

Miljøprojekt Nr. 922 2004

# Fytoremidiering af tungmetalholdigt dambrugsslam

Marianne Bruus og John Jensen  
Danmarks Miljøundersøgelser

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>9</b>
<b>1 INDLEDNING</b>	<b>11</b>
1.1 BAGGRUND	11
1.2 CADMIUM OG NIKKEL	11
1.3 FYTOREMEDIERING AF TUNGMETALLER	12
1.4 TIDLIGERE ERFARINGER	12
1.5 FORMÅLET MED PROJEKTET	13
<b>2 PILOTPROJEKT 2000</b>	<b>15</b>
2.1 FORMÅL	15
2.2 FØRSØG MED PIL	15
2.2.1 <i>Opstilling</i>	15
2.2.2 <i>Forløb</i>	16
2.2.3 <i>Høst</i>	16
2.2.4 <i>Metalanalyser</i>	16
2.3 DAMBRUGSSLAMS PÅVIRKNING AF SPRINGHALER	16
2.4 RESULTATER	17
2.4.1 <i>Høstet biomasse</i>	17
2.4.2 <i>Optag af cadmium og nikkel</i>	17
2.4.3 <i>Potentiale for jordrensning</i>	18
2.4.4 <i>Effekter på springhaler</i>	18
<b>3 PROJEKT 2001</b>	<b>21</b>
3.1 FORMÅL	21
3.2 FØRSØG MED PIL OG SLAM	21
3.2.1 <i>Opstilling</i>	21
3.2.2 <i>Forløb</i>	21
3.2.3 <i>Høst</i>	22
3.2.4 <i>Metalanalyser</i>	22
3.3 RESULTATER	22
3.3.1 <i>Biomasse</i>	22
3.3.2 <i>Optag af cadmium og nikkel</i>	23
3.3.3 <i>Potentiale for jordrensning</i>	25
<b>4 DISKUSSION</b>	<b>27</b>
4.1 SAMMENLIGNING AF RESULTATER FOR 2000 OG 2001	27
4.2 BLADENES BETYDNING FOR METALOPTAGET	27
4.3 RØDDERNES BETYDNING	27
4.4 LANGTIDSPERSPEKTIVER	28
4.5 ANDRES ERFARINGER MED PIL	28

4.6	ANDRE PLANTEARTER EN MULIGHED?	29
4.7	KAN BIOTILGÆNGELIGHEDEN AF METALLERNE ØGES?	29
4.8	ØKONOMISKE ASPEKTER	30
4.9	KONKLUSIONER/ANBEFALINGER	30
<b>5</b>	<b>REFERENCER</b>	<b>31</b>

# Forord

Projektet "Fytoremediering af tungmetaltholdigt dambrugsslam" blev iværksat for at undersøge muligheden for ved hjælp af energiafgrøden pil at rense dambrugsslam, der overskrider grænseværdierne for cadmium og nikkel, så slammet efterfølgende kan anvendes på normal vis som jordforbedringsmiddel/gødning i landbruget. Projektet er udført af Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Terrestrisk Økologi i perioden 2000-2002.

Finansieringen af projektet kommer dels fra Miljøstyrelsens Udviklingsordning under Program for renere produkter m.v., dels fra Dansk Dambrugerforening. En følgegruppe bestående af Svend Erik Jepsen, Miljøstyrelsens Husholdningsaffalds-kontor, Jan Steinbring Jensen, Skov- og Naturstyrelsen, Kåre Michelsen, Dansk Dambrugerforening, Uffe Jørgensen, Danmarks Jordbrugsforskning, Jørgen Larsen/Jens Ewald Conradsen, Ringkøbing Amtskommunes Dambrugsgruppe samt John Jensen, Beate Strandberg og Marianne Bruus, Danmarks Miljøundersøgelser.

Nogle af de anvendte pilekloner var venligst stillet til rådighed af Svalöf Weibull, hvilket vi gerne vil benytte lejligheden til at takke for. Ligeledes takker vi Kærhede Dambrug i Sdr. Felding for slam og jord. Aage Bach, Ny Vraa bioenergi, samt Nils-Ove Bertholdsson, Svalöf Weibull, har bistået med gode råd undervejs.



# Sammenfatning og konklusioner

Det slam, som fremkommer, når dambrugsbassiner renses op, anvendes normalt som gødning/jordforbedringsmiddel i landbruget med doseringer på omkring 10 t/ha om året. Imidlertid er der, især i Vestjylland, konstateret indhold af cadmium og nikkel i slammet, der overskrider de tilladte værdier. Det betyder, at slammet ikke kan anvendes på normal vis, men må deponeres eller renses, til det overholder de fastsatte grænseværdier. Deponering er en dyr løsning for dambrugerne. Der var derfor et ønske om at finde et økonomisk rentabelt alternativ. I den forbindelse var det oplagt at kombinere oprensning med produktion af energiafgrøder, hvilket i princippet kan ske ved at dyrke pilekloner, som optager cadmium og nikkel fra slammet, og derefter brændes under kontrollerede forhold i affaldforbrændingsanlæg, hvor de skadelige tungmetaller opsamles som aske, der derefter lettere kan deponeres.

Projektet "Fytoremediering af tungmetalholdigt dambrugsslam" består af et pilotprojekt, som blev gennemført i 2000/2001, og et hovedprojekt, som blev gennemført i 2001/2002.

Formålet med pilotprojektet var at screene udvalgte pilekloner for deres evne til at optage og tåle cadmium og nikkel. De seks udvalgte kloner blev dyrket i potter udendørs. Der var to doseringer af dambrugsslam, svarende til 10 og 30 t/ha, og slammet blev enten strøet på jordoverfladen eller blandet med jorden. Desuden blev pileklonerne som kontrol dyrket i jord alene. Nogle af klonerne blev desuden forsøgsvis dyrket i slam alene, idet en mulig rensemetode kunne være at dyrke pilen i slambede med membran i bunden. Pilekviste blev stukket i potterne i det tidlige forår, og den producerede biomasse blev høstet efter løvfald. Tilvækst samt indhold af cadmium og nikkel i veddet blev bestemt, hvorefter man ved en kombination af de to parametre kunne skønne de enkelte kloners potentiale som oprensere af tungmetalbelastet dambrugsslam. Det viste sig, at resultaterne for pil dyrket i jord med slam og pil dyrket i slam alene var meget forskellige. For det første groede alle kloner bedre i slam alene end i jord med slam, formentlig pga. et højere tilgængeligt næringsindhold. For det andet var det ikke de samme kloner, der havde det største potentiale for oprensning i de to dyrkningsformer. Desuden viste det sig i løbet af sommeren, at en af de leverede pilekloner var en anden end den bestilte. Ud over forsøgene med pil blev giftigheden af slammet over for jordlevende dyr estimeret ved at udføre en reproduktionstest med springhaler. Efter 3 uger i jord med slam svarende til 0-50 t/ha var der ikke signifikante effekter af slammet på springhalernes reproduktion. Det anses derfor ikke for sandsynligt, at normale slamdoseringer vil udgøre en risiko for de jordlevende dyr.

På baggrund af pilotprojektets resultater blev det besluttet at køre videre med de fem mest lovende kloner samt to nye i hovedprojektet. De syv kloner blev stukket i potter med slam alene eller halvt slam og halvt jord. Omkring løvfald blev der indsamlet blade til bestemmelse af Cd- og Ni-indhold. Efter løvfald blev den overjordiske biomasse samt nogle af rødderne høstet. Ved og rødder blev tørret og vejret, og der blev målt cadmium og nikkel. Cadmiumindholdet var ens i ved og rødder, 1-3 mg/kg, og lidt højere i bladene, 2-13 mg/kg. Nikkelindholdet i veddet var 0,3-0,9 mg/kg, indholdet i rødder 3-21 mg/kg, og

indholdet i blade 1-4 mg/kg. Sammenholdt med biomassen af de forskellige organer, kan man konkludere, at en væsentlig del af de optagne metaller recirkuleres til jorden ved løvfald. Optaget af de to metaller var størst, når pilen groede i slam alene, og det samme gjaldt for jordrensningspotentialet, defineret som vedbiomassen ganget med det målte metalindhold. Hvad angår forskelle mellem de testede kloner, var der klare tendenser for cadmiums vedkommende, men dog kun få signifikante forskelle. Klonerne Jodis, Loden og Aage havde det største potentiale for cadmiumoptag. For nikkels vedkommende var forskellene mindre, men *Salix alba* toppede listen uanset eksponeringsform.

Hvis man ekstrapolerer projektets resultater til en normal dyrkningssituation, hvor pilen høstes fx hvert tredje år, og antager, at pilen optager de to metaller til samme vedkoncentrationer gennem alle år, kan man regne på, hvor meget Cd og Ni der kan fjernes i hver høstcyklus, og dermed hvor mange år pilen vil være om at rense slammet til grænseværdien for slams indhold af cadmium og nikkel. Ud fra vore forsøg må man konkludere, at en pileplante aldrig vil kunne rense det slam, den selv står i, hvis den gror i slambed. Hvis man derimod fordeler slam på/i jorden i lighed med almindelig dyrkningspraksis, vil det måske, hvis metoden optimeres, være realistisk for cadmiums vedkommende at rense jord og slam i løbet af den 20-årsperiode, en pileplante normalt står i jorden, inden den er udtjent. Dette forudsætter dog, at der ikke udbringes yderligere cadmiumbelastet slam eller anden form for gødning i perioden. For nikkels vedkommende er en oprensning vha. pil slet ikke realistisk under de nuværende betingelser. Muligvis vil man ved kemiske manipulationer af biotilgængeligheden og fremavl/udvælgelse af mere potente kloner kunne øge nikkelpotentialet betragteligt, men det synes ikke umiddelbart realistisk at anvende dyrkning af energipil som alternativ til deponering af nikkelholdigt slam.



# Summary and conclusions

The sludge produced in fish farms is usually applied as agricultural fertiliser at dosages of approximately 30 t/ha. However, in some areas of Denmark, especially Western Jutland, the cadmium and nickel contents of the fish farm sludge exceed the quality criteria for sludge. This means that the sludge cannot be used for agricultural purposes, but has to be deposited or remedied until it meets the criteria. Depositing the sludge is expensive for the fish farmers. They therefore seek an economically sound alternative. For that purpose phytoremediation by energy crops is an appealing solution that may in principle be established by growing willow clones that accumulate cadmium and nickel from the sludge and is then used as fuel under controlled conditions where the heavy metals are collected as easily disposable ashes.

The project "Phytoremediation of heavy metal-containing fish farm sludge" consists of a preliminary study performed in 2000/2001, and a main project performed in 2001/2002.

The aim of the preliminary project was to screen selected willow clones for their ability to take up and tolerate cadmium and nickel. The six selected clones were cultivated in pots under outdoor conditions. Two dosages of sludge were applied, viz. 10 and 30 t/ha, and the sludge was either spread on the pot soil surface or mixed into the soil. Furthermore, all clones were grown under control conditions, i.e. without sludge. Some of the clones were also grown in pure sludge, since a possible remediation method may be to grow the willow in sludge beds with sealed bottom. Willow twigs were planted in the pots in early spring, and the produced biomass was harvested after leaf fall. Growth as well as cadmium and nickel contents were measured. Thereafter, the remediation potential of the single clones was estimated by combining growth and heavy metal content. The results for willow grown in soil with sludge and willow grown in pure sludge differed substantially. Firstly, all willow clones grew to a larger biomass in pure sludge than in soil with sludge, probably due to a higher nutrient availability. Secondly, the relative remediation potential differed between the two situations. Furthermore, one of the delivered clones turned out to be misnamed as it sprouted and grew during summer. Beside the willow clone experiments, the potential toxicity of the sludge to soil-living animals was estimated by conducting a reproduction test with springtails. After three weeks exposure to soil mixed with fish farm sludge at levels corresponding to 0-50 t/ha there were no significant effects of the sludge on springtail reproduction. It therefore seems unlikely that conventional sludge dosages would cause any harm to soil-living animals.

On basis of the results of the preliminary project we decided to continue with the five most promising clones as well as two new clones. The seven clones were planted in pots with pure sludge or half sludge/half soil. At leaf-fall leaves were collected for cadmium and nickel measurements. After leaf-fall, the aboveground biomass was harvested as well as some of the roots. Wood and roots were dried and weighed, and their cadmium and nickel contents were measured. The cadmium content of wood and roots was similar, 1-3 mg/kg, that of leaves was somewhat higher, 2-13 mg/kg. The nickel content of wood was 0.3-0.9 mg/kg, the content in roots 3-21 mg/kg, and the content in leaves

1-4 mg/kg. Considering the biomass and metal contents of the different plant parts, it may be concluded that a substantial part of the metals taken up by the willow plants is recycled to the soil at leaf fall. The uptake of the two metals was larger when the willow grew in pure sludge compared to sludge in combination with soil. The same was true for the remediation potential, defined as woody biomass multiplied with the measured metal concentrations. Concerning differences between the tested clones, there was a clear trend for cadmium, but only few significant differences. The clones Jodis, Loden and Aage had the highest potential for cadmium uptake. Concerning nickel, the differences were generally smaller, but *Salix alba* was on top of the list irrespective of how the willow was exposed to sludge.

If the results of the project are extrapolated to a normal cultivation system with repeated wood harvest e.g. every three years, and it is assumed that cadmium and nickel are taken up to the same wood concentrations through all growing years, it is possible to estimate how much Cd and Ni is removed from the sludge in every harvest cycle, and thereby how many years it will take until the sludge is clean enough to meet the quality criteria. From our experiments it may be concluded that a willow plant will never be able to remedy the pool of sludge in which it grows, if it grows in bed of pure sludge. If, on the other hand, the sludge is applied to soil at low dosages like in normal agricultural practice, it seems likely that the method may be optimised so that the cadmium content can be lowered sufficiently during the 20-year period that is usually the lifetime of willows grown as energy crop. However, this implies that no further cadmium-containing sludge or other kinds of cadmium-containing fertilisers are applied. For nickel it seems totally unrealistic to clean fish farm sludge by growing willow. It may be possible to increase the nickel potential by chemically increasing nickel bioavailability in combination with breeding/selection of more potent clones or species, but at the moment the willow model is not a realistic alternative to deposition of nickel-polluted sludge.

# 1 Indledning

## 1.1 Baggrund

Indholdet af cadmium og nikkel i slam fra en lang række danske dambrug er i dag så stort, at slammet ikke kan overholde slambekendtgørelsens grænseværdier og derfor ikke kan anvendes til jordbrugsformål. Grænseværdierne er for nikkel  $30 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TS}$  ( $2500 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$ ) og for cadmium  $0.8 \text{ mg kg}^{-1} \text{ TS}$  ( $100 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$ ). På baggrund af dambrugernes egne data er det vurderet, at op mod 70% af det producerede slam ikke kan overholde de gældende grænseværdier (COWI 1998). Problemets omfang er dog ikke ens over landet. Således er indholdet af cadmium og nikkel generelt højest i de vestjyske dambrug. Langt den overvejende del af cadmium i dambrugsslam (>95%) stammer fra tilløbsvandet. Om end der ikke findes nogen detaljerede undersøgelser, formodes det, at den overvejende andel af vandløbenes cadmium og nikkel stammer fra udvaskning og afstrømning fra de omkringliggende landbrugsarealer (COWI 1998). Dette understøttes af, at koncentrationen af cadmium og nikkel er højest i de vestjyske vandløb, hvor et samspil mellem øget mobilisering i forbindelse med pyritoksidation og en langt lavere bindingskapacitet i de sandede jorder, som er fremherskende i det vestlige Danmark, bevirker øget udvaskning af tungmetaller tilført jorden med handelsgødning eller atmosfærisk nedfald.

Et velfungerende jordbundsøkosystem er vigtigt for at sikre markernes frugtbarhed. Dambrugsslam, der bringes ud på marker, kan være giftigt for jordbundsdyr. Foruden tungmetallerne nikkel og cadmium vil dambrugsslam indeholde medicinrester, som også kan tænkes direkte eller indirekte at påvirke jordbundsdyr. Tidligere undersøgelser med springhaler og regnorme har dog ikke vist nogen høj giftighed af antibiotika (Bagger, Jensen og Krogh 1999).

## 1.2 Cadmium og nikkel

Cadmium og nikkel er begge tungmetaller, der besidder egenskaber, som gør dem problematiske i forhold til den menneskelige sundhed og for miljøet. Cadmium kan ophobes i den menneskelige krop, primært i nyrerne, hvilket kan medføre en forringet nyrefunktion. Følgesygdomme af en beskadiget nyre kan være nyresten samt knogleskørhed som følge af øget calcium og fosforudskillelse. Nikkel kan fremkalde kontaktallergi. Selv små mængder nikkel i fødevarer kan fremkalde allergireaktioner hos overfølsomme personer. Nikkelforbindelser er også påvist at kunne fremkalde kræft. Da begge tungmetaller kan akkumulere i landbrugsjorder og også optages i afgrøder, ønsker man at begrænse tilførslen af disse stoffer til landbrugsjorderne. På den anden side er en recirkulering af næringsstoffer i slam ønskelig ud fra et princip om en bæredygtig udvikling og opretholdelse af det økologiske råderum. Det kan derfor være fornuftigt at forsøge at opnå en højere kvalitet af affaldsprodukter. Dette kan i princippet gøres ved to primære måder, der ikke udelukker hinanden. Dels kan en massestrømsanalyse og effektiv kildeopsporing efterfulgt af frivillige eller lovmæssige tiltag være med til at nedsætte forbruget og derved også belastning på affaldsbehandlingen. Dels

kan en effektiv efterbehandling af affaldet være med til at reducere problemets omfang. For eksempel kan kompostering af spildevandsslam effektivt fjerne en række organiske forureningskomponenter, som ellers ikke nedbrydes under den normale slambehandling. Grænseværdier for cadmium i handelsgødning samt en række andre nationale og internationale miljøpolitiske tiltag har i det sidste 10 år bevirket, at cadmiumtilførslen til vores landbrugsarealer er stærkt reduceret. Det vil derfor ikke være realistisk af den vej yderligere at reducere tilførslen væsentligt og derved også afstrømningen til vandløbene. Tilbage er så, såfremt der fra samfundet og dambrugernes side er et ønske om at genanvende dambrugsslam, at forbedre slammets kvalitet ved at fjerne cadmium og nikkel. En række lovende indledende undersøgelser har dokumenteret, at oprensning med hurtigtvoksende metalakkumulerende planter som fx pil vil kunne løse opgaven.

### 1.3 Fytoremediering af tungmetaller

En række planter er tolerante over for forhøjede metalkoncentrationer i jordmiljøet, dvs. planten kan spire og gro på områder med meget høje metalkoncentrationer. Nogle arter tolererer tungmetaller, andre optager og akkumulerer dem, og nogle kan hyperakkumulere stofferne. Nogle arter opkoncentrerer metallerne i rødderne, mens andre translokerer en del af de optagne metaller til det overjordiske skudsystem. Potentialet i relation til rensning af forurenede jord afhænger derfor ikke kun af akkumuleringssevnen, men også af translokeringen. Hvis en betydelig del af de optagne metaller translokeres til overjordiske plantedele, kan metallerne fjernes fra jordmiljøet ved høst af planterne, og det høstede plantemateriale kan evt. udnyttes til biobrændsel, hvor tungmetallerne effektivt kan opsamles af røggasfiltre. Denne fytoremediering kan anvendes til at rense forurenede jord eller slam.

### 1.4 Tidligere erfaringer

Teknikken er ny i Danmark, men baseret på udenlandske erfaringer med rensning af forurenede jord (Greger & Landberg 1995, Hasselgren 1984, Greger 1997, Ernst 1996, Baker et al. 1994). Disse undersøgelser har vist, at navnlig tre forhold er væsentlige: (i) koncentrationen af metallerne, (ii) biotilgængeligheden i den kontaminerede jord, og (iii) planternes evne til at akkumulere metallerne og translokere dem til overjordiske plantedele. Erfaringerne (f.eks. Ernst 1996, Ernst 1998, Westergaard & Munkøe 1999) har vist, at "rensningen" ofte er begrænset af den producerede biomasse. Dette skyldes, at de planter, der kan hyperakkumulere metaller, f.eks. arter af pengeurt (*Thlaspi spp.*), kun producerer en meget begrænset biomasse. Derimod har pil, navnlig kloner af båndpil (*Salix viminalis*), men også andre pilearter, f.eks. mandelpil (*S. triandra*), evnen til at akkumulere tungmetaller, heriblandt cadmium og nikkel (Greger & Landberg 1995, Hasselgren 1984, Greger 1997, Ernst 1995), og forener dermed produktionen af en betydelig biomasse med en forhøjet optagelse og er således en interessant mulighed i forbindelse med rensning af Cd- og Ni-forurenede jord.

I Danmark er de første pilotprojekter ved at blive igangsat for at afdække potentialet til forskellige formål, bl.a. rensning af tungmetallforurenede grunde. Der er hidtil ikke foretaget undersøgelser af potentialet for rensning af dambrugsslam. En engelsk undersøgelse med rensning af spildevandsslam (Ridell-Black et al. 1997) har vist, at biomassen ikke påvirkes af Cd-koncentrationen i jorden, hvorimod Ni-koncentrationer over 30 mg/kg

reducerede biomassen væsentligt. Samtidig viste undersøgelsen, at der fandtes to distinkte grupper af pil: de, der ikke akkumulerede Ni, og de, der gjorde og havde reduceret biomasse.

Alt i alt peger en række undersøgelser på, at gødskning af cadmium- og nikkelakkumulerende energipil vil være en miljømæssigt forsvarlig anvendelsesform af dambrugsslam og samtidig være med til opnå energihandlingsplanens "Energi 21"-mål for brug af energiafgrøder.

### 1.5 Formålet med projektet

Formålet med nærværende projekt er at undersøge mulighederne for at anvende dambrugsslam på en måde, som er miljømæssigt forsvarlig og samtidig reducerer den økonomiske byrde på den del af de danske dambrug, der på grund af landbrugsmæssige og geologiske forhold ikke umiddelbart kan anvende deres slam på landbrugsjorder med spiselige afgrøder.

Projektet består af to dele, nemlig et pilotprojekt gennemført i 2000 og et hovedprojekt gennemført i 2001.



## 2 Pilotprojekt 2000

### 2.1 Formål

Formålet med denne del af projektet var at finde egnede pilekloner og teste deres evne til at optage nikkel og cadmium fra dambrugsslam. Indholdet af nikkel og cadmium skulle sammenholdes med høstudbyttet for de forskellige kloner med henblik på at udvælge de bedst egnede kloner til forsøgene i 2001, dvs. de kloner, der optager meget metal (dvs. renses slammet) og samtidig producerer en acceptabel biomasse til brug som brændsel. Desuden var vi interesserede i, om deponeringsformen påvirker metaloptaget, dvs. om der er forskel på slam, der ligger oven på jorden, og slam, der er blandet op med jord. Derudover skulle giftigheden af det urensede dambrugsslam over for udvalgte jordbundsdyr, nemlig springhaler, testes.

### 2.2 Forsøg med pil

Der var udvalgt 6 kloner, hvoraf nogle skulle være gode til at akkumulere cadmium og/eller nikkel (Jodis, Loden, begge *Salix viminalis* x *S. dasyclados*; Aage, en *S. viminalis*-klon; *S. alba*), og andre medium-gode til at akkumulere metallerne, men med en forventet høj biomasseproduktion (Tora, Olof). Desværre viste det sig efterfølgende, at *S. alba* var blevet forbyttet med *S. viminalis*-klonen Carl Jensen.

#### 2.2.1 Opstilling

Den 31. marts 2000 blev der stukket pilestiklinger i potter med sandjord fra dambrugerens (Kjærhede Dambrug, Sdr. Felding) mark. Potterne var 13 l plasticpotter, som blev fyldt med 11 l jord/slam. Den anvendte jord havde et cadmiumindhold på  $0,2 \pm 0,1$  mg/kg, et nikkelindhold på  $1,7 \pm 0,1$  mg/kg og en pH-værdi på 5,7. Jorden blev tilsat slam fra Kjærhede dambrug svarende til 0, 10 og 30 tons per hektar, udregnet på basis af potternes diameter. Det anvendte slam havde et cadmiumindhold på  $6,0 \pm 0,2$  mg/kg, et nikkelindhold på  $93 \pm 3$  mg/kg og en pH-værdi på 5,0. Slammet blev enten lagt i et tyndt lag på jordoverfladen eller blandet med pottejorden i blandemaskine. For hver pileklon, behandling og slamdosis blev der fremstillet 3 eller 4 potter (replikater), se tabel 1. Desuden blev der stukket pilekviste af nogle af klonerne (se tabel 1) i potter fyldt med dambrugsslam (uden jord), idet vi vurderede, at en tilladelse til rensning af slam i slambede med membran i bunden er mere sandsynlig end en tilladelse til at bringe metalbelastet slam ud på landbrugsjord. Vi ønskede derfor at se, om de angiveligt mest metaltolerante kloner kunne trives i slam alene og optage metaller herfra. Potterne var ikke forsynet med hul i bunden, da vi ønskede at beholde den samlede metalmængde i pottene. For at undgå overvanding i regnfulde perioder var alle potter dækket med låg, som i midten havde et hul til pileskuddene.

Kontrolpotterne blev gødet til det samme N- og P-niveau, som potter med 10 t slam/ha skønnedes at indeholde, dvs. 0,37 g P og 0,55 g N per potte (COWI

1998). Gødskning bestod af organisk gødning (Florina, Bayer A/S, N-P-K 5-2-4) suppleret med superfosfat 8% (Ole Bj. Knudsen).

Tabel 1. Eksperimenter 2000. Kloner, behandlinger og antal replikater.

Klon	Kontrol	10 t/ha		30 t/ha		Kun slam
		Blandet	top	Blandet	top	
Tora	3	3		3		
Olof	3	3		3		
Loden	4	4	4	4	4	3
Jodis	4	4	4	4	4	3
Aage	4	4	4	4	4	3
Carl Jensen	(4)	4	4	4	4	3

### 2.2.2 Forløb

I forårets og sommerens løb har potterne stået på marken foran vort væksthus. For at undgå overløb af vand og dermed metaller blev der kreeret læg med hul til stiklingerne, og disse læg blev lagt på potterne i perioder med megen nedbør. I mere tørre perioder var det af og til nødvendigt at vande pilestiklingerne. Der blev opstillet et automatisk vandingsanlæg, som dog viste sig at være behæftet med visse uheldige egenskaber, idet der ikke blev tilført lige meget vand til alle potter. Dette skulle nu være rettet, men det meste af sommeren 2000 blev der vandet med vandkande i stedet.

### 2.2.3 Høst

Omkring 1. november blev pilekvistene høstet, dvs. klippet af ved jordoverfladen. Kvistene for hver plante blev bundtet, vejjet (vådvægt) og frosset ned.

### 2.2.4 Metalanalyser

Indholdet af nikkel og cadmium blev målt i midterstykket af de enkelte kviste. Kvistene blev klippet i skiver og tørret ved 80°C, hvorefter de blev opløst i koncentreret salpetersyre. Metalindholdet blev analyseret med flammeatomabsorptionsspektrometri. Samtidig med pilekvistene blev standardplantemateriale (reference) med et certificeret indhold af nikkel og cadmium analyseret. Desuden blev der målt metalindhold i de anvendte gødningsprodukter.

## 2.3 Dambrugsslams påvirkning af springhaler

Vi testede giftigheden af dambrugsslam overfor springhaler af arten *Folsomia fimetaria* i 5 koncentrationer, svarende til 0, 3, 7, 21 og 50 t/ha i en 3-ugers reproduktionstest med 10 hanner og 10 hunner i hver af de 4 replikater.



## 2.4 Resultater

### 2.4.1 Høstet biomasse

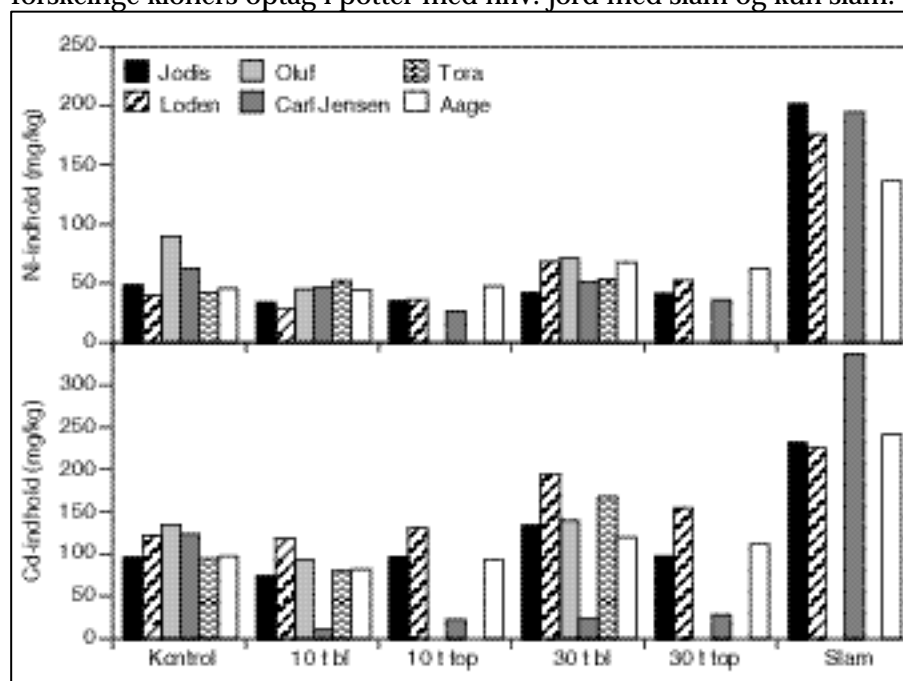
Som det fremgår af tabel 2, voksede den højtydende sort Olof mere end de andre kloner. Desuden voksede samtlige de testede kloner bedre i slam alene end i jord tilsat slam.

Tabel 2. Biomasse (g overjordisk vådvægt) af Salix efter en sæsons vækst i forskellige slamdoseringer, hvor slammet enten var blandet med jord ("blandet") eller lagt oven på denne ("top").

	Kontrol	10 t/ha		30 t/ha		Kun slam
		blandet	top	blandet	top	
Tora	57 ∇ 5	36 ∇ 3		63 ∇ 5		
Olof	87 ∇ 11	55 ∇ 8		72 ∇ 18		
Loden	46 ∇ 4	26 ∇ 2	34 ∇ 1	58 ∇ 9	61 ∇ 9	88 ∇ 30
Jodis	45 ∇ 7	31 ∇ 8	34 ∇ 6	51 ∇ 7	54 ∇ 11	125 ∇ 55
Aage	55 ∇ 3	33 ∇ 4	43 ∇ 5	48 ∇ 3	55 ∇ 6	67 ∇ 39
Carl Jensen	54 ∇ 6	40 ∇ 4	34 ∇ 15	49 ∇ 9	50 ∇ 8	113 ∇ 53

### 2.4.2 Optag af cadmium og nikkel

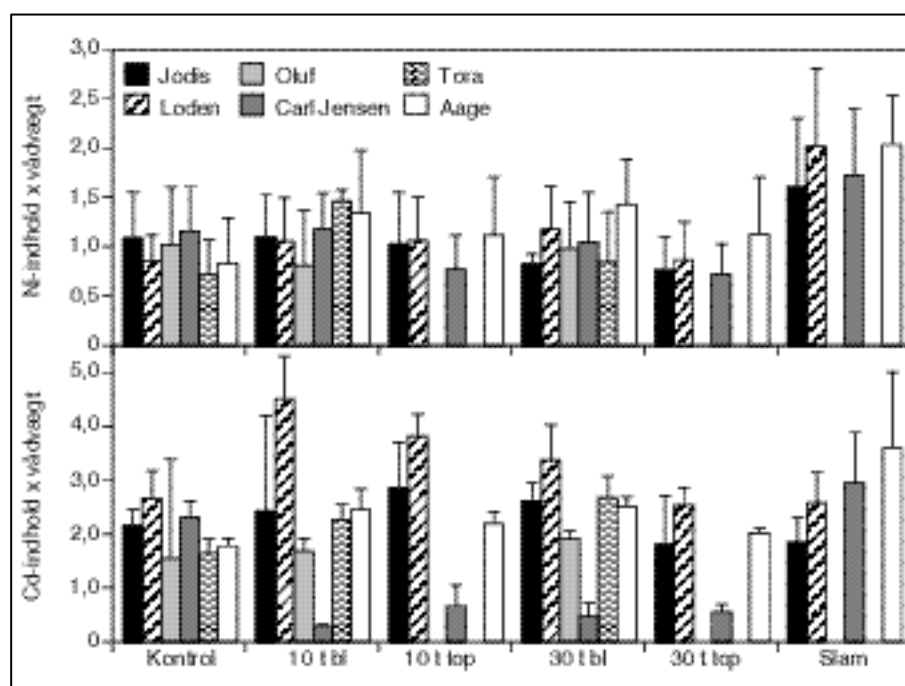
For nikkels vedkommende var der ikke nogen klar tendens i, hvilke kloner, der optog meget metal i de forskellige behandlinger (Figur 2.1). For cadmium var tendensen mere klar, idet klonen Loden næsten ufravigeligt indeholdt mest metal. For begge metaller skal bemærkes, at der er klare forskelle i de forskellige kloners optag i pletter med hhv. jord med slam og kun slam.



Figur 2.1. Optag af nikkel (øverst) og cadmium (nederst) i de forskellige pilekloner efter en sæsons vækst i forskellige slamblandinger. x t bl: x t slam/ha blandet op med jord; x t top: x t/ha lagt oven på jorden; slam: kun slam.

### 2.4.3 Potentiale for jordrensning

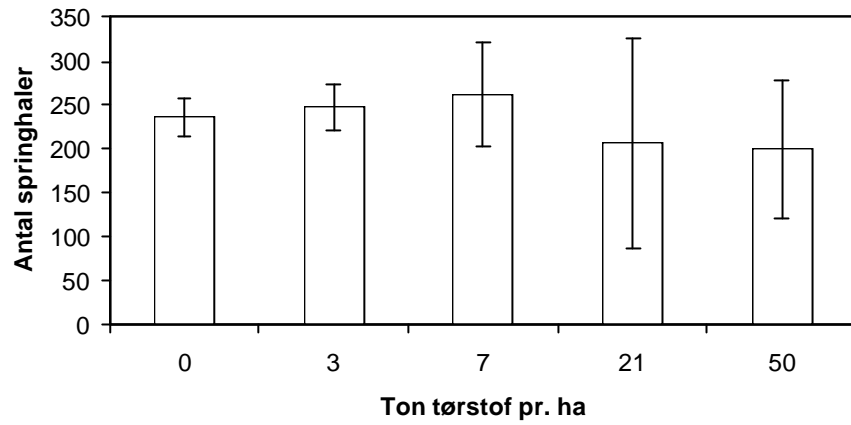
Potentialet for jordrensning er her defineret som biomassehøsten ganget med det målte metalindhold. Der er ikke bestemt tørvægt, hvorfor den udregnede værdi bliver temmelig arbitrær. Vi har dog skønnet, at værdierne for de forskellige kloner er sammenlignelige, idet de formodes at have nogenlunde samme vandindhold, når de vokser under ens betingelser. Som det fremgår af Figur 2, varierer potentialet for metaloptag ca. med en faktor to. For nikkel er der heller ikke her nogen klar tendens til, at en eller to kloner er klart bedre end de andre, hvorimod der for cadmium i jord med slam er en temmelig klar tendens til, at klonen Loden har et større potentiale for metaloptag end de andre kloner. Når man sammenligner situationen i potter kun med slam med potter, der også indeholder jord, er billedet imidlertid noget forvirrende, idet den klon med det dårligste cadmiumpotentiale i potter med jord og slam er klart den bedste i potter kun med slam, mens Loden faktisk har det dårligste potentiale i slam.



Figur 2.2. Potentiale for optag af nikkel (øverst) og cadmium (nederst) i seks forskellige kloner af pil udtrykt som det målte metalindhold multipliceret med biomassen (vådvægt) efter en sæsons vækst i forskellige slamblandinger. x t bl: x t slam/ha blanded op med jord; x t top: x t/ha lagt oven på jorden; slam: kun slam.

### 2.4.4 Effekter på springhaler

Koncentrationer af dambrugsslam, som svarer til en udbringning af 50 tons pr. ha, gav ikke nogen tydelig effekt på springhalernes forplantning (Figur 2.1). Selv om der ved de to højeste doseringer er fundet bemærkelsesværdigt få dyr i et par replikater, er der samlet set ikke nogen signifikant forskel mellem de enkelte behandlinger. På baggrund af disse undersøgelser og andre erfaringer med spildevandsslam kan det konkluderes, at dambrugsslam i de tilladte doseringer (max. 7 t/ha/år over 10 år) formentlig ikke vil udgøre en uacceptabel risiko for landbrugsjorder, specielt ikke hvis slammets indhold af cadmium og nikkel er reduceret ved hjælp af fyto Remediering inden udbringning.



Figur 2.1. Antallet af springhaler ved eksponering til slam-jord-blandinger, som modsvarende markdoser på 0-50 tons slam pr. ha. Antallet er gengivet som middelværdien og standardafvigelsen for de fire replikater med 10 hanner og 10 hunner i hver replikat ved start. Antallet af dyr (unger og voksne) er optalt efter tre uger.



## 3 Projekt 2001

### 3.1 Formål

Formålet med de videre undersøgelser var at teste de udvalgte kloner fra pilotprojektet yderligere. Dels var vi interesserede i, om resultaterne fra 2000 var reproducerbare, dels ville vi se nærmere på fordelingen af tungmetallerne i de forskellige plantedele (ved, rødder, blade) for at kunne gå længere ind i en diskussion af mulighederne for rensning af dambrugsslam i kombination med biobrændselproduktion.

### 3.2 Forsøg med pil og slam

Forsøgene med pil i 2001 var stort set identiske med forsøgene i 2000, bortset fra at de allerdårligste kloner var pillet ud. Da vi i 2000 mod forventning ikke havde *S. alba* med, inkluderede vi den i 2001. Desuden er en anden klon, Buhl, medtaget på anbefaling af Aage Bach, Ny Vraa bioenergi. På baggrund af resultaterne fra 2000 og en forventning om, at den mest realistiske dyrkningsform vil være slambede kun med slam eller med en meget høj koncentration af slam sammenlignet med udbringning af slam på almindelig landbrugsjord, valgte vi i 2001 kun at køre forsøg i potter udelukkende med slam samt i potter med halvt slam (15 cm lag) og halvt jord. I en marksituation ville det svare til, at man tilførte 150 l slam/m<sup>2</sup>, hvilket giver 100 kg/ha med en slamdensitet på 0,67 kg/l.

#### 3.2.1 Opstilling

Forsøgene blev kørt i 13 l potter, som blev fyldt helt op. I nogle potter var der kun slam fra Kærhede dambrug (fra samme bunke som i 2000, metalindhold målt til  $3,2 \pm 0,5$  mg Cd/kg og  $62 \pm 9$  mg Ni/kg), mens der i andre potter var sandjord fra Kærhede Dambrugs marker ( $0,2 \pm 0,1$  mg Cd/kg og  $1,7 \pm 0,1$  mg Ni/kg) i den nederste halvdel og slam øverst. Alle potter blev dækket med kraftig, sort plastic, som blev fæstnet med elastik. Midt i potten blev prikket et hul til pilestiklingen. Vanding blev ligeledes foretaget gennem et hul i plasticdækket vha. et vandingsspyd.

Til årets forsøg var udvalgt klonerne Aage, *S. alba*, Buhl, Carl Jensen, Loden, Jodis og Tora. Disse kloner blev testet i begge behandlinger, med 10 replikater med kun slam og 5 replikater med halvt jord og halvt slam. Pilestiklingerne kom i jorden 27. april, da frosten omsider var gået af jorden.

#### 3.2.2 Forløb

Dette års afdækning af potterne fungerede tilfredsstillende. Der var således ikke problemer med uønsket vandnedtrængning. Ved høst blev der fundet en del bladbiller (formentlig *Phylloedecta vitellinae*, Lille pilebladbille) og store bladlus (*Tuberolachnus salignus*, Stor pilebladlus) på hhv. blade og stilke/stængler, men de syntes ikke have udrettet skade af betydning.

### 3.2.3 Høst

De overjordiske dele blev høstet 25.-26. oktober, grene og blade for sig, og rødderne blev taget op et par dage senere. Udvalgte prøver blev vejret umiddelbart efter høst for at bestemme vådvægt. Alle pilekviste og blade blev tørret ved 80°C, hvorefter tørvægten af kvistene blev bestemt. Bladbiomassen blev ikke målt, da nogle blade var faldet af ved høst. Det midterste stykke af den længste kvist fra hver potte blev markeret med henblik på metalanalyser.

### 3.2.4 Metalanalyser

Det udvalgte materiale blev knust i en prøveknuser (Retsch). Derefter blev udtaget 0,3 g, som blev overhældt med 4 ml koncentreret HNO<sub>3</sub> (Suprapur, J.T. Baker). Efter ca. 16 timer blev prøverne nedbrudt i mikrobølgeovn, 25-35 minutter ved 195°C. Derefter blev prøverne fortyndet til 25 ml med destilleret vand (ELGA). Indholdet af cadmium og nikkel blev derefter bestemt med grafitovnsatomabsorptionsspektrometri (GF-AAS). Til cadmiumanalyserne blev brugt NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> som modifier og til nikkelanalyserne Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Parallelt med prøverne blev kørt dels blindprøver for at tjekke for forurening, dels certificeret referencemateriale (spinat, National Institute of Standards and Technology) for at tjekke nedbrydningen og målingernes nøjagtighed.

## 3.3 Resultater

### 3.3.1 Biomasse

Tørvægten af det høstede pileved fremgår af Tabel 3.1. I slam alene varierede biomassen fra 38 til 54 g per plante, mens den i halvt slam, halvt jord varierede mellem 29 og 47 g. Der var således en tendens til, at pilen voksede bedre i slam alene.

Tabel 3.1. Vedbiomasse (tørvægt) af de forskellige pilekloner efter ca. 7 måneders vækst i hhv. slam alen og halvt slam, halvt jord.

Eksponering	Slam		Slam/jord	
	N	Gennemsnit ± SD	N	Gennemsnit ± SD
Aage	10	43,8 ± 11,2	5	33,9 ± 7,1
Buhl	10	39,5 ± 17,0	5	30,6 ± 4,4
Carl Jensen	10	37,8 ± 14,8	5	32,4 ± 9,3
Jodis	10	37,5 ± 10,8	5	36,0 ± 9,2
Loden	10	37,8 ± 15,8	5	42,8 ± 7,2
<i>S. alba</i>	10	53,6 ± 24,2	5	46,5 ± 7,3
Tora	10	42,6 ± 16,5	5	29,4 ± 5,1

Vandprocenten i det nyhøstede ved var 51 ± 2,6.

Den maksimale bladbiomasse blev målt til ca. 23 g, men desværre var en del blade gule, og på nogle planter manglede de fleste blade. Den gennemsnitlige rodbiomasse skønnes at have været omkring 20 g. En del af de vejede rødder var mindre, men dette skyldes formentlig, at noget af rodbiomassen er blevet i klumpen af slam/jord. Tilsvarende vejede enkelte rødder betydeligt mere, men dette skyldes formentlig vedhæftet slam/jord, som ikke er blevet skyllet af.

### 3.3.2 Optag af cadmium og nikkel

Ved eksponering i slam alene optog pilen i gennemsnit mellem 1,1 og 2,9 mg Cd/kg ved. Det tilsvarende nikkeloptag var mellem 0,5 og 0,9 mg/kg (Tabel 3.2). I halvt slam, halvt jord varierede Cd-optaget mellem 0,9 og 2,2 mg/kg, Ni-optaget mellem 0,3 og 0,6 mg/kg. Cd-optaget i rødderne var omtrent som for veddet, mens rødderne indeholdt betydeligt mere Ni end veddet (Tabel 3.2). Cd-indholdet i bladene var ca. det dobbelte af vedindholdet, mens Ni-indholdet i bladene var 3-6 gange så højt som i veddet (Tabel 3.2).

Tabel 3.2. Indhold af cadmium og nikkel (mg/kg tørvægt) i forskellige plantedele efter 7 måneders eksponering i halvt slam og halvt jord ("slam/jord") eller slam alene ("slam") for forskellige pilekloner.

Eksponering	Klon	Cd i ved		Cd i blade		Cd i rod		Ni i ved		Ni i blade		Ni i rod	
		N	gnsn. ± SD	N	gnsn. ± SD	N	gnsn. ± SD	N	gnsn. ± SD	N	gnsn. ± SD	N	gnsn. ± SD
Slam/jord	Buhl	5	1,3 ± 0,3	3	2,8 ± 0,7	0		5	0,3 ± 0,1	3	1,2 ± 0,6	0	
Slam/jord	Carl Jensen	5	1,7 ± 0,1	3	3,4 ± 0,1	3	1,7 ± 0,2	5	0,3 ± 0,1	3	1,1 ± 0,1	3	2,9 ± 1,0
Slam/jord	Jodis	5	1,7 ± 0,3	3	2,1 ± 0,4	0		5	0,4 ± 0,1	3	1,4 ± 0,2	0	
Slam/jord	Loden	5	1,9 ± 0,3	3	3,7 ± 0,1	3	2,0 ± 0,5	5	0,5 ± 0,1	3	1,4 ± 0,2	3	11,4 ± 8,2
Slam/jord	S. alba	5	0,9 ± 0,2	3	2,2 ± 0,6	3	1,0 ± 0,7	5	0,5 ± 0,1	3	1,5 ± 0,5	3	3,8 ± 1,5
Slam/jord	Tora	5	1,8 ± 0,3	3	4,8 ± 1,4	3	1,0 ± 0,4	5	0,4 ± 0,1	3	1,8 ± 0,1	3	3,6 ± 1,6
Slam/jord	Aage	5	2,2 ± 0,9	3	4,4 ± 0,7	0		5	0,6 ± 0,2	3	2,3 ± 0,4	0	
Slam	Buhl	10	1,6 ± 0,3	5	3,3 ± 0,5	3	1,6 ± 0,9	10	0,7 ± 0,1	5	2,3 ± 0,6	3	12,6 ± 6,8
Slam	Carl Jensen	10	2,2 ± 0,6	5	6,4 ± 1,8	3	1,4 ± 0,7	10	0,5 ± 0,2	5	3,1 ± 0,3	3	9,6 ± 4,6
Slam	Jodis	10	2,9 ± 0,7	5	10,5 ± 4,3	3	1,6 ± 0,4	10	0,9 ± 0,3	5	3,7 ± 0,7	3	6,5 ± 1,9
Slam	Loden	9	2,6 ± 0,7	5	10,5 ± 3,7	3	2,2 ± 2,0	10	0,8 ± 0,2	5	3,1 ± 0,5	3	15,5 ± 10,7
Slam	S. alba	10	1,1 ± 0,5	5	2,9 ± 1,0	3	1,6 ± 0,8	10	0,8 ± 0,4	5	3,1 ± 0,4	3	21,0 ± 19,3
Slam	Tora	10	2,0 ± 0,2	5	9,2 ± 1,6	3	1,8 ± 0,3	10	0,6 ± 0,1	5	3,8 ± 0,3	3	15,5 ± 4,1
Slam	Aage	10	2,1 ± 0,4	5	12,8 ± 2,4	3	1,4 ± 0,2	10	0,6 ± 0,1	5	3,6 ± 0,7	3	21,0 ± 13,2



### 3.3.3 Potentiale for jordrensning

Potentialet for jordrensning er estimeret ved at gange den opnåede vedbiomasse med det målte tungmetalindhold (Tabel 3.2). Hvad angår Cd-potentiale, topper Jodis, Loden og Aage listen uanset eksponeringsform, mens *S. alba* har det højeste Ni-potentiale.

Tabel 3.2. Gennemsnitligt, beregnet potentiale  $\pm$  SD for optag af cadmium og nikkel efter en vækstsæson for forskellige pilekloner dyrket i slam alene ("slam") eller halvt jord og halvt slam ("slam/jord"). Potentialer er angivet i  $\mu\text{g}$  per plante.

Sort	Eksponering	N	Cd-potentiale	Ni-potentiale
Buhl	Slam	10	60 $\pm$ 20	27 $\pm$ 12
Carl Jensen		10	78 $\pm$ 26	21 $\pm$ 11
Jodis		10	107 $\pm$ 41	32 $\pm$ 11
Loden		10	104 $\pm$ 36	29 $\pm$ 15
<i>S. alba</i>		10	50 $\pm$ 20	36 $\pm$ 12
Tora		10	86 $\pm$ 28	26 $\pm$ 18
Aage		10	91 $\pm$ 30	26 $\pm$ 5
Buhl	Slam/jord	5	39 $\pm$ 14	8 $\pm$ 4
Carl Jensen		5	54 $\pm$ 15	11 $\pm$ 1
Jodis		5	60 $\pm$ 16	15 $\pm$ 7
Loden		5	81 $\pm$ 14	20 $\pm$ 5
<i>S. alba</i>		5	43 $\pm$ 17	23 $\pm$ 8
Tora		5	53 $\pm$ 14	13 $\pm$ 6
Aage		5	77 $\pm$ 39	21 $\pm$ 10

Hvis man antager, at pilen efter 3 vækstsæsoner har en tørvægt 20 gange så høj som efter 1 sæson (Ledin 1996, Danfors et al. 1998), dvs. ca. 800 g, og at de optager tungmetaller til samme koncentrationer i veddet, dvs. maksimalt 3 mg Cd/kg og 1 mg Ni/kg, svarer dette til et Cd-optag på 2,4 mg og et Ni-optag på 0,8 mg per plante i løbet af de tre første vækstsæsoner. Med et Cd-indhold i slammet på 3,2 mg/kg og et Ni-indhold på 62 mg/kg svarer det til, at en plante kan rense hhv. 1,0 og 0,025 kg slam til grænseværdierne for cadmium og nikkel (hhv. 0,8 og 30 mg/kg slam) i løbet af de tre første vækstsæsoner.

Vi antager nu, at pilen høstes hvert tredje år, og at biomassen år 6, 9 osv. svarer til det dobbelte af biomassen produceret efter 3 år (Ledin 1996, Danfors et al. 1998). Der plantes med en tæthed svarende til ca. 15000 stiklinger pr. hektar, hvilket giver, at hver pileplante har 0,67 m<sup>2</sup>. Hvis slamlaget er 25 cm tykt, svarer det til, at hver plante har 0,17 m<sup>3</sup> slam. Med en densitet på ca. 0,67 vil hver plante skulle rense ca. 112 kg slam, hvilket skønnes at ville tage 55 høstcykler, dvs. 165 år for Cd og et endnu mere astronomisk antal år for Ni.

Ud fra de målte koncentrationer i de høstede blade og biomassen af disse skønnes det, at op til 230  $\mu\text{g}$  Cd og 85  $\mu\text{g}$  Ni pr. plante tabes til jorden via bladene det første efterår. Formentlig vil dette tab vokse proportionalt med vedbiomassen, dvs. være ca. 20 gange så stort det tredje efterår.

Røddernes indhold af Cd svarer nogenlunde til veddets, mens indholdet af Ni er 10-30 gange så højt i rødderne som i veddet. Formentlig er begge værdier overestimeret, idet der utvivlsomt har hængt rester af slam/jord ved rødderne efter skylning. På den anden side vil rødder, der trækkes op og ikke skylles,

bære meget større mængder Cd og Ni. Beregninger af jordrensningspotentialet ved en alternativ dyrkningsstrategi, hvor hele pileplanten høstes hvert tredje år (som foreslået af dambrugene) på baggrund af de her målte indhold af metaller i rødder giver ikke resultater, der afviger væsentligt fra de ovenfor nævnte for cadmium. Dels er rodbiomassen ca. halvt så stor som vedbiomassen, og dels vil høst hvert tredje år nedsætte den gennemsnitlige biomasse (og dermed potentialt for rensning) i pilens levetid, da pilen vokser til ca. dobbelt biomasse år 6 sammenlignet med år 3 (jvf. Danfors et al. 1998). For nikkels vedkommende vil potentialt nok for nogle pilekloners vedkommende øges ved høst af hele planten, men det samlede potentialt vil aldrig overstige potentialt for cadmiumoptag. Et hurtigt overslag, hvor man antager, at pilen opnår 20 gange så høje koncentrationer i rødderne som i veddet, giver, at pilen maksimalt kan indeholde 8,8 mg Ni/plante efter de tre år og dermed rense 0,28 kg jord til grænseværdien. De 112 kg jord, som hver plante skal rense, vil efter lignende antagelser som ovenfor (afsnit 3.3.3) have nået grænseværdien for nikkel efter 407 cykler af tre år, dvs. 1221 år.

## 4 Diskussion

### 4.1 Sammenligning af resultater for 2000 og 2001

”Potentialet” for rensning af Cd- og Ni-holdigt slam for 2000 kan sammenlignes med potentialet for 2001, hvis man dividerer tallene for 2000 (Figur 2.2) med 2, idet man antager en vandprocent på ca. 50, jvf. resultaterne fra 2001. En sådan sammenligning viser, at potentialet i 2000 var lidt større end i 2001. Forskellene mellem de to år skyldes forskelle i optag, ikke i biomasse, hvilket formentlig skyldes, at slamkoncentrationerne var højere i 2000 (6,0 mg Cd/kg og 93 mg Ni/kg i 2000 mod 3,2 og 62 i 2001). Desuden kan biotilgængeligheden af metallerne eventuelt have ændret sig under lagringen af slammet.

Årsagen til det lavere indhold af metaller i slammet i 2001 sammenlignet med 2000 kendes ikke. For det første er slambunken formentlig temmelig inhomogen bl.a. mht. metalindhold. For det andet kan man tænke sig, at en nedsivning af metallerne til dybere slamlag har fundet sted fra 2000 til 2001, selvom metallerne generelt forventes at være kraftigt bundet til slammet.

### 4.2 Bladenes betydning for metaloptaget

En betydelig del af det optagne tungmetal recirkuleres til jord/slam ved løvfald, idet bladbiomasse skønnes at være ca. halvt så stor som vedbiomassen, mens metalindholdet i bladene er 2-6 gange så højt som i veddet. Ved at vælge at høste inden løvfald kunne denne recirkulering forhindres, og remedieringspotentialet ville derved stige. De år, der ikke høstes, vil en betydelig metalpulje dog stadig vende tilbage til jorden, med mindre man finder en metode til at opsamle bladene hvert år.

### 4.3 Røddernes betydning

Cd-indholdet i rødderne er sammenligneligt med indholdet i veddet, hvorimod Ni-indholdet er større i rødderne. Det reelle optag er svært at måle, da en del er adsorberet på røddernes overflade, dvs. ikke optaget. På den anden side vil en eventuel ”høst” af rødderne med plov eller harve også medføre, at (endnu mere) slam/jord følger med rødderne op. Dette vil formentlig ikke udgøre noget problem i forbindelse med afbrænding under kontrollerede forhold i affaldforbrændingsanlæg (askeopsamling, evt. skorstensfilter). Et jævnt optag af rødder vil dog øge arbejdsbyrden til energipilproduktionen væsentligt, idet man så er nødt til at sætte nye stiklinger hver gang. På baggrund af nærværende forsøg er det ikke muligt at afgøre, præcis hvor meget cadmium og nikkel, man vil få med op, hvis man i stedet for at høste de overjordiske dele hvert tredje år vælger at trække hele planten op og derefter plante nye stiklinger. Umiddelbart synes potentialet for rensning af slammet dog ikke at kunne øges ad den vej.

#### 4.4 Langtidsperspektiver

De overslag, der er præsenteret i afsnit 3.3.3, viser, at pilestiklingerne ikke inden for en overskuelig tidshorisont vil kunne rense slammet til Cd- og Ni-koncentrationer under grænseværdierne, hvis pilene gror i fx bede kun med slam eller med halvt slam og halvt jord.

Resultaterne fra 2000 viser, at optaget af metaller falder, hvis slamdoseringen sænkes (Figur 2.1), og potentialet for rensning falder endnu mere (Figur 2.2). Det sidste er måske delvis en effekt af forskelle i gødningstilgængelighed, idet forskellene i potentiale jo er en kombination af metaloptag og vækst. Et tilskud af fx handelsgødning ville formentlig ligeledes resultere i en bedre vækst, men da de fleste gødningsformer også indeholder cadmium og/eller nikkel, vil de øge indholdet af disse stoffer i jorden og dermed kræve et endnu højere rensningspotentiale. Hvis man ser bort fra gødningseffekten, viser Figur 2.2, at metaloptaget ved slamdoseringer svarende til landbrugsmæssig anvendelse er 1/3 – 1/2 af optaget ved eksponering i rent slam. Hvis vi antager, at der udbringes 30 t/ha, svarer det til, at hver pileplante har 2 kg slam til rådighed ved en plantetæthed på 15000/ha. Med et optag på 1/3 af optaget ved slam alene svarer det til, at hver plante kan rense 0,33 kg slam for Cd og 0,0083 kg slam for Ni i løbet af de første tre år og hhv. 0,67 og 0,017 kg de følgende høstcykler à tre år med de metalkoncentrationer, vi havde i slammet i 2001. For Cd vil det således tage pilen ca. 12 år at rense de 2 kg slam, og for Ni ca. 354 år, begge dele under forudsætning af, at det årlige optag ikke falder, hvilket ikke er realistisk, idet tilgængeligheden af metallerne vil falde med tiden som følge af optag og evt. binding til den underliggende jord. Den lavere slamdosering betyder desuden, at større arealer skal tilplantes med pil, og lukkede dyrkningssystemer med fx membran under vil formentlig ikke være praktisk mulige.

#### 4.5 Andres erfaringer med pil

Andersen et al. (2002) undersøgte forskellige plantearters evne til at rense seks jorder for diverse spormetaller, heriblandt Cd og Ni. Undersøgelserne blev gennemført som korttidsforsøg i kar i vækstkamre, dvs. under omstændigheder, der i nogen grad lignede forsøgene beskrevet i denne rapport. Jordernes Cd-indhold varierede fra 0,18 til 4,7 mg/kg, og Ni-indholdet fra 3,4 til 41 mg/kg. Den valgte pileklon, *Salix burjatica* "Germany", opnåede Cd-koncentrationer i de overjordiske dele på 1,1-9,8 mg/kg, dog typisk ca. 2 mg/kg. Ni-indholdet var 0,47-1,7 mg/kg. Resultaterne fra Andersen et al. (2000) stemmer således godt overens med resultaterne fra nærværende projekt, hvad angår pilens optag af de to metaller.

Landberg og Greger (1996) målte indholdet af bl.a. Cd i 15 forskellige pilekloner indsamlet i et forurenede område i Polen. Jordens Cd-indhold var 67 mg/kg, mens pileveddet indeholdt fra mindre end 0,1 til 1,2 mg Cd/kg, hvorimod rodindholdet var langt højere. Dette taler for en produktion af "rent" brændsel på forurenede jord, men bestemt ikke for brugen af pil i fyto Remedieringsøjemed. Robinson et al. (2000) målte vedkoncentrationer på ca. 6 mg Cd/kg i pil, som havde vokset under feltforhold i jord med 0,6-60 mg Cd/kg. Ved højere Cd-koncentrationer i jorden steg optaget i pileveddet op til ca. 20 mg/kg ved et Cd-indhold i jorden på ca. 100 mg/kg. Forfatterne konkluderer, at pil vil kunne anvendes til at rense landbrugsjord for det cadmium, der er tilført med gødning gennem de sidste 100 år, forudsat at resultaterne fra deres pottforsøg også gælder for feltforhold. Felix (1997)

undersøgte bl.a. en *Salix viminalis*-klons (78198) evne til at rense jord med 6,6 mg Cd/kg og regnede ud, at det ville tage mellem 77 og 206 år, hvilket jo ikke er alt for lovende.

#### 4.6 Andre plantearter en mulighed?

Cd-indholdet i planter er generelt mindre end 3 mg/kg (Reeves & Baker 2000), men kan nå op til 20 mg/kg i planter, der vokser i Cd-rig jord. Visse varianter af *Thlaspi caerulescens* (en art af pengeurt) kan akkumulere mere end 1000 mg/kg. Pilen anvendt i dette projekt må således siges at ligge i den høje ende af normalområdet. Af værdien fundet i litteraturen kan nævnes, at *Hibiscus cannabinus* optog 24 mg Cd/kg og *Sinapis* sp. (Indian mustard) 15 mg Cd/kg fra jord med 8 mg/kg (Bañuelos & Ajwa 1999); mælkebøtte (*Taraxacum officinale*) optog 15 mg Cd/kg fra jord med gennemsnitligt 8,5 mg/kg (0,7-21 mg/kg), andre plantearter 4,2-11,5 mg Cd/kg (Pichtel et al. 2000).

I det ovenfor beskrevne forsøg af Andersen et al. (2000) viste alpepengeurt, *Thlaspi caerulescens*, sig at kunne optage Cd til langt højere koncentrationer end de øvrige plantearter, nemlig op til 125 mg/kg, mens pengeurtens evne til at optage Ni ikke var specielt bemærkelsesværdig. På baggrund af deres resultater konkluderer Andersen et al. (2000), at det vil være realistisk over en periode på 10-20 år at rense jord for cadmium under feltforhold ved hjælp af *Thlaspi*, evt. i kombination med pil. For nikkel og andre metaller er udsigterne derimod ikke så lovende.

Mange *Alyssum*-arter (krognål) optager Ni til høje koncentrationer (op til 10000 mg/kg (reviewed i Reeves & Baker 2000)). Derudover findes gode Ni-akkumulerende arter i flere familier, især vortemælk (83 arter), korsblomstrede (82 arter), kurveblomster (27 arter), Flacourtiaceae (19 arter), buksbom (17 arter) og krapfamilien (12 arter). Således ser der ikke umiddelbart ud til at være potentielle energiafgrøder blandt de bedste Ni-optagende arter, og muligheden for rensning af jord eller slam forurenet med nikkel er formentlig heller ikke særligt gode, jvf. Andersen et al. (2000).

#### 4.7 Kan biotilgængeligheden af metallerne øges?

Lave optag af tungmetallerne kan dels skyldes, at disse ikke er biotilgængelige, fordi de bindes hårdt til jorden, dels at planterne undgår at optage dem.

Forskellige stoffer kan øge biotilgængeligheden af tungmetaller i jord og lignende medier. Således beskriver Robinson et al. (2000), hvordan de chelerende stoffer EDTA (ethylendiamintetraeddikesyre), DTPA (diethylentriaminpentaeddikesyre) og NTA (nitrilotrieddikesyre) kan øge optaget af Cd i pil og poppel til næsten det dobbelte i en kort periode efter tilsætning af stoffet. Effekten forsvandt dog allerede efter halvanden måned, hvilket betyder, at de chelerende stoffer skal tilsættes kort før høst. En øgning i tilgængelighed og dermed optag kan i nogle jorder opnås ved kunstig forsuring af jorden (fx Tichy et al. 1997). Tilsætning af stoffer, der øger biotilgængeligheden, vil dog øge risikoen for udvaskning af cadmium og nikkel.

#### 4.8 Økonomiske aspekter

På grund af de dårlige prognoser mht. til rensning af dambrugsslammet for især nikkel går vi ikke nærmere ind i de økonomiske forhold ved pile dyrkning. Det kan dog nævnes, at energipil antages at kunne give et økonomisk udbytte svarende til konventionelle afgrøder (Ledin 1996).

#### 4.9 Konklusioner/anbefalinger

På baggrund af vore forsøg med dyrkning af pil i potter med små og store koncentrationer af cadmium- og nikkelholdigt dambrugsslam må vi konkludere, at ingen af de testede pilekloner vil være i stand til at rense slammet for nikkel inden for en overskuelig tidshorisont. Efter en optimering af metoden vil rensning af slammet for cadmium vha. pil vil måske være en mulighed under de rette dyrkningsbetingelser, dvs. små doser af slam på i jorden svarende til almindelig slam anvendelse i landbruget. Dette forudsætter, at vore resultater fra en dyrkningssæson i potter kan ekstrapoleres direkte til flerårig dyrkning under almindelige feltforhold. For nikkel er perspektivet for anvendelse af fyto remediering af dambrugsslam vha. pil meget dårligere. Hvis rensning for nikkel nogensinde skal blive en mulighed, vil det kræve pilekloner med dramatisk højere nikkeloptag i kombination med metoder, som øger tilgængeligheden af nikkel i slammet kraftigt.

Andre metoder til rensning eller bortskaffelse af slammet må derfor overvejes. Det store indhold af organisk stof taget i betragtning kunne afbrænding af slammet under kontrollerede forhold i affaldforbrændingsanlæg måske være en mulighed.

## 5 Referencer

Andersen, L., Holm, P.E., Lehmann, N.K.J., Petersen, L.S., Jørgensen, U. & Mortensen, J.V. 2000. Phytooprensning af metaller. Miljøprojekt nr. 536, Miljøstyrelsen. 63 pp.

Baguer, A.J., Jensen, J. & Krogh, P.H. 1999. Effects of the antibiotics oxytetracycline and tylosin on soil fauna. *Chemosphere* 40, 751-757.

Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Sidoli, C.M.D. & Reeves, R.D. 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling* 11, 41-49.

Bañuelos, G.S. & Ajwa, H.A. 1999. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 34(4), 951-974.

COWI 1998: Tungmetalforurening af slam fra dambrug. Kilder og afhjælpeforanstaltninger. COWI og Dansk Dambrugerforening.

Danfors, B., Ledin, S. & Rosenqvist, H. 1998. Short-rotation willow coppice: Growers manual. Swedish Institute of Agricultural Engineering. Björn Sundell, Sverige. 40 pp.

Ernst, W.H.O. 1995. Decontamination or consolidation of metal-contaminated soils by biological means. In: *Heavy Metals: Problems and Solutions* (eds. U. Foerstner, W. Salomons & P. Meder) pp 141-149. Springer Verlag, Berlin.

Ernst, W.H.O. 1996. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants. *Applied Geochemistry*, 11, 163-167.

Ernst, W.H.O. 1988. Decontamination of mine sites by plants: an analysis of the efficiency. In: *Environmental Contamination 3rd Int. Conf. Venice* (ed. A.A. Orio) pp 30+5-310. CEP Consultants, Edinburgh.

Felix, H. 1997. Field trials for in situ decontamination of heavy metal polluted soil using crops of metal-accumulating plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160, 525-529.

Greger, M. 1997: Willow as phytoremediator of heavy metal contaminated soil. in II International Scientific-Technical Conference: Element Cycling in the Environment, pp. 167-172, Institute of Environmental Protection, Warsaw.

Greger, M., & Landberg, T. 1995: Use of willow clones with high Cd accumulating properties in phytoremediation of agricultural soils with elevated Cd levels. *Contaminated Soils*, 85, 505-511.

Hasselgren, K. 1984: Municipal wastewater reuse and treatment in energy cultivation. in *Future of water reuse Vol. 1*, pp. 414-427, AWWA Research Foundation, Denver, Colorado, San Diego, California.

Landberg, T. & Greger, M. 1996. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas. *Applied Geochemistry* 11, 175-180.

- Ledin, S. 1996. Willow wood properties, production and economy. *Biomass and Bioenergy* 11, 75-83.
- Pichtel, J., Kuroiwa, K. & Sawyerr, H.T. 2000. Distribution of Pb, Cd and Ba in soils and plants of two contaminated sites. *Environmental Pollution* 110, 171-178.
- Reeves, R.D & A.J.M. Baker 2000. Metal-accumulating plants. In: *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment* (eds. I. Raskin & B.D. Ensley) pp 193-229. John Wiley & Sons, USA.
- Ridell-Black, D., Pulford, I., & Stewart, C. 1997: Clonal variation in heavy metal uptake by willow. *Aspects of Applied Biology* 49, 327-334.
- Robinson, B.H., Mills, T.M., Petit, D., Fung, L.E., Green, S.R. & Clothier, B.E. 2000. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. *Plant and Soil* 227, 301-306.
- Tichy, R., Fajtl, J., Kuzel, S. & Kolar, L. 1997. Use of elemental sulphur to enhance a cadmium solubilization and its vegetative removal from contaminated soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46, 249-255.
- Westergaard, T. & Munkøe, M. 1999. Tungmetalfjernelse vha. phytooprensning. Eksamensprojekt nr 256. IGG, DTU.