzonen är muskovitskiffer, biotitskiffer och biotitgnejs och den kemiska sammansättningen ges i tabell 3 (Abrahamsson, 1994). Med den kemiska sammansättningen hos muskovitskiffer och biotitskiffer/gnejs (sandens modermaterial), kan man fråga sig i hur stor utsträckning som sanden bidrar med växtnäringsämnen vid vittring. Svaret är att ett visst bidrag kan fås när det gäller  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  och  $Na^+$  och möjligen fosfatjonerna  $H_2PO_4^-$  och  $HPO_4^{2-}$ .  $Fe^{2+}$  finns sannolikt tillräckligt eller mer än tillräckligt för växternas behov.

Stjernman (2000) redovisar jämförelser mellan ämnen i anrikningssanden provtagen 1999 och svensk matjord (tabell 4). Det framgår att koncentrationerna av Mg, P och K från anrikningssanden, extraherade i ammoniumlaktat, är betydligt lägre än för svensk matjord. Det innebär att växtnäring måste sättas till sanden för att växter skall utvecklas väl i den. Eftersom sanden har låg näringsadsorberande förmåga för de vanliga katjonerna  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ , finns starka indikationer på att någon form av jordförbättring behövs, för att vegetation skall kunna fungera på sikt.



**Tabell 3.** Kemisk sammansättning av bergarterna i malmzonen i Aitikgruvan (Abrahamsson, 1994)

Kemisk förening	Muskovitskiffer %	Biotitskiffer/gnejs %
SiO <sub>2</sub>	66,61	62,95
TiO <sub>2</sub>	0,50	0,57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,08	15,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,46	6,76
MnO	0,10	0,24
MgO	0,46	2,02
CaO	0,50	3,24
Na <sub>2</sub> O	1,19	1,13
K <sub>2</sub> O	7,49	5,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	0,18

**Tabell 4.** Kemiska data för anrikningssanden tagen 1999 från det vattenmättade magasinet i Aitik. Samtliga metaller är extraherade i 7 M salpetersyra. Mg, P och K är extraherade med ammoniumlaktat. Svenska riktvärden redovisas på metallhalter i förorenad mark och medelvärden på metallhalter och näringsinnehåll i svensk odlingsmark (matjorden) (Stjernman, 2000)

pH och grundämnen	Aitiks avfalls-sand	Svenska riktvärden för förorenad mark <sup>1)</sup>	Medelvärden i svensk matjord <sup>2)</sup>
pH	7,1		
Fe (mg/kg <sup>*</sup> ) <sup>b c</sup>	24700		
Al (mg/kg) <sup>a c</sup>	13800		
As (mg/kg) <sup>a c</sup>	11	15	4,0
Cu (mg/kg) <sup>a c</sup>	478	100	14,6
Cd (mg/kg) <sup>a c</sup>	1,3	0,4	0,2
Pb (mg/kg) <sup>a c</sup>	19	80	17,1
Zn (mg/kg) <sup>a c</sup>	96	350	59,0
Mn (mg/kg) <sup>a c</sup>	706		422
Mg-AL (mg/kg) <sup>a</sup>	17		160
P-AL (mg/kg) <sup>a</sup>	51		106
K-AL (mg/kg) <sup>a</sup>	65		137
tot-C (%) <sup>a</sup>	0,0		
tot-N (%) <sup>a</sup>	0,0		0,3
tot-S (%) <sup>a</sup>	4,0		0,05
Sulfat-S (mg/kg) <sup>a</sup>	6,4		

\* Koncentrationerna avser mg per lufttorr jord.

<sup>1)</sup>Naturvårdsverket, 2006.

<sup>2)</sup>Eriksson *et al.*, 1997.

<sup>a</sup> Analyser utförda 1997 av avdelningen för växtnäringlära, SLU

<sup>b</sup> Analyser utförda 1999 av avdelningen för marklära och ekokemi, SLU

<sup>c</sup> Extraherade i 7 M HNO<sub>3</sub>

Stjernman (2000) konstaterar att endast halterna av koppar och kadmium ligger över de svenska riktvärdena för förorenade marker enligt Naturvårdsverket (2006), och vidare att samtliga tungmetallhalter dock ligger över medelvärdena för svensk odlingsmark. Detta gäller också halterna av arsenik och svavel enligt Eriksson *et al.*, (1997).

Fosfatjonerna  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  och  $\text{HPO}_4^{2-}$  förväntas bindas och forma svårösliga föreningar med järn och aluminium, som det finns gott om i anrikningssanden, samt mera lösliga föreningar med kalcium.

I malmen finns inget kväve och därför inte heller i sanden. Möjligen skulle man kunna hitta spår av kväve i sanden från sprängämnen, men analysen gav 0,0 procent kväve. Svavel finns mer än nog i sanden från 1999. Den framtida sanden kommer som nämnts att avsvavlas, men det är troligt att den ändå kommer att hålla tillräckligt med svavel för växternas behov. Dessutom kommer det att vara nödvändigt att genomföra någon form av jordförbättring före växtetablering och jordförbättringsmedlet, sannolikt rötslam, kommer att innehålla alla de ämnen som växten behöver.



**Figur 11.** Bilden visar anrikningssand som grävts upp i juni 1999 med en spade i västra delen av sandmagasinet, långt bort från utsläppsrören. Sanden är fotograferad, liggande på spaden, och de horisontella sprickorna har bildats vid själva uppgrävningen. I orört tillstånd är sanden homogent tät, utan sprickor. Tillfälligtvis hade vatten täckt sanden och finare partiklar har sedimenterat långsammare än de grövre, och bildar därför ett ytskikt. Men generellt kommer sådana skikt av finare fraktioner sannolikt att vara av marginell betydelse vid det tillfälle

då hela sandmagasinet skall få sitt växttäckte. De ställen på magasinet, vid vilka man släpper ut sanden, har varierat med åren, och beroende på vilka ytformer man önskar ge magasinet i slutfasen före gruvans nedläggning, bestämmer man hur sanden släpps ut. Stående vatten med sedimentation kommer troligen att utgöra en mycket liten del av sandmagasinets yta.

## Avloppsslam som jordförbättringsmedel

Slam innehåller alla de ämnen som växter behöver, om än inte exakt i de proportioner som växterna kräver. Kväve och fosfor finns i förhållandevis höga halter i slam och eftersom kväve kan röra sig med vatten i det fall då det föreligger som nitrat, är kväve det ämne som förtjänar störst uppmärksamhet då man bedömer miljörisker förknippade med användning av slam som jordförbättringsmedel. För fosfors del gäller att fosfatjoner som frigörs från slammet bildar oorganiska föreningar, genom att till exempel förena sig med aluminium- och järnhydroxider i jorden. Fosfor blir då förhållandevis orörlig och bör därmed inte vara ett miljöproblem.

Det är vanligt att det finns en viss tveksamhet när det gäller att använda avloppsslam i olika sammanhang. Denna tveksamhet finns i Sverige liksom i de flesta länder i världen. Tveksamheten är naturlig och befogad och baserad på mänsklig erfarenhet i anslutning till exkrement. Den absolut första tveksamheten gäller risken för spridning av sjukdomar. Även i ett välutvecklat samhälle med moderna reningsverk kan denna risk med patogener i slammet fortfarande finnas som en realitet och i folks medvetande. I tillägg till patogener handlar oron om icke önskvärda substanser som hormoner och andra potentiellt miljöfarliga organiska ämnen samt tungmetaller.

Om avloppsslammet bara innehöll resterna av mat och dryck som gått igenom människans matsmältningsorgan, skulle miljöfarliga organiska ämnen och tungmetaller inte vara ett problem. I vårt ytterst välutvecklade, svenska samhälle (t ex i jämförelse med utvecklingsländer) har medvetenheten om miljöriskerna funnits åtminstone de senaste 40 åren och avfallshantering samt utveckling av reningsprocesserna har lett till förbättringar av slammets kvalitet och minskning av riskerna för spridning av icke önskvärda ämnen vid slam användning. I de fall då man gör bedömningen att ett slam kan rekommenderas för användning på matproducerande mark är det givetvis användbart som jordförbättringsmedel i andra sammanhang. En generell bedömning av rötat slam från Henriksdalsverket i Stockholm ger vid handen att det är användbart på matproducerande mark och därmed också för inblandning i anrikningssand inför växtetablering.

När det gäller miljöfarliga, organiska ämnen är nedbrytbarheten i mark god för de flesta ämnena, med undantag för vissa PCB-föreningar och dioxiner (Levlin m fl., 1996). De ämnen som inte bryts ner, binds hårt till markpartiklarna och en sådan bindning leder till lågt växtupptag. Då slammet blandas in i anrikningssanden utsätts de organiska föreningarna för flera biokemiska, kemiska och fysikaliska processer. De ämnen som är flyktiga rör sig upp i atmosfären i gasfas. Fenoler och vissa aromatiska föreningar fotolyseras av solljuset. Men det som har störst betydelse för nedbrytningen är den biologiska och kemiska nedbrytningen som mikroorganismerna i marken genomför (Levlin m fl., 1996). För organiska miljöfarliga ämnen används några ämnen som indikatorämnen, eftersom det är svårt att analysera alla ämnen. (Statens Naturvårdsverk m fl., 1995, enl. Levlin m fl. 1996) har redovisat indikatorämnen och gränsvärden som presenteras i tabell 5. För metaller har samma källa redovisat gränsvärden för jordbruksanvändning enligt tabellerna 6 och 7.

**Tabell 5.** Gränsvärden för organiska föroreningar i slam i mg/Kg TS (Statens Naturvårdsverk m fl., 1995, enl. Levlin m fl. 1996)

Organiskt ämne	Gränsvärde
Nonylfenol	50
Toluen	5,0
Summa PAH	3,0
Summa PCB	0,4

**Tabell 6.** Gränsvärden för metaller i slam avsett för jordbruksanvändning och grönytor i mg/kg TS (Statens Naturvårdsverk m fl., 1995, enl. Levlin m fl. 1996)

Metall	Gränsvärde
Pb	100
Cd	2
Cu	600
Cr	100
Hg	2,5
Ni	50
Zn	800

**Tabell 7.** Gränsvärden för mängd metall som får tillföras åkermark genom slamgödning i g/ha, år (Statens Naturvårdsverk m fl., 1995, enl. Levlin m fl. 1996)

Metall	Gränsvärde
Pb	25
Cd	0,75
Cu	300
Cr	40
Hg	1,5
Ni	25
Zn	600

## Slammets egenskaper

### Slam från Gällivare

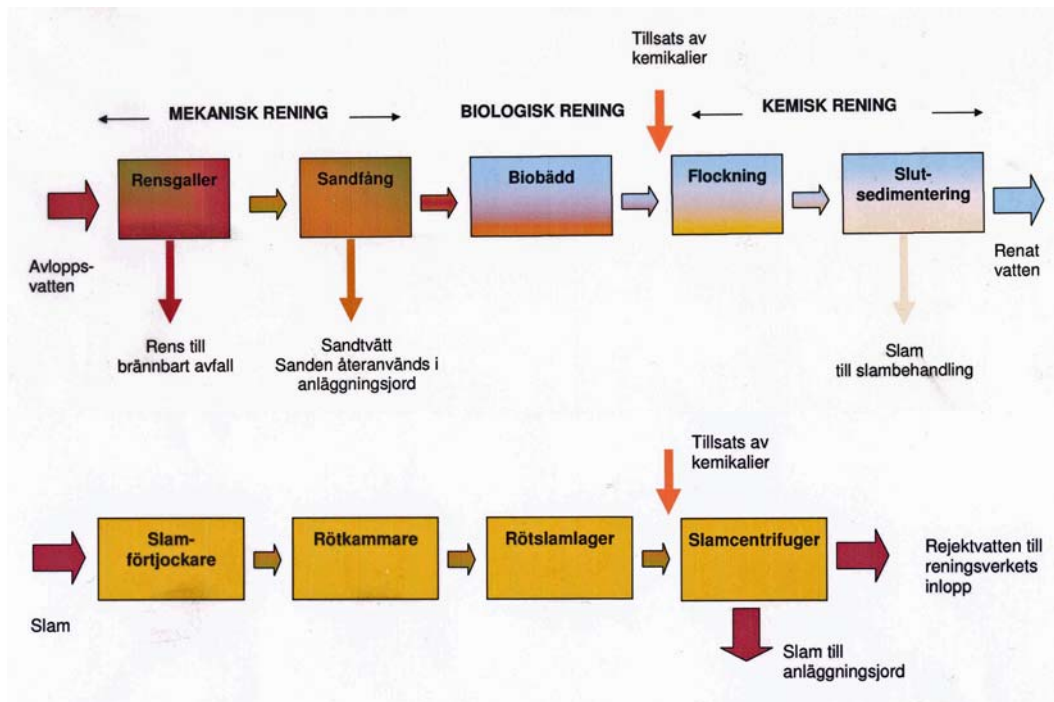
Avloppsslam från Kavahedens reningsverk, Gällivare (figur 12) användes för de ytor som anlades år 1997, 1999 och 2000. Resultat av analyser på Gällivareslam visade 390 g kol och 36 g kväve per kilo torrt slam. Volymvikten var 0,25 kg per kubikdecimeter.



**Figur 12.** Bild av orötat slam från Kavahedens reningsverk, Gällivare den 15 juni år 2000, i samband med anläggningen av 2000-ytan.

### Avloppsreningsprocessen

Det rötade slammets har gått igenom en lång process från det att avloppsvattnet kom in i reningsanläggningen (Fig. 13), (Piteå kommun, 2006a; Piteå kommun 2006b). Som framgår av figuren renas avloppsvattnet först mekaniskt, där större partiklar avskiljs. Det rör sig om småsten, grus, träbitar, hår, textilier och plast. Reningen sker i galler, sandfång och genom försedimentering. I den biologiska reningen sker nedbrytningen av organiskt material (kolhydrater, fetter och proteiner m.m.). I detta biologiska steg har mikroorganismerna (bakterier, protozoer) tillgång till syre. I den efterföljande kemiska reningen avskiljs främst fosfor från avloppsvattnet. Detta gör man genom tillsats av fällningskemikalier som innehåller aluminium- eller järnföreningar. Fosfor som är i lösning kopplas ihop med aluminium- eller järnföreningarna. Flockar bildas och sedimenterar till botten av bassängen. Slam som går vidare i processen förtjockas innan det går in i en röt-kammare, där anaeroba mikroorganismer nyttjar slammets som föda och därvid också bildar gaser i form av metan och koldioxid. Tiden för rötningen kan röra sig om 20 dagar. Det rötade slammets går via ett lager till slamcentrifuger och vatten centrifugeras av, så att torrsubstanshalten ökar från cirka 3 % till cirka 25 %.



**Figur 13.** Avloppsrening som den beskrivs för Sandholmens avloppsreningsverk (Piteå kommun, 2006a; Piteå kommun 2006b)

### Slam från Henriksdals reningsverk

Genom Bolidens försorg har resultat av analyser på rötat slam från Stockholm Vatten (tabell 8, 9 och 10) blivit tillgängliga för denna rapport. Analyserna är genomförda dels av AnalyCen AB, dels av Stockholm Vatten.

Av tabell 8a framgår att pH-värdet hos slammet ligger på den alkaliska sidan. Detta är positivt om man önskar få en buffringseffekt av slammet när det blandas in i anrikningssanden. De totala fosfor- och kvävehalterna är höga och ligger för båda ämnena omkring fyra procent av slammets torrsubstans. Av makronäringsämnen (NPK) är det kalium som förekommer i lägst koncentration med 0,13 procent. En vanlig proportion mellan ämnena i växter är 100N:12P:80K. Man kan dock inte direkt göra tolkningen att växterna kommer att lida brist på kalium, eftersom kemiska processer i anrikningssanden snabbt binder fosfor och det är möjligt att kväve kommer att finnas i överskott för växterna. Dessutom bidrar sanden i sig med kalium. Mikronäringsämnena finns i slammet och därav är järnet i överskott, vilket inte behöver vara ett problem för växterna.

**Tabell 8a.** pH och ”närsalter” i rötslammet. Medelvärden beräknade från flera månaders mätningar under åren 2002, 2003 och 2004 (Nilsson, 2006)

År	pH	TS %	GR % av TS	P-AL mg/kg TS	Tot-P % av TS	Tot-N % av TS	NH <sub>4</sub> -N % av TS
2002	7,9	26,8	42,9	1284	3,9	4,0	1,1
2003	7,7	27,3	43,3	1453	4,2	4,1	1,1
2004	7,6	28,1	44,0	1214	3,9	4,1	1,2

**Tabell 8b.** Fortsättning ”närsalter” i rötslammet. Medelvärden beräknade från flera månaders mätningar under åren 2002, 2003 och 2004 (Nilsson, 2006)

År	B mg/kg TS	Tot-S % av TS	K % av TS	Ca % av TS	Mg % av TS	CaO % av TS
2002	<28	0,89	0,13	1,83	0,27	3,6
2003	<24	1,0	0,14	1,8	0,28	4,4
2004	<24	0,8	0,15	1,6	0,29	4,7

**Tabell 9a.** Torrsubstanshalt och grundämnen, framförallt metaller, i avvattnat slam från Henriksdalsverket, mg/kg TS, medelvärden för alla månader under fyra år, samt motsvarande för slam från Bromma reningsverk, medelvärden från alla månader under ett år (Nilsson, 2006)

Reningsverk och år	TS %	Zn	Pb	Co	Cd	Ni	Mn
Henriksdal 2002	27,4	550	39	9,4	1,2	50	160
Henriksdal 2003	27,4	560	32	9,8	1,2	24	170
Henriksdal 2004	28,6	560	29	10	1,2	23	170
Henriksdal 2005	28,7	620	29	9,7	1,2	25	170
Bromma 2005	34,3	510	25	10	0,9	20	180

**Tabell 9b.** Fortsättning, grundämnen, framförallt metaller, i avvattnat slam från Henriksdalsverket, mg/kg TS, medelvärden för alla månader under fyra år, samt motsvarande för slam från Bromma reningsverk, medelvärden från alla månader under ett år (Nilsson, 2006)

Reningsverk och år	Cr	Cu	Hg	Ag	Mo	B	Fe
Henriksdal 2002	25	390	1,5	13	5	15	108000
Henriksdal 2003	23	390	1,5	12	6	16	115000
Henriksdal 2004	23	380	1,3	10,1	6	14	114000
Henriksdal 2005	23	370	1,0	8,7	5	17	109000
Bromma 2005	22	350	0,8	4,5	11	11,1	102000

**Tabell 10a.** ”Miljöfarliga, organiska ämnen” i avvattnat slam från Henriksdalsverket under åren 2002, 2003, 2004, mg/kg TS, (Nilsson, 2006)

År	TS %	Destillerbara fenoler	Toluen	4-nonyl-fenol	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 118
2002	26,8	5,6	<0,1	24	0,030	0,014	0,009	0,007
2003	27,3	5,3	<0,1	23	0,008	0,008	0,009	0,006
2004	28,3	6,5	<0,1	20	0,006	0,006	0,009	0,005

**Tabell 10b.** "Miljöfarliga, organiska ämnen" i avvattnat slam från Henriksdalsverket under åren 2002, 2003, 2004, mg/kg TS, (Nilsson, 2006)

År	PCB 153	PCB 138	PCB 180	Sa:PCB	Fluor- anten	Benso(b) Fluor- anten	Benso(k) Fluor- anten	Benso(a) pyren
2002	0,018	0,019	0,012	0,11	0,63	0,31	0,13	0,21
2003	0,014	0,016	0,008	0,07	0,7	0,4	0,2	0,3
2004	0,018	0,020	0,010	0,08	0,7	0,3	0,1	0,2

**Tabell 10c.** "Miljöfarliga, organiska ämnen" i avvattnat slam från Henriksdalsverket under åren 2002, 2003, 2004, mg/kg TS, (Nilsson, 2006)

År	Benso (ghi) perylene	Indeno (1,2,3,-cd) pyren	Sa:PAH	Lindan	DDT	DDE	DDD	Dibetyl- ftalat
2002	0,27	0,18	1,63	<0,09	<0,012	<0,012	<0,012	0,28
2003	0,2	0,2	1,9	<0,018	<0,018	<0,030	<0,030	0,25
2004	0,2	0,2	1,7	<0,018	<0,018	<0,030	<0,030	0,25

**Tabell 10d.** "Miljöfarliga, organiska ämnen" i avvattnat slam från Henriksdalsverket under åren 2002, 2003, 2004, mg/kg TS, (Nilsson, 2006)

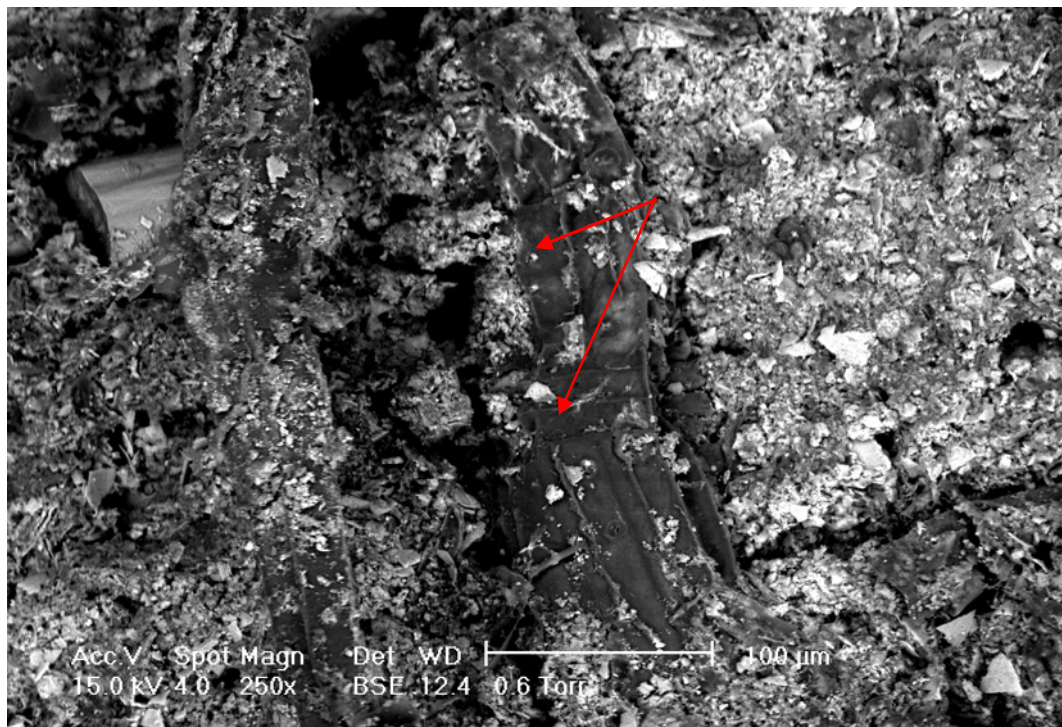
År	Bis-(2-ethyl-- Hexyl) ftalat	CN fri	CN tot
2002	46	<0,8	2,5
2003	85	<0,7	(3,6)
2004	89	<0,72	4,0

### Svepelektronmikroskopering

Slam som hade legat omkring två år på ett moräntäckt gråbergssupplag ("T-femman" vid Aitik) provtogs för mikroskopering. Mikroskoperingen genomfördes med ett svepelektronmikroskop XL 30 ESEM-FEG (Philips). Bilderna presenteras i figurerna 14 a - 14 e.

Svepelektronmikroskoperingen genomfördes för att få kunskaper om slammet, som de kemiska analyserna inte kan ge. Det kan vara nyttigt vid försök till bedömning av risker med rötslam, att tänka igenom vad rötslam egentligen är. Till att börja med är det som spolats ner i toaletten rester av livsmedel, mat och dryck. Livsmedlen har dels gått igenom matsmältningskanalen, dels njurarna. Det mesta av det som fanns i maten utom koldioxid och vatten som andats ut lämnar kroppen som fekalier och urin. Bara en ytterst liten bråkdel av det som fanns i maten blir kvar. I resterna finns en del av de gynnsamma tarmmikroorganismerna. Toalettpapperet är fibrer från vedartade växter. I tillägg finns i resterna också molekyler som har sitt ursprung i mediciner eller profylaktiska substanser. Även patogena organismer kan finnas i det som spolats ner i toaletten. När det organiska materialet kommer till reningsverket nyttjas det av en rad

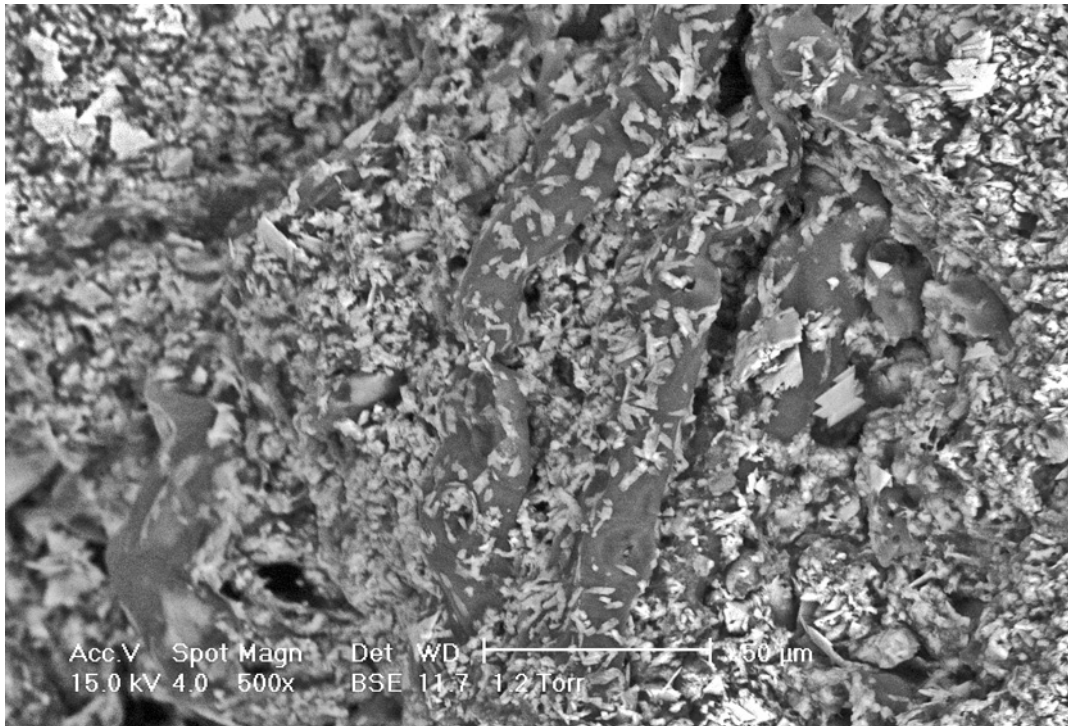




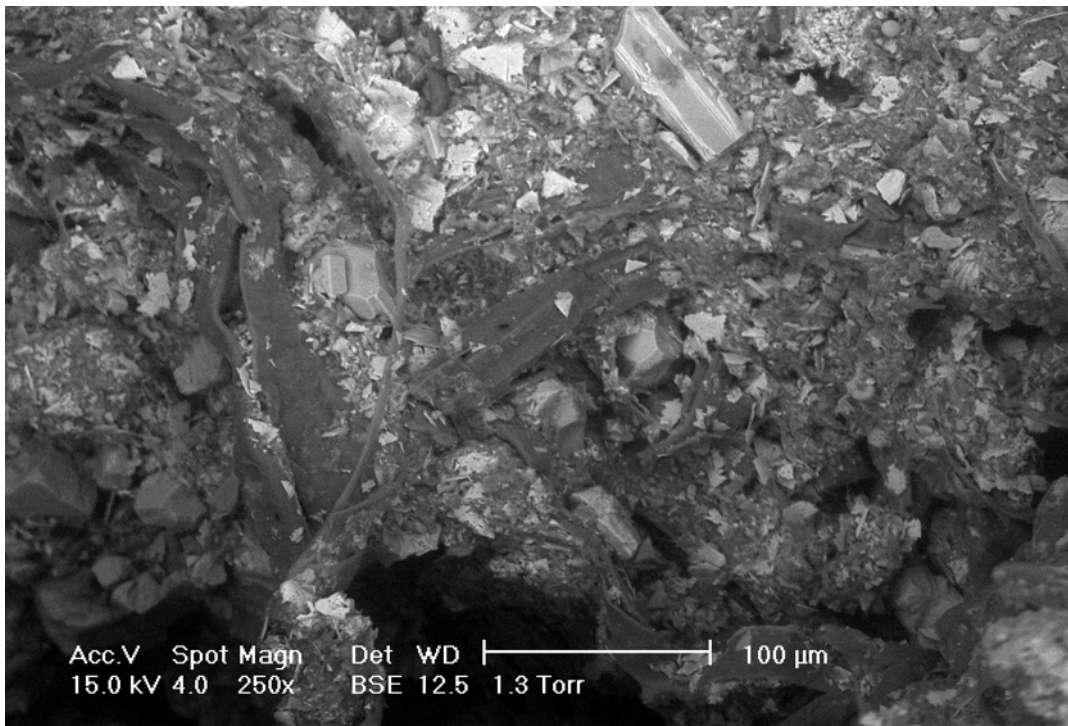
**Figur 14 a.** ESEM-bild av prov A1, som visar förekomst av en speta inbäddad i jordpartiklar. Spetan härstammar från barrved med karakteristiska gårdade porer, se pilar (Hornatowska, 2006).

organismer som föda. Röttslammet är därför dels rester eller restprodukter av dessa organismer, dels icke ännu nedbrutet organiskt material, som t.ex. rester av toapapper. Svepelektronmikroskopbilderna visar en hel del mineralpartiklar och ännu återstår att reda ut var dessa kommer in i reningsprocessen. Så som processen beskrivs i figur 13, är det tänkbart att dra slutsatsen att flockningen i den kemiska reningen ger upphov till en del av det som i svepelektronmikroskopet uppfattas som mineralpartiklar. (Det är ytterst troligt att någon som läser detta redan har kunskap om vad det är vi ser och hur och när mineralpartiklarna kommer in i slammet). En förklaring kan vara att dagvatten leds till reningsverket och det är uppenbart att jordpartiklar kan komma den vägen.

Som framgår av tabell 10a-10b, ingår ”miljöfarliga organiska ämnen” i slammet. Hur fort nedbrytning av dessa ämnen sker, när slam blandas in i anrikningssand är inte känt när detta skrivs våren 2006. Hur de ”miljöfarliga organiska ämnena” kommer in i slammet utreds inte i denna rapport, men generellt kan sägas att strävan efter renare slam har pågått så länge som reningsverk har använts i Sverige, eller åtminstone från början av 70-talet då miljömedvetenheten fick fast grund i landet. Rimligtvis ökar inte risken med tiden för kontaminering av slam med miljöfarliga, organiska ämnen.

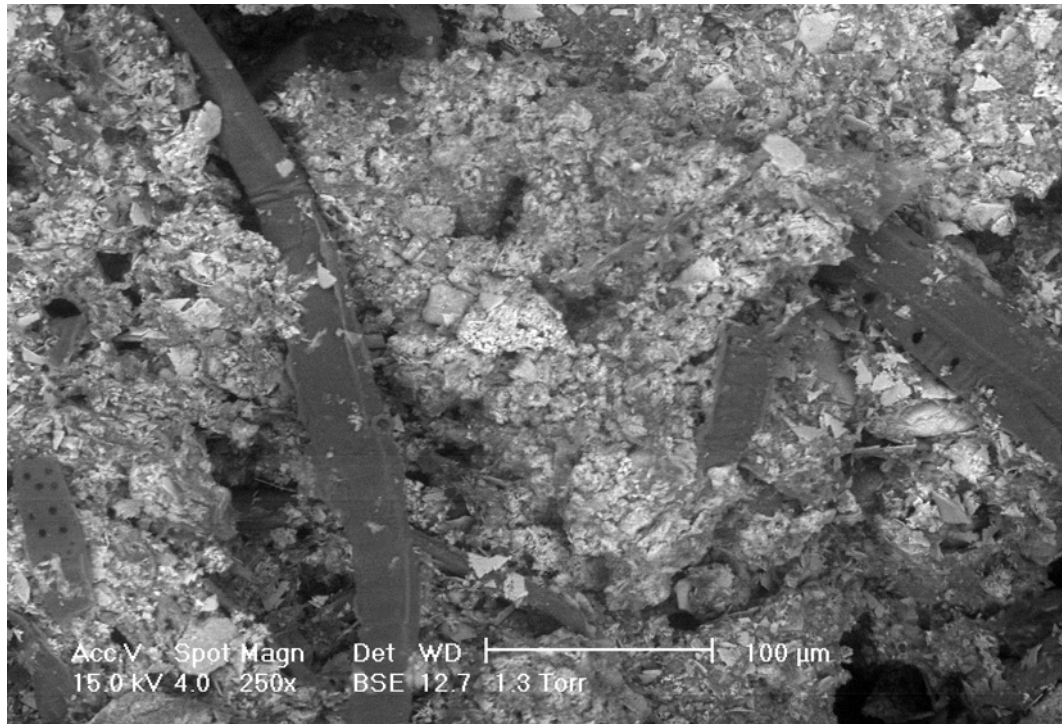


**Figur 14 b.** ESEM-bild av prov A3 som visar förekomst av barrvedsfibrer mellan jordpartiklar, förstoring 500x (Hornatowska, 2006).



**Figur 14 c.** ESEM-bild av prov A3 som visar förekomst av barrvedsfibrer mellan jordpartiklar (mineralpartiklar) förstoring 250x (Hornatowska, 2006).





**Figur 14 d.** ESEM-bild av prov A4 med sommarvedsfibrer (från barrved) och parenkymceller. Parenkymcellen visas med en pil (Hornatowska, 2006).



**Figur 14 e.** ESEM-bild av prov A4 som illustrerar förekomst av en speta från gran med de typiska små porerna, se pil (Hornatowska, 2006).

Svepelektronmikroskoperingen genomfördes av Hornatowska vid STFI-Packforsk AB, Stockholm. I anslutning till svepelektronmikroskoperingen genomfördes in situ analys av de grundämnen, som ingår i det mikroskoperade slammet. Analysen genom-

fördes med energidispersiv röntgenanalys. Metoden är halvkvantitativ och med denna analyseras grundämnen från natrium och uppåt hos oorganiska föreningar. Kol- och syresignal registreras dock både från organiska och oorganiska material. Detta är ingen totalanalys, utan de grundämnen som är detekterbara med metoden presenteras. Därvid erhöles medelvärden av fem analyser på varje prov (tabell 11).

En kemisk analys av slamprover, som användes i Pär Wennmans inkubationsförsök (Wennman and Kätterer, 2006), genomfördes också vid STFI. Den ungefärliga mängden av polymeriska kolhydrater och lignin i slammet var 37-39% av den totala torrvikten. Proven hade torkats vid 35 grader Celsius under fyra dagar, och extraktionen genomfördes med aceton. Polymererna hydrolyserades med 0,4 M svavelsyra i en autoklav vid 0,14 MPa tryck, och de lösliga sockerarterna kvantifierades i en jonkromatograf med en IC-PAD-detektor. Monomererna som hade sitt ursprung huvudsakligen från cellulosa och hemicellulosa bestod av 4,8 % glukos, 1,4 % mannos, 1,0 % galaktos, 1,0 % xylos och 0,5 % arabinos. Den gravimetriskt bestämda resten efter hydrolysen utgjorde 25,5% av den totala, torra mängden. Denna rest bestod av 60 % aska och 40 % klasonlignin. Den syralösliga ligninmängden, analyserad genom UV absorption var 4,1 %.

**Tabell 11.** Grundämnen (viktsprocent) som detekterats i de prover som svepelektron-mikroskoperats. Medelvärden av fem observationer (Hornatowska, 2006)

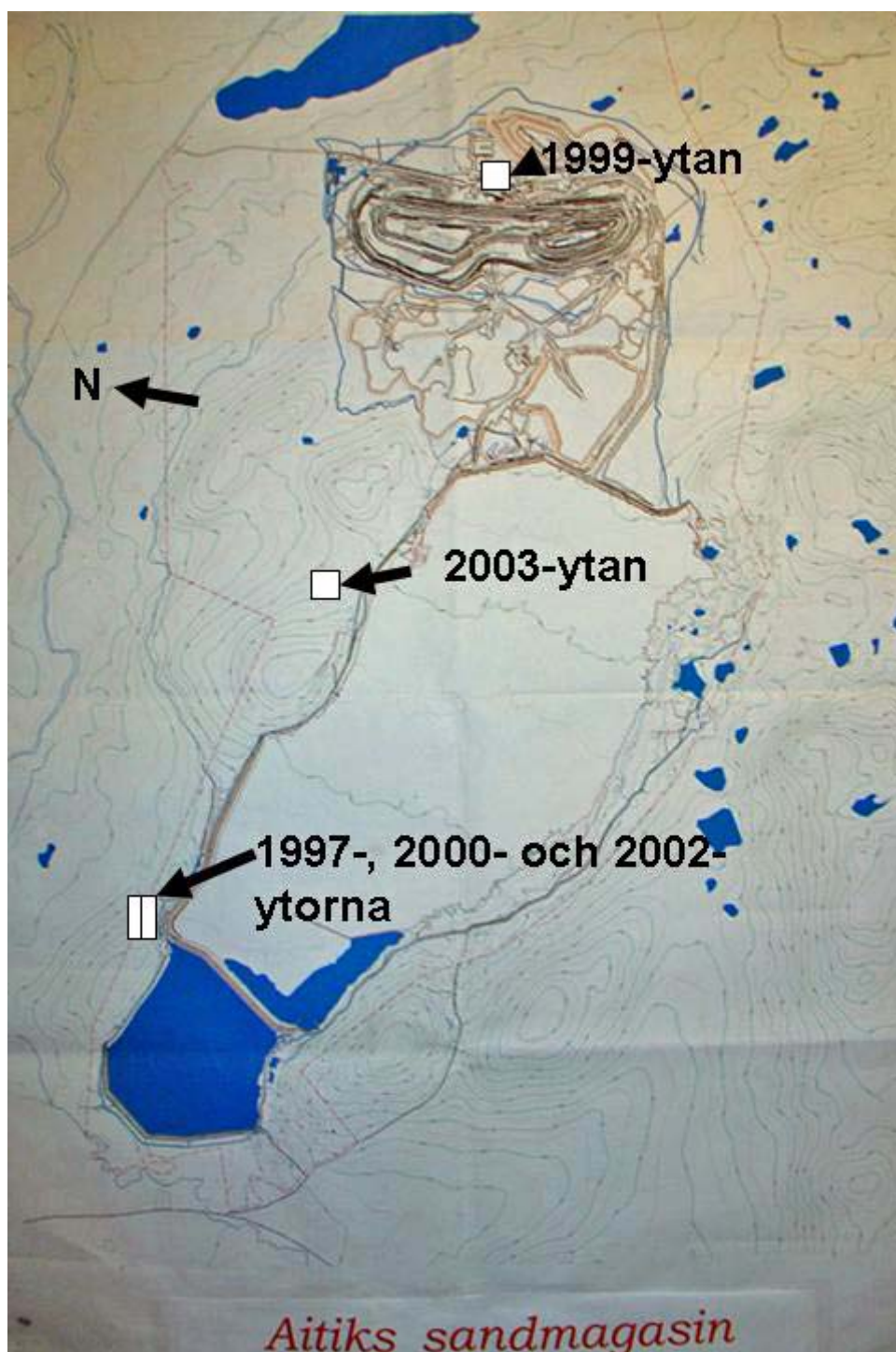
Grundämne	Viktsprocent
C	24,9
O	37,1
Na	0,5
Mg	0,6
Si	3,7
P	4,2
S	3,6
Cl	0,2
K	0,6
Ca	5,1
Ti	0,6
Fe	15,9

### Försöksplatsen och klimatet

Fältförsökens placering vid Aitik framgår av kartan i figur 15. Klimatet i området är subarktiskt med kalla somrar (medeltemperatur +13°C) och kalla vintrar (medeltemperatur -14°C). Årsmedelnederbörden är omkring 600 mm, och av denna faller omkring 40 % under växtsäsongen (slutet av maj till september) (Eriksson, 1992). Växtsäsongen år 2002 var omkring 16 veckor med en medeltemperatur på 16°C med variationer mellan -2 till 25°C, (Nilsson, 2006).

För de flesta fältförsöken grävdes anrikningssand upp och transporterades från den östra delen av sandmagasinet vid Aitik och placerades på förberedda, plangjorda ytor

av morän nära skogen strax intill nordvästra delen av magasinet. Fältförsöksplatserna ligger några meter högre upp än sandmagasinets yta och sanden dräneras effektivt. Sanden påfördes vid samtliga tillfällen i en tjocklek som överskred 1 meter och ytan gjordes plan. Fältpänerna för 1997- och 1999-ytorna framgår av figurerna 16 och 25. 1999-ytan avviker i den meningen att anrikningssand inte grävdes upp från magasinet, utan sand vid vattendammen nära industrianläggningen (fig. 15) nyttjades och därmed låg också grundvattenytan närmare markytan än i de övriga fältförsöksplatserna.



**Figur 15.** Aitikområdet med fältförsöksplatsernas lägen indikerade.

## UNDERSÖKNINGAR PÅ 1997-YTAN OCH ANSLUTANDE STUDIER

En sammanfattning som gäller denna undersökning finns på sidan 9 i denna rapport

### Material och metoder

De olika markbehandlingsleden i 1997-ytan (figur 16) var följande:

- A. anrikningssand
- B. anrikningssand + mineralgödselkväve motsvarande 60 kg/ha
- C. anrikningssand + mineralgödsel N+PK motsvarande 60 kg N/ha, 30 kg P/ha och 60 kg K/ha
- D. anrikningssand + avloppsslam från Gällivare infräst till cirka 20 cm djup i sanden. Mängden ungefär 20 volymprocent.
- E. anrikningssand + insådd av rödklöver (i stället för 20 olika arter som etablerades i försöksleden A, B, C och D). Den optimistiska tanken var att rödklöver skulle fungera som grüngödsling och att man året därpå skulle kunna så in olika arter. Tyvärr dog klövern och idén övergavs). 1998 testades tillsats av NPK-mikro i detta försöksled. Mängderna motsvarade 66 kg N/ha, 30 kg P/ha och 66 kg K/ha. Kvävet tillsattes dels som N28, dels i NPK 18-4-10. Mängden NPK/ha var cirka 350 kg. Näringsämnen utöver NPK ingick med 0,2 % Ca, 1,0 % Mg, 10-11% S, 0,4 % Cl, 0,06 % Mn, 0,03 % Cu, 0,02 % B, 0,1 % Fe, (Zn okänd mängd), 0,001 % Co och 0,001 % Mo.

De växter som testades i 1997-ytan grävdes delvis upp från skogen intill, eller nära närmaste vattendrag (alplantorna), delvis nyttjades inköpta frön. Anledningen till att skogsplantor från närmiljön nyttjades, var att man kan utgå att de är anpassade till klimatet på platsen. När växterna grävdes upp lades de omedelbart ner i hink med vatten och moränen från naturmarken tilläts hänga kvar till viss del på rötterna. Plantorna bars direkt i hinkarna med vattendränkta rötter till den plats, där de planterades i anrikningssanden i rutorna med olika behandling. Växterna var följande:

1. Tall ( <i>Pinus sylvestris</i> )	frö
2. Tall	planta
3. Gran ( <i>Picea abies</i> )	frö
4. Gran	planta
5. Björk ( <i>Betula pubescens</i> )	frö
6. Björk	planta
7. Vide ( <i>Salix ssp.</i> )	planta
8. Al ( <i>Alnus incana</i> )	planta
9. Lingon ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> )	'plantor'
10. Kråkris ( <i>Empetrum nigrum</i> )	'plantor'
11. (Odon år ett) Ljung ( <i>Calluna vulgaris</i> )	'plantor'
12. Blåbär ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )	'plantor'
13. Rödsvingel ( <i>Festuca rubra</i> 'Lovisa')	frö
14. Ängsgröe ( <i>Poa pratensis</i> 'Fylking')	frö
15. Rörflen ( <i>Phalaris arundinacea</i> )	frö
16. Björnmossa ( <i>Polýtrichum commúne</i> )	'plantor'
17. Renlav ( <i>Cladina rangiferina</i> )	'plantor'
18. Mjölkört ( <i>Epilobium angustifolium</i> )	plantor
19. Rödklöver ( <i>Trifolium pratense</i> 'Bjursele')	frö
20. Alaskalupin ( <i>Lupinus nootkaensis</i> )	frö



(Tecknen runt 'plantor' indikerar att dessa växter inte är avgränsade lika tydligt som dem vilka saknar dessa tecken. Exempelvis är det ganska svårt att avgränsa en lingon-planta, när man gräver upp den i skogen).

E1	E2	E3	E4	E5	E6	sand + NPK-mi
D1	D2	D3	D4	D5	D6	sand + slam
C1	C2	C3	C4	C5	C6	sand + NPK
B1	B2	B3	B4	B5	B6	sand + N
A1	A2	A3	A4	A5	A6	sand

Varje ruta på 1997-ytan hade följande utseende för blocken A-D:

Tall (frö) 1	Tall (planta) 2	Gran (frö) 3	Gran (planta) 4	Björk (frö) 5
Björk (planta) 6	Vide 7	A1 8	Lingon 9	Kråkris 10
(Odon), Ljung 11	Blåbär 12	Rödsvingel (frö) 13	Ångsgröe (frö) 14	Rörflen (frö) 15
Björnmossa 16	Renlav 17	Mjölkört 18	Rödklöver (frö) 19	Alaskalupin (frö) 20

**Figur 16.** Schematisk beskrivning av 1997-ytan med den enskilda rutans indelning och markbehandlingarna angivna.



**Figur 17 a.** Vy över 1997-ytan försommaren 1997 innan alla försöksleden är anlagda. Närmast magasinet A. Anrikningssand. Sedan följer B. Anrikningssand + mineralgödselkväve; C. Anrikningssand + mineralgödsel N+PK; D. Anrikningssand + avloppsslam från Gällivare (skall anläggas); E. Anrikningssand + insådd av rödklöver.



**Figur 17 b.** Vid Block C västerut efter det att plantorna satts i jorden och fröna såtts. Till höger Block D som ännu inte fått sitt slam och där plantering och sådd kommer senare.



År 1998 stod det klart att de frösådda trädarterna i 1997-ytan inte utvecklats till plan-  
tor, och därför sattes plantor från plantskolor i de rutor som frösåts året innan, tall-  
planta där tallfrön såtts, granplanta där granfrö såtts, osv.

Figur 17 visar hur det såg ut på ytan vid anläggningstillfället. Partikelstorleksfördel-  
ningen, porstorleksfördelningen, genomsläppligheten och jordmaterialets penetra-  
tionsmotstånd studerades på försommaren 1999 (figur18), och resultaten presenter-  
ades i ett examensarbete (Stjernman, 2000).



**Figur 18 a, b, c.** Partikelstorleksfördelningen, porstorleksfördelningen, genomsläppligheten och jordmaterialets penetrationsmotstånd studerades på försommaren 1999, och resultaten presenterades 1999, och resultaten presenterades i ett examensarbete (Stjernman, 2000). Lägga märke till att sanden har ändrat färg från grå till rostfärgad.

## Resultat och diskussion

### Inventering av döda växter ett år efter etablering

Adelin Ries genomförde en inventering den 16 juni 1998 gällande hur stor andel av växterna som dött, och resultaten finns redovisade i detalj i hennes rapport (Ries, 1998). Här presenteras några utvalda resultat från inventeringen (tabell 12).

**Tabell 12.** Den procentuella dödligheten i medeltal hos arterna i de olika mark-behandlingarna. 100 indikerar att alla växter dött

Art	A. Sand	B. Sand +kväve	C. Sand + kväve, fosfor, kalium (NPK)	D. Sand + slam
1 Tall (frö)	67	75	100	88
2 Tall (planta)	17	50	67	46
3 Gran (frö)	75	88	96	88
4 Gran (planta)	54	54	63	42
5 Björk (frö)	100	100	100	100
6 Björk (planta)	33	54	75	42
7 Vide (planta)	38	71	79	63
8 Al (planta)	88	96	100	100
9 Lingon	4	38	50	13
10 Kråkris	42	50	38	29
11 Ljung	79	88	92	92
12 Blåbär	58	50	58	33
13 Rödsvingel (frö)	100	100	83	29
14 Ängsgröe (frö)	100	100	79	17
15 Rörflen (frö)	100	100	96	63
16 Björnmossa	4	8	13	46
17 Renlav	4	4	21	83
18 Mjölkört	54	83	79	71
19 Rödklöver (frö)	83	100	92	46
20 Alaskalupin (frö)	100	100	100	100

Överlevnaden av plantor från skogsträdens frö förefaller närmast slumpartad, och generellt kan sägas att frön från tall, gran och björk haft liten framgång, eller ingen framgång alls när det gäller björk. Frön av gräsen har grott och överlevt bäst i det slambehandlade försöksledet. Allra bäst har ängsgröe klarat sig och rörflen har klarat sig sämst och däremellan ligger rödsvingel. Bland leguminoserna har rödklöver klarat sig bäst med 54 % överlevnad, medan alaskalupinen är totalt misslyckad i alla behandlingsleden. Al förefaller vara totalt olämplig i sammanhanget, medan vide sannolikt är potentiellt intressant. Av risen är lingon, blåbär och även kråkris intressanta, medan ljung förefaller vara svåretablerad, särskilt när näring har tillsats i någon form. Mjölkört har inte utvecklats sig väl, men med tanke på hur ofta man ser den i andra sammanhang i omgivande och liknande landskap skall den definitivt inte avskrivras från listan av intressanta växter. För björnmossa och renlav förefaller anrikningssanden utan tillsatser vara bättre än med tillsatser och sämst för överlevnad av båda arterna är slamtillförseln. Om man tar vinderosion med i överväganden om passande växter, faller dock både renlav och björnmossa bort som potentiella marktäckare. Sanden måste bindas snabbare än renlav och mossa etablerar sig.

## En summering av de tre säsongernas växtetableringsförsök

Vegetationen var mest livskraftig på ytan med slamtillsats (yta D) (Stjernman, 2000). Arter av träd och ris har varit mest framgångsrika, med undantag av första säsongen, då björnmossa och renlav klarade sig bäst (Ries, 1998). Bland träden var överlevnaden högst hos tall (*Pinus sylvestris*), björk (*Betula pubescens*) och vide (*Salix ssp.*), i synnerhet hos de individer som planterats. Dödligheten var högst hos al (*Alnus incana*). Inte heller frön av gran (*Picea abies*) lyckades etablera sig. Trädetableringen varierade dock något från år till år. De risarter som överlevde var främst kråkris (*Empetrum nigrum*) och ljung (*Calluna vulgaris*). Samtliga risarter var dock i mycket dåligt skick. De gräs som planterats på försöksytan var rödsvingel (*Festuca rubra* Lovisa'), ängsgröe (*Poa pratensis* Fylking') och rörflen (*Phalaris arundinacea* Palaton'). Resultaten av gräsetableringen har varit mycket dåliga. Endast på yta D låg dödligheten under 100 %, men majoriteten av gräsen dog även där. Till övriga örter som såtts hör bl.a. vissa baljväxter. Av dem klarade sig rödklöver (*Trifolium pratense* Bjursele') bäst, men överlevde endast på ytan med slamtillsats (Kofoed, 1999). Figurerna 19 – 22 illustrerar detta.



**Figur 19.** Rödklöver etablerade sig i försöksledet där slam hade blandats in och i slammet fanns olika ogräsfrön som också hade givit upphov till livskraftiga plantor. I det här fallet syns gråbo. När det gäller att skydda sandmagasinet mot vinderosion är det kraftfullt växande arterna ett positivt inslag, men från estetisk synpunkt och även markanvändningssynpunkt kan det vara önskvärt att det vi kallar ogräs finns i mindre utsträckning i den vegetation som etableras på sandmagasinet. Vid den slutliga växtetableringen på hela magasinet kommer rötat slam att användas och det har knappast de ogräsfrön som fanns i det orötade Gällivareslammet, som användes på 1997-ytan.





**Figur 20.** Innan det stod klart att pH-värdet hade sänkts så mycket att vegetationen led svårt av det, gjordes försök att komplettera den vegetation som hade dött ut. Bilden visar hur kompletteringsplantering genomfördes försommaren 1999 i yta D där Gällivareslam brukats in i sanden.



**Figur 21.** Bilden visar yta D och illustrerar att vegetationen är död överallt utom där slam brukats in. De kala trädgrenar som syns på ytan placerades ut för vindskydd och om inte pH hade varit så lågt skulle grenarna ha bidragit till större chans till överlevnad för spirande växter.





a



b

**Figur 22 a och b.** Bilderna är ytterligare exempel på att vegetationen överlevde där slam blandats in i anrikningssanden.

### pH-förändring över tiden

Efter tre år låg pH-värdet i den oxiderade sanden från försöksytan (djup 0-10 cm) på 3,3. I den reducerade sanden på sandmagasinet låg pH-värdet på 6,4 (djup 0-10 cm). Vid det tillfälle då sanden lades upp på plats för att ytan skulle etableras våren 1997, var pH-värdet närmare 7 i anrikningssanden. Huruvida pH varierade i markprofilen (figur 23) undersöktes inte på 1997-ytan, men på senare anlagda ytor studerades markreaktionen på olika djup.



**Figur 23.** Bild av markprofil i 1997-ytan, så som den såg ut i juni 1999. Från övre till nedre kanten är det cirka 30 cm. Det grå är ovittrat material det rostfärgade vittrat material med de låga pH-värdena. Orsaken till att oxidationen i det här fallet har uppträtt fläckvis är inte känd, men man kan dra slutsatsen att redoxpotentialen har varierat, sannolikt beroende på variationer i täthet och vattenhållande förmåga hos materialet.

## Partikelstorleksfördelning

**Tabell 13.** Partikelstorleksfördelning och glödförlust hos material som provtogs 1999 på ytan som anlades 1997 (Stjernman, 2000)

Provplats och prov- djup	Viktsprocent av fraktionen						Glöd förlust %
	Sand 2,0-0,2 mm	Grovmo 0,2-0,06 mm	Finmo 0,06-0,02 mm	Grovmjåla 0,02-0,006 mm	Finmjåla 0,006-0,002 mm	Ler <0,002 mm	
D6							
0-10 cm	36,7	50,4	5,4	0,8	0,07	6,5	2,0
10-20 cm	35,4	48,9	6,7	2,4	0,8	5,8	1,6
20-30 cm	39,4	48,1	4,7	1,4	1,5	4,3	1,3
D3							
0-10 cm	34,4	51,7	8,4	1,3	1,7	7,7	2,2
D1							
0-10 cm	49,5	35,7	3,4	2,8	0,2	7,2	2,2
A6							
0-10 cm	37,4	52,4	4,8	2,1	0,7	3,9	0,3
10-20 cm	32,0	57,4	5,5	2,4	1,25	7,7	0,1
20-30 cm	32,6	55,6	6,8	1,8	0,9	4,7	0,1
A3							
0-10 cm	41,0	46,5	6,4	1,9	0,75	6,1	1,4
C3							
0-10 cm	39,5	46,9	6,6	1,9	0,7	5,8	0

Grovmofraktionen dominerar i anrikningssanden och den föreligger i enkelkornstruktur. De porer som finns mellan grovmokornen har en sådan storlek att de töms så fort sanden dräneras. Sandens känslighet för markpackning som observerades i fält beror på att sammansättningen av partiklar i likartad storlek. Cementeringen i sanden på försöksytan, som orsakats av att järnet fällts ut i hydroxider vid närvaro av syre, reducerar den totala porvolymen i sanden. Även porstorleksfördelningen har påverkats, då järnaggregaten skapat ett finare porsystem (Stjernman, 2000).

### Vattnets bindning i anrikningssanden med och utan avloppsslam, skrym- och kompaktensitet, penetrationsmotstånd och infiltrationsegenskaper.

I tabell 14 presenteras data beträffande materialegenskaper, som har betydelse för växterna. Särskilt tillgängligt vatten är viktigt.



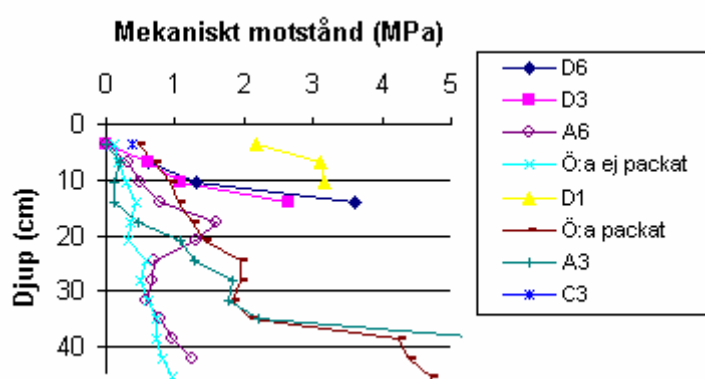
**Tabell 14.** Sammanställning av viktigare fysikaliska data av Aitik's anrikningssand, 1999. (Stjernman, 2000)

Provplats och skikt (cm)	Total porositet (%)	Vattenhalt i vol-% vid olika tension, (m vp)								Växttillgängligt vatten (%)	Torr skrym densitet (g/cm <sup>3</sup> )	Kompakt densitet (g/cm <sup>3</sup> )
		0,10	0,20	0,5	1,0	3,0	6,0	150				
D6 0-10	50	46,0	44,9	23,4	13,3	9,4	8,9	2,0	11,3	1,4	2,8	
10-20	---	41,7	41,0	23,4	11,4	6,9	6,0	1,6	9,8	1,5	---	
20-30	---	42,4	42,0	22,0	10,3	6,0	5,1	1,7	8,6	1,5	---	
D3 0-10	50	49,6	48,6	26,1	17,5	13,7	12,3	1,9	15,6	1,4	2,8	
D1 0-10 (cement.)	47	41,5	40,8	22,8	13,1	10,8	8,9	1,6	11,5	1,6	2,9 3,0	
A6 0-10	48	40,8	40,4	28,8	13,4	6,4	5,0	0,7	12,7	1,5	2,9	
10-20	---	41,6	41,4	28,5	14,0	6,7	5,0	0,9	13,1	1,5	---	
20-30	---	41,0	40,7	28,5	13,4	6,6	5,2	0,8	12,6	1,5	---	
A3 0-10	48	41,7	41,3	23,8	11,2	5,7	4,8	1,0	10,2	1,5	---	
C3 0-10	---	38,4	38,0	23,4	11,4	7,7	6,4	2,3	9,1	1,6	2,9	

cement. = cementerat

Växttillgängligt vatten definierat enligt Brady (1996) som det vatten som dräneras mellan de vattenavförande trycken 1,0 och 150 m vp

Figur 24 illustrerar hur mekaniskt motstånd, mätt med penetrometer, varierar med djupet i olika försöksled på 1997-ytan (A3, A6, D1, D3 och D6) och på östra sandmagasinet, dels under hjulspår "Ö:a packat", dels vid sidan om hjulspåren "Ö:a ej packat". Det mekaniska motståndet har betydelse för hur växrötterna kan utvecklas. Vattengenomsläppligheten (tabell 15) ger en uppfattning om hur strukturen i materialet varierar med behandlingarna.



**Figur 24.** Mekaniska motståndet i avfallssanden på olika provtagningspunkter i Aitik, 1999 (Stjernman, 2000).



**Tabell 15.** Sammanställning av resultaten från mätning av vattengenomsläppligheten i cylinderprover (ostörda prover) på laboratoriet, samt i fält ( $K_f$ ) vid olika platser i Aitik 1999. I cylindrarna mättes genomsläppligheten 1 h ( $K_1$ ) och 24 h ( $K_{24}$ ) efter mätningens början (Stjernman, 2000).

Provplats	$K_1$ (cm/h)	$K_{24}$ (cm/h)	$K_f$ (cm/h)
D6 0-10 cm	22,6	20,3	24,4
10-20 cm	20,9	22,8	---
20-30 cm	22,6	25,0	---
D3 0-10 cm	19,5	18,8	---
D1 0-10 cm	19,6	19,8	20,4
A6 0-10 cm	14,7	17,0	24,6
10-20 cm	17,7	21,3	
20-30 cm	12,2	13,3	
A3 0-10 cm	19,8	20,7	22,8
C3 0-10 cm	13,2	9,8	14,5
Ö:a 0-10 cm	13,6	11,4	18,1
0-10 cm (p)	6,8	3,4	9,2
10-20 cm	11,8		10,3
20-30 cm	12,8	11,0	
V:a 0-10 cm	2,0	2,0	

p=packad

### Slutsatser

Under optimala klimat- och pH-förhållanden fungerar anrikningssanden med närings-tillsats som växtsubstrat för både träd, buskar, ris, gräs, baljväxter och sädeslag, även före inblandning av organiskt material. Men tillsats av mineralnäring har kort verkan, vilket innebär att mineralnäringstilltsats skulle behövas mer än en gång per växt-säsong, vilket är helt orealistiskt och oekonomiskt på sikt. Vid brist på nederbörd torkar sanden fort ut, p.g.a. den dåliga vattenhållande förmågan. Med det pyritinnehåll som anrikningssanden hade på 1997-ytan, inträffade oxidation av svavlet och en påtaglig pH-sänkning från pH 7 till pH 3 kunde uppmätas efter tre säsonger. Denna försurning, som inte kunde buffras av slamtillsats, var det helt överskuggande hotet mot växternas överlevnad och även för den omgivande miljön. Tungmetaller och sulfater mobiliseras vid lågt pH och lakas ut i markvattnet och kan röra sig vidare med avrinnande vatten. -Försurningen kan teoretiskt motverkas med kalkning, men oxidationen av sulfiderna kan endast förhindras om sanden läggs under vatten.

(Se vidare sid. 18 i denna rapport)



## Resultat

### Vegetationens utveckling

Inventeringsresultat från juni månad året efter etableringsåret, dvs. i början av andra växtsäsongen finns redovisade i sammanfattningen. Här nedan följer en bildsvit (figur 26-41) som illustrerar utvecklingen hos vegetationen under etableringsåret och de följande åren.



**Figur 26.** Bild av område I av 1999-ytan efter plantering och sådd av växterna (se fältplan, fig. 25).



**Figur 27.** Bild av område II av 1999-ytan efter plantering och sådd av växterna (se fältplan, figur 25).



**Figur 28.** Detalj från område II av 1999-ytan. Bilden är tagen i början av juli år 2001, vilket innebär en bit in i tredje växtsäsongen. Gräs och mossa har etablerats spontant i en björkparcell. Marktäckningen är inte 100 %, utan sanden syns. Det kan anses naturligt i denna parcell, där bara björk planterats och ingenting har såtts in.



**Figur 29.** En granparcell i område II av 1999-ytan. Bilden är tagen i början av juli år 2001, en bit in i tredje växtsäsongen. Även här har gräs och mossa etablerats spontant. Liksom för björkparcellen gäller att marktäckningen inte är 100 %, utan sanden syns. Det kan även här anses naturligt i denna parcell, där bara gran planterats och ingenting har såtts in.





**Figur 30.** Gräsparcell i område II av 1999-ytan, fotograferad i början av juli 2001 under tredje växtsäsongen. Gräset är heltäckande och ogräs förekommer. Sannolikt kom ogräsfröna med avloppsslammet.



**Figur 31.** Översikt över område II av 1999-ytan. Början av juli 2001, tredje växtsäsongen.





**Figur 32.** Gräsparcell i område I av 1999-ytan, fotograferad i början av juli 2001 under tredje växtsäsongen. Gräset är totalt dött.



**Figur 33.** Björk- och granparceller i område I av 1999-ytan, fotograferad i början av juli 2001 under tredje växtsäsongen. Växterna är totalt döda.



**Figur 34.** En detaljbild från område II på 1999-ytan fotograferad 2002 under fjärde växtsäsongen. Marken är täckt till 100 % av mossa, som är spontanetablerad.





**Figur 35.** Bilder av björk och gran i 1999-ytan område II, fotograferade under år 2002, under fjärde växtsäsongen. Båda arterna har en normal utveckling.





**Figur 36.** Bild av gräsparcell i område II av 1999-ytan fotograferad 2002 under fjärde växtsäsongen. De döda stänglarna är ogräsplantor (gråbo?) från året innan.



**Figur 37.** En annan bild av gräsparcell i område II av 1999-ytan fotograferad 2002 under fjärde växtsäsongen. Bilden visar att gräsetableringen inte hade lyckats till 100 %.





**Figur 38.** 1999-ytan, område II (vid pilen) fotograferad från T-femman (täckt, gräsbevuxet gråbergssupplag) år 2002.





**Figur 39.** 1999-ytan fotograferad 18 juni år 2004



**Figur 40.** Markprofil vid 1997-ytan 18 juni 2004. Profilen är preparerad vid diket mellan område I och II vid västra kanten av område II.





**Figur 41.** Närbild av skiktet med inblandat Gällivareslam på 1999-ytan den 18 juni 2004 fem år efter etableringen. Lägga märke till att gräsrötterna inte utvecklas djupare än till den nivå dit slam blandats in. Detta är naturligt eftersom rötter utvecklas där det finns vatten och tillgång till näring.

### Slutsatser

Erfarenheterna från 1997-ytan bestyrks. Vegetationen överlever på sikt i de fall då avfallsslam har blandats in i anrikningssanden. Mineralgödsel – applicerad före sådd – hjälper växterna till en del under första växtsäsongen, men inte alla de följande säsongerna.

Gräs, gran och björk fungerar som vegetation.

## UNDERSÖKNINGAR PÅ 2000-YTAN OCH ANSLUTANDE STUDIER

En sammanfattning som rör undersökningar på denna yta finns på sidan 11 i denna rapport

### Material och metoder

#### Behandlingar och fältplan

För 2000-ytan (figur 42) gällde tillförsel av 30 volymprocent avloppsslam och inarbetning till tre olika djup, nämligen 10, 20 och 30 cm. Tillförseln motsvarade ungefär 30, 60 och 90 ton kol per hektar. Kontrollbehandlingen var utan tillsats av slam. I tillägg fanns två försöksled med tillsats av enbart mineralnäring, inarbetad till dels 20, dels 30 cm djup.

E: NPK-mikro, 20 cm djup	E	E	E
C: Slam, 30 volym%, 30 cm djup	B: slam, 30 volym% 20 cm djup	D: kontroll	D: kontroll
A: Slam, 30 volym% 10 cm djup	D: kontroll	C: Slam, 30 volym%, 30 cm djup	A: Slam, 30 volym% 10 cm djup
D: kontroll	B: slam, 30 volym% 20 cm djup	B: slam, 30 volym% 20 cm djup	C: Slam, 30 volym%, 30 cm djup
B: slam, 30 volym% 20 cm djup	A: Slam, 30 volym% 10 cm djup	C: Slam, 30 volym%, 30 cm djup	A: Slam, 30 volym% 10 cm djup
F: NPK-mikro, 30 cm djup	F	F	F

**Figur 42.** Fältplan för 2000-ytan. Behandlingarna framgår av figuren. E närmast sandmagasinet, F närmast skogen.

## Jordförbättring och växtetablering

I en serie bilder som följer, beskrivs hur anläggningen av växtetableringsförsöket gick till.



**Figur 43.** Kärrans volym var känd och slammet från Gällivares reningsverk lastades för hand tills kärran var full, överytan jämnades till så att varje lass hade samma, kända volym.



