

SVENSKA TRÄSKYDDSSINSTITUTET

SWEDISH WOOD PRESERVATION INSTITUTE

Meddelanden

Reports

Nr 166

1992

ISSN 0346-7090

Läckage av arsenik, koppar och krom från impregnerat
träspån deponerat i mark
Ett elvaårigt fältförsök

Leakage of arsenic, copper and chromium from preserved wooden
chips deposited in soil
An eleven year old field experiment

Johan Bergholm

STOCKHOLM 1992

INNEHÅLL

ENGLISH SUMMARY	3
INLEDNING	7
MATERIAL OCH METODER	8
RESULTAT OCH DISKUSSION	9
Nederbörd, marktemperatur och mängd lakvatten	9
pH i spånskikt och lakvatten	10
Utlakning av As, Cu och Cr	10
Halten As, Cu och Cr i marken	12
Lösligheten av As, Cu och Cr i mark	13
Mängden As, Cu och Cr som lakats ut från spånen	13
SAMMANFATTNING	16
REFERENSER	17
TABELLER	18
FIGURER	29

**LEAKAGE OF ARSENIC, COPPER AND CHROMIUM FROM PRESERVED WOODEN CHIPS
DEPOSITED IN SOIL
AN ELEVEN YEAR OLD FIELD EXPERIMENT**

INTRODUCTION

Wood preservatives containing arsenic, copper and chromium (CCA-solution) are used in Sweden. In 1990 a total of 384 000 m³ of poles and sawn products were treated with CCA-solutions. The sawn products were used for out-door furniture and other wood constructions. In such cases pieces of wood and sawdust were produced. The waste could amount to about five per cent of the wood. Earlier, the waste was burnt, causing air pollution problems. Another way to get rid of the waste was to deposit it on, or in, the soil.

This project started in 1979 with the aim to study the leaching of arsenic, copper and chromium from CCA-preserved wooden chips deposited in the soil.

Three different soil types were used; a clay soil with a pH around 7 and with a high content of clay, a marsh peat soil with a high content of organic matter and a high buffering capacity, and a fine sand soil with a low content of both clay and organic matter and with a relatively low pH. The physical and chemical properties of the soils are listed in Table 1. The wooden chips were preserved with Boliden K33. The contents of arsenic, copper and chromium are listed in Table 3.

MATERIAL AND METHODS

Three field lysimeters, with a diameter of 30 cm and a depth of 70 cm were prepared with a 35 cm thick soil layer covered with a 15 cm layer of chips from preserved wood. The chips were covered with 5 cm of the same soil as the one below the chips layer. The amounts of soil and wooden chips used are given in Table 2. The drainage water was collected via PVC-tubes connected to the lysimeters and ending in a collecting cellar. The experimental design is shown in Figure 1.

Drainage water was collected during the first four years (1980 - 1983). Then there was a break until 1990 when samples were collected again from February until October, when the soils and the wooden chips were collected. The upper soil was taken as one whole sample. The chips layer was split into two parts. The main soil column under the chips layer was split into five layers; 0-2, 2-6, 6-14, 14-22 and 22-35 cm. The layer in the contact zone between soil and wooden chips was discarded in order to avoid heavy contamination of the samples.

The total contents of soluble arsenic, copper and chromium were measured in extracts of the soils with 2 M HCl on a steam bath for two hours. The exchangeable content of the elements was measured by extracting with 1 M NH₄OAc for one hour. Water soluble arsenic was measured by extracting with distilled water in the proportion 1:2 (soil:water) for 24 hours.

Arsenic was analysed by the arsen hydride method, and copper, chromium, iron and aluminium were analysed by atomic absorption spectrometry.

The total contents of arsenic, copper and chromium in the wooden chips were analysed by ray spectrometry.

The pH was measured with combination electrode.

RESULT AND DISCUSSION

During the whole period of eleven years the lysimeters received about 6200 mm of precipitation, corresponding to 438 liters. The amount of drainage water was calculated (no observations were made during 1984 - 1989) to be 3750 mm from the clay and marsh peat lysimeters and 200 mm more from the fine sand lysimeter, i.e. correspond to 265 and 280 liters respectively. Between 60 and 64% of the precipitation was drained out. About 12 liters was taken up by the soil in the clay and marsh peat soil at the start. The rest was evaporated. The yearly amount of precipitation and the calculated amount of drainage water are presented in Table 4.

The average pH value of the precipitation was about 4.3. It was higher in the summer and lower in the rest of the year.

The pH of the drainage water from the clay and marsh peat lysimeters was relatively constant during the measured periods. The soils were well-buffered and the drainage water was not affected by the low pH of the precipitation. But this was the case in the fine sand lysimeter. The pH of the drainage water dropped 0.6 pH-units between 1983 and 1990, Table 5 and Figure 4a. This may have increased the leaching of arsenic from that soil. There were seasonal variations in pH but there was no correlation between these pH variations and variations in the concentrations of arsenic, copper and chromium in the drainage water.

When the CCA-treated wooden chips alone are leached with precipitation or other leaching solutions the first leachate contains very high concentrations of arsenic but also of copper and chromium. The elements are washed out from the wooden chips. After a while the concentrations decrease sharply to a more constant level.

When the layer of wooden chips is covered by soil the drainage water from the soil affects the leaching of the elements from the wooden chips. The leaching of arsenic from the chips layer decreases about 40% when covered with clay soil compared with uncovered chips, and about 15% when covered with marsh peat soil or fine sand soil. The leaching of copper increases about four times in the marsh peat soil treatment. The effect by the other soil is much less. The leaching of chromium decreased 65% in the clay soil treatment and also slightly in the fine sand soil treatment, Table 6.

The leaching of arsenic during the two periods studied is shown in Figure 6 and the measured and calculated yearly amounts in the drainage water are listed in Table 7. The outwash of arsenic from the chips layer leaves the soil column as a sharp pulse in the beginning of the second year in the clay and marsh peat lysimeters. The pulse

from the fine sand soil starts already in autumn of the year before. The pulse from the clay and fine sand lysimeters contained about 24 mg of arsenic and that from the marsh peat lysimeter about 11 mg. This is only a fraction of what could be expected to leave the chips layer in the different lysimeters. The rest is adsorbed or precipitated as less soluble arsenate compounds in the soil column.

Totally about 80, 14 and 60 mg arsenic was leached out from the clay, marsh peat and fine sand lysimeters, respectively. This corresponds to less than 1% of the total content in the wooden chips layer.

Between 1983 and 1990, the concentration of arsenic in the drainage water from the clay and fine sand lysimeters increased but was still very low from the marsh peat lysimeter, Figure 6b.

Less than 20 mg of copper was leached out from the clay and marsh peat lysimeters and only 2 mg from the fine sand lysimeter. Most of the copper comes together with the outflow of soluble organic compounds from the marsh peat lysimeter the second year, Figures 5 and 7. The total outflow of copper was between 0.05 and 0.4% of the content in the wooden chips layer.

Only a few mg of chromium was leached out, most of it already in the first year from the fine sand lysimeter, Figure 8. The total outflow of chromium corresponds to less than 0.2% of the content in the wooden chips layer.

The distribution of arsenic, copper and chromium in the soil columns is shown in Table 8 and Figures 9-11. The content of the elements had increased also in the upper soil layer above the wooden chips due to upward transportation of water during dry periods. The concentration of all elements was highest just below the wooden chips layer and decreased towards the bottom of the soil column.

Both arsenic and chromium were more mobile in the fine sand soil than in the others. Relatively high concentrations were found in the bottom of the soil columns. The mobility of arsenic is also shown by the high water soluble fraction in these soils, from figures listed in Table 9.

The budget of the inflow and outflow of arsenic, copper and chromium in the lysimeters can be calculated in two ways. One approach is to take the difference between the contents in the wooden chips at the start and when finishing the experiment. This method may give false values due to the problems in obtaining representative samples. The preservative solution is evenly distributed in the wooden block from where the chips are prepared and that makes it difficult to get representative subsamples for analysis.

The other method of calculating the budget is to summarise the total soluble amount in the soil layers plus the leached amount minus the amount added with precipitation and the background content in the soils. This method has the drawback of summarising many different components. But, on the other hand, the subsamples from the well-mixed soil and from the drainage water are more representative due to more homogeneous samples.

Results from the two calculation methods are presented in Table 10.

The correlation between the two methods is not too good. However, it is seen that a very small part of the elements released from the chips layer is drained out during the experimental period of eleven years. The main part of the released arsenic, about 99%, is adsorbed or precipitated in the 35 cm deep soil layer in the marsh peat and fine sand lysimeter. The corresponding figure for the clay soil is 96%. The sorption of copper and chromium is as effective as of arsenic.

The release of arsenic from the chips layer is lowest in the clay soil and three times higher in the fine sand soil.

The capacity of the clay soil to adsorb arsenic was about 500 mg/kg. The marsh peat soil was able to adsorb about 5000 mg/kg and the fine sand soil 100 mg/kg (Bergholm, 1989). The clay soil and the marsh peat soil had the capacity to adsorb all arsenic found in the wooden chips layer but the capacity of the fine sand soil was exceeded already during the run of the experiment. Still, more arsenic was found in that soil than what the soil could adsorb. Thus, some of the arsenic found in the soil must have been precipitated as less soluble arsenate salts. One part could be copper arsenate because of the high content of copper in that soil. Arsenic could also be precipitated as iron and aluminum arsenates. The pH of the soil was in the optimum range for that reaction. High concentrations are often found in polluted areas at preservative factories. In such places, the content in the soil often exceed the adsorption capacity of the soil.

The recommendation concerning deposition of CCA-preserved wooden waste is to deposit it on a layer of organic soil or other organic material with high adsorption capacity and to cover it with a layer of clay soil or a soil with low organic content and a pH above 7, which can be done by liming.

INLEDNING

I Sverige impregnerades 1990 384 000 m³ stolpar, sliprar och virke med CCA-medel innehållande koppar (C), krom (C) och arsenik (A). Hela 97 % av den produktionen var sågat virke (Nilsson, 1991). 1979, då föreliggande undersökning startade, impregnerades 330 000 m³ med CCA-medel.

Det impregnerade virket har använts bl a för tillverkning av trallar, utemöbler och andra konstruktioner som utsätts för väta. Vid bearbetning av virket bildas avfall i form av kapbitar, hyvelspån och sågspån. Beräkningar som gjorts av Svenska Träskyddsinstitutet efter en enkätundersökning 1977 bland företag inom träbranschen visade att ca 5% av det impregnerade virket blev avfall. Vanligen brändes avfallet med risk för skador på miljön genom utsläpp av främst arsenik men även koppar och krom till luften eller genom anrikning av dessa ämnen i askan med risk för läckage till mark och grundvatten.

I syfte att söka andra kvittblivningsmetoder med mindre effekter på miljön startades 1979 på intiativ av Svenska Träskyddsinstitutet en undersökning på avdelningen för Marklära och Ekokemi, Sveriges Lantbrukuniversitet. I denna undersökning studerades läckaget av arsenik, koppar och krom från träspån som impregnerats med Boliden K33 (ett CCA-medel) och som deponerats i mark.

Undersökningen bestod av en lakningsstudie på laboratoriet (Persson & Isaksson, 1983) och en lysimeterstudie i fält. Dessa undersökningar omfattade även studier av läckaget från träspån som impregnerats med Tanalith CBC och Cuprinol Tryck. Lysimeterstudien i fält pågick till oktober 1983 då leden med Tanalith CBC och Cuprinol Tryck upphörde. Resultaten från denna period finns i en rapport till Träskyddsinstitutet (Bergholm, 1985). Resterande tre lysimetrar med Boliden K33 impregnerade träspån behölls men utan provtagning av lakvattnet. Efter något mer än sex års uppehåll återupptogs provtagningen igen i februari 1990 och pågick fram till oktober samma år. Då upphörde försöket i sin helhet och jorden från de tre resterande lysimetrarna samlades in.

Arsenik, koppar och krom fastläggs i marken på olika sätt. Arsenik, som kemiskt är närbesläktat med fosfor, förekommer som anjon. I oxiderad miljö, d v s i icke vattenmättade jordar med god lufttillförsel, förekommer arseniken i femvärd form. I reducerad miljö övergår arseniken till trevärd form som är rörligare i marken och mer toxisk än den femvärda. I impregnerat virke och stolpar liksom i spån från impregnerat virke förekommer arseniken i femvärd form i förening med koppar och krom. Arsenik liksom fosfor bildar stabila föreningar med kalcium i basisk miljö och med amorft järn och aluminium i sur miljö. Även andra metaller i marken bl a mangan kan bilda stabila föreningar med arsenik (Sadiq et. al, 1983). Arsenik fastläggs starkare i ler och humusrika jordar än i sandjordar. Arsenik kan förekomma som utbytbar jon på markkolloiderna genom adsorption till järn- och aluminiumhydroxylgrupper. Arsenik är den mest rörliga av de tre ämnena arsenik, koppar och krom i marken.

Koppar binds starkt till organiskt material. Det betyder att det dels kan fastläggas direkt i kontakt med humushaltiga jordar men också att det kan bindas till vattenlösliga och därmed rörliga organiska föreningar som kan förekomma i marklösningen. Vid höga pH-värden i

marken fälls kopparn ut som kopparhydroxid.

Krom kan förekomma både som trevärd katjon och som sexvärd anjon. Den senare formen är mera toxisk och rörligare i marken. Vid impregneringen av virket tillförs krom som kromsyra d v s den sexvärda formen. Under fixeringsprocessen reduceras kromet till trevärd form i kontakt med virkets organiska föreningar. Trevärd krom fälls ut som hydroxider redan vid svagt sura förhållanden i marken och fastläggs därmed. Undersökningar tyder dock på att krom i samband med impregneringsverksamhet kan förekomma i sexvärd form i marken och därmed i mera rörlig form (Bergholm & Dryler, 1989).

Syftet med denna undersökning är att beräkna mängden arsenik, koppar och krom som läckt ut från lysimetrarna under de elva försöksåren samt att genom bestämning av ämnenas fördelning i markprofilen i lysimetern och av den resterande mängden i spånen beräkna ämnenas löslighet, fastläggning och rörlighet i marken.

MATERIAL OCH METODER

Lysimetrarna bestod av 70 cm djupa och 30 cm vida runda keramik-behållare med ett utlopp i botten som via en plastslang mynnade i ett nedgrävt uppsamlingsrum, Figur 1. Lysimetrarna hade tidigare använts i andra lysimeterstudier. För att förhindra störningar av eventuella föroreningar från tidigare försök försågs kärlden med en plastsäck av 2 mm plast med en plastslang som fördes ner genom den befintliga avloppsslangen till uppsamlingsrummet.

Tre jordar med helt olika egenskaper avseende pH och halterna ler och humus användes i försöket; en lerjord, en kärrtorvjord och en mojord. Jordarnas fysikaliska och kemiska egenskaper redovisas i Tabell 1. Lysimetrarna laddades först med ett tunt lager med glasull i botten följt av ett 5 cm tjockt lager med syratvättad kvartssand. Över detta lades ett 35 cm tjockt lager jord följt av ett 15 cm tjockt lager med impregnerade träspån. Överst lades ett 5 cm tjockt lager av samma jord som under spånen. Mängden jord och träspån i de tre lysimetrarna framgår av Tabell 2.

Träspånen hade framställts från träbitar som impregnerats med Boliden K33-lösning.

Totalhalten och totalmängden arsenik, koppar och krom i de använda träspånen vid starten 1979 framgår av Tabell 3.

Lakvattnet provtogs med tätare intervall vid försökets start och i samband med tjällossningen varje år. Provtagning var glesare under resten av året. Sammanlagt togs ungefär 20 prover per år de första fyra åren och 1990. pH och färg samt mängden prov mättes omgående. På 1990 års prover mättes ingen färg. Proverna konserverades med salpetersyra till 0.5% syra i provet och förvarades i kyl.

I oktober 1990, då försöket avslutades, togs jord och träspån ut ur lysimetrarna enligt följande: Det översta jordlagret togs ut i sin helhet med undvikande av det allra närmaste skiktet intill spånen. Spånskiktet delades upp i en övre och en undre hälft. Underliggande jordskikt delades upp i nivåerna 0-2, 2-6, 6-14, 14-22 och 22-35 cm. Provet från varje nivå blandades omsorgsfullt till ett homogent prov.

Samtliga analyser utfördes på färska prover.

På jordproverna och spånen bestämdes pH i destillerat vatten. Totalhalten lösligt As, Cu och Cr samt Fe och Al i jordproverna bestämdes genom att extrahera proverna med 2 M HCl på ångbad under två timmar. 5 gram prov extraherades med 100 ml HCl.

Fraktionen utbytbar och relativt lösligt As, Cu och Cr bestämdes genom att extrahera jordproven en timme med 1 M NH_4OAc vid pH 4.8. 10 gram jord extraherades med 100 ml lösning.

Andelen vattenlösligt As i jorden, bestämdes genom extraktion av jordproven med destillerat vatten i en jämviktslösning innehållande en del jord och två delar vatten. Proverna skakades under 24 timmar, centrifugerades vid 10 000 varv per minut och filtrerades genom 0.45 μm membranfilter.

Totalhalten As, Cu och Cr i träspån bestämdes på malda prover dels med våglängdsdispersiv röntgenspektrometer, dels efter uppslutning med salpetersyra och perklorosyra följt av analys på ICP-plasma.

I övriga extrakt analyserades As enligt hydrid metoden, Cu, Cr, Fe och Al med atomabsorptionsfotometrer (AAS) med flamma och låga halter av Cu och Cr på AAS med grafitugn.

RESULTAT OCH DISKUSSION

Nederbörd, marktemperatur och mängd lakvatten

Redovisade klimat- och nederbördsdata beskriver förhållandena vid Ultuna klimatstation ca 1 km SV om försökslokalen. Förhållandena på försökslokalen kan ha avvikit något från klimatstationens. Försökslokalen låg nämligen skyddad innanför en granhäck och i nära anslutning till Uppsalaåsen till skillnad från klimatstationen som ligger på öppna fältet. Nederbörds mängden kan därför ha varit något större och marktemperaturen något högre på försökslokalen än vad resultaten från klimatstationen visar.

Det normala nederbörds mönstret under året på klimatstationen karakteriserades av mindre nederbörds mängder i början på året och större mängder under sensommar och början på hösten, Figur 2. En del år hade ett kraftigt avvikande mönster. Under 1982 och 1989 förekom inga regnrika månader resulterande till de lägsta årsnederbörds mängderna under hela försöksperioden, Tabell 4. Även 1987 var årsnederbörds mängden låg som följd av den nederbördsfattiga vintern, våren och senhösten. De första försöksåren, 1980 och 1981, var de nederbördsrikaste.

Från starten 1979-12-18 till avslutningen av försöket elva år senare 1990-10-16 kom sammanlagt 6180 mm nederbörd. Under de första fyra åren, då det kom 2430 mm, passerade mellan 50 och 75% av nederbörden genom lysimetrarna. Den resterande nederbörds mängden bands dels i marken och försvann, dels genom avdunstning. Utlakningen de första åren var i genomsnitt 63% av nederbörds mängden med något mindre mängd från ler- och kärrtorvjorden och något mer från mojordden.

Relationen mellan nederbördsmängd och genomsnittlig utlakad mängd för de fyra första åren användes för att beräkna den utlakade mängden under perioden 1984 till och med 1989. Den samlade utlakade mängden under hela försöksperioden beräknades till ca 3750 mm från ler- och kärrtorvjorden och ca 200 mm mer från mojorden motsvarande 61 och 64% av nederbördsmängden.

Marktemperaturen under vintern var av intresse eftersom utlakningsförhållandena påverkades av vinterns tjälning av marken (Bergholm, 1985). Marktemperaturen på klimatstationen mättes på 5 och 35 cm nivåerna. Temperaturen i det översta markskiktet var under alla vintrar mellan 1980 och 1987 under 0 grader. Tjäljen gick troligen ännu längre ner i marken i början, i mitten och i slutet av den perioden. De tre sista åren var helt tjälfria, Figur 3.

pH i spånskikt och lakvatten

Nederbörden hade i genomsnitt ett pH kring 4.3, något lägre under höst, vinter och vår och något högre under sommaren.

Lakningsvattnet från övre jordskiktet i lysimetrarna påverkade pH i spånskiktet. Normalt har spånen ett pH kring 5.4. pH i träspånen från lerjorden hade ökat till pH 6.6 och i träspånen från kärrtorv-jorden hade pH ökat till 5.9 medan pH i spånen från mojorden höjts endast någon tiondels pH-enhet.

Lakvattnet från den kalkhaltiga och buffrande lerjorden hade ett pH som varierade kring 7.3, Figur 4a. Årsmedelvärdet var någon tiondel högre de två första åren. I slutet av försöksperioden (1990) hade pH stabiliserats kring pH 7.3, Tabell 5.

Lakvattnet från kärrtorvjorden hade ett medel-pH kring 5.9 det första året. Det sjönk sedan under de första åren till pH 5.7. 1990 hade pH stigit igen och låg kring 6.2. Lakvattnets pH från mojorden var till en början strax under pH 6 men sjönk till 5.3 fram till 1990 ett värde som överensstämmer med pH i mojorden och spånskiktet.

Något samband mellan pH-variationerna i lakvattnet från respektive lysimeter och utlakningen av arsenik, koppar och krom har inte kunnat påvisas. Däremot fanns det ett samband mellan det genomsnittliga pH-värdet i lakvattnet från de olika jordarna och utlakningen av arsenik. Utlakningen ökade med sjunkande pH.

Utlakning av As, Cu och Cr

Utlakning av arsenik, koppar och krom från enbart spån har ett förlopp som kan indelas i två delar. Den första, den s k "tvättfasen", innehåller till en början mycket höga halter som snabbt klingar av. Denna fas varar under endast en relativt kort period. Det är ytligt liggande salter och föreningar som lakas ut. Halten av de olika ämnena beror delvis av lakningsintensiteten, ju lägre genomflöde av lakvatten desto högre koncentration (Bergholm, 1985). Efter "tvättfasen" följer ett skede med jämförelsevis låga halter. I detta skede avklingar halterna mycket långsamt och är näst intill konstanta över en längre tidsperiod.

Läggs ett lager jord ovanpå spånskiktet påverkas lakningsvattnet av de kemiska förhållandena i jorden. Lakvattnets kemiska karaktär förändras och därmed utlakningen av arsenik, koppar och krom från spånskiktet. Lerjorden med sitt pH kring 7 minskar utlakningen av arsenik och krom men påverkar inte nämnvärt utlakningen av koppar. Kärrtorvjorden med sin höga halt organiskt material ökar kraftigt utlakningen av koppar men påverkar obetydligt utlakningen av arsenik och krom. Mojorden som varken innehåller ler eller organiskt material påverkar inte nämnvärt utlakningen av varken arsenik, koppar eller krom, Tabell 6.

I det underliggande jordskiktet under spånen fastläggs arsenik, koppar och krom mer eller mindre hårt beroende på jordarnas pH och halt av ler, organiskt material samt amorft järn och aluminium.

Det första lakvattenprovet, som innehöll arsenik, kom från mojordslysometern beroende på mojordens låga bindningskapacitet för arsenik samtidigt som arsenikhalten var hög i den s k "tvättfasen". Först under andra året återfanns arsenik i lakvattnet från de båda andra lysimetrarna, Figur 6a. Gemensamt för de tre jordarna var att arsenik kom ut som en mer eller mindre skarp puls. Halten avklingade därefter successivt till förhållandevis låga värden mellan 100 till 150 $\mu\text{g/L}$ från mo- respektive lerjorden och så lågt som ca 10 $\mu\text{g/L}$ från kärrtorvjorden.

Fram till 1990 ökade halten arsenik i lakvattnet igen från ler- och mojorden medan den sjönk till några få $\mu\text{g/L}$ från kärrtorvjorden, Figur 6b. Halten varierade kraftigt under året från de två första jordarna. Medelvärdet var 1990 ca 2.5 gånger högre än under 1983, Tabell 5.

Utlakningen av arsenik påverkas av tjälning och torra. Det gäller särskilt från lerjorden. Det första lakvattnet efter tjällossningen 1982 och 1983 hade förhöjda halter av arsenik som avklingade snabbt, Figur 5a.

För att beräkna utlakningen under mellanperioden 1984-1989 antogs arsenikhalten ha ökat med ett konstant värde på ca 40 $\mu\text{g/L}$ och år. Under hela försöksperioden lakades 80 mg arsenik ut från lerjorden, Tabell 7. Det motsvarar 1% av ursprungsmängden i spånskiktet. Motsvarande värden för kärrtorvjorden var 14 mg respektive 0.17% och från mojorden 60 mg respektive 0.7%.

Den första arsenikpulsen i de tre jordarna, som härrörde från "tvättfasen", innehöll lika stora mängder arsenik från ler- och mojorden, nämligen 24 mg, trots de helt olika utlakningsförloppen. Lerjorden hade en skarpt koncentrerad och mojorden en mycket utdragen puls, Figur 6a. Från kärrtorvjorden kom endast hälften så mycket med "tvättfasvattnet" beroende på kärrtorvjordens större adsorptionsförmåga för arsenik. Med tanke på mojordens låga bindningskapacitet för arsenik samt det övre lerjordlagrets dämpande effekt på utlakningen från träspånen i lerjorden borde arsenikpulsen från mojorden innehållit mer arsenik än från lerjorden. Detta tyder på att mer arsenik än väntat fastlagts i mojorden. Det troliga är att arsenik fällts ut som stabila arsenatsalter.

Kopparhalterna i lakvattnet var generellt lägre än arsenikhalterna vilket stämmer överens med deras inbördes förhållande avseende

rörligheten i spån och mark, Figur 7a och Tabell 6.

De högsta halterna kom 1981 med lakvattnet från kärrtorvjorden. Det berodde bl a på den samtidiga utlakningen av vattenlösliga organiska föreningar som indikerades genom mörkfärgningen av lakvattnet, Figur 5. Halterna av både koppar och organiska föreningar var förhöjda under sommaren och lägre under vintern. Lakvattnet från ler- och mojorden var nästan helt klart och innehöll därmed också lågt halt organiskt material och koppar.

Det större läckaget av koppar från kärrtorvjorden kom under de första åren. Under 1990 hade halten sjunkit till ca 15 $\mu\text{g/L}$, Tabell 5. I mojorden fastlades kopparn effektivt och halterna i lakvattnet översteg inte 20 $\mu\text{g/L}$ och från 1982 var halten inte högre än 6 $\mu\text{g/L}$. Kopparhalten ökade i lakvattnet från lerjorden med ca 2.5 gånger från 1983 till 1990. Ökningen var ungefär lika stor som för arsenik.

De låga kopparhalterna från mojorden stöder tanken att arsenik fällts ut i mojorden och att en del av denna fällning bestod av koppararsenat.

Under hela försöksperioden kom det ut ca 20 mg koppar från ler- och kärrtorvjordarna men bara ca 2 mg från mojorden. Det utgjorde endast 0.4 respektive 0.05% av totalhalten i spånen, Tabell 7.

Utlakningen av krom hade ett helt annat förlopp i de fall då det över huvud taget kom några större mängder, Figur 8. Den snabba utlakningen från mojorden antyder att allt eller delar av det krom som löstes ut från spånskiktet passerade rakt genom det undre jordskiktet utan att några fastläggnings- eller utlösningmekanismer varit verk samma. Det är troligt att det första lakvattnet innehöll den rörliga sexvärda kromatjonen, som i de andra jordarna fastlagts p g a hög humus- och lerhalt. Från 1981 stabiliserades utlakningen från mojorden på en låg nivå. Nästan all krom fastlades i marken i ler- och kärrtorvjordarna och halterna i lakvattnet var endast ca 15 $\mu\text{g/L}$. 1990 var halterna fortfarande lika låga från kärrtorv- och mojordarna men hade ökat något från lerjorden.

Mellan 4 och 9 mg krom lakades ut under försöksperioden, mest från mojorden och minst från kärrtorvjorden. Det motsvara mellan 0.1 och 0.2% av totalhalten i spånen.

Halten As, Cu och Cr i marken

Fördelningen av arsenik, koppar och krom i det undre markskiktet redovisas i Tabell 8 och i Figurerna 9-11. I Tabell 8 anges halten i mg/kg. För att bättre kunna jämföra fördelningen av arsenik, koppar och krom mellan jordarna, som hade olika volymvikt, anges halten i figurerna i $\mu\text{g/cm}^3$. Nollnivån i figurerna anger läget för spånskiktet. Det som ligger över noll är det övre markskiktet. Värdena visar vad som tillförts markskiktet, bakgrundsvärdena har frånräknats.

Arsenik, koppar och krom lakades inte bara ner genom det undre markskiktet utan tillfördes även det övre markskiktet i samband med vattenavdunstning. Det rörde sig inte om stora mängder, Tabell 8.

De högsta halterna av arsenik, koppar och krom återfanns i skiktet närmast under spånen. Halterna minskade mot djupet.

De högsta halterna av arsenik förekom i kärrtorvjorden följt av mojorden och sist lerjorden, Figur 9. I ler- och kärrtorvjorden avklingade halten snabbt och var nära noll redan på halva djupet. I mojorden var arseniken mera jämt fördelad genom hela jordskiktet.

Det mesta av kopparn var koncentrerat till jordskiktet omedelbart under spånskiktet, särskilt i kärrtorv- och lerjorden, Figur 10. I mojorden hade kopparn transporterats ner till något större djup.

Halten krom var ungefär en tiondel lägre än halten arsenik och koppar. Mycket lite krom lakades ner genom markskiktet i kärrtorvjorden. I de andra jordarna fanns förhöjda halter även i botten på det undre markskiktet, Figur 11.

De olika fördelningsmönstren av arsenik, koppar och krom i jordarna förklaras främst med jordarnas olika bindningskapacitet för dessa ämnen. I kärrtorvjorden, som hade den högsta bindningskapaciteten, återfanns 40% av markskiktets totala mängd arsenik, 89% av mängden koppar och 49% av mängden krom i de två översta centimetrarna. Motsvarande värden för lerjorden var 24% av mängden arsenik, 45% av mängden koppar och 17% av mängden krom och för mojorden 13% av mängden arsenik, 28% av mängden koppar och 14% mängden krom. Värdena beskriver tydligt jordarnas förmåga att binda de olika ämnena och att koppar binds hårdare i marken än arsenik och krom.

Lösligheten av As, Cu och Cr i mark

Halten ammoniumacetatlösligt arsenik, koppar och krom samt halten vattenlösligt arsenik och deras procentuella andel av "totalhalten" i marken redovisas i Tabell 9.

Halten lätttrörlig arsenik, koppar och krom minskade mot djupet. Det förekom dock en viss differentiering av ämnenas löslighet i markprofilen. Andelen lätttrörlig koppar och krom minskade mot djupet i samtliga jordar medan andelen lättlöslig arsenik var relativt konstant genom hela profilen.

Lösligheten av arsenik var störst i mojorden, ca 33% och lägst i kärrtorvjorden, ca 8%. Kopparn var mycket lättlöslig i mojorden, 80% i den övre och 50% i den nedre delen av profilen löstes ut med ammoniumacetat. Krom var 2-3 gånger hårdare bundet i marken än kopparn.

Den höga rörligheten av koppar i mojorden kan förklaras dels av mojordens låga bindningskapacitet för koppar, dels att utfälld koppararsenat gått i lösning vid extraktion med den sura ammoniumacetatlösningen.

Andelen vattenlösligt arsenik var ca 4% av totalhalten i ler- och mojorden och ca 0.5% i kärrtorvjorden. De små mängder som lakades ut från kärrtorvjorden kan dessutom varit bundet till organiska föreningar. Lösningen var nämligen svagt brunfärgad.

Den förhöjda halten arsenik i lakvattnet 1990 från ler- och mojorden,

som behandlats i tidigare avsnitt, härrörde troligen till största delen från det nedre jordskiktet. Den fastlagda arseniken började där lösas upp igen, särskilt från mojorden.

Mängden As, Cu och Cr som lakats ut från spånen

Den samlade mängden arsenik, koppar och krom som lakats ut från spånen erhålls som summan av vad som lämnat lysimetrarna med lakvattnet och totalmängden i marken minskat med markens bakgrundsmängd och vad som tillförts med nederbörden.

Mängden som tillförts med nederbörden var ca 0.1 mg arsenik, 0.3 mg koppar och 0.2 mg krom. Dessa halter var försumbara i samband med budgetberäkningen. En viss mängd av de tre ämnena kan ha fastnat i glasullen och kvartssanden i botten på lysimetrarna (de analyserades ej), men de mängderna måste ha varit försumbara, särskilt i de fall då halterna i de nedre marknivåerna och i lakvattnet var mycket låga. Om alla delposter analyserats korrekt skall den utlakade mängden från spånen vara lika med ursprungsmängden i spånen minskat med den funna mängden i mark och dräneringsvatten vid försökets slut eller vara lika med skillnaden i mängd i spånen mellan försökets start och avslutning.

Resultaten från de båda beräkning metoderna redovisas i Tabell 10. Överensstämmelsen mellan de båda beräkningarna är inte särskilt god. Ibland ger differansberäkningen högre förluster än summationen av mängderna i mark och dräneringsvatten. I andra fall är det tvärt om. Den största svårigheten är att få ett representativt värde på halten i träspånen. Halten varierar beroende på varifrån i veden spånen kommer. Det är lättare att erhålla representativa från jord och framför allt från dräneringsvattnet.

Värdena i Tabell 10 visar att mellan ca 20 och 60% av arseniken i spånskiktet har lakats ut under de elva åren. Utlakningen från spånen var större från mojorden än från lerjoden med kärrtorvjoden mitt emellan. Utlakningen av koppar var något lägre än av arsenik och läckaget varierade mellan ca 15 och 40% av totalmängden. Utlakningen av krom var mycket låg och motsvarade bara några få procent av totalmängden i spånskiktet.

För att bedöma det övre jordlagrets effekt på utlakningen av arsenik från spånen måste utlakningen från enbart spånen beräknas. Ett led med enbart spån saknades i fältförsöket. Utgående från resultaten i Tabellerna 6 och 10 och användning av utlakningen från mojorden i Tabell 10 som mall, kan utlakningen från spånskiktet enbart uppskattas till ca 70% av totalhalten. Läggs därtill att nederbörden var något surare än lakvattnet från mojorden (utlakningen ökar med sjunkande pH) kan värdet höjas till 75%. Det betyder att om ett ca 15 cm tjockt lager spån deponeras utan att täckas med jord skulle ca 3/4 av arseniken lakas ut under en 10-års period eller efter ca 6000 mm nederbörd.

Utgående från dessa beräkningar skulle det övre jordlagret minska utlakningen av arsenik från spånskiktet i fältförsöket med omkring 60% i lerjorden, med 50% i kärrtorvjorden och med 30% i mojorden.

Huvudorsaken till den dämpande effekten på utlakningen i lerjorden var lakvattnets höga pH. Den något mindre effekten eller högre

utlakningen i kärrtorvjorden berodde på förekomsten av vattenlösliga organiska föreningar som löste upp bl a koppararsenater i spånen. Den mindre dämpande effekten i mojorden berodde förmodligen på lakningsvattnets låga pH.

En tidigare undersökning av jordarnas adsorptionskapacitet för arsenik visade att lerjorden kunde adsorbera ca 500 mg/kg, kärrtorvjorden ca 5000 mg/kg och mojorden ca 100 mg/kg jord (Bergholm, 1989). Överfört till fältförsöket betyder det att jordarna maximalt skulle kunna binda 15 g arsenik i det undre lerjordsskiktet, 65 g i kärrtorvjorden och 4.8 g i mojorden. I spånen fanns totalt 8.3 g arsenik. Hela den mängden skulle med god marginal kunna fastläggas i ler- och kärrtorvjorden. Mojordens kapacitet överskreds redan under försökets gång med några tiondels gram, Tabell 10. Det betyder att arseniken fällts ut som relativt stabila arsenater i form av koppar- och förmodligen också järnarsenater. Utfällningen av arsenik, koppar och krom kan naturligtvis ha skett även i de andra jordarna men där var det inte lika uppenbart eftersom adsorptionskapaciteten inte överskreds.

De maximala mängderna som jorden kan adsorbera är delvis beroende av marklösningens halt av arsenik. Det föreligger en jämvikt mellan adsorberat och halten i marklösningen. I lerjorden uppnås dessa förhållanden vid ca 80 mg/L i marklösningen, i kärrtorvjorden vid ca 150 mg/L och i mojorden vid ca 15 mg/L (Bergholm, 1989).

Dessa halter kan ha förekommit endast i lakvattnet från "tvättfasen". I den senare delen av försöksperioden har halterna i marklösningen sjunkit till lägre nivåer och då har nya jämvikter inställt sig. Beroende på arsenikens bindningsstyrka i marken kommer då tidigare adsorberad arsenik att desorberas och lakas ut. Denna process kan förklara de förhöjda halterna i lakvattnet 1990 från ler- och mojorden, Figur 6b.

För att minimera effekterna av främst arsenik från spån som deponerats i mark skall spånen läggas på väl dränerad organisk jord med ett lager kalkhaltig lerjord ovanpå. På så sätt fördelas utlakningen av arseniken över en lång tidsperiod med lägre halter i markvattnet som resultat.

Utlakningen av koppar från spånskiktet följer ungefär utlakningsmönster för arsenik. Den utlakade kopparmängden är ca tre gånger lägre än arsenikmängden. Samvariationen mellan koppar och arsenik kan tyda på en viss utfällning av koppararsenater. Den utlakade mängden koppar bands huvudsakligen i det allra översta jordskiktet under spånen. Nedtransporten genom marken var ringa.

Metoden att täcka spånen med lerjord skulle också minska utlakningen av koppar och det som lakades från spånskiktet skulle fastläggas hårt i organiska jordskiktet.

Utlakningen av krom från spånen var låg. Endast några få procent krom återfanns i marken och lakvattnet. Lerjordlagret ovanpå spånen skulle öka utlakningen av krom något jämfört med kärrtorvjord som täckmedel, men den utlakade mängden skulle effektivt fastläggas i det underliggande organiska markskiktet varför den rekommenderade metoden även minskar kromläckaget.

SAMMANFATTNING

* Utlakningen av arsenik från enbart de impregnerade spånen (utan ovanpåliggande jord) beräknades till ca 75% av totalmängden i spånen efter 11 års lakning med ca 6000 mm nederbörd. Av denna beräknade utlakning av arsenik har det ovanpåliggande jordlagret minskat utlakningen från spånskiktet med omkring 60% i lerjorden, med 50% i kärrtorvjorden och med 30% i mojorden.

* Den uppmätta utlakningen av arsenik, koppar och krom från spånen (med ovanpåliggande jord) var omkring 30%, 20% respektive 10% av totalhalten i spånen i lerjorden. I kärrtorvjorden var utlakningen omkring 40%, 35% respektive 1% och i mojorden omkring 50%, 25% respektive 4%.

* Mellan 0.2 och 1% av totalmängden arsenik i spånen kom ut med lakvattnet från de tre lysimetrarna. Motsvarande värden för koppar var mellan 0.05 och 0.5% och för krom mellan 0.08 och 0.2%. Trots den relativt låga utlakningsmängden av arsenik var halterna i lakvattnet 1990 från ler och mojorden så hög som 400 respektive 230 $\mu\text{g/L}$. I kärrtorvjorden var halten bara 8 $\mu\text{g/L}$. De förhöjda halterna från ler och mojorden berodde troligen på desorption av arsenik från undre jordskiktet. Den vattenlösliga andelen i dessa jordar var nämligen relativt hög, ca 4% mot bara 0.5% i kärrtorvjorden.

* Kärrtorvjorden har stor kapacitet att binda arsenik, koppar och krom. All den arsenik som fanns i spånskiktet kunde med god marginal bindas i jorden med låga halter i lakvattnet som följd. Lerjorden hade också kapacitet att binda det som fanns i spånen men den svagare bindningen av arsenik i lerjorden ökade risken för att arsenikläckaget skulle öka med tiden.

* Mojordens adsorptionskapacitet för arsenik var ca 100 mg/kg. Mer arsenik fastlades i mojorden än vad som adsorptionskapaciteten tillät. En del av arseniken måste därför ha fällts ut som arsenater av olika slag, förmodligen som koppar- och järnarsenater.

* En metod att minimera riskerna för läckage av framför allt arsenik från avfall från virke som impregnerats med CCA-medel är att deponera avfallet på kärrtorvjord eller annan ej för sur organisk jord och täcka spånen med ett lager kalkhaltig lera som ger ett lakvatten med högt pH. Utlakningstiden förlängs resulterande i låga halter i lakvattnet, en utspädningseffekt.

Föreliggande undersökning har finansierats av Svenska Träskyddsinstitutet. Ett varm tack riktas till Eakubul Islam som utfört huvuddelen av arbetet med provtagning, provberedning och analys av proverna och till Gunilla Hallberg som utfört en del av analyserna.

REFERENSER

- Bergholm, J. 1985. Utlakning av koppar, krom och arsenik från impregnerat spån deponerat i mark. Svenska Träskyddsinstitutet, Medelände nr 154.
- Bergholm, J. & Dryler, K. 1989. Studier av fixering av arsenik, koppar och krom i CCAförorenade jordar. Svenska Träskyddsinstitutet, Medelände nr 161.
- Isaksson, B & Persson, I. 1983. Utlakning av koppar, krom och arsenik från impregnerat träavfall i mark. Examensarbete vid avdelningen för Marklära, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Nilsson, K. 1991. Träskydd, aktuellt från Träskyddsinst. nr 2.
- Sadiq, M., Zaidi, T.H. & Main, A.A. 1983. Environmental behavior of arsenic in soils; Theoretical. Water, Air and Soil Pollution. 20 369-377.

Tabell 1. Fysikaliska och kemiska egenskaper hos försöksjordana.

Physical and chemical properties of the experimental soils.

	Lerjord <i>Clay soil</i>	Kärrtorvjord <i>Marsh peat soil</i>	Mojord <i>Fine sand soil</i>
Sand <i>Sand, %</i>	2	0	6
Mo <i>Silt, %</i>	15	7	64
Mjåla <i>Silt, %</i>	28	23	27
Ler <i>Clay, %</i>	55	70 ¹	3
Mullhalt <i>Organic matter content, %</i>	3.2	50.4	0.2
Jordart <i>Soil type</i>	Måttligt mullhaltig styv lera <i>Clay soil</i>	Kärrtorvjord <i>Silty clay marsh peat soil</i>	Mullfattig svagt lerig, mjålig mo <i>Silt</i>
pH (H ₂ O)	7.8	5.2	5.4
pH (CaCl ₂)	6.8	4.6	4.4
CaCO ₃ , %	1.22	0	0
Katjonbyteskapacitet <i>CEC, me/100 g</i>	22	273	2
Oxalatlösligt <i>Oxalate extractable</i>			
Fe, mg/g	5.95	9.90	1.65
Al, mg/g	1.45	4.15	1.00

¹ Lerhalten beråknad på mineraljordsfraktionen
The clay content is calculated from the mineral soil fraction

Tabell 2. Mängden jord och impregnerade spån i de tre lysimet-
rarna.

*The amount of soil and preservative-treated wooden chips
in the three lysimeters.*

	Lerjord <i>Clay soil</i>	Kärrtorvjord <i>Marsh peat soil</i>	Mojord <i>Fine sand soil</i>
Övre jordskiktet <i>Upper soil layer</i> kg	5.4	2.3	8.4
Spånskiktet <i>Chips layer</i> kg	1.7	1.7	1.7
Undre jordskiktet <i>Lower soil layer</i> kg	31.3	13.1	48.0

Tabell 3. Totalhalten och totalmängden As, Cu och Cr i spånen vid start av lysimeterförsöket.

The total content and the total amount of As, Cu and Cr in the wooden chips at the start of the lysimeter experiment.

Ämne <i>Element</i>	%	mg
As	0.50	8300
Cu	0.27	4480
Cr	0.28	4650

Tabell 4. Årsnederbörd och ackumulerad nederbörd samt uppmätt (1980-1983 och 1990) och beräknad årlig och ackumulerad avrinning (1984-1989) från lysimetrarna.

The yearly and accumulated amount of precipitation and drainage water (measured 1980-1983 and 1990 and calculated amount 1984-1989).

År Year	Nederbörd Precipitation mm		Avrinning Drainage, mm					
			Ler Clay		Kärrtorv Marsh peat		Mo Fine sand	
1979	35	35	0	0	0	0	0	0
1980	685	720	349	349	345	345	391	391
1981	641	1361	431	780	403	748	448	839
1982	452	1813	320	1100	297	1045	320	1159
1983	613	2426	380	1480	403	1448	407	1566
1984	580	3006	358	1838	351	1799	380	1946
1985	543	3549	336	2174	329	2128	356	2302
1986	641	4190	396	2570	388	2516	420	2722
1987	460	4650	284	2854	278	2794	301	3023
1988	590	5240	365	3219	357	3151	386	3409
1989	411	5651	254	3473	249	3400	269	3678
1990	530	6181	301	3774	344	3744	297	3975

¹⁹⁷⁹ Från starten 1979-12-18 *From the start December 18th 1979.*

¹⁹⁹⁰ Avrinning, 26 februari till 16 oktober *Drainage water, February 20th to October 16th.*

Tabell 5. Årsmedelvärden med standardavvikelse inom parentes för pH och halten As, Cu och Cr i lakvatten.

Yearly mean with standard deviation in brackets for pH and the content of As, Cu and Cr in the drainage water.

År Year	pH	µg/L		
		As	Cu	Cr
Ler Clay				
1980	7.4 (0.11)	3 (2)	19 (6)	12 (5)
1981	7.5 (0.49)	540 (746)	36 (19)	17 (19)
1982	7.1 (0.22)	284 (245)	84 (64)	10 (2)
1983	7.1 (0.28)	146 (116)	44 (16)	15 (13)
1990	7.3 (0.31)	405 (130)	112 (37)	40 (21)
Kärrtorv Marsh peat				
1980	5.9 (0.50)	0	143 (105)	13 (5)
1981	5.8 (0.36)	491 (662)	230 (244)	17 (19)
1982	5.8 (0.23)	23 (20)	75 (28)	12 (6)
1983	5.7 (0.38)	12 (14)	74 (61)	10 (3)
1990	6.2 (0.49)	8 (5)	15 (3)	15 (4)
Mo Fine sand				
1980	6.0 (0.48)	196 (170)	20 (12)	225 (219)
1981	6.0 (0.47)	734 (400)	12 (2)	22 (7)
1982	5.8 (0.28)	262 (92)	6 (1)	18 (4)
1983	5.9 (0.46)	95 (44)	7 (4)	23 (7)
1990	5.3 (0.49)	231 (186)	6 (3)	18 (9)

Tabell 6. Det övre jordlagrets effekt på utlakning av As, Cu och Cr från det underliggande spånsskiktet. Värdena anger den procentuella andelen av totalhalten i spånen som lakats ut efter 100 mm lakning.

The effect of the upper soil layer on the leaching of As, Cu and Cr from wooden chips. The figures show the percentage of the total in the wooden chips which leached out with 100 mm of precipitation.

Jordart Soil type	%		
	As	Cu	Cr
Spån Chips	18	8	2.5
Ler Clay	10	7	0.9
Kärrtorv Marsh peat	15	32	2.6
Mo Fine sand	16	10	2.0

Tabell 7. Årlig utlakad mängd As, Cu och Cr. Värden från 1984 till 1989 är beräknade.

The yearly amount of As, Cu and Cr leached out with the drainage water. The values from the years 1984 to 1989 are calculated.

