

# Vegetationsetablering i rötslam vid efterbehandling av sandmagasin

*Clara Neuschütz, Maria Greger*





# Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

SV-Utveckling (fd VA-Forsk) initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten  
Ledningsnät  
Avloppsvatten  
Ekonomi och organisation  
Utbildning och information

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

|                           |                                 |
|---------------------------|---------------------------------|
| Anders Lago, ordförande   | Södertälje                      |
| Olof Bergstedt            | Göteborg Vatten                 |
| Roger Bergström           | Svenskt Vatten AB               |
| Per Fåhraeus              | Varberg                         |
| Carina Färm               | Mälarenergi                     |
| Daniel Hellström          | Svenskt Vatten AB               |
| Mikael Medelberg          | Roslagsvatten AB                |
| Marie Nordkvist Persson   | Sydvatten                       |
| Bo Rutberg                | Sveriges Kommuner och Landsting |
| Ulf Thysell               | VA-verket i Malmö               |
| Susann Wennmalm           | Käppalaförbundet                |
| Einar Malm, adjungerad    | NORVAR, Norge                   |
| Peter Balmér, sekreterare |                                 |

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

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

*Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.*

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rapportens titel:</b>                               | Vegetationsetablering i rötslam vid efterbehandling av sandmagasin.                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Title of the report:</b>                            | Establishment of vegetation in sewage sludge used in dry cover treatment of mine tailings.                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Rapportens beteckning<br/>Nr i serien:</b>          | 2008-14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Författare:</b>                                     | Clara Neuschütz och Maria Greger, Botaniska institutionen, Stockholms universitet                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Projekt nr:</b>                                     | 22-117                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Projektets namn:</b>                                | Efterbehandling av sandmagasin med rötslam och vegetationsetablering.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Projektets finansiering:</b>                        | Svenskt Vatten Utveckling (fd VA-Forsk).                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Rapportens omfattning<br/>Sidantal:<br/>Format:</b> | 36<br>A4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Sökord:</b>                                         | Anrikningssand, fytostabilisering, läckage, metaller, näringsämnen, rötslam, växtetablering                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Keywords:</b>                                       | Leakage, metals, mine tailings, nutrients, phytostabilization, plant establishment, biosolids                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Sammandrag:</b>                                     | Växters effekt på rötslam utlagt som täckskikt på gruvavfall har undersökts. Förmågan att etablera sig i rötslammet, samt att förhindra läckage av näring och metaller skilde sig mellan olika arter. Mest effektivt fungerade etablering av energigräs, som minskade läckage av näring och metaller utan att ackumulera höga metallhalter i skotten. |
| <b>Abstract:</b>                                       | The effect of vegetation on biosolids used as cover material on mine tailings was studied. The ability to establish and to decrease leakage of nutrients and metals differed between plant species. Most efficient was an introduction of energy grass, which decreased the leakage without accumulating high metal levels in the shoots.             |
| <b>Målgrupper:</b>                                     | Deponiägare, miljömyndigheter, avloppsreningsverk, konsulter och forskare                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Omslagsbild:</b>                                    | Anrikningssandsmagasinet Lilla Bredsjön i Garpenberg före och efter övertäckning av rötslam med insått gräs. Foto: Clara Neuschütz.                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Rapporten beställs från:</b>                        | Svenskt Vattens distribution, Box 262, 591 23 Motala. Finns även att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida <a href="http://www.svensktvatten.se">www.svensktvatten.se</a>                                                                                                                                                                |
| <b>Utgivningsår:</b>                                   | 2008                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Utgivare:</b>                                       | Svenskt Vatten AB<br>© Svenskt Vatten AB                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

# Förord

Föreliggande rapport är en redovisning av hur vegetationsetablering i rötslam påverkar rötslammets funktion vid efterbehandling av sandmagasin. Projektet har ingått som en separat del i ett större projekt om hur flygaska och rötslam kan användas som material för konstruktion av tät- och täckskikt vid efterbehandling av sandmagasin, och som substrat för vegetationsetablering. Finansiärer för det projektet har varit Värmeforsk och Boliden Mineral AB, medan Svenskt Vatten Utveckling har finansierat det delprojekt som presenteras i denna rapport.

Syftet med projektet har varit att ge ökade kunskaper om etablering av växter i rötslam, om hur växterna påverkar läckaget av näringsämnen och metaller från slammet samt om hur mycket av metallerna som tas upp och lagras i växternas skott. Med hjälp av sådana kunskaper ökar möjligheterna att ta fram växtarter som har lätt att etablera sig och kan förhindra läckage av näring och metaller utan att ackumulera höga halter metaller i skotten, och därför är lämpliga att användas för stabilisering av rötslam.

Maria Greger, projektledare, och Clara Neuschütz (Stockholms universitet) samt Karl-Erik Isaksson (Boliden Mineral AB), har arbetet med detta projekt. Maria Greger och Clara Neuschütz har svarat för utvärdering och rapportskrivning.

Stockholm, juni 2008

Maria Greger  
*Projektledare*



# Innehåll

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Sammanfattning.....</b>                                           | <b>6</b>  |
| <b>Summary.....</b>                                                  | <b>7</b>  |
| <b>1 Bakgrund.....</b>                                               | <b>8</b>  |
| <b>2 Syfte.....</b>                                                  | <b>10</b> |
| <b>3 Material och metodik.....</b>                                   | <b>11</b> |
| 3.1 Täcksiktmaterial, anrikningssand och växtmaterial .....          | 11        |
| 3.1.1 Täcksiktmaterial .....                                         | 11        |
| 3.1.2 Anrikningssand .....                                           | 12        |
| 3.1.3 Växtmaterial .....                                             | 12        |
| 3.2 Etablering av växter i rötslam .....                             | 12        |
| 3.2.1 Fältförsök.....                                                | 12        |
| 3.2.2 Växthusförsök.....                                             | 14        |
| 3.3 Läckageförsök.....                                               | 15        |
| 3.3.1 Porvattenprovtagning i fält .....                              | 15        |
| 3.3.2 Läckageförsök 1 – rötslam på flygaska och anrikningssand ..... | 15        |
| 3.3.3 Sandwich-försök .....                                          | 16        |
| 3.3.4 Läckageförsök 2 – olika växters påverkan på rötslam.....       | 17        |
| 3.3.5 Vattenupptag i olika typer av växter .....                     | 17        |
| 3.3.6 Kvävepreferens hos olika växter.....                           | 17        |
| 3.4 Metallupptag i växter .....                                      | 18        |
| 3.5 Statistik och beräkningar.....                                   | 18        |
| <b>4 Resultat och diskussion .....</b>                               | <b>19</b> |
| 4.1 Utlägg av rötslam som tät- och täcksikt.....                     | 19        |
| 4.2 Inventering av växter på gruvdeponier med rötslam .....          | 19        |
| 4.3 Etablering av växter i rötslam .....                             | 19        |
| 4.3.1 Fältförsök.....                                                | 19        |
| 4.3.2 Växthusförsök.....                                             | 21        |
| 4.4 Läckageförsök.....                                               | 23        |
| 4.4.1 Porvattenprovtagning i fält .....                              | 23        |
| 4.4.2 Läckageförsök 1 – rötslam på flygaska och anrikningssand ..... | 23        |
| 4.4.3 Sandwich-försök .....                                          | 26        |
| 4.4.4 Läckageförsök 2 – olika växters påverkan på rötslam.....       | 26        |
| 4.4.5 Vattenupptag i olika typer av växter .....                     | 28        |
| 4.4.6 Kvävepreferens hos olika växter.....                           | 28        |
| 4.5 Metallupptag i växter .....                                      | 29        |
| <b>5 Slutsatser .....</b>                                            | <b>32</b> |
| 5.1 Slutsatser från projektets olika delar .....                     | 32        |
| 5.1.1 Etablering i rötslam .....                                     | 32        |
| 5.1.2 Läckage av näring och metaller från rötslam .....              | 32        |
| 5.1.3 Växtupptag av metaller från rötslam.....                       | 32        |
| 5.2 Övergripande slutsats .....                                      | 33        |
| <b>6 Referenser.....</b>                                             | <b>34</b> |

# Sammanfattning

Gruvdriften i Sverige genererar en avfallsprodukt från anrikningsverken, s.k. anrikningssand, som deponeras i sandmagasin i naturen. I närvaro av syre och vatten vittrar sanden och avger ett surt lakvatten som kan innehålla höga metallhalter. Täckning av sandmagasin sker idag med vatten eller morän, men intresse har riktats mot att istället använda restprodukter som flygaska och rötslam. Flygaska, som är pH-höjande, skulle läggas närmast sanden och rötslam användas som täckmaterial och som substrat för växtetablering ovanpå askan. Innan metoden används i stor skala bör man dock säkerställa att inte metaller och näring läcker från askan och rötslammet i sig. Eftersom växter kan ta upp näring och metaller bör etablering av växter kunna minska läckage av dessa element. Om växternas upptag av metaller till skotten är högt skulle de dock kunna utgöra en hälsorisk för betande djur.

Syftet med föreliggande undersökning har varit att

1. Inventera vanligt förekommande växter i de miljöer där gruvavfall finns och som har hög biomassatillväxt
2. Undersöka olika växtarters förmåga att etablera sig i rötslam
3. Undersöka växters inverkan på bildning av läckagevatten från rötslam och dess innehåll av metaller och näring
4. Ta reda på om metallupptaget i växter kan utgöra en risk för betande djur

En inventering har utförts av växter i slam runt gruvavfall i Boliden och i Garpenberg. Därefter har valda växter etablerats i fält i slam som lagts ovanpå gruvavfall vid Gillervattnet, Boliden. Etableringsförsök har även gjorts i växthus där rötslam med eller utan inblandning av sand, anrikningssand, bark eller bioflygaska använts. Porvattenprovtagning i täckskikt av rötslam har gjorts i fält och växthusförsök har utförts för att studera växters inverkan på lakvatten. Dessutom har ett lakvattenförsök gjorts där slam lades närmast anrikningssanden, därefter flygaska och överst slam, i vilket växter etablerades. Denna s.k. "sandwich-modell" har jämförts med en där askan legat närmast sanden. Läckagevatten från de olika försöken har analyserats för nitrat, ammonium, fosfat, zink, koppar och kadmium. Dessutom har växternas upptag av metaller från slammet analyserats.

Resultaten visar att rötslam är ett lämpligt substrat för växtetablering, dock kan etablering i färskt eller torkat slam vara problematiskt, särskilt av sticklingar och plantor, medan frösådd fungerar bättre. Inblandning av sand eller bark i slammet förbättrar chansen för växter att etablera sig. Läckage av metaller från anrikningssanden minskas effektivt om sanden täcks med flygaska och rötslam; vilket av de två materialen som läggs i direkt anslutning till sanden har däremot mindre betydelse. Från nyutlagt rötslam kan läckaget av kväve och metaller bli stort, men etablering av växter kan minska detta läckage, särskilt genom att minska mängden lakvatten. Energigräset rörfen visade god potential för fytostabilisering av rötslam. Förutom svartvide som uppvisade mycket höga halter av zink, hade växter odlade i rötslam låga metallhalter i bladen, varför de inte anses utgöra någon risk för betande djur. Störst del av de upptagna metallerna ackumulerades i rötterna.



## Summary

Mining generates wastes, i.e. tailings, which are deposited in impoundments. In the presence of oxygen and water, tailings weather, releasing low-pH metal-rich water called acid mine drainage. Today, these impoundments are covered with a layer of water or glacial till. Instead of till, waste products such as fly ash and sewage sludge could be used as cover materials. Ash tends to increase the pH, and can be applied on top of tailings covered by sludge in which plants can be established. Since plants can take up metals and nutrient elements, establishment of vegetation should reduce the leaching of these elements from the sludge. If the metal uptake into the plant shoot is high, however, plants could pose a risk to grazing animals.

The aim of this study was to investigate:

1. common plant species with high biomass growth in environments where mine tailings exist,
2. ability of various plant species in becoming established in sewage sludge,
3. the effects of various plant species on the formation of leachate and its metal and nutrient content, and
4. whether the metal uptake of tested plant species is high and could pose a threat to grazing animals.

An inventory was performed of plants growing in sludge in the vicinity of mine tailings impoundments in Boliden and Garpenberg, Sweden. Thereafter, chosen plant species were established in the field in sludge covering the Gillervattnet mine tailings impoundment in Boliden. Greenhouse studies also investigated plant establishment, either in sludge only or in sludge mixed with sand, mine tailings, bark, or bio fuel fly ash. Pore water was sampled in the field and the effect of growing plants on the leachate from sludge was tested in greenhouse. In addition, a leachate experiment was conducted in which sludge was placed in direct contact with the tailings, covered with a layer of fly ash and then another layer of sludge. The performance of this "sandwich model" was compared with that of directly covering the tailings with an ash layer, in turn covered with sludge. The leachates from the different studies were analyzed for nitrate, ammonium, phosphate, copper, cadmium, and zinc. The uptake of metals by plants growing in field or in model impoundments was also analyzed.

Results indicate that sewage sludge is suitable for plant establishment. Fresh or dried sludge can pose problems, especially when establishing seedlings in it, though it works well with direct seeding. Mixing sludge with sand or bark increases the chances of plant establishment. The leakage of metals from mine tailings was greatly reduced by covers of fly ash and sludge; no matter which of the materials that was placed in direct contact with the tailings. Nitrogen and metals can, however, leach from the sludge, though plant establishment can decrease this leaching, especially by decreasing the amount of leachate. In particular, the bio fuel crop, *Phalaris arundinacea* (reed canary grass), displayed good potential to stabilize sludge. Apart from *Salix myrsinifolia* (dark leaved willow) that contained very high zinc levels in its leaves, metals were accumulated to highest extent in the roots, and the risk to grazing animals seems therefore to be negligible.

# 1 Bakgrund

Vid utvinning av metaller bildas en finkornig restprodukt, s.k. anrikningssand, som innehåller metaller, ofta bundna till sulfider. En del av sanden kan pumpas tillbaka till tömda bergrum, men avsevärda mängder måste också deponeras utomhus i sandmagasin som kan vara upp till flera kvadratkilometer i storlek. Om sanden lämnas utan täckning kan den börja vittra eller spridas för vinden, och växter som skulle kunna binda sanden har svårt att etablera sig då näringsnivån är mycket låg. Vittring sker genom att sulfiderna i sanden reagerar med vatten och syre, varvid metaller frigörs och pH sänks. Avrinande vatten kan bli mycket surt och innehålla stora mängder lösta metaller och utgöra en risk för omkringliggande ekosystem. För att förhindra vittring och vindspridning bör deponierna täckas, antingen med ett torrt material (torrtäckning) eller med vatten (våttäckning). Vid torrtäckning anläggs vanligtvis ett tätskikt på ca 0,3 m av tät packad morän. Ovanpå detta läggs ett 1–2 meter tjockt tätskikt av lösare morän, i vilket växter kan etableras. Ett problem är dock tillgången på morän till dessa stora ytor samt den åverkan på naturen en moränförflyttning åstadkommer. Vid våttäckning täcks anrikningssanden av vatten för att förhindra att sanden nås av syrgas. För att åstadkomma detta behövs ett vattendjup på ca 1–2 m för att förhindra omrörning av sanden, vilket kräver att kostnadskrävande vallar konstrueras kring magasinet, alternativt att sanden pumpas ut i en befintlig sjö där en lämplig vattenmängd sparas som kan täcka sanden. I bägge fallen krävs ett tillrinningsområde som är av den storleken att en positiv vattenbalans kan tryggas.

Ett alternativ till våttäckning är att anlägga en våtmark på sanden. Dessa kräver inte samma vattendjup och samma tillrinningsområde för att sanden ska hållas vattenmättad och dessutom etableras en vegetation. Våtmarksväxter har en gynnsam effekt genom att de minskar tillgången på fria metaller och håller pH på en neutral nivå (5–7) samt minskar syrehalten i läckagevattnet (Stoltz & Greger 2002a). Dessutom bildar de successivt en organisk matta som konsumerar det syre som annars skulle bidra till vittringen i sanden.

Vid anläggande av våtmark eller torrtäckning behöver dock näring tillsättas för att få en effektiv

växtetablering. Näringen bör ges i en form som ger en långtidseffekt, och inte som konstgödsel vid etableringstillfället. Detta prövades exempelvis vid efterbehandlingen av sandmagasinet i Saxdalen, där gräs- och andra växtfrön spreds över stora ytor tillsammans med konstgödsel (Nils Eriksson, Boliden pers. kom.). Växterna etablerade sig, men växte enbart under ett par säsonger, eftersom näringen försvunnit och inte tillräckligt med organiskt material hade bildats. På Höbäcksdalsmagasinet i Boliden spred kommunen istället ut avloppsvatten under 15 års tid. Detta satte fart på en naturlig växtetablering, och idag finns där en väl fungerande våtmark. Även rötslam (med eller utan inblandning av flygaska) har visat sig vara en passande växtnäringsprodukt vid växtetablering direkt på den näringsfattiga anrikningssanden (Borgegård & Rydin 1989, Stoltz & Greger 2002a). Det ger inte bara näring över en längre tidsperiod, tack vare långsamt läckage, utan är även början till ett organiskt skikt, som kan konsumera syre och har en vattenhållande kapacitet (Borgegård & Rydin 1989). Även på Lilla Bredsjömagasinet i Garpenberg har flera ytor som täckts med slam fått en tät och livskraftig vegetation. Där har dels lokalt avloppsslam spridits i ett tunt skikt under många år, i vilket en riklig vegetation etablerat sig självmant, och dels rötat slam från Stockholm lagts ut i ett tjockare skikt, där gräs såtts in (se omslagsbilden). Rötslam tycks därför kunna fungera väl som alternativ till morän för växtetablering vid en storskalig efterbehandling av sandmagasin.

Vid torrtäckning är det fördelaktigt om täckningen består av två skikt, ett underliggande tätskikt, och ett överliggande tätskikt vari växter kan etableras. För konstruktion av ett effektivt tätskikt kan restprodukten flygaska användas, antingen oblandad eller i kombination med rötslam (Carling m.fl. 2007). Flygaska som packas och fuktas med vatten härdar ihop och bildar ett mycket tätt och bärkraftigt skikt, och kan därmed minska vatten- och syregenomträngning till anrikningssanden och förhindra vittring. Flygaska kan också ha en positiv effekt om det tillsätts i små mängder tillsammans med rötslam till våtmarker på anrikningssand (Stoltz & Greger 2006), i och med att askan ofta har ett högt pH som kan motverka sandens försurande effekt.

För att skydda tätskiktet från uttorkning, samt öka möjligheterna för växtetablering kan ett tätskikt av rötslam läggas ut ovanpå askan.

Rötat slam, flygaska och anrikningssand är alla avfallsprodukter som innehåller tungmetaller (Eriksson 2001, Steenari, Schelander & Lindqvist 1999, och Stoltz & Greger 2002a, b). Rötslam har ett neutralt pH och innehåller även stora mängder näringsämnen, organiskt material samt en del organiska föroreningar i låga halter (Nilsson 1996, Eriksson 2001). Att använda rötat slam i samband med växtodling i jordbruket har diskuterats under flera decennier. På grund av tungmetallinnehållet har användningen av slam i jordbruk minskat, trots att långtidsstudier visat positiva effekter av slam användning i jordbruket, med skördeökningar utan förhöjda halter av metaller eller organiska föroreningar i mark och växt (Andersson & Nilsson, 1992). Utlägg av rötslam i tätskikt innebär dock att större mängder används än vid gödsling av jordbruksmark, vilket kan leda till läckage av näring och metaller.

Växter med en hög förmåga att ta upp metaller skulle kunna minska risken för metall-läckage till utgående vatten, men skulle å andra sidan kunna öka risken för att metaller överförs till betande djur,

om en stor del av metallerna transporteras upp i skotten. Vass som planterats i slambäddar har både ökat i tillväxt och tagit upp metaller (Hardej & Ozimek 2002, Glass 2000). Men olika växtarter, liksom olika sorter av en och samma art, är olika effektiva på att ta upp och transportera metaller till skottet (Greger, Landberg & Berg 2001, Stoltz & Greger 2002b), vilket också skiljer sig mycket mellan olika element (Stoltz & Greger 2002a). Om förmågan att ackumulera eller fastlägga metaller i rotzonen är låg hos växterna uppstår en risk att metallerna istället sprids till omgivande vatten. Därför är det viktigt att få kunskap om vilka växter som har förmågan att stabilisera toxiska ämnen i rotzonen samtidigt som transporten av dem till skottet är lågt. För att förhindra läckage av näring bör de växter som etableras ha en snabb tillväxt och högt upptag av näring och vatten. Frågan är vad som händer i rötslammet vid odling av snabbväxande växter, eftersom förändrade hydrologiska förhållanden kan ändra lösligheten för många ämnen, som metaller. I arbetet med att ta fram en effektiv metod för efterbehandling av sandmagasin med restprodukter är det värdefullt att få mer kunskaper om hur olika typer av vegetation påverkar läckaget av näring och metaller från de olika restprodukterna.

## 2 Syfte

*Syftet* med föreliggande undersökning är att ta reda på lämpliga växtarter för etablering i rötat slam som täckskikt på avslutade gruvavfallsdeponier.

Projektets *delmål* har varit att:

- Inventera möjliga, vanligt förekommande växter som kan växa i kallt klimat. Växterna bör ha en god kolonisationsförmåga och hög biomassaproduktion.
- Välja ut lämpliga växtarter och undersöka deras förmåga att etablera sig i röttslam.
- Analysera valda växters inverkan på läckagevatten från röttslam, flygaska och anrikningssand.
- Studera valda växters upptag av metaller från röttslam.



Röttslam utlagt på anrikningssandsmagasinet Gillervattnet, Boliden. På bilden syns kanten av en försöksruta som består av tre lager täckmaterial: röttslam, flygaska och röttslam (s.k. "sandwich"-modell). Anrikningsverket syns i bakgrunden. Foto: Clara Neuschütz

## 3 Material och metodik

### 3.1 Täcksiktmaterial, anrikningssand och växtmaterial

#### 3.1.1 Täcksiktmaterial

Det täcksiktmaterial som har använts i undersökningen är välrötat slam från Henriksdal-Sickla slamanläggning i Stockholm. Upptagningsområdet är södra Stockholm i vilket ingår hushåll, industri, dagvatten m.m. Innehåll av element i rötslam från valda år presenteras i tabell 3-1.

I fältförsöken, samt i några av växthusförsöken, har flygaska använts som material i tätsikt. Leverantörer av askorna har varit Stora Enso Fors, Hedensbyn (Skellefteå Kraft), samt Munksunds pappersbruk (Tabell 3-2). Samtliga askor är flygaskor från förbränning av biobränsle i CFB-pannor (Circulating fluidized bed).

Tabell 3-2 Analys av flygaskor. LOI = loss on ignition (glödningsförlust), EC = electrical conductivity (elektrisk konduktivitet).

|                                    | Fors   | Munksund |
|------------------------------------|--------|----------|
| pH                                 | 12,1   | 12,8     |
| LOI (%)                            | 9,0    |          |
| EC (mS/cm)                         | 12,3   | 16,6     |
| TS (%)                             | 99,8   | 99,6     |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 39,2   | 35       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 16,3   | 9,38     |
| CaO (%)                            | 19,6   | 25,7     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 1,2    | 4,06     |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 4,17   | 5,47     |
| MgO (%)                            | 1,8    | 3,85     |
| MnO (%)                            | 0,83   | 1,73     |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 2,5    | 1,96     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 1,7    | 2,61     |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0,164  | 0,304    |
| As (mg/kg TS)                      | 4,35   | 17,5     |
| Cd (mg/kg TS)                      | 5,42   | 14,8     |
| Co (mg/kg TS)                      | 5,09   | 12,6     |
| Cr (mg/kg TS)                      | 49,4   | 74,7     |
| Cu (mg/kg TS)                      | 52,9   | 247      |
| Hg (mg/kg TS)                      | 0,03   | 0,409    |
| Mo (mg/kg TS)                      | 17,2   | 7,34     |
| Ni (mg/kg TS)                      | 17,0   | 38       |
| Pb (mg/kg TS)                      | 32,2   | 168      |
| S (mg/kg TS)                       | 12 300 | 10 700   |
| Zn (mg/kg TS)                      | 1 460  | 1 880    |

Tabell 3-1 Innehållsbeskrivning av rötslam från Henriksdal-Sickla slamanläggning. Medelvärden från de månader då slam hämtats för försök i projektet.

| Element       | September 2002 | September 2003 | Oktober 2006 | Juli 2007 |
|---------------|----------------|----------------|--------------|-----------|
| TS (%)        | 28,2           | 32,3           | 28,3         | 27,2      |
| Tot-P (%)     | 3,9            | 3,7            | 3,8          | 3,7       |
| Ag (mg/kg TS) | 15             | 5,4            | 6,0          | 8,2       |
| B (mg/kg TS)  | 14             | 9,4            | 13           | 17        |
| Cd (mg/kg TS) | 1,2            | 0,8            | 0,9          | 1,0       |
| Co (mg/kg TS) | 10             | 10,5           | 9,5          | 10        |
| Cr (mg/kg TS) | 24             | 20             | 23           | 22        |
| Cu (mg/kg TS) | 400            | 325            | 360          | 380       |
| Hg (mg/kg TS) | 1,5            | 1,3            | 1,0          | 1,3       |
| Mn (mg/kg TS) | 150            | 155            | 160          | 170       |
| Mo (mg/kg TS) | 5,1            | 13,8           | 5,1          | 5,0       |
| Ni (mg/kg TS) | 23             | 21,8           | 23           | 24        |
| Pb (mg/kg TS) | 39             | 24,8           | 34           | 30        |
| Zn (mg/kg TS) | 570            | 503            | 570          | 640       |

### 3.1.2 Anrikningssand

Anrikningssand har använts i en del av studierna i växthus. Denna kommer från Bolidens anrikningssandsmagasin Gillervattnet i Boliden och är ovittrad eller delvis vittrad (Tabell 3-3).

Tabell 3-3 Innehåll av element i anrikningssand från Gillervattnet.

| Element                               | Anrikningssand |
|---------------------------------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub> (% TS)               | 24,7           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% TS) | 4,33           |
| CaO (% TS)                            | 2,11           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% TS) | 39,3           |
| K <sub>2</sub> O (% TS)               | 0,503          |
| MgO (% TS)                            | 4,00           |
| MnO <sub>2</sub> (% TS)               | 0,0724         |
| Na <sub>2</sub> O (% TS)              | 0,311          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (% TS)  | 0,0687         |
| TiO <sub>2</sub> (% TS)               | 0,285          |
| S (% TS)                              | 30,6           |
| As (mg/kg TS)                         | 1 763          |
| Cd (mg/kg TS)                         | 28             |
| Cu (mg/kg TS)                         | 849            |
| Fe x 10 <sup>3</sup> (mg/kg TS)       | 284            |
| Pb (mg/kg TS)                         | 1 972          |
| Zn (mg/kg TS)                         | 8 361          |

### 3.1.3 Växtmaterial

Deponier för gruvavfall förekommer i Sverige till stor del i områden med ett kallt klimat, där många växter kan ha svårt att etablera sig. För att få en förståelse för vilka växtarter som har förmåga att av sig själva etablera sig i rötslam i dessa områden



gjordes en översiktlig florainventering av två ytor. Dels inventerades en höjd bredvid anrikningssandsdeponin Gillervattnet vid Boliden, där rötslam deponerats under ett par år innan inventeringen utfördes, och dels inventerades den nordvästra delen av Lilla Bredsjömagasinet, en deponi för anrikningssand vid Garpenberg, som under en period

av 30 år har täckts av ett tunt lager av slam från ortens reningsverk. Dessa två lokaler är markerade på kartan. Inventeringarna gjordes vid ett tillfälle på vardera plats, i juli 2002.

Från de växter som återfanns på dessa områden valdes några ut för vidare studier av deras etableringsförmåga i utlagt rötslam, upptag av metaller och förmåga att påverka läckage av näring och metaller från slammet. Dessutom valdes ytterligare några videarter (*Salix* spp) och gräset rörfilen, eftersom de kan odlas som energigrödor och därmed ha ekonomisk betydelse. I tabell 3-4 listas alla arter som har använts i de olika studierna, både i fält och i växthus. Plantor och sticklingar har dels hämtats i fält och dels köpts in från plantskolor. Många av växterna är även etablerade från insamlade eller inköpta frön. De växter som överfördes i form av uppvuxna plantor var vid överföringen mellan 10 och 20 cm höga.

## 3.2 Etablering av växter i rötslam

### 3.2.1 Fältförsök

Rötslam och flygaska har under perioden 2003–2006 successivt lagts ut på olika försöksytor på anrikningssandsmagasinet Gillervattnet vid Boliden. Syftet med utläggget var att se om rötslam kan användas som täckmaterial och substrat för vegetationsetablering samt om flygaska fungerar som tätskikt, med eller utan inblandning av rötslam, och därmed kan förhindra vittring av sulfidrik anrikningssand. Som tätskikt har bioflygaska från Munksund och Hedensbyn lagts ut i två rutor om 1 ha, med 0,5 eller 1 m tjocklek, och med eller utan inblandning av 70 % rötslam till 30 % flygaska (baserat på volym). Dessutom lades en 0,5 ha stor yta ut med enbart rötslam (0,5 m djupt) som tätskikt. Ovanpå dessa tre skikt har rötslam lagts som tätskikt i mindre rutor av olika tjocklek. Dessa rutor lades ut enligt följande:

#### Etableringsruta

I augusti 2003 lades en 10 x 30 m stor ruta med rötslam av en tjocklek av 0,3 m på tätskiktet av enbart flygaska. I rutan planterades, sattes och såddes 17 olika växtarter (Tabell 3-4) i slumpvis utlagda rader

Tabell 3-4 Växter som använts vid studierna av vegetationsetablering och läckage från rötslam. Siffrorna i sista kolumnen anger vilket försök de har använts i: 1) Etablering i fält, 2) Etablering i fält på olika tätskikt, 3) Etablering i växthus, 4) Porvattenförsök i fält, 5) Läckageförsök 1 och 2 och vattenupptagningsförsök, 6) Sandwich-försök, 7) Kvävepreferens, 8) Metallupptag i växter.

| Svenskt namn                                                                                     | Latinskt namn<br>sort                                                                                                                                                                                                      | Insamlingsplats,<br>inköpsställe                              | Försök /<br>etableringsform                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Blomsterlupin                                                                                    | <i>Lupinus polyphyllus</i>                                                                                                                                                                                                 | Fält vid Botaniska inst,<br>Stockholm                         | 1 / Frön                                                    |
| Glasbjörk                                                                                        | <i>Betula pubescens</i>                                                                                                                                                                                                    | Gillervattnet                                                 | 2 / Plantor                                                 |
| Gran                                                                                             | <i>Picea abies</i><br>var Hissjö + Björkebo<br>var Ålbrunna                                                                                                                                                                | Gillervattnet<br>Wallons Skogsplantor<br>Svenska Skogsplantor | 1 / Plantor<br>1, 2 / Plantor<br>3 / Plantor                |
| Hästhov                                                                                          | <i>Tussilago farfara</i>                                                                                                                                                                                                   | Gillervattnet                                                 | 1 / Plantor                                                 |
| Honungsört                                                                                       | <i>Phacelia tanacetifolia</i>                                                                                                                                                                                              | Svalöf Weibull                                                | 1 / Frön                                                    |
| Industrihampa                                                                                    | <i>Cannabis sativa</i>                                                                                                                                                                                                     | Svalöf Weibull                                                | 2 / Frön                                                    |
| Korgvide                                                                                         | <i>Salix viminalis x schwerinii</i><br>klon Tora                                                                                                                                                                           | Fält vid Botaniska inst,<br>Stockholm                         | 1, 5, 7, 8 / Sticklingar                                    |
| Mjölkört                                                                                         | <i>Epilobium angustifolium</i>                                                                                                                                                                                             | Gillervattnet                                                 | 1, 3, 5, 7, 8 /<br>Frön samt rhizom                         |
| Perserklöver                                                                                     | <i>Trifolium resupinatum</i>                                                                                                                                                                                               | Svalöf Weibull                                                | 1 / Frön                                                    |
| Rödsvingel                                                                                       | <i>Festuca rubra rubra</i><br>var Kristina + Diego                                                                                                                                                                         | Svalöf Weibull                                                | 1 / Frön                                                    |
| Rödven                                                                                           | <i>Agrostis capillaris</i><br>var Boral                                                                                                                                                                                    | Svalöf Weibull                                                | 1, 3 / Frön                                                 |
| Rörflen                                                                                          | <i>Phalaris arundinacea</i><br>var Palaton + Bamse                                                                                                                                                                         | Svalöf Weibull                                                | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 /<br>Frön                            |
| Sälg                                                                                             | <i>Salix caprea</i>                                                                                                                                                                                                        | Gillervattnet                                                 | 1, 2 / Sticklingar                                          |
| Svartvide                                                                                        | <i>Salix myrsinifolia</i>                                                                                                                                                                                                  | Gillervattnet                                                 | 1, 2, 8 / Plantor                                           |
|                                                                                                  | <i>Salix myrsinifolia</i><br>klon SWE1                                                                                                                                                                                     | Fält vid Botaniska inst,<br>Stockholm                         | 1, 3 / Sticklingar                                          |
| Tall                                                                                             | <i>Pinus sylvestris</i><br>var Skaholma<br>var Almnäs                                                                                                                                                                      | Gillervattnet<br>Wallons Skogsplantor<br>Svenska Skogsplantor | 1 / Plantor<br>2 / Plantor<br>5, 8 / Plantor<br>3, 7 / Frön |
| Turftimotej                                                                                      | <i>Phleum bertolonii</i><br>var Parant                                                                                                                                                                                     | Svalöf Weibull                                                | 1 / Frön                                                    |
| Vägsbläntsblandning:<br>rödsvingel<br>engelskt rajgräs<br>hårdsvingel<br>turftimotej<br>ängsgröe | <i>Festuca rubra rubra</i><br>var Kristina + Lovisa + Wilma<br><i>Lolium perenne</i><br>var Kavat<br><i>Festuca brevipila</i><br>var Barfina<br><i>Phleum bertolonii</i><br>var Parant<br><i>Poa pratensis</i><br>var Opal | Svalöf Weibull                                                | 1, 2, 4 / Frön                                              |
| Vårtbjörk                                                                                        | <i>Betula pendula</i>                                                                                                                                                                                                      | Gillervattnet<br>Skogforsk                                    | 1 / Plantor<br>3 / Frön                                     |
| Vattenpil                                                                                        | <i>Salix dacyclados</i><br>klon 81090                                                                                                                                                                                      | Fält vid Botaniska inst,<br>Stockholm                         | 1 / Sticklingar                                             |
| Vitgröe                                                                                          | <i>Poa annua</i>                                                                                                                                                                                                           | Svalöf Weibull                                                | 4 / Frön                                                    |
| Ängsgröe                                                                                         | <i>Poa pratensis</i><br>var Sobra                                                                                                                                                                                          | Svalöf Weibull                                                | 1, 3 / Frön                                                 |

(tre rader av varje art). I juni 2004 kompletterades höstplanteringen med nya skott av korgvide, svartvide och vattenpil från Botaniska institutionen och pluggplantor av gran och tall, då dessa arter hade haft en mycket låg överlevnad över vintern. I oktober 2004 såddes även honungsört och perserklöver. För att testa några olika planteringsmaterial för etablering lades små rutor ut där vägläntsblandning och rörfen såddes. Rutorna täcktes innan sådd av barkflis eller sand från grusplanen.

#### **Rutor på olika tätskikt**

I juni 2004 lades tre stycken 6,5 x 5 m stora rutor med rötslam av en tjocklek av 0,3 m ut på tätskiktet med enbart aska, aska/rötslam och enbart rötslam. Dessutom lades på tätskiktet av flygaska en ruta med barkflis täckt med rötslam (ca 15 cm av vardera lager), för att se om bark kunde underlätta växtetablering. Syftet med dessa rutor var att se om någon av dessa växters rötter skulle kunna växa ned i tätskiktet nedanför. I alla rutorna såddes, sattes och planterades 7 olika arter (Tabell 3-4), i fyra slumpvis utplacerade rader i varje ruta. En månad efter etableringen avlästes överlevnad och döda plantor ersattes med nya, då det visade sig att vissa arter hade haft svårt att etablera sig i det färska slammet. I änden på de två rutor som lades ut på tätskiktet av flygaska såddes i juli 2005 även snabbväxande industrihampa.

#### **Rutor för porvattenprovtagning**

På hösten 2004, i juni 2005 samt i juni 2006 lades större slamytor ut på tätskiktet av flygaska, i vilka rörfen och vitgröe såddes på valda ytor, medan andra lämnades för naturlig succession, alternativt hölls fria från växter. Syftet med dessa rutor var att studera effekten av olika gräs samt ogräs på porvattenet i slammet, men det gick även att dra slutsatser om dessa växters förmåga att etablera sig i rötslammet från detta försök. Mer om dessa rutor står att läsa under rubriken *3.3.1 Porvattenprovtagning i fält*.

I rutorna som lades ut för att studera växtetablering i augusti 2003 samt juni 2004 lästes överlevnaden av växterna av varje sommar under åren 2004–2007. Antal plantor som var vid liv noterades för träd och buskar, medan täckningsgrad samt skothöjd noterades för gräsen.

### **3.2.2 Växthusförsök**

Eftersom det visade sig att fröer kan ha svårighet att gro i rötslam på grund av bildandet av en hård skorpa på slammet, satte vi upp två försök där olika material tillsattes rötslammet för att förbättra strukturen och förmågan att hålla vatten. Ett groningstest med 6 olika växtarter utfördes i rötslam med eller utan inblandning av sand eller anrikningssand. De arter som valdes var tall, vårtbjörk, mjölkört, rödven, rörfen och ängsgröe. Följande substrat samt blandningar användes:

- Såjord (Svalöf Weibull)
- Rötslam
- Rötslam / sand (2:1 i volym)
- Rötslam / anrikningssand (2:1 i volym)

Rötslammet hade efter hämtning från reningsverket legat 6 veckor i slutna plasthinkar. Före försöket siktades det genom ett såll med maskvidd 10 mm, medan sand och anrikningssand siktades genom ett 2 mm såll. Substraten blandades manuellt i plastpåsar under 1 minut, och lades därefter i 2 dl stora plastkrukor. I varje kruka såddes 25 frön av varje växtart, och 5 replikat av varje behandling användes. Krukorna placerades övertäckta med plast i växthus och vattnades med samma mängd destillerat vatten tre gånger i veckan. Efter 1, 2 och 3 veckor räknades antal grodda frön, och efter 3 veckor mättes biomassan av skotten efter 24 timmars torkning i 105° C. pH i substraten analyserades (Metrohm pH-meter) efter blandning med destillerat vatten (i volymförhållandet 2:1 vatten:substrat) som fick stå i 2 timmar.

Etableringsförmågan testades även hos sticklingar av svartvide samt hos ett-åriga granplantor (var Ålbrunna). Denna gång tillsattes även flygaska och bark för att se om de materialen kunde underlätta etablering. Följande blandningar användes:

- Såjord (Svalöf Weibull)
- Rötslam
- Rötslam / sand (2:1 i volym)
- Rötslam / anrikningssand (2:1 i volym)
- Rötslam / bark (2:1 i volym)
- Rötslam / bioflygaska (Hedensbyn) (2:1 i volym)

I detta fall användes rötslam som legat i plasthinkar i 10 månader. Plantorna av svartvide fick växa i 4 veckor, varefter skottbiomassan mättes efter torkning i 105° C under 24 timmar. Granplantorna



sattes med torvpluggen kvar i större krukor (4 dl) i substratblandningarna, och tilläts växa i 6 månader för att se hur de klarade sig på längre sikt. Vid avslut mättes biomassa hos barr, stam och rötter, samt längdtillväxt hos skotten. Dessutom analyserades klorofyllhalt i barr och enzymaktivitet i barr och rötter för att få en uppfattning om vilken stressnivå växterna utsatts för. Klorofyllhalten mättes enligt Arnon (1949). De enzymer som valdes är markörer för allmän stress och var glukos-6-fosfat dehydrogenas (G-6-PDH) och guaiacolperoxidas (GPOD) vilka analyserades enligt Bergmeyer, Gawehn & Grassl. (1974) och Van Assche, Cardinaels & Clisters (1988). pH i substratet mättes efter att 10 g lufttorkat substrat skakats med 50 ml vatten i förslutna plastbägare och sedan låtit stå 5 timmar.

### 3.3 Läckageförsök

#### 3.3.1 Porvattenprovtagning i fält

Syftet med detta försök var att studera effekten av olika typer av vegetation på porvattnets komposition i rötslam. Dessutom togs prover av porvatten i slam som legat ute under olika lång tid för att få reda på hur frisättandet av olika element ser ut i slam av olika åldrar, samt i skikt av olika tjocklek. Ett antagande bakom detta försök var att om mer närsalter och metaller frigörs från rötslammet till porvattnet är det också en större risk att dessa ämnen läcker ut till omgivningen.

Rötslam lades ut under hösten 2004 i form av 2 rutor a 65 x 15 m, med ett djup av 0,25 m respektive 0,5 m. I juni 2005 och i maj 2006 lades sedan två nya rutor (40 x 15 m respektive 22 x 12 m) ut av nylevererat slam med en tjocklek av 0,5 m. Under juni 2005 samt juni 2006 såddes rutorna in med växter. Eftersom det visat sig vid etableringsförsöken att vegetationsetablering i slam enklast utförs genom sådd av gräs, eller genom att växter tilläts att spridas naturligt från omkringliggande områden valdes till denna studie två olika gräs, ogräs samt kontroll. Gräsen utgjordes av ett flerårigt snabbväxande gräs med djupgående rötter (rörflen) samt ett ettårigt gräs med ytliga rötter (vitgröe). Ogräset utgjordes av

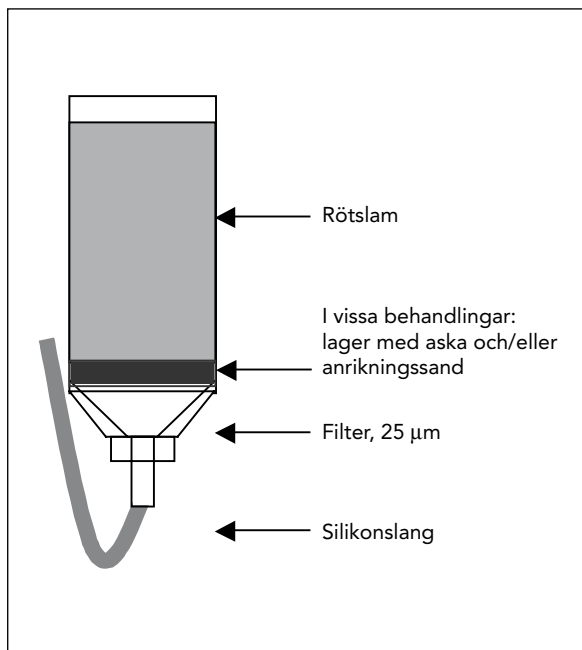
växter som tog sig in från omkringliggande områden via fröspridning. I kontrollrutorna hölls växter borta genom rensning för hand två gånger per år. Rutorna var 7 x 7 m stora och lades ut i tre replikat.

Porvattenprovtagare (MacroRhizon soil moisture samplers, Eijkelkamp, Holland) sattes ned i täckskikt av rötslam med 45° vinkling 20 cm under ytan i maj 2006. Prover av porvatten togs genom att en 30 ml spruta sattes med undertryck till en slang kopplad till provtagaren under 24 timmar. Detta gjordes i maj 2006 samt i oktober 2006. Försök gjordes även under sommaren att ta prov, men då det var en ovanligt torr sommar var det omöjligt att få ut tillräckligt med porvatten vid dessa tillfällen. Porvattenproverna lades i kylväska och transporterades till laboratorium där de analyserades för pH, konduktivitet samt innehåll av ammonium, nitrat och fosfat. Analyserna gjordes spektrofotometriskt vid 640 nm för ammonium och 220 nm för nitrat (Clesceri & Greenberg 1995) samt vid 880 nm för fosfat (Murphy & Riley 1962). Därefter lagrades proverna i kylrum tills de kunde analyseras för innehåll av Zn, med hjälp av atomabsorptionsspektrofotometri (VarianSpektrAA).

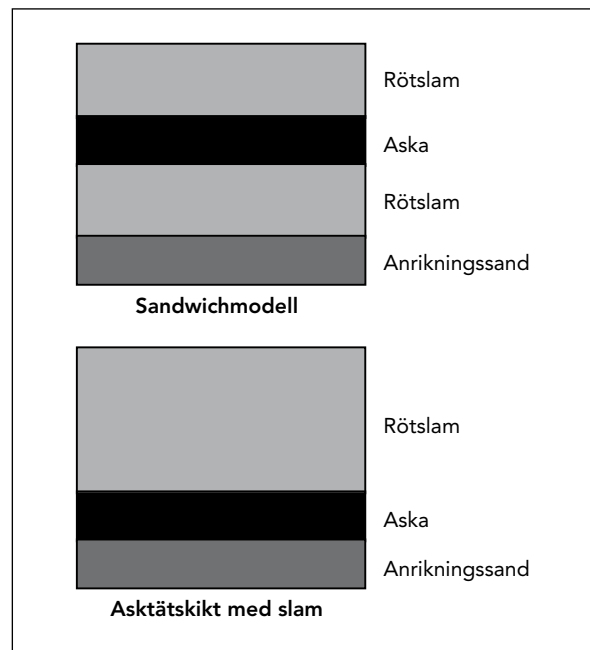
#### 3.3.2 Läckageförsök 1 – rötslam på flygaska och anrikningssand

För att se om växter har någon inverkan på läckaget av näring och tungmetaller från rötslam på flygaska och anrikningssand så odlades rörflen i lysimetrar (volym 1 l) (Figur 3-1) i växthus, under 11 veckor. Rötslam lades på ett lager av härdad bioflygaska från Munksund, och/eller ovittrad anrikningssand från Gillervattnet, Boliden. För att underlätta vatten genomströmning mortlades och sållades (2 mm) den härdade askan innan iläggning. I lysimetrar med både aska och anrikningssand låg askan ovanpå anrikningssanden. Även lysimetrar med enbart rötslam användes. Mängden material (TS) i lysimetrarna var: 100 g rötslam, 40 g aska och 70 g anrikningssand.

Försöket utfördes i växthus med 18 timmar ljus/6 timmar mörker samt 19° C/17° C dag/natt-temperatur. Tre gånger i veckan tillsattes 100 ml destillerat vatten som fick perkolera genom lysimetrarna. Efter 11 veckor togs vattenprover genom att 200 ml vatten läts stå i lysimetrarna under 60 minuter innan



Figur 3-1 Lysimeter använd i läckageförsök.



Figur 3-2 Schematisk skiss av dels "sandwich"-modellen med rötslam/flygaska/rötslam, samt en modell där aska ligger mot anrikningssanden och täcks av rötslam.

det släpptes ut genom slangen och tappades upp i plastflaskor. I vattenproverna analyserades kväve, fosfor, Cd, Cu, Pb, Zn, pH och konduktivitet. Ammonium, nitrat och fosfat analyserades spektrofotometriskt (enligt Clesceri och Greenberg 1995, respektive Murphy & Riley 1962) och metaller med atomabsorptions-spektrofotometri (Varian SpectrAA). Metallhalter mättes även i rötter och skott av de växter som använts i försöket (se avsnittet 3.4 *Metallupptag i växter*).

### 3.3.3 Sandwich-försök

Vid provtagning av grundvatten i anrikningssand under olika typer av tätskikt på Gillervattnet, har indikationer kommit om att metallhalterna är lägre då rötslam ligger i direkt kontakt med anrikningssanden jämfört med om flygaska gör det. Därför sattes ett växthusförsök upp där två olika täckningsmetoder testades, enligt figur 3-2.

I kortsidan av lådor av transparent polypropylen (volym 3 l.) skars 3 triangulära hål (med 1 cm långa sidor) 2 cm över botten. Innanför hålen sattes ett filter av polyamid med maskvidd 25 µm (Sintab Pro-

dukt AB, Oxie, Sverige) samt ett lager med glasull för att förhindra att filtret blev igenmurat med anrikningssand. Därefter lades delvis vittrad anrikningssand från Gillervattnet i, och täcktes med rötslam och flygaska (bioflygaska från Stora Enso Fors AB) enligt de två modellerna (Figur 3-2). Rötslammet hade efter leverans legat utspritt på ett plastskynke för luftning i 3 veckor, och därefter siktats (1 cm). Varje låda ställdes i en lika stor ej transparent låda, med ett 3 cm högt mellanrum för att få ett lämpligt utrymme i den yttre lådan för läckagevatten. I hälften av behållarna såddes rörflen för att studera effekten av en växt i de bägge modellerna. Dessutom gjordes en behandling med enbart anrikningssand. Fyra replikat av varje behandling användes.

Lådorna vattnades tre gånger i veckan med en bestämd mängd vatten. Mängden vatten ökades under försökets gång för att ge tillräcklig mängd lakvatten. En gång varannan vecka samlades lakvattnet in, vägdes och analyserades för pH och konduktivitet och höllades upp i burkar med salpetersyra (5 µl/l) för lagring i kyl tills analys av metaller kunde genomföras. Metaller (Cd, Cu, Zn) analyserades med atomabsorptionsspektrofotometri (Varian SpektrAA). Försöket pågick i 12 veckor. Vid avslut mättes biomassa hos växterna, och vattenhalt i de olika materialen.

### 3.3.4 Läckageförsök 2 – olika växters påverkan på rötslam

Olika typer av växter har olika växtsätt och påverkar det substrat de lever i på varierande sätt. Det är därför troligt att växter också påverkar läckage av ämnen från rötslam olika. För att testa detta sattes detta växthusförsök upp, där fyra växtarter med skilda växtsätt odlades under 10 veckor i rötslam. De valda växterna var tall, korgvide, mjölkört och rörflen. Växterna drevs upp i vermiculit och fördes efter 3 veckor över till lysimetrar (samma som i läckageförsök 1, Figur 3-1) med ca 0,9 liter rötslam. Behållarna vattnades tre gånger i veckan med destillerat vatten. Vid varje vattningstillfälle togs vattenprover efter att vattnet först stått i lysimetrarna i 30 min och därefter tillåtit rinna ut under 30 min i plastpåsar. Plastpåsarna vägdes och proverna sparades efter filtrering (0,45 µm sprutfilter) i kyl. En gång per vecka mättes pH, konduktivitet, ammonium, nitrat och fosfat i läckagevattnet med samma metod som i läckageförsök 1. Metaller (Cd, Cu och Zn) analyserades i läckageprover som poolats ihop från vecka 1–3, vecka 4–7 och vecka 8–10, enligt ovan beskriven metod. Vid avslut mättes biomassa och vattenhalt i slammet och partikelhalt i vattnet.

### 3.3.5 Vattenupptag i olika typer av växter

Detta försök gjordes för att få en bättre bild av vilken förmåga de växtarter som använts i läckage-testen har att snabbt etablera sig och ta upp vatten. En växt som snabbt formar ett rotsystem med hög förmåga att ta upp vatten bör också ha en större förmåga att förhindra ett initialt läckage av näring och metaller från nyutlagt rötslam. Vi ville också ta reda på om frigörelse av näring ser annorlunda ut då rötslammet hålls fuktigt hela tiden, jämfört med om det torkar ut olika mycket med olika växter som det gjorde i läckageförsöken.

Tall, korgvide, mjölkört och rörflen odlades i rötslam i krukor på övertäckta fat där utrunnet vatten samlades och kunde tas upp av växten. Tre gånger i veckan vattnades krukorna med en mängd destillerat vatten som anpassades för varje växts behov. Mängden tillsatt vatten noterades, och mängden utrunnet vatten vägdes innan varje vattning för att se hur mycket växterna tagit upp sedan föregående vattning. Åtta replikat användes och försöket pågick

i 10 veckor. Vid avslut togs vattenprov från en genomvattning och analyserades för pH, konduktivitet, ammonium, nitrat och fosfat, enligt samma metoder som i läckageförsöken. Växternas biomassa mättes samt slammets vattenhalt.

### 3.3.6 Kvävepreferens hos olika växter

Eftersom rötslam innehåller en stor mängd kväve som riskerar att läcka ut efter utläggning, är det viktigt att välja växter som har förmågan att ta upp kväve i olika former. Vissa växter tar huvudsakligen upp kväve i ammonium-form, vilket kan vara fördelaktigt i början då kvävet till stor del förekommer i den formen i slammet (Smith & Tibbett 2004). Det tar dock inte lång tid innan ammoniumkväve börjar omvandlas till nitratkväve, varför det är bra om de växter som etableras kan ta upp kväve både som ammonium och nitrat. Växter kan även ta upp organiskt kväve, men ammonium och nitrat är de som huvudsakligen ansvarar för växters kvävetillförsel (Marschner 1995).

I detta test undersökte vi vilken kväveform som fyra olika växtarter föredrar, genom att mäta hur mycket av ammonium- respektive nitratkväve som försvinner från odlingsmediet. Tall, korgvide, mjölkört och rörflen odlades upp i 50 % Hoaglands näringslösning under 5 veckor. Två dagar innan försöket startades sänktes näringsnivån till 1 %, eftersom försöket måste utföras vid en låg näringsnivå för att upptaget skulle kunna avläsas. Vid försökets start fördes 12, 1, 2 och 8 plantor av tall, korgvide, mjölkört och rörflen över till 0,15 l plastbehållare med en modifierad 1 % Hoaglands näringslösning innehållande 60 µM av ammonium-N och 60 µM av nitrat-N. Antalet plantor per behållare valdes så att rotbiomassan skulle vara liknande i varje behållare. Växterna monterades i skumplast, som även täckte kontrollbehållarna utan växter. Sex replikat användes. Vid tidpunkterna 0; 0,5; 1,5; 3; 6; 21 och 27 timmar togs vattenprover om 2 x 2 ml som sparades i eppendorf-rör i kylskåp tills dagen efter då de analyserades för ammonium- och nitratinnehåll spektrofotometriskt vid 640 respektive 220 nm (Clesceri och Greenberg 1995). Försöket utfördes två gånger med olika pH vid start, först med pH ställt till 5,6 och därefter till 7,0. Vid avslut mättes pH i lösningarna samt mängden vatten och växternas biomassa.

### 3.4 Metallupptag i växter

Ett högt upptag av metaller i växter som odlas i rötslam kan å ena sidan medföra ett minskat läckage av metaller till omgivningen, men också utgöra en risk för betande djur. Vid några av försöken i fält och i växthus har prover av olika arter tagits och analyserats för valda metaller.

I september 2006 togs växtprover vid fältförsöket på Gillervattnet; blad från rörflen från rutor utlagda under åren 2003, 2004 (50 och 25 cm), 2005 och 2006, vitgröe i rötslam från 2004 och 2005, samt svartvide och korgvide (Tora) i slam från 2003. Bladen tvättades med destillerat vatten och doppades 3 sekunder i 20 mM EDTA (etylendiamintetraättiksyra) för att avlägsna metaller adsorberade på ytan, sköljdes åter i destillerat vatten och torkades sedan i 105° C under 24 timmar. Därefter våtförbrändes växtmaterialet i koncentrerad  $\text{HNO}_3\text{:HClO}_4$  (7:3 volymförhållande) under 20 timmar i en stegvis upphettning till 225° C och analyserades för Cu och Zn med hjälp av atomabsorptionsspektrofotometri (VarianSpektrAA).

Efter att läckageförsök 1 som utfördes i växthus hade avslutats tvättades rötter och skott noggrant och sköljdes, torkades och våtförbrändes på samma sätt som beskrivits ovan. Parallellt med läckageförsök 1 odlades tall, korgvide, mjölkört och rörflen under 10 veckor i rötslam, varefter innehåll av Cd, Cu, Pb och Zn analyserades i rötter, skott och rötslam så att

växternas ackumuleringsfaktor kunde beräknas (enligt beräkning under 3.5 Statistik och beräkningar). Totalhalten av metaller i rötslam analyserades efter att slammet torkats i 105° C i 48 timmar och våtförbränts i 7 M  $\text{HNO}_3$  under 30 minuter i 120° C.

### 3.5 Statistik och beräkningar

Statistiska analyser utfördes med hjälp av dataprogrammet Statistica version 8.0 (StatSoft Inc 2007). Data från försök med flera behandlingar analyserades med ANOVA, och skillnader mellan behandlingarna togs fram med hjälp av Tukey Honestly Significant Differences (HSD-test) vid en nivå där  $p < 0,05$ . Vid analys av procentvärden (groningsförsöket) användes ArcSin-transformerade värden.

Beräkning av ackumuleringsfaktor efter analys av metallhalter i växter och rötslam gjordes enligt följande ekvation:

$$\text{Ackumuleringsfaktor} = [\text{Me}]_{\text{skott eller rot}} / [\text{Me}]_{\text{rötslam}}$$

där [Me] står för koncentration av Cd, Cu, Pb eller Zn. Är ackumuleringsfaktorn högre än 1 innebär det att växten ackumulerar metaller i högre koncentration än vad som finns i det omgivande substratet.

## 4 Resultat och diskussion

### 4.1 Utlägg av rötslam som tät- och täckskikt

För att kunna lägga ut ett täckskikt av rötslam måste underlaget ha bärighet. Därför bör rötslam som ska läggas direkt på anrikningssanden köras ut då underlaget är fruset, vilket kan medföra problem eftersom slammet också fryser och blir svårhanterligt. Ska slammet däremot läggas på ett tätskikt av härdad flygaska kan det köras ut vid vilken tid som helst på året. Att blanda flygaska och rötslam visade sig komplicerat, varför utlägget av tätskiktet som bestod av bägge materialen avbröts innan hela ytan var täckt. På grund av de svårigheter som uppstod vid utläggning av ytan med blandmaterial samt rötslam direkt på anrikningssanden kunde inte utsättning av grundvattenrör och syresonder genomföras enligt ursprunglig planering.

### 4.2 Inventering av växter på gruvdeponier med rötslam

På den rötslamstäckta kullen invid Gillervattnet i Boliden växte stora mängder mjölkört, hästhov och

svartvide (Tabell 4-1). På den slamtäckta delen av Lilla Bredsjömagasinet i Garpenberg dominerades ytan av björk, tall samt gräset rödven, och sammanlagt hittades där 72 olika arter.

### 4.3 Etablering av växter i rötslam

#### 4.3.1 Fältförsök

På rötslamsrutorna som lades ut hösten 2003 och våren 2004 lästes överlevnad av under somrarna 2004–2007. Resultaten från dessa avläsningar samt observationer från försöken med porvattenprovtagning samt i växthus sammanfattas i tabell 4-2. I figur 4-1a visas en av de små rötslamsrutor som ligger på ett tätskikt av rötslam på Gillervattnet, ett år efter etablering.

Resultaten visar tydligt att det är lättare att etablera växter genom frösädd än genom utplantering. De flesta gräsarter, lupin och klöver grodde bra, särskilt rörflen, turftimotej och ängsgröe. Överflyttning av växter från omgivningen fungerade endast för mjölkört, samt för svartvide som redan rotat sig i rötslam. Plantering av salix-sticklingar fungerade ej då de inte lyckades bilda rötter i rötslammet. Detta gällde även sorter som vattenpil, sälg och svartvide som är köldtåliga. Pluggplantor av gran och tall hade en större förmåga att etablera sig, troligen på grund av att rötterna fått med sig torv som underlät-

Tabell 4-1 Dominerande växtarter på slamtäckta områden vid Gillervattnet, Boliden, och Lilla Bredsjömagasinet, Garpenberg. Växterna presenteras efter uppskattad grad av förekomst.

| Gillervattnet<br>Svenskt namn | Latinskt namn                  | Lilla Bredsjömagasinet<br>Svenskt namn | Latinskt namn                 |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
| Mjölkört                      | <i>Epilobium angustifolium</i> | Rödven                                 | <i>Agrostis capillaris</i>    |
| Hästhov                       | <i>Tussilago farfara</i>       | Vårtbjörk                              | <i>Betula pendula</i>         |
| Svartvide                     | <i>Salix myrsinifolia</i>      | Glasbjörk                              | <i>Betula pubescens</i>       |
| Vårtbjörk                     | <i>Betula pendula</i>          | Tall                                   | <i>Pinus sylvestris</i>       |
| Tall                          | <i>Pinus sylvestris</i>        | Brunrör                                | <i>Calamagrostis purpurea</i> |
| Glasbjörk                     | <i>Betula pubescens</i>        | Hallon                                 | <i>Rubus idaeus</i>           |
| Tuvtätel                      | <i>Deschampsia cespitosa</i>   | Pipdån                                 | <i>Galeopsis tetrahit</i>     |
|                               |                                | Kvickrot                               | <i>Elytrigia repens</i>       |
|                               |                                | Vass                                   | <i>Phragmites australis</i>   |
|                               |                                | Svart vinbär                           | <i>Ribes nigrum</i>           |



Figur 4-1a Ruta med växtetablering i täckskikt av rötslam 1 år efter etablering på Giller-vattnet, Boliden. Foto: Clara Neuschütz.



Figur 4-1b Täckskikt av rötslam som inte rensats från ogräs 3 år efter utlägg. Foto: Clara Neuschütz.

Tabell 4-2 Lista över erfarenheter från etableringsförsök av olika växter i rötslam utomhus och i växthus, utförda under en tidsperiod av fyra år. För latinska namn se tabell 3-4.

| Svenskt namn       | Etableringsförmåga i rötslam                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blomsterlupin      | Medelgod groningsförmåga i slam. Konkurrerades lätt ut av andra arter.                                                                                                                                                                  |
| Glasbjörk          | Första vintern överlevde ca 50 % av plantorna, 3 år efter plantering levde de fortfarande och hade nått en höjd av 1–1,5 m                                                                                                              |
| Gran               | Överföring av plantor från omgivningen fungerade ej. Däremot överlevde nästan 50 % av pluggplantorna första året i fält, både Björkebo och Hissjö, och hade 3 år efter plantering en höjd av 0,3 m.                                     |
| Hästhov            | Spred sig lätt med frön från omgivningen till utlagt rötslam.                                                                                                                                                                           |
| Honungsort         | Klarade första vintern, men konkurrerades sedan ut av andra arter.                                                                                                                                                                      |
| Industrihampa      | Mycket god tillväxt, även två år efter sådd, vilket tyder på att den självsått sig eftersom det är en 1-årig växt.                                                                                                                      |
| Korgvide           | Sticklingar hade svårt att bilda rötter i rötslam, vilket visade sig både i fält och i växthusstudierna.                                                                                                                                |
| Mjölkört           | Visade mycket god förmåga att etablera sig i rötslam. Spred sig både med frö och med långa rotutlöpare.                                                                                                                                 |
| Perserklöver       | Kunde gro men konkurrerades snart ut av andra växter.                                                                                                                                                                                   |
| Rödsvingel         | Visade dålig förmåga att gro och etablera sig i rötslam.                                                                                                                                                                                |
| Rödven             | Grodde bra, men klarade sig inte i längden. Sorkar valde detta gräs bland flera att bygga bo i.                                                                                                                                         |
| Rörflen            | Grodde långsamt, men när den väl hade etablerat sig hade den en mycket stark tillväxt i rötslam, och kom igen år efter år med upp till 2 meter höga skott. Konkurrerade lätt ut närliggande växtlighet.                                 |
| Sälg               | Hade svårt att bilda rötter från sticklingar i rötslam. Däremot växte de bra genom fröspridning på åldrat slam.                                                                                                                         |
| Svartvide          | Mycket god etableringsförmåga genom naturlig fröspridning. God överlevnad av plantor som hämtats på rötslam, men inte om de växt på grus, eller överfördes som sticklingar.                                                             |
| Tall               | Plantor som överfördes från omgivningen klarade sig ej, däremot överlevde 60 % av pluggplantorna första vintern, men hade därefter en mycket låg tillväxt, med gulnande barr. I växthus grodde tallen bra, men plantorna blev rangliga. |
| Turftimotej        | Mycket bra groning, men sämre förmåga att klara flera säsonger.                                                                                                                                                                         |
| Väglänts-blandning | Bra groningsförmåga, och ganska bra förmåga att komma igen år efter år. Gräsen bildade en mycket tät matta med 20–30 cm höga skott.                                                                                                     |
| Vårthjörk          | Bra groningsförmåga vid spridning av frö, men svårt att överföra hela plantor från jord till rötslam.                                                                                                                                   |
| Vattenpil          | Låg förmåga att bilda rötter från sticklingar i rötslam.                                                                                                                                                                                |
| Vitgröe            | Bra groningsförmåga, men gräset hade relativt dålig förmåga att komma igen år efter år då det är 1-årigt och sprider sig med frön.                                                                                                      |
| Ängsgröe           | Medelgod förmåga att gro och överleva flera säsonger. Fick dock i fält en vit svampbeläggning på bladen.                                                                                                                                |

tade omställningen till rötslam. Dock är det svårt att få barrträd att klara konkurrensen med andra växter, då de har en så pass långsam tillväxt. Överlevande björkar och videbuskar hade större chans att klara sig då de snabbt växte upp över omgivande gräs.

Spridning av bark eller sand på ytan av slammet medförde inte någon skillnad i groningsförmåga för rörflen eller vägsblåsblandning. Däremot var etableringsförmågan hos växter större i rötslamsrutan som låg ovanpå bark jämfört med om den låg direkt på flygaska, både rörflen och vägsblå grodde bättre, och av överförda plantor klarade sig tall, gran och glasbjörk bättre – i genomsnitt 74 % av plantorna hade överlevt en månad efter plantering, jämfört med 19 % av plantorna i enbart rötslam. För svartvide och sälgräs var det ingen skillnad. Etableringen av hampan fungerade bra, och resulterade i 2 meter höga plantor under första säsongen, oavsett planteringsmaterial, dvs. rötslam eller rötslam ovanpå bark.

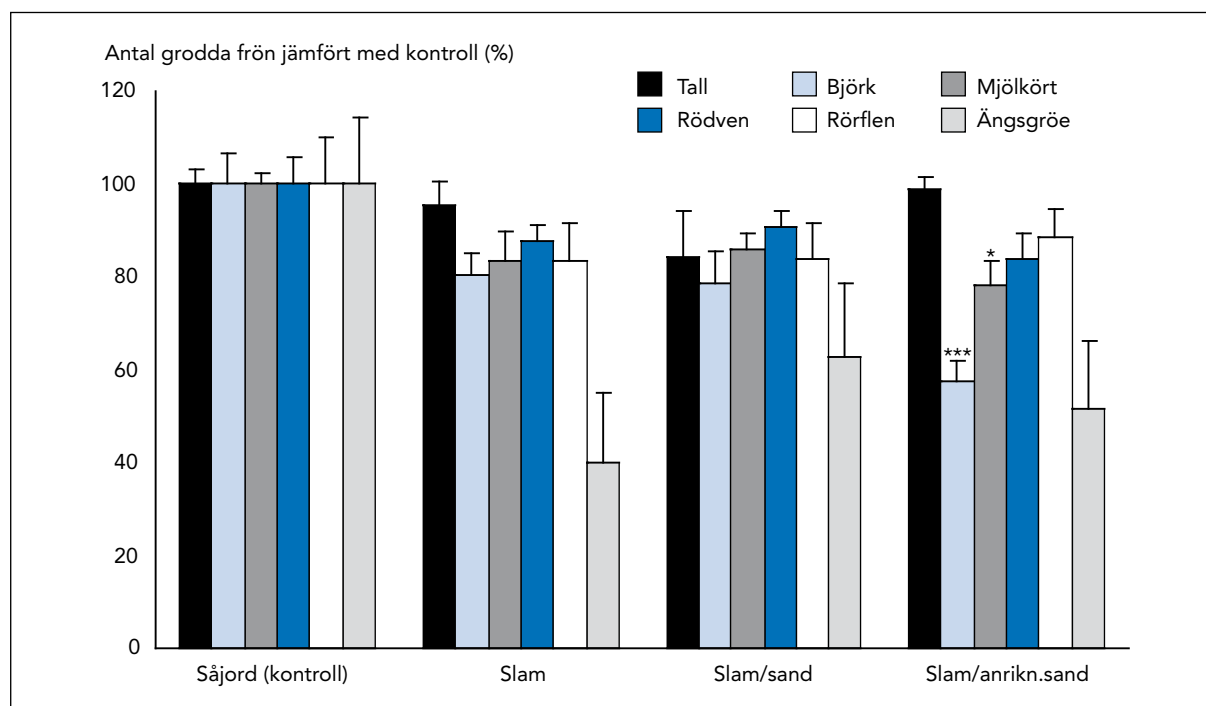
Naturlig fröspridning av framförallt svartvide och mjölkört från omgivande områden skedde i stor omfattning (Figur 4-1b). Andra arter som spred sig in på rötslamsrutorna från omgivningarna var vårtbjörk, hästhov, gårdsskräppa, svinmålla, lomme och gatkamomill.

#### 4.3.2 Växthusförsök

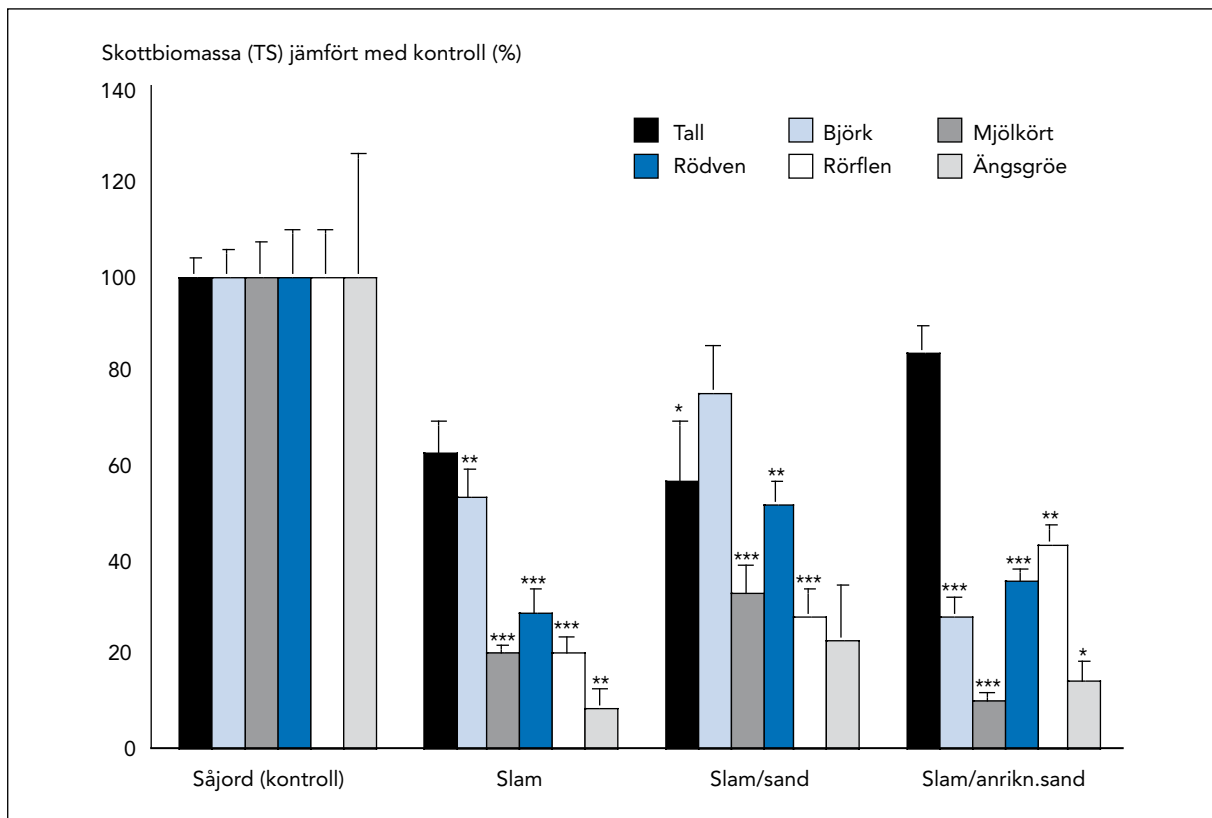
Groningsförsöket visade att rötslam endast marginellt påverkar växters förmåga att gro (Figur 4-2). Däremot påverkas tillväxten av de små plantorna mycket, jämfört med om de får gro i torvrik såjord (Figur 4-3). Inblandning av vanlig sand eller anrikningssand hade ingen större effekt på förmågan hos växterna att gro eller att växa till jämfört med då de såddes i enbart rötslam. Tallarna som växte på rötslam och rötslam med sand blev smala och rangliga och hade i flera av krukorna vält vid tiden för skörd efter 3 veckor.

Sticklingar av svartvide hade svårt att etablera sig i rötslam (Figur 4-4). För svartvide hade dock inblandning av vanlig sand en positiv effekt, etableringen gick då lika bra som i kontrolljord. Tillsats av anrikningssand, flygaska eller bark hade däremot ingen förbättrande effekt.

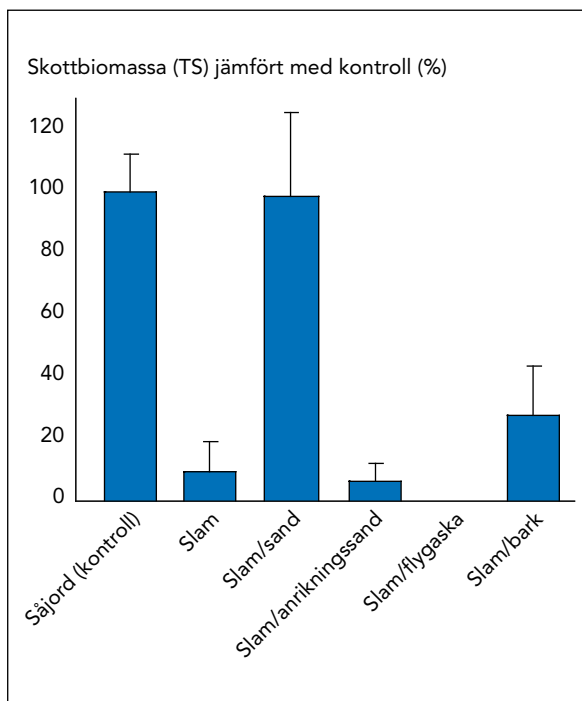
Odling av gran fungerade i alla substrat utom när rötslam var blandat med anrikningssand, då alla plantorna dog. Efter sex månaders odling var det inga statistiskt signifikanta skillnader i biomassa mellan granar som stått i de olika substraten, bortsett de plantor som odlats i slam och anriknings-



Figur 4-2 Groningsfrekvens av frön av 6 olika växtarter efter 3 veckor i rötslam, med eller utan inblandning av sand eller anrikningssand, jämfört med groning i såjord ( $n=5\pm SE$ ). Stjärnor som är märkta med \* är signifikant (\*= $p<0,05$ ; \*\*= $p<0,01$ , \*\*\*= $p<0,001$ ) lägre än kontrollen.



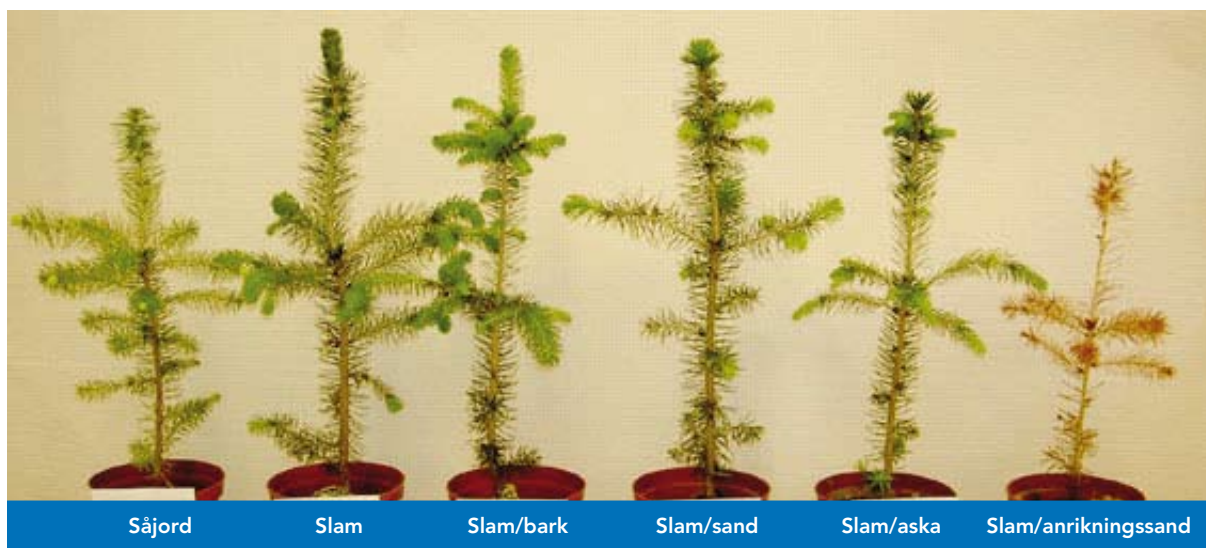
Figur 4-3 Biomassa av skott (TS) av 6 olika växtarter efter tillväxt i rötslam under 3 veckor, med eller utan inblandning av sand eller anrikningssand, jämfört med groning i såjord ( $n=5 \pm SE$ ). Staplar som är märkta med stjärnor är signifikant (\*= $p<0,05$ ; \*\*= $p<0,01$ , \*\*\*= $p<0,001$ ) lägre än kontrollen.



Figur 4-4 Biomassa av skott (TS) av svartvide efter tillväxt i rötslam under 4 veckor, med eller utan inblandning av sand, anrikningssand, flygaska eller bark, jämfört med odling i såjord ( $n=5 \pm SE$ ).

sand, och inte heller i klorofyllinnehåll eller aktivitet av stressenzym. Det fanns dock tendenser till att rötslam gav ökad klorofyllhalt och fler nybildade skott (Figur 4-5). Såjord är ett relativt näringsfattigt substrat, vilket kan förklara den till synes ökade tillväxten i rötslam. En anledning till att plantorna klarade sig bättre än vad frön och videsticklingar gjorde i samma blandningar kan vara att torvpluggen tilläts sitta kvar runt granplantans rötter vid plantering, och därmed kunde skydda rötterna mot förhållandena i de olika substraten.





Figur 4-5 Granar odlade i 6 månader i växthus i såjord alternativt rötslam med eller utan tillsats av bark, sand, bioflygaska eller anrikningssand. Foto: Clara Neuschütz.

## 4.4 Läckageförsök

### 4.4.1 Porvattenprovtagning i fält

Provtagning av porvatten i rötslam av olika ålder samt med olika vegetation utfördes i maj och i oktober 2006. Resultaten visar att slammets ålder samt tid på säsongen för provtagning har stor betydelse för porvattnets komposition. Däremot kunde vi inte se några entydiga effekter av olika typ av vegetation.

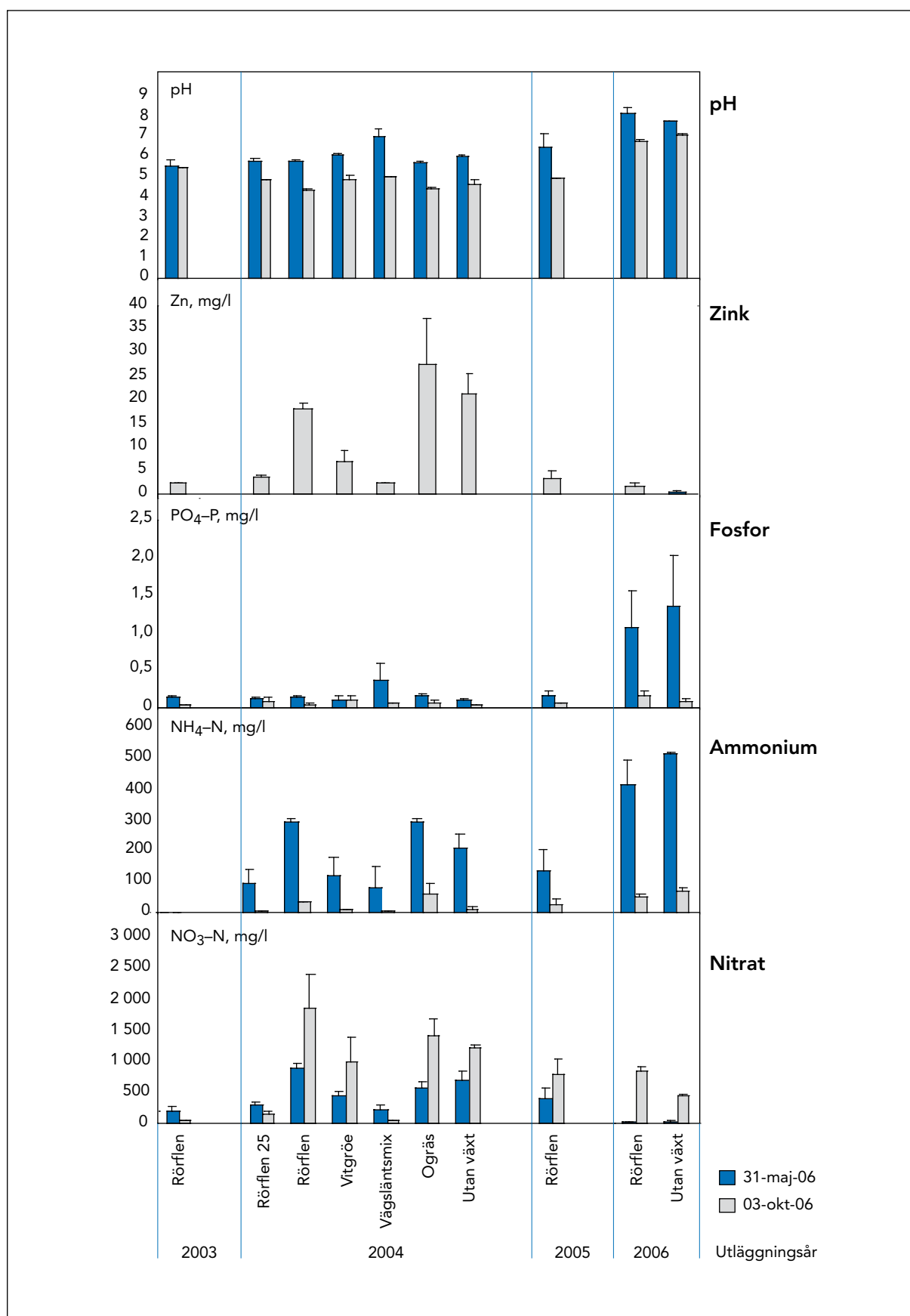
Porvattnets pH var lägre vid provtagning på hösten jämfört med på våren (Figur 4-6). I det nyutlagda slammet var pH också högre än i slam som legat 1–3 år. Även halterna av ammonium och fosfat visade samma mönster – med höga koncentrationer i nyutlagt slam på våren, och lägre i slam som legat ute minst en säsong. Med nitrat var det tvärtom – halterna ökade över säsongen och bibehölls hög i slam som legat ute upp till två år. När det gäller metaller har endast Zn analyserats, och endast i prover tagna på hösten. Resultaten från dessa analyser visar att halterna av Zn hade ett liknande mönster som nitrat, med högre nivåer i porvatten från slam som legat ute i 2 år än i nyutlagt slam (Figur 4-6).

Stehouwer, Day & Macneal (2006) mätte halter av näring och metaller i lakvatten från gruvavfall i

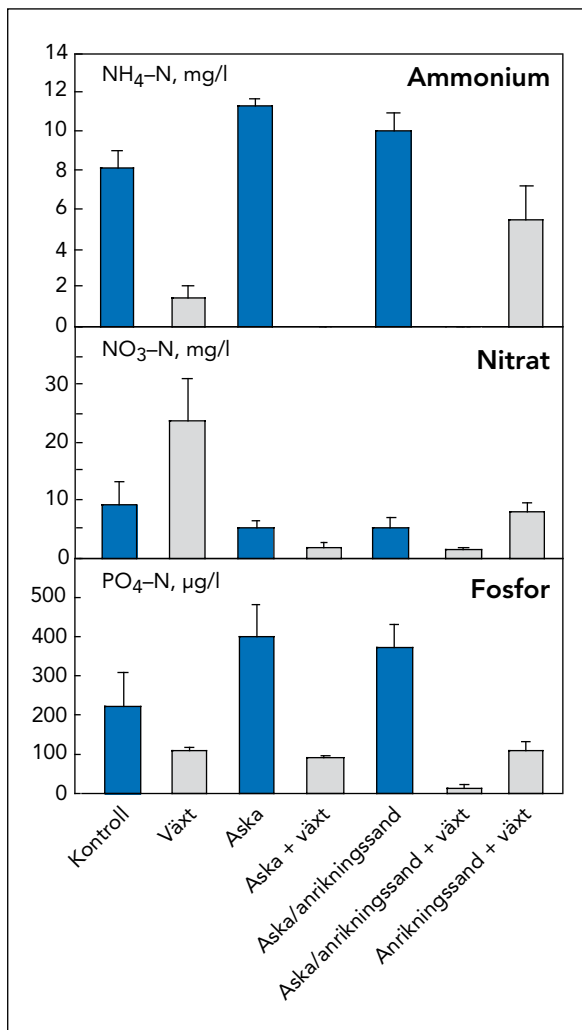
Pennsylvania, USA, täckt med 134 ton TS/ha rötslam, kontinuerligt under två år. Även de såg stora säsongsvariationer med ökade halter av nitrat över säsongen, men minskade halter under det andra året. Mätningar av pH visade att försurning av slammet följde samma mönster, med högst syrautveckling på hösten. Mobilisering av Al, Cu, Mn, Ni, Pb och Zn följde pH i lakvattnet, med en ökad löslighet ju surare det var. Detta gällde inte As, Cd, Co, Cr, Hg, Mo och Se.

### 4.4.2 Läckageförsök 1 – rötslam på flygaska och anrikningssand

Halten av fosfat och ammonium var lägre i läckagevatten från lysimetrar med växter än från dem utan, vid provtagning 11 veckor efter att försöket startats (Figur 4-7). Dessvärre kunde inte läckagevattnet från anrikningssanden utan växt analyseras eftersom vatten inte rann igenom. När det gäller läckaget av nitrat hade växter en minskande effekt i de fall aska fanns med i lysimetrarna. Försök med inblandning av kolflygaska i rötslam har visat att 10 % flygaska kan förhindra nitrifikation och bildning av lättlösligt nitrat, och även att aska minskar lösligheten på fosfat i slammet (Fang m.fl. 1999), något som också var fallet i vår studie, men endast då rörflen odlades, och askan låg på anrikningssand (Figur 4-7).

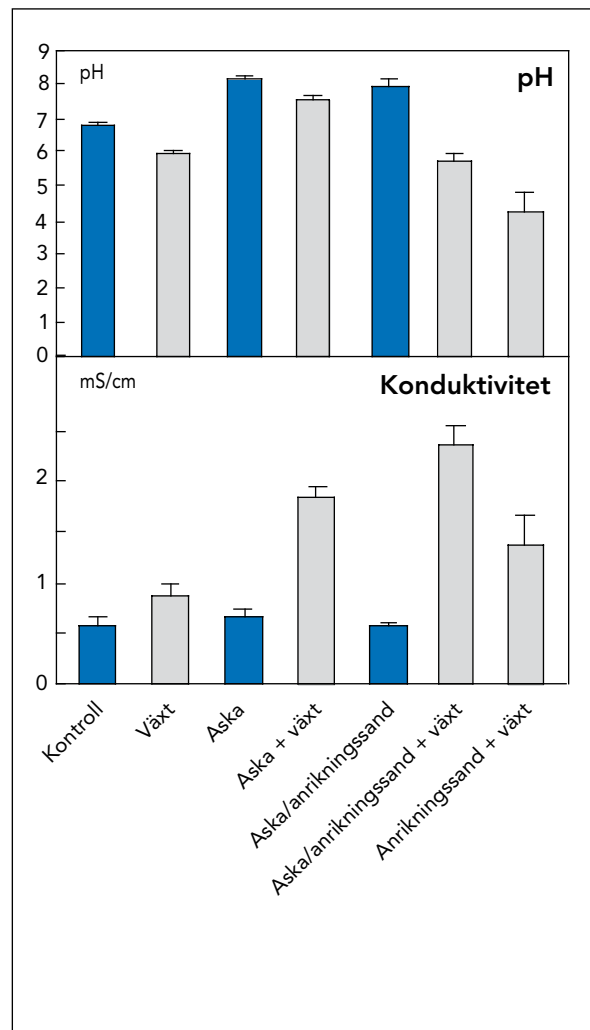


Figur 4-6 pH, Zn samt näringsämnen i porvatten insamlat vid två tillfällen under år 2006 (31 maj samt 3 oktober). Provtagarna var placerade 20 cm ned i rötslamsrutor utlagda under år 2003-2006 med olika typer av vegetation ( $n=3$ ,  $\pm SE$ ). Tjockleken på rutorna var ursprungligen 50 cm, förutom för "Rörfilen 25" utlagt 2004, där skiktets tjocklek var 25 cm.



Figur 4-7

Ammonium, nitrat och fosfat i lakvatten från lysimetrar packade med rötslam och under detta ett skikt med antingen aska, aska/anrikningssand eller enbart anrikningssand. I rötslammet hade rörfen planterats i hälften av kärlen (grå staplar). Kontroll är ett kärl med enbart rötslam.  $n = 7$ ,  $\pm SE$ .



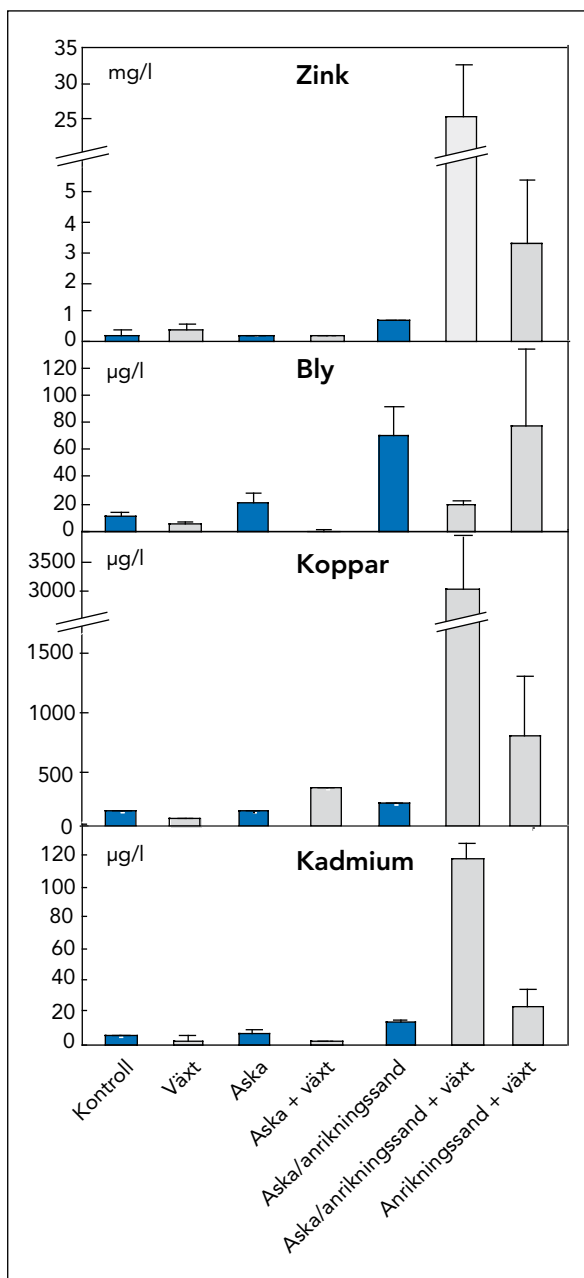
Figur 4-8

Konduktivitet och pH i lakvatten från lysimetrar packade med rötslam och under detta ett skikt med antingen aska, aska/anrikningssand eller enbart anrikningssand. I rötslammet hade i hälften av kärlen planterats rörfen (grå staplar). Kontroll är ett kärl med enbart rötslam.  $n = 7$ ,  $\pm SE$ .

Växterna sänkte pH i läckagevattnet (Figur 4-8). Tillsats av aska under slammet ökade pH medan anrikningssanden sänkte det, vilket var väntat. Konduktiviteten påverkades åt motsatt håll, med högst värden i vatten från behållare med växter på rötslam med aska och anrikningssand under. Däremot var det inga skillnader mellan konduktivitet i vatten från behållare med olika substrat utan växter.

I närvaro av växter påverkades askan och anrikningssanden så att ett stort läckage av Cd, Cu och Zn, men inte av Pb förekom (Figur 4-9). Särskilt när både anrikningssand, aska och växter var närvarande ökade läckaget av Cd, Cu och Zn, intressant nog mer än om bara anrikningssand låg under slam-

met, utan aska. I andra studier har flygaska kunnat minska tillgängligheten av metaller från anrikningssand (Xenidis, Mylona & Paspaliaris 2002), och rötslam (Su & Wong 2003), förmodligen genom att höja pH. I de studierna användes dock kolflygaska vilken skiljer sig från bioflygaska i komposition, och dessutom användes inte växtetablering, vilket, enligt vår studie, tycks ha en drastisk effekt på frigörelsen av metaller (Figur 4-9). Eftersom växterna som vi använde var snabbväxande energigräs tog de snabbt upp tillsatt vatten, varvid vattenmättnaden i behandling med eller utan växt skilde sig, vilket kan ha påverkat metallernas löslighet. En trolig förklaring är att då rörfen odlades torkade slammet ut



Figur 4-9

Metallhalten i lakvatten från lysimetrar packade med rötslam och under detta ett skikt med antingen aska, aska/anrikningssand eller enbart anrikningssand. I rötslammet hade i hälften av kärlen planterats rörlan (grå staplar). Kontroll är ett kärl med enbart rötslam.  $n = 7$ ,  $\pm SE$ .

så pass mycket att luft kunde tränga ned till anrikningssanden, som då kunde vittra mer än då rötslammet förblev vattenmättat. Detta visar att endast ett tunt lager med rötslam inte är någon lösning för övertäckning av anrikningssand, utan att både tät- och täckskikt bör ha en tillräcklig tjocklek för att inte torka ut.

#### 4.4.3 Sandwich-försök

I detta försök undersöktes om en så kallad sandwich-övertäckning (dvs ett treskiktstäck med slam/aska/slam) ovanpå anrikningssand kan minska läckaget av metaller jämfört med om övertäckningen enbart består av två skikt där aska ligger i anslutning till anrikningssanden, med rötslam överst. Dessutom studerades effekten av etablering av energigräs i rötslammet. Analys av läckagevattnet efter 6 och 12 veckor visade inte på några skillnader mellan de olika täckningsmetoderna, däremot att täckning i sig mycket effektivt förhindrar metalläckage. Halterna av Zn i läckagevatten från anrikningssand utan övertäckning var flera hundra gånger högre än från behållare där sanden hade någon form av täckning; ca 30 gånger högre för Cd, och ca 5 gånger högre för Cu (Tabell 4-3). pH i läckagevattnet var också lägre från behållare med enbart anrikningssand, och minskade med tiden något. Ett undantag var behållare med sandwich-övertäckning – där ökade pH från vecka 6 till vecka 12, både med och utan växt. Förutom att växterna minskade mängden vatten som läckte ut hade de ingen effekt på kompositionen av läckagevattnet.

#### 4.4.4 Läckageförsök 2 – olika växters påverkan på rötslam

I detta försök samlades allt läckagevatten in kontinuerligt under 10 veckor och därmed kunde det totala läckaget av löst näring och metaller beräknas. Från kontrollen läckte 18,1 % av det initiala kväveinnehållet i rötslammet ut i form av nitrat, och 7,7 % som ammonium. När det gäller fosfor uppmätte vi 0,03 % av det ursprungliga fosforinnehållet som löst fosfat i läckagevatten från kontrollen under försökets gång. Växter hade en preventiv effekt på läckaget, och mest effektivt fungerade etablering av energigräset rörlan, som signifikant minskade läckaget av alla uppmätta parametrar (ammonium, nitrat, fosfat – Figur 4-10 och Cd, Cu och Zn – Figur 4-11). Mjölkört och korgvide minskade läckaget av nitrat, fosfat, Cu och Zn, medan tall endast minskade mängden fosfat och Cu. Till viss del relaterade läckageminskningen till mängden läckagevatten, men också till en minskning av ämnens koncentrationer i läckagevattnet. Det visade sig även att

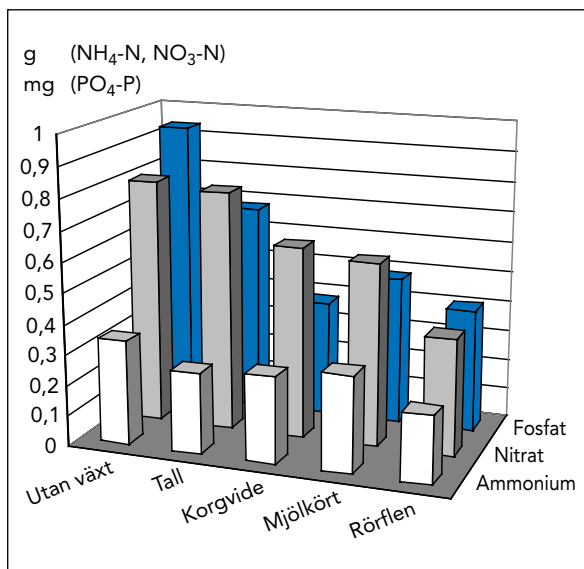
Tabell 4-3 Koncentration av metaller i läckagevatten efter 6 respektive 12 veckor från behållare med anrikningssand med eller utan två olika övertäckningar och med och utan energigräset rörflen. Övertäckningarna bestod antingen av bioflygaska täckt med rötslam ("aska") eller ett treskiktsslager med rötslam täckt av bioflygaska och överst rötslam ("sandwich") (n=4, ±SE). Behandlingar med skilda bokstäver (a-h) skiljer sig signifikant (p<0,05) från varandra.

| Täckning        | Vecka | Vattenmängd<br>ml      | Zink<br>mg/l                | Koppar<br>µg/l          | Kadmium<br>µg/l       | pH                         |
|-----------------|-------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Utan täckning   | 6     | 259 ± 48 <sup>de</sup> | 190,37 ± 18,73 <sup>a</sup> | 1611 ± 243 <sup>a</sup> | 447 ± 28 <sup>a</sup> | 5,38 ± 0,09 <sup>a</sup>   |
|                 | 12    | 475 ± 30 <sup>bc</sup> | 39,63 ± 10,43 <sup>b</sup>  | 1605 ± 257 <sup>a</sup> | 223 ± 36 <sup>b</sup> | 4,86 ± 0,02 <sup>b</sup>   |
| Aska            | 6     | 456 ± 16 <sup>c</sup>  | 0,07 ± 0,03 <sup>c</sup>    | 548 ± 132 <sup>b</sup>  | 26 ± 2 <sup>c</sup>   | 7,62 ± 0,10 <sup>cd</sup>  |
|                 | 12    | 632 ± 22 <sup>ab</sup> | 0,36 ± 0,20 <sup>c</sup>    | 252 ± 8 <sup>b</sup>    | 31 ± 5 <sup>c</sup>   | 6,80 ± 0,05 <sup>gh</sup>  |
| Aska + växt     | 6     | 214 ± 34 <sup>a</sup>  | 0,07 ± 0,02 <sup>c</sup>    | 294 ± 37 <sup>b</sup>   | 4 ± 0 <sup>c</sup>    | 7,91 ± 0,18 <sup>c</sup>   |
|                 | 12    | 126 ± 39 <sup>a</sup>  | 0,05 ± 0,03 <sup>c</sup>    | 256 ± 23 <sup>b</sup>   | 8 ± 5 <sup>c</sup>    | 7,27 ± 0,10 <sup>df</sup>  |
| Sandwich        | 6     | 433 ± 10 <sup>c</sup>  | 0,46 ± 0,05 <sup>c</sup>    | 335 ± 42 <sup>b</sup>   | 10 ± 3 <sup>c</sup>   | 6,61 ± 0,04 <sup>h</sup>   |
|                 | 12    | 634 ± 2 <sup>a</sup>   | 0,12 ± 0,01 <sup>c</sup>    | 326 ± 17 <sup>b</sup>   | 5 ± 2 <sup>c</sup>    | 7,33 ± 0,01 <sup>de</sup>  |
| Sandwich + växt | 6     | 380 ± 22 <sup>c</sup>  | 0,55 ± 0,13 <sup>c</sup>    | 267 ± 39 <sup>b</sup>   | 0 ± 0 <sup>c</sup>    | 6,61 ± 0,02 <sup>h</sup>   |
|                 | 12    | 410 ± 59 <sup>cd</sup> | 0,70 ± 0,19 <sup>c</sup>    | 316 ± 51 <sup>b</sup>   | 19 ± 11 <sup>c</sup>  | 7,12 ± 0,07 <sup>efg</sup> |

vissa växter kunde orsaka ökade koncentrationer av näring i läckagevattnet, exempelvis ökade korgvide och tall nitrathalterna jämfört med kontrollbehållaren utan växt, även om det totala läckaget inte ökade eftersom växterna minskade mängden läckagevatten.

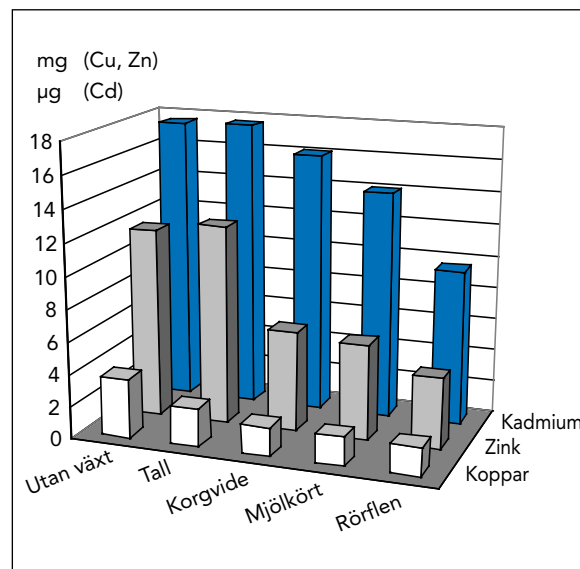
Koncentrationerna av ammonium var högst under de tre första veckorna, initialt så höga som

500 mg/l (NH<sub>4</sub>-N), varefter de snabbt sjönk och var vid försökets slut under 3 mg/l i vatten från alla behållare. Nitrathalterna var högst 3 veckor efter start (runt 400 mg/l NO<sub>3</sub>-N), och sjönk därefter, men var fortfarande vid försökets slut som lägst 50 mg/l i vatten från behållare med rörflen, och som högst 160 mg/l i vatten från behållare med tall, vilket får betraktas som högt, t.ex. i jämförelse med EUs ni-



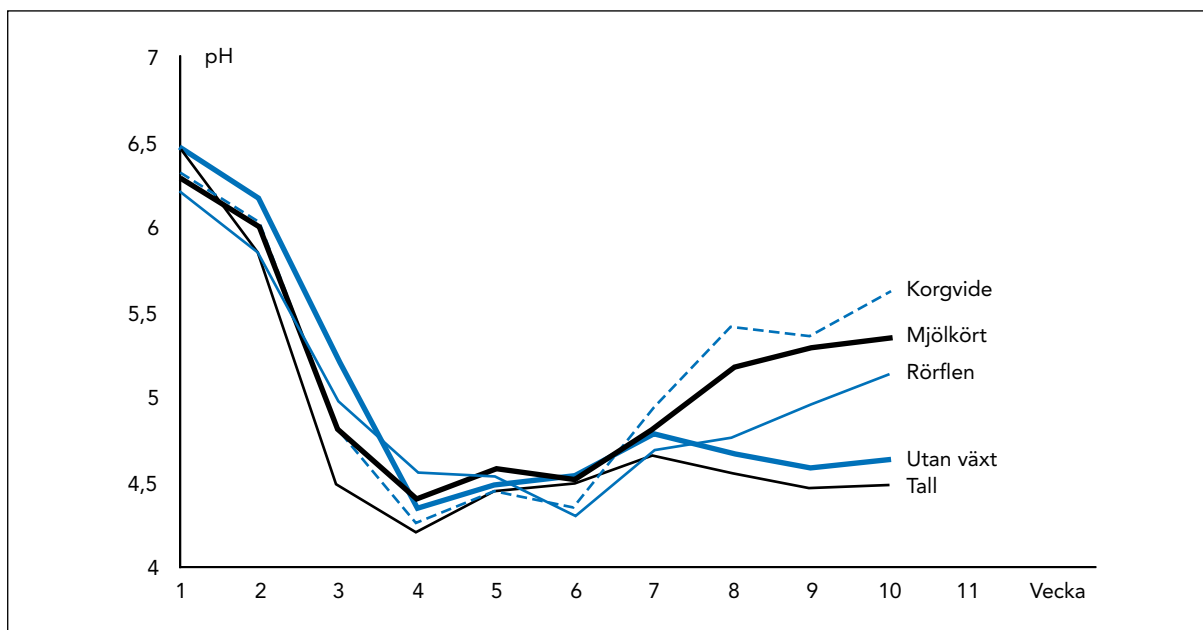
Figur 4-10

Total mängd ammonium-N, nitrat-N och fosfat-P som läckt ur behållare med eller utan olika växter under 10 veckor i växthus (n=7, ±SE). Alla växter minskade signifikant (p<0,05) mängden fosfat, medan nitrat minskades av odling av korgvide, mjölkört och rörflen, och ammonium endast av rörflen.



Figur 4-11

Total mängd Cd, Cu och Zn som läckt ur behållare med eller utan olika växter under 10 veckor i växthus (n=7, ±SE). Alla växter minskade signifikant (p<0,05) mängden Cu, medan Zn minskades av odling av korgvide, mjölkört och rörflen, och Cd endast av rörflen.



Figur 4-12 pH i läckagevatten från behållare med eller utan olika växter under 10 veckor i växthus ( $n=7$ ,  $\pm SE$ ). Vid vecka 10 var pH signifikant högre ( $p<0,05$ ) i läckagevatten från behållare med korgvide och mjölkört jämfört med från behållare utan växt.

tratedirektiv (91/676/EEG) som anger att nitrathalter över 50 mg/l i grundvattnet utgör en risk för hälsa och miljö (EU, 1991).

Läckagevattnets pH sjönk snabbt de första 4 veckorna, både från behållare med och utan växt (Figur 4-12). Efter vecka 6 började dock pH stiga igen i vatten från mjölkört, korgvide och rörflen. Koncentrationerna av Cd och Zn, men inte Cu, ökade i alla behållare under försökets gång, vilket skulle kunna vara en effekt av ett sjunkande pH. Villar & Garcia (2002) såg att lösligheten av Zn i rötslam började öka då pH nådde värden under pH 5, medan Cu behövde ett pH under 3 för att börja lösa sig från slammet, vilket kan vara en förklaring till resultatet från vår studie.

#### 4.4.5 Vattenupptag i olika typer av växter

Den växt som hade högst vattenupptag och ökning i biomassa under 10 veckors odling i rötslam var rörflen (Tabell 4-4). Därefter kom korgvide, mjölkört och sist tall. De tre snabbväxande växterna rörflen, korgvide och mjölkört orsakade också signifikant lägre nivåer av kväve, samt minskade konduktiviteten i vatten som perkolerat genom krukorna vid vattning i vecka 10. Odling av tall gav något lägre nitrathalter i vattnet jämfört med om ingen växt

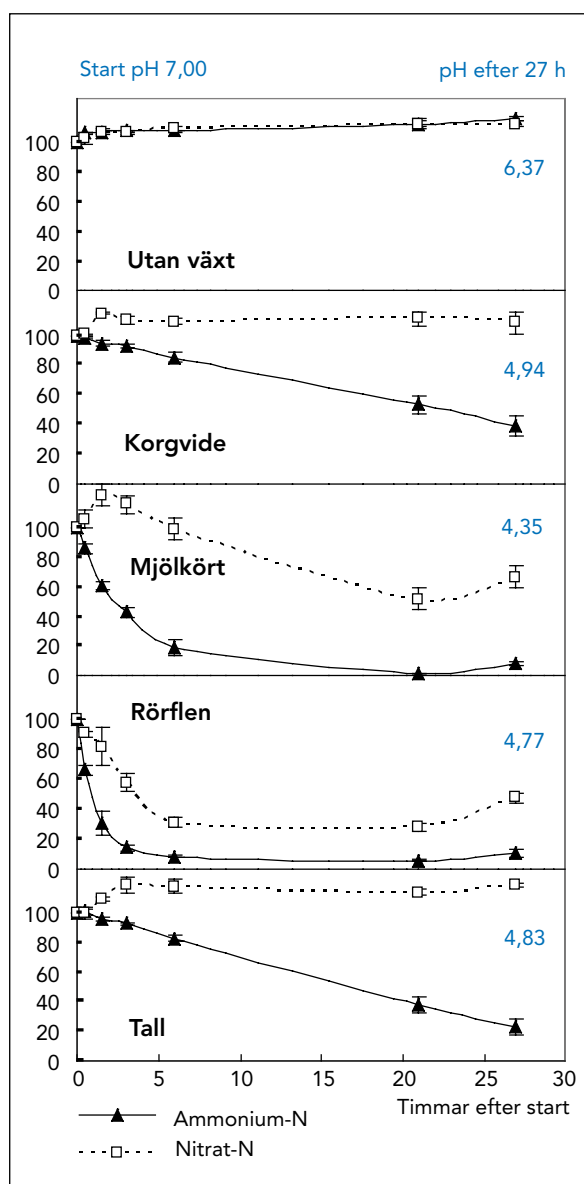
odlades, men långt högre än övriga växter. Någon skillnad i fosfathalter kunde däremot inte ses, och endast korgvide orsakade högre pH i läckagevattnet jämfört med kontrollen utan växt. I jämförelse med det tidigare läckageförsöket (läckageförsök 2), lyckades även korgvide i detta försök minska nitrathalterna. Troligtvis berodde det på att en ökad vattenmättnad i slammet, i och med att vattentillgången var god, gav en minskad bildning av nitrat som kunde läcka ut.

#### 4.4.6 Kvävepreferens hos olika växter

Alla växterna hade ett större upptag av ammonium jämfört med nitrat (Figur 4-13). Detta gällde speciellt korgvide och tall, medan mjölkört och rörflen även tog upp nitrat parallellt med ammonium, men i mindre mängd. I figuren visas resultatet från den del av försöket när pH i odlingsmediet ställdes till 7,0 vid start. När pH ställdes till 5,6 var mönstret liknande, med skillnaden att rörflen tog upp lika mycket nitrat som ammonium, och mjölkört nästan lika mycket. pH sänktes av alla växter, vilket troligtvis är en effekt av upptag av ammonium, eftersom upptag av katjoner i rötter kompenseras med en utsöndring av protoner, vilket leder till en pH-sänkning (Imas m.fl. 1997).

Tabell 4-4 Upptag av vatten och ökning i biomassa hos fyra växter odlade i rötslam med god tillgång till vatten under 10 veckor. I vecka 10 analyserades vatten som tillåtit perkolera genom krukorna under 10 minuter för ammonium, nitrat, fosfat, pH och konduktivitet (n=8, ±SE).

|                          | Utan växt                | Tall                     | Korgvide                  | Mjölkkört                | Rörflen                   |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Vattenupptag (l)         | -                        | 0,71 ± 0,05 <sup>d</sup> | 2,63 ± 0,23 <sup>b</sup>  | 1,88 ± 0,16 <sup>c</sup> | 3,62 ± 0,16 <sup>a</sup>  |
| Ökning i biomassa (g TS) | -                        | 3,89 ± 1,02 <sup>c</sup> | 10,54 ± 0,43 <sup>b</sup> | 8,65 ± 0,71 <sup>b</sup> | 17,95 ± 0,65 <sup>a</sup> |
| Ammonium-N (mg/l)        | 9,22 ± 0,92 <sup>a</sup> | 5,52 ± 0,87 <sup>a</sup> | 0,31 ± 0,02 <sup>b</sup>  | 0,83 ± 0,25 <sup>b</sup> | 0,12 ± 0,02 <sup>b</sup>  |
| Nitrat-N (mg/l)          | 101,3 ± 2,0 <sup>a</sup> | 84,6 ± 6,5 <sup>b</sup>  | 6,8 ± 2,8 <sup>c</sup>    | 1,1 ± 0,2 <sup>c</sup>   | 1,2 ± 0,3 <sup>c</sup>    |
| Fosfat-P (µg/l)          | 31 ± 6 <sup>a</sup>      | 51 ± 5 <sup>a</sup>      | 47 ± 3 <sup>a</sup>       | 53 ± 19 <sup>a</sup>     | 17 ± 7 <sup>a</sup>       |
| pH                       | 4,78 ± 0,19 <sup>b</sup> | 4,74 ± 0,07 <sup>b</sup> | 5,22 ± 0,05 <sup>a</sup>  | 4,85 ± 0,08 <sup>b</sup> | 4,95 ± 0,05 <sup>ab</sup> |
| Konduktivitet (mS/cm)    | 1,5 ± 0,1 <sup>a</sup>   | 1,3 ± 0,1 <sup>a</sup>   | 0,7 ± 0,1 <sup>bc</sup>   | 0,6 ± 0,1 <sup>c</sup>   | 0,9 ± 0,2 <sup>b</sup>    |



Figur 4-13

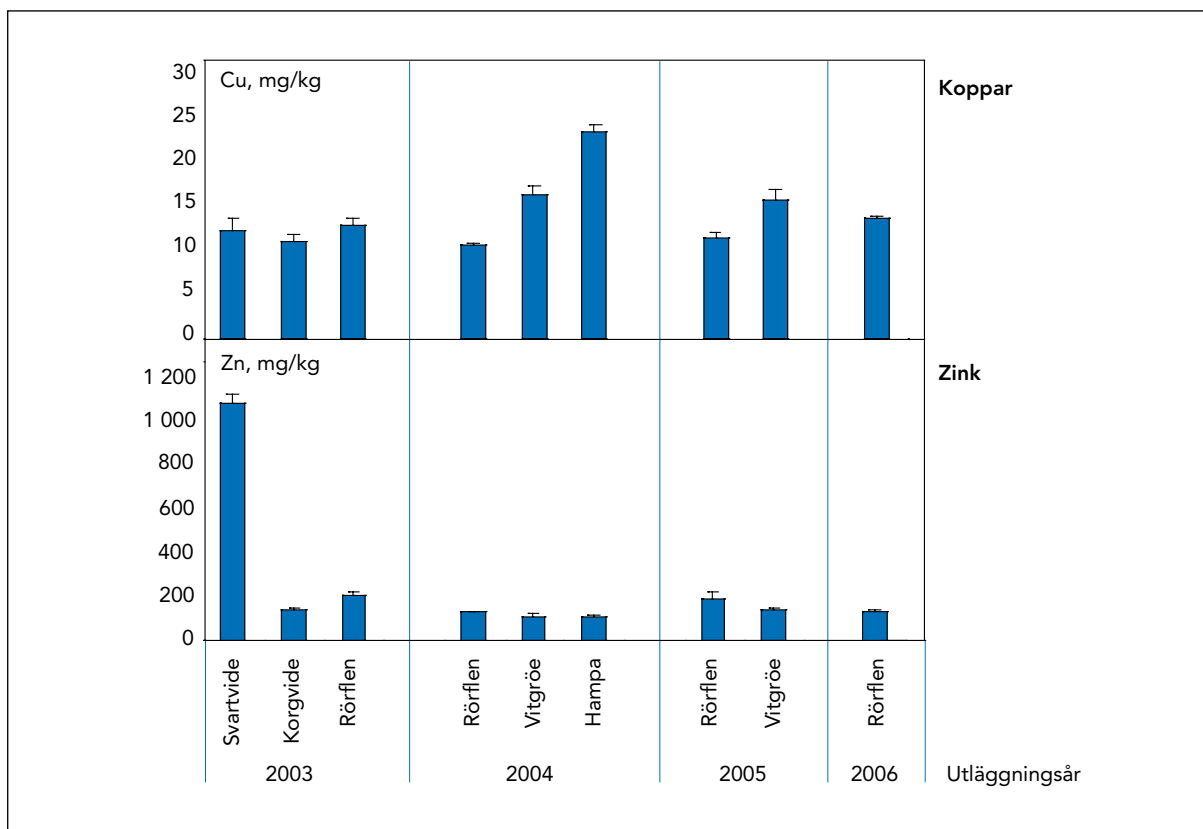
Mängd ammonium- och nitratkväve i näringslösning vid odling av fyra olika växter under 27 timmar, i relation till hur mycket som fanns vid start. Vid start innehöll lösningen 60 µM av vardera kvävesort (n=6, ±SE).

## 4.5 Metallupptag i växter

Från växtmaterialet som insamlades i fält i september 2006 framkom att åldern på slammet inte spelade någon roll för rörflens upptag av Cu eller Zn (Figur 4-14). Det var inte heller stor skillnad i upptag av dessa metaller mellan de olika växter som samlades in, förutom hampa som hade något högre Cu-halter än övriga växter, och svartvide som innehöll mycket höga halter av Zn i bladen. Nivåerna av Zn i svartvide som växt på slam utlagt 2003 var så pass höga att de överskred halterna för vad som kan tolereras för boskap (Tabell 4-5).

I växthusförsök där tall, korgvide, mjölkkört och rörflen odlades i rötslam under 11 veckor hade växterna relativt höga koncentrationer av Cu och Zn, särskilt i rötter (Tabell 4-5). Halterna av Cd och Pb var däremot inom ramen för vad som räknas som normalt i växter, förutom för Pb i rötter av rörflen som var något förhöjda. När aska och anrikningssand låg under rötslammet ökade upptaget av Cd och Pb, speciellt i rötter, jämfört med från bara rötslam. Aska eller anrikningssand var för sig under rötslammet orsakade dock ingen entydig ökning av metallupptaget. I vissa fall hade en del av rötterna växt ned i askan och/eller anrikningssanden under rötslammet, men metallanalys gjordes endast på rötter som befunnit sig i rötslammet. En transport av metaller från underliggande material hade således inte förekommit upp till rötter i rötslammet, förutom möjligen för bly i rörflen som växt i rötslam ovanpå aska kombinerat med anrikningssand.





Figur 4-14 Koncentrationer av Cu och Zn i skott av olika växter som etablerats i rötslam utlagt under olika år (2003-2006). Växtmaterialet samlades in i september 2006 (n=3,  $\pm$ SE).

Tabell 4-5 Koncentration av metaller i skott och rötter av växter som odlats under 11 veckor i rötslam. En av växterna, rörflen, odlades även i rötslam på bioflygaska, bioflygaska ovanpå anrikningssand, eller bara anrikningssand. Till skott räknas blad eller barr, stammar ingår ej. (n=6-7,  $\pm$ SE). Bokstäver (a-d för skott, och s-v för rötter) anger statistiskt signifikanta ( $p < 0,05$ ) skillnader mellan behandlingarna. Angivet är också vanliga halter funna i växter (Pais & Jones, 2000) samt gränsvärde för metallhalter i torkat växtfoder för tamboskap (NRC, 1980).

| Växtart                                   | Växtdel     | Cd, mg/kg TS                   | Cu, mg/kg TS                   | Pb, mg/kg TS                | Zn, mg/kg TS               |
|-------------------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>Rötslam</b>                            |             |                                |                                |                             |                            |
| Tall                                      | Skott       | 0,04 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>   | 7,5 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>     | 0,1 $\pm$ 0,1 <sup>ab</sup> | 36 $\pm$ 4 <sup>a</sup>    |
|                                           | Rot         | 0,49 $\pm$ 0,04 <sup>stu</sup> | 241,2 $\pm$ 22,1 <sup>u</sup>  | 3,2 $\pm$ 0,5 <sup>s</sup>  | 176 $\pm$ 30 <sup>s</sup>  |
| Korgvide                                  | Skott       | 0,29 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>   | 22,1 $\pm$ 1,0 <sup>bc</sup>   | 0,1 $\pm$ 0,0 <sup>a</sup>  | 289 $\pm$ 22 <sup>bc</sup> |
|                                           | Rot         | 0,31 $\pm$ 0,02 <sup>s</sup>   | 94,1 $\pm$ 8,1 <sup>s</sup>    | 2,8 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>  | 251 $\pm$ 18 <sup>s</sup>  |
| Mjölkört                                  | Skott       | 0,20 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>   | 7,0 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>     | 0,1 $\pm$ 0,1 <sup>a</sup>  | 94 $\pm$ 12 <sup>a</sup>   |
|                                           | Rot         | 0,43 $\pm$ 0,11 <sup>st</sup>  | 75,6 $\pm$ 17,3 <sup>s</sup>   | 4,1 $\pm$ 1,5 <sup>s</sup>  | 206 $\pm$ 27 <sup>s</sup>  |
| Rörflen                                   | Skott       | 0,18 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>   | 20,2 $\pm$ 0,5 <sup>b</sup>    | 1,0 $\pm$ 0,3 <sup>c</sup>  | 342 $\pm$ 27 <sup>cd</sup> |
|                                           | Rot         | 0,70 $\pm$ 0,04 <sup>uv</sup>  | 174,7 $\pm$ 5,7 <sup>tu</sup>  | 12,1 $\pm$ 0,6 <sup>t</sup> | 511 $\pm$ 32 <sup>t</sup>  |
| <b>Rötslam på aska</b>                    |             |                                |                                |                             |                            |
| Rörflen                                   | Skott       | 0,23 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>   | 23,0 $\pm$ 2,1 <sup>bc</sup>   | 0,7 $\pm$ 0,2 <sup>bc</sup> | 242 $\pm$ 33 <sup>b</sup>  |
|                                           | Rot         | 0,89 $\pm$ 0,08 <sup>v</sup>   | 115,7 $\pm$ 6,0 <sup>st</sup>  | 10,6 $\pm$ 2,1 <sup>t</sup> | 249 $\pm$ 40 <sup>s</sup>  |
| <b>Rötslam på aska och anrikningssand</b> |             |                                |                                |                             |                            |
| Rörflen                                   | Skott       | 0,24 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>   | 19,1 $\pm$ 0,5 <sup>b</sup>    | 1,6 $\pm$ 0,7 <sup>c</sup>  | 286 $\pm$ 23 <sup>bc</sup> |
|                                           | Rot         | 1,24 $\pm$ 0,07 <sup>x</sup>   | 149,5 $\pm$ 7,7 <sup>stu</sup> | 37,3 $\pm$ 4,7 <sup>u</sup> | 398 $\pm$ 23 <sup>t</sup>  |
| <b>Rötslam på anrikningssand</b>          |             |                                |                                |                             |                            |
| Rörflen                                   | Skott       | 0,28 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>   | 25,9 $\pm$ 1,0 <sup>c</sup>    | 2,3 $\pm$ 0,7 <sup>c</sup>  | 413 $\pm$ 25 <sup>d</sup>  |
|                                           | Rot         | 0,69 $\pm$ 0,04 <sup>tuv</sup> | 166,8 $\pm$ 5,2 <sup>stu</sup> | 16,0 $\pm$ 2,9 <sup>t</sup> | 482 $\pm$ 42 <sup>t</sup>  |
| Vanliga halter i växter                   | Rot + skott | 0,2–0,8                        | 4–15                           | 0,1–10                      | 15–200                     |
| Gränsvärde för foder                      |             | 0,50                           | 25–800                         | 30                          | 500–1 000                  |



Tabell 4-6 Ackumuleringsfaktor för metaller i olika växter som odlats under 11 veckor i rötslam. En av växterna, rörflen, odlades även i rötslam på bioflygaska, bioflygaska ovanpå anrikningssand, eller bara anrikningssand. Till skott räknas blad eller barr, stammar ingår ej. (n=6-7, ±SE). Bokstäver (a-d för skott, och s-v för rötter) anger statistiskt signifikanta ( $p < 0,05$ ) skillnader mellan behandlingarna. Ackumuleringsfaktorn beskriver den andel av metallen som återfinns i växten jämfört med vad som finns i rötslammet, uträknat från koncentrationer i torrt material.

| Växtart                                   | Växtedel | Cd                         | Cu                           | Pb                          | Zn                        |
|-------------------------------------------|----------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| <b>Rötslam</b>                            |          |                            |                              |                             |                           |
| Tall                                      | Skott    | 0,02 ± 0,00 <sup>a</sup>   | 0,017 ± 0,002 <sup>a</sup>   | 0,002 ± 0,001 <sup>ab</sup> | 0,05 ± 0,01 <sup>a</sup>  |
|                                           | Rot      | 0,26 ± 0,02 <sup>stu</sup> | 0,556 ± 0,053 <sup>u</sup>   | 0,040 ± 0,005 <sup>s</sup>  | 0,24 ± 0,03 <sup>s</sup>  |
| Korgvide                                  | Skott    | 0,16 ± 0,02 <sup>bc</sup>  | 0,052 ± 0,002 <sup>bc</sup>  | 0,001 ± 0,000 <sup>a</sup>  | 0,45 ± 0,03 <sup>cd</sup> |
|                                           | Rot      | 0,17 ± 0,02 <sup>s</sup>   | 0,224 ± 0,021 <sup>s</sup>   | 0,040 ± 0,016 <sup>s</sup>  | 0,39 ± 0,04 <sup>st</sup> |
| Mjölkört                                  | Skott    | 0,12 ± 0,02 <sup>bc</sup>  | 0,017 ± 0,001 <sup>a</sup>   | 0,002 ± 0,001 <sup>ab</sup> | 0,14 ± 0,02 <sup>b</sup>  |
|                                           | Rot      | 0,25 ± 0,05 <sup>st</sup>  | 0,180 ± 0,041 <sup>s</sup>   | 0,049 ± 0,017 <sup>st</sup> | 0,30 ± 0,04 <sup>s</sup>  |
| Rörflen                                   | Skott    | 0,09 ± 0,03 <sup>ac</sup>  | 0,047 ± 0,001 <sup>bc</sup>  | 0,013 ± 0,004 <sup>c</sup>  | 0,52 ± 0,03 <sup>cd</sup> |
|                                           | Rot      | 0,40 ± 0,02 <sup>uv</sup>  | 0,407 ± 0,016 <sup>tu</sup>  | 0,150 ± 0,012 <sup>u</sup>  | 0,77 ± 0,03 <sup>u</sup>  |
| <b>Rötslam på aska</b>                    |          |                            |                              |                             |                           |
| Rörflen                                   | Skott    | 0,11 ± 0,02 <sup>ac</sup>  | 0,058 ± 0,005 <sup>bc</sup>  | 0,008 ± 0,002 <sup>bc</sup> | 0,35 ± 0,06 <sup>c</sup>  |
|                                           | Rot      | 0,42 ± 0,07 <sup>tuv</sup> | 0,295 ± 0,018 <sup>st</sup>  | 0,116 ± 0,018 <sup>tu</sup> | 0,37 ± 0,07 <sup>s</sup>  |
| <b>Rötslam på aska och anrikningssand</b> |          |                            |                              |                             |                           |
| Rörflen                                   | Skott    | 0,12 ± 0,03 <sup>ac</sup>  | 0,045 ± 0,001 <sup>b</sup>   | 0,014 ± 0,006 <sup>c</sup>  | 0,43 ± 0,05 <sup>cd</sup> |
|                                           | Rot      | 0,57 ± 0,08 <sup>v</sup>   | 0,355 ± 0,019 <sup>stu</sup> | 0,337 ± 0,050 <sup>v</sup>  | 0,59 ± 0,05 <sup>tu</sup> |
| <b>Rötslam på anrikningssand</b>          |          |                            |                              |                             |                           |
| Rörflen                                   | Skott    | 0,14 ± 0,03 <sup>bc</sup>  | 0,063 ± 0,003 <sup>c</sup>   | 0,017 ± 0,004 <sup>c</sup>  | 0,58 ± 0,04 <sup>d</sup>  |
|                                           | Rot      | 0,33 ± 0,04 <sup>tuv</sup> | 0,403 ± 0,010 <sup>stu</sup> | 0,129 ± 0,029 <sup>u</sup>  | 0,68 ± 0,06 <sup>u</sup>  |

Ackumuleringsfaktorn, som visar hur mycket metall växten innehåller i relation till omgivande rötslam, var låg i skotten för alla metaller utom Zn, men högre i rötterna (Tabell 4-6). Ingen av växterna uppvisade en ackumuleringsfaktor högre än 1.

Högst ackumuleringsfaktor (0,77) hade rötter av rörflen när det gäller Zn efter odling i enbart rötslam. Lägst värde (0,001) hade skott av korgvide av Pb i samma behandling.

## 5 Slutsatser

### 5.1 Slutsatser från projektets olika delar

#### 5.1.1 Etablering i rötslam

- Groning och etablering i rötslam kan vara svår för många växter då slammet är färskt eller har torkat så att en skorpa bildats på slammet. När slammet legat ute ett tag har dock de växter som kan bilda rötter en mycket god tillväxt.
- I fält etablerar sig växter som mjölkört och svartvide mycket effektivt genom naturlig fröspredning.
- Energigräset rörfen hade en långsam groning, men när det väl grott fungerade etableringen mycket bra, och gräset kan självant återkomma med stark tillväxt efterföljande säsonger.
- Sticklingar av Salix-arter har svårt att etablera sig i rötslam, men detta kan underlättas genom inblandning av sand i rötslammet.
- Utlägg av bark under rötslammet har en gynnsam effekt för etablering av plantor.
- Vid torr väderlek kan tunna skikt av rötslam torka ihop varvid stora sprickor bildas ned till underlaget. Därför bör tjockleken på ett täcksikt av rötslam vara åtminstone 50 cm.

#### 5.1.2 Läckage av näring och metaller från rötslam

- Läckage av kväve kan vara stort från utlagt rötslam, först som ammonium och senare som nitrat. Däremot är fosforläckaget lågt.
- Även metaller som Zn och Cu frigörs från rötslammet efter utlägg.
- Växter kan minska läckaget av både näring och metaller. I vår växthusstudie var rörfen mest effektivt, därefter kom mjölkört och korgvide, medan tall hade liten effekt på läckagevattnet.

- Korgvide och tall föredrar ammonium framför nitrat som kvävekälla, medan rörfen och mjölkört tar upp bägge kvävesorterna, vilket är lämpligt vid odling i rötslam.
- Rörfen har ett högre vattenupptag och snabbare biomassaökning i rötslam jämfört med mjölkört, korgvide och tall.
- pH i lakvatten från rötslam är initialt neutralt, men sjunker ned mot pH 4,5 om det läggs ut och luftas. Odling av många snabbväxande växter höjer pH i lakvattnet. Vid provtagning av porvatten i fält kunde dock inga effekter av växter skönjas på frigörelse av näring eller pH.
- Flygaska under rötslammet kan förhindra läckage av nitrat, särskilt då växter är etablerade i rötslammet.
- Växter kan dock öka konduktiviteten i läckagevattnet och utflöde av Cd, Cu och Zn då aska och anrikningssand förekommer i tunna lager under rötslam, troligtvis p.g.a. uttorkning av slammet och därmed ökad syretillgång och risk för vittring av anrikningssanden.
- Huruvida ett tätskikt är konstruerat så att rötslam ("sandwich-modell") eller flygaska ligger i direkt anslutning till anrikningssanden har ingen effekt på läckage av metaller, åtminstone under en period av 3 månader. Båda typerna av övertäckning minskar däremot kraftigt läckaget av både Cd, Cu och Zn jämfört med om anrikningssanden lämnas utan täckning.

#### 5.1.3 Växtupptag av metaller från rötslam

- I växthusförsöken hade rörfen högre upptag i rötter av Cd, Pb och Zn jämfört med korgvide, mjölkört och tall, medan tall uppvisade högst rot-koncentrationer av Cu. Metallkoncentrationerna i skott var högre i rörfen och korgvide än i mjölkört och tall, men var aldrig höga nog att betraktas som en risk för betande djur.
- Från prover insamlade i fält visade det sig att svartvide ackumulerar stora mängder Zn i bladen, vilket skulle kunna utgöra en risk för betande djur. Rörfen, vitgröe, korgvide och hampa hade däremot låga koncentrationer av Cu och Zn i bladen.
- Hur länge rötslam har legat ute påverkar inte upptaget av metaller (Cu och Zn) i växters skott.

## 5.2 Övergripande slutsats

Rötslam är ett lämpligt substrat för växtetablering, dock kan etablering i färskt eller torkat slam vara problematiskt, särskilt av sticklingar och plantor, medan frösådd fungerar bättre. Övertäckning av anrikningssand med rötslam och flygaska kan effektivt minska läckage av metaller från sanden. Huruvida rötslam eller flygaska läggs i direkt anslutning till anrikningssanden tycks däremot ha mindre betydelse, huvudsaken är att sanden täcks över. Från utlagt rötslam finns det en risk för läckage av kväve och metal-

ler. Växter kan förhindra ett sådant läckage, framför allt genom att minska mängden läckagevatten, men effekten varierar stort mellan olika växtarter. Energigräset rörflen visade god potential för etablering i täckskikt av rötslam, och för minskning av läckage av näring och metaller. Om en energigröda ska odlas rekommenderas energigräs före Salix-arter. Störst del av de metaller som analyserades (Cd, Cu, Pb och Zn) i växter som växt i rötslam, hade ackumulerats i rötterna, medan metallhalter i bladen var lägre. Av de analyserade växterna uppvisade endast svartvide så pass höga koncentrationer av zink att det skulle kunna utgöra en risk för betande djur.

## 6 Referenser

- Andersson, P.-G. och Nilsson, P. (1999). *Slamspridning på åkermark*. VA-Forsk rapport 1999: 22.
- Arnon, D. I. (1949). *Copper enzymes in isolated chloroplasts*. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology 24 (1): 1–15.
- Bergmeyer, H. U., Gawehn, K. och Grassl, M. (1974). *Enzymes as biochemical reagents*. I: H. U. Bergmeyer (red), *Methods in enzymatic analysis*. New York, Academic Press.
- Borgegård, S. O. och Rydin, H. (1989). *Utilization of waste products and inorganic fertilizer in the restoration of iron-mine tailings*. Journal of Applied Ecology 26: 1083–1088.
- Carling, M., Håkansson, K., Mácsik, J., Mossakowska, A. och Rogbeck, Y. (2007). *Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskiktmaterial vid sluttäckning av deponier – en vägledning*. Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2007-10.
- Clesceri, L. S. och Greenberg, A. E. (red). (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Eaton, A. D.
- Eriksson, J. (2001). *Halter av 61 spårelement i avloppsslam, stallgödsel, handelsgödsel, nederbörd samt i jord och gröda*. Naturvårdsverket, rapport 5148.
- EU (1991). *Rådets direktiv 91/676/EEG av den 12 december 1991 om skydd mot att vatten förorenas av nitrater från jordbruket*.
- Fang, M., Wong, J.W.C., Ma, K.K., och Wong, M. H. (1999). *Co-composting of sewage sludge and coal fly ash: nutrient transformations*. Bioresource Technology 67: 19–24.
- Glass, D.J. (2000). *U.S. and international markets for Phytoremediation, 1999–2000*. D. Glass Ass., Inc.
- Greger, M., Landberg, T. och Berg, B. (2001). *Salix clones with different properties to accumulate heavy metals for production of biomass*. Akademitryck, Edsbruk. ISBN 91-631-1493-3.
- Hardej, M. och Ozimek, T. (2002). *The effect of sewage sludge flooding on growth and morphometric parameters of Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel. Ecological Engineering 18: 343–350.
- Imas, P., Bar-Yosef, B., Kafkafi, U. och Ganmore-Neumann, R. (1997). *Release of carboxylic anions and protons by tomato roots in response to ammonium nitrate ratio and pH in nutrient solution*. Plant and Soil 191: 27–34.
- Ledin, S. (1999). *Växtetablering på störda marker – särskilt på deponier för gruvavfall*. Naturvårdsverket, rapport 5026.
- Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2:a uppl. Academic Press, London, UK.
- Murphy, J. och Riley, J. P. (1962). *A modified single-solution method for the determination of phosphate in natural waters*. Analytica Chimica Acta 27: 31–36.

- Nilsson, C. (1996). *Organiska miljöföroreningar i slam*. Naturvårdsverket, rapport 4673.
- NRC (National Research Council) (1980). *Mineral Tolerance of Domestic Animals*. National Academy of Science, Washington, DC, USA.
- Pais, I. och Jones, J.B.Jr, (2000). *The Handbook of Trace Elements*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Smith, M. T. E. och Tibbett, M. (2004). *Nitrogen dynamics under Lolium perenne after a single application of three different biosolids types from the same treatment stream*. Bioresource Technology 91: 233-241.
- StatSoft, Inc. (2007). STATISTICA (data analys program), version 8.0. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Steenari, B-M., Schelander, S. och Lindqvist, O. (1999). *Chemical and leaching characteristics of ash from combustion of coal, peat and wood in a 12 MW CBF – a comparative study*. Fuel 78: 249–258.
- Stehouwer, R., Day, R.L. och Macneal, K.E. (2006). *Nutrient and trace element leaching following mine reclamation with biosolids*. Journal of Environmental Quality 35: 1118–1126.
- Stoltz, E. och Greger, M. (2002a). *Cottongrass effects of trace elements in submersed mine tailings*. Journal of Environmental Quality 31:1477–1483.
- Stoltz, E. och Greger, M. (2002b). *Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings*. Environmental and Experimental Botany 47: 271–280.
- Stoltz, E. och Greger, M. (2006). *Influences of wetland plants on weathered acidic mine tailings*. Environmental Pollution 144(2): 689–694.
- Su, D.C. och Wong, J.W.C. (2003). *Chemical speciation and phytoavailability of Zn, Cu, Ni and Cd in soil amended with fly ash-stabilize sewage sludge*. Environment International 29: 895–900.
- Van Assche, F., Cardinaels, C. och Clijsters, H. (1988). *Induction of enzyme capacity in plants as a result of heavy metal toxicity: Dose-response relations in Phaseolus vulgaris L., treated with zinc and cadmium*. Environmental Pollution 52: 103–115.
- Villar, D.L. och Garcia Jr, O. (2002). *Solubilization profiles of metal ions from bio-leaching of sewage sludge as a function of pH*. Biotechnology Letters 24: 611–614.
- Xenidis, A., Mylona, E. och Paspaliaris, I. (2002). *Potential use of lignite fly ash for the control of acid generation from sulphidic wastes*. Waste Management 22: 631–641.







Box 47607, 117 94 Stockholm

Tel 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post [svensktvatten@svensktvatten.se](mailto:svensktvatten@svensktvatten.se)

[www.svensktvatten.se](http://www.svensktvatten.se)