**Figur 44.** Slammet kärrades ut till rutorna i mängder som motsvarade fältplanen.



**Figur 45.** Som framgår av bilden innebar den högsta givan att ett förhållandevis tjockt lager slam lades på rutan. Enligt planen skulle infräsning ske till tre olika djup, 10; 20 och 30 cm. Den motormanuella fräsen (figur 46) hade rotorblad som sträckte sig 30 cm från axeln och utåt, så djupet nåddes vid upprepad körning fram och tillbaka, men det visade sig senare när markprofilen studerades, att det mesta slammet ändå låg grundare än det avsedda djupet. Vad vi med säkerhet kan säga är att vi applicerade de avsedda mängderna per ytenhet. När man i framtiden skall etablera vegetation på sandmagasinet i ”praktisk” skala, kommer givetvis traktorburna redskap att användas. Därvid kan ett önskat djup nås och inblandningen av slammet kan resultera i en jämnare blandning av slam och anrikningssand. Anledningen till att man vill få in slammet både djupt och välblandat, är att rötterna utvecklas där slammet finns, och ju större volym av jorden som rötterna når, desto bättre vattenförsörjning kan växten få. En stor jordvolym för vattenförsörjningen är givetvis särskilt viktig under torrperioder, då växten lever på vatten som lagrats i de finare porerna i marken (jämför undersökningen i 1997 ytan (Stjernman, 2000)).





**Figur 46.** Motormanuell fräsning. Med traktorburen fräs kan bearbetningen dels göras djupare, dels bli effektivare.



**Figur 47 a.** 2000-ytan med de olika tillsatserna utförda. Närmast kameran till vänster försöksleden i rad 1: F, B, D, A, C, E och till höger därom rad 2: F, A, B, D, B, E, 18 juni 2000.



**Figur 47 b.** Fortsättning, 2000-ytan med de olika tillsatserna utförda. Närmast kameran till vänster försöksleden i rad 3: F, C, B, C, D, E och till höger därom rad 4: F, A, C, A, D, E 18 juni 2000.





Korn



Gräsfrö. Rödsvingel och ängsgröe i blandning.



**Figur 48.** Kornet såddes för hand med 15 cm mellan raderna på cirka 7 cm djup. Jorden myllades tillbaka med hjälp av en kratta och gräsfröet bredsåddes över hela ytan. Sådden skedde dels 18 juni 2000, dels cirka en vecka senare.





**Figur 49.** Gräsfrön, rödsvingel och ängsgröe bredsåddes för hand



**Figur 50.** Gräsfröna myllades lätt med hjälp av kratta. 18 juni 2000.

## Provtagning och analyser

Prov av substratet (dels enbart sand, dels blandningen av sand och avloppsslam) på 2000-ytan togs i juni 2001, augusti 2001, september 2002 och september 2004. Därvid användes traditionell provtagningsborr under 2001 och 2002. Året 2004 genomfördes en särskild provtagning för att få volymsbestämda prover, som grund för mängdberäkningar. Denna speciella provtagning beskrivs närmare nedan. Provtagningsdjupen var 0-10 cm och 10-20 cm.

Vid provtagningen i september 2004 med specifika volymer, gällde för 2000-ytan fem cylindrar (cylinderns volym 400 ml) per ruta av det övre skiktet och fem cylindrar av det undre skiktet. Det innebär 10 cylindrar per ruta och med fyra upprepningar 40 cylindrar per behandling. De volymsbestämda proverna användes för att bestämma relationen mellan kolhalt och skrymdensitet (volymvikt) hos substratet. Alla proven torkades vid 35°C i ett torkskåp. Prover från åren 2001, 2002 och 2003 förvarades vid -18°C före prepareringen. Efter torkning homogeniserades proverna noga, urskiljbara delar av förna som legat på marken och rötter avlägsnades och representativt material överfördes till delprover före analys av kolhalten. Material som var genomvävt av rötter och material strax under detta skikt, provtogs särskilt vid slutet av femte säsongen för pH-analys.

För vart och ett av de volymspecifika proverna bestämdes vikten av torr jord. Därefter beräknades skrymdensiteten. Den uträknade skrymdensiteten plottades mot kolinnehållet. Den polynoma funktionen som blev resultatet av skrymdensiteten som en funktion av kolhalten ser ut på följande sätt:

$$y = 0,0002x^2 - 0,0236x + 1,4813$$

Denna funktion, där y motsvarar skrymdensitet och x är kolkoncentrationen hade ett R<sup>2</sup>-värde på 0,93.

Mängden kol i de två provtagna lagren i båda försöksytorna beräknades med utnyttjande av skrymdensitet och kolhalt hos substratet. Mängderna kol i de två lagren adderades, så att mängden per ytenhet kunde anges. Kvävemängderna beräknades på motsvarande sätt. Analyserna genomfördes med LECO<sup>®</sup>, CHN 932 analyser.

pH bestämdes i en lösning av fem ml jord uppskakad i 25 ml avjoniserat vatten. Skakningen genomfördes under fem minuter, varefter jorden tilläts sedimentera. Efter två timmar genomfördes pH-mätningen med glaselektrod. pH mätningförfarandet motsvarar svensk standard, ISO 10 390.

Halten av totalkväve analyserades också på varje prov.

## Resultat

### Växternas etablering på 2000-ytan

Särskilt under etableringsåret och de närmast följande åren, var tillväxten god, och bäst i de rutor, som fått en tillförsel av 30 volymprocent slam. Detta är av särskilt intresse för studien av hur kolhalterna förändrar sig med tiden, eftersom kolhalterna i marken påverkas inte bara av tillfört slam utan också av den förna som växterna bidrar med. Det fanns i alla försöksled med slam en tydlig trend med avtagande växtproduktion med åren som gick. Detta illustreras av figurerna längre fram i detta kapitel. I kontrollerledet utan tillsatser överlevde inte växterna mer än första säsongen och tillväxten var ytterst svag (figurerna 51 – 54).



**Figur 51.** Vy över 2000-ytan den 29 juni 2000. Det har gått 11 dagar från säderna och kornplantorna är på god väg. Snabb etablering är viktig för att sandflykt inte skall kunna ske.





**Figur 52.** Vy i öst-västlig riktning, behandling E (NPK inblandat till 20 cm) till vänster, den 11 juli 2000. Kornet har vuxit ovan mark i något mer än tio dagar. Till höger om pinnen ligger ett C-led (30 volymprocent slam till 30 cm) närmast kameran. Redan nu kan man börja ana att kornet i slamledet börjar utvecklas bättre än i mineralgödselledet.

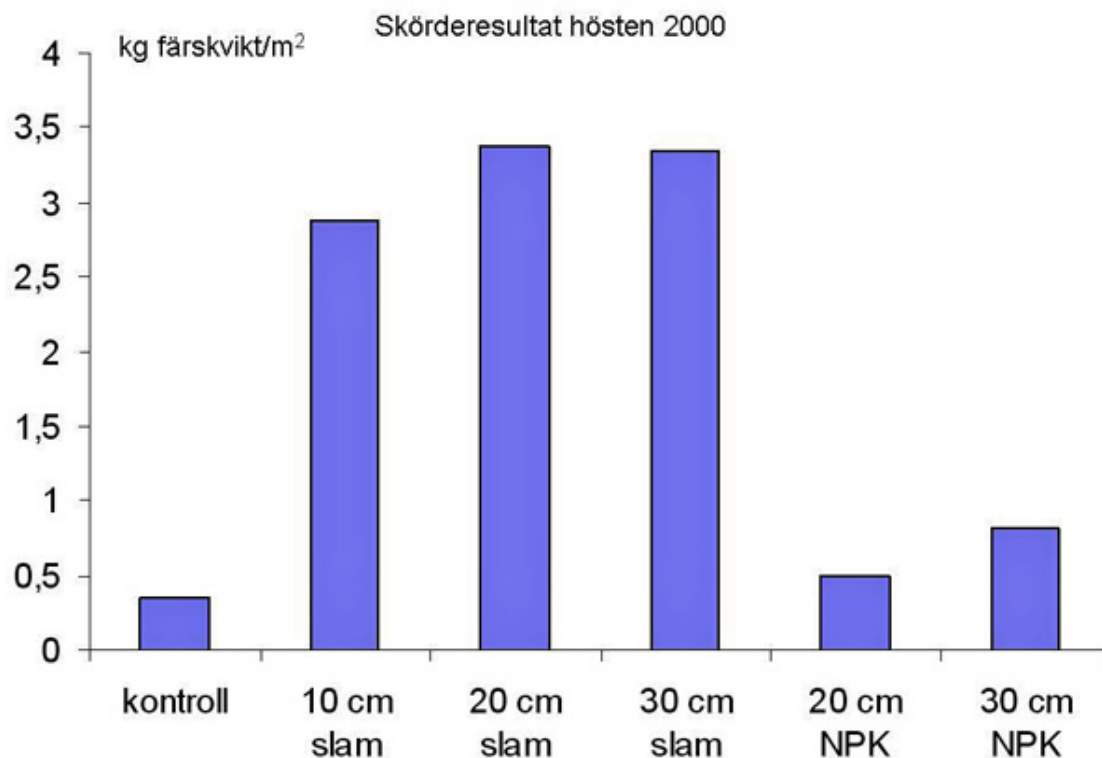




**Figur 53.** Skillnaderna mellan försöksleden framträdde redan under juli månad. Närmast till vänster slambehandlat led, närmast till höger kontroll utan tillsatser. Kornet har grott och lever i detta led bara på den näring som fanns i kornkärnan.



**Figur 54.** Till vänster med slaminblandning, till höger enbart mineralnäring.



**Figur 55.** Medelvärden av mängden färsk biomassa per m<sup>2</sup> av korn ovan markytan vid skörd hösten år 2000 (Preuss, 2001).

#### Kornets biomassaproduktion vid skörd hösten 2000

Som har framgått av bilderna var det stora skillnader mellan de olika behandlingarna när det gäller kornets tillväxt. Skördesiffrorna (färskvikt) presenteras i figur 55. De absoluta siffrorna är av mindre betydelse, men relationerna mellan behandlingarna är det intressanta. Kontroll-ledet utan tillsats gav i medeltal 0,35 kg/m<sup>2</sup> och slambehandlingarna nästan 10 gånger mer med i medeltal 3,2 kg/ m<sup>2</sup>. Leden med mineralgödsel gav en medelskörd på 0,87 kg/ m<sup>2</sup> (Sonja Preuss uppsats 2001, opublicerad).

#### Försöksytans utseende vid början av andra växtsäsongen försommar 2001

Figureerna 56 – 62 illustrerar hur kornhalmen påverkade gräsväxten i början på andra växtsäsongen. Vid storskalig etablering kommer man sannolikt inte att skörda på hösten under etableringsåret. I figurerna här ser vi att halmen kan ha en kvävande effekt på gräset. Detta problem måste få en lösning. I fältförsök som anlades senare år såddes kornet med längre radavstånd.





**Figur 56.** Bilden visar en parcell, vid början på andra vegetations-säsongen, med 30 volymprocent slam inblandat till 10 cm



**Figur 57.** Bilden visar en parcell, vid början på andra vegetations-säsongen, med 30 volymprocent slam inblandat till 20cm. Korn-halmen togs bort på denna parcell. Gräsets och klövers utveck-ling är god.



**Figur 58.** Bilden visar en parcell, vid början på andra vegetationssäsongen, med 30 volymprocent slam inblandat till 20 cm. Kornhalmen togs inte bort på denna parcell. Grässets utveckling är svag.



**Figur 59.** Bilden visar en parcell, vid början på andra vegetationssäsongen, med 30 volymprocent slam inblandat till 30 cm. Kvarliggande kornhalm har påverkat gräsåterväxten negativt.





**Figur 60.** Bilden visar en parcell, vid början på andra vegetations-säsongen, utan tillsatser. Gräset är totalt dött. Det är bara halmstubben som syns.



**Figur 61.** Bilden visar en parcell, vid början på andra vegetations-säsongen, mineralnäring inblandad till 20 cm. Gräset är till synes totalt dött.





**Figur 62.** Bilden visar en parcell, vid början på andra vegetations-säsongen, med mineralnäring inblandad till 30 cm. Gräset är till synes totalt dött.

#### Rotutbredning vid början av juli 2001, den andra vegetationssäsongen

För att förstå varför rot djupen inte motsvarar det avsedda fräsdjupet behöver man skaffa sig en uppfattning om hur mycket det bearbetade markskiktet sjunker ihop med tiden. Skiktet där slam är inblandat har sjunkit ihop avsevärt (kanske ända upp till 50 %) under det första året. De inblandningsdjup som verkligen avsågs att nå, nåddes antagligen inte i försöksled C (30 cm) och i viss mån kanske inte heller i B. Detta visar på svårigheten att nå ned till 30 cm med en motormanuell fräs som användes i detta fall. Vid storskalig växtetablering kommer givetvis traktorburna jordfräsar att användas.

Rotdjupet ökar med ökat inblandningsdjup av slam. (Ruta A-C). Medelvärdet för det maximala rot djupet var i A=17,5 cm (n=8), B=18,6 cm (n=7) och i C=20,4 cm (n=7). Detta kan jämföras med det synliga inblandningsdjupet av slam som varierade enligt följande: A=5,6 cm, B=10,1 cm och C=10,8 cm. Rötterna har alltså nått djupare än de befintliga inblandningsdjupen av slam. Rötter från både korn, gräs och klöver kan ses i profilen. Kornrötterna utgör dock en stor del av rotbeståndet och dessa har utslutande bildats under etableringssäsongen. I försöksleden utan tillsats (D) och de med NPK-mikro (E och F) var det maximala rot djupet 14,2 cm (n=6) resp. 23,3 cm (n=3) och 18,7 cm (n=3). Rotdjupet var alltså minst i rutorna utan tillsats av näring och i samma storleksordning i försöksleden med tillsats av NPK-mikro som med tillsats av slam.



**Figur 63.** Gräs till vänster, rödklöver till höger vid början av juli 2001, den andra växtsäsongen.

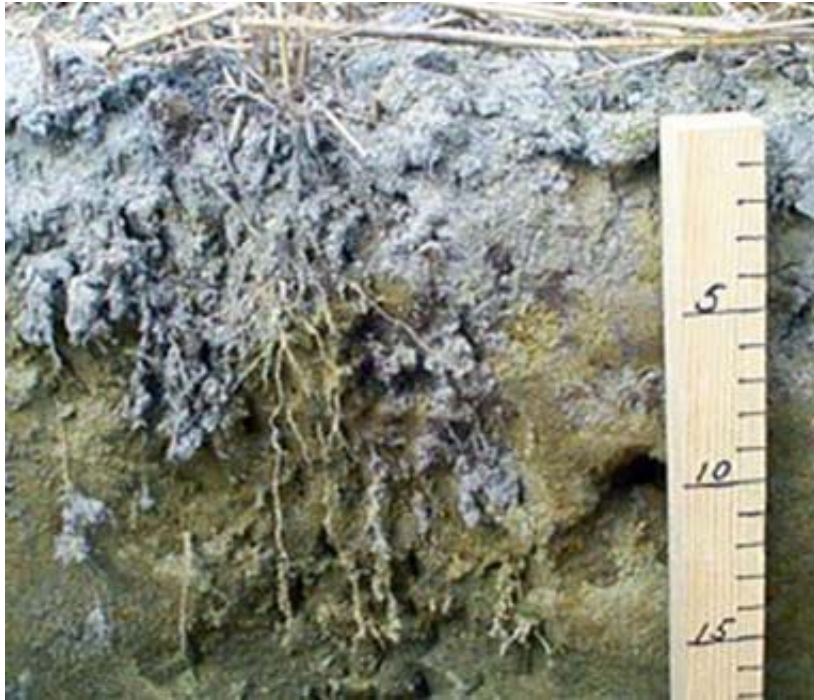




**Figur 64.** Död kornrot vid början av år 2001. Denna planta hade växt i slambehandlad anrikningssand med slammet nedbrukat 20 cm.



**Figur 65.** A, 30 volymprocent slam inblandat till 10 cm djup.



**Figur 66. B,** 30 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup.



**Figur 67. C,** 30 volymprocent slam inblandat till 30 cm djup.





**Figur 68.** C, 30 volymprocent slam inblandat till 30 cm djup. ·





**Figur 69.** D, utan inblandning, kontroll



**Figur 70.** E, Inblandning av NPK till 20 cm djup. En färgförändring kan observeras i det bearbetade skiktet, vilket indikerar att vittring av pyrit börjat (jämför avsnittet om pH-utvecklingen över tiden).



**Figur 71.** F, Inblandning av NPK till 30 cm djup. En färgförändring kan observeras i det bearbetade skiktet även här.

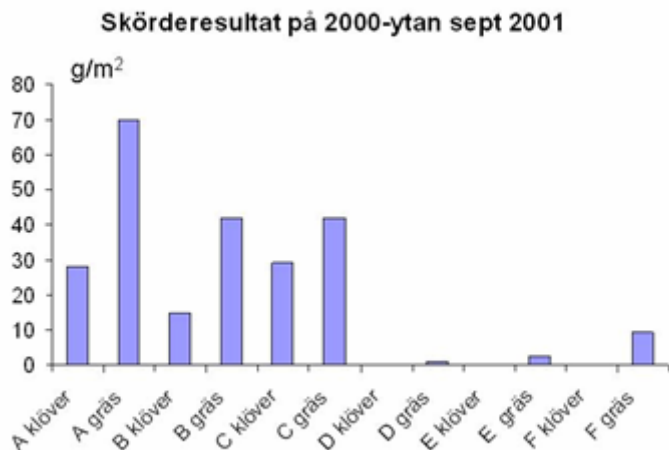
#### Allmän beskrivning av försöksytan vid början av andra växtsäsongen

Den framgångsrika etableringen gav under den första växtsäsongen upphov till stor biomassatillväxt (tabell 16 och figur 72). Framförallt hade det ettåriga kornet hävdats sig bra. Kornets goda tillväxt gav upphov till stora mängder halm. Halmen låg under vintern som ett täcke och med snön ovanpå halmen, blev den underliggande vegetationen, gräs och klöver delvis kvävd. De största halmmängderna fanns på rutorna A, B och C, och allra mest i B och C vilket också talar om att den bästa tillväxten av korn erhöles i dessa parceller (se skörderesultat). I parcellerna E och F var kornets strån i början på andra växtsäsongen ännu obrutna vilket berodde på sämre tillväxt i dessa parceller än i parceller med slamtillförsel. För att ge möjlighet för gräset och klöver att växa upp den andra växtsäsongen, krattades tidigt på försommaren halmen bort och lades på sidan i parcellerna A-C. Borttagning av halmen gav möjlighet till ljusinsläpp och upptorkning i det översta markskiktet. Den bästa tillväxten av grödan (gräs och klöver) år två fanns i parcell A. Detta förklaras av att mindre mängd halm täckt dessa ytor än i B och C och därmed givit bättre ljus- och fuktighetsförhållanden för växterna. I ruta D hade kornet växt i mycket begränsad omfattning, främst på upplagsnäringen i fröet och strållängden var bara omkring 7-8 cm. En mycket liten del av gräset, ingen klöver, hade överlevt i ruta D den första växtsäsongen. De få gräsindivider som överlevt hade satsat all energi på att hitta näring. Den tolkningen kunde man göra när man såg de långa mycket tunna rottrådarna. Bladen var tydligt stressade, små och missfärgade, gråröda, vilket kan bero på fosforbrist eller kombination av N och P-brist. Liknande tendens kunde ses i rutorna E och F (NPK-mikrobehandling). I dessa parceller hade dock gräset klarat sig bättre och med längre skott, men samma missfärgning.

**Tabell 16.** Resultat vid skörd av 2000-ytan i september 2001 (g/m<sup>2</sup>).

Behandling	Färskvikt (g/m <sup>2</sup> ).	Klöver (g/m <sup>2</sup> ). TS	Gräs (g/m <sup>2</sup> ). TS	Övrigt (g/m <sup>2</sup> ). TS
A 1:2	332,3	26,3	66,3	1,4
A 1:4	422,4	30,2	92,9	1,2
A 3:1	258,9	22,5	38	3,3
A 3:4	515,2	36,8	83,3	5,7
medelvärde	382,2	29,0	70,1	2,9
std.	111,0	6,1	24,0	2,0
B 1:1	464,7	40,3	76,1	2,5
B 2:2	129,5	7,5	15,8	11
B 2:3	148,5	6,5	3,1	24,5
B 4:2	297	6,7	72,6	10,1
medel	259,9	15,3	41,9	12,0
std.	155,7	16,7	37,9	9,1
C 1:3	724,1	43,7	58,8	60,4
C 2:4	622,4	25,7	17,7	74,7
C 3:3	564,5	22,9	69,8	32,8
C 4:1	439	25,3	20,4	46,6
medel	587,5	29,4	41,7	53,6
std.	118,9	9,6	26,5	18,0
D 2:1	3,1	0	0,5	0
D 3:2	3,9	0	1,0	0
D 4:3	1,4	0	0,6	0
D 4:4	1,7	0	0,7	0
medel	2,5		0,7	
std.	1,2		0,2	
E-främre	2,1	0	0,9	0
E-bortre	13,4	0	4,4	0
medel	7,7	0	2,7	
std.	7,9		2,5	
F-främre	17,4	0	7,8	0
F-bortre	17	0	9,3	0
medel	17,2		8,6	
std.	0,3		1,0	





**Figur 72.** Skörderesultaten ( $\text{g/m}^2$ ) för gräs och rödklöver vid slutet av andra växtsäsongen på 2000-ytan, september 2001.

### Vegetationens utveckling år efter år – en bildbeskrivning

Den vegetationsutveckling som kan ses i figurerna 73 – 77 tagna veckan före midsommar år 2002, alltså i början på tredje växtsäsongen klargör skillnaderna mellan mängderna slam och effekten på vegetationen. Den lägsta tillförslen av slam (30 volymprocent inbrukat till 10 cm) har lett till att gräset lever, men det ser magert ut i början på växtsäsongen. I försöksledet med den dubbla tillsatsen av slam växer gräset bra och är på väg upp genom fjolårets döda gräs. De rutor som fått tredubbel tillförsel med det största inbrukningsdjupet präglas av många ogräsplantor i tillägg till gräset, men man bör hålla i minnet att ogräsfröna har sitt ursprung i Gällivareslammet, och att den rikliga kornhalmen kvävde gräset vid slutet av första och början på andra växtsäsongen. Om man använder ett slam utan ogräsfrön och dessutom undviker halmtäckning kommer motsvarande behandling antagligen att ge den frodigaste vegetationen av de tre som testats i detta försök. I försöksledet med tillförsel av NPK-mikro kan man se fläckar av fjolårsgräs, men gräset är dött vid början av den tredje växtsäsongen. Med stor sannolikhet är kvävebristen avgörande, och i detta fall också det låga pH-värdet i anrikningssanden (jämför avsnittet om pH-utveckling med tiden, längre fram i rapporten). I B-ledet, och speciellt i de B-rutor där halmen togs bort efter kornskörden, fanns rikligt med gräs och rödklöver i slutet av tredje växtsäsongen. Vegetationen kan beskrivas som frodig. I C-ledet uppträdde mycket gårdsskräppa och gråbo i tillägg till gräs och klöver. Detta kan bero på att den djupare växtbädden är särskilt gynnsam för ogräsen men mera sannolikt är att fröna av gårdsskräppa och gråbo fanns med i slammet från Gällivare reningsverk och att ju mer slam, desto mer frön. Dessutom kunde ogräsen komma in på grund av att halm täckte ytan och hindrade gräs och klöver att konkurrera med skräppan och gråbon. Det låg, som beskrivits tidigare, särskilt mycket halm kvar på C-rutorna, där tillväxten av korn varit mest kraftfull. Halmen gjorde att klöver och gräs kvävdes och ogräsen hann etablera sig innan gräs och klöver hade blivit konkurrenskraftiga under andra säsongens första veckor.



**Figur 73. A,** 30 volymprocent slam inblandat till 10 cm. Veckan före midsommar år 2002. Grässets tillväxt är betydligt sämre än för de rutor som fått dubbel eller trippel tillförsel av slam (se följande bilder).



**Figur 74. B,** 30 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup. Veckan före midsommar år 2002.





**Figur 75.** C, 30 volymprocent slam inblandat till 30 cm djup. Veckan före midsommar år 2002.



**Figur 76.** F: NPK-mikro. Veckan före midsommar år 2002. Gräset är dött här i början på tredje växtsäsongen.





**Figur 77.** D, ingen tillsats av slam, kontrollbehandling. Veckan före midsommar år 2002. Här finns inget levande gräs.



**Figur 78.** Översikt över 2000-ytan 27 juni år 2002.





**Figur 79.** En av B-rutorna i 2000-ytan fotograferad i augusti 2002. 30 volymprocent slam inarbetat till 20 cm djup. Halmen hade avlägsnats vid början av andra växtsäsongen. Vid fotograferingstillfället finns rikligt med gräs och rödklöver i rutan. Vegetationen kan beskrivas som frodig. För varje år som följde, avtog frodigheten och rödklövern minskade i andel. tillväxten av korn varit mest kraftfull. Halmen gjorde att klöver och gräs kvävdes och ogräsen hann etablera sig innan gräs och klöver hade blivit konkurrenskraftiga under andra säsongens första veckor.





**Figur 80.** En av C-rutorna i 2000-ytan fotograferad i augusti 2002, 30 volymprocent slam inarbetat till 30 cm djup. Det är samma frodighet som i B-rutan, men utöver gräs och rödklöver finns ett tydligt inslag av ogräset gårdsskräppa och även gråbo.



**Figur 81.** 2000-ytan i augusti 2002, led B. Jämför med bild 79. Del av ruta som hade haft mycket kvävande halm i slutet av första växtsäsongen. Återhämtningen var inte total.





**Figur 82.** 2000-ytan, rad 1 vid mitten av augusti 2003. Närmast F följt av B, D, A, C och E. Det är behandlingarna B (30 volymprocent slam inblandat till 20 cm och C (inblandat till 30 cm) som har grön, levande vegetation. Lägg märke till att halva B-rutan (delen närmast kameran) inte har grön vegetation.



**Figur 83.** 2000-ytan, rad 2 vid mitten av augusti 2003. Närmast F följt av A, B, D, B. Att A-rutan har lite grön vegetation beror sannolikt på översläpning från den närliggande C-rutan (till höger). I övrigt är det bara B-rutorna som har grön vegetation.



**Figur 84.** 2000-ytan, rad 3 vid mitten av augusti 2003. Närmast F, därefter C, B, C, D. C-rutorna har den rikligaste vegetationen.



**Figur 85.** 2000-ytan, rad 4 vid mitten av augusti 2003. Närmast kameran vegetation på liten slamhög. Därefter F, A C, A, D. Lägg särskilt märke till att det finns lite vegetation kvar på A-rutan, men som i de övriga raderna har C-rutan den frodigaste växtligheten.





**Figur 86.** En av C-rutorna (30 volymprocent slam inarbetat till 30 cm djup) fotograferad i september 2004. Om man jämför med bilden från 2002 i augusti, är det uppenbart att vegetationen är betydligt mindre frodig. Detta gällde samtliga rutor. Lägg särskilt märke till att rödklövern fortfarande finns med tillsammans med gräset.



**Figur 87.** 2000-ytan, rad 1, 28 augusti, 2005. Närmast F följt av B, D, A och C. Samma mönster som tidigare finns kvar med vegetation på B- och C-rutorna, men med svagare växtlighet. På den icke gräsbevuxna delen av den närmaste B-rutan, har en björk spontant etablerat sig denna sjätte växtsäsong.





**Figur 88.** 2000-ytan, rad 2, 28 augusti, 2005. Närmast F följt av A, B, D och B. Fortfarande finns lite levande gräs på A-rutan liksom på B-Rutorna.



**Figur 89.** 2000-ytan rad 3, den 28 augusti, 2005. Närmast F följt av C, B, C, D. Gräset växer bäst på C-rutorna.



**Figur 90.** 2000-ytan, rad 4 den 28 augusti, 2005. F följt av A, C, A, D. Alla slambehandlade rutor har fortfarande levande vegetation vid slutet av den sjätte växtsäsongen.



**Figur 91.** 2000-ytan, översiktsbild den 28 augusti, 2005.





**Figur 92.** Närbild, 2000-ytan, rad 3, C-ruta till vänster B-ruta till höger, 28 augusti 2005.



**Figur 93.** Spontan etablering efter 6 år på ett litet område där avloppsslam lades utanför försöksrutorna, på anrikningssand, när arbetet med inblandning av slam genomfördes år 2000. Fotot taget 28 augusti 2005.

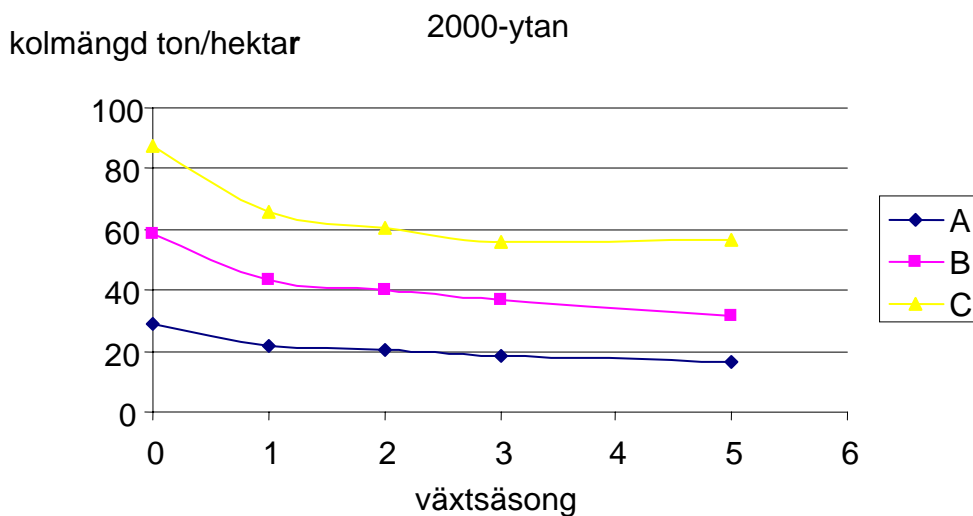


## Nedbrytning av organiskt material på 2000-ytan

I figur 95 visas hur mycket kol som finns kvar efter fem växtsäsonger. Den tillförda mängden är en kontrollerad mängd och mätningen efter fem säsonger är baserad på volymsbestämda prover. Värdena efter första, andra och tredje säsongerna är beräknade utifrån den procentuella omsättningen av det organiska materialet som vi fann i 2002-ytan. Det visade sig nämligen att när beräknad skrymdensitet och uppmätt kolhalt nyttjades, erhöles orimligt låga värden. Vi fann det osannolikt att det organiska materialet bröts ned snabbt under första växtsäsongen och därefter ökade i massa. Vi gjorde då tolkningen att fel förelåg i provtagningen och/eller i den funktion som beskriver skrymdensiteten som en funktion av kolhalten. Det som kunde ses okulärt var att slammet hängde samman i större enheter till att börja med, och med tiden fick det blandade skiktet ett mera homogent utseende. Det vi med rimlig säkerhet kan säga är att förhållandevis mycket av det organiska materialet finns kvar efter fem växtsäsonger. För led A är 57 % av kolet kvar, för B 54 % och för C 64 %. I det analyserade kolet finns också det kol som har sitt ursprung i rötter. Vi ser då en indikation på att rotförnatillförseln har varit störst i led C. Men eftersom trenden inte är genomgående (A med lägst biomassaproduktion borde ha legat lägst) kan man inte med säkerhet påstå att C avviker från de andra på grund av hög biomassaproduktion och därmed störst mängd rotförna. Man kan också tänka sig att omsättningen av tillfört slam har varit långsammare i A, eftersom där funnits mindre mängd buffrande slam och pH-värdet därför sjunkit snabbare (se nästa avsnitt).



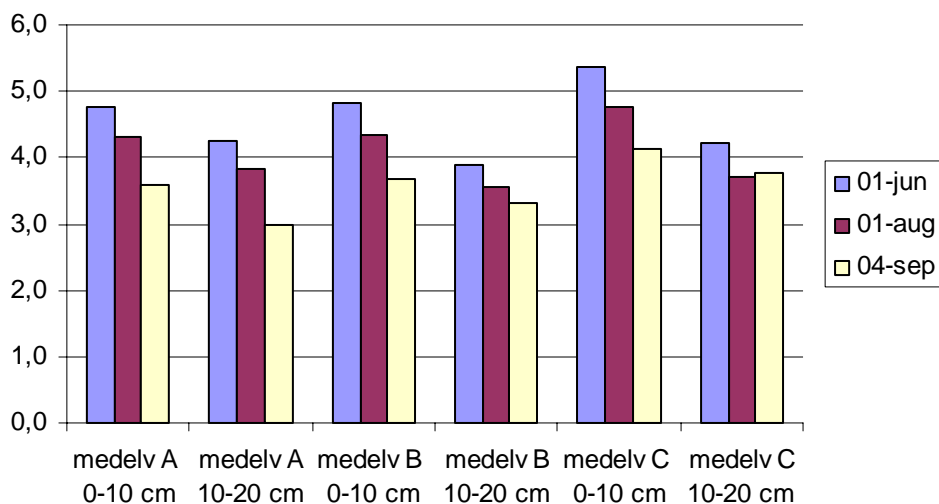
**Figur 94.** Profilbild som visar utseendet i en yta som fått behandlingen 30 volymprocent avloppsslam inarbetat till 30 cm djup fem växtsäsonger tidigare. 2000-ytan fotograferad i september 2004. Skiktet är vid fotograferingstidpunkten knappt 20 cm tjockt. Det organiska materialet har dels konsoliderats, dels har nedbrytning skett varvid kolet har avgått, vilket illustreras i figur 95.



**Figur 95.** Återstående mängder av kol i substratet från fältförsöket anlagt 2000 vid Aitik, Gällivare. A = 30 volymprocent avloppsslam inblandat till 10 cm djup i avfalls-sand, B = 30 volymprocent slam inblandat till 20 cm och C = 30 volymprocent slam inblandat till 30 cm djup. Tillförd mängd är uppmätt vid anläggningstillfället och mängderna efter fem säsonger är beräknade på analys av volymsbestämda prover. Värdena efter en, två och tre säsonger är beräknade (se texten).

#### Förändringar av pH i substratet på 2000-ytan

I figur 96 visas pH-värdets förändring med tiden i substraten i de olika försöksleden på 2000-ytan. Utgångsläget visas inte p.g.a. att data saknas, men ett rimligt antagande baserat på andra mätningar (2002-ytan med liknande förhållanden) är att pH-värdet i samtliga led låg mellan 6 och 7. Den första mätningen är gjord på substrat från första juni ett år efter etableringen av försöket. pH-värdena ligger då strax under 5 för A- och B-ledens övre skikt och strax över 5 för C-ledets övre skikt. Att pH-värdena genomgående är lägre i de undre skikten, tolkar vi som att inblandningen resulterade i mer slam i toppskiktet, och att mer slam buffrar bättre. Med tiden sjunker pH-värdena så att pH 3 nås efter fem säsonger i A-ledets nedre skikt. Skiktet där mesta buffringen sker, övre skiktet i C-ledet har ett pH-värde strax över 4. Variationerna i mätvärden, som inte illustreras i figuren, är mycket små.



**Figur 96.** pH-värden juni 2001, augusti 2001 samt september 2004 i substratet från fältförsöket anlagt 2000 vid Aitik, Gällivare. A = 30 volymprocent avloppsslam inblandat till 10 cm djup i avfallssand, B = 30 volymprocent slam inblandat till 20 cm och C = 30 volymprocent slam inblandat till 30 cm djup.

#### Vittring av pyrit och rostutfällningar i sanden

Pyriten i anrikningssanden har även denna gång (jfr 1997-ytan) vittrat och svavlet har oxiderats, vilket avlästes i pH-förändringarna. En del av järnet har fällts ut i hydroxidform på sandpartiklarna, som då blivit rostfärgade. Intentionen var att nyttja anrikningssand med låga pyrithalter, men de faktiska halterna i materialet var inte kända, när sanden transporterades från sandmagasinet och lades ut ovanpå moränen. Gemensamt för samtliga parceller är att rostutfällning börjar en bit ned i marken. Utfällningarna syntes i de flesta fall endast i skiktet under det skikt som innehöll slam. Variationen både inom försöksleden och inom profilen var stor. Uppenbarligen finns här ett område för fortsatt forskning.



## UNDERSÖKNINGAR PÅ 2002-YTAN OCH ANSLUTANDE STUDIER

En sammanfattning som gäller denna yta finns på sidan 12 i denna rapport.

### Material och metoder

Denna yta lades ut med en slumpad blockdesign (figur 97) som innehöll åtta behandlingar med fyra upprepningar. De åtta behandlingarna med anrikningssanden som bas var följande:

A: Kontroll, inga tillsatser, korn och gräs

B: Kontroll, inga tillsatser, gräs

C: Slam, 20 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, korn och gräs

D: Slam, 20 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, gräs

E: Mineralgödsel, 0,02 kg N/m<sup>2</sup>; 0,08 kg P/m<sup>2</sup>; 0,15 kg K/m<sup>2</sup>, korn och gräs

F: Mineralgödsel, 0,02 kg N/m<sup>2</sup>; 0,08 kg P/m<sup>2</sup>; 0,15 kg K/m<sup>2</sup>, gräs

G: Slam, 10 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, mineralgödsel, 0,01 kg N/m<sup>2</sup>; 0,04 kg P/m<sup>2</sup>; 0,08 kg K/m<sup>2</sup>, korn och gräs

H: Slam, 10 volymprocent, inblandat till 20 cm djup, mineralgödsel, 0,01 kg N/m<sup>2</sup>; 0,04 kg P/m<sup>2</sup>; 0,08 kg K/m<sup>2</sup>, gräs

Slammet (figur 98) och dess egenskaper finns beskrivna i inledningskapitlet.

Block 1		Block 2		Block 3		Block 4	
D: Slam, 20 vol.%, Gräs	A: Kontroll, Korn och Gräs	G: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Korn, Gräs	D: Slam 20 vol.%, Gräs	F: Mineralgödsel Gräs			
B: Kontroll, Gräs	F: Mineralgödsel Gräs	E: Mineralgödsel Korn, Gräs	C: Slam 20 vol.% Korn, Gräs	E: Mineralgödsel Korn, Gräs	G: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Korn, Gräs	C: Slam 20 vol.% Korn, Gräs	
E: Mineralgödsel Korn, Gräs	G: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Korn, Gräs	B: Kontroll Gräs	F: Mineralgödsel Gräs	B: Kontroll, Gräs	H: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Gräs	A: Kontroll, Korn och Gräs	
C: Slam 20 vol.% Korn, Gräs	H: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Gräs	H: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Gräs	A: Kontroll, Korn och Gräs	D: Slam, 20 vol.% Gräs	B: Kontroll, Gräs	F: Mineralgödsel Gräs	
	A: Kontroll, Korn och Gräs	C: Slam 20 vol.% Korn, Gräs	G: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Korn, Gräs	H: Slam 10 vol.% Mineralgödsel Gräs	E: Mineralgödsel Korn, Gräs	D: Slam, 20 vol.%, Gräs	

2002-ytan vid Aitik. Kornet såddes 17-18:e juni år 2002. En del av gräset (Festuca rubra), såddes i storm (Block 1 och Block 2), varpå ytorna bevattnades med 5 mm. Den 19:e juni såddes resten av gräset. Tillräckligt med regn föll därefter (30 mm enligt väderleksrapporten).

Alla rutor frästes med motormanuell fräs till samma djup (20 cm)

**Figur 97.** Fältplan för 2002-ytan. Den speciella designen är en följd av anpassning till hela ytans utseende.

Varje ruta med en viss behandling hade storleken 5x6 m<sup>2</sup>. Framförallt två av de åtta behandlingarna valdes för kolomsättningsstudien, nämligen led C: 20 volymprocent rötat slam inblandad i sanden till 20 cm djup och led G: 10 volymprocent rötat slam +

NPK inblandat i sanden till 20 cm djup. För behandlingen med 20 volymprocent slam var tillförseln cirka 40 liter slam per m<sup>2</sup> (6,5 kg TS och motsvarande närmare 16 ton kol/ha) och följaktligen 20 liter slam per m<sup>2</sup> i behandlingen med 10 volymprocent.



**Figur 98.** Högen med röttslam från Stockholm, upplagd intill 2002-ytan, juni 2002.

Nedbrukningen av slam och mineralgödsel gjordes med en motormanuell fräs. Det framgick senare att det avsedda inblandningsdjupet inte nåddes genomgående. Det innebär alltså att bearbetningsdjupet är grundare än vad som anges i planen, men mängderna slam och gödsel per ytenhet gäller. När det gällde mängden mineralgödsel var intentionen att tillföra så mycket att växterna under första växtsäsongen skulle ha lika mycket tillgänglig näring oberoende av försöksled, (med undantag av kontrollrutorna), och därmed skulle man kunna urskilja de effekter som slammet hade utöver gödslingseffekten. Vid beräkningarna av mängder näring i form av PK-gödsel, mineralgödsel, gjordes antagandet att 30 % av fosfor i slammet skulle frigöras under första växtsäsongen (Granhall och Slapokas, 1984). Denna beräkningsgrund ledde till följande tillsatser i form av mineralnäring: 0,08 kg P/m<sup>2</sup> och med använt gödselmedel 0,15 kg K/ m<sup>2</sup>. Tillförseln av kväve i form av mineralgödsel var 0,02 kg/ m<sup>2</sup>. Alla tillsatser brukades ner med en motormanuell fräs. Sådden genomfördes den 17-18 juni 2002. Figurerna 98-101 visar dels ytans läge i terrängen, dels utseendet vid anläggningstillfället.



**Figur 99.** 2002-ytan upplagd ovanpå gamla ytan från 1997. Sandskiktets tjocklek är minst 1 m ovanpå det gamla, metertjocka sandskiktet. Morän i botten.



**Figur 100.** 2002-ytans utseende den 10 juni år 2002. Närmast till vänster om personen i bilden är en fräst kontrollruta utan tillsatser och närmast till höger en ruta med 20 volymprocent slam infräst till 20 cm djup.





**Figur 101.** Ytan har besåttts med korn och gräs 17-18 juni 2002 enligt plan. Jordprov tas med speciell borrh och myllning av fröna sker genom krattning.

### Provtagning och analys

Prov av substratet (dels enbart sand, dels blandningen av sand och avloppsslam) på 2002-ytan togs juni 2002, september 2002, september 2003 samt september 2004. Vid provtagningen 2004 genomfördes en särskild procedur för att få volymsbestämda prover, som grund för mängdberäkningar. Denna speciella provtagning beskrivs närmare nedan. Provtagningsdjupen var 0-10 cm och 10-20 cm.

Vid provtagningen i september 2004 med specifika volymer togs, på varje ruta, åtta cylindrar med 400 ml och åtta cylindrar med 200 ml, vilket innebar 64 cylindrar per behandling. De volymsbestämda proverna användes för att bestämma relationen mellan kolhalt och skrymdensitet (volymvikt) hos substratet. Alla proven torkades vid 35°C i ett torkskåp. Prover från åren 2002 och 2003 förvarades vid -18°C före prepareringen. Efter torkning homogeniserades proverna noga, urskiljbara delar av förna som legat på marken och rötter avlägsnades och representativt material överfördes till delprover före analys av kolhalten.

För vart och ett av de volymspecifika proverna bestämdes vikten av torr jord. Därefter beräknades skrymdensiteten. Den uträknade skrymdensiteten plottades mot kolinnehållet. Den polynoma funktionen som blev resultatet av skrymdensiteten som en funktion av kolhalten ser ut på följande sätt:

$y = 0,0002x^2 - 0,0236x + 1,4813$ . Denna funktion, där y motsvarar skrymdensiteten och x är kolkoncentrationen hade ett  $R^2$ -värde på 0,93.

Mängden kol i de två provtagna lagren beräknades med utnyttjande av skrymdensitet och kolhalt hos substratet. Mängderna kol i de två lagren adderades, så att mängden per ytenhet kunde anges. Kvävmängderna beräknades på motsvarande sätt. Analyserna genomfördes med LECO<sup>®</sup>, CHN 932 analyser.

pH bestämdes i en lösning av fem ml jord uppskakad i 25 ml avjoniserat vatten. Skakningen genomfördes under fem minuter, varefter jorden tilläts sedimentera. Efter två timmar genomfördes pH-mätningen med glaselektrod. pH mätningförfarandet motsvarar svensk standard, ISO 10 390.

Halten av totalkväve analyserades också på varje prov. Dessutom analyserades mineralkväve (ammonium och nitrat). Bestämningarna av mineralkväve gjordes på icke volymsbestämda prover tagna på 2002-ytan vid anläggningstillfället och på volymsbestämda prover från september 2004. Behandlingsleden D (endast gräs som vegetation och med 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup) och H (enbart gräs och 10 volymprocent slam + mineralgödsel inblandat till 20 cm djup) provtogs endast år ett, dvs. i september år 2002.