År Year	mg/år mg/year		
	As	Cu	Cr
		Ler Clay	
1980	0.1	0.5	0.3
1981	24.3	1.4	0.7
1982	6.2	1.8	0.2
1983	4.3	1.5	0.5
1984	4.2	1.3	0.5
1985	4.9	1.5	0.5
1986	6.9	2.0	0.7
1987	5.7	1.7	0.6
1988	8.4	2.5	0.8
1989	5.5	1.9	0.7
1990	9.4	3.1	1.1
Summa Sum	<u>79.9</u>	<u>19.2</u>	<u>6.6</u>
		Kärrtorv Marsh peat	
1980	0	3.3	0.3
1981	11.3	5.7	0.5
1982	0.4	1.5	0.3
1983	0.5	2.6	0.3
1984	0.3	1.7	0.3
1985	0.2	1.4	0.2
1986	0.3	1.4	0.3
1987	0.2	0.8	0.3
1988	0.3	0.8	0.3
1989	0.2	0.4	0.3
1990	0.2	0.4	0.4
Summa Sum	<u>13.9</u>	<u>20.0</u>	<u>3.5</u>
		Mo Fine sand	
1980	5.6	0.4	4.0
1981	19.0	0.4	0.7
1982	4.3	0.2	0.5
1983	2.7	0.2	0.7
1984	2.9	0.2	0.6
1985	3.3	0.1	0.5
1986	4.5	0.2	0.5
1987	3.7	0.1	0.4
1988	5.4	0.2	0.5
1989	3.9	0.1	0.4
1990	4.3	0.2	0.5
Summa Sum	<u>59.6</u>	<u>2.3</u>	<u>9.3</u>

Tabell 8. Fördelning av halten av As, Cu och Cr i mark.

The distribution of the content of As, Cu and Cr in soil.

Nivå Level	mg/kg		
	As	Cu	Cr
cm			
Ler Clay			
5- 0	15.4	4.9	10.3
0- 2	245.0	144.1	42.7
2- 6	85.0	16.1	13.7
6-14	90.4	16.3	13.9
14-22	32.2	9.5	10.5
22-35	8.6	3.5	8.9
Kärrtorv Marsh peat			
5- 0	38.4	3.7	17.9
0- 2	2141.0	1718.2	78.7
2- 6	949.0	102.2	12.1
6-12	268.0	1.2	0.5
12-22	18.8	0.2	0.2
22-35	10.2	0.2	0.2
Mo Fine sand			
5- 0	3.0	3.0	4.4
0- 2	236.7	170.4	17.0
2- 6	144.7	79.6	9.8
6-12	122.7	33.8	6.0
12-22	95.9	21.2	4.6
22-35	76.7	6.2	4.2

Tabell 9. Halten rörligt (NH₄OAc) As, Cu och Cr och vattenlösligt As samt den procentuella andelen av "totalhalten" i marken.

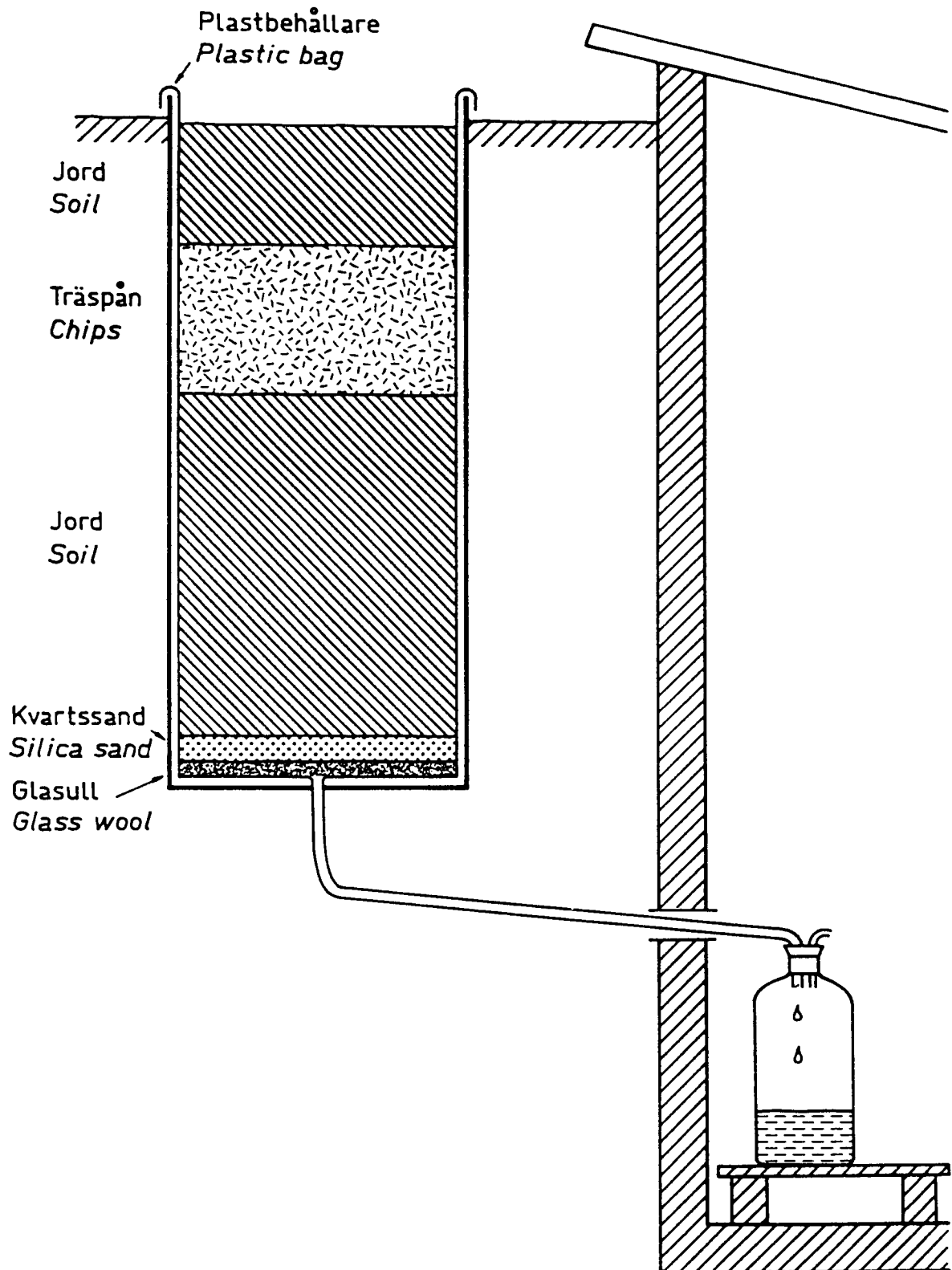
The content of mobile (NH₄OAc-extracted) and water soluble As, Cu and Cr and the percentage of the "total" content in the soil.

Nivå Level cm	NH ₄ OAc						Vatten Water	
	As		Cu		Cr		As	
	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ler Clay								
5- 0	0.4	2.6	0.3	6.1	0.2	1.9	0.2	1.3
0- 2	37.5	15.3	11.7	8.1	1.6	3.7	9.6	3.9
2- 6	13.0	15.2	0.7	4.3	0.3	2.2	4.8	5.6
6-14	15.9	17.6	1.9	11.7	0.3	2.2	4.7	5.2
14-22	4.9	15.2	0.3	3.2	0.2	1.9	0.4	1.2
22-35	1.0	11.6	0		0.1	1.1	0.3	3.5
Kärrtorv Marsh peat								
5- 0	1.1	2.9	0.8	21.6	1.0	5.7	0.2	0.5
0- 2	134.0	6.3	321.0	18.7	10.3	13.3	13.0	0.6
2- 6	88.0	9.3	11.1	11.6	2.3	19.0	11.2	1.2
6-14	23.6	8.8	0.1	8.3	0.8	16.6	2.3	0.9
14-22	1.5	8.0	0		0		0.1	0.5
22-35	0.2	2.0	0		0		0	
Mo Fine sand								
5- 0	0.1	3.3	2.7	90.0	0.3	6.8	0	
0- 2	68.1	28.8	136.0	80.0	5.0	29.4	8.6	3.6
2- 6	49.9	34.5	54.7	68.7	2.4	24.5	5.4	3.7
6-14	41.4	33.7	19.7	58.3	1.1	18.3	5.4	4.4
14-22	34.3	35.7	9.3	43.7	0.6	13.0	4.1	4.3
22-35	25.9	33.8	3.1	50.0	0.5	11.9	2.2	2.8

Tabell 10. Budgetberäkningar för As, Cu och Cr i lysimeterförsöket.

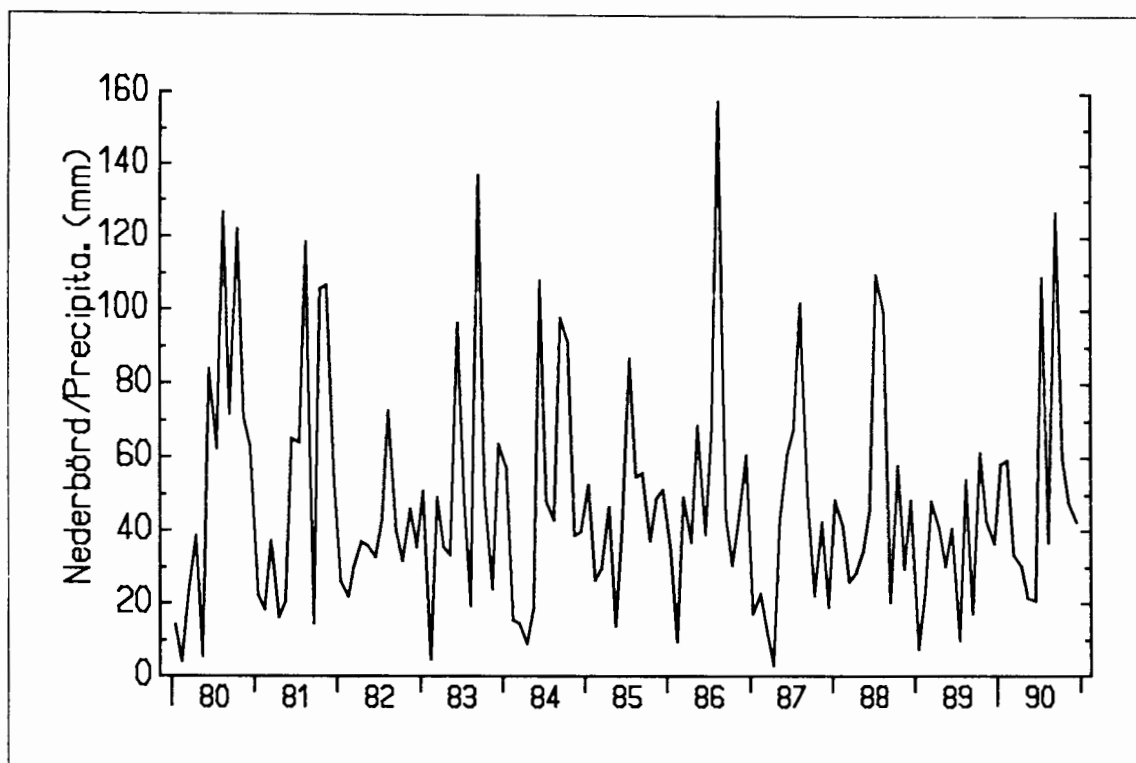
Budget calculations for As, Cu and Cr in the lysimeter experiment.

	As		Cu		Cr	
	mg	%	mg	%	mg	%
Spån Chips 1979	8300		4480		4650	
Ler Clay						
Spån Chips 1990						
Övre Upper	2120		1370		1910	
Undre Lower	2640		1840		2320	
Summa Sum	<u>4760</u>		<u>3120</u>		<u>4230</u>	
Förlust Lost	3540	42.7	1270	24.8	420	9.0
Funnet Found						
Lakvatten						
Drainage water	80	0.96	19	0.43	10	0.14
Jord Soil	1802	21.7	618	13.8	457	9.8
Summa Sum	1882	22.7	637	14.2	467	9.9
Kärrtorv Marsh peat						
Spån Chips 1990						
Övre Upper	2850		1130		2260	
Nedre Lower	2900		1650		2320	
Summa Sum	<u>5750</u>		<u>2780</u>		<u>4580</u>	
Förlust Lost	2550	30.7	1700	38.0	70	1.5
Funnet Found						
Lakvatten						
Drainage water	14	0.17	20	0.45	4	0.08
Jord Soil	4028	48.5	1456	32.5	121	2.6
Summa Sum	4042	48.7	1476	33.0	125	2.7
Mo Fine sand						
Spån Chips 1990						
Övre Upper	2450		1430		2240	
Nedre Lower	2600		1880		2240	
Summa Sum	<u>5050</u>		<u>3310</u>		<u>4480</u>	
Förlust Lost	3250	39.2	1170	26.1	170	3.5
Funnet Found						
Lakvatten						
Drainage water	60	0.72	2	0.05	9	0.20
Jord Soil	5185	62.5	1642	36.7	328	7.1
Summa Sum	5225	63.2	1644	36.7	337	7.3

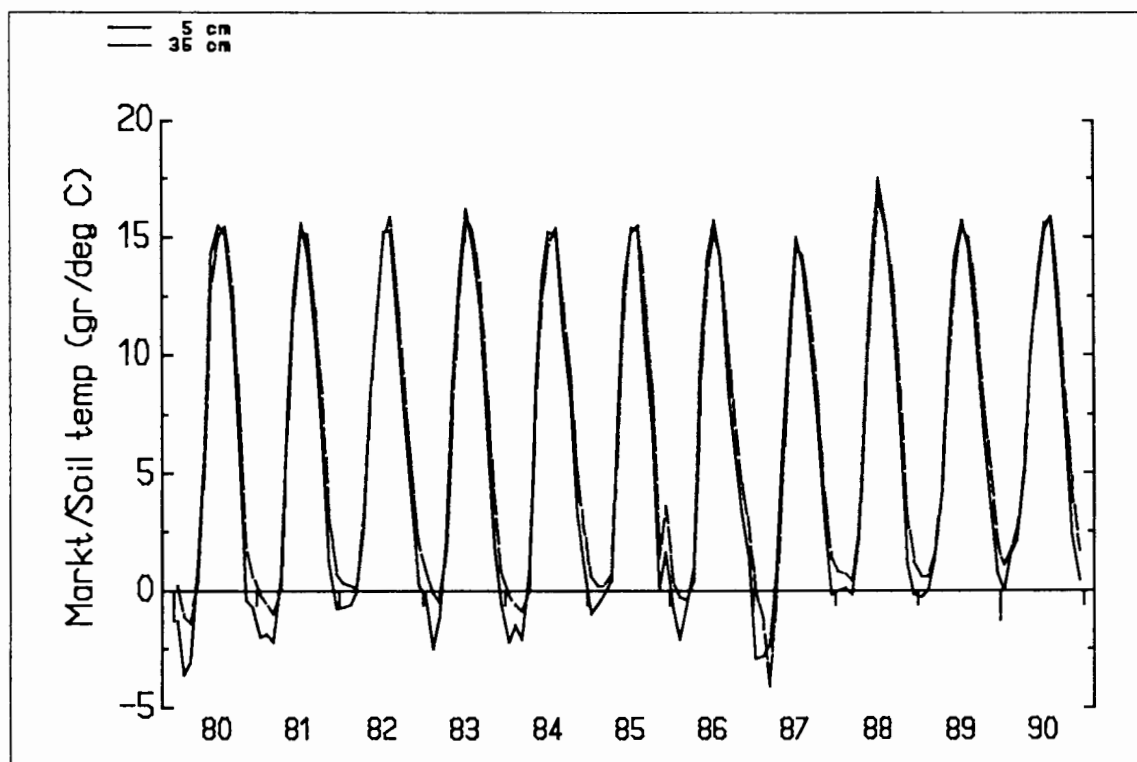


Figur 1. Lysimeteruppsättning i fältförsöket.

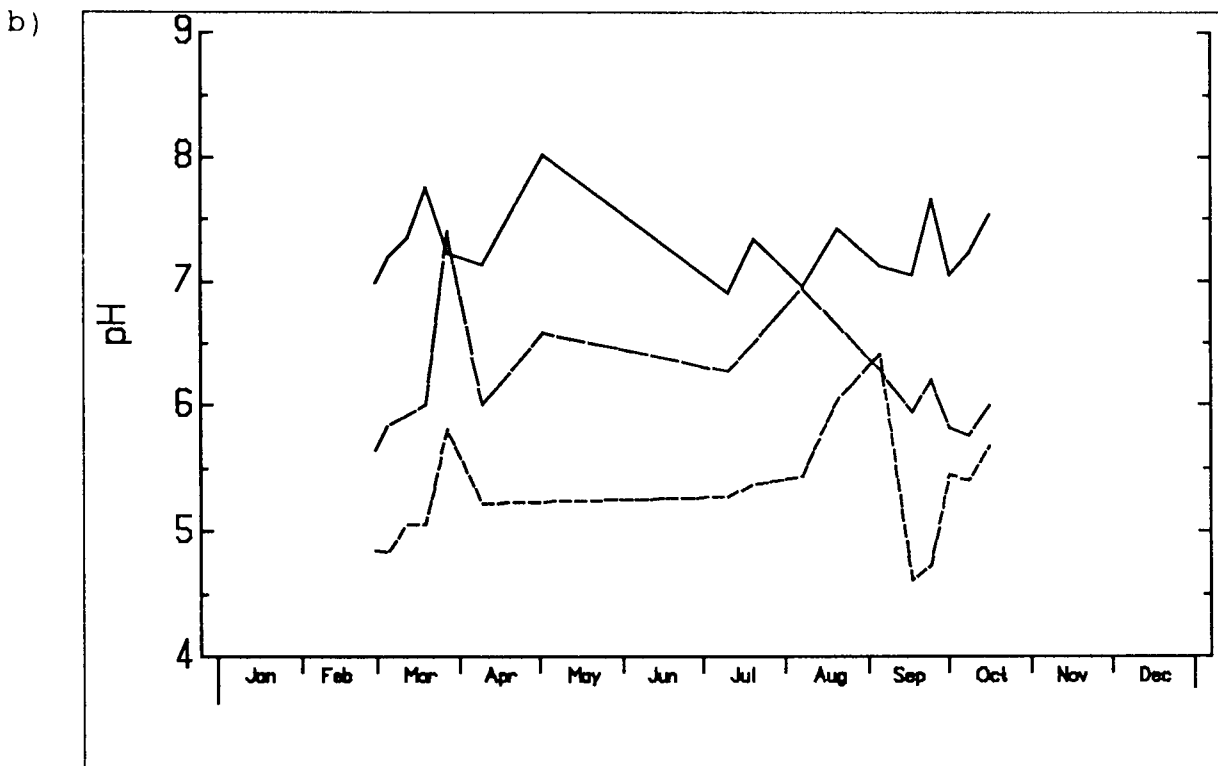
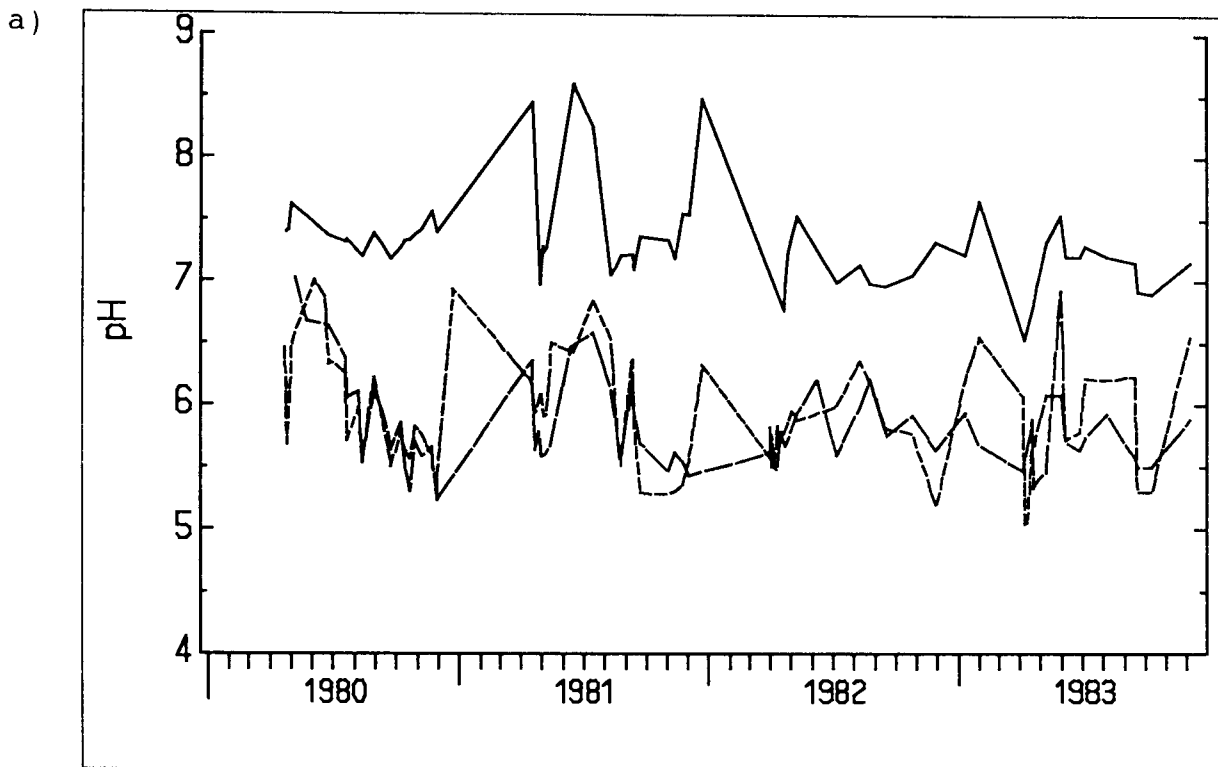
Lysimeter design in the field experiment.



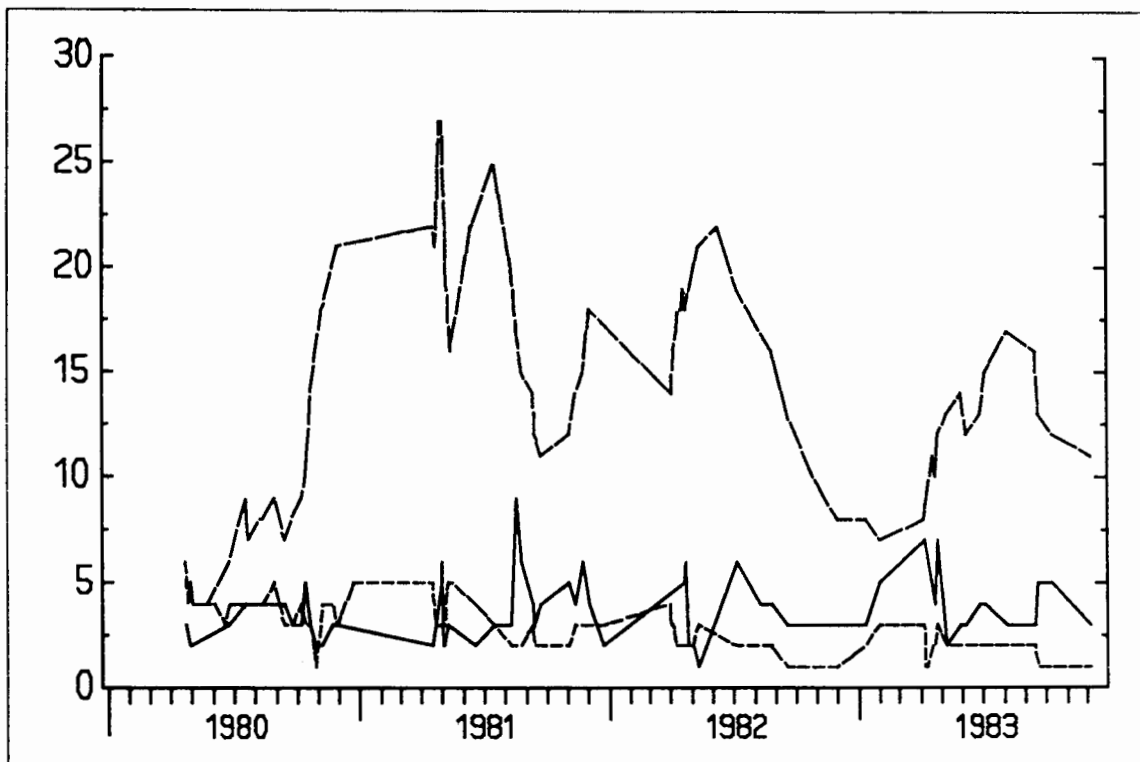
Figur 2. Månadsnederbördens fördelning under hela försöksperioden.
The monthly precipitation amount during the whole experimental period.



Figur 3. Marktemperaturen på 5 och 35 cm djup vid Ultuna klimatstation under hela försöksperioden.
The soil temperature at 5 and 35 cm depth at the Ultuna meteorological station during the experimental period.

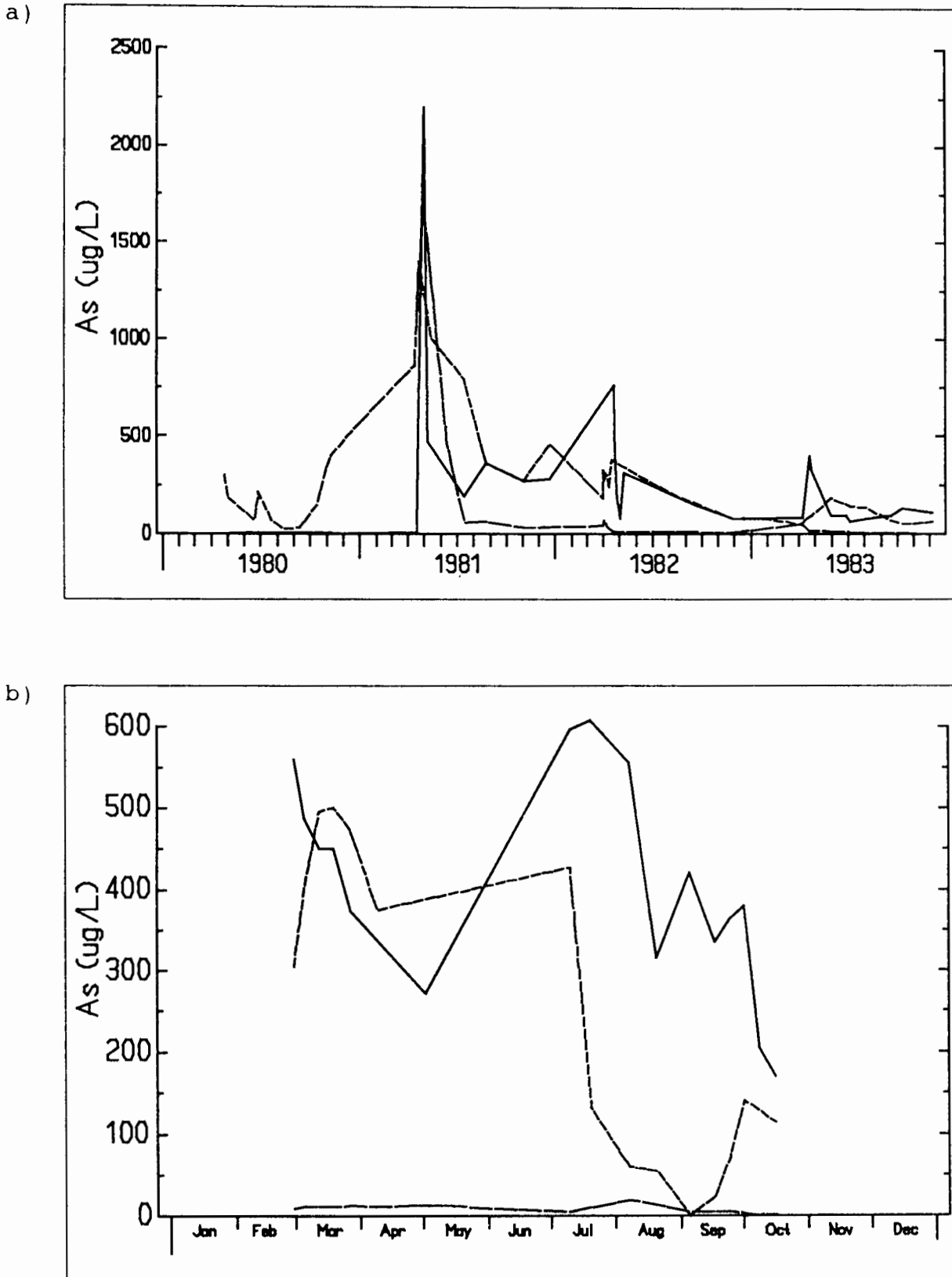


Figur 4. pH i lakvatten a) 1980-1983 och b) 1990.
 _____ Ler Clay, - - - - Kärri Marsh peat och - . - . Mo Fine sand.
 pH in drainage water a) 1980-1983 and b) 1990.

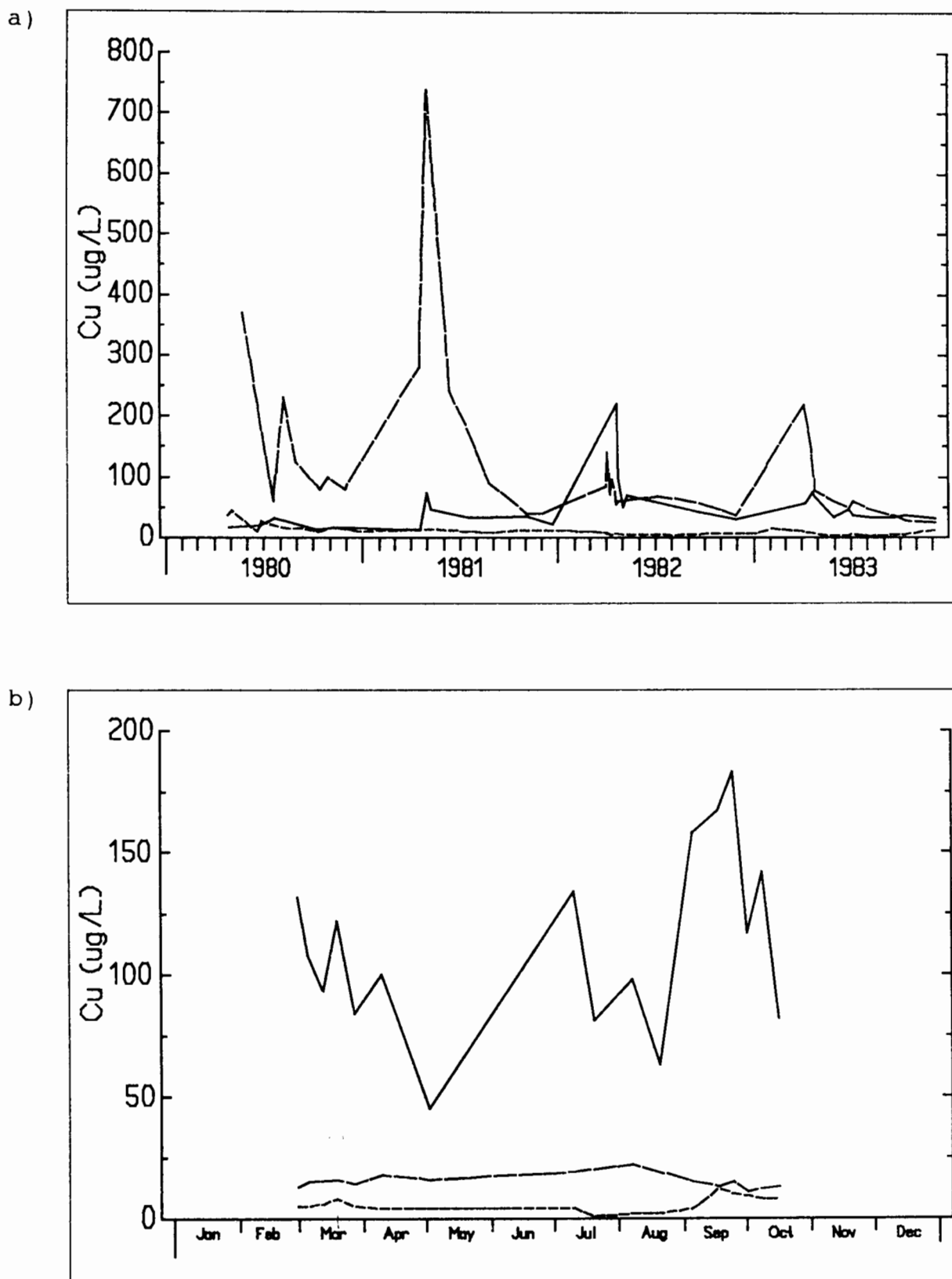


Figur 5. Lakvattnets färg. Absorbansen mätt som differensen mellan 400 nm - 700 nm.

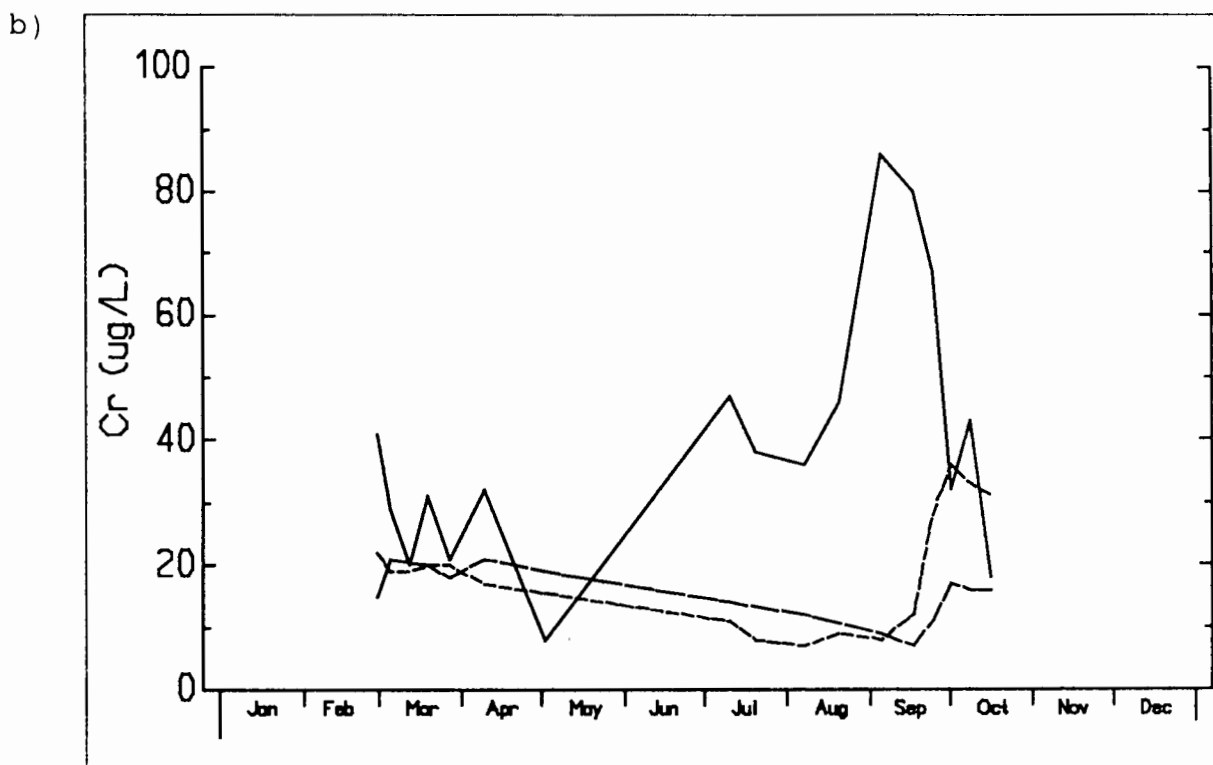
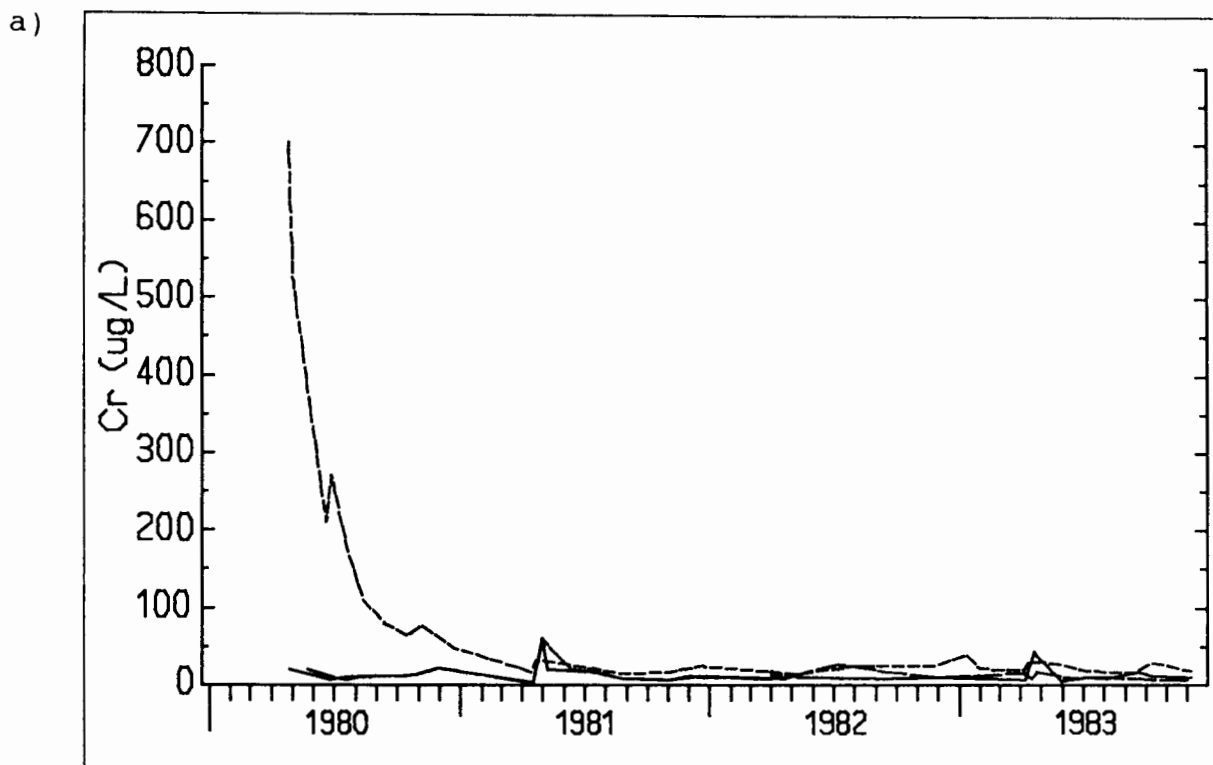
The colour of drainage water measured as the difference between 400 nm - 700 nm.



Figur 6. Arsenik i lakvatten a) 1980-1983 och b) 1990.
 — Ler Clay, - - - Kärr Marsh peat ---- Mo Fine sand.
 Arsenic in drainage water a) 1980-1983 and b) 1990.



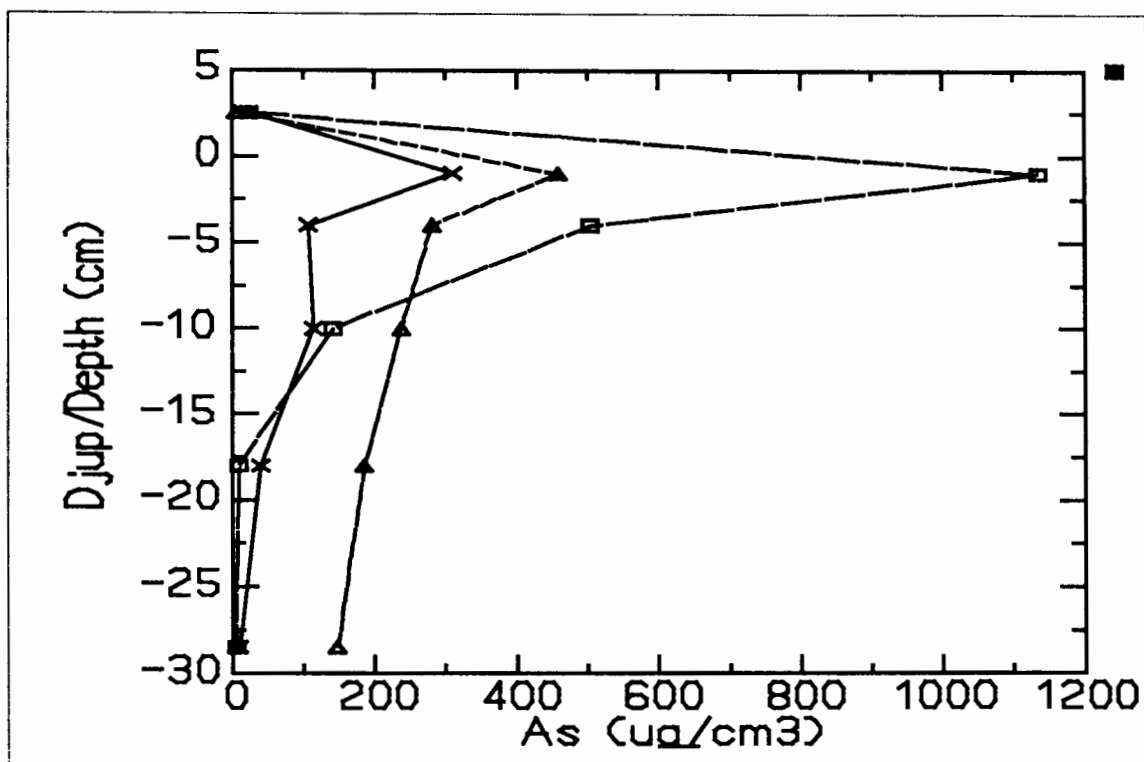
Figur 7. Koppar i lakvatten a) 1980-1983 och b) 1990.
 — Ler Clay, - - - Kärr Marsh peat och . . . Mo Fine sand.
 Copper in drainage water a) 1980-1983 and b) 1990.



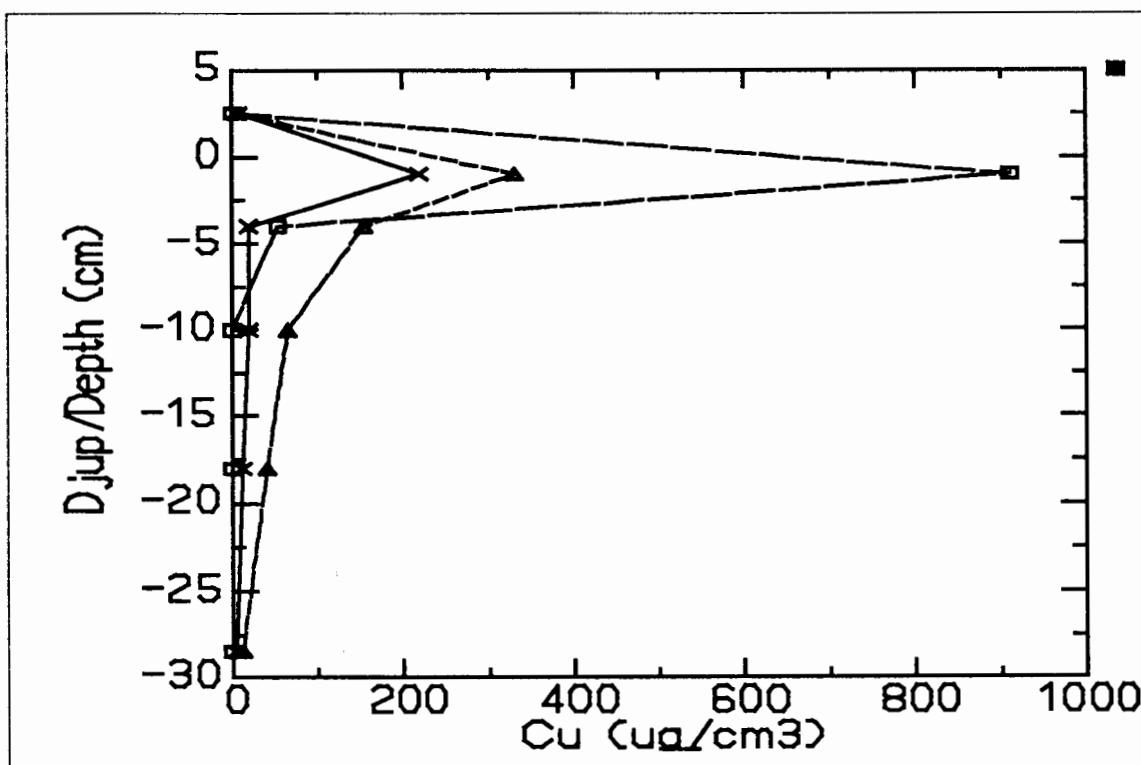
Figur 8. Krom i lakvatten a) 1980-1983 och b) 1990.

— Ler Clay, - - - Kärri Marsh peat och ---- Mo Fine sand.

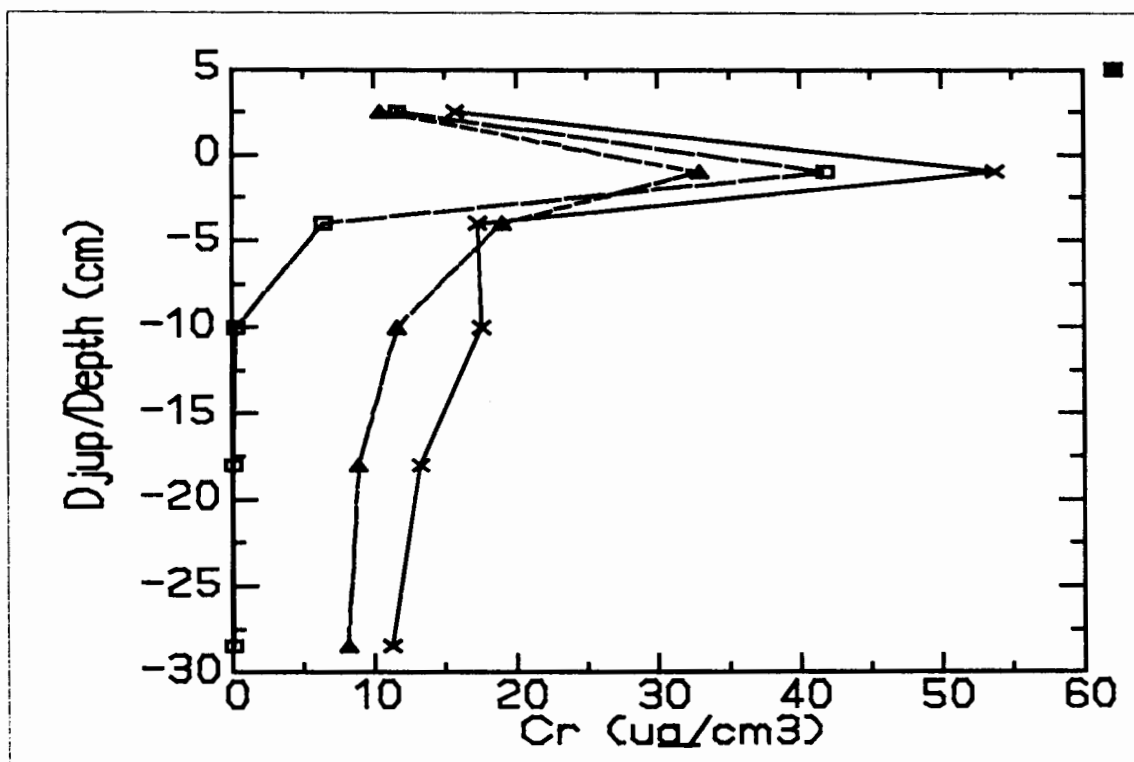
Chromium in drainage water a) 1980-1983 and b) 1990.



Figur 9. Fördelningen av As i mark, $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.
 — Ler Clay, — Kärr Mars peat och ---- Mo Fine sand.
 The distribution of As in the soil.



Figur 10. Fördelningen av Cu i mark, $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.
 — Ler Clay, — Kärr Marsh peat och ---- Mo Fine sand.
 The distribution of Cu in the soil.



Figur 11. Fördelningen av Cr i mark, $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

— Ler Clay, — — Kärr Marsh peat och ---- Mo Fine sand.

The distribution of Cr in the soil.