

Orensning af metalforurenede jord med planter på Kalvebod Miljøcenter

Afrapportering af opnåede resultater og erfaringer



17. maj 2006

Julie Katrine Jensen (KMC), Morten Larsen (DTU),
Kåre Press-Kristensen (DTU), Morten Sørensen (KMC),
Stefan Trapp (DTU).

Abstract

Copenhagen Recycling Center (KMC) is a part of the Environmental Protection Agency, City of Copenhagen, DK. KMC is among other things running storage facilities for polluted soil. Approximately 4 million tons of polluted soil has been deposited so far. Removing heavy metals from the polluted soil is very expensive. Thus, experiments with plant growth on the polluted soils were initiated in 2005. The idea is that the plants can take up and remove the metals from the soil (phytoremediation). This report describes the experiments initiated and the results and experience obtained so far.

An *in-situ* experiment where cuttings of willow were planted on a 400 m² heavy metal polluted soil deposit (class 4) was started in April 2005. The willows had serious growth problems in some parts of the area, which could be due to either the compactness or the high metal concentrations of the soil. Analysis of heavy metals in the plants showed that the concentrations in the plants growing in the deposit were significantly higher than plants growing on control soil. It also showed that the heavy metals accumulate mostly in the leaves and that, for the plants on the deposit, was the copper concentrations in the dead plants were significantly higher than in the living plants.

An *ex-situ* experiment, where cuttings of willows were grown in a growth chamber, was started in summer, 2005. The cuttings were grown in 3 different soils from the deposit. One soil from an area where the plants were growing good on the deposit, another from an area, where the plants were dead, and finally one from an area where the plants had a fair growth. The plants were irrigated with different nutrient solutions or tap water, to see if addition of nutrients could increase the growth and the uptake of metals. The results showed that the concentrations of heavy metals in the plants grown in the polluted soils in all cases were significantly higher compared to plants grown in control soil. No significant variation of the heavy metal concentrations between plants grown in the 3 different polluted soils could be found. Visually, the plants irrigated with 1/4 strength Hoagland nutrient solution seemed to grow better, but no significant increase in heavy metal could be detected in the plants.

From the results it was concluded that the method has a potential, but that the process needs to be optimized if a substantial amount of metals is to be removed from the soil. Also it was concluded that the topsoil should not be compressed before the willow cuttings were planted and that the willows should be harvested in autumn, before defoliation, to increase removal and avoid spreading of the heavy metals.

1 Indledning	3
1.1 Samarbejdsparter.....	3
2 Teori.....	4
3 Materialer og metoder.....	5
3.1 In-situ forsøget.....	5
3.2 Ex-situ forsøg.....	6
3.3 Drift af In-situ forsøget	6
3.4 Drift af Ex-situ forsøg.....	7
3.5 Analyser	8
3.6 Databehandling	9
4 Resultater og diskussion	10
4.1 Jordbundsanalyser.....	10
4.2 In-situ forsøget.....	10
4.3 Ex-situ forsøg.....	12
4.3.1 Gennemsnitlig daglig transpiration.....	12
4.3.2 Normaliseret relativ transpiration	14
4.3.3. Optag af tungmetal i planter	15
5 Konklusion.....	18
6 Perspektivering	19
7 Referencer	21
Bilag 1 Transpiration	22
B 1.1 Transpiration generelt	22
B 1.2 Fastsættelse af initialtranspiration.....	22
Bilag 2 Næringssubstrat.....	23
Bilag 3 Billeder.....	24
Bilag 4 Analysemetoder.....	26
Bilag 5 Jordbundsanalyser	27
Bilag 6 Jordens kemiske egenskaber	28
Bilag 7 Transpiration for samtlige planter i forsøgsserie a-c.....	29
Bilag 8 Data og statistik for koncentrationer af metaller i planterne for ex-situ forsøg ...	33
Bilag 9 Udvasningsforsøg på KMC.....	38

1 Indledning

Kalvebod Miljøcenter (KMC), der er en del af Miljøkontrollen i Københavns Kommune, indretter og driver bl.a. depoter for forurenede jord. KMC har til dato deponeret ca. 4 mio. tons forurenede jord på Vestamager og på Prøvestenen.

Som et led i Miljøkontrollens miljøcertificering valgte KMC i 2005 at starte et flerårigt forsøg med oprensning af tungmetallforurenede jord vha. planter (kaldet phytoremediering). Målet er at opnå en miljøeffekt i form af reduktion af miljøbelastningen fra KMCs depot for stærkt forurenede jord (klasse 4 depotet).

Phytoremediering er en oprensningsteknik, der udnytter, at planter kan optage tungmetaller fra jorden. Det er en lavteknologisk, biologisk og forholdsvis billig metode, der dermed adskiller sig fra eksisterende oprensningstekniker. På nuværende tidspunkt viser erfaringerne dog, at phytoremediering indebærer en lang oprensningshorisont (f.eks. Prasad 2002 og Kalisova-Spirochova *et al* 2002), og der er derfor behov for mere viden og erfaring på området.

Forsøget kan bidrage med viden og erfaringer, idet der undersøges og afprøves forskellige tiltag til at optimere metoden og derigennem reducere miljøbelastningen yderligere. De opnåede erfaringer vil være grundviden, der kan anvendes på øvrige lokaliteter, bl.a. i forbindelse med afviklingen af Prøvestensdepotet og øvrige jorddepoter i København.

Denne rapport sammenfatter erfaringer og resultater fra forsøget til dato og kommer med forslag til fremtidige forsøg/tiltag til optimering af metoden.

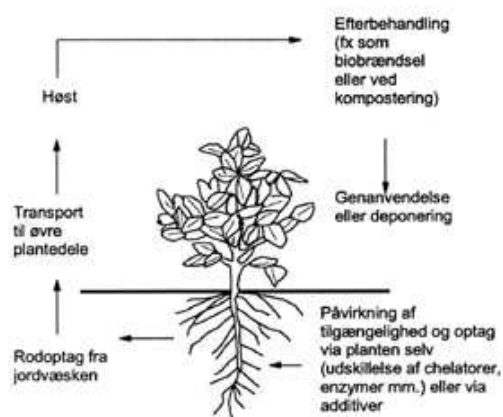
Forsøget kan betragtes som to delforsøg: Et in-situ forsøg og et ex-situ forsøg. In-situ forsøget består pt. af et areal på ca. 400 m² metallforurenede jord i klasse 4 depotet, der i april 2005 blev tilplantet med pil. Sideløbende er der skabt et vækstkammer i en 20 fods skibscontainer (kaldet ex-situ forsøget). Her har der i sidste halvdel af 2005 kørt forskellige forsøgsrækker. Rapporten beskriver de forsøgsaktiviteter, der har fundet sted indtil nu: I vækstkammeret er det således afprøvet, om der er en effekt af at give planterne bedre vækstvilkår, sammenlignet med dem de har i depotet. Planterne i vækstkammeret er plantet i samme jord som dem i depotet, men de får en tilstrækkelig mængde lys, varme, fugt og vand/næring, og jorden er ikke så kompakt som i depotet. Dermed kan det fastsættes, om det er vækstvilkårene eller metallerne, der er afgørende for planternes vækst i depotet. Ved at afprøve forskellige styrker af tilsat næringssubstrat kan det ligeledes besluttes, om tilvæksten kan øges herigennem.

1.1 Samarbejdsparter

Den første del af projektet er udført i samarbejde med Institut for Miljø & Ressourcer på DTU (Danmarks Tekniske Universitet), der bistår med rådgivning og analyser. Der er indgået en aftale, der løber indtil 31. maj 2006. Samarbejdsparter er også Arresø Pil, som leverer pilestiklinger og rådgiver om beplantning og beskæring af pil. Derudover bidrager KVL (Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole) og Kontor for jordforurening og afværgeforanstaltninger i Miljøkontrollen med viden.

2 Teori

Figur 2.1 illustrerer hovedprincipperne i phytoremediering. Metoden udnytter planters evne til at optage forureningskomponenter (herunder metaller) fra jorden. Derved kan risikoen for f.eks. udvaskning til grundvandet nedsættes. Plantens øvre dele kan evt. høstes, hvorved en del af forureningen helt kan fjernes fra arealet. Høstes materialet, så må mængden af akkumulerede metaller i planterne være afgørende for, hvad der skal ske med det høstede materiale. F.eks. kan materialet anvendes til biobrændsel. Dog er det nødvendigt, at det anlæg, der afbrænder materialet, har en god røggasrensning, da den største del af metallerne efter afbrænding traditionelt vil være at finde i flyveasken. Koncentrationen af metaller i bundasken, der mængdemæssigt udgør den største andel af asken er således lille (Andersen *et al* 2000).



Figur 2.1: Skitse af principperne i Phytoremediering (Miljøstyrelsen 2000).

Planterne er fra naturens hånd udstyret med mekanismer, der gør dem i stand til at optage de metaller, der er essentielle for væksten. Herudover kan nogle planter optage metaller, der ikke umiddelbart har nogen kendt funktion for planten (Andersen *et al* 2000).

Der er flere faktorer, der er afgørende for optagets samlede størrelse fra et givent areal. I første omgang gælder det om at vælge planter, der kan tolerere og optage metallerne. I vores tilfælde, hvor jorden indeholder en bred vifte af metaller, skal den valgte planteart kunne tolerere alle metallerne. Nogle planter er kendt for at optage store mængder metaller pr. kg plante, disse kaldes hyperakkumulatører (McIntyre 2003). Ofte producerer disse arter dog ikke en særlig stor biomasse (kg plante), hvorfor et større samlet optag af metaller fra jorden nogen gange kan opnås ved at vælge arter med en stor biomasseproduktion i stedet.

Den mængde metaller, der fjernes fra jorden kan øges yderligere på forskellige måder. F.eks. kan biomasseproduktionen gøres større ved at forbedre vækstvilkårene på stedet. Eller de kemiske vilkår i jorden kan ændres, så metallerne bliver mere tilgængelige for planten. En kombination af de tilgange, der måtte være til optimering af optaget, må forventes at give den største effekt.

3 Materialer og metoder

Forsøget består som nævnt af to del-forsøg: Et in-situ forsøg og et ex-situ forsøg. Disse beskrives hver for sig i nedenstående.

3.1 In-situ forsøget

I klasse 4 depotet på Selinevej blev der i april 2005 plantet pil på ca. 400 m² tungmetalfourenet jord. Jorden stammer fra Røde Mellemvej. Der er lavet en historisk beskrivelse af grunden, lige som der under anlæggelse af forsøget er udtaget prøver til analyse af indholdet af forureningsparametre.

For at forhindre harer og rådyr i at gnave i planterne, er arealet afgrænset af et hegn.



Figur 3.1. In - situ forsøget i klasse 4 depotet lige efter anlæggelse i april 2005.

Stiklingerne er plantet i rækker med 25 centimeter mellem planterne og 80 centimeter mellem hver række. Planterne er plantet i 20-25 centimeters dybde, og stiklingerne har generelt 10-15 centimeter stamme over jorden. Imellem rækkerne er der, som et forsøg, enkelte steder sat planter i 50 centimeters dybde og med 30 til 40 centimeter stamme over jorden.

Pil er valgt, fordi den i andre forsøg har udvist evner til optag af tungmetaller. Under danske forhold har slægten især vist lovende resultater i forhold til optag af cadmium (f.eks. Andersen *et al* 2000). Cadmium er netop et af de metaller, der er meget af i den jord, der er tilplantet. Der findes mange forskellige kloner af pil, der kan afprøves. I

første omgang er der plantet Engelsk Pil (*Salix Viminalis*), da denne er kendt for at være meget robust og samtidig have en god tilvækst (Buhl 2005).

In-situ forsøget kan give et direkte udtryk for tungmetalloptaget under de givne feltforhold. Den samlede mængde metaller, der er optaget, kan registreres ved at høste materialet, måle koncentrationen af tungmetaller og sammenholde med den høstede mængde.

3.2 Ex-situ forsøg

Der er etableret et vækstkammer i en 20 fods skibscontainer på Materielpladsen umiddelbart ved siden af klasse 4 depotet på Selinevej. Vækstkammeret er indrettet således, at der er gode forhold for planterne. Isolering, temperaturstyring, befugtersystem og lysstofrør sikrer, at der er en konstant temperatur på 24 °C (+/- 1 °C), en luftfugtighed på 65 % RH (+/- 2%RH) og tilstrækkelig forsyning af lys.



Figur 3.2: Planter i vækstkammeret.

De optimale vækstvilkår betyder, at forsøgsrækkerne kan afsluttes relativt hurtigt. Dermed opnås der flere erfaringer, der efterfølgende forsøges implementeres i in-situ forsøget. I vækstkammeret er vækstvilkårene konstante, hvorfor forsøgsresultater fra forskellige forsøgsrækker umiddelbart bør kunne sammenlignes, selv om de laves på forskellige tider af året.

3.3 Drift af In-situ forsøget

Pilen er i sommerperioden blevet vandet dagligt. En enkelt gang er der spredt NPK-gødning over arealet i form af hønsemøg på pilleform, for at planternes vækst var ved at gå helt i stå.

Det er meningen, at planterne i depotet skal gro der i flere vækstsæsoner. Pilen høstes i vinterhalvåret. Dette er første gang gjort i januar 2006. Herefter vurderes det år for år, om pilen skal høstes. Høst af pilen sker af to årsager: For at kunne monitorere optaget af tungmetaller, samt for at optimere pilens vækst sæsonen efter. Efter høst skyder pilen igen fra rod, og sætter oftest flere og kraftigere skud, end der har været året før.

3.4 Drift af Ex-situ forsøg

Tre steder in-situ er der udtaget jord til brug for forsøgsrækkerne i vækstkammeret. De tre steder er udvalgt efter pilenes almene sundhedstilstand. Der er udtaget jord fra et område, hvor pilen gror godt (jord 1), jord fra et område, hvor pilen har en gennemsnitlig vækst (jord 2) og jord fra et område, hvor pilene er døde (jord 3). Derudover er der udtaget en kontroljord (ren jord). Denne er udtaget i Kongelunden på Amager i et område, der har været skovbevokset i mange år. Jorden er udtaget i 30-50 cm dybde. I denne dybde skønnedes indholdet af organisk stof at svare overens med indholdet i de tre andre jorde. Kontroljorden skal så vidt muligt have de samme egenskaber som de tre andre jorde, blot med den forskel, at den ikke er forurennet.

Generelt plantes alle planterne (uafhængigt af jordtype etc.) i kolber, der pakkes ind i stanniol, for at undgå algevækst. Kolberne lukkes med en korkprop, der slutter tæt omkring plantens stamme. Ved at tegne en streg på bordet og på kolben, markeres kolbens orientering i forhold til lyset. Dermed sikres det, at planterne hele tiden har samme orientering i forhold til omgivelserne. Disse forbehold tages, fordi planternes transpiration (den væskemængde træerne optager og udskiller gennem blade og stamme) er en vigtig faktor (bilag 1). Planterne har, inden de plantes, stået i vand i dagslys i et par uger, så at de er forspirede. De tildækkes med gennemsigtige plastikposer de første par dage efter plantning i containeren. Dette for at undgå, at de gror alt for meget de første dage. De skal stille og roligt vænne sig til at gro i den forurenede jord.

I vækstkammeret har der i perioden september 2005 – januar 2006 kørt 3 parallelle forsøgsserier:

Forsøgsserie a (etableret 16-17/9-05)

Forsøgsserien er plantet i kolber med 1400 g jord og 400 ml vand. Der er 23 planter i serien: Seks planter på jord 1, seks planter på jord 2, seks planter på jord 3 og fem planter på kontroljorden. Der er gentagelser for hver af de fire jordtyper for at sikre, at resultaterne ikke er tilfældige, samt at forsøgsresultaterne stadig er brugbare, selv om en plante eller to skulle gå ud undervejs. Planterne vejes jævnlige for at bestemme transpirationen. Når vægten er gået så meget ned, at alt vandet er ved at være forbrugt, vandes planten med 200 ml vand.

Forsøgsserie b (etableret 16-17/9-05)

Forsøgsserien er plantet i kolber med 1400 g jord og 400 ml næringssubstrat (fremover kaldet ”fuld Hoagland opløsning”). Som i forsøgsserie a indgår der 24 planter fordelt med seks til hver jordtype. Når vægten er gået så meget ned, at alt næringssubstratet er ved at

være forbrugt, vandes planten med 200 ml fuld Hoagland opløsning. Næringssubstratets sammensætning fremgår af bilag 2.

Forsøgsserie c (etableret 15/10-05)

Forsøgsserien er plantet i kolber med 1200 g jord og 300 ml næringssubstrat. Substratet, der anvendes i denne forsøgsserie, er dog fortyndet til $\frac{1}{4}$ af den koncentration, der anvendes i forsøgsserie b (fremover kaldet "1/4 Hoagland opløsning"). Som for de andre forsøgsserier gælder, at der er plantet 24 planter, fordelt med seks planter til de fire forskellige jordtyper. Disse vandes med 200 ml 1/4 Hoagland opløsning. Specielt for denne forsøgsserie gælder, at planterne er fordelt til de fire jordtyper alt efter størrelsen af deres initial-transpiration (bilag 1). Således opnås en jævn fordeling af planterne til de fire jordtyper.

Generelt er planterne blevet vejet og vandet 2-3 gange om ugen. Der er ført en logbog over eventuelle afvigelser mm. Der er undervejs taget en del billeder for at dokumentere planternes vækst og sundhed (se bilag 3).

Visne blade fra planterne i vækstkammeret er løbende blevet opsamlet i poser, så det tilslut er muligt, at bestemme det samlede optag af tungmetaller i de enkelte planter, ligesom det er muligt at bestemme koncentrationen af tungmetaller i plantens forskellige dele.

Den 4. november 2005 konstateredes der spindemider i planterne. Planterne blev derfor sprøjtet med vand tilsat økologisk opvaskemiddel i 8 dage. Herefter var midforekomsten så reduceret, at planterne efterfølgende kun blev sprøjtet med vand, samtidig med at de blev vejet og vandet. Efter forsøgets afslutning har Skadedyrsafdelingen i Miljøkontrollen sprøjtet vækstkammeret med Special 86, der er et udtræk af Chrysanthemum-blomster. Midlet virker mod insekter, herunder spindemider, og kan mindske risikoen for, at der kommer spindemider i planterne næste gang, der køres forsøg i kammeret.

3.5 Analyser

Som nævnt er der allerede under anlæggelsen af forsøget udtaget jordprøver til analyser for indhold af forureningskomponenter.

Disse analyser er siden hen suppleret med analyser af den jord, der er udtaget til anvendelse i ex-situ forsøget, samt analyser af kontroljorden. Af disse fire jordprøver er der tillige lavet analyser af total kulstofindhold (TOC), pH-værdier, røntgenanalyser for at fastsætte jordens mineralogi og sigteanalyse for at fastsætte dens tekstur.

Baggrundskoncentