

Miljøprojekt Nr. 536 2000

Teknologiudviklingsprogrammet for  
jord- og grundvandsforurening.

## Phytooprensning af metaller

Forprojekt

Lizzi Andersen, Peter E. Holm, Nikolaj K. J. Lehmann og Lise Samsøe-  
Petersen  
DHI - Institut for Vand og Miljø

Uffe Jørgensen og Jørgen Vestergaard Mortensen  
Danmarks Jordbrugsforskning

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

# Indhold

<b>Forord</b> .....	<b>5</b>
<b>Sammenfatning og konklusioner</b> .....	<b>7</b>
<b>Summary and conclusions</b> .....	<b>13</b>
<b>1 INDLEDNING</b> .....	<b>19</b>
1.1 BAGGRUND.....	19
1.2 FORMÅL .....	19
<b>2 POTENTIALE FOR OPRENSNING VED PHYTOEKSTRAKTION AF METALLER</b> .....	<b>20</b>
2.1 PRINCIP .....	20
2.2 PLANTERNES BETYDNING FOR PHYTOEKSTRAKTION .....	21
2.2.1 <i>Hyperakkumulerende planter</i> .....	21
2.2.2 <i>Ikke hyperakkumulerende planter</i> .....	23
2.2.3 <i>Optimeringspotentiale</i> .....	25
2.3 JORDMEDIETS BETYDNING FOR PHYTOEKSTRAKTIONEN .....	26
2.3.1 <i>Jordens sammensætning</i> .....	26
2.3.2 <i>Koncentrationsniveau og forureningskilde</i> .....	26
2.3.3 <i>Optimeringspotentiale</i> .....	27
2.4 HØST OG BEHANDLINGSMETODER .....	28
<b>3 EKSPERIMENTEL AFPRØVNING AF PHYTOEKSTRAKTION</b> .....	<b>30</b>
3.1 LOKALITETER OG JORDPRØVETAGNING .....	30
3.1.1 <i>Kauslunde, Middelfart Kommune, Fyns Amt</i> .....	30
3.1.2 <i>Kibæk, Ålskov Kommune, Ringkøbing Amt</i> .....	32
3.1.3 <i>Valbyparken, Københavns Kommune</i> .....	32
3.1.4 <i>Lobbæk, Aakirkeby, Bornholms Amt</i> .....	33
3.2 EFTERBEHANDLING OG KARAKTERISERING AF JORDPRØVER .....	34
3.3 UDVÆLGELSE OG INDSAMLING AF PLANTER .....	35
3.3.1 <i>Thlaspi caerulescens (alpepengeurt)</i> .....	35
3.3.2 <i>Brassica juncea (sareptasennep)</i> .....	36
3.3.3 <i>Salix burjatica "Germany" (pil)</i> .....	36
3.3.4 <i>Amaranthus retroflexus (opret amarant)</i> .....	36
3.3.5 <i>Agrostis capillaris (A. tenuis), (alm. hvene)</i> .....	37
3.4 VÆKSTKAMMERFORSØG MED PLANTER OG FORURENET JORD .....	37
3.4.1 <i>Såning og plantning</i> .....	37
3.4.2 <i>Klimakammerprogram</i> .....	38
3.4.3 <i>Gødskning og vanding</i> .....	38
3.4.4 <i>Høst af planter</i> .....	39
3.5 FORBEHANDLING OG ANALYSE AF PLANTEMATERIALE.....	39
<b>4 RESULTATER OG DISKUSSION</b> .....	<b>40</b>
4.1 JORDKARAKTERISERING .....	40
4.1.1 <i>Overordnet sammensætning</i> .....	40
4.1.2 <i>Indhold af spormetaller</i> .....	40
4.2 VÆKSTKAMMERFORSØG.....	41
4.2.1 <i>Vækstmæssig karakterisering og udbytte af overjordisk plantemateriale</i> .....	41
4.2.2 <i>Rodudbytte</i> .....	43
4.2.3 <i>Overførsel af udbytteresultater til markforhold</i> .....	44
4.3 PLANTEANALYSE.....	46
4.3.1 <i>Indhold af sporelementer i overjordisk plantemateriale</i> .....	46
4.3.2 <i>Indhold af sporelementer i rødder</i> .....	48

<b>5</b>	<b>VURDERING AF PHYTOEKSTRAKTION SOM OPRENSNINGS- TEKNIK PÅ BAGGRUND AF DE UDFØRTE FØRSØG .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCER .....</b>	<b>55</b>
	<b>Bilag A: Jordanalyser .....</b>	<b>57</b>
	<b>Bilag B: Kemiske analyser .....</b>	<b>59</b>
	<b>Bilag C: Kontakter i forbindelse med plantevalg.....</b>	<b>63</b>

# Forord

Som led i udviklingen og afprøvningen af metoder til rensning af metalforurenede jord har Miljøstyrelsen under Teknologiudviklingsprogrammet i 1998 og 1999 ladet gennemføre et projekt med afprøvning af phytooprensningsteknologien med prøver fra i alt 4 metalforurenede lokaliteter i henholdsvis Bornholms, Fyns, og Ringkøbing amter samt i Københavns Kommune. Projektet er udført af VKI i samarbejde med Afdelingen for Plantevækst og Jord, Danmarks JordbrugsForskning, med Peter E. Holm, VKI som projektleder.

Styregruppen for projektarbejdet har bestået af Inger Asp Fuglsang og Ulla Højsholt, der senere blev erstattet af Preben Bruun, alle Miljøstyrelsen, Ingela Brejnrod, Ringkøbing Amt, Jens Erling Klindt, Fyns Amt, Mehregan Vahman, Københavns Kommune, Hans Peter Birk Hansen, Bornholms Amt, Peter E. Holm, VKI og Uffe Jørgensen, Danmarks JordbrugsForskning.

Rapporten er udarbejdet af Peter E. Holm, Lizzi Andersen, Nikolaj K.J. Lehmann, VKI og Uffe Jørgensen og Jørgen Vestergaard Mortensen, Danmarks JordbrugsForskning. Herudover har Lise Samsøe-Petersen, VKI bidraget til arbejdet.



# Sammenfatning og konklusioner

Som led i arbejdet med udvikling og afprøvning af teknikker til rensning af forurenede jord under Teknologiuudviklingsprogrammet har der været fokus på behovet for teknikker til rensning af tungmetalforurenede jord. I Danmark er der primært behov for metoder til oprensning af moderate koncentrationer af flere metaller i blanding og af blyforureninger. Metoderne skal også kunne fungere i relativt lerede jorde.

I 1997 blev der gennemført et projekt under Teknologiuudviklingsprogrammet, som omfattede en systematisk gennemgang af mulige metoder til håndtering af tungmetalforurenede jord. Af de gennemgåede metoder blev phytooprensning udpeget som en mulig metode med et lovende potentiale.

Efterfølgende gav Miljøstyrelsen under Teknologiuudviklingsprogrammet foreløbigt tilsagn om afprøvning af phytooprensningsteknologien på i alt 4 metalforurenede lokaliteter i henholdsvis Bornholms, Fyns, og Ringkøbing amter samt i Københavns Kommune. På baggrund heraf blev der udformet et projekt vedrørende eksperimentel afprøvning af phytooprensning på jordprøver fra alle fire metalforurenede lokaliteter. Formålet med projektet var at tilvejebringe et forbedret vidgrundlag vedrørende dels den praktiske oprensning af tungmetalforurenede jord ved hjælp af planter, herunder udpegnings af plantearter, der er særligt egnede til phytooprensning under danske forhold, dels betydningen af jordbundsforhold og af forureningens karakter for metodens effektivitet. Af hensyn til en eventuel hurtig efterfølgende afprøvning af teknologien i felten blev projektet gennemført som et kortvarigt projekt med henblik på at kunne igangsætte eventuelle feltforsøg allerede i sommeren 1999. Denne rapport beskriver resultaterne af projektet, der blev gennemført af VKI i samarbejde med Danmarks Jordbrugsforskning.

I de indledende dele af rapporten er principperne for oprensning af metalforurenede jord ved hjælp af phytooprensning samt det potentiale, der ligger for at anvende og forbedre metoden i praksis under danske forhold, kort gennemgået. Gennemgangen er baseret på det tidligere gennemførte udredningsarbejde vedrørende metoder til oprensning af tungmetalforurenede jord, men suppleret med ny og i flere tilfælde endnu ikke publiceret viden.

På baggrund af erfaringerne fra litteraturen samt via kontakter til primært internationale, men også danske forskningsmiljøer og planteproducenter blev der indsamlet 9 planter, hvoraf der blev igangsat vækstforsøg med 4 planter i 2 jordprøver fra hver af de 4 lokaliteter. De fire planter var *Thlaspi caerulescens* (alpepengeurt), *Brassica juncea* (sareptasennep), *Salix burjatica* "Germany" (Pil) og *Amaranthus retroflexus* (opret amarant). De fire valgte planter er meget forskellige af vækstform, udseende og varighed af beplantningen. Endvidere er der store forskelle mellem arternes egenskaber med hensyn til omsætning af biomassen efter høst.

Jordprøverne blev efter prøvetagningen efterbehandlet og karakteriseret med hensyn til generelle jordparametre som pH, tekstur, plantenæringsstoffer samt indhold af spormetallerne arsen, bly, cadmium, kobber, krom, nikkel og zink. Karakteriseringen af jordprøverne viste, at disse repræsenterer en bred variation af jordtyper, for så vidt angår overordnet kornstørrelsessammensætning, pH, indhold af kalk og organisk stof samt plantenæringsstoffer. Med hensyn til indhold af metaller dækker prøverne flere af de metalforureninger, man støder ind i Danmark, både for så vidt angår koncentrationsni-

veauer og sammensætning. Nikkel var det eneste spormetal, der ikke fandtes i koncentrationer over baggrunds niveauerne. Koncentrationerne af de enkelte spormetaller varierede hen over jordprøverne fra alle lokaliteterne indenfor intervallerne: Arsen, 4–1800 mg As/kg; bly, 83-1100 mg Pb/kg; cadmium, 0,2–4,7 mg Cd/kg; kobber 7-11000 mg Cu/kg; krom, 6-1000 mg Cr/kg; nikkel, 3-41 mg Ni/kg; zink, 29-2700 mg Zn/kg.

Forsøgene blev gennemført over en 2-3 måneders periode i vækstkamre, hvor planterne blev sået eller plantet i kar på ca. 30 liter (jorddybde 30 cm og overfladeareal 0,1 m<sup>2</sup>). Klimakamrene blev kørt efter et fast døgnprogram over hele vækstperioden. De indlagte dag- og nattemperaturer i programmet korresponderede omtrent til henholdsvis middel-maksimum og middel-minimum temperaturerne i juli måned. .

Planterne voksede generelt tilfredsstillende, dog ikke på jordprøverne fra Fyns amt, der var kraftigt forurenet med arsen og kobber (specielt den ene prøve). Da de 4 udvalgte planter enten døde eller mistrivedes i den første del af vækstperioden, blev der gennemført supplerende forsøg med *Agrostis capillaris* (alm. hvene), som er fundet tolerant overfor arsen. Denne plante voksede tilfredsstillende i de stærkt arsen- og kobberforurenede prøver.

Efter høst blev plantematerialet vejret, og planternes overjordiske dele, samt i nogle tilfælde rødder, blev analyseret for indhold af de 7 sporelementer. Høstudbyttet af pil og sareptasennep var generelt af samme størrelsesorden, mens udbyttet for de øvrige arter var en faktor 4-5 lavere. Den største rod-mængde blev isoleret fra sennep med en mængde, der udgjorde 16-24 vægt-% af topudbyttet. For pil udgjorde rodmængden under 10% af topmængden. For pengeurt og amarant var rodudbyttet små mængdemæssigt, men udgjorde over 10% af topmængden. Hvenen havde en meget høj rodandel, da græsset har et øverligt liggende trevlerodsystem

Analyserne af plantematerialet viste, at der som forventeligt var store forskelle mellem koncentrationerne af de forskellige metaller i mellem plantearter og jordprøver. Forskellene viser, at de metaller, som findes i forhøjede koncentrationer i jorden, kan optages af visse planter. Der ses dels et væsentligt optag af metaller, hvor de optræder i forhøjede koncentrationer i jorden, og omvendt et ubetydeligt optag af metaller, hvor de ikke optræder i forhøjede koncentrationer i jorden. Dette er en indikation af, at forsøgene, behandlingen og analyserne af jordprøver og plantematerialer har fungeret efter hensigten.

Analyseresultaterne viser et vist optag af arsen i hvene og sennep på jordene, der er kraftigt forurenede med arsen. I enkelte andre prøver ses også målbare koncentrationer af arsen i plantematerialet, men i koncentrationer, der er mindre end 1 mg As/kg, og dermed ubetydelige i forhold til, hvad der optræder i jorden.

Koncentrationerne af Cd i store dele af plantematerialet var interessant høje. Pilen og i nogle tilfælde amaranterne indeholdt høje koncentrationer af cadmium, der i de fleste tilfælde er højere (op til 10 mg Cd/kg plantemateriale) end koncentrationerne i jorden. I pengeurt fra to af lokaliteterne blev der målt mere end 100 mg Cd/kg plantemateriale, hvilket giver en opkoncentrering på ca. en faktor 100 i forhold til koncentrationerne i jordprøverne. Der er god sammenhæng med, at det er i disse jordprøver, at der findes de højeste koncentrationer af cadmium. Fordelingen mellem cadmium i jord og jordvæske og dermed planteoptaget er meget pH-afhængigt. Dette er antageligt forklaringen på, at der findes så relativt høje koncentrationer af cadmium i pengeurt (16 og 36 mg Cd/kg), der voksede på jordprøverne fra Ringkøbing



Amt, som indeholder koncentrationer af cadmium på baggrundsniveau, men har meget lave pH-værdier på ca. 4,5.

Kobber og til dels krom optræder i målbart forhøjede koncentrationer i enkelte prøver, men alle i koncentrationer, der er meget lavere end koncentrationerne i jorden.

De anvendte jordprøver giver på grund af relativt lave koncentrationer af nikkel ikke umiddelbart mulighed for at vurdere potentialet for oprensning af nikkel fra forurenede jord. Som ventet er det pengeurten, der vides at kunne hyperakkumulere nikkel, som optager nikkel i de højeste koncentrationer fra de jorder, hvor der forekommer de højeste koncentrationer.

Bly er det tungmetal, der optræder med størst hyppighed på forurenede lokaliteter i Danmark. Samtidigt er det yderst vanskeligt at få optaget bly, primært på grund af dets stærke binding og meget lidt tilgængelige form i jorden. De højeste blykoncentrationer (158 og 177 mg Pb/kg plantemateriale) måles i amaranterne på den vestjyske lokalitet. Koncentrationerne i plantematerialet er kun ca. 4 gange højere end jordkvalitetskriteriet for bly, men viser et optag i en plante, der hidtil er begrænset erfaring med. Det er værd at bemærke, at pilen, ligeledes fra jordprøverne fra Ringkøbing Amt, optog op til 40 mg Pb/kg og gav et væsentligt større udbytte end amaranterne. Alle jordprøver har som tidligere nævnt et forhøjet indhold af bly, men det største optag er ikke direkte korreleret med jordkoncentrationerne. Igen må de lave pH-værdier formodes at være den primære forklaring på den større tilgængelighed i jordprøverne fra Ringkøbing Amt.

Som forventeligt er zink det metal, der optages i de højeste koncentrationer, da det udgør et næringsstof for planterne. Pengeurten, der kan hyperakkumulere zink, indholder koncentrationer fra 1800 til 8200 mg Zn/kg plantemateriale. I pilen og i amaranterne måles også høje koncentrationer, op til henholdsvis 1400 og 1100 mg Zn/kg. Trods de betydeligt lavere koncentrationer af zink i jorden fra den vestjyske lokalitet måles der ikke væsentligt lavere koncentrationer i plantematerialet. Dette fænomen, som diskuteret for cadmium og bly, må tilskrives de lave pH-værdier i jorden, der øger plantetilgængeligheden af metallerne.

Koncentrationerne af metal i de udvalgte rodprøver er umiddelbart mest interessante for bly, da de højeste koncentrationer i rodmaterialet (500-1000 mg Pb/kg) er ca. en faktor 5 højere end de højeste koncentrationer af bly i det overjordiske plantemateriale. For arsen, krom, kobber og nikkel er koncentrationen i rodmaterialet moderat højere end i de overjordiske dele, men ikke så høje, at det kan bidrage væsentligt til det samlede optag. Cadmium og zink optræder generelt i lidt lavere koncentrationer i rodmaterialet end i de overjordiske plantematerialer, hvilket hænger sammen med, at disse to metaller nemt kan translokere op i planternes overjordiske dele.

På baggrund af kendskabet til den producerede plantebiomasse og koncentrationerne af metallerne i plantematerialet og i jorden er den relative fjernelse af de enkelte metaller beregnet. Fjernelserne er opgjort i procent set i forhold til den del af jordens indhold af det pågældende metal som overstiger jordkvalitetskriteriet. Generelt er der regnet med indholdet i planternes overjordiske dele, men hvor det har været muligt, er røddernes indhold af metal indregnet.

Cadmium er som nævnt det metal, der relativt i forhold til koncentrationerne i jorden optages (opkoncentreres) i de største mængder i planterne. Den procentuelle fjernelse af cadmium var for pengeurten typisk 3-4%, og helt op til

over 9% i løbet af denne ene vækstperiode. Pil er den anden plante, der fra flere af jordprøverne kan optage cadmium i mængder svarende til over 0,1% af jordens indhold. I ingen tilfælde overstiger fjernelsen med pil dog 1% af jordens indhold. Det synes således muligt med pengeurt, eventuelt i kombination med pil, at gennemføre en oprensning under feltforhold.

For krom og kobber sås ingen oprensning af betydning. Kobber er et nødvendigt plantenæringsstof, der dog er meget phytotoksisk i høje koncentrationer og derfor umiddelbart problematisk i relation til phytooprensning. Det vides fra litteraturen, at en specielt kobbertolerant flora eksisterer, specielt i Zaire i Afrika. Det har ikke været muligt at afprøve nogle af disse plantesorter.

Bly optræder i koncentrationer over jordkvalitetskriteriet i samtlige jordprøver, der blev benyttet i forsøgene. Der sås i ingen tilfælde fjernelser over 0,1% af jordens blyindhold, og der er således ikke potentiale for oprensning af jordens blyindhold alene ved phytoekstraktion uden anden manipulation af jorden.

Zink er udover cadmium det metal, der umiddelbart ser ud til være størst mulighed for at oprense ved hjælp af phytoekstraktion. Planterne er i stand til at optage høje koncentrationer af zink, men zink optræder også i høje koncentrationer i jorden. Dette betyder, at de relative fjernelser bliver lave. Pengeurt og pil fjernede zink svarende til 0,1-0,6% af jordens indhold. For de øvrige forsøg ligger den relative fjernelse på 0,1% eller derunder. Zink er først human- og phytotoksisk i meget høje koncentrationer, så det vil sandsynligvis sjældent være zink, der er styrende for oprensning af en lokalitet. Det kan konkluderes, at de relative fjernelser er for lave til umiddelbart at kunne anvendes i oprensningssammenhænge.

Resultaterne af forsøgene, der foregik i vækstkamre over en periode på 2 til 3 måneder kan ikke direkte overføres til feltforhold, men den høstede biomasse per areal vil sandsynligvis indenfor en faktor 2 svare rimeligt godt til de udbytter, som kan opnås over en typisk vækstperiode i felten. De gennemførte forsøg vurderes at give et realistisk estimat over fjernelsen af metal fra jorden over den første vækstsæson. Til skøn over fjernelsen over en længere årrække er det nødvendigt at foretage ekstrapolationer af resultaterne udover den undersøgte vækstperiode. I litteraturen er set anvendt lineære estimater (samme mængde fjernet pr. år) til vurdering af oprensningstider for phytoekstraktion. Denne antagelse er formentlig rimelig for de første år af oprensningen, men herefter vil tilgængeligheden af metallerne sandsynligvis falde efterhånden som det mere lettilgængelige metal er fjernet. Med hensyn til cadmium vil der sandsynligvis kunne foretages oprensninger over en periode på 10-20 år, mens horisonterne er betydeligt længere for alle de øvrige metaller.

Da det direkte optag af de øvrige metaller, målt som fjernelse af "total-metal" i relation til jordkvalitetskriterierne, er begrænset, er det oplagt at se på mulighederne for videreudvikling af teknologien, der har fordelen af at være lavteknologisk, grøn og relativt billig. På længere sigt kan man forestille sig planter med højere metalkoncentrationer og større biomasse, hvilket sammenlagt kan give anledning til betydeligt større fjernelsesrater, end resultaterne i denne undersøgelse har vist. Optimering af planteoptaget gennem manipulation af jorden og jordvæsken er en anden af de muligheder, der kan arbejdes videre med. På baggrund af de gennemførte forsøg er det vist, at metaller som cadmium og zink, der sandsynligvis er sorptionskontrollerede, kan fjernes fra jorden ned til meget lave koncentrationer ved lave pH-værdier. For disse metaller kan det således konkluderes, at justering af pH

giver mulighed for at optimere optaget i planterne, således at metallerne kan fjernes helt ned til under jordkvalitetskriteriet. Man skal dog her være opmærksom på, at etableringen af plantevækst i sig selv virker regulerende på pH hen imod et mere neutralt pH.

En anden mulighed for optimering af planteoptaget er tilsætning af ligander eller chelatorer, der kompleksbinder metaller i jordvæsken og forøger optaget i planterne. Denne mulighed kan give en forøget risiko for udvaskning af metallerne og skal i givet fald styres meget præcist i forhold til den årlige variation i nedsivningen set i relation til chelatorernes nedbrydelighed.

Phytoekstraktion kan tænkes anvendt til alene at fjerne de relativt lettere tilgængelige puljer af metal i jorden og dermed måske hovedparten af metallernes uønskede effekt. En sådan tilgang kunne tænkes anvendt på bly, der findes hårdt bundet i jorden. Dette vil bl.a. kræve en større viden om fjernelsesraternes ændring med tiden samt om den indflydelse plantevæksten i sig selv har på biotilgængeligheden af metallerne.

Sammenfattende vurderes det, at der ved de gennemførte forsøg er dokumenteret et direkte potentiale for phytoekstraktion med de afprøvede planter og under danske forhold til oprensning af jord forurenet med cadmium. Blandt de afprøvede planter vil anvendelse af pengeurt, evt. i kombination med pil, være mest effektiv. En bredere anvendelse af phytoekstraktion som oprensningsteknik kræver en teknologisk videreudvikling af metoden.



# Summary and conclusions

As a part of the development and testing of technologies in the “Programme for Development of Technologies”, initiated by the Danish EPA (Miljøstyrelsen), techniques for remediation of metal contaminated soils are in focus. Under Danish conditions, methods for remediation of moderate concentrations of several metals in mixture and lead contaminated soils are most needed. The methods must also be feasible for soils with a high content of clay.

In 1997, a project, reviewing the possible technologies in relation to Danish conditions with respect to handling and treatment of metal contaminated soil pointed to phyto extraction as one of the feasible technologies with a promising potential.

On this basis, the Danish EPA (Miljøstyrelsen) has given preliminary acceptance of testing of the phytoextraction technology on 4 metal contaminated sites located in the counties of Bornholm, Funen and Ringkøbing and in the municipality of Copenhagen. Thus, a growth chamber project involving soil samples from all four sites was initiated. The aim of the project was to establish an improved basis, partly regarding phytoextraction in practice and selection of plants that are feasible under Danish conditions, partly regarding the importance of soil conditions and the characteristics of the contaminants for the efficiency of the technology. Considering the possible subsequent testing of the technique in the field, the project was undertaken as a fast short-term project. This report presents the results of the growth chamber project carried out by VKI in collaboration with the Danish Institute of Agricultural Sciences.

In the introductory parts of the report the potential for use and improvement of the method under Danish conditions is discussed in addition to the principles for remediation of metal contaminated soil by plants. This part of the report is based partly on the previously undertaken review of technologies for remediation of metal contaminated soils in Denmark but updated with recent and in some cases not published knowledge.

Based on the experiences from literature and through contacts, primarily international, but also Danish research groups and plant breeders, 9 plants were collected. Four of these plants and 2 soil samples from each of the 4 sites were used for growth experiments. The 4 plants were *Thlaspi caerulescens*, *Brassica juncea*, *Salix burjatica* “Germany” and *Amaranthus retroflexus* (two different ecotypes). The 4 selected plants differ with respect to appearance, growth, growth period and characteristics in relation to subsequent harvesting and treatment of the biomass.

After sampling, the soil samples were characterised for general soil parameters such as pH, texture, plant nutrients and contents of the trace elements arsenic, lead, cadmium, copper, chromium, nickel and zinc. This characterisation showed that the soil samples were representative for a range of different soil types with respect to texture, pH, content of calcium carbonate, organic carbon and plant nutrients. Regarding content of metals, the samples are typical for many of the contaminated sites found in Denmark, both in terms of level of concentration and composition. Nickel was the only metal not found in concentrations exceeding background level. Concentrations of each of the metals varied over the sites within the ranges: Arsenic, 4–1800

mg As/kg; lead, 83-1100 mg Pb/kg; cadmium, 0,2-4,7 mg Cd/kg; copper 7-11000 mg Cu/kg; chromium, 6-1000 mg Cr/kg; nickel, 3-41 mg Ni/kg; zinc, 29-2700 mg Zn/kg.

The experiment was carried out in growth chambers over a period of 2-3 months. The plants were sown or planted in containers with a volume of approximately 30 litre (depth 30 cm and surface area 0.1 m<sup>2</sup>). The growth chambers were run according to a fixed 24-hour schedule throughout the growth period. The applied day and night temperatures corresponded approximately to Danish July mean-maximum and mean-minimum temperatures.

Generally, the plants grew satisfactorily, except for the plants grown in soil samples from Funen County that were highly polluted with arsenic and copper. Here the 4 selected plants either died or showed poor growth, so, additional experiments with *Agrostis capillaris* were carried out. *Agrostis capillaris* is found to be tolerant to arsenic. This plant grew satisfactorily in the samples highly polluted with arsenic and copper.

After harvest the plant material was weighed. Subsequently the root stock of the plant, in some occasions also the root material, were analysed for the content of the 7 trace elements. The yields of *Salix burjatica* and *Brassica juncea* were generally of the same order of magnitude whereas the yields of the other plant species were a factor of 4-5 lower. The largest fraction of root material compared to top material was obtained from *Brassica juncea*. For *Brassica juncea* the fraction was 16-24% (weight) and for *Salix burjatica* less than 10%. Regarding *Thlaspi* and *Amaranthus*, the root yields were small but made up more than 10% of the top material. *Agrostis capillaris* had a very high fraction of roots because it has a fibrous root system.

The analysis of plant material showed large variations between the concentrations of the metals in both the plant species and the soil samples. This verified that certain plants may take up metals found in elevated concentrations in the soil. The uptake of metals found in elevated concentrations in the soil compared to the insignificant uptake of metals from the soil with low concentrations indicates that the experiments, the treatment and the analysis of the soil and plant samples have worked as intended.

The results document a certain uptake of arsenic in *Agrostis* and *Brassica* grown on the soils highly contaminated with arsenic. In some of the other samples, detectable concentrations of arsenic were found in the plant material, however only in concentrations less than 1 mg As/kg and thus insignificant in relation to the much higher concentrations found in the soil.

The concentrations of Cd in many of the plant samples were interestingly high. *Salix* and in some cases *Amaranth* contained high concentrations of cadmium, typically higher (up to 10 mg Cd/kg plant material) than the concentrations found in the soil. In plant material of *Thlaspi* from two of the sites, more than 100 mg Cd/kg were determined. These concentrations are equivalent to an accumulation of approximately a factor of 100 in relation to the concentrations in the soil. The highest concentrations of Cd were found in plant material coming from the soil samples containing the highest concentrations of Cd. It is known that the distribution of cadmium between soil and soil solution and thus the plant uptake is very dependent of pH. This is probably the explanation to the relatively high concentrations found in *Thlaspi* (16 and 36 mg Cd/kg) grown on the soil samples from Ringkøbing County. These samples contain cadmium at background level but have very low pH-values at approximately 4.5.

Copper and partly chromium are found in measurably elevated concentration in some of the plant samples, but the concentrations are much lower than the concentrations in the soil.

Since the concentrations of nickel are relatively low in the soil samples, the potential for testing the remediation of nickel is low. As expected, it is *Thlaspi caerulescens*, known to have the ability to hyperaccumulate nickel, that takes up the highest concentrations of nickel from the soils containing the highest concentrations of nickel.

In Denmark lead is the most abundant metal at polluted sites. It is known that lead has a very strong binding and low availability in the soil. In the experiment the highest concentrations of 158 and 177 mg Pb/kg plant material were found in the *Amaranth* grown on soil from Ringkøbing County. The concentrations were approximately 4 times higher than the soil quality criteria for lead (40 mg/kg) and the experiments demonstrated uptake from a plant, which is relatively unknown in this context. It is also worth noting that *Salix* took up lead in concentrations up to 40 mg Pb/kg plant from the soil samples from Ringkøbing County and gave a significantly higher yield than *Amaranth*. As previously mentioned, all soil samples contained elevated contents of lead but the highest uptakes by plants were not directly correlated to the concentrations in the soil. Again, the low pH-values in the soil samples from Ringkøbing County are presumably the explanation for the higher availability of the metals from these samples.

Zinc was the metal taken up in the highest concentrations, which was to be expected, since zinc is an essential element for the plants and abundantly available in the soils. *Thlaspi caerulescens*, that can hyperaccumulate zinc, contained concentrations of 1800 to 8200 mg Zn/kg plant material. High concentrations were also found in *Salix* and *Amaranth*, up to 1400 and 1100 mg Zn/kg respectively. Despite the significantly lower concentrations of zinc in the soil from Ringkøbing County, the corresponding concentrations in the plants were not low compared to other samples. Again, the reason, as discussed for cadmium and lead, must be related to the low pH-values in the soil that increased the plant availability of the metals.

The concentrations of metals in the selected root samples are mostly interesting with respect to lead because the highest concentrations (500-1000 mg Pb/kg) are approximately a factor of 5 higher than the highest concentrations of lead in the shoot material. The concentrations of arsenic, chromium, copper and nickel were moderately higher in root samples than in shoot samples. However, the concentrations are not sufficiently high to signify any contribution to the total uptake of metals from the soil. Generally, cadmium and zinc were found in slightly lower concentrations in the root material than in the shoot material. Presumably this is related to an effective translocation of these metals from the roots to the green parts of the plant.

Based on the knowledge of the produced plant biomass and the concentrations of metal in the plant material and the soil, the relative removal of each of the metals was estimated. The removal is given in percent in relation to the fraction of the content in soil that exceeds the soil quality criteria. Generally, the estimate only includes the metal found in the above ground plant material, but where possible the content in root material was included.

Relative to the concentrations in the soil, cadmium is the metal taken up (accumulated) in the largest quantities by the plants. The removal of cadmium was for *Thlaspi caerulescens* typically 3 to 4%, and up to more than 9% were removed by this single harvest carried out after one growth season.

*Salix* is the other plant which is able to take up cadmium in quantities exceeding 0.1% of the content in the soil. However, the removal by *Salix* did not exceed 1% of the content in the soil in any of the experiments. Thus, it seems feasible by use of *Thlaspi*, possibly in combination with *Salix*, to carry out a remediation under field conditions. Besides cadmium, zinc is the metal with the best possibility or successful remediation by phytoextraction. The plants are capable of taking up high concentrations of zinc, but zinc is also found in high concentrations in the soil. This means that the relative removal is low. Only *Thlaspi* and *Salix* removed zinc in quantities equivalent to 0.1-0.6% of the soil contents. All other plants revealed relative removals of 0.1% or less. Since zinc is toxic for humans and plants only at very high concentrations, this element will presumably only very rarely determine the need for remediation of a contaminated site. Under all circumstances, it is concluded that the experienced relative removals of zinc are too low to be directly useful for practical remediation purposes.

The results of the experiment carried out over a period of 2 to 3 months can not directly be applied to field conditions. However, it is likely that the harvested biomass per area within a factor of 2 will correspond to the yield expected from one growing season in the field. The experiments provide an estimate of the expected removal of metal from the soil within the first growth season. Estimates of the removal over several years involve extrapolations of the results. In the literature linear calculations (same annual removal per year) have been used to estimate the necessary remediation period for phytoextraction. This assumption is probably fair for the first years of remediation, but hereafter the availability of the metals is likely to decrease as the most available metal is removed.

With respect to cadmium, it is likely that effective remediation by phytoextraction may be carried out over a period of maximum 10-20 years. For all other metals investigated, the perspectives in terms of necessary remediation periods are significantly longer.

Since the direct uptake of other metals was limited, it is obvious to look into the possibilities for further development of the technology, which has the advantage of being a low-tech, "green" and relatively low-cost technology.

In the long term, plants with higher metal concentrations and larger biomass yields will be developed, which will lead to considerable higher rates of removal than the results of these investigations have shown. Optimising the uptake in plants by manipulation of the soil and soil solution is another possibility, which may be further developed. Based on the experiments carried out, it is shown that metals such as cadmium and zinc, probably controlled by sorption processes in the soil, at low pH-values may be removed from the soil down to very low concentrations. For these metals it can be concluded that adjustment of pH is one possibility for optimising the uptake of metal in the plants. However, it should be taken into account that the establishment of plants themselves may again change the pH-conditions in the soil.

Addition of ligands or chelators that can form complexes with the metals in the soil solution and thereby increase the plant uptake is another possibility for optimising phytoextraction. This possibility may however increase the risk of metal leaching. The additions must therefore be controlled very precisely in relation to the variation in infiltration and the retention and degradability of the ligands and chelators.

Phytoextraction as a remediation technique is known to influence primarily the most available forms of metal in the soil and thus also the most undesired



effects associated with the metals. This may be utilised in case of lead, which is strongly bound in the soil. This approach will demand more knowledge of the time dependent changes in removal and the influence of plant growth on the availability of the metals.

In conclusion the experiments document a direct potential for using phytoextraction with the tested plants under Danish conditions for remediation of cadmium polluted soil. Among the tested plants *Thlaspi caerulescens*, possibly in combination with *Salix*, was most effective. A more widespread use of phytoextraction as a remediation technique demands further development of the technique.



# 1 Indledning

## 1.1 Baggrund

Tungmetalforureninger i jord er problematiske, fordi de fleste tungmetaller er toksiske, selv når de optræder i lave koncentrationer i jordmiljøet. Desuden optræder tungmetaller som ”ikke nedbrydelige” grundstoffer, relativt hårdt bundet til og i jord, hvilket resulterer i, at metallernes opholdstider i jorden er meget lange, oftest flere hundrede år. På grund af den hårde binding til jorden er de desuden vanskelige at fjerne, og det er vanskeligt at rense jorden for metallerne.

For tiden findes der i dansk regi ikke kommercielt tilgængelige metoder til oprensning af tungmetalforurenede jord bortset fra elektrokinetik, som er en teknik under afprøvning. Derudover deponeres jorden på kontrollerede lossepladser eller i specialdepoter, hvilket er miljøbelastende, da det kræver afgravning og transport, uden at der opnås forbedring af jordens kvalitet. I ”Program for teknologiudvikling” indgår tungmetalforurenede jord som et af indsatsområderne, især jord forurenede med bly, cadmium, krom, arsen, nikkel, zink, kobber og kviksølv. Programmet angiver, at der for at mindske mængden af metalforurenede jord, der skal deponeres på lossepladser, bør ske en udvikling af metoder til rensning af metalforurenede jord.

I 1997 blev der gennemført et projekt under teknologiudviklingsprogrammet, som omfattede en systematisk gennemgang af mulige metoder til håndtering af tungmetalforurenede jord. Under danske forhold skal relevante oprensningsmetoder helst kunne oprense moderate koncentrationer af flere metaller i blanding, oprense blyforureninger samt håndtere relativt lerede jorde. Af de gennemgåede metoder synes blandt andet phytooprensning af have et potentiale.

Miljøstyrelsen har under teknologiudviklingsprogrammet efterfølgende givet foreløbigt tilsagn om afprøvning af phytooprensningsteknologien på i alt 4 metalforurenede lokaliteter i henholdsvis Bornholms, Fyns, og Ringkøbing amter samt i Københavns Kommune. Af hensyn til den egentlige afprøvning af teknologien på de udvalgte lokaliteter har Miljøstyrelsen foreslået igangsættelsen af et forprojekt med henblik på at forbedre grundlaget for en eventuel afprøvning i felten. Denne rapport beskriver resultaterne af forprojektet. Projektet er udført i 1998 og 1999 af VKI i samarbejde med Afdeling for Plantevækst og Jord, Danmarks JordbrugsForskning.

## 1.2 Formål

Formålet med projektet er at tilvejebringe et forbedret vidensgrundlag vedrørende den praktiske oprensning af tungmetalforurenede jord ved hjælp af planter, herunder

- udpegning af plantearter, der er særligt egnede til phytooprensning under danske forhold,
- tilvejebringelse af en større viden om jordbundsforholdenes betydning og forureningens karakter for metodens effektivitet,
- forbedring af det faglige grundlag for gennemførelse af afprøvninger af phytoekstraktion af metaller i feltskala.

## 2 Potentiale for oprensning ved phytoekstraktion af metaller

### 2.1 Princip

Ved oprensning af metalforurennet jord med planter udnyttes planters evne til at ekstrahere, optage og akkumulere eller uskadeliggøre metaller fra jord og jordvæske. Planter kan optage og akkumulere de metaller, der er essentielle for plantens vækst, men herudover kan visse planter optage og tolerere metaller, som ingen vækstmæssig eller anden kendt funktion har for planten. Visse planter kan også optage metaller i koncentrationer, der normalt vil være toksisk for plantevækst.

En nærmere teknisk beskrivelse af phytooprensning, og en systematisk gennemgang af litteraturen findes i Andersen (1998). I det følgende er princippet for oprensning af metalforurennet jord samt det potentiale, der ligger for at anvende og forbedre metoden i praksis under danske forhold, kort gennemgået. I det omfang, der er tilført ny væsentlig international viden, siden Andersen (1998) blev udarbejdet, er denne medtaget i det følgende.

En lang række mekanismer har betydning for den samlede proces:

- eksistensen af en aktiv mikrobiel biofilm omkring planterødderne (rhizosfæren)
- frigivelsen af overfladeaktive, pH- eller redox-ændrende stoffer, chelater m.m. fra planterødderne og det mikrobiologiske miljø omkring dem
- symbiotiske svampemiljøer i rodzonen som forøger optagefladen samt medfører yderligere enzymatisk aktivitet
- tilstandsformen og biotilgængeligheden af forureningsstofferne i jorden.
- stofoptag gennem rodoverfladen
- transport af stofferne (translokation) op i den overjordiske del af planten
- evnen til akkumulering og isolering af toksiske stoffer
- evnen til at optage, transportere og fordampe vand.

Siden 1970'erne har de mekanismer, som styrer planternes evne til at optage, translokere og tolerere meget høje metalkoncentrationer, været undersøgt. Det drejer sig f.eks. om indbygning af zink i plantens cellevægge, chelatering af zink og cadmium med citrat, chelatering af nikkel og kobolt med æblesyre, associering af nikkel med pektin og associering af zink med phytochelatinere.

Forskningen i de mekanismer, der har betydning for phytoekstraktionen, har vist, at planterne for at mobilisere metallerne i jorden, således at de kan optages, udskiller metalchelaterende stoffer (phytosiderophorer), f.eks. visse organiske syrer. Phytochelatinere og metalthioneiner i planterne, som også har betydning for planternes metaltolerance, kan muligvis også fungere som siderophorer. Visse planter (f.eks. ærter) kan også udskille enzymer, som kan reducere nogle metaller til mere optagelige valensformer. Endelig kan planterødder udskille protoner, hvorved jordens pH reduceres, hvilket via desorption af visse metaller fra jorden igen kan øge optaget af disse metaller. Disse processer kan også udføres af svampe eller bakterier i rhizosfæren.

Phytoekstraktion af metaller udnytter planternes evne til at ekstrahere metaller fra jorden samt optage og opkoncentrere disse i plantematerialet. Princippet i at anvende phytoekstraktion som oprensningsteknik er, at planterne via jordvæsken optager metal, der frigives fra jorden. I planten optages metaller i rødderne, hvorefter der oftest sker en translokation (transport mellem plantedelene) fra rødderne via plantesaften (xylemet) til løvet eller andre overjordiske dele af planten. De overjordiske plantedele (og i nogle tilfælde de underjordiske dele) kan efterfølgende høstes, hvorved en metalmængde svarende til planternes indhold fjernes fra arealet. I princippet er der herefter flere muligheder for efterbehandling af det høstede plantemateriale. Plantedelene kan f.eks. forbrændes som biobrændsel og asken efterfølgende deponeres, hvorved den tungmetalfurene mængde vil være væsentlig reduceret. Det er ønskeligt at kunne genanvende eller nyttiggøre plantematerialet direkte eller efter foraskning i forbindelse med metaloparbejdning.

## 2.2 Planternes betydning for phytoekstraktion

Til phytoekstraktion kan der overvejes brug af mange forskellige typer af planter, heriblandt træer, nytteplanter, vilde urter og græsser, se f.eks. Andersen (1998) og Brooks (1998). Træer har den fordel, at de udvikler en stor biomasse og dermed har potentiale for et stort samlet optag af metaller. Til gengæld er vækstperioden lang, og bladfald kan medføre en borttransport eller tilbagetransport til jorden på vækststedet. Der findes vilde urter og græsser, som er tilpasset vækst på metalforurenede lokaliteter, og blandt disse er der arter, som i særlig grad kan opkoncentrere metallerne. Ulemper ved disse planter er, at biomasseudbyttet oftest er relativt lavt. Endelig kan der anvendes nytteplanter, f.eks. landbrugsafgrøder som er velkendte i denne sammenhæng, fordi der foreligger viden om afgrødernes metaloptag i relation til den mulige belastning af fødekæden. Denne mulige belastning af fødekæden er da også en af ulemperne ved at anvende afgrøder, som potentielt udgør et fødeemne for mennesker og dyr. Fordelen ved nytteplanter som afgrøder er, at de kan have en relativt høj biomasseproduktion og en forholdsvis kort vækstsæson. Endelig er forholdene vedrørende dyrkning og høstning af afgrøderne veludviklede og optimerede.

De mekanismer og faktorer, som styrer og har betydning for metallers optag i planter, er komplicerede og ikke kendt i detaljer, men i relation til phytoekstraktion er der to forskellige typer af planter, som adskiller sig ved de mekanismer, hvorved metallerne optages i planterne. Den ene type er de såkaldte hyperakkumulerende planter, der er kendetegnet ved gennem aktivt optag at kunne akkumulere høje koncentrationer af visse tungmetaller. Den anden type er de ikke hyperakkumulerende planter, som gennem høj tolerance og/eller stor biomasseproduktion også kan optage væsentlige mængder af tungmetaller.

### 2.2.1 Hyperakkumulerende planter

Man kalder en plante for hyperakkumulerende, hvis den indeholder mere end 1 vægt-% Zn eller Mn på tørstofbasis eller mere end 0,1 vægt-% Co, Cr, Cu eller Ni (Baker et al, 1994). For at give et indtryk af forskellen i optag af metaller mellem hyperakkumulatorer og ”almindelige” planter er i tabel 2.2.1 gengivet en tabel efter Brooks (1983), som viser typiske baggrundskoncentrationer i jord, et typisk gennemsnitsindhold af metaller i ”almindelige” planter og i hyperakkumulatorer. De sidstangivne koncentrationer er ikke de højest fundne i sådanne planter.

**Tabel 2.2.1**

Forskel i optag af forskellige metaller mellem "almindelige" planter og hyperakkumulatører, efter (Brooks, 1983), gennemsnitsindhold i mg/kg tørstof.

Metal	Baggrunds-koncentration	Indhold i "almindelige" planter	Indhold i hyperakkumulatører
Cd	0,1	2	100
Co	1	3	5000
Cu	10	20	5000
Mn	400	1000	10.000
Ni	3	20	5000
Se	0,1	1	1000
Zn	70	100	10.000

Hyperakkumulerende planter har som oftest udviklet sig på naturligt stærkt metalholdige jorde og et kendskab til dem har i mange år været anvendt i forbindelse med søgning efter malmholdige områder. På denne måde er der opstået et kendskab til planter, som kan akkumulere op til 3% metal i planten (målt som tørstof) eller op til 25% i plantesaften (målt som tørstof) uden tegn på skader. Der foreligger veldokumenterede oplysninger om hyperakkumulering i en række plantearter. Det drejer sig f.eks. om de i tabel 2.2.2 angivne, hvor resulterende metalindhold i planternes tørstof tillige er angivet. Der kan være stor variation indenfor en plantearter med hensyn til akkumulerende evne. Fx er det for *Thlaspi caerulescens* kun de økotyper, der er indsamlede på gamle minearealer, der besidder evnen til at hyperakkumulere tungmetal, mens økotyper indsamlet på ubelastet jord ikke adskiller sig væsentligt fra andre planter.

**Tabel 2.2.2**

Eksempler på metal-hyperakkumulatører, hovedsageligt gengivet efter (Brooks, 1998).

Metal	Plantearter	% metal i bladernes tørstof	Oprindelsessted	Reference
Zn	<i>Thlaspi cepaeifolium</i>	2,1	Østrig/Italien	(Brooks et al, 1995)
	<i>Thlaspi calaminare</i>	4,0	Tyskland	(Pollard & Baker, 1996)
	<i>Viola calaminaria</i>	1,0	Belgien/Tyskland	(Baumann, 1887)
Cd	<i>Thlaspi caerulescens</i>	0,2	Centraleuropa	(Vázquez, 1992)
Co	<i>Haumaniastrum roberti</i>	0,5	Zaire	(Morrison, 1981)
Cu	<i>Aeolanthus linearis</i>	1,4	Zaire	(Malaisse et al, 1978)
	<i>Buchnera metallorum</i>	0,4	Zaire	(Morrison, 1980)
	<i>Haumaniastrum kantangense</i>	0,8	Zaire	(Brooks et al. 1995)
Ni	<i>Phyllanthus palawanensis</i>	5,0	Filippinerne	(Homer, 1991)
	<i>Alyssum bertolini</i> og 50 andre alyssum arter	0,1 – 0,3	Sydeuropa og Tyrkiet	(Vergnano Gambi et al, 1977)
	<i>Sebertia acuminata</i>	25,7 (i plantesaften)	Ny Caledonien	(Jaffré et al, 1976)
	<i>Hybanthus floribundus</i>	1,3 – 3,0	Australien	(Severn, 1972)
Pb	<i>Thlaspi caerulescens</i>	0,3	Centraleuropa	(Reeves & Brooks, 1983)
	<i>Thlaspi cepaeifolium</i>	1	Østrig/Italien	(Reeves & Brooks, 1983)

Nogle planter/økotypersorter kan hyperakkumulere flere metaller. Ud over *Thlaspi*-arterne i tabel 2.2.2 drejer det sig bl.a. om *Thlaspi alpestre* (Pb, Ni og Zn), *Viola calaminaria* (Ni og Zn) og *Alyssum montanum* (Cu og Ni). De fleste hyperakkumulatører er dog ret metalspecifikke.

Det har vist sig (Shen et al, 1997), at i hvert fald visse zink-hyperakkumulatorer (*Thlaspi caerulescens*) generelt har behov for et højere zinkindhold i jorden end normalt (5 gange så højt) for at kunne overleve og vokse.

Kelly & Guerin, 1997, har vist, at planterne tilsyneladende har en periode i deres udviklingsforløb, hvor metaloptaget topper. De har dog ikke kunnet forklare årsagen hertil. Undersøgelser udført af Nicks & Chambers (1998) viste, at nikkelindholdet i plantevævet hos *Streptanthus polygaloides* var størst lige før blomstringen og siden aftog igen. Tidligere undersøgelser af hyperakkumulering af nikkel i *Alyssum hederichii* (Morrison, 1980) viste tilsyneladende, at nikkeloptaget snarere var relateret til vækstsæsonens længde end til nikkelindholdet i jorden.

Feltforsøg (McGrath & Dunham, 1997) har meget forventeligt vist, at både biomasseproduktion og akkumuleret koncentration varierer fra år til år og dermed fjernelsesraten. Det ser dog ikke på baggrund af de 3-årige forsøg ud til, at den generelt falder med tiden for det pågældende metal (zink) og de pågældende plantesorter (*Thlaspi caerulescens* og *Cardaminopsis hallerii*). Det er dog vigtigt, at der bliver udført længerevarende forsøg for flere metaller og flere plantesorter for generelt at kunne vurdere denne tendens.

### 2.2.2 Ikke hyperakkumulerende planter

De hidtil kendte hyperakkumulerende plantearter har oftest et ret begrænset vækstpotentiale og kan tillige være vanskelige at høste og efterbehandle (se afsnit 2.4). Det er derfor interessant at vurdere muligheden for phytooprensning med afgrøder, der er udvalgt for deres høje biomasseproduktion med henblik på energi- eller fiberanvendelse. Sådanne afgrøder er blevet dyrket i Danmark i en årrække, således at dyrkningsteknik samt høst- og efterbehandlingsmetoder er udviklet. Introduktion af biomasseafgrøder til phytooprensning vil derfor kunne gennemføres hurtigere og med et mere sikkert resultat end introduktion af hyperakkumulerende planter, hvor der mangler dyrkningserfaring i Danmark.

Under danske forhold kan der forventes udbytter af biomasseafgrøder på mellem 5 og 20 t/ha tørstof årligt afhængigt af afgrøde, høsttidspunkt, jordtype og klima (Jørgensen & Kristensen, 1996). Det skal sammenlignes med udbytter af det eksisterende materiale af hyperakkumulerende planter, der bedømt på basis af litteraturangivelser kan forventes at ville ligge mellem 2 og 10 t/ha tørstof (se f.eks. McGrath, 1998).

Da det i de fleste tilfælde må forventes, at phytooprensning skal gennemføres over en række år, kan det være hensigtsmæssigt at anvende flerårige afgrøder til formålet, således at den forurenede jord ikke skal behandles årligt med risiko for spredning af forureningen. Flerårige afgrøder kan desuden udvikle et dybeere rodnet, som kan medvirke til en dybtgående rensning. To velkendte flerårige biomasseafgrøder i Danmark, der er velbeskrevne med hensyn til tungmetaloptag, er arter af pil (*Salix*) og elefantgræs (*Miscanthus*). Derudover gives der i den følgende tekst information om sareptasennep (*Brassica juncea*), der internationalt ofte er blevet anvendt i forsøg med phytooprensning, og som minder meget om raps og sennep, to velkendte afgrøder i Danmark, samt en sammenligning heraf med bl.a. majs.

Pil dyrkes til energiformål på knap 20.000 ha i Sverige og ca. 600 ha i Danmark. Afgrødens etablering og dyrkning er således velkendt. Pil høstes normalt i vinterperioden med et vandindhold omkring 50%, oftest med 3-4 års mellemrum. Med henblik på maksimal fjernelse af metaller kan pilen høstes med blade om efteråret.

Pileflisens indhold af Cd kan give problemer med recirkulering af asken i jordbruget, og derfra stammer tanken om at anvende pil til fjernelse af Cd fra dyrkningsjorden (Greger & Landberg, 1997). Elsamprojekt (1995) har således undersøgt pileflis fra 8 danske lokaliteter og fandt Cd-koncentrationer mellem 0,4 og 3,6 mg/kg tørstof. I et forsøg med tilførsel af ubelastet slam til pil på tre forskellige lokaliteter fandt Nielsen (1996) mellem 0,7 og 1,1 mg Cd/kg tørstof med størst koncentration i de ugedede forsøgsled. Indholdet af Pb, Cu, Hg og Ni i samme forsøg var i størrelsesordenen 0,4, 3, 0,05 og 0,5 mg/kg. For ingen af metallerne fandtes der væsentlige forskelle mellem koncentrationerne i top og rod.

På en jord, stærkt belastet efter 50 års slamtilførsel, fandt Riddel-Black et al. (1997) betydeligt højere tungmetalkoncentrationer end i de danske målinger. I forsøget blev der tillige testet 20 forskellige arter og kloner af pil, og de kunne tilsyneladende opdeles i to grupper: En gruppe, der ikke opnåede barkkoncentrationer af Cu og Ni på over 30 mg/kg tørstof, og en gruppe, der gjorde og derved led under kraftig misvækst. Pilenes indhold af Cd og Zn syntes til gengæld ikke at påvirke væksten. Med henblik på phytooprensning vurderedes *Salix burjatica* 'Germany' at være den af de 20 undersøgte pil, der havde den bedste kombination af tilvækst og koncentration af tungmetal. Dens koncentration af Cr, Cu, Zn, Cd og Ni i bark (koncentrationen i vedmasse i parentes) var 6,9; 26,5 (24,2); 469 (222); 33,8 (12,3) og 5,4 (4,6) mg/kg tørstof. I *S. cineria*, der er en stresstolerant men langsomtvoksende pileart, fandt Punshon & Dickinson (1997) koncentrationer af Cd og Pb på henholdsvis 76 og 157 mg/kg i stængler af naturligt etableret vegetation på minejord med et indhold af 255 og 12.840 mg/kg.

Elefantgræs stammer fra Sydøstasien og har været dyrket som prydblade i Europa i dette århundrede. Siden midten af 60'erne har den været afprøvet i Danmark og siden i resten af Europa som biomasseafgrøde. Etablering af afgrøden har været vanskelig, men synes nu at kunne ske rentabelt og sikkert ved deling og plantning af græssets rhizomer (underjordiske stængelstykker) (Jørgensen, 1995). Afgrøden høstes årligt, enten ved høst af hele afgrøden med 50-60% vand i november-december eller ved høst af tørre stængler i foråret, efter at top og blade er faldet af igennem vinteren.

Indholdet af tungmetaller er målt i elefantgræs i Danmark efter tilførsel af varierende mængder slam med koncentrationer af Cd, Pb, Ni, Cu og Zn på henholdsvis 0,9; 84; 125; 188 og 717 mg/kg tørstof (Bjerre, 1988). Indholdet i plantematerialet varierede mellem stængel og blad, høsttidspunkter, gødningsniveauer og jordens pH, men ikke voldsomt. Størrelsesordenen for koncentrationen af de ovennævnte metaller i plantematerialet var 0,1; 0,2; 2; 3 og 50 mg/kg tørstof. Wilkins (1997) fandt koncentrationer af Cu, Zn og As på 9-37 mg/kg tørstof med meget ringe effekt af jordens koncentration (op til 2339 mg/kg As og 924 mg/kg Cu). I Tyskland er der på jorder med stigende tilførsel af stærkt tungmetalbelastet slam fundet højere koncentrationer end de ovennævnte, specielt i rødderne, men samtidig fandtes der en betydelig udbyttedgang ved de største metalkoncentrationer i dyrkningsjorden (Metz & Wilke, 1996).

Sareptasennep (*Brassica juncea*) er en afgrøde, der ligner raps og gul sennep med hensyn til dyrkning og udbytte (Kjellström, 1993). Den kan dyrkes i det danske klima, men er aldrig blevet det i større udstrækning (Pedersen, 1963). I USA var sareptasennep en af de arter, der havde højest indhold af Se i forbindelse med forureningsproblemer med Se i kunstvandede områder i Californien (Banuelos et al, 1993), og da det var et af de første eksempler på fjernelse af et problematisk mineral med planter, har sareptasennep siden været undersøgt med henblik på phytooprensning af en række metaller. I



disse forsøg er der ofte opnået gode udbytter, men metalkoncentrationer, der berettiger sareptasennep til at blive klassificeret som hyperakkumulerende, er ikke fundet ved umanipuleret dyrkning på forurenede jord (Steve McGrath, personlig meddelelse). Derimod har den samlede blyfjernelse (koncentration gange biomasse) været relativt god. Der findes derudover eksempler på høje koncentrationer af bly (og også andre metaller) ved dyrkning af sareptasennep i vandkultur (f.eks. Begonia et al. 1998 og Kumar et al. 1995) eller ved tilsætning af kompleksdannere til forurenede jord (f.eks. Huang et al. 1997).

Der har været udført feltforsøg med dyrkning af sareptasennep på en blyforurenede grund i New Jersey (US EPA 1999). Sareptasennep blev sået på arealet, og når afgrøden var vokset til (efter ca. 2 måneder), blev der tilsat EDTA. Dette medførte et kortvarigt ekstremt højt optag af bly, som slog planterne ihjel, hvorefter planterne blev høstet. På denne måde kan der evt. ved gentagen såning i en vækstsæson opnås meget store fjernelsesrater (op til 60% i det pågældende forsøg). Der har dog tilsyneladende været en væsentlig usikkerhed vedr. styring af EDTA-tilsætningen. Metoden har derfor endnu ikke fundet videre udbredelse.

Nogle forsøg tyder på, at selv om *Brassica juncea* har et relativt højt metaloptag, påvirkes denne plante også mere af de høje metalindhold end f.eks. kornsorterne (bl.a. Ebbs et al, 1996). Majs synes f.eks. sammen med andre énkimede planter at være relativt gode til at translokere den optagne blymængde videre til den overjordiske del af planten. Igen er de bedste resultater opnået ved at tilsætte kompleksdannere til jorden, f.eks. NTA, som øgede majs' blyoptag med en faktor 100 (Huang & Cunningham, 1996). Hos USDA i Beltsville, Maryland, hvor man har arbejdet med phytoekstraktion af Zn og Cd, har det vist sig, at majs har relativt gode akkumulerende egenskaber, mens dette f.eks. ikke gælder tomat (Brown et al, 1994).

### 2.2.3 Optimeringspotentiale

De hyperakkumulerende plantearter, der er blevet indsamlet med henblik på phytooprensning, har ikke gennemgået nogen systematisk selektion for højt indhold af tungmetaller og højt udbytte. Der er derfor et stort potentiale for at forbedre plantematerialets egenskaber, således som det er sket med alle øvrige kulturplanter gennem århundreder. Denne proces er så småt gået i gang i forskellige forskningsmiljøer, men endnu uden at færdigforædlede sorter er blevet markedsført. Et amerikansk patent skulle netop være udtaget på en "superakkumulerende" alpepengeurt på baggrund af forskning udført ved USDA i Beltsville, USA, men der er endnu ikke offentliggjort tilgængelige data om denne plante.

Ved sammenligning med de kendte forbedringer ved forædling af landbrugsplanter er det ikke usandsynligt at kunne forvente mindst en fordobling af 'metaludbyttet' i forhold til dyrkning af de først indsamlede planter. Mulighederne afhænger dog af, hvor tæt sammenhæng der er mellem optaget af tungmetal og vækstreduktion, samt af hvilke dyrkningstiltag (f.eks. gødskning) der evt. kan modvirke denne sammenhæng. Forsøg med varierende kvælstoftilførsel til *Alyssum bertolinii* (Bennet et al, 1998) viste, at nikkeloptaget holdt sig uændret indtil en vis N-tilførsel, hvorefter det faldt. Totaloptaget steg dog vedvarende. Et tilsvarende mønster er set for zinkoptaget i alpepengeurt. Her faldt totaloptaget dog ved de højeste N-tilførsler (100 mg N/kg). Både selektion for stort metaloptag og højt udbytte samt undersøgelser af dyrkningstiltag bør ske under danske klima- og jordbetingelser for at kunne vurdere potentialet for anvendelse som en egentlig teknologi til jordrensning i Danmark.

En anden mulig strategi for maksimering af metaloptaget i plantebiomasse er at kombinere arter med hyperakkumulerende egenskaber med arter med høj biomasseproduktion. Det kan tænkes opnået enten ved traditionel krydsning af beslægtede arter (kan f.eks. forsøges med alpepengeurt og sareptasennep) eller ved genetisk manipulering. Sidstnævnte vil sandsynligvis bedst kunne ske ved overførsel af gener for høj biomasseproduktion til hyperakkumulerende planter. Evnen til hyperakkumulering af tungmetaller vedrører nemlig både optag, translokation og tolerance for metallerne og vil derfor sandsynligvis være vanskelig at overføre til nye arter (Fangjie Zhao, Rothamsted, personlig meddelelse).

Endelig kan en nærmere optimering af planternes symbiose med bakterier og svampe være en mulighed for at stimulere akkumuleringen.

I 2-3 igangværende EU-projekter undersøges forskellige strategier for phytooptagelse for tungmetaller, herunder planteselektion og bioteknologiske muligheder. Der er dog ikke dansk deltagelse i nogen af projekterne.

## 2.3 Jordmediets betydning for phytoekstraktionen

På trods af omfattende forskning i jord- og plantefaktorer, der kan påvirke optaget af metaller i planter, eksisterer der ikke en generel metode til at forudsige planteoptaget af metaller fra jord. Dette skyldes antageligt de mange faktorer, som influerer på planteoptaget af metaller fra jorden. Faktorer som plantetype, temperatur, lys og luftfugtighed relaterer sig direkte til planten. Faktorer af betydning for planteoptaget, der er direkte relateret til jordmediet er jordens pH, jordtypen, koncentrationsniveauet af metallerne, jordens indhold af organisk stof, tilførsel af gødning og jordvæskens sammensætning. De enkelte faktoreres mekanistiske sammenhæng med planters optag af de forskellige metaller er ikke klarlagt, men typisk rangordnes faktorerne gennem forsøg, hvor planters indhold af metal korreleres med de undersøgte faktorer, og forklaringsgraden,  $r^2$  anvendes som mål for de enkelte faktoreres betydning.

### 2.3.1 Jordens sammensætning

Jordmediets sammensætning, typisk karakteriseret ved jordens tekstur, pH, kationbytningskapacitet og eventuelt suppleret med bestemmelse af specifikke mineraler har indflydelse på planternes vækstforhold og optaget af metaller. Som sagt er det yderst komplekst at klarlægge disse faktoreres betydning for det mekanistiske i planternes optag af metaller, men det er klart at pH er en central faktor, idet pH er den altovervejende styrende parameter for fordelingen af tungmetaller mellem jord og jordvæske. Undersøgelser af Cd, Ni og Zn har vist at variationer i pH kunne forklare den overvejende variation i forholdet mellem fordelingen af metallerne mellem jord og jordvæske, og således også vil have primær betydning for planteoptaget. I nogle tilfælde kan inddragelse af jordens indhold af organisk stof forbedre forklaringen af fordelingen, men for alle normale danske jordtyper kan den sandsynligvis anses for sekundær i sammenligning med pH.

### 2.3.2 Koncentrationsniveau og forureningskilde

Den generelle viden om optag af metal i planter bygger primært på forekomsten af metal som total koncentration i jorden eller som en ekstraherbar del af jordens totale indhold. Flere studier har vist en god korrelation mellem koncentrationer af f.eks. Cd i planter og koncentrationer af Cd i jord. Disse studier er ofte udført ved en begrænset variation i f.eks. pH. Generelt mindskes korrelationen mellem indholdet af Cd i planten og jorden, når jordparametrene varieres. Det er da også almindeligt accepteret, at jordens totale indhold

af metal ikke har nogen direkte mekanistisk sammenhæng med den del af metalmængden, som optages i planten. Dette er også årsagen til, at optaget af metal fra forskellige jorder, hvor koncentrationsniveauerne er de samme, men indholdet af metallet stammer fra forskellige kilder, kan forventes at give varierende optag i forbindelse med phytoekstraktion. Metallernes forskelligartede forekomst og form i f.eks. rester af maling, blyslam fra gamle batterier, imprægneringssalte vil bevirke, at den del af metallet, som vil være umiddelbart tilgængelig for optag i planten vil variere og kun vanskeligt kunne forudsiges.

I forsøg med phytooprensning af Zn og Cd (Brown et al, 1994) er det vist, at plantevæksten har reduceret den vandekstraherbare del af Zn-indholdet i 2 af de 3 umanipulerede jorde med henholdsvis ca. 30 og ca. 60% og den tilsvarende andel af Cd-indholdet med ca. 70% i én af jordene (her er kun angivet de signifikante reduktioner). Et andet forsøg (McGrath et al, 1997) viste, at det samlede zinkoptag var væsentligt større (10 gange) end hvad der forinden var vurderet som planteoptageligt (ekstraherbart med 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) i jorden. Introduktionen af planter forøgede således i sig selv den ekstraherbare del.

### 2.3.3 Optimeringspotentiale

Phytoekstraktions virkningsgrad afhænger væsentligt af metallernes tilgængelighed i jorden. Af den samlede metalkoncentration i jorden vil typisk kun en mindre del være umiddelbart tilgængelig for planteoptag. Optimeringen af optaget relaterer sig til at påvirke de processer, som gør metallet mere tilgængeligt i jorden, hvilket vil sige øge desorptionen og kompleksdannelsen af metallet i jordvæsken, der er de to processer, som resulterer i en forøgelse af koncentrationen af metal i jordvæsken ved forskydning af ligevægten fra jordfasen til væskefasen. For flere metaller, f.eks. Cd, Ni og Zn vides, at pH har meget stor betydning for fordelingen mellem jord- og væskefasen. For et større antal danske jordprøver er det fundet, at fordelingskoefficienterne for Cd falder med ca. en faktor 3 for et fald i pH på én enhed. Desuden vides, at stærke kompleksbindere eller chelatorer, som f.eks. EDTA, kan forøge opløseligheden af visse metaller med flere størrelsesordener. Tilsætning af metal-chelatorer er således den umiddelbart mest effektive måde at forøge metallernes opløselighed og dermed planteoptaget på. Tilsætning af organiske syrer er afprøvet bl.a. med henblik på at reducere pH og dermed øge visse metalleres mobilitet.

Det vides, at tilstedeværelsen af visse mikroorganismer i rhizosfæren øger optaget af Fe og Mn, og enkelte forsøg med tilsætning af forskellige typer af *Pseudomonas* og *Bacillus* fra en metalforurennet jord har da også øget Cd-optaget hos sareptasennep, *Brassica juncea* (Salt et al, 1995).

Det problematiske ved at anvende tilsætning af meget effektive kompleksdannere for at optimere planteoptaget er, at mulighederne for øget udvaskning fra jorden også bliver større. Anvendelsen skal således kombineres med reduktion af infiltrationen gennem dyrkningslaget. Ved tilsætning af kompleksdannere med kort halveringstid til en voksende afgrøde i sommermånedene vil der dog sjældent være afstrømning af jordvand af betydning indenfor halveringstiden.

Oprensninger udført i pilotskala med *Brassica juncea* i et boligområde i Massachusetts, USA, hvor der var stærkt forhøjede blykoncentrationer i jorden, viser, at efter første høst var det areal, hvor blykoncentrationen oversteg 1000 mg/kg blevet reduceret fra 25% til 11% af grunden. Efter 3. høst var koncentrationen på arealet overalt under 800 mg/kg, men over 600 mg/kg. Måling af jordens indhold af vandopløseligt bly viste, at denne andel

ikke var blevet forøget ved phytooprensningen (Blaylock et al, 1997). Det er ikke ved beskrivelsen af forsøget oplyst, om der har været anvendt EDTA eller andre kompleksdannere, men det må man formode.

Flere udenlandske undersøgelser diskuterer betydningen af påvirkningen af den biotilgængelige del af metallerne i jorden ("Bioavailable element stripping", BES), se bl.a. de i afsnit 2.3.2 nævnte. Det påpeges derudover, at det ikke er hensigtsmæssigt at fjerne alt metal (relevant for de metaller, som er essentielle for planterne, f.eks. zink), og at BES måske kun behøver at fjerne en mindre andel af totalindholdet for at fjerne metallernes uønskede effekter. Også i denne sammenhæng bør ændringen i fjernelsesraten med tiden vurderes. Herom foreligger der kun ganske få resultater, da der endnu ikke er foretaget tilstrækkeligt langvarige forsøg.

Generelt må det forventes, at den øgede viden om sammenhænge mellem jordforureningens art, størrelse og tilgængelighed, jordparametrene generelt samt valg og dyrkning af de enkelte plantearter vil kunne føre til "skræddersyede" løsninger, der vil kunne optimere det opnåelige resultat både med hensyn til totalkoncentration og effektreduktion for en oprensningsperiode som helhed.

## 2.4 Høst og behandlingsmetoder

Efter optagelse af tungmetal i en afgrøde på et forurenet areal reterer der en vigtig opgave omkring høst og acceptabel anvendelse/bortskaffelse af det tungmetaltholdige plantemateriale. Disse processer har stor betydning for den samlede miljøvurdering af phytooprensningsteknologien og for økonomien i metoden. Hvilke høst- og behandlingsmetoder der vil være de bedste at tage i anvendelse, vil ud over plantearter og forureningstype i høj grad afhænge af skalaen for forureningen og plantedyrkningen. I tilfælde af oprensning af 'baghavestørrelse' vil det sandsynligvis altid være overvejende manuelle høstmetoder, der tages i anvendelse, og bortskaffelse via affaldsforbrænding eller evt. deponering kan være den nemmeste løsning. I tilfælde af større arealer vil maskinel høst være mere rentabel, og de større mængder biomasse (og tungmetal) kan evt. indgå i en industriel (gen-)anvendelse. Hvorvidt biomasse produceret på tungmetalforurenet jord vil blive betraget som affald (med affaldsafgift til følge) eller som biomasse til forbrænding i almindelige biomassefyrringsanlæg må sandsynligvis komme an på en konkret stillingtagen fra miljømyndighederne, da der ikke er taget højde for spørgsmålet i den eksisterende lovgivning. En sådan vurdering må forventes at tage udgangspunkt i tungmetallernes videre skæbne i biomassefyrringsanlæg.

I landbruget findes der høstudstyr, som vil kunne anvendes til høst af afgrøder med henblik på tungmetalfjernelse. For at maksimere udbyttet af urteagtige afgrøder såsom alpepengeurt (*Thlaspi*), sareptasennep (*Brassica*) og græsser bør de formentlig høstes grønne, inden bladene falder af. Høsten vil kunne ske med en grønthøster eller en finsnitter. Alpepengeurt er en meget lav urt, og snithøjden vil være afgørende for, hvor stor biomasse- og tungmetalfjernelsen bliver. Ved jævn jordoverflade kan snithøjden ned til ca. 5 cm opnås med grønthøster eller finsnitter. Ønskes der en lavere snithøjde, kan det overvejes at teste plænegræsslåmaskiner, som f.eks. anvendes på golfbaner. Pil og andre vedagtige planter kan høstes med specialmaskiner udviklet til formålet (Kofmann, 1999).

Der mangler viden omkring fordeling af tungmetaller mellem forskellige dele af planterne samt variationen over tid, hvilket kan have stor betydning for fastlæggelsen af den optimale høst- og behandlingsmetode.

Ved forbrænding af den høstede biomasse vil det tungmetalforurende volumen reduceres til biomassens askeindhold (oftest 2-6% af biomassens tørstofindhold). Det er dog en forudsætning, at forbrændingen sker i anlæg med omhyggelig røgrrensning, således at der ikke emitteres metaller med røggassen. Røggasrensning er dog også i større eller mindre omfang standard i alle større danske anlæg til biomasseforbrænding. Ved forbrænding af biomasser med max. 80% vandindhold vil der opnås et energioverskud, som kan indgå i energiforsyningen (i praksis kan biomassefyrede anlæg dog normalt ikke håndtere brændsler med over 50-60% vandindhold).

Asken fra biomassefyring opsamles oftest i 3 fraktioner, nemlig bundaske, cyklonflyveaske og filterflyveaske. Bundasken udgør mængdemæssigt den største fraktion, mens til gengæld tungmetalkoncentrationerne er størst i flyveaskefraktionerne (Obernberger et al., 1997). Koncentrationsforskellene hænger sammen med forskelle i fortætningstemperaturer for røggassen i de forskellige dele af kedelanlægget. Disse forhold betyder, at bundaske fra almindelig biomasseforbrænding i Danmark normalt kan recirkuleres i jordbruget uden at konflikte med den såkaldte slambekendtgørelse (bekendtgørelse nr. 736), mens til gengæld flyveasken ofte overskrider grænseværdier, specielt for Cd (i den kommende askebekendtgørelse lægges der op til et egentligt forbud mod recirkulering af flyveasken). På baggrund af den eksisterende viden forventes der ikke en væsentlig stigning i bundaskens tungmetalindhold ved stigende indhold i biomassen, mens til gengæld indholdet i flyveasken vil stige (Anders Ewald, dk-TEKNIK, personlig meddelelse).

Det er muligt at optimere kedelopbygningen, således at tungmetallerne yderligere opkoncentreres i de mængdemæssigt små flyveaskefraktioner (Obernberger et al., 1997). Tungmetallerne kan herved opnå koncentrationsniveauer, der åbner mulighed for at forsøge at udvinde metallerne af asken (Dahl & Obernberger, 1998).

## 3 Eksperimentel afprøvning af phytoekstraktion

### 3.1 Lokalteter og jordprøvetagning

#### 3.1.1 Kauslunde, Middelfart Kommune, Fyns Amt

Den udvalgte lokalitet til afprøvning af phytooprensningsteknologien er registreret som affaldsdepot, reg. nr. 445-8, og beliggende på Hasserisvej 34, 5500 Middelfart, matrikelnumrene 8b, 8d, 8f og 8i, Gamborg By, Gamborg. Fyns Amt har i perioden 1992 til 1995 gennemført en forureningsundersøgelse af lokaliteten. Resultaterne af undersøgelsen er beskrevet i rapporten Fyns Amt (1995), der sammen med besigtigelse af og jordprøvetagning på lokaliteten udgør grundlaget for denne beskrivelse af lokaliteten.

Grunden er anvendt til træimprægneringsformål i perioden fra omkring år 1900 til 1971. Bortset fra en periode i midten af 1980'erne, hvor arealet blev anvendt som køreteknisk anlæg, har grunden siden 1971 ligget ubenyttet hen. Grunden anvendes dog i mindre omfang til rekreative formål, bl.a. knallertbane (Fyns Amt, 1995). Indtil midten af 1950'erne foregik imprægneringen af hovedsagelig telefon- og telegrafmaster ved boucheriemetoden i det fri på ubefæstede arealer. Ved hjælp af tryk blev imprægneringsmidlet tilført rodenderne af de uafbarkede stammer, indtil væsken efter 1-2 uger var presset hele vejen igennem stammerne og dryppede ud af topenden. Ved boucheriemetoden blev der primært anvendt kobber, arsen, fluorid og eventuelt dinitrophenol i imprægneringsmidlet (Fyns Amt, 1995). I nærheden af selve imprægneringspladsen har der været et pumpehus, hvorfra der gennem underjordiske rørledninger blev pumpet imprægneringsvæske ud til aftapningsstudse på pladsen. De imprægnerede stammer blev efterfølgende afbarket og barken midlertidigt deponeret på den sydlige del af grunden. Der ligger stadig bark fra denne periode i det sydvestlige hjørne af grunden. Forureningen ved denne metode er antagelig især forårsaget af afdrypning fra ender af stammer direkte på pladsen, udsivning fra rørsystemer og udvaskning fra bark og oplagring af imprægnerede stammer.

På grund af myndighedskrav blev boucheriemetoden opgivet i midten af 1950'erne og erstattet af imprægnering ved saftfortrængningsmetoden. Denne metode blev anvendt indtil virksomhedens ophør i 1971 (Fyns Amt, 1995). Ved saftfortrængningsmetoden foregår imprægneringen i betonkar, hvor væsken ved vakuum over en periode på 4-6 dage suges ind i de afbarkede master. Ved denne metode er der især anvendt arsen, krom, fluorid og i mindre grad kobber og eventuelt zink i imprægneringsvæsken. Når imprægneringen er færdig, tømmes betonkarrene for væske via et underjordisk rørsystem. Forureningen på grunden ved saftfortrængningsmetoden er sandsynligvis sket gennem spild fra imprægneringskar og afdrypningsplads samt udvaskning fra oplagringsplads.

Grundens samlede areal udgør ca. 2 ha, og på baggrund af den gennemførte forureningsundersøgelse (Fyns Amt, 1995) ses det, at stort set hele grunden er forurenede med arsen og kobber. Kun i det sydøstlige hjørne er der fundet spormetalniveauer, der ikke overstiger Fyns Amts kvalitetskriterier.

De højeste arsenindhold, med koncentrationer op til 1.300 mg As/kg TS, er fundet ved de kar, som blev anvendt til imprægnering ved saftfortræng-

ningsmetoden. I det nordvestlige område af grunden er der ligeledes fundet meget høje arsenindhold med koncentrationer fra 500 til 1.000 mg As/kg TS. Dette område har været anvendt som afdrypnings- og lagerplads for imprægnerede stammer.

Kobberindholdet er højt på den centrale og nordlige del af lokaliteten. De højeste kobberindhold er fundet omkring de kar, som blev anvendt til imprægnering ved saftfortrængningsmetoden, og ved de områder, som blev anvendt til selve imprægneringsaktiviteterne ved bouccheriemetoden. I disse områder overstiger kobberindholdet typisk 2.000 mg/kg TS.

Uden for grunden er der fundet en betydelig arsenforurening på en mark mod øst, der grænser op til depotet. Her er der målt arsenindhold op til 3-400 mg/kg TS. Der er ligeledes fundet forhøjede arsen- og kobberindhold på baneterrænet nord for depotet.

Der er også fundet forhøjede indhold af krom på imprægneringsgrunden, men i forhold til indholdene af arsen og kobber er indholdene af krom relativt lave (Fyns Amt, 1995).

Med hensyn til den dybdemæssige fordeling af forureningen viser undersøgelsen fra 1995, at forureningen mange steder er nået ned i 1-2 meters dybde. I den sydlige del af lokaliteterne, der har været anvendt som barkdepot, er forureningen typisk nået ned i 0,5-1 meters dybde under terræn. Overslagsberegninger gennemført i Fyns Amt (1995) viser, at der er spildt ca. 10.000 kg arsen og ca. 55.000 kg kobber på grunden, hvoraf ca. 50% af såvel arsen- som kobbermængderne findes i den øverste meter af jordlagene.

Geologiske profiler udtaget på grunden viser generelt et muldlag i den øverste halve meter og herunder moræneler ned til 4-5 meter under terræn (m.u.t.). Herunder blev der i de fleste borer (Fyns Amt, 1995) i området fundet vekslende aflejringer af moræneler og smeltevandsaflejringer af ler, silt og sand ned til 10-15 m.u.t. På den midterste del af imprægneringsgrunden er der udlagt ca. 30 cm grus.

De målte pH-værdier på grunden varierer fra 6 til 8,6 med en tendens til stigende pH-værdier med dybden.

På store dele af grunden er der konstateret misvækst af vegetationen og døde områder som følge af forureningen.

Den 3. december 1998 blev der udtaget to jordprøver, hver af en størrelse svarende til 12 kar à ca. 30 liter, dvs. ca. 360 liter.

Den første jordprøve, navngivet Kauslunde 1, blev udtaget over et areal på ca. 1 m<sup>2</sup> i en afstand af 37 m i sydlig retning målt fra det sydvestlige hjørne af betonkarret beliggende centralt i den nordlige ende af lokaliteten. Der fandtes ingen vegetation på det pågældende areal, og på overfladen kunne der identificeres barkrester samt grønne udfældninger, antageligt i form af kobbersulfat. Der blev prøvetaget ned til 40 cm's dybde. De øverste 15 cm under terræn bestod af mørk muldjord blandet med barkrester. Fra ca. 15 til 40 cm's dybde bestod jorden af lermuld og nærmest ren ler i bunden.

Den anden jordprøve, navngivet Kauslunde 2, blev ligeledes udtaget på et areal på 1-1½ m<sup>2</sup> i en afstand af 12 m i østlig retning fra betonkarret. På arealet voksede der forskellige græsser. Den øverste del af jordlaget ned til ca. 20 cm's dybde bestod af muldjord, og herunder skiftede lagfølgen til gulligt ler ned til ca. 35 cm's dybde. Det var vanskeligt at grave i det gullige ler.

### 3.1.2 Kibæk, Ålskov Kommune, Ringkøbing Amt

Den udpegede lokalitet til afprøvning af phytooprensningsteknologien er beliggende på Kastanieallé 2-4 i Kibæk, Ålskov Kommune. Lokaliteten, som i dag er udlagt til grønt areal, har tidligere været benyttet til aktiviteter i forbindelse med produktion af elektricitet på Kibæk Elværk, der før nedrivningen i 1980 var beliggende på Kastanieallé 2. Arealerne er primært forurenet med bly i de øvre jordlag, hvilket formentlig skyldes håndteringen af blyakkumulatorer.

Grundens samlede areal udgør knap 1.000 m<sup>2</sup>, og på baggrund af en tidligere gennemført forureningsundersøgelse (Petersen og Mortensen, 1996) skønnes det forurenede område at udgøre ca. 450 m<sup>2</sup>. Forureningen er afgrænset i nord og syd, dvs. i grundens længde, mens den i øst og vest udelukkende afgrænses af nabogrundene. Forureningen er generelt vertikalt afgrænset i en dybde af omtrent 0,75 - 1 m.u.t. med undtagelse af de to udpegede hotspots, hvor meget høje koncentrationer blev fundet ned til 1,25 m.u.t. De fundne koncentrationsniveauer i hotspottene varierer meget, fra baggrunds-niveauer på 5-20 mg Pb/kg TS til 7.400 mg Pb/kg TS, og der er nogle steder tydelige tegn på hæmning af græssets vækst. Koncentrationer på over 1.000 mg Pb/kg TS er i hotspottene flere steder fundet ned til 1 m.u.t., heriblandt den højeste målte koncentration. Arealmæssigt udgør disse meget forurenede områder tilsammen ca. 40 m<sup>2</sup>. Uden for hotspottene ligger koncentrationsniveauerne i intervallet 50-950 mg Pb/kg TS.

Af forureningsundersøgelsen fremgår det, at jordbunden består af muld den første halve meter, efterfulgt af sand, grus og ler ned til ca. 2 m.u.t. Den halve meter muldlag blev efter sigende udlagt på grunden efter nedrivningen af elværket. Imidlertid er forureningsniveauerne i muldlaget visse steder på grunden væsentligt forhøjet i forhold til de oprindelige underliggende lag. Med hensyn til jordparametre (pH, tekstur, organisk stof m.m.) er grunden kun karakteriseret i begrænset omfang. Der er foretaget et mindre antal pH- og glødetabsmålinger på udvalgte jordprøver i muldlaget (0,25 m.u.t.) og sandlaget (1,25 m.u.t.). Tørstofindholdet er i prøverne fra muldlaget meget højt, mens indholdet ligger på de typiske niveauer i prøverne fra sandlaget. Variationen i jordprøvernes pH inden for grunden spænder fra 5,3 til 7,3. Herudover er det muligt, at der kan findes mindre områder med lavere pH-værdier som følge af syrespild.

Den 17. december 1998 blev der udtaget to jordprøver. Første prøve (Kibæk 1) blev udtaget i et område med angivet høj forurening. Øverst bestod jorden af sandmuld (bevokset med plænegræsser o.a.) til ca. 25 cm dybde, herunder af et mørkfarvet lag (10-20 cm) af lidt ubestemmelig karakter og derunder af gulfarvet sand. Gravedybde ca. 50 cm. Anden prøve (Kibæk 2) blev udtaget i et område af grunden med angiveligt mindre forurening. Overjorden bestod af sandmuld (bevokset med plænegræsser o.a.) og herunder af et stenblandet mellemlag, der lignede påfyldningsmateriale. Der var ingen mørkfarvede partier. Gravedybde ca. 45 cm. Fra hvert sted blev der udtaget ca. 350 liter jord.

### 3.1.3 Valbyparken, Københavns Kommune

Det udvalgte areal til afprøvning af phytooprensningsteknologien ligger i den sydøstlige del af Valbyparken i det område, som kaldes "Stranden". I 1995 er der af Geoteknisk Institut for Miljøkontrollen gennemført en forureningsundersøgelse (Geoteknisk Institut, 1995) af de 3 haveforeninger (Kalvebod, Bergmanns Have og Sundbo) i Valbyparken. I forbindelse med undersøgelsen blev der endvidere udtaget 3 prøver fra selve Valbyparken uden for haveforeningerne. Ingen af prøverne er imidlertid udtaget fra "Stranden", og der er således ikke foretaget en egentlig undersøgelse af det areal, som



påtænkes anvendt til afprøvning af phytooprensningsteknologien i Københavns Kommune. Idet Valby parken består af fyld, kan de gennemførte undersøgelser bidrage med generel information om karakteren og styrken af forureningen samt variationen i forureningsniveauerne. Resultaterne af undersøgelsen er beskrevet i rapporten Geoteknisk Institut (1995), der sammen med besigtigelse af og jordprøvetagning på lokaliteten udgør grundlaget for denne beskrivelse af lokaliteten.

Valbyparken er etableret på gammel lossepladsfyld, der er tilført før 1938 (Geoteknisk Institut, 1995). Fyldet består af dagrenovation og industriaffald, men det kan ikke udelukkes, at for eksempel restprodukter fra Valby Gasværk er deponeret på arealerne. Det udvalgte areal er i dag udlagt med græs-dække og anvendes til rekreative formål. Den gennemførte forureningsundersøgelse viser, at de prøver, der er udtaget i de øverste 20 cm af jordlagene, generelt er forurenede med et bredt spektrum af spormetaller. De typiske niveauer for metaller, der blev fundet i forhøjede koncentrationer, er: Cadmium: 1,5-4 mg Cd/kg TS, kobber: 200-500 mg Cu/kg TS, krom: 100-300 mg Cr/kg TS, bly: 300-600 mg Pb/kg TS, zink: 700-1500 mg Zn/kg TS og kviksølv 0,5-1,5 mg Hg/kg TS. Niveauerne er således i langt de fleste tilfælde moderate og udgør derfor næppe en akut fare ved direkte eksponering, men derimod en risiko for langsigtede effekter.

Dæklaget i parken består generelt af muld i forskellige nuancer. Enkelte steder forekommer der sand og sandblandet muld. Der er tilsyneladende ikke målt pH i jorden.

Den 16. december 1998 blev der udtaget to jordprøver i den sydøstlige del af Valbyparken. Hver af prøverne var af en størrelse på 3-400 liter.

Den første prøve "Valbyparken 1" blev udtaget ca. 50 m nord for den øst-vestgående kørevej, som deler denne del af Valbyparken i de to områder "Engen" (nord for vejen) og "Stranden" (syd for vejen). Den anden prøve "Valbyparken 2" blev udtaget ca. 25 m syd for vejen på "Stranden".

Prøven "Valbyparken 1" fra "Engen" blev udtaget over et græs-dækket areal på ca. 2 m<sup>2</sup>. Det var meget vanskeligt at grave i jorden, der var rødlig med slaggelignende substanser, tydeligvis fyldjord, hvori også fandtes mindre glas- og træstykker. Der blev udtaget jord til 20-25 cm's dybde. Den anden prøve "Valbyparken 2" bestod af mørk brunlig muldjord, der blev udtaget over et areal på 1½-2 m<sup>2</sup> ned til en dybde af 35 m.u.t.

#### **3.1.4 Lobbæk, Aakirkeby, Bornholms Amt**

Den udvalgte lokalitet til afprøvning af phytooprensningsteknologien er registreret som affaldsdepot, reg. nr. 409-6, beliggende på Lobbæk Hovedgade 23, 3720 Aakirkeby, matrikelnummer 45x, Nylars. Bornholms Amt har i 1996 gennemført en forureningsundersøgelse af lokaliteten. Resultaterne af undersøgelsen er beskrevet i rapporten Bornholms Amt (1996), der sammen med en besigtigelse af lokaliteten udgør grundlaget for denne beskrivelse af lokaliteten. Jordprøvetagningen blev foretaget af Bornholms Amt, Teknisk Forvaltning.

I perioden 1922 til 1955 har der været malervirksomhed på grunden, herunder sandsynligvis billakering. I dag anvendes ejendommen til privatbeboelse.

Matriklens samlede areal er på 717 m<sup>2</sup>, hvoraf et areal på ca. 310 m<sup>2</sup> er registreret under affaldsdepotloven. Det registrerede areal svarer til arealet (baghaven) bag beboelsesbygningen, men omfatter ikke arealet, hvorpå værkstedsbygningen er beliggende (Bornholms Amt, 1996). På nuværende tids-

punkt (1998) er det registrerede areal sået til med græs, der tilsyneladende trives uden tydelige tegn på misvækst. Der er endvidere på arealet placeret et mindre drivhus (hvor der ikke anvendes jord fra lokaliteten til dyrkning af grønt til spising).

Som led i en forureningsundersøgelse (Bornholms Amt, 1996) udførte Bornholms Amt i 1996 3 korte (1-1½ m.u.t.) miljøtekniske boringer på steder, hvor der var mistanke om, at der kunne findes forurening fra malervirksomhedens aktiviteter. Ved undersøgelsen blev der konstateret forurening med spormetallerne bly, cadmium og zink. Analyse af 2 jordprøver (0-0,2 meters dybde) viste koncentrationer af bly på henholdsvis 440 og 2.100 mg Pb/kg TS, cadmium på 1 og 2 mg Cd/kg samt zink på 790 og 1.500 mg Zn/kg TS. Herudover blev der fundet svagt forhøjede koncentrationer af kobber, mens koncentrationerne af krom, nikkel og arsen lå på typiske baggrunds niveauer. Ved undersøgelsen blev ikke fundet forurening med olieprodukter el.lign.

Lagfølgen i de miljøtekniske boringer viste øverst (ca. 70 cm) fyld i form af sand og herunder moræneler samt rødbrunt sand i naturlig lejring. Det vides, at undergrunden under lokaliteten består af grønne skifre, der udgør et lokalt magasin, hvorfra Lobbæk Vandværk pumper (Bornholms Amt, 1996). Nærmeste vandværksboring ligger ca. 120 m nedstrøms for lokaliteten.

Den 17. december 1998 blev der udtaget to jordprøver på grunden Lobbæk Hovedgade 23, hver af prøverne var af en størrelse på 3-400 liter. Den første prøve "Lobbæk 1" blev udtaget over et areal på ca. 1 m<sup>2</sup> i græsplænen i en afstand af 1-2 m syd for værkstedsbygningen. Den anden prøve "Lobbæk 2" blev ligeledes udtaget over et areal på ca. 1 m<sup>2</sup> fra græsplænen i en afstand af 1-2 m fra den vestlige side af værkstedsbygningen. I begge tilfælde blev der udtaget prøver til en dybde af 30-35 cm. Jordprøverne bestod af muldjord med fyldmateriale, der kunne identificeres som plastik-, glas- og porcelænsstykker.

### 3.2 Efterbehandling og karakterisering af jordprøver

Efter hjemtagningen til laboratoriet (DJF, Foulum) blev jordene enkeltvis sigtet gennem gulvrist (1x2 cm firkanthuller) for fjernelse af store sten, rødder og andre urenheder. Større jordklumper blev mast, til de kunne passere sigten. Sten, affald (jernstumper, glas etc.) og plantedele opsamlet på risten blev fjernet. Hver jord blev herefter blandet 4 gange med skovl. Ca. 200 kg af hver jordprøve blev overført til 8 kar (plastkasser, dimension: 35 cm lang, 27 cm bred, 32 cm dyb), hver med et overfladeareal på ca. 0,1 m<sup>2</sup>, til brug for dyrkningsforsøg i vækstkammer som beskrevet i det videre. Karrene var forsynet med afdræningshul i bunden, hvorover der blev lagt en plastrist dækket med en glasfiberduk. Karrene blev fyldt til en jordhøjde på 30 cm for alle jorde, svarende til et indhold på ca. 28 liter. Jordindholdet i foreliggende tilstand varierede i vægt fra 32 til 40 kg pr. kar afhængigt af jordtypen.

Inden overførslen til plastkasser blev der udtaget to delprøver à ca. 10 kg til analyse på henholdsvis VKI og DJF.

Af delprøven til analyse på DJF blev 4-5 kg tørret v. 80°C i 20 timer, hvorefter jordknolde blev knust på maskine. Prøverne blev sigtet over 2 mm sold, det ikke passerede blev fjernet. Prøverne blev herefter sendt til analysering for tekstur (fordeling mellem ler, silt, grovsilt, sand, grovsand, humus og kalk), kationbytningskapacitet CEC, kalium K, natrium Na, calcium Ca, magnesium Mg, fosfor P og total nitrogen N. Jordanalyserne er beskrevet i bilag A.

Den anden delprøve på ca. 10 kg blev sendt til VKIs laboratorium, hvor der efter homogenisering blev udtaget en repræsentativ delprøve, der blev sigtet gennem en 4 mm sigte. Materiale større end 4 mm blev tørret ved ca. 40°C, således at aggregater af jord kunne presses gennem sigten. Herefter blev materialet sigtet gennem en 2 mm sigte. Eventuelle sten over 4 mm og 2 mm blev frasorteret og registeret. Af prøvematerialet med en størrelse mindre end 2 mm blev der udtaget en repræsentativ prøve på 50-100 g til oplukning med halvkoncentreret salpetersyre efter forskrifterne i DS 259 og efterfølgende analyse for spormetallerne arsen As, bly Pb, cadmium Cd, krom Cr, kobber Cu, nikkel Ni og zink Zn. Analysemetoderne er beskrevet i bilag B.

### 3.3 Udvalgelse og indsamling af planter

Baseret på indsamlingen af viden er der udvalgt og hjemtaget frø og stiklinger fra 9 planter.

I bilag C findes der en oversigt over de kontaktede personer i forbindelse med indsamling af planter. Af disse 9 indsamlede planter blev der igangsat vækstforsøg med følgende 4 planter i alle 8 jordprøver. De fire valgte planter er meget forskellige af vækstform, udseende og varighed af beplantningen. Det kan være vigtige parametre ved artsvalg til specifikke lokaliteter mht. at sikre lokal accept af tilplantningen. Endvidere er der store forskelle mellem arternes egenskaber med hensyn til omsætning af biomassen efter høst.

#### 3.3.1 *Thlaspi caerulescens* (alpepengeurt)

*Thlaspi caerulescens* eller alpepengeurt, som den kaldes på dansk, er vel nok den plante, der er hyppigst citeret i forbindelse med omtale af mulighederne for oprensning af metaller fra forurenede jord ved phytoekstraktion med hyperakkumulerende planter. Der foreligger eksperimentel dokumentation af, at pengeurten kan akkumulere Cd, Ni og Zn fra jordarealer, der er belastet, typisk via minedrift og slamudbringning. Overslagsberegninger baseret på udenlandske undersøgelser indikerer, at pengeurten vil kunne opkoncentrere Cd i mængder, der bør kunne resultere i en oprensning af det øverste jordlag ned til jordkvalitetskriteriet inden for en overskuelige årrække (nogle få år op til 8-10 år). Der er kun fundet baggrundsniveauer eller meget moderate koncentrationer af Ni i jorden fra de udvalgte lokaliteter, hvilket sandsynligvis vil kunne optages af pengeurten, men der opnås antageligt ikke en afprøvning af plantens fulde potentiale for at optage Ni fra forurenede jord. Det vides, at pengeurten er en meget god Zn hyperakkumulator, men overslagsberegninger antyder, at fordi Zn findes i relativt høje (ca. faktor 200 højere end f.eks. Cd) koncentrationer i jord generelt og på de udvalgte lokaliteter, vil det tage betydeligt længere tid at oprense lokaliteterne for Zn sammenlignet med Cd. Med hensyn til de øvrige metaller (Cu, Cr, As, Pb) findes der ingen eller meget lidt information, og det vurderes derfor vigtigt at få dokumenteret plantens muligheder på de danske lokaliteter. Såvel for *Thlaspi caerulescens* som for alle øvrige planter vides det, at det er meget vanskeligt at få ekstraheret/optaget Pb fra jorden, fordi Pb primært indgår i faste faser og mineraler, der er svære at mobilisere uden at manipulere forholdene i jorden. Under alle omstændigheder blev det skønnet, at forsøg med pengeurten kunne bidrage med danske erfaringer i forhold til optag af bly og uden manipulation af jorden, udover hvad der svarer til almindelig landbrugspraksis.

Ud fra en helhedsvurdering er *Thlaspi caerulescens* således den plante, som det er mest oplagt at få afprøvet i forhold til metalforurenede jord i Danmark. Til brug for testningen i vækstkamrene var der fremskaffet frø af den population, som har dokumenteret de hidtil mest lovende resultater for en hyperakkumulator under europæiske forhold. Herudover arbejdes der internati-

onalt med at frembringe *Thlaspi*-genotyper med et endnu større potentiale for oprensning.

### 3.3.2 **Brassica juncea (sareptassenep)**

*Brassica juncea* eller sareptassenep, som den kaldes på dansk, er også en meget omtalt plante i phytoekstraktionssammenhæng. Den er ikke en egentlig hyperakkumulator som *Thlaspi caerulescens*, men en afgrøde som kan tolerere relativt høje metalkoncentrationer. Desuden har den et potentiale for via et højt biomasseudbytte at fjerne væsentlige mængder metal fra jorden. Idet biomasseudbyttet og dermed afgrødens trivsel er central, blev det besluttet, at forsøget i vækstkamrene blev iværksat med en dansk sort, som kunne forventes at ville trives under danske forhold.

### 3.3.3 **Salix burjatica "Germany" (pil)**

Af de flerårige biomasseafgrøder valgtes at teste pil fremfor elefantgræs, da pil ifølge litteraturen har den bedste evne til tungmetalloptag. *Salix burjatica* 'Germany' er den pileklon, der har vist det største potentiale for optag af Cd i en nyere screening af pilekloner for evne til tungmetalloptag (se 2.2.2). Overslagsberegninger baseret på den omtalte undersøgelse viser imidlertid, at på trods af pilens gode evne til hurtigt at producere biomasse, vil det sandsynligvis tage 10 år eller mere for at nå kvalitetskriteriet for Cd, og for Zn er oprensningspotentialet uinteressant ud fra de foreliggende data. Årsagen til, at det alligevel anbefales at afprøve pil er, at den kan anvendes som energifafgrøde. Det er således muligt, at man i nogle tilfælde vil acceptere en mere langvarig fjernelse af metaller, når der samtidigt produceres biomasse til energiproduktion. Endvidere kan rødderne fra pil i løbet af en til to vækstsæsoner udvikle sig ned i større dybde end de øvrige planter, som har potentiale i phytooprensningssammenhænge, og har herved mulighed for oprensning i større dybde, specielt da metalforureninger oftest er aftagende med stigende dybde. Det lykkedes fra England at skaffe den udvalgte klon, som ikke tidligere har været afprøvet i Danmark.

### 3.3.4 **Amaranthus retroflexus (opret amarant)**

*Amaranthus retroflexus* eller opret amarant (rævehale) på dansk har været undersøgt med hensyn til optag af bly og af uran og caesium. Blyoptaget er koncentrationsmæssigt af samme størrelsesorden som *Brassica juncea*. Over kort tid (2–3 uger) er *B. juncea* en hurtigere voksende plante og får dermed større biomasse, men over blot lidt længere tid kan *A. retroflexus* opnå større biomasse, således at det totale optag bliver større. For caesium er også det koncentrationsmæssige optag størst for *A. retroflexus*. På grund af kemiske fællestræk mellem caesium og arsen er der grund til at tro, at *A. retroflexus* muligvis vil være god til også at optage arsen. Dette har ikke hidtil været afprøvet. *A. retroflexus* er en plante, der dels etablerer sig på marginale jorde, dels findes som ukrudt i bl.a. soyabønnemarken. Der er hjemtaget frø af *A. retroflexus* udvalgt efter størst mulig biomasseproduktion, og efter at planten er fundet på "waste lands". Det blev valgt at afprøve planten på alle 4 jorder for at vurdere jordtypens betydning samt plantens generelle akkumulerende effekt på de involverede metaller.

Ud over disse 4 planter, blev der gennemført supplerende forsøg med *Agrostis capillaris* (Alm. hvene) i de to jordprøver fra Kauslundelokaliteten, dvs. de kraftigt arsen- og kobberforurenede jordprøver. Baggrunden herfor var den, at alle andre planter enten døde eller mistrivedes i den første del af vækstperioden. I mellemtiden var det lykkedes at skaffe denne græs, som muligvis kunne vokse i jorden, men som primært forventedes at kunne bidrage med resultater i relation til arsen.

### 3.3.5 *Agrostis capillaris* (*A. tenuis*), (alm. hvene)

Denne græs stammer fra arsen- og muligvis kobberbelastede områder i England, hvorfra det vides, at den i et vist omfang er tolerant over for arsen, men ikke i hvilket omfang, den kan optage arsen.

## 3.4 Vækstkammerforsøg med planter og forurenede jord

### 3.4.1 Såning og plantning

Der blev anvendt følgende plantemateriale med kendte eller forventede egenskaber med hensyn til optagelse og akkumulering af tungmetaller (afsnit 3.3):

1. *Brassica juncea* (sareptasennep) leveret fra KVL's genbank (Jens Bertelsen).
2. *Salix burjatica* 'Germany' (pil), leveret fra Drusilla Riddell-Black, England.
3. *Thlaspi caerulescens* (alpepengeurt) leveret fra Delmut Guy, Frankrig
4. *Amaranthus retroflexus* (Amarant, Rævehale), to populationer: 'Iowa' og 'Washington' leveret fra North Central Regional Plant Introduction Station.
5. *Agrostis capillaris* (*A. tenuis*, alm. hvene), leveret fra England (University of Exeter).

Jordene blev, som beskrevet i afsnit 3.2, klargjort i kasser/kar, hvorefter der blev plantet en planteart pr. jordprøve.

Fremgangsmåden ved såningen/plantningen varierede afhængigt af plantearten :

Senneppen blev sået direkte i karrene på et sandlag (ca. 1 cm) over jorden og dækket med ca. 1 cm sand. Karrene blev derefter anbragt i klimakammer. Efter fremspiring blev bestanden udtyndet til 24 planter/kar.

Pengeurten blev sået direkte i karrene som for senneppen. Karrene anbragtes i klimakammer få dage efter såning. Efter oplysning om, at pengeurten kræver vernalisering (kuldepåvirkning), og konstatering af en meget lav spireprocent blev et nyt hold frø sået på en sand-/sphagnumblanding og anbragt udendørs 4-5 døgn, hvor der i det pågældende tidsrum var temperaturer varierende omkring frysepunktet. Efter anbringelse indendørs ved 17-20 °C skete der en hurtig fremspiring, og småplanter blev plantet over i de i forvejen tilsåede kasser med 24 planter/kasse. Nogle ganske få planter (0-3 stk./kar) fremspiret fra de oprindelige frø blev bevaret.

Af pilen blev 6 stiklinger (20 cm lange, 10-15 mm tykke) anbragt i hvert kar, således at ca. 2 knopper var over jordoverfladen, som herefter blev dækket med ca. 1 cm sand.

De to populationer af amarant blev udsået hver for sig på en sand-/spagnumblanding. Af de fremspirede planter blev der af hver population plantet 6 planter i samme kar, men adskilt i hver sin ende af karret, således at populationerne kunne høstes hver for sig.

Hvenen blev ligeledes udsået på en sand-/sphagnumblanding og efter fremspiring plantet i karrene, men alene på de to jorde fra Kauslunde.

**Tabel 3.1**

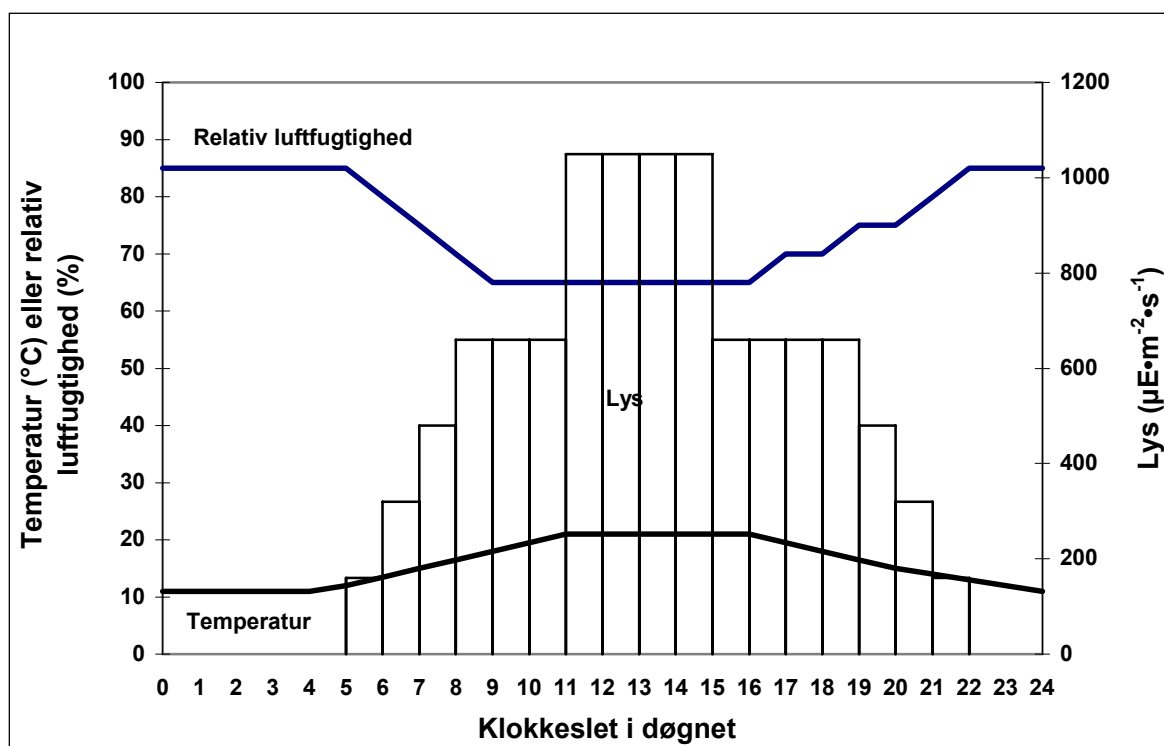
Oversigt over sånings- plantnings- og høstdatoer for de forskellige arter.

Plantearart	Udsåning	Fremspiring	Plantning	Høst	Alder v. høst (dage fra såning)
Brassica juncea	11. feb.	16. feb.	-	12. april	60
Salix burjatica	-	-	16. feb.	4. maj	77
Amaranthus retroflexus	19. feb.	24. feb.	10. marts	5. maj	75
Thlaspi caerulescens	19. feb.	3. marts	24. marts	4. maj	74
Agrostis capillaris	26. feb.	5. marts	31. marts	5. maj	66

### 3.4.2 Klimakammerprogram

Klimakamrene blev kørt efter et fast døgnprogram over hele væksttiden, døgnprogrammet fremgår af figur 3.1. Temperatur og relativ luftfugtighed reguleres kontinuert, medens lysintensiteten reguleres i trin ved at slukke eller tænde for et givet antal lamper. Dag- og nattemperaturerne indlagt i programmet korresponderer omtrentlig til henholdsvis middel-maksimum og middel-minimum temperaturerne i juli måned.

Kuldioxidkoncentrationen blev holdt på et minimum af 350 ppm.

**Figur 3.1**

Programmeret døgnforløb for parametre i klimakammerdriften. Temperatur og luftfugtighed reguleres kontinuert, medens lyset indstilles i trin. Ud over de viste parametre er kuldioxidkoncentrationen indstillet til minimum 350 ppm.

### 3.4.3 Gødskning og vanding

Alle plantearter blev gødet ens, men afhængigt af jordtypens analysetal for næringsstofindhold (tabel i kapitel 4). Gødningsplanen fremgår af tabel 3.2.

Kvælstof blev tildelt med 1 g N pr. kar i begyndelsen af væksten og senere med yderligere 0,5 g N med undtagelse af jordene fra Kauslunde med misvækst og døde planter. Kun i *Brassica juncea* kunne der iagttages N-mangel før den anden N-tilførsel. Den anvendte N-form afhang af jordene, således at

der blev anvendt ammonium-N til de kalkholdige jorde for evt. at sænke pH lidt og derigennem forbedre metaloptaget.

Til jordene fra Kibæk blev givet K og Mg på grund af lavt indhold heraf.

Karrene blev tilført afioniseret vand fra oven med afdræning af overskudsvand gennem et hul i bunden af karret. Overskudsvandet blev opsamlet i en bøtte under karret og returneret til karret igen ved følgende vanding.

**Tabel 3.2**

*Tilførsel af næringsstoffer til jordene.*

Jord	N (g N/kar i NH <sub>4</sub> -sulfat)	N (g N/kar i Ca-nitrat)	K (g K/kar i K-sulfat)	Mg (g Mg/kar i Mg-sulfat)
Kauslunde 1	-	1,0	-	-
Kauslunde 2	0,5	0,5	-	-
Lobbæk 1	1,5	-	-	-
Lobbæk 2	1,5	-	-	-
Valby 1	1,5	-	-	-
Valby 2	1,5	-	-	-
Kibæk 1	-	1,5	1,0	0,25
Kibæk 2	-	1,5	1,0	0,25

#### 3.4.4 Høst af planter

Såvel top som rod blev taget med ved høsten. For roden dog kun den del, der umiddelbart fulgte med ved oprykning/opgravning, altså ikke isolering fra hele jordmassen i karrene.

Den uforurenede topdel af planterne blev afklippet først. Nedliggende blade forurenede med jord- eller sandpartikler blev derefter afklippet og afskyllet og føjet til topdelen. Stubben med rødder blev trukket eller vippet op med et jordbor og afskyllet for jord med vand. Døde rester fra tidligere plantevækst blev så vidt muligt frasorteret. Rødderne blev klippet af stubdelen, og denne blev føjet til topdelen. For pil blev stiklingestokken holdt for sig selv.

### 3.5 Forbehandling og analyse af plantemateriale

Plantematerialet blev forbehandlet før analyse. Der blev så vidt muligt anvendt rengjort udstyr og værktøj af plastmaterialer, men for enkelte vanskelige prøver var det nødvendigt at afvige fra denne fremgangsmåde. I de tilfælde, hvor der blev anvendt udstyr af metal, var dette af rustfri materialer.

De fleste plantematerialer blev findelt ved kværning 3 gange gennem plastpersillehakker. Materialet af pil og Brassica juncea blev opdelt i blade og stængler og findelt ved 2 forskellige metoder. Bladene blev findelt med plastpersillehakker som beskrevet ovenfor, mens stænglerne blev klippet i stykker med en rosensaks.

Prøverne blev efterfølgende oplukket med halvkonzentreret salpetersyre efter forskrifterne i DS 259 og efterfølgende analyseret for spormetallerne arsen As, bly Pb, cadmium Cd, krom Cr, kobber Cu, nikkel Ni og zink Zn. Analysemetoderne er beskrevet i bilag B. Alle planteprøver blev oplukket og analyseret som dobbeltbestemmelser. For de planter, der blev opdelt i stængler og blade, blev disse analyseret som enkeltprøver, og i det omfang, der angives gennemsnitlige koncentrationer for hele prøven, blev dette beregnet som vægtet gennemsnit ud fra tørstofvægten af det samlede materiale af henholdsvis blade og stængler.

## 4 Resultater og diskussion

### 4.1 Jordkarakterisering

#### 4.1.1 Overordnet sammensætning

Resultaterne af teksturanalysen af jordprøverne er vist i tabel 4.1, mens resultatet af den øvrige karakterisering af jord, primært indeks for plantenæringsstoffer, findes i tabel 4.2.

**Tabel 4.1**

*Teksturmæssig sammensætning af jordprøverne. (vægtprocent)*

Jordprøve	Ler <2 µm (%)	Silt 2-20µm (%)	Grovsilt 20-63µm (%)	Sand 63-200µm (%)	Grovsand >200µm (%)	Humus (%)	Kalk (CaCO <sub>3</sub> ) (%)	Jordklassificering
Kauslunde 1	14.7	14.3	8.8	26.6	31.2	4.4	0	Grov sandblandet lerjord
Kauslunde 2	14.7	14.3	3.9	30.8	26.8	9.5	0	
Lobbæk 1	17.4	6.6	6.7	20.8	40.6	6.1	1.8	Lerjord
Lobbæk 2	16.3	6.7	2.1	17.0	48.4	6.3	3.2	
Valby 1	11.0	8.0	1.0	16.0	37.8	16.4	10.3	Humusjord
Valby 2	11.5	11.5	5.3	18.6	35.8	12.5	4.8	
Kibæk 1	6.2	4.8	6.5	28.6	49.3	4.6	0	Grov lerblandet sandjord
Kibæk 2	6.2	5.8	6.2	27.3	50.7	3.8	0	

**Tabel 4.2**

*Indeks for nogle plantenæringsstoffer og totalindhold af kvælstof og kulstof samt pH og alkalinitet i jordprøverne.*

Jordprøve	Kt (K)	Pt (P)	Mgt (Mg)	Cat (Ca)	Nat (Na)	Total N (%)	Alkalinitet (mmol/g TS)	pH (Rt)
	(= mg / 100 g tør jord)							
Kauslunde 1	17	9.1	7.1	134	58.0	0.14	0.6	6.3
Kauslunde 2	16	2.9	15.1	342	5.7	0.23	0.6	6.4
Lobbæk 1	33	12.0	9.2	325	1.9	0.23	1.2	7.1
Lobbæk 2	26	8.1	10.1	312	1.5	0.23	2.4	7.3
Valby 1	41	2.6	6.3	569	3.1	0.38	1.5	8.1
Valby 2	31	6.6	9.1	373	2.2	0.47	< 0.1	7.9
Kibæk 1	4	7.9	2.4	56	0.6	0.12	< 0.1	4.9
Kibæk 2	7	4.4	3.8	91	1.1	0.11		5.5
Normtal	7 - 10	2 - 4	4 - 8	>100	<5	-		6.0 - 7.5

Jordene fra Lobbæk og Valby indeholdt kalk og havde derfor også et relativt højt pH. Disse jorde havde sammen med Kauslunde 2 et højt indhold af humus og total N og høje tal for K, Mg og Ca. Jordene fra Kibæk er næringsfattige med lave tal for K, Mg og Ca og havde tillige lave pH-værdier. Specielt Kibæk 1 havde et pH på et niveau, hvor mange plantearter vil mistrives. Jorden Kauslunde 1 var meget ekstrem med meget høje værdier for Na, formentlig hidrørende fra anvendte imprægneringskemikalier. Det høje indhold af Na var formentlig årsag til en for denne jord meget ubekvem (klistret) karakter.

#### 4.1.2 Indhold af spormetaller

Jordprøvernes partielle (salpetersyreoplukning) indhold af sporelementer er angivet i tabel 4.3. Af tabellen fremgår endvidere de toksikologiske kvalitetskriterier i jord for de enkelte elementer (Nielsen et al., 1995).



**Tabel 4.3.**

Jordprøvernes partielle (salpetersyreoplukning) indhold af spormetaller.

Jordprøve	As (mg/kg TS)	Cd (mg/kg TS)	Cr (mg/kg TS)	Cu (mg/kg TS)	Ni (mg/kg TS)	Pb (mg/kg TS)	Zn (mg/kg TS)
Kauslunde 1	1800	0,5	27	11000	14	83	200
Kauslunde 2	990	0,89	930	1600	12	93	280
Lobbæk 1	9	1,7	27	81	11	840	1900
Lobbæk 2	11	2,3	29	110	15	1100	2700
Valby 1	42	2,2	44	1200	41	510	910
Valby 2	26	4,7	1000	270	29	370	1300
Kibæk 1	4,6	0,31	5,8	10	3,8	920	68
Kibæk 2	4,4	0,18	6,4	6,7	3,4	130	29
Jordkvalitets- kriterium	20	0,5	500 (total)	500	30	40	500

Af resultaterne ses det, at prøvernes indhold af sporelementer varierer med lokaliteten og kilderne til forurening på de forskellige lokaliteter, se afsnit 3.1.

De to prøver fra Kauslunde-lokaliteten er karakteriseret ved meget høje indhold af arsen og kobber, helt op til 1,8 g As/kg og 11 g Cu/kg jord i den ene prøve. Så høje indhold af især Cu i jord må almindeligvis antages at gøre jorden uegnet til vækst af planter, hvilket også blev observeret i form af områder med ingen eller ringe plantevækst. Ud over arsen og kobber er prøverne moderat (op til faktor 2 af kriterieværdien) forurenede med bly, cadmium (kun Kauslunde 2) og krom (kun Kauslunde 2).

Prøverne fra Lobbæk indeholder middelhøje (op til faktor 5 af kriterieværdien) niveauer af cadmium og zink samt meget høje (over faktor 10 af kriterieværdien) niveauer af bly.

Prøverne fra Valby indeholder forhøjede koncentrationer af arsen, cadmium, krom, kobber, bly og zink, dvs. næsten alle analyserede metaller. I forhold til kriterieværdierne er niveauerne af cadmium og bly høje, mens de øvrige er moderate.

Prøverne fra Kibæk er udelukkende forurenede med bly, der optræder i 3 til 10 gange kriterieværdierne.

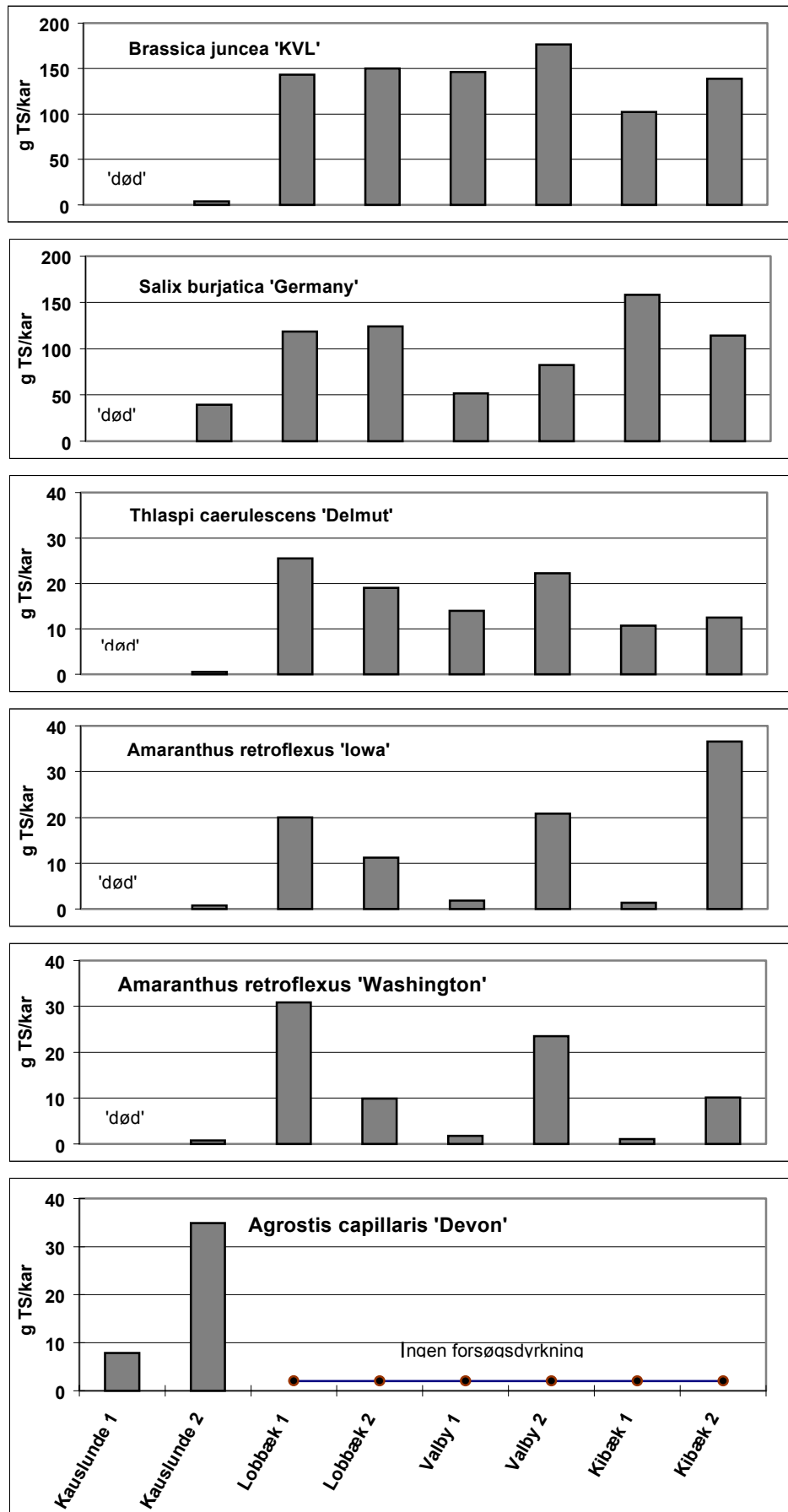
Sammenfattende viser karakteriseringen af jordprøverne, at disse repræsenterer en bred variation af jordtyper, for så vidt angår overordnet kornstørrelsessammensætning, pH, indhold af kalk og organisk stof samt plantenæringsstoffer. Med hensyn til indhold af spormetaller dækker prøverne flere af de metalforureninger, man støder ind i Danmark, både for så vidt angår koncentrationsniveauer og sammensætning.

## 4.2 Vækstkammerforsøg

### 4.2.1 Vækstmæssig karakterisering og udbytte af overjordisk plantemateriale

Det høstede udbytte af planternes overjordiske dele fremgår af fig. 4.1.

Jordene fra Kauslunde var, som også jordanalyserne viste, generelt dårlige som vækstmedium for planterne. Alle de først afprøvede planter døde på Kauslunde 1, og trivslen på Kauslunde 2 var generelt meget dårlig, dog gav pilen (*S. burjatica*) et vist udbytte her.



**Figur 4.1**

Udbytter (tørstof) af overjordisk plantemasse af forskellige plantearter efter dyrkning i klimakammer i kasser med overfladeareal på ca. 0,1 m<sup>2</sup>. Bemærk skalaforskel fra Brassica og Salix til øvrige arter.

Plantning af hvene (*Agrostis capillaris*) viste, at denne var i stand til at overleve på Kauslunde 1, og den gav på Kauslunde 2 en afgrøde af normalt udseende og med tilsyneladende normal vækst.

Det maksimale udbytte af pil og sareptasennep (*B. juncea*) var af samme størrelsesorden, medens udbyttet for de øvrige arter var en faktor 4-5 lavere.

Hvis der ses bort fra jordene fra Kauslunde, havde sennep den mest stabile udbytte på de resterende jorde, medens pilen og pengeurten (*T. caerule-scens*) og især amarant-populationerne varierede en del. De nævnte arter gav alle lave udbytter på Valby 1, og for pengeurten og amaranten (*A. retroflexus*) også på Kibæk 1, medens pilen gav det største udbytte på Kibæk 1.

De to Amarant-populationer var ikke helt identiske i reaktion over for jordene, 'Iowa' gav sit højeste udbytte på Kibæk 2, medens 'Washington' gav sit højeste udbytte på Lobbæk 1.

En karakteristik af planternes vækst bedømt undervejs med bemærkninger om tegn på eventuel manglende sundhed er opstillet i tabel 4.4.

Tabel 4.5 angiver højder for sennep og pil ved høst samt blomstringsstadium for sennep. Udviklingen var stærkt retarderet på Kauslunde 2. For sennep fandtes den største højde og mest fremskredne blomstringsudvikling på Valby 2, medens de største højder for pil fandtes på Kibæk-jordene.

Højder blev ikke målt på øvrige plantearter. Pengeurten var stadig på rosetstadiet, med en enkelt plante med synlig blomsterstand i hjerteskuddet, medens hvenen var i buskningsstadiet eller med nedliggende vækst. Amaranten var af noget forskelligt udseende for de to populationer. 'Iowa' var uden synlig blomsterstands-dannelse på høsttidspunktet og var stadig busket, medens 'Washington' havde tendens til blomsterstands-dannelse meget tidligt og havde nedliggende stængler.

#### 4.2.2 Rodudbytte

Udbyttet af den isolerede rodmængde fremgår af tabel 4.6, dels mængden af rodtørstof pr. kar, dels i procent af den høstede topmængde (vægtprocent). Bortset fra Kauslunde 2, blev den største rodmængde isoleret fra sennep med 24-30 g tørstof pr. kar, som tillige var ret stort set i forhold til toppen (16-24% af topudbyttet). For pilen udgjorde rodmængden under 10% af topmængden. For pengeurten og amaranten var rodudbytterne små mængdemæssigt, men kunne udgøre over 10% af topmængden. Rodudbyttet af pengeurten synes procentvist set at være højere på de sandede Kibæk-jorde end på de øvrige jorde.

Hvenen havde en meget høj rodandel, hvilket formentlig hænger sammen med, at græsset har en trevlerod med øverligt liggende rodsystem, som bevirker, at det var let at få det meste af rodsystemet med. I praksis vil høst af stub med rodsystem betyde medtagning af en stor mængde jord, som hænger fast i græssets system af trevlerødder. Adskillelse af jord og rødder vil i praksis være vanskelig.

**Tabel 4.4**

Generel karakterisering af de forskellige plantearters vækst i de enkelte jordprøver.

Jord/plante	B. juncea	S. burjatica	T. caerule-scens	A. retroflexus 'Iowa'	A. retroflexus 'Washington'	A. capillaris
Kauslunde 1	Døde	Døde	Døde	Døde	Døde	Overlevede, men svag vækst. Hvid-gullige grønne blade
Kauslunde 2	Meget ringe vækst. Forblev på rosetstadiet meget længe, planter 'usundt' grønne.	Ringe vækst, retarderede skudspidser, yngre blade hvide, nekrotiske bladspidser.	Meget ringe vækst. Vækst standset, violettertonede blade.	Meget ringe vækst. Planter standset i udvikling	Meget ringe vækst. Planter standset i udvikling.	Vækst synes normal. Sunde grønne planter.
Lobbæk 1	God vækst, lidt tynde.	God vækst, yngre blade violettertonede omkring nerver.	Bedste vækst	God vækst	Bedste vækst	Ikke afprøvet
Lobbæk 2	God vækst, lidt tynde.	God vækst, øvre blade gul-grønne, violettertonede, nedre blade helt gule.	God vækst	Relativt ringe vækst	Ringe vækst	Ikke afprøvet
Valby 1	God vækst. Bleggrønne blade.	Ringe vækst, skudspidser retarderede, yngre blade violettertonede.	Relativt ringe vækst	Meget ringe vækst Grønviolette planter	Meget ringe vækst. Grønviolette planter.	Ikke afprøvet
Valby 2	Bedste vækst. Bleggrønne blade.	Relativt ringe vækst Blade gul-hvidlig grønne, nekrotiske pletter, buklete	God vækst	God vækst Blade gul-grønne	God vækst	Ikke afprøvet
Kibæk 1	Knap så god vækst. Blåduggede stængler og bladrande.	Bedste vækst. Blade violettertonede omkring midtnerve.	Relativt ringe vækst. Violettertonede blade	Ringe vækst. Planter standset i udvikling.	Meget ringe vækst. Planter standset i udvikling	Ikke afprøvet
Kibæk 2	God vækst. Blåduggede stængler og bladrande.	God vækst	Relativt ringe vækst Lidt violettertoning	Bedste vækst	Ringe vækst. Planter dårligt udviklede	Ikke afprøvet

**Tabel 4.5**

Højde og blomstringsstadiet for sareptasennep og højde af pil ved høst.

Jord	Brassica juncea		Salix burjatica
	Højde v. høst 12. april (cm)	Blomstringsstadium ved høst	Højde v. høst 4. maj (cm)
Kauslunde 1	-	-	-
Kauslunde 2	5 / 10 *)	Roset / enkelte knopper	55
Lobbæk 1	130	Halv blomstring	90
Lobbæk 2	130	Halv blomstring	90
Valby 1	80	Knop – beg. blomstring	60
Valby 2	135	Næsten fuld blomstring	90
Kibæk 1	60	Knop – beg. blomstring	100
Kibæk 2	120	Halv blomstring	100

\*) Højde målt ved høst 4. maj, dels lave rosetplanter, dels planter med lidt stængelstrækning.

#### 4.2.3 Overførsel af udbytteresultater til markforhold

Overfladearealet på dyrkningskarrene udgør ca. 0,1 m<sup>2</sup>, og en direkte arealmæssig omregning af høstudbyttet fra g tørstof pr. kar til ton tørstof pr. hektar kan således ske ved division med 10. Dette giver for sennep og pilen

**Tabel 4.6**

Høstet rodmængde pr. kar og i procent af topmængde.

Jord	Brassica juncea		Salix Burjatica		Thlaspi caerule- scens		Amaranthus Retoflexus 'Iowa'		Agrostis Capillaris	
	Rod g TS /kar	Rod % af top	Rod g TS /kar	Rod % af top	Rod g TS /kar	Rod % af top	Rod g TS /kar	Rod % af top	Rod g TS /kar	Rod % af top
Kauslunde 1	-	-	-	-	-	-	-	-	6,6	85
Kauslunde 2	1,1	30	3,2	8	-	-	-	-	10,6	30
Lobbæk 1	30,1	21	4,4	4	1,6	6	1,2	12	-	-
Lobbæk 2	26,1	17	5,1	4	1,8	9	0,8	15	-	-
Valby 1	25,6	18	3,5	7	1,2	9	-	-	-	-
Valby 2	28,7	16	2,5	3	1,4	6	1,1	11	-	-
Kibæk 1	24,3	24	7,0	4	1,8	17	-	-	-	-
Kibæk 2	30,1	22	4,6	4	1,5	12	3,0	16	-	-

et maksimalt udbytte på 15–17 tons tørstof/ha, hvilket umiddelbart forekommer højt i løbet af den begrænsede væksttid på 2 – 2½ måneder.

Imidlertid gør flere faktorer sig gældende, som gør, at det næppe vil være muligt at opnå så høje produktionstal i en vækstsæson under markforhold. I klimakammeret voksede planterne under optimale temperatur- og lysforhold svarende til gode sommermåneder, og planterne var hele tiden velforsynede med vand. Desuden er der etableret et relativt stort plantetal, og jorden er gjort rimeligt bekvem i hele dybden. På den anden side vil en normal vækstsæson strække sig over længere tid, hvilket dog er afhængigt af afgrødens stadium ved ønsket høsttid.

Forsøg med korn i den her anvendte kartype giver almindeligvis et dobbelt så stort udbytte arealmæssigt som i marken. For sennep, som ved høst var i et stadium med noget nær maksimalt opnåeligt udbytte, kan der formentlig ved division med 2 fås et godt skøn over det opnåelige udbytte under markforhold, dvs. 7-8 tons tørstof/ha.

For de øvrige arter var der ikke opnået maksimalt udbytte for en vækstperiode, således at division med 2 er en for stærk reduktion. Formentlig kunne der ved fortsættelse af dyrkningen være opnået hen imod det dobbelte udbytte på de mest velegnede jorde for pengeurten, amaranterne og hvenen, således at det under markforhold opnåelige udbytte svarer til det høstede i karrene. For pilen er det lidt vanskeligere at vurdere udbyttepotentialet under markforhold, men i mange danske forsøg er opnået 7-9 tons tørstof/ha ved høst om vinteren uden blade. Med henblik på maksimal fjernelse af tungmetal kan det overvejes at høste pil i efteråret med blade, hvorved udbyttet vil øges med ca. 2 tons tørstof/ha.

Udbyttens niveauet under markforhold vil generelt afhænge af hvor intensiv pasning afgrøden gives. Ved vanding i tørre perioder samt optimal gødskning og renholdelse for ukrudt kan forventes 50-100% merudbytte i forhold til ekstensiv pasning.

Udbytte-, etablerings- og høstmæssigt synes *Brassica juncea* at være en god og nem art at dyrke. *Salix burjatica* synes udbyttmæssigt også at være en god art, men her er etablering og høst lidt vanskeligere end for sennep. Imidlertid kan der efter plantning af pil normalt høstes på de samme planter i

adskillige år. *Thlaspi caerulescens*, *Amaranthus retroflexus* og *Agrostis capillaris* kan forventes at give noget mindre udbytter.

### 4.3 Planteanalyse

#### 4.3.1 Indhold af sporelementer i overjordisk plantemateriale

Tabel 4.7 viser indholdet af de 7 sporelementer i plantematerialet.

Af tabel 4.7 fremgår det, at der som forventeligt er store forskelle mellem koncentrationerne af de forskellige metaller planter og jordprøver imellem. Forskellene viser, at visse af de metaller, som findes i forhøjede koncentrationer i jorden, kan optages af visse planter, mens andre planter ikke optager metallerne i mængder af betydning. At der sker et optag af metaller, hvor de optræder i forhøjede koncentrationer i jorden, og modsat kun sker et ubetydeligt optag af metaller, hvor de i jorden findes i lave koncentrationer, er en indikation af, at forsøgene, behandlingen og analyserne af jordprøver og plantematerialer har fungeret efter hensigten, og at der ikke har foregået tab eller tilførsel af metal til forsøgene.

I det efterfølgende er resultaterne af målingerne af de enkelte metaller gennemgået.

Resultaterne i tabel 4.7 viser, at der har foregået et vist optag af arsen i hvenen og sennepen på Kauslunde-jordene, som er meget forurenede med arsen. Jordene fra Valbyparken er let forurenede med arsen, og der ses også målbare koncentrationer af arsen i planter fra denne lokalitet, men i koncentrationer, der er mindre end 1 mg As/kg, og dermed ubetydelige i forhold til, hvad der optræder i jorden.

Koncentrationerne af Cd i store dele af plantematerialet er interessant høje, og i *Thlaspi* fra Lobbæk- og Valby 2-prøverne måles der mere end 100 mg Cd/kg plantemateriale, hvilket giver en opkoncentrering på ca. en faktor 100 i forhold til koncentrationerne i jordprøverne. Med henvisning til definitionerne på hyperakkumulerende planter skal indholdet i planten være på 0,1 vægtprocent, dvs. 1.000 mg Cd/kg plantemateriale. Dette kriterium kan pengeurten ikke leve op til i dette forsøg. Der er god sammenhæng med, at det er i ovennævnte jordprøver, at der findes de højeste koncentrationer af Cd. En ikke helt så høj opkoncentrering ses i pengeurten fra Valby 1-jordprøven, hvor der også findes høje koncentrationer af Cd. Det lidt reducerede planteoptag kan muligvis skyldes, at pH er så højt som 8,1 i Valby 1, hvilket dog kun er lidt højere end i de øvrige prøver med høje Cd-koncentrationer, der alle har pH-værdier over 7. Det vides fra litteraturen, at fordelingen mellem Cd i jord og jordvæske og dermed planteoptaget er meget pH-afhængigt, se f.eks. Holm og Christensen (1996). Dette er antagelig også forklaringen på, at der findes så relativt høje koncentrationer af Cd i pengeurten (16 og 36 mg Cd/kg), der voksede på jordprøverne fra Kibæk, som indeholder baggrundskoncentrationer af Cd, men har meget lave pH-værdier på 4,4 og 4,6.

Med hensyn til de øvrige planter skal det bemærkes, at pilen og i nogle tilfælde amaranterne indeholder høje koncentrationer af Cd, der i de fleste tilfælde er højere (op til 10 mg Cd/kg plantemateriale) end koncentrationerne i jorden. Senneps- og hveneplanterne har til sammenligning ikke optaget væsentlige mængder af Cd.

Krom optræder kun i væsentlig forhøjede koncentrationer i Kauslunde 2- og Valby 2-prøverne, hvilket da også resulterer i målbare koncentrationer af Cr i planter dyrket på disse jorde. Samlet for alle målingerne af Cr i plantemate-

**Tabel 4.7**

Koncentrationer af spormetaller i det høstede overjordiske plantemateriale (top) fra forsøgene med de forskellige jordprøver.

Koncentration i planter	As mg/kg TS	Cd mg/kg TS	Cr mg/kg TS	Cu mg/kg TS	Ni mg/kg TS	Pb mg/kg TS	Zn mg/kg TS
Brassica, Kauslunde 2	5,6	0,89	0,21	54	1,9	<0,2	582
Brassica, Lobbæk 1	<0,1	0,30	<0,1	3,6	<0,4	<0,5	306
Brassica, Lobbæk 2	<0,1	0,25	0,11	3,5	<0,4	0,32	391
Brassica, Kibæk 1	<0,1	0,33	<0,1	3,4	1,3	3,84	300
Brassica, Kibæk 2	0,21	0,17	<0,1	3,5	0,50	0,36	84
Brassica, Valby 1	0,19	0,05	0,19	3,0	0,49	<0,2	30
Brassica, Valby 2	0,39	0,28	<0,8	3,6	0,56	1,2	83
Agrostis, Kauslunde 1	12	0,07	0,10	71	6,4	0,21	123
Agrostis, Kauslunde 2	2,0	0,34	0,10	7,5	0,73	<0,2	216
Thlaspi, Lobbæk 1	<0,1	125	<0,1	3,2	<0,4	1,1	8190
Thlaspi, Lobbæk 2	<0,1	125	<0,1	3,8	0,31	1,2	7630
Thlaspi, Kibæk 1	<0,1	16	<0,1	1,6	0,93	15	1820
Thlaspi, Kibæk 2	0,10	36	<0,1	4,0	2,4	1,5	2990
Thlaspi, Valby 1	<0,1	20	<0,1	16	10,4	0,41	3780
Thlaspi, Valby 2	<0,1	124	0,52	8,4	11,4	0,31	5010
Pil, Lobbæk 1	<0,1	1,6	<0,1	5,9	0,47	0,42	374
Pil, Lobbæk 2	0,15	1,6	0,15	7,3	0,88	0,52	661
Pil, Kibæk 1	0,1	2,2	0,21	3,7	1,3	40	433
Pil, Kibæk 2	0,10	1,6	0,15	4,6	0,77	1,6	228
Pil, Valby 1	0,1	1,7	0,19	7,5	1,3	0,33	447
Pil, Valby 2	0,10	9,8	0,62	19	1,5	<0,4	1430
Pil, Kauslunde 2	1,4	1,1	0,46	7,5	1,7	<0,4	193
Amarant I, Lobbæk 1	0,10	1,6	0,52	5,2	<0,3	4,1	488
Amarant W, Lobbæk 1	0,10	1,6	0,10	4,9	<0,3	2,7	415
Amarant I, Lobbæk 2	0,10	1,2	0,10	6,4	<0,3	4,6	672
Amarant W, Lobbæk 2	0,10	1,8	<0,1	12	0,31	3,3	939
Amarant I, Kibæk 1	0,11	4,1	0,21	7,2	1,9	158	1110
Amarant W, Kibæk 1	0,10	2,4	0,21	9,4	1,9	177	781
Amarant I, Kibæk 2	0,10	2,8	<0,1	10	1,0	11,4	649
Amarant W, Kibæk 2	0,10	1,9	0,21	7,7	0,63	7,5	476
Amarant I, Valby 1	0,21	0,2	0,32	8,7	0,63	1,5	84
Amarant W, Valby 1	0,31	0,3	0,52	9,8	0,42	1,6	109
Amarant I, Valby 2	<0,1	2,0	1,0	10	1,3	0,73	250
Amarant W, Valby 2	<0,1	1,9	1,0	8,7	0,93	0,52	249

rialet gælder det, at koncentrationerne ikke overstiger 1 mg Cr/kg, hvilket er uinteressant i relation til oprensning af jorden, hvor jordkvalitetskriteriet er 500 mg total Cr/kg jord.

Kobber optages i den højeste koncentration i hvene på Kauslunde 1-jorden, hvor der måles 71 mg Cu/kg. Den næsthøjeste koncentration på 54 mg Cu/kg findes i sennep fra Kauslunde 2. Disse koncentrationer er lave sammenlignet med jordens høje indhold på henholdsvis 11.000 og 1.600 mg Cu/kg. Dette gælder også for Valby 2, der er forurennet med lavere indhold af Cu, og hvorfra der også optages generelt højere koncentrationer end fra de øvrige prøver, men typisk mindre end 10 mg Cu/kg plantemateriale, hvilket ikke er væsentligt i relation til en oprensning.

De afprøvede jordprøver giver på grund af relativt lave koncentrationer af Ni ikke umiddelbart mulighed for at afprøve potentialet for oprensning af Ni fra forurennet jord. Det er pengeurten, der optager Ni i højeste koncentrationer fra Valby-prøverne, hvor der forekommer Ni i højeste koncentrationer i jorden.

Bly er det tungmetal, der oftest er størst interesse for at kunne fjerne fra forurenede jord, da det er det metal, der optræder med størst hyppighed på forurenede lokaliteter i Danmark (f.eks. Andersen 1998). Samtidig vides det, at det i relation til at anvende phytoekstraktion uden manipulation af plante og jord er yderst vanskeligt at få optaget Pb, primært på grund af dets stærke og meget lidt tilgængelige binding i jorden. De højeste koncentrationer på 158 og 177 mg Pb/kg plantemateriale måles i amaranterne fra Kibæk 1 lokaliteten. Koncentrationerne er kun ca. 4 gange højere end jordkvalitetskriteriet for Pb, men viser dog et optag fra en plante, som der var meget begrænset erfaring med i denne sammenhæng. Det er også værd at bemærke, at pilen, ligeledes fra Kibæk-prøverne, kan optage op til en koncentration på 40 mg Pb/kg. Alle jordprøver har som tidligere nævnt et forhøjet indhold af Pb, men det tydeligvis største optag fra Kibæk-prøverne er ikke direkte korreleret med koncentrationerne i jorden. Valby 1 har et højere Pb-indhold end Kibæk, men gav ikke anledning til væsentlige optag af Pb. Igen må de lave pH-værdier formodes at være den primære forklaring på den større tilgængelighed fra Kibæk-prøverne.

Som forventeligt er Zn det element, der generelt optages i de højeste koncentrationer i planterne, da det udgør et næringsstof for planterne. Pengeurten, der kan hyperakkumulere Zn, indholder koncentrationer fra 1800 til 8200 mg Zn/kg plantemateriale. Definitionen for hyperakkumulation af Zn er 1%, dvs. 10000 mg Zn/kg, hvilket således næsten er opfyldt for pengeurten dyrket på Lobbæk-lokaliteterne (ca. 8000 mg Zn/kg), hvor også koncentrationerne er højest i jorden (1900 og 2700 mg Zn/kg). I pilen og amaranterne måles også høje koncentrationer, op til henholdsvis 1400 og 1100 mg Zn/kg. Trods de betydeligt lavere koncentrationer af Zn i jorden fra Kibæk-lokaliteten måles der ikke væsentligt lavere koncentrationer i plantematerialet fra disse lokaliteter. Dette fænomen, som diskuteret for Cd og Pb, må tilskrives Kibæk-jordenes lave pH-værdier, der øger tilgængeligheden. Fænomenet er meget udtalt for Zn, hvor koncentrationerne i jorden er mindre end 100 mg Zn/kg, og der i pengeurten måles så høje koncentrationer som 3000 mg Zn/kg. En lav pH-værdi kan således bidrage til en større tilgængelighed fra jorden, og dermed til at forbedre optaget af visse spormetaller i plantematerialet.

#### 4.3.2 Indhold af sporelementer i rødder

I tabel 4.8 er vist indholdet af sporelementer i udvalgte rodprøver fra forsøgene.

**Tabel 4.8**

*Koncentrationer af spormetaller i udvalgt rodmateriale fra forsøgene med de forskellige jordprøver.*

Rodmateriale	As mg/kg TS	Cd mg/kg TS	Cr mg/kg TS	Cu mg/kg TS	Ni mg/kg TS	Pb mg/kg TS	Zn mg/kg TS
Brassica, Lobbæk 2	0,5	0,17	0,78	5,1	2,3	9,5	231
Brassica, Kibæk 1	0,2	0,28	0,12	2,6	1,7	145	267
Brassica, Valby 2	0,8	0,31	10	23	1,8	2,9	100
Thlaspi, Lobbæk 2	2,5	30	9,3	55	8,5	503	4140
Thlaspi, Kibæk 1	1,8	8,0	2,8	16	5,3	959	797
Thlaspi, Valby 2	2,6	43	118	51	9,5	22	1610
Pil, Lobbæk 2	1,4	1,6	2,4	32	1,9	54	674
Pil, Kibæk 1	1,4	1,8	1,3	15	4,2	751	457
Pil, Valby 2	7,8	5,8	49	143	8,4	24	577
Amarant I, Lobbæk 2	3,7	1,9	1,2	13	4,9	31	977
Amarant I, Valby 2	1,9	1,3	12	15	3,0	8,4	229

Som det fremgår af tabel 4.6, udgør rodudbyttet vægtmæssigt 5-15% af det overjordiske plantemateriale for pilen, pengeurten og amaranterne, mens det



er højere (20-85%) for Brassica og Agrostis. Hvis optaget i rødderne skal bidrage væsentligt til fjernelsen af metaller fra jorden, skal koncentrationerne af de forskellige metaller således gerne være væsentligt højere end koncentrationerne i de overjordiske plantedele, da det generelt er vanskeligere at fjerne de underjordiske plantedele.

Koncentrationerne af metal i de udvalgte rodprøver er umiddelbart mest interessante for bly, da de højeste koncentrationer i rodmaterialet (500-1000 mg Pb/kg) er ca. en faktor 5 højere end de højeste koncentrationer af Pb i det overjordiske plantemateriale (150-180 mg Pb/kg). Denne erkendelse er i overensstemmelse med indikationer fra litteraturen af, at Pb specifikt ikke translokeres fra plantens underjordiske til overjordiske grønne plantedele.

Med hensyn til As, Cr, Cu og Ni er koncentrationer i rodmaterialet moderat højere end i de overjordiske dele, men stadig ikke så høje, at det forventes at kunne bidrage væsentligt til det samlede optag af metallerne fra jorden, hvilket vil blive kommenteret nærmere i afsnit 5. Det bemærkes dog, at koncentrationen af Cr i pengeurt- og pilerødderne fra Valby 2 samt koncentrationen af Cu i pilerødderne også fra Valby 2 er højere end de øvrige prøver af både over- og underjordisk plantemateriale.

Cadmium og zink optræder generelt i lidt lavere koncentrationer i rodmaterialerne end de overjordiske plantematerialer, hvilket antageligt hænger sammen med, at netop disse to metaller nemt kan translokeres op i planternes overjordiske dele.

Til analyse af plantematerialet blev valgt samme oplukningsmetode som til jordprøverne, dvs. kogning med halvkoncentreret salpetersyre. Denne metode er udviklet til oplukning af slam, og vil således nødvendigvis ikke frigive prøvens totale indhold af metaller, f.eks. metaller bundet i silikater i jordmatricen. Metoden med salpetersyre er imidlertid anvendt, fordi danske jordkvalitetskriteriet, og dermed koncentrationer bestemt ved forureningsundersøgelser, er angivet på baggrund af denne metode. Det har været overvejet om der skulle anvendes en anden metode til analyse af plantematerialet, idet en ikke fuldstændig oplukning af materialet vil kunne betyde, at planternes optag af metaller underestimeres. Af hensyn til laboratoriesikkerheden og analysetekniske årsager er det imidlertid hensigtsmæssigt at anvende metoden med salpetersyre. Desuden er metoden som nævnt netop velegnet til oplukning af organisk stof, hvilket bekræftes af, at alle destruerede prøver har været klare opløsninger. I de 3 rodprøver: *Thlaspi*, Kibæk 1; *Thlaspi*, Lobbæk 2 og Pil, Valby 2 blev der dog konstateret bundfald efter destruktio- nen med salpetersyre. Bundfaldet havde karakter af partikler og var således sandsynligvis jordpartikler, som har siddet på rødderne. Samlet er der således ikke grund til at tro, at plantematerialet kun har været partielt destrueret.

## 5 Vurdering af phytoekstraktion som oprensningsteknik på baggrund af de udførte forsøg

Vurderingen af phytoekstraktions effektivitet som oprensningsteknik afhænger primært af den forventede årlige fjernelse af metal fra jorden i forhold til indholdet i jorden. De mere præcise succeskriterier for en given sag skal naturligvis i det konkrete tilfælde sammenholdes med en række forhold, f.eks. andre alternativer og omkostninger, anvendelsen af jorden og eventuelle risici ved at lade oprensningen foregå over en længere årrække.

I det videre er mulighederne for at anvende phytoekstraktion som oprensningsteknik i Danmark vurderet nærmere på baggrund af de gennemførte forsøg og erfaringer fra andre lande. Forsøgene er i modsætning til flere andre udenlandske forsøg gennemført uden manipulation af jorden.

Tabel 5.1 viser den procentuelle fjernelse af sporelementer fra forsøgene i vækstkamrene. Fjernelserne er opgjort i procent som mængden af metal optaget i planterne sat i forhold til jordens indhold af det pågældende metal. Generelt er der taget hensyn til planternes overjordiske dele, men hvor det har været muligt, er røddernes indhold af metal medtaget.

For bedre at kunne få overblik over resultaterne er der indsat et minimumskrav, således at kun fjernelser svarende til mindst 0,1% af jordens indhold og fra jordprøver, hvor metallerne optræder i koncentrationer over jordkvalitetskriterierne, er medtaget. I sidstnævnte tilfælde er der angivet et særskilt symbol i tabellen, hvorved det er muligt at adskille en lille fjernelse fra et oprindeligt niveau, der ikke overstiger jordkvalitetskriteriet.

Alle de undersøgte metaller med undtagelse af nikkel optræder i koncentrationer over kriterierne, og der er således behov for at oprense for disse metaller. Arsen optræder i koncentrationer over kriterierne på Kauslunde og Valby lokaliteterne, men det har ikke umiddelbart været muligt at få optaget arsenmængder af betydning. Det er værd at bemærke, at det på Kauslunde lokaliteten var muligt at få hvenen til at vokse i den jord, som ellers lå hen helt eller delvist uden plantevækst. Det er således under de foreliggende omstændigheder ikke muligt at pege på planter, der kan anvendes til at oprense arsenforurenede jord, men der kan findes vegetation, som har tolerance for arsen, og som dermed kan benyttes som plantedække på lokaliteter, hvor eksponeringen eller spredningen af forureningsstofferne f.eks. via støv ønskes begrænset.

Cadmium er som nævnt det metal, der relativt i forhold til koncentrationerne i jorden optages (opkoncentreres) i de største mængder i planterne. Af tabel 5.1 ses det, at den procentuelle fjernelse af Cd flere steder er over 0,1%, for pengeurten typisk 3-4% og helt op til over 9% fjernelse i løbet af denne ene vækstperiode. Pil er den anden plante, der fra flere af jordprøverne har kunnet optage cadmium i mængder svarende til over 0,1% af jordens indhold. I ingen tilfælde overstiger fjernelsen dog 1% af jordens indhold. Det synes således muligt med pengeurten, eventuelt i kombination med pil for at sikre en større spredning i dybden, at kunne gennemføre en oprensning under feltforhold.

På de 2 lokaliteter (Kauslunde 2 og Valby 2), hvor jordkvalitetskriteriet for krom er overskredet ses intet optag af krom af betydning. Erfaringerne med krom er meget begrænsede, og krom i form af CrIII findes hårdt bundet i jord som kromhydroxid, og det var således forventet, at planteoptaget ville være begrænset.

**Tabel 5.1**

*Procentuel fjernelse af spormetaller i forsøgsperioden. Fjernelsen er angivet i procent af jordens startindhold. Kun fjernelser over 0,1% er angivet. Værdier er kun angivet for de planter og jorde, hvor dette er opnået. Det er ved \* angivet, hvor startindholdet var under kvalitetskriteriet. Tal i parentes angiver % fjernet af den del af spormetalindholdet, som overstiger kvalitetskriteriet.*

Forsøg	Cd	Cu	Ni	Zn
Sennep, Lobbæk 1	< 0,1	< 0,1*	< 0,1*	0,1
Sennep med rod, Lobbæk 2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
Sennep, Kibæk 1	0,35*	0,1*	0,1*	1,5*
Sennep, Kibæk 2	0,4*	0,2*	< 0,1*	1,2*
Hvene, Kauslunde 2	0,1	< 0,1*	< 0,1*	0,1*
Pengeurt, Lobbæk 1	6,6 (9,4)	< 0,1*	< 0,1*	0,5
Pengeurt, Lobbæk 2	3,5 (4,4)	< 0,1*	< 0,1*	0,2
Pengeurt, Kibæk 1	1,8*	< 0,1*	< 0,1*	0,9*
Pengeurt, Kibæk 2	7,5*	< 0,1*	< 0,1*	3,8*
Pengeurt, Valby 1	0,5 (6,7)	< 0,1	< 0,1	0,2 (0,5)
Pengeurt, Valby 2	2,3 (2,6)	< 0,1	< 0,1	0,3 (0,6)
Pil, Lobbæk 1	0,4 (0,6)	< 0,1*	< 0,1*	0,1
Pil, Lobbæk 2	0,3 (0,4)	< 0,1*	< 0,1*	0,1
Pil, Kibæk 1	3,7*	0,2*	0,2*	3,4*
Pil, Kibæk 2	3,0*	0,2*	< 0,1*	2,8*
Pil, Valby 1	0,2	< 0,1	< 0,1	0,2
Pil, Valby 2	0,8	< 0,1	< 0,1	0,6
Pil, Kauslunde 2	0,5	< 0,1*	< 0,1*	0,1*
Amarant I, Kibæk 2	< 0,1*	< 0,1*	< 0,1*	1,2*
Amarant W, Kibæk 2	< 0,1*	< 0,1*	< 0,1*	0,2*

Tilsvarende for kobber, der primært optræder på Kauslundelokaliteten og i mindre omfang i Valbyparken, sås der heller ingen oprensning af betydning. Kobber er et meget phytotoksisk spormetal og derfor umiddelbart problematisk at satse på i relation til phytooprensning. Ydermere danner Cu gerne udfældninger som karbonater og hydroxider, og vil derfor findes hårdt bundet i jorden.

Med hensyn til nikkel er det vanskeligt at evaluere potentialet for phytoekstraktion ud fra de gennemførte forsøg, da koncentrationerne af Ni er relativt lave i alle jordprøverne. Mulighederne med hensyn til nikkel er kommenteret yderligere i det videre.

Bly optræder i koncentrationer over jordkvalitetskriteriet i samtlige jordprøver, der er benyttet i forsøgene. Desværre sås i ingen tilfælde fjernelser over 0,1% af jordens blyindhold, og der er således ikke potentiale for at satse på en fjernelse af jordens totale blyindhold alene ved phytoekstraktion uden anden manipulation af jorden.

Zink er udover Cd det metal, der umiddelbart ser ud til være størst muligheder for at oprense ved hjælp af phytoekstraktion. I kap. 4 er gennemgået resultaterne af planteanalyserne, som viser, at planter er i stand til at optage høje koncentrationer af Zn, men Zn optræder også i høje koncentrationer i jorden. Som det ses af tabel 5.1 betyder dette, at de relative fjernelser bliver lave. Det er kun pengeurt og pil, der kan fjerne Zn svarende til 0,1-0,6% af jordens indhold. For de øvrige forsøg ligger den relative fjernelse på 0,1% eller derunder, og det kan konkluderes, at de relative fjernelser er for lave til umiddelbart at kunne anvendes i oprensningssammenhænge. Zn er først human- og phytotoksisk i meget høje koncentrationer, så det vil sandsynligvis sjældent være Zn, der er styrende for oprensning af en lokalitet.

Resultaterne af forsøgene, der er foregået i vækstkamre over en periode på 2 til 3 måneder kan ikke direkte overføres til feltforhold, men som det er diskuteret i kapitel 4 vil den høstede biomasse per areal sandsynligvis indenfor en faktor 2 svare rimeligt godt til de udbytter, som kan opnås over en typisk vækstperiode i felten. Der er således ikke belæg for at foretage tilpasninger af resultaterne i en udstrækning, der kan ændre ved konklusionerne af forsøgene udført i vækstkamrene. De gennemførte forsøg giver et estimat over fjernelsen af metal fra jorden over den første vækstsæson. Til skøn over fjernelsen over en længere årrække er det nødvendigt at foretage ekstrapolationer af resultaterne udover den undersøgte vækstperiode. McGrath (1998) anvendte et lineært estimat (samme mængde fjernet pr. år) til vurdering af oprensningstider for phytoekstraktion. Denne antagelse er formentlig rimelig for de første år af oprensningen (se bl.a. afsnit 2.2.1), men herefter vil tilgængeligheden af metallerne sandsynligvis falde, efterhånden som det mere let tilgængelige metal er fjernet. Hvis fjernelsen er styret alene af desorption fra jorden, vil det dog være rimeligt at antage fjernelse af en procentuel konstant fraktion af jordens metalindhold i hver vækstsæson. I denne sammenhæng, hvor fjernelsen tilsyneladende, med undtagelse af Cd, er meget begrænset, er det derfor ikke afgørende, hvilken model der anvendes. Med hensyn til Cd vil der sandsynligvis kunne foretages oprensninger over en periode på 10-20 år, mens horisonterne er betydelige længere for alle de øvrige metaller.

Udviklingen af phytoekstraktion som oprensningsteknik fortsætter, og der arbejdes internationalt med at frembringe planter, som har et betydeligt større potentiale for at opkoncentrere metaller. Således kan man på længere sigt forestille sig planter med højere metalkoncentrationer og større biomasse, hvilket sammenlagt kan give anledning til planter med væsentligt større fjernelsesrater end resultaterne i denne undersøgelse har vist.

I denne situation, hvor det direkte optag af metal, målt som fjernelse af "total-metal" - og sat i relation til jordkvalitetskriterierne - er begrænset, er det oplagt at søge alternative former for anvendelse af phytoekstraktion, der har fordelen af at være lavteknologisk, grøn og relativt billig.

Optimering af planteoptaget gennem manipulation af jorden og jordvæsken er et af de alternativer, der er mulighed for at arbejde videre med. Et generelt problem ved dette er, at oprensningen bliver mere arbejdskrævende og dermed dyrere, samt at den indebærer en potentiel miljørisiko.

Det ses, at der fjernes en væsentlig procentdel Cd og Zn med pengeurt (Cd: 1,8 og 7,5%; Zn: 0,9 og 3,8%) og pil (Cd: 3,0 og 3,7%; Zn: 2,8 og 3,4%) fra Kibæk-prøverne på trods af det lave indhold i disse prøver. Dette skyldes givet prøvernes lave pH og bekræfter, at optagelsen af cadmium og zink er meget afhængig af pH. Dette viser endvidere, at metallerne ved fastholdt pH kan optages i sammenlignelige rater ved lave og høje koncentrationer i jor-

den. Det er som forventeligt metaller som Cd og Zn, der sandsynligvis er sorptionskontrollerede, hvor metallerne kan fjernes fra jorden ned til meget lave koncentrationer. For disse metaller kan det således konkluderes, at justering af pH giver mulighed for at optimere optaget i planterne, således at metallerne kan fjernes helt ned til under jordkvalitetskriteriet.

En anden mulighed for optimering af planteoptaget er tilsætning af ligander eller chelatorer, der kompleksbinder metaller i jordvæsken og forøger optaget i planterne. Denne mulighed skønnes under danske forhold at være mindre oplagt, idet kompleksering af metallerne, alt andet lige, vil give en forøget risiko for udvaskning af metaller fra jorden mod underliggende grundvand. Dog er det muligt, at tilsætning af kompleksdannere med kort halveringstid (få uger) til en voksende afgrøde i sommermånederne ikke vil resultere i nedsivning af jordvand.

Afslutningsvis skal det nævnes, at phytoekstraktion kan tænkes anvendt i kombination med phytostabilisering. Dvs. at phytoekstraktion anvendes til fjernelse af de relativt lettere tilgængelige puljer af metal i jorden, hvorefter de mindre tilgængelige puljer gøres endnu mindre tilgængelige ved brug af andre planter. En sådan tilgang kunne tænkes anvendt på bly, der findes hårdt bundet i jorden.



## 6 Referencer

Andersen, L. (1998): Oprensning af tungmetalforurenede jord. Miljøprojekt nr. 407. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Miljø- og Energiministeriet Miljøstyrelsen.

Begonia, G. B., Davis, C. D., Begonia, M. F. T., & Gray, C. N. (1998): Growth responses of Indian mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern.] and its phytoextraction of lead from a contaminated soil. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 61, 38-43.

Bjerre, G. K. (1988): Dyrkning af elefantgræs til fremstilling af cellulose, forsøg med anvendelse af spildevandsslam som gødning. Laboratoriet for Miljøteknik, Ålborg Universitetscenter, 101 pp.

Bornholms Amt (1996): Jordforureningsundersøgelse. Lobbæk Malerforretning. Lobbæk Hovedgade 23, 3720 Aakirkeby, Matr. nr. 45x, Nylars, reg. nr. 409-6. Journalnr. 8-76-5-409-16/94. Bornholms Amt, Teknisk Forvaltning, november 1996.

Brooks, R.R. (1998): Plants that hyperaccumulate heavy metals. Their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. Edited by Brooks, R.R. CAB International. Wallingford, UK.

Dahl, J. & Obernberger, I. (1998): Thermodynamic and experimental investigations on the possibilities of heavy metal recovery from contaminated biomass ashes by thermal treatment. I: Biomass for Energy and Industry (Eds. Kopetz, Weber, Palz, Chartier, Ferrero), C.A.R.M.E.N., 241-244.

Elsamprojekt A/S (1995): Kemiske brændselsdata for dansk energipil. Notat EP95/468, 7 pp.

Fyns Amt (1995): Forureningsundersøgelse. Affaldsdepot nr. 445-8 Kauslunde Træimprægneringsvirksomhed. Rapport marts 1995. Fyns Amt, Miljø- og Arealafdelingen.

Geoteknisk Institut (1995): København, Valbyparken, Haveforeningerne Kalvebod, Bergmanns Have og Sundbo, Feltundersøgelse. Rapport 1, december 1995.

Greger, M. & Landberger, T. (1997): Use of willow clones with high Cd accumulating properties in phytoremediation of agricultural soils with elevated Cd levels. I: Contaminated Soils (Ed. INRA, Paris), Les Colloques, no 85, 505-511.

Huang, J. W., Chen, J. and Cunningham, S. D. (1997): Phytoextraction of lead from contaminated soils. I: Phytoremediation of Soils and Water Contaminants (Eds. Kruger, E.L. et al.), American Chemical Society, Washington, 14 pp.

Jørgensen, U. (1995): Low-cost and safe establishment of *Miscanthus*. Proceedings of the 8th European Conference on Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry. Vienna, 3-5 Oct. 1994, vol. 1, 541-547.

- Jørgensen, U. & Kristensen, E.F. (1996): European Energy Crops Overview - Country report for Denmark. Report from DIPS and DIAS, 83 pp.
- Kjellström, C. (1993): Comparative growth analysis of *Brassica napus* and *Brassica juncea* under Swedish conditions. Canadian Journal of Plant Science, 73, 795-801.
- Kofmann, P. (1999) Høstmetoder til pil. I: Har energiafgrøder en fremtid i Danmark? DJF-rapport (under trykning).
- Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H. & Raskin, I. (1995): Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. Environmental Science & Technology, 29, 1232-1238.
- McGrath, S. P. (1998): Phytoextraction for soil remediation. I: Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals (Ed. Brooks, R. R.), CAB International, 261-287.
- McGrath, S. P., Dunham, S. J. & Correll, R. L. (1997): Potential for phytoextraction of Zinc and Cadmium from soils using hyperaccumulator plants. I: Phytoremediation (Eds. Terry, N., Banuelos, G. & Vangroneveld, J.) Ann Arbor, Michigan.
- Metz, R. & Wilke, B. M. (1996): Schwermetalltransfer Boden-planten beim anbau von nachwachsenden rohstoffen auf rieselfeldern. I: Erster Berliner Workshop "Nachwachsende Rohstoffe: Repositionspflanzen auf altlastengeschädigten bodenflächen", 83-88.
- Nielsen, E., Larsen, P.B., Hansen, E., Ladefoged, O., Mortensen, I., Strube, M., Poulsen, M. (1995): Toksikologiske kvalitetskriterier for jord og grundvand. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen nr. 12. Miljø- og Energiministeriet Miljøstyrelsen.
- Nielsen, K. H. (1996): Virkning af slamgødskning på det omgivende miljø og på biomassekvantitet og -kvalitet i energiskove af pil. Skovbrugsserien nr. 16-1996, Forskningscentret for Skov & Landskab, 111 pp.
- Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W. & Riedl, R. (1997): Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. Biomass and Bioenergy, 12(3), 211-224.
- Petersen, R. & L. Mortensen (1996): Undersøgelse af kortlagt forurennet grund. Esbjerg Tekniske Skole.
- Punshon, T. & Dickinson, N. M. (1997): Mobilisation of heavy metals using short-rotation coppice. Aspects of applied Biology 49, 285-292.
- Riddell-Black, D. Pulford, I. D. & Stewart, C. (1997): Clonal variation in heavy metal uptake by willow. Aspects of Applied Biology 49, 327-334.
- US EPA (1999): Site Technology Capsule, Edenspace Systems Corp., Phyto Extraction Process, EPA/540/R-99xxxx, draft.



# Bilag A: Analysemetoder anvendt ved jordkarakterisering

Analyseringen blev udført på DJF's Centrallaboratorium, generelt efter metoder beskrevet i 'Fælles arbejdsmetoder for jordbundsanalyser', Landbrugsministeriet, Plantedirektoratet 1994.

Jordens tekstur blev bestemt efter dispergering i natriumpyrofosfat. Ler og silt bestemmes under sedimentation ved anvendelse af hydrometer, sandfraktionerne ved vådsigtning. Humus blev bestemt ud fra indhold af totalkulstof bestemt ved afbrænding med ren ilt og infrarød absorbans af dannet kuldioxid. Der blev kompenseret for evt. indhold af calciumcarbonat i jorden, som bestemmes ved mængden af afgivet kuldioxid ved behandling med saltsyre.

Jordens pH bestemmes i et 0,01 M  $\text{CaCl}_2$ -ekstrakt. Den målte pH-værdi til lægges 0,5 pH-enhed for at få reaktionstallet  $R_t$ , som generelt svarer til pH i et vandigt ekstrakt.

Det bestemte indhold af K, Na, og Mg omfatter den ombyttelige mængde af disse ioner, frigjort ved ekstraktion med 0.5 M ammoniumacetatopløsning. Ca ekstraheredes tilsvarende med 1 M ammoniumchlorid i jord uden kalk, ved tilstedeværelse af kalk anvendes 1 M natriumchlorid med compensation for opløst calciumcarbonat. Ekstraheret K og Na bestemtes flammefotometrisk, Mg og Ca med atomabsorptionspektroskopi.

P bestemmes spektrofotometrisk efter ekstraktion med 0.5 M natriumhydrogenkarbonat.

Total-N bestemmes med Dumas-metoden, dvs. afbrænding i oxygenatmosfære v.  $900^\circ\text{C}$ . Gasserne opsamles og renses for vand og kuldioxid, kvælstofilter reduceres til  $\text{N}_2$ , som opsamles og måling i konduktivitetscelle. (Ref.: Hansen, B. (1989) Determination of nitrogen as elementary N, an alternative to Kjeldahl. Acta Agric. Scand. 39, 113-118.

# Bilag B: Kemiske analysemetoder, tørstof, pH og metaller

## Bestemmelse af tørstof

*PRINCIP:* Tørstofindholdet bestemmes ved at en kendt prøvemængde tørres ved 105°C, og den tilbageværende rest vejes.

*REFERENCE:* DS 204:1980

*DETEKTIONSGRÆNSE:* Tørstof: 20 mg/kg

*INTERN KVALITETSKONTROL:* Metoden kontrolleres ved dobbeltbestemmelse af en naturlig prøve i hver analyseserie.

*USIKKERHED:* Ved dobbeltbestemmelsen af en naturlig prøve er der en analyseusikkerhed indenfor dagen,  $CV_w$ , tørstof, 0,1-1%

## Bestemmelse af alkalinitet i jord

*PRINCIP:* Bestemmelsen af alkaliniteten foretages, ved at prøven koges med fortyndet saltsyre, og derefter tilbagetitreres til pH=7 med natriumhydroxid.

*REFERENCE:* Miljøstyrelsens referencelaboratorium. Interkalibrering 35 : 1987.

## Bestemmelse af pH i jord, CaCl opløsning

*PRINCIP:* 10 g prøve opslemmes i 25 ml 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-opløsning, og omrøres i ca. 60 minutter. pH måles i opslemningen.

*REFERENCE:* Fælles arbejdsmetoder for jordbundsanalyser. Landbrugsministeriet. Plantedirektoratet. Marts 1994

*INTERN KVALITETSKONTROL:* Metoden kontrolleres ved samtidig analyse af syntetisk kontrolprøve.

*USIKKERHED:* Ved kontrolanalyse af syntetiske kontrolprøver er der en analyseusikkerhed inden for dagen,  $CV_w$ , 0,2-1% og mellem dagene,  $CV_B$ , 0,5-1%.

## Bestemmelse af pH i jord, vandig opløsning

*PRINCIP:* 10 g prøve opslemmes i 25 ml milli-Q vand, og omrøres i ca. 60 minutter. pH måles i opslemningen.

*REFERENCE:* Fælles arbejdsmetoder for jordbundsanalyser. Landbrugsministeriet. Plantedirektoratet. Marts 1994

*INTERN KVALITETSKONTROL:* Metoden kontrolleres ved samtidig analyse af syntetisk kontrolprøve.

*USIKKERHED:* Ved kontrolanalyse af syntetiske kontrolprøver er der en analyseusikkerhed indenfor dagen,  $CV_w$ , 0,2-1% og mellem dagene,  $CV_B$ , 0,5-1%.

## Bestemmelse af metaller og sporelementer i jord

*PRINCIP:*

*Forbehandling:* Prøvematerialet homogeniseres.

*Destruktion:* En repræsentativt udtaget delprøve af det foreliggende prøvemateriale afvejes i specialrensede glasflasker. 20 ml 7 M salpetersyre tilsættes. Prøveblandingerne destrueres under tryk ved opvarmning i autoklave til 120 °C (200 kPa) i 30 minutter. Blindprøver samt referencemateriale destrueres parallelt med prøverne.

*Analyse:*

As, Pb: De destruerede prøver analyseres ved hjælp af atomabsorptionsspektrometri med grafitovnsteknik (ETAAS), idet der anvendes baggrundskorrektion og standardadditionsteknik.

As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn: Prøverne analyseres ved hjælp af højtopløselig induktiv koblet plasma massespektrometri (HR-ICPMS), idet der anvendes ekstern kalibrering og rentrumsteknik.

*REFERENCE:*

Destruktion; Dansk Standard DS 259, DS 2210.

Måling ved ETAAS; Dansk Standard DS 2211. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 3113 A+B, 18th edition (1992+1994). Perkin Elmer Analytical Techniques for Furnace Atomic Absorption Spectrometry 1984.

Måling ved HR-ICPMS: U.S. Environmental Protection Agency method 200.8 : 1991: Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma - mass spectrometry

*INTERN KVALITETSKONTROL:*

Resultaterne er kontrolleret ved samtidig analyse af syntetiske og naturlige referencematerialer.

*USIKKERHED:*

Ved kontrolanalyse er der en analyseusikkerhed,  $CV_{\text{Total}}$ , på 5-10.

## **Bestemmelse af metaller og sporelementer i biota**

*PRINCIP:*

*Destruktion:* En repræsentativt udtaget delprøve af det fintdelte materiale afvejes i specialrensede teflonbeholdere. Koncentreret kvartsdestilleret salpetersyre og vand tilsættes. Prøverne destrueres under tryk ved anvendelse af mikrobølgeopvarmning. Blindprøver samt referencemateriale destrueres parallelt med prøverne.

*Analyse:*

As,Cd,Cr,Cu,Ni,Pb: Prøverne analyseres ved hjælp af højtopløselig induktiv koblet plasma massespektrometri (HR-ICPMS), idet der anvendes standardadditions- og rentrumsteknik.

Zn: De destruerede prøver analyseres ved hjælp af atomabsorptionsspektrometri med flammeteknik (FAAS), idet der anvendes baggrundskorrektion, og måling foretages ved brug af en kalibreringskurve.

*REFERENCE:*

Destruktion; CEM Microwave Sample Preparation Note BI-8 & BI-3.

Måling ved FAAS; Dansk Standard DS 238, DS 263, DS 284, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 3111 A+B+D, 18th edition (1992). Perkin Elmer Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometry 1990.

Måling ved HR-ICPMS: U.S. Environmental Protection Agency method 200.8 : 1991: Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma - mass spectrometry.

*DETEKTIONSGRÆNSER:*

Analysedetektionsgrænserne er følgende bestemt ved ETAAS, HAAS eller CVAAS:

Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se: 0,01-0,1 mg/kg.

Al, As, Se, Sn, V, Zn: 0,1-1 mg/kg.

Analysedetektionsgrænserne er følgende bestemt ved FAAS:

Zn: 1-10 mg/kg.

*INTERN KVALITETSKONTROL:*

Resultaterne er kontrolleret ved samtidig analyse af referencematerialer.

*USIKKERHED:*

Ved kontrolanalyse er der en analyseusikkerhed,  $CV_{\text{Total}}$ , på 5-10%.

# Bilag C: Kontakter i forbindelse med plantevalg

## Kontakter til forskningsmiljøer:

*Responderende kontakter, besøg*

### USA:

Scott D. Cunningham, William Berti, Dupont, Newark, New Jersey: Blyoprensning, plantescreening, Brassica, majs, screening af 200 chelatorer, stabilisering, biotilgængelighed.

Rufus Chaney, ARS, USDA, Beltsville, Maryland: Hyperakkumulatorer, *Thlaspi caerulescens*, Zn, Cd, Ni, Patenteret hyperakkumulator, stabilisering, biotilgængelighed.

Lee Newman, Darlene Zarbowski, Sally M. Brown, Stuart Strand, University of Washington: Phytooprensning af både organiske stoffer og metaller, phytostabilisering af mineområder.

David Brenner, USDA North Central Regional Plant Introduction Station, Ames, Iowa: Planteselektering, planteoptag, Amaranth, Cu, levering af frø.

### Canada:

Terry McIntyre, Environment Canada: Oversigt over phytooprensningsaktiviteter i Canada, database over planter og metaller, vurdering af økologiske risici ved phytooprensning, registrering af akkumulatorer på forurenede grunde, adskillige projekter i gang.

### Europa:

Steve, P. McGrath, IACR-Rothamsted, England (koordinator på EU-projekt "Phytorem"): Vejledning, besøg, evt. projektsamarbejde, *Thlaspi caerulescens*.

Stig Larsson og Nils-Ove Bertholdsson Swalöf-Weibull seeds, Sverige. Pilekloner, spirehvile.

Guy Delmot, Mas Aviniers, St. Laurent le Minier, Frankrig: Frølevering af *Thlaspi caerulescens* og *Iberis intermedia*.

Drusilla Riddell-Black, Soil, Waste and Groundwater Group, WRC plc, Medmenham, England (koordinator på EU-projekt: Biorenew). Pilekloner med højt metaloptag.

Caroline Wilkins South West Industrial Crops, England: Pilekloner med højt metaloptag og værdier for metaloptag i elefantgræs.

Alan J.M. Baker, University of Sheffield, UK: En af pionerrerne i phytooprensning, diskussion af *Thlaspi rotundifolium*, bly, generel vejledning.

Mark Macnair, University of Exeter, UK: Akkumulation og tolerance, As, Zn, levering af arsen-tolerant græsfrø, jordskokker, Cardaminopsis halleri.

Dr. Ian Pulford, University of Glasgow vedr. fremskaffelse af planter (specielt salix) til de konkrete lokaliteter.

Gartnerikonsulent Dorthe Nissen: Adresser på gartnerier i England, der har P. "Frensham".

Ulf Meyer Henius, Energistyrelsens Biomassekoordinator for EFP: Diskussion af muligheder for søgning af supplerende EFP-projekt.

Lise Samsøe-Petersen, VKI: Diverse kontakter og beregninger vedr. rodfrugter.

#### **Australien:**

Dr. Rebecca Hamon, Mike McLaughlin. Soil Science and Plant Nutrition group, University of Western Australia. Vedr. fremskaffelse af planter og generel information om State-of-the-art.

*Ikke responderende kontakter:*

#### **USA:**

Leon Kochian, Mitch Lasat, US Plant, Soil & Nutrition Laboratory, Cornell University, Ithaca, New York: Screening af 200 planter, Brassica, Amaranthus retroflexus, Zn, Cs, m.m.

Ilya Raskin, Rutgers University, New Jersey: Brassica, bly, chelatorer, field tests.

Steve Roch, USEPA: Field test af phytooprensning.

Christina Negri, Ray Hinchmann, Argonne National Laboratory: Poppeltræer, Zn oprensning af organiske stoffer.

Robert Fellows, Batelle, Pacific Northwest National Laboratory: Planteoptag, risikovurdering.

Gregorio Begonia, Jackson State University, Mississippi: Bly, Brassica m.m.

L.R. Hossner, University of Texas at Austin. Metaloptag, screening.

J.L. Gardeau-Torresdy, University of Texas: Optag af Zn, Cu m.m. i lucernerødder.

#### **Japan:**

Japanske kontakter vedrørende biomasseproduktion og mulighed for dyrkning af Athyrium yokoscence.

#### **Europa:**

Praveen Saxena, University of Guelph, Canada: Pelargonium sp. "Frensham" vedr. meget høje metaloptag.

Dr. Paivi Kopponen, University of Kuopio, Finland.

Dr. Rajesh Mehra, Rowell Res. Inst. & Aberdeen, UK.

Volker Römheld & co-workers, Hohenheim University, Tyskland.