## Resultat

### Växtetableringen första året i en bildsvit

Utvecklingen av vegetationen var snabb, vilket illustreras av följande bilder. Först visas en serie närbilder (figur 102 – 106) av ett av försöksleden med slambehandling och därefter vyer över försöksytan vid olika tidpunkter under första växtsäsongen.



**Figur 102.** Utseendet hos ruta C i Block 1 den 4 juli år 2002, 16 dagar efter sådd. Slambehandlat led med 20 volymprocent slam inarbetat till 20 cm djup. Klumpar av slam är synliga på markytan. Något gräs syns ännu inte mellan kornplantorna, men i det här läget är ytan redan skyddad mot vinderosion, dels på grund av slammet, dels på grund av kornplantorna, som binder sanden.





**Figur 103.** Utseendet den 11 juli år 2002, 23 dagar efter sådd. Här kan man se att även gräset har grott och börjat växa.



**Figur 104.** Utseendet den 17 juli år 2002, 29 dagar efter sådd. Man kan se gräset mellan kornraderna, som står med 30 cm mellanrum.



**Figur 105.** Den 2 augusti år 2002, 45 dagar efter sådd. Kornet har gått i ax. Gräset finns där, men skuggas i stor utsträckning.



**Figur 106.** Den 22 augusti år 2002, 65 dagar efter sådd. Kornet har börjat mogna.



Här följer nu en liknande genomgång av vegetationsutvecklingen under första växtsäsongen, men nu med översiktsbilder (figur 107 – 120), så att man kan se alla försöksled.



**Figur 107.** Vy över en del av 2002-ytan den 4 juli år 2002, 16 dagar efter sådd. Man kan se att kornet har grott och börjat växa i alla behandlingar med kornsådd, men redan nu framträder en skillnad så att det är uppenbart att tillväxten är bättre i rutor som fått näring i form av slam, i form av mineralgödsel eller i form av en kombination av mineralgödsel och slam. Exempelvis finns i nedre delen, längst till vänster, en kontrollruta utan slam, utan mineralnäring, besådd med korn och gräs. Intill denna ruta ligger (till höger) en ruta med 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup, besådd med korn och gräs. Kornraderna kan urskiljas i kontrollytan men framträder tydligare i den slambehandlade rutan. Allra längst till vänster, vid uppfartsvägen, ligger en ruta med 20 volymprocent slam och intill den i riktning mot sandmagasinet ligger en ruta som fått enbart mineralnäring och besåts med korn och gräs. Vid detta utvecklingsstadium kan man inte se skillnad på slambehandlad och mineralgödselbehandlad ruta. Som framgick av de tidigare närbilderna (figur 102) syntes ännu inte gräset 16 dagar efter sådd.





**Figur 108.** Vy den 4 juli år 2002. I nedre delen, längst till vänster en C-ruta med 20 volymprocent slam, och till höger om denna ruta en G-ruta med 10 volymprocent slam och mineralgödsel. Bortom G-rutan ligger en A-ruta, kontroll utan tillsatser, besådd med korn och gräs. Kornet har grott och börjat växa även i kontrollrutan.



**Figur 109.** Vy den 4 juli år 2002. I nedre delen, längst till höger, en D-ruta med 20 volymprocent slam besådd med gräs. Till vänster om denna D-ruta en E-ruta med enbart mineralgödsel, besådd med korn och gräs. Till vänster om denna E-ruta ligger en H-ruta med 10 volymprocent slam och mineralgödsel besådd med gräs.



**Figur 110.** Vy över ytan den 11 juli år 2002, 23 dagar efter sådd. Vid den här tidpunkten kan man se att kornet i slambehandlade led har en mera djupgrön färg än i de rutor som behandlats enbart med mineralnäring.



**Figur 111.** Vy över ytan den 11 juli år 2002, 23 dagar efter sådd. Gräset har börjat växa, som framgick av närbilderna, men det ser man inte så tydligt ännu i översiktsbilderna.





**Figur 112.** Vy över ytan den 11 juli år 2002, 23 dagar efter sådd. Denna bild ger en översikt av hela Block 4 med åtta rutor och alla behandlingar representerade. Räknat från höger till vänster och med början närmast kameran: E, D,B, F, H, A, G och C längst upp till höger i borte hörnet. En detaljobservation är att det finns en grön remsa mellan H och A. Det beror på att slam har släpats över från H till A-rutan vid fräsningen, och slammets har givit fart åt den första raden korn i A-rutan.



**Figur 113.** Vy över ytan den 17 juli år 2002, 29 dagar efter sådd. Skillnaderna mellan slambehandlade rutor och icke slambehandlade rutor framträder allt tydligare. Gräset har blivit synligt även i översikt-bilderna. Närmast kameran en del av Block 3, från vänster räknat A, C, G. Uppe till vänster de åtta rutorna i Block 1 och intill de åtta rutorna i Block 2. Kornet på kontrollytorna har börjat gulna, det är slut på den näring som fröna bar med sig.





**Figur 114.** Vy över ytan den 17 juli 2002, 29 dagar efter sådd. Närmast kameran från vänster: C, G, H tillhörande Block 3 och från H ut mot magasinet följer D, B, E, F också tillhörande Block 3 (med sin speciella design som ett bakvänt stort L). Rakt fram bortom C och G ligger hela Block 2 med sina åtta rutor. I rutor som fått enbart mineralgödsel växer kornet sämre än i rutor som fått slam.



**Figur 115.** Vy över ytan den 17 juli år 2002, 29 dagar efter sådd. De åtta rutorna i Block 4 syns. I alla fyra blocken på ytan skiljer sig varje försöksled åt på ett likartat sätt. Behandlings-effekterna är tydliga och konsistenta.



**Figur 116.** Vy över del av ytan den 19 juli år 2002, 31 dagar efter sådd. Allteftersom tiden går blir skillnaderna mellan behandlingarna tydligare. Personen står vid högra kanten av ruta G i Block 3. I kontrollytorna ser kornet dött ut. I rutor som fått enbart mineralgödsel är kornet gulgrönt. Det syns en skillnad, kanske i den gröna färgen, mellan rutor som fått 20 volymprocent slam och de med 10 volymprocent slam plus mineralnäring, men man kan inte med ögats hjälp säga om biomassaproduktionen är olika.



**Figur 117.** Vy över ytan den 19 juli år 2002, 31 dagar efter sådd. Bilden fångar alla rutor. Det som är slående är att gräset syns mycket svagt vid denna tidpunkt, även i rutor som fått slam. Senare på säsongen skall det visa sig att gräset kommer innan vegetationsperioden är över.





**Figur 118.** Vy över del av ytan den 2 augusti år 2002, 45 dagar efter sådd. Vid denna tidpunkt är det tydligt att gräset är väletablerat.



**Figur 119.** Bild av del av ytan den 17 augusti, 60 dagar efter sådd. Närmast till vänster H i Block 1 och den närliggande gräsrutan är H i Block 2. Att kornet till höger i kontrollrutan A, ser så pass bra ut, beror på översläpning av slam just i kanten av ytan. Det som är slående i denna bild är att gräset har växt till sig kraftfullt under augusti.





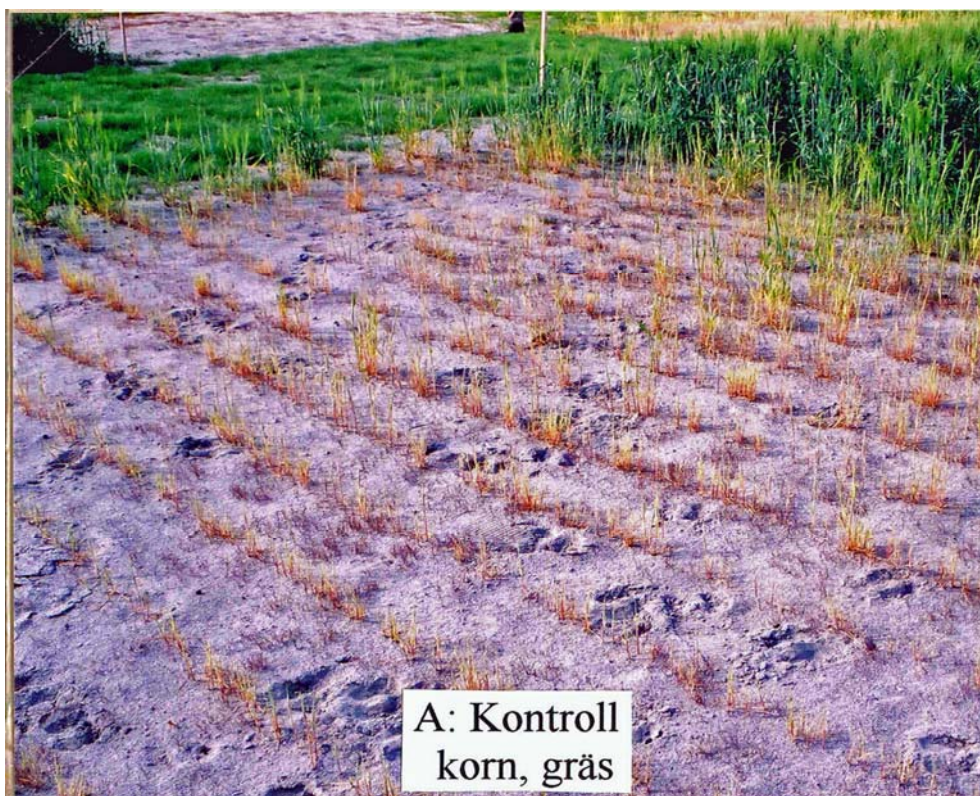
**Figur 120.** Vy över i stort sett hela ytan den 22 augusti 2002, 65 dagar efter sådd. Rutor med tillfört slam och slam plus mineralgödsel besådda med enbart gräs lyser gröna, medan rutor som fått enbart mineralgödsel är luckigare och har sämre vegetationsutveckling.

Översikt över vegetationens tillstånd i 2002-ytan den 5 augusti 2002, 48 dagar efter sådd.

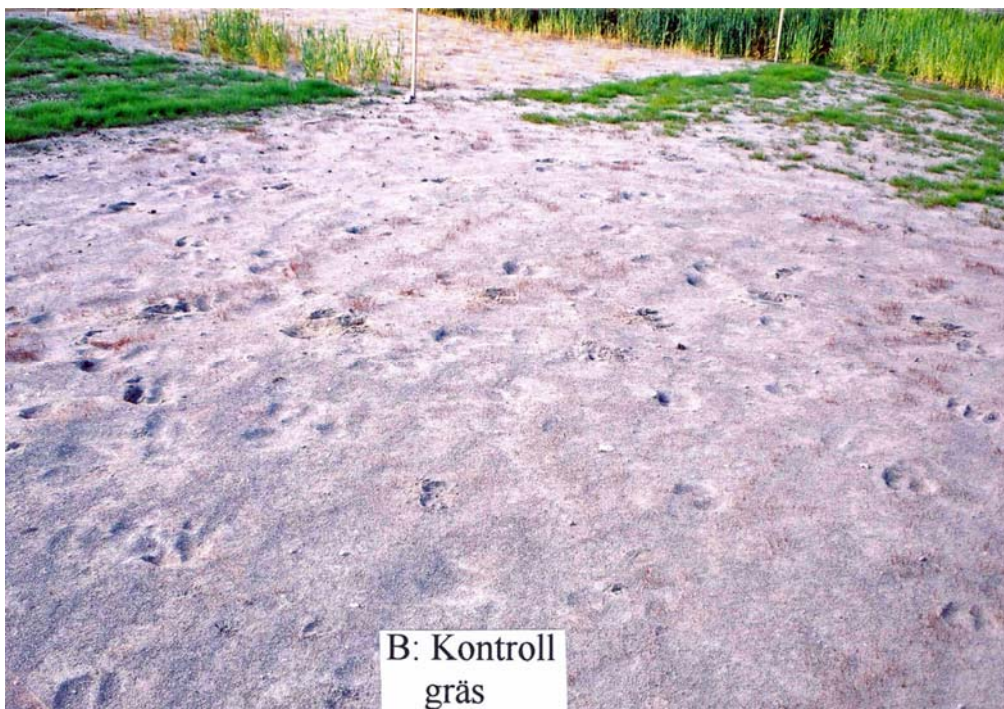
Tabell 17 sammanfattar tillståndet hos vegetationen den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. (Det visades i föregående avsnitt att gräset utvecklas betydligt under den återstående delen av växtsäsongen). Sist i avsnittet (figur 121 – 128) visas karakteristiska utseenden hos de åtta försöksleden på bild, med förklarande text. Kontroll motsvarar anrikningssand utan tillsatser, i övriga försöksled är det anrikningssand med inblandning av de angivna medlen.

**Tabell 17.** Sammanfattning av tillståndet hos vegetationen i 2002-ytan den 5 augusti, 48 dagar efter sådd

Behandling	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Sammanfattande beskrivning
A. Kontroll, korn + gräs	Kornet är dött, gräset syns inte	Som i Block 1	Som i Block 1 och 2	Som i de övriga Blocken	Kornet och gräset är dött
B. Kontroll, gräs	Ett fåtal tussar med dött gräs	Som i Block 1	Som i Block 1 och 2	Som i de övriga Blocken	Ett fåtal tussar med dött gräs
C. Slam, 20 volym% korn +gräs	Tätbevuxen, kornet i gulgröna ax, bladen friskt djupgröna	Som i Block 1	Som i block 1 och 2	Som i de övriga blocken	Tätbevuxen, kornet i gulgröna ax, bladen friskt djupgröna
D. Slam 20 volym% gräs	Luckig genom ojämn sådd, gräset friskt, djupgrönt	Tätare än i Block 1, gräset friskt, djupgrönt	Delvis ojämnt sått, gräset friskt, djupgrönt	Enstaka luckor genom ojämn sådd, gräset friskt, djupgrönt	Luckig genom ojämn sådd, gräset friskt, djupgrönt
E. Mineralgödsel korn + gräs	Inte helt tätbevuxen, gulgröna ax, bladen friskt gröna	Något luckig, gulgröna ax, dels gröna dels några gulnade blad	Nästan tät, gulgröna ax, gröna blad och någon antydning till gulnade blad	Inte helt tätbevuxen, gulgröna ax, bladen friskt gröna	Inte helt tätbevuxen, gulgröna ax, bladen gröna, någon antydning till gulnade blad
F. Mineralgödsel gräs	Mycket luckig genom ojämn sådd, varierande från grönt till gulnande gräs, mest grönt	Som i Block 1	Som i Block 1 och 2	Som i övriga Block	Mycket luckig genom ojämn sådd, varierande från grönt till gulnande gräs, mest grönt
G. Slam 10 volym%, mineralgödsel, korn + gräs	Tätbevuxen, kornet i gulgröna ax, bladen friskt djupgröna	Som i Block 1	Som i Block 1 och 2	Som i övriga Block	Tätbevuxen, kornet i gulgröna ax, bladen friskt djupgröna
H. Slam 10 volym%, Mineralgödsel, gräs	Luckig genom ojämn sådd, gräset friskt, djupgrönt	Som i Block 1	Som i Block 1 och 2	Som i övriga Block	Luckig genom ojämn sådd, gräset friskt, djupgrönt

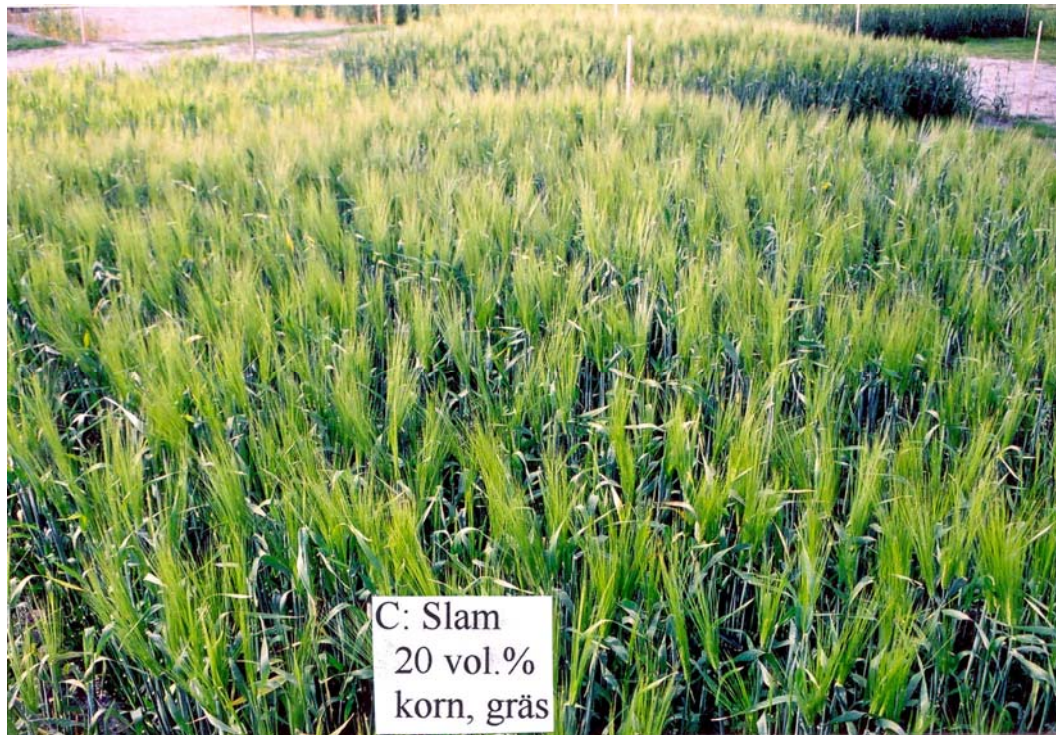


**Figur 121.** Tillståndet hos vegetationen den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Kornet och gräset är dött.



**Figur 122.** Den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Ett fåtal tussar med dött gräs.





**Figur 123.** Den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Tätbevuxen, kornet i gulgröna ax, bladen friskt djupgröna.



**Figur 124.** Den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Luckig genom ojämn sådd, gräset friskt, djupgrönt.





**Figur 125.** Den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Inte helt tätbevuxen, gulgröna ax, bladen gröna, någon antydning till gulnade blad.



**Figur 126.** Den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Mycket luckig genom ojämn sådd, varierande från grönt till gulnande gräs, mest grönt.





**Figur 127.** Den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Tätbevuxen, kornet i gulgröna ax, bladen friskt djupgröna.



**Figur 128.** Den 5 augusti, 48 dagar efter sådd. Luckig genom ojämn sådd, gräset friskt, djupgrönt.



## Rötterna i 2002-ytan vid slutet av första växtsäsongen, 19 augusti år 2002

Figureerna 129 – 132 visar representativa bilder av rötter i olika försöksled. I den första gropen som grävdes i en kontrolllyta där korn och gräs såtts (figur 129), föreföll kornplantorna den 19 augusti vara döda, men det framgår att rotutvecklingen tidigare under säsongen var påtaglig. De döda grässtråna är knappt urskiljbara i bilden. Sanden i kontrolllytan saknar kväve, så det är troligt att kornplantorna liksom gräset har dött av kvävebrist. När plantor ändå började växa var det genom att nyttja det lilla kväve som var lagrat i fröet. Kornrötterna har inte kommit djupare än 4-8 cm (tabell 18) och plantorna har därför också sannolikt lidit av vattenbrist eftersom plantan bara har kunnat utnyttja vatten i en liten jordvolym. Bilden innehåller information om kemiska processer som skett i anrikningssanden under den första växtsäsongen. De brunröda fläckarna är troligtvis järnutfällningar. Den information man kunde få av de andra groparna i samma försöksled, var densamma som i första gropen.



**Figur 129.** Rötter i kontrolllytan (försöksled A, första gropen) vid slutet av första växtsäsongen.

I försöksled C med 20 volymprocent slam (figur 130), med det avsedda inblandningsdjupet 20 cm, har grödan växt bra ovan mark och rötterna har vävt igenom en betydligt större jordvolym än i jorden utan inblandning av slam eller mineralgödsel. Efter infräsningen i juni har ytskiktet sjunkit ihop, konsoliderats. Rötterna finns huvudsakligen där slammet har blandats in. Genomsnittsdjupet är 15 cm, minimumdjupet 13 cm och maximumdjupet omkring 19 cm (tabell 18). Rotutvecklingen i första och

andra gropen var mycket likartad. Liksom i kontrollrutorna kunde man se antydningar till rostutfällningar i sanden under skiktet med slam och anrikningssand i blandning. Även i skiktet som innehåller slam fanns fläckar av rost, även om de inte framträder så tydligt i bilden. Tredje gropen visade samma karakteristiska drag som de två andra groparna. I fjärde gropen syntes fläckvis en viss rostfärgning även i det översta skiktet.



**Figur 130.** Rötter i ledet med 20 volym% slam (försöksled C, andra gropen) vid slutet av första växtsäsongen.

Figur 131 visar rötter i en av groparna i försöksled E, som representerar inblandning av enbart mineralgödsel. Rotutvecklingen har varit god, men något grundare än i ledet med slamblandning. Rostutfällningarna i profilen under rotzonen är tydliga. Rötterna som studerades i de tre andra groparna, hade utvecklats på likartat sätt, men de nådde olika djup, sannolikt beroende på näringens nedbrukningsdjup vid inblandningstillfället. Av tabell 18, framgår att rotdjupet varierar mellan 11 och 17 cm.





**Figur 131.** Rötter i ledet med enbart mineralgödsel vid slutet av första växtsäsongen.

Försöksled G representerar 10 volymprocent slam plus mineralgödsel inblandad i anrikningssanden. Rotstudierna visade på stor variation från 4 – 17 cm (tabell 18). Rostutfällningar finns i både rotskiktet och därunder.





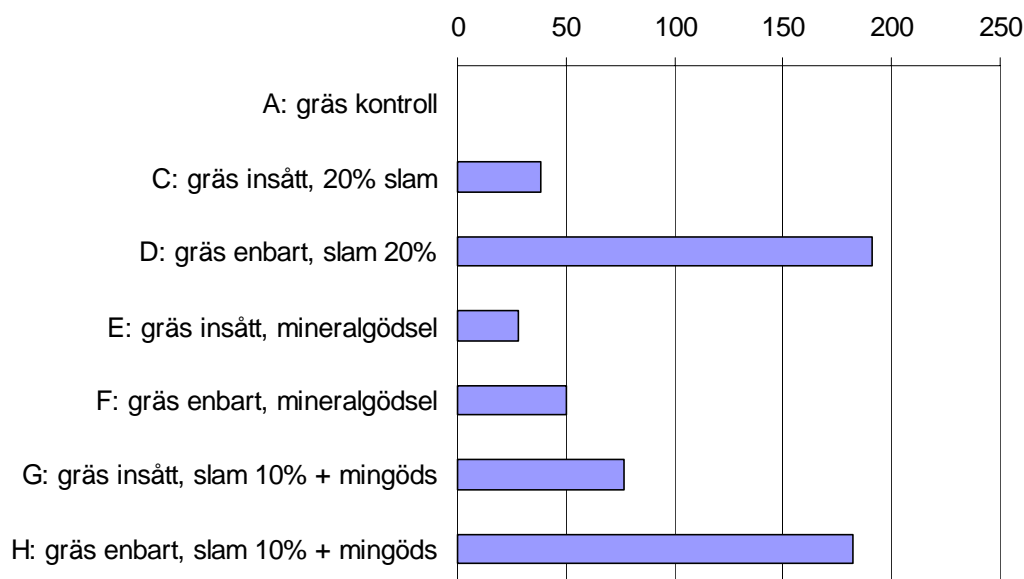
**Figur 132.** 10 volymprocent slam plus mineralgödsel inblandad i anrikningssanden. Just här har nedfräsning av slammet lyckats bättre, och rötterna når nästan 20 cm djup

**Tabell 18.** Översikt över rotdjup i olika parceller (cm)

Behandling	Grop 1, max-djup	Grop 1 medeldjup	Grop 2 max-djup	Grop 2 medeldjup
A	7	4-5	8	7-8
C	19	15-17	18	13-17
E	14	11-13	17	12-15
G	9	4-6	17	13-16

Växtproduktion vid skörd av 2002-ytan i mitten av september 2002, första växtsäsongen

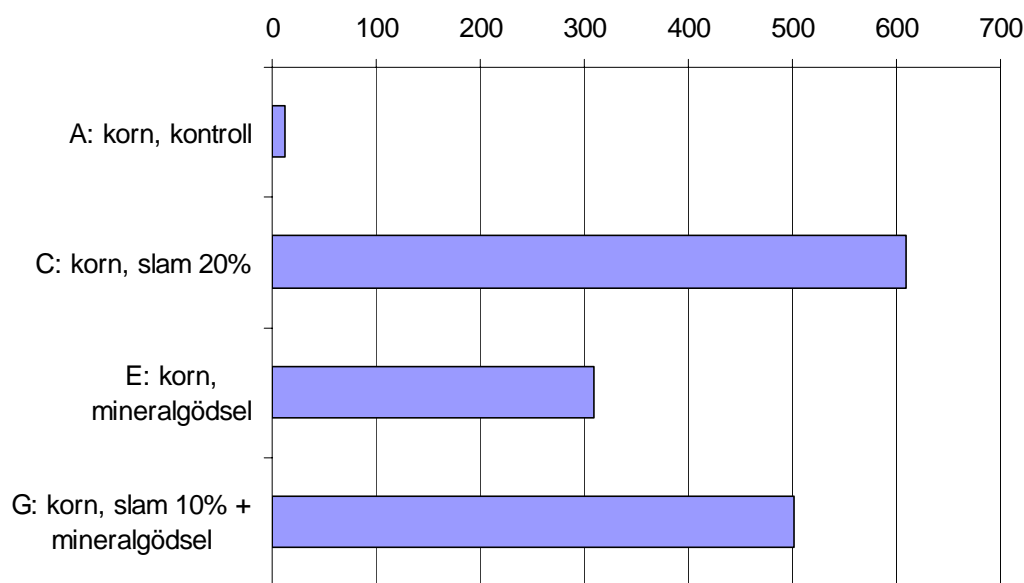
Skörderesultaten redovisas dels översiktligt i diagram (figur 133 och 134), dels mera detalj i tabell 19 med standardavvikelserna presenterade. Av resultaten framgår att det fanns tydliga skillnader i växtproduktion mellan varje försöksled. Tillväxten av gräs var högre då det växte ensamt, utan skyddsgrödan korn. Det innebär att kornet, som såtts med 30 cm radavstånd, konkurrerar starkt med gräset, som det skall skydda. För gräs, som växt utan korn, var rangordningen mellan försöksleden från högsta till lägsta skörd följande: 20 volymprocent slam > 10 volymprocent slam + mineralgödsel > enbart mineralgödsel >> kontroll utan tillsatser. Rangordningen när gräs växte med korn var: 10 volymprocent slam + mineralgödsel > 20 volymprocent slam > enbart mineralgödsel >> kontroll utan tillsatser.



**Figur 133.** Skördad mängd gräs, gram TS per kvadratmeter. I kontrolledet fanns inget gräs att skörda. Insått gräs i ledet med 20 % slam, hade hållits tillbaka av det konkurrerande kornet.

Tillväxten av korn (figur 134 och tabell 19) var högst i slamledet, drygt 20 % högre än i ledet med slam + mineralgödsel. Ledet med enbart mineralgödsel gav betydligt lägre skörd, endast 50 % av slamledets produktion. I kontrolledet, där kornet endast har vuxit av näringen lagrat i kärnan var produktionen mycket låg.

Det faktum att kornet konkurrerar framgångsrikt med gräset leder till frågan hur det kommer att gå de följande åren. Det skall visa sig att gräset kommer igen starkt under andra växtsäsongen i leden med insådd i korn. Det visade sig att kornet hade haft en positiv inverkan så att gräset i slamleden växte bäst där korn hade funnits första växtsäsongen. Med åren försvann inverkan av kornet och det som återstod med det starkaste inflytandet var mängden av slam som hade tillförts anrikningssanden före sådd. Gräset utvecklades bäst i de led som fått den största slamgivan.



**Figur 134.** Skördad mängd korn, gram TS per kvadratmeter. Det framgår att mineralgödsel tillförd strax före sådd, inte kan ge samma effekt som slammet. Slammet som omsätts lämnar ifrån sig små mängder näring kontinuerligt under växtsäsongen, vilket gynnar tillväxten. Bättre vattenlagring i slaminblandad sand bidrar också positivt till utvecklingen hos växterna. Näringsbevattnings med små doser åt gången skulle kunna leda till liknande tillväxt som i slamleden, men sådan bevattnings kräver mycket dyra investeringar och innebär dyr drift. Slammet är både billigt och effektivt.

**Tabell 19.** Gräs och kornproduktion på 2002-ytan under första växtsäsongen

Försöksled/Behandling	Gräs TS g m <sup>-2</sup> medelvärde	Standard- avvikelse	Korn TS g m <sup>-2</sup> medelvärde	Standard- avvikelse
A: kontroll, korn och gräs	0		12,55	7,08
B: kontroll, gräs	0			
C: slam 20 vol%, korn och gräs	37,95	6,87	608,825	120,24
D: slam 20 vol%, gräs	190,98	39,70		
E: mineralgödsel, korn och gräs	27,98	2,62	308,50	125,24
F: mineralgödsel, gräs	49,53	15,53		
G: slam 10 vol% + mineralgödsel, korn och gräs	77,05	19,38	501,03	76,04
H: slam 10 vol% + mineralgödsel, gräs	182,23	34,69		

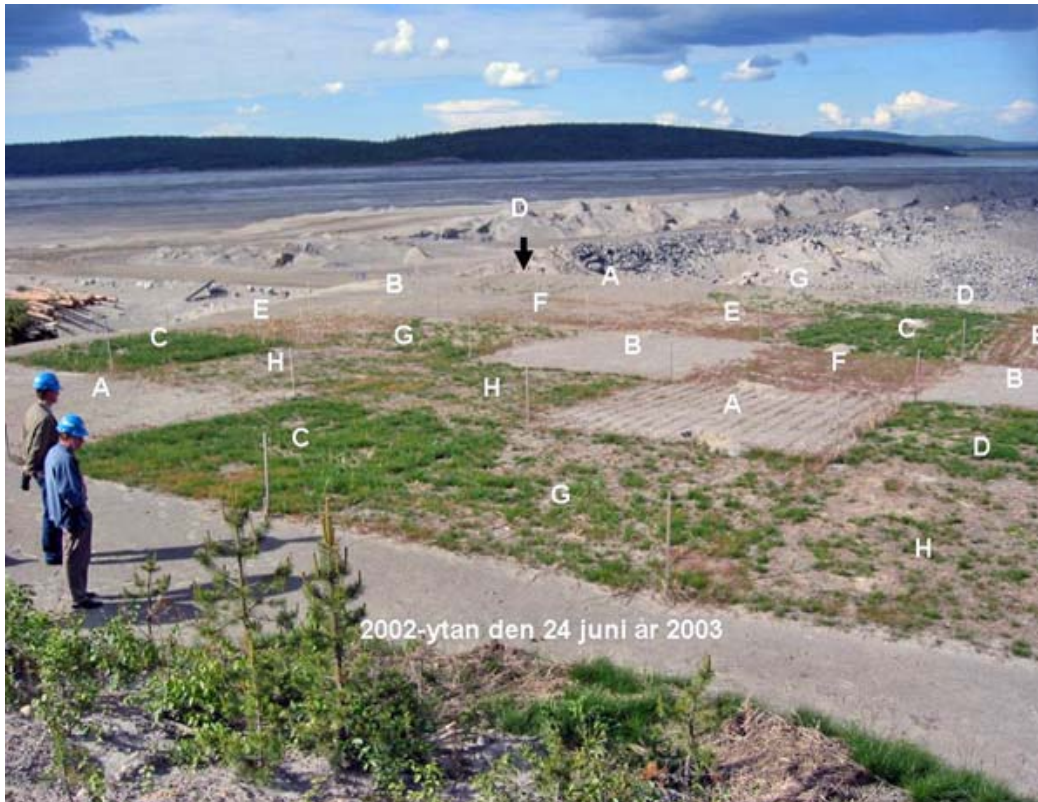


## Vegetationens utveckling de följande åren 2003 – 2005 på 2002-ytan

På följande sidor finns bilder (figur 135 - 148) som illustrerar vegetationens utveckling från början av andra växtsäsongen till slutet av fjärde växtsäsongen. Det framgår att vid slutet av augusti år 2005, då fyra växtsäsonger var till ända, växte gräset fortfarande bra i det försöksled som fått 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm och vegetationen var i stort sett heltäckande. Effekten av kornet som skyddsgröda var inte märkbar efter fyra säsonger, vilket ger besked om att gräset kan etableras utan skyddsgröda. Men om kornets erosionskyddande effekt beaktas, liksom kornets upptag av kväve, kan man ändå hävda att kornet bör finnas med i sammanhanget. I det försöksled som innebar 10 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup växte gräs fortfarande efter 4 växtsäsonger, men beståndet var mycket luckigt och täckningsgraden var mindre än 50 %. Resultatet ger ett tydligt besked om att 10 volymprocent slam är för lite och 20 volymprocent slam är tillräckligt, åtminstone för de första åren efter etableringen. När det gäller den framtida etableringen av vegetation på sandmagasinet efter jordförbättring med rötslam, kan man räkna med spontan etablering av alla de växter i omgivningen, som kan sprida sina frön.



**Figur 135.** 2002-ytan den 24 juni år 2003. Den gröna rutan i den närmaste raden längst till vänster är C: slam, 20 volym%, korn, gräs (kornet växte bara år 2002), rutan näst intill är G: slam, 10 volym% + mineralgödsel, korn, gräs, följd av H: slam 10 volym% + mineralgödsel, gräs, E: mineralgödsel, korn och gräs och D: slam, 20 volym%, gräs. Endast rutor med tillfört slam har grön vegetation. Mineralgödseln har tappat sin verkan redan i början av andra växtsäsongen.



**Figur 136.** 2002-ytan den 24 juni år 2003.



**Figur 137.** 2002-ytan den 24 juni år 2003.





**Figur 138.** Översikt över 2002-ytan vid mitten av augusti 2003.



**Figur 139.** Huvudsakligen Block 1 av 2000-ytan och A-rutan från Block 3 närmast t.h. vid mitten av augusti 2003.





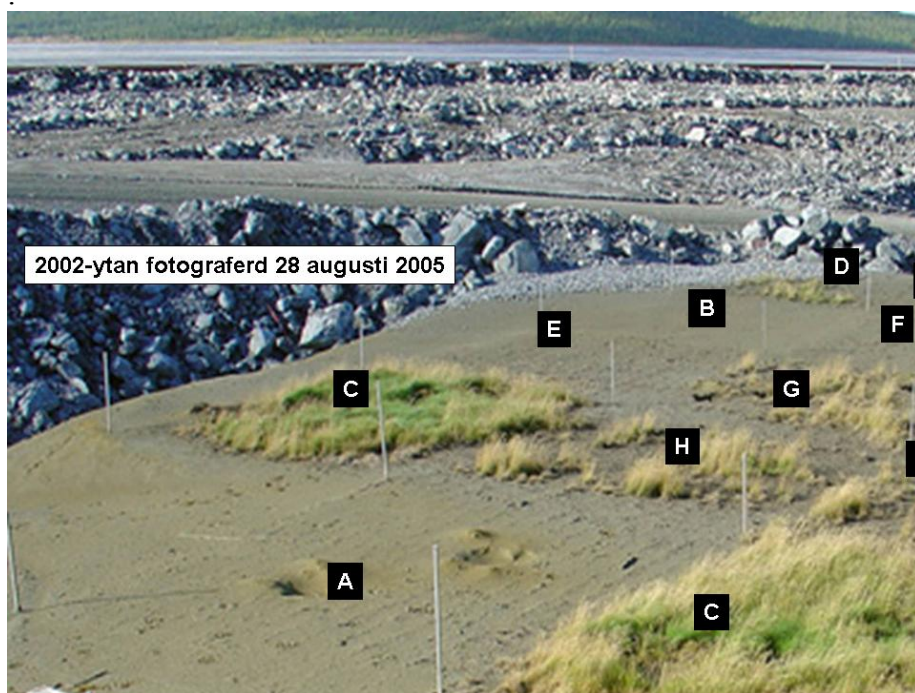
**Figur 140.** Huvudsakligen Block 2 av 2002-ytan samt C- och G-rutorna från Block 3, i förgrunden, vid mitten av augusti 2003.



**Figur 141.** Block 4 av 2002-ytan vid mitten av augusti 2003.



**Figur 142** . Block 1 av 2002-ytan. Närmast en ruta med behandlingen 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup. Fotograferingen genomförd i juni 2004. Enbart gräs, rödsvingel, växer på ytan.

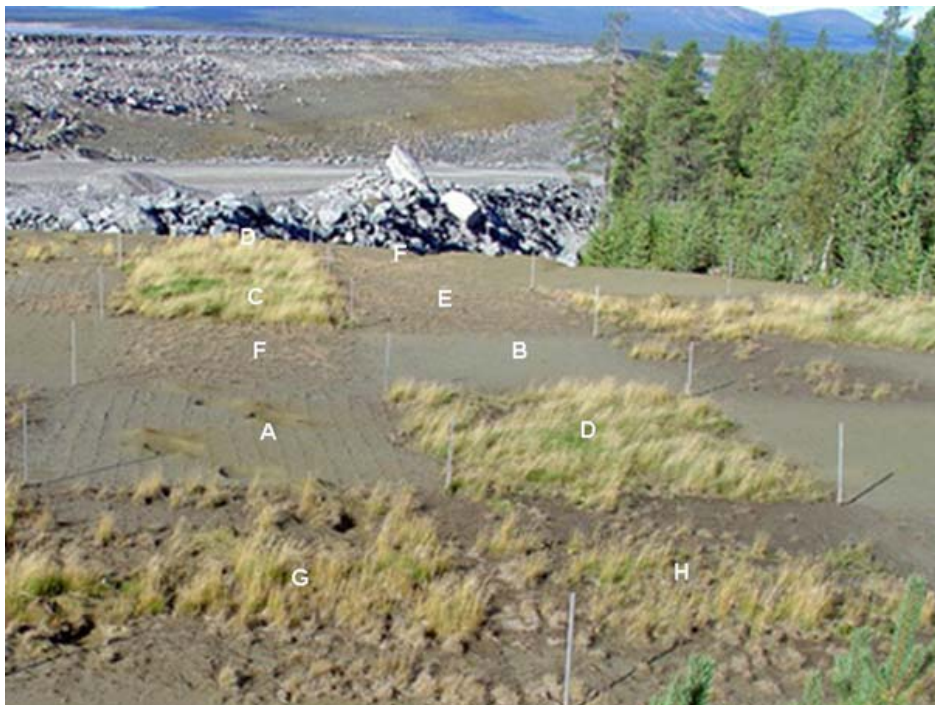


**Figur 143**. 2002-ytan med block 1, samt A- och C-rutorna från Block 3 i förgrunden. Fotograferingen genomförd den 28 augusti år 2005.



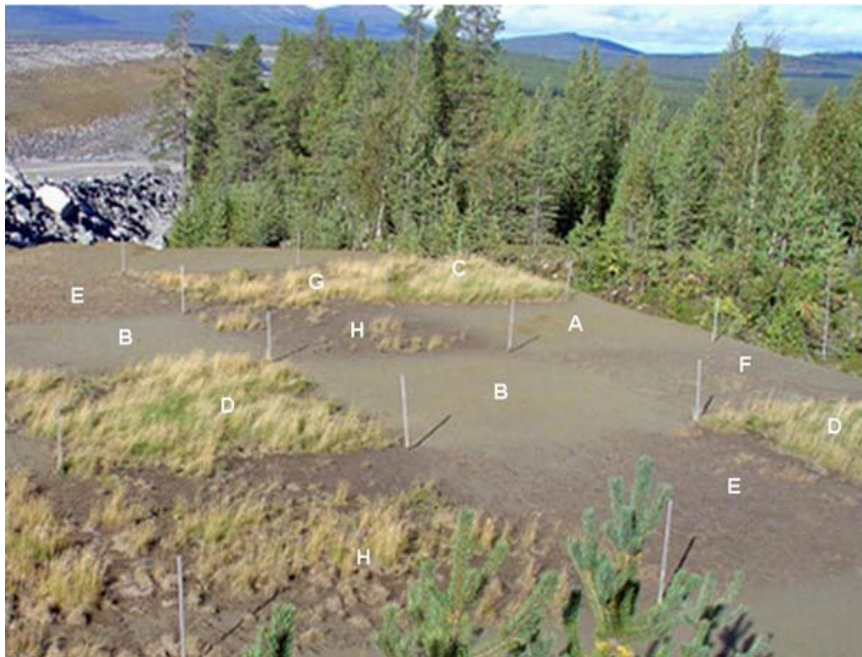


**Figur 144.** Närbild av C-rutan i Block 1 i 2002-ytan. Luckigheten beror bland annat av jordprovtagning föregående år.



**Figur 145.** 2002-ytan fotograferad den 28 augusti, 2005.





**Fig. 146.** Del av Block 3 av 2002-ytan (t.v.) och Block 4, fotograferade 28 augusti, 2005.



**Figur 147.** E, D och F-rutorna i Block 4 fotograferade 28 augusti, 2005.



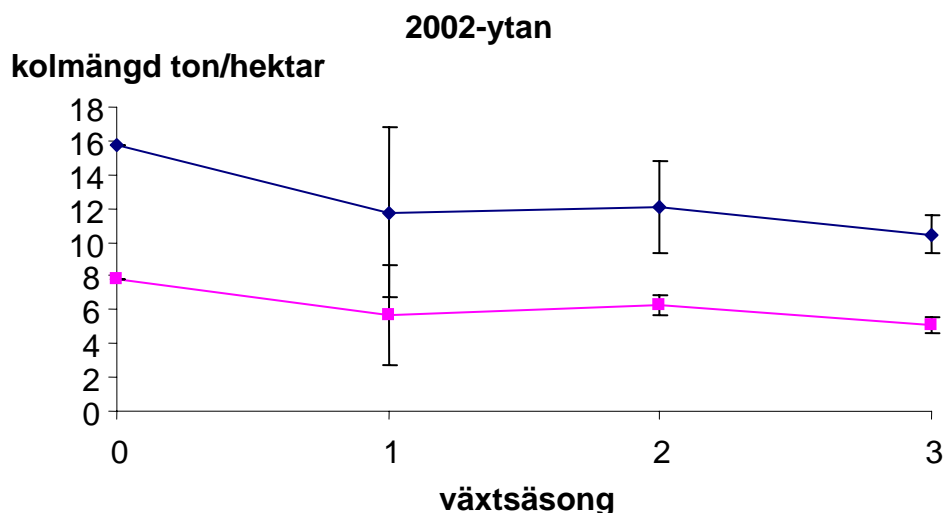


**Figur 148.** Spontan etablering av en björk i slambehandlad ruta i 2002-ytan. Fotografiet är taget den 28 augusti 2005. Det hade då gått fyra växtsäsonger sedan ytan jordförbättrades och såddes. När det gäller den framtida etableringen av vegetation på sandmagasinet efter jordförbättring med rötslam, kan man räkna med spontan etablering av alla de växter i omgivningen, som kan sprida sina frön.

#### Nedbrytning av organiskt material på 2002-ytan

Tjockleken hos det skikt som innehöll inblandat organiskt material minskade från cirka 15 cm efter anläggningen av försöket till strax under 10 cm efter tre växtsäsonger. Denna minskning var resultatet av en kombination av hopsjunkning, konsolidering av blandningen och en omsättning av det organiska materialet. Kvarvarande kolmängd i substratet efter första, andra och tredje växtsäsongen presenteras i figur 149 för de två behandlingarna, 20 % slam och 10 % slam + NPK inblandat i anrikningssanden.

Nedbrytningen av slam under den första växtsäsongen motsvarade cirka 20 % av tillförd mängd. De följande två växtsäsongerna var nedbrytningshastigheten mycket lägre. Den mängd kol som förvandlats till koldioxid och avgått till atmosfären motsvarar sammanlagt för säsongerna 2 och 3 cirka 16 % av den ursprungligen tillsatta mängden. Uppenbarligen minskar nedbrytningen starkt under den andra växtsäsongen. Detta gör det intressant att ta reda på om rotförnan från vegetationen har bidragit påtagligt till förrådet av organiskt material. Den totala ovanjordiska biomasen från första säsongen var omkring 6500 kg torrs substans per hektar (tabell 20).



**Figur 149.** Återstående mängder av kol i substratet från fältförsöket anlagt 2002 vid Aitik, Gällivare. Den övre linjen anger 20 % slam (volymprocent), den nedre linjen 10 %.

**Tabell 20.** Skördad mängd av kornhalm och kärna, samt gräs från fältförsöket (2002-ytan) vid Aitik, Gällivare vid slutet av första växstsäsongen (kg torrsustans/ha). 20 volymprocent av rötat avloppsslam som blandats in i avfallssand till 20 cm djup, samt. 10 volymprocent av rötat slam + NPK inblandat till 20 cm djup. Standardavvikelse inom parentes

Behandling	Korn (kg TS ha <sup>-1</sup> )	Gräs (kg TS ha <sup>-1</sup> )
20 % slam	6088 (68)	379
10 % slam + NPK	5010 (194)	770

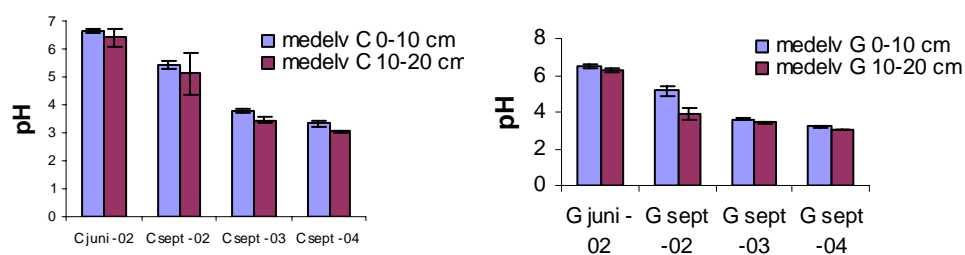
Om rotbiomassan utgör 20 % av ovanjordisk massa (Hansson, Pettersson och Paustian, 1987) är rotbiomassan omkring 1300 kg torrsustans per hektar. Hur fort rotförnan bryts ner är inte känt i det här fallet men det är troligt att den bidrar till att öka kolförrådet i substratet, och det kan vara en förklaring till att det är en stor mängd kol kvar vid slutet av den andra vegetationsperioden. Vid provprepareringen togs urskiljbara rötter bort innan substratet analyserades. Vid slutet av den första växstsäsongen fanns det färskorötter i stora mängder och de avlägsnades, men efter ytterligare en säsong var rötterna döda och de kunde då bidra till det organiska förrådet och ingick i de analyserade proverna. Kornhalmen avlägsnades vid slutet av den första vegetationsperioden och enbart gräs växte de följande två säsongerna. Rotförnatillförseln från gräs under andra och tredje växstsäsongen, var mycket mindre än den från korn och gräs den första växstsäsongen (data inte redovisade här).

#### Förändringar av pH i substratet på 2002-ytan

pH i substratet förändrades från omkring 6,5 vid tiden för växtetableringen av försöket till nära 3 vid slutet av den tredje växstsäsongen (figur 150). I båda behandlingarna finns det en indikation på att avloppsslammet i det övre skiktet buffrade de frigjorda vätejonerna (relaterat till oxidation av pyriten) i större utsträckning än i det underlig-



gande skiktet. Detta speglar med stor sannolikhet det faktum att mer slam fanns i det övre skiktet, eller med andra ord, den mekaniska fräsningen resulterade inte i en jämn fördelning av slammet i 0-20 cm skiktet. Det framgår att slammet hade en buffrande verkan, men det är också tydligt att buffringskapaciteten inte var tillräcklig för att hålla pH-värdet uppe över en längre tidsperiod. Observation av det rotgenomvävda substratet med blotta ögat vid slutet av den tredje växtsäsongen, visade att rötterna utvecklades enbart där organiskt material fanns kvar. Resultat av pH-mätningar av grästorvmaterial och material alldeles under det rotgenomvävda skiktet presenteras i tabell 21. Med det låga pH-värdet i växtsubstratet är det sannolikt att organismer som bryter ner avloppsslammet är negativt påverkade.



**Figur 150.** Förändringar i pH ärden under de tre växtsäsongerna i substratet på 2002 ytan vid Aitik. C= 20 volymprocent rötat slam inblandat i avfallssand till 20 cm djup och G = 10 volymprocent rötat slam + NPK inblandat i avfallssand till 20 cm djup

Om denna negativa påverkan är ett faktum innebär det att organiskt material kommer att finnas kvar en längre period i substratet på den undersökta platsen än om pH-värdet varit högre och vätejonaktiviteten på en nivå som är mera gynnsam för markorganismerna. På grund av de låga pH-värdena kan den perenna vegetationen av huvudsakligen gräs inte anses vara ett uthålligt vegetationssystem. Slutligen kommer trots långsam nedbrytning en ytterst liten fraktion av organiskt material finnas kvar och vegetationen kommer att dö. Av den anledningen och även från metallutlakningsaspekt är det nödvändigt att tillräckligt mycket pyrit avlägsnas från sanden i anslutning till metallanrikningsprocessen. Så mycket pyrit måste avlägsnas, att pH-värdet aldrig någonsin sjunker under 4,5. Ett teoretiskt alternativ är att tillföra så mycket kalk att samma resultat nås. Alternativet är knappast realistiskt. Det skulle gå åt för stora mängder kalk och bli alltför dyrt i jämförelse med alternativet att ta bort pyriten.

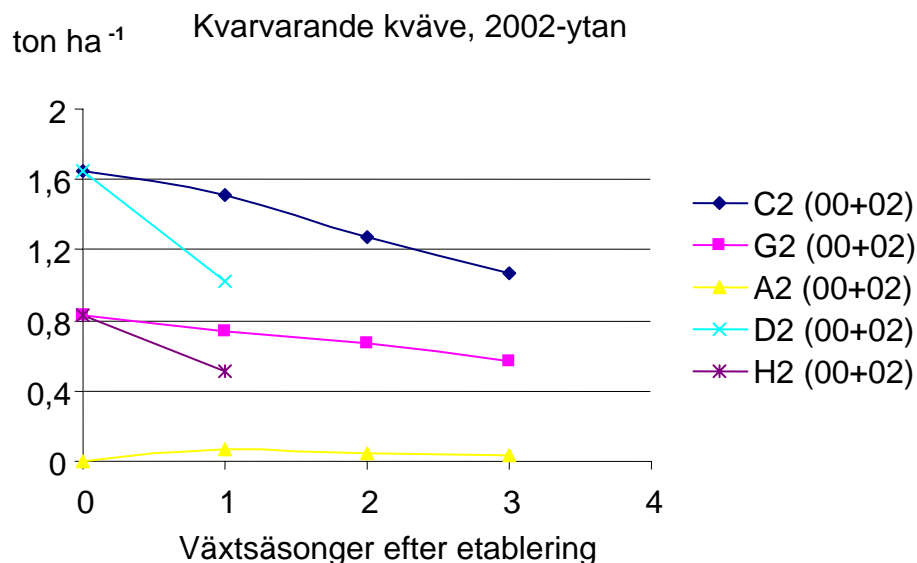
**Tabell 21.** pH i det rotgenomvävda skiktet och materialet strax därunder i behandlingsledet där 20 volymprocent slam blandats till 20 cm djup. Mätningen är gjord på material som legat tre år efter inblandningen. Standardavvikelse inom parentes

Prov	pH
Rotgenomvävt material	4,6 (0,1)
Material strax under det rotgenomvävda	3,7 (0,2)

### Kvävefrigörelse på 2002-ytan

Sett över hela perioden, de tre växtsäsongerna, frigjordes lika stor andel kväve som kol från substratet i 2002-ytan, dvs. 30-35 % (tabell 22). Under den första säsongen frigjordes dock en betydligt större andel kol i förhållande till det kväve som analyserades som fritt kväve. Medan 20 % kol frigjordes i led C och 30 % kol i led G, rörde det sig bara om 10 % kväve. (C = 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup, G = 10 volymprocent slam + NPK inblandat till 20 cm djup). En orsak till att man uppmäter låga mängder, kan vara att frigjort kväve återanvänds omedelbart av mikroorganismerna under första växtsäsongen. Mikroorganismerna använder de stora mängderna kolrika utsöndringarna från växande rötter samt rotrester som energikälla och kvävet för egen tillväxt. Trots att betydande kolmängder sannolikt har tillförts substratet via rötterna, har vi en indikation på en relativt större kolomsättning än förändring av kväveförråd under den första växtsäsongen, då kornet stod för den dominerande biomassaproduktionen. En förklaring kan alltså vara att en stor andel av det organiska kvävet byggs in i den mikrobiella biomassan för tillväxt. Detta kallas immobilisering av kvävet. Att det kan förhålla sig så, styrks också av data från led D (enbart gräs som vegetation med 20 volymprocent slam) och H (enbart gräs, 10 procent slam + mineralgödsel). I dessa försöksled framträder nämligen en betydligt större frigörelse av kväve under första växtsäsongen än i leden C och G, närmare 40 % (figur 151). Resultatet indikerar alltså att ganska stora mängder kväve kan frigöras under den första säsongen. Genom det växande kornet minskar risken för utlakning. Kornet växte enbart den första säsongen och det andra och tredje året efter etablering ökar kvävemineralkvämningen i leden C och G.

I substratproven som togs direkt efter etableringen i juni var mängderna av mineralkväve (ammonium + nitrat) 39 % av de totala kvävemängderna som påfördes med slam. Så stor del av kvävet kan alltså föreligga som mineralkväve i färskt slam. Variationen mellan proven var stor (CV= 45 %). Denna provtagning gjordes endast i led C. Analyserna visade att den största delen, nämligen >90 % av mineralkvävet, föreligger som ammonium. Då växterna kommer på plats kommer rötterna att absorbera det mineralkväve som ligger tillgängligt. Upptaget sker i konkurrens med mikrober. Det föreligger dock en risk för läckage av i första hand nitrat om förhållanden för bildandet av nitrat är goda, dvs. tillgången på ammonium är hög, om konkurrensen från växterna är liten och aktiviteten hos nitrifikationsbakterierna är hög. Läckaget sker bara om det föreligger en nettorelse av vatten nedåt i markprofilen. Andelen mineralkväve i prov tagna i september 2004 var obefintliga.



**Figur 151.** Kvarvarande kvävemängder (Tot-N) i 2002-ytan, efter 1, 2 och 3 växstsäsonger. (00+02 indikerar att beräkningarna av skrymdensiteten, vilken nyttjades vid mängdberäkningar, baseras på prov tagna i dels 2000-ytan, dels 2002-ytan).

**Tabell 22.** Förändring av kol och kvävemängder i 2002-ytan under de 3 första växstsäsongerna (procent av tillförd slammängd)

Växstsäsonger efter etablering	Kol		Kväve	
	Led C %	Led G %	Led C %	Led G %
1	-21	-28	-9	-11
2	-2	11	-16	-9
3	-13	-19	-16	-15
0-3	-36	-36	-41	-35

### Slutsatser

- Vid slutet av augusti år 2005, då fyra växstsäsonger var till ända, växte gräset fortfarande bra i de försöksled som fått 20 volymprocent slam inblandat till 20 cm och vegetationen var i stort sett heltäckande.
- Effekten av kornet som skyddsgröda var inte märkbar efter fyra säsonger, vilket ger besked om att gräset kan etableras utan skyddsgröda.
- I det försöksled som innebar 10 volymprocent slam inblandat till 20 cm djup växte gräs fortfarande efter 4 växstsäsonger, men beståndet var mycket luckigt och täckningsgraden var mindre än 50 %. Resultatet ger ett tydligt besked om att 10 volymprocent slam är för lite och 20 volymprocent slam är tillräckligt, åtminstone för de första åren efter etableringen.



- Vätejonaktiviteten ökade påtagligt med tiden. Detta påverkar sannolikt den mikrobiella nedbrytningen negativt, så att organiskt material kommer att finnas kvar en längre period i substratet på de undersökta platserna än om pH-värdet varit högre och vätejonaktiviteten på en nivå som är mera gynnsam för markorganismerna.
- På grund av de låga pH-värdena kan den perenna vegetationen av huvudsakligen gräs inte anses vara ett uthålligt vegetationssystem. Av den anledningen och även från metallutlakningsaspekt är det nödvändigt att mer pyrit än tidigare avlägsnas från sanden i anslutning till metallanrikningsprocessen. Så mycket pyrit måste avlägsnas, att pH-värdet aldrig någonsin sjunker under 4,5. Ett teoretiskt alternativ är att tillföra så mycket kalk att samma resultat nås.
- Att vid växtetableringen använda en snabbväxande skyddsgröda, såsom korn, gynnar inte enbart det långsammare gräset, utan är också en fördel med tanke på risken för läckage av kväve, främst nitrat. Det finns flera orsaker till detta. Dels ger stort upptag av ammoniumkväve i den snabbt växande, ettåriga grödan, mindre utrymme för nitrat att bildas, dels tas också nitrat upp och dels finns en möjlighet att korngrödan genom utsöndring av kolrika substanser indirekt leder till immobilisering av mineraliserat kväve. Allt sammantaget leder korngrödan till minskad risk för läckage under första växtsäsongen. Immobiliserat kväve kan frigöras under främst andra men även följande växtsäsonger och nyttjas av vegetationen.
- Koncentrationerna av flera metaller i korn och rödsvingel som växt i båda försöksleden överskred de bakgrundsvärden som finns i litteraturen. Kopparkoncentrationen i kornhalm överskred  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  i båda behandlingarna och kan vara toxisk för betande djur. Studien visade alltså att rötslam som tillförs anrikningssand som har potential att oxidera inte räcker som buffrande ämne och vidare att rötslaminblandning kan öka rödsvingelns upptag av metaller.

## UNDERSÖKNINGAR PÅ 2003-YTAN

En sammanfattning gällande undersökningarna på denna yta finns på sidan 14 i denna rapport.

### Jordförbättring och växtetablering illustrerad i en bildsvit

I figurerna 152- - 164 illustreras och beskrivs utvecklingen på ytan från anläggningstillfället och fram till hösten 2003 då tre växtsäsonger var till ända.



**Figur 152.** 2003-ytan i juni 2003. Anrikningssanden lades i ett skikt med minst en meters tjocklek ovanpå en plangjord moränya. Rötslam spreds ut i ett skikt som var omkring 8 cm tjockt och slammet frästes in i sanden till cirka 20 cm djup. Inblandningen av organiskt material, rötslam var ojämn.



**Figur 153.** Närbild av område med rikligt påfört slam. Det är lätt att se att risken för vinderosion minskar betydligt direkt genom inblandning av slam i anrikningssanden.



**Figur 154.** 2003-ytan i augusti 2003. Gräset är ännu inte heltäckande. Ojämn spridning av slam har lett till ojämn groningen av gräset.



**Figur 155.** 25 september 2003. Nu, en månad senare är gräset heltäckande. Höstregnen räckte för att tillräckligt många frön skulle gro.





**Figur 156.** 2003-ytan den 18 juni 2004. Hela ytan är friskt grön.



**Figur 157.** Närbild av vitklöver i gräs, 18 juni 2004.





**Figur 158.** Närbild av rödklöver i gräs, 18 juni 2004.



**Figur 159.** 18 juni år 2004. Raderna där kornet stod året innan syns här vid början av andra växtsäsongen, men inte vid slutet av denna.





**Figur 160.** Närbild av kornrad.



**Figur 161.** 2003-ytan fotograferad 28 augusti, år 2005. Gräset växer mycket frodigt.





**Figur 162.** Mjölkört har etablerat sig spontant (28 augusti, 2005)



**Figur 163.** Närbild som visar hur tät vegetationen är den 28 augusti, 2005, vid slutet av den tredje växtsäsongen.



**Figur 164.** Illustrerar samma som föregående bild (28 augusti 2005).

### Slutsatser

- Inblandning av ett cirka 8 cm tjockt skikt av rötslam till cirka 25 cm djup i anrikningssanden följt av gräs- och klöverfrösådd, leder till lyckad växtetablering med 100 % vegetationstäckning
- Korn sått i två riktningar vinkelrätt mot varandra och med en meters mellanrum mellan raderna, ger skydd mot vinderosion utan att producera så mycket halm att gräset kvävs.
- Inblandning av rötslam i anrikningssanden ger också ett direkt vindskydd.
- Fröspridande växter i omgivningen ger upphov till spontan etablering på ytan som jordförbättrats med rötslam av andra arter än de som såtts.



## LITTERATURFÖRTECKNING

- Abrahamsson, S. 1994. Om mineralogin i Aitik, Gällivare. Rapport G521. Golder geosystem AB.
- Eriksson, B. 1992. Klimat. I: Clason, Å och Granström, B. (red). Sveriges Nationalatlas. Jordbruk, p 14-21.
- Eriksson, J., Andersson, A. & Wenblad, A. 1997. Tillståndet i svensk åkermark. Naturvårdsverket. Rapport 4759. Naturvårdsverkets förlag, Solna.
- Fors, J. 2002. Koppar och kadmium i vedartade växter på anrikningssand – med och utan inblandat avloppsslam. Examensarbete. Sveriges lantbruksuniversitetet, institutionen för markvetenskap, avdelningen för hydroteknik.
- Gómes Santos, J.M. 2003. Erosion control in covered waste rock heaps – a model and its practical application. Master thesis. SLU, Department of Soil Sciences, Division of Hydrotechnics, Uppsala.
- Heinonen, R. 1975. Jordarterna och deras brukningsegenskaper. Lantbrukshögskolans meddelanden B 23. Uppsala.
- Hornatowska, J. 2006. Svepelektronmikroskopering av rötat avloppsslam. STFI-Packforsk AB, Stockholm.
- Kofoed, J. 1999. Växtetableringsförsök i Aitiks anrikningssand, rapport från inventering 15 juni år 1999.
- Ledin, S. 1999. Växtetablering på störda marker – särskilt på deponier för gruvavfall, Rapport 5026. Naturvårdsverkets förlag. Stockholm.
- Ledin, S and Wennman, P. 2005. Decomposition of sewage sludge mixed into oxidising pyritic mine tailings. Proceedings of Securing the Future, International Conference on Mining and Environment, Metals and Energy Recovery, June 27 – July 1, 2005. Volume 1, pp 566-575, Skellefteå, Sweden.
- Levlin, E., Westlund, L. och Hultman, B. 1996. Rening av avloppsslam från tungmetaller och miljöfarliga organiska ämnen. Svenska Vatten- och Avloppsverksföreningen, Rapport 1996:8, 50 pp.
- Paustian, K., André, O., Boström, U., Clarholm, M., Hansson, A-C., Johansson, G., Lagerlöf, J., Lindberg, T., Pettersson, R., Rosswall, T., Schnurer, J., Sohlenius, B. & Steen, E. Carbon and nitrogen budgets of four agroecosystems with annual and perennial crops, with and without N fertilization. *Journal of Applied Ecology* 27, 60-84.
- Preuss, S. 2001. Copper- and cadmium uptake by plants grown on the waste deposit of the copper mine at Aitik, Gällivare, Northern Sweden. Third Year Research Project in Environmental Science at the University of East Anglia (UEA), Norwich, UK.
- Ries, A. 1998. Vegetation tests on tailings pond soil, results on 16<sup>th</sup> June 1998. Boliden Mineral AB and Ecole des Mines d'Alès.
- Stjernman, L. 2000. Gruvavfall som växtsubstrat – effekter av organiskt material. Examensarbete. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap, avdelningen för hydroteknik. Avdelningsmeddelande 00:1. Uppsala.
- Stjernman, L. and Ledin, S. 2001. Growth of Barley, Red Fescue and Red Clover in tailings Mixed with Different Kinds of Organic Material. Proceedings of Securing the Future, International Conference on Mining and the Environment, June 25 – July 1, Skellefteå, 2001.
- Stjernman Forsberg, L and Ledin, S., 2003. Effects of iron precipitation and organic amendments on porosity and penetrability in sulphide mine tailings. *Water, Air, and Soil Pollution* 142: 395-408.



- Stjernman Forsberg, L. och Ledin, S. 2006. Effects of sewage sludge on pH and plant availability of metals in oxidising sulphide mine tailings. *Science of the Total Environment*, 358: 21-35.
- Wennman, P. 2004. Decomposition and nitrogen transformations in digested sewage sludge applied to mine tailings – effects of temperature, soil moisture, pH and plants. Licentiate Thesis. SLU, Reports from the department of Soil Sciences 34. Uppsala.
- Wennman, P. 2005. Microbial activity and nitrogen mineralization in incubated sewage sludge mixed into mine tailings – studies of different temperatures and water contents. Proceedings of Securing the Future, International Conference on Mining and Environment, Metals and Energy Recovery, June 27 – July 1, 2005. Volume 1, pp 1004-1012, Skellefteå, Sweden.
- Wennman, P. and Kätterer, T. 2006. Effects of moisture on carbon and nitrogen mineralization in mine tailings mixed with sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 35:1135-1141.

#### Internetadresser

- Naturvårdsverket, 2006. World Wide Web 2006-12-12  
<http://www.naturvardsverket.se/index.php3?main=/dokument/lagar/bedgrund/foromr/fordok/niveau.html>
- Piteå kommun 2006a World Wide Web 2006-12-11  
<http://www.pitea.se/kommun/tekniska/vattenochavlopp/pdf/Slambehandling.pdf>
- Piteå kommun 2006b World Wide Web 2006-12-11  
<http://www.pitea.se/kommun/tekniska/vattenochavlopp/pdf/rening.pdf>

#### Personliga referenser

- Lundin, Lars, 2006. Institutionen för skoglig marklära, SLU, Uppsala.
- Nilsson, G., 2006. Boliden AB, Aitik, Gällivare. Uppgifter från AnalyCen och Stockholm vatten.

## **Förteckning över utgivna nummer i rapportserien (ISSN 1653-6797 online). 2006 -**

List of publications in the Report series (ISSN 1653-6797 online). 2006 -

- 1 Anna Krafft. 2006. The effect of urban runoff on the water quality of the Sweetbriar Brook, Ampthill, UK. (Dagvattnets effekt på vattenkvaliteten i Sweetbriar Brook, Ampthill, Storbritannien). 66 p.
- 2 Karin Pettersson. 2006. Root development of *Lolium Perenne* in diesel contaminated soil. (Rotutveckling hos *Lolium Perenne* i dieselkontaminerad jord). 54 p.
- 3 Emma Lennmo. 2006. Växters upptag av spårämnen från rödfyr – ett odlingsförsök vid tre rödfyrshögar i Västra Götalands län. 65 s.
- 4 Jenny Johansson. 2006. Marktäckande, lågväxt vegetation på ställverksmark – en biologisk bekämpningsmetod mot ogräs. 81 s.
- 5 Stig Ledin 2006. Metoder för växtetablering på sandmagasinet vid Aitik – miljöeffekter av rötslam som jordförbättringsmedel. 158 s

Sveriges lantbruksuniversitet (Swedish University of Agricultural Sciences)  
Institutionen för Markvetenskap (Department of Soil Sciences)  
Avdelningen för hydroteknik (Division of Hydrotechnics)  
P.O.Box 7014  
S-750 07 Uppsala, Sweden

Tel. 018-67 10 00  
[www.mv.slu.se](http://www.mv.slu.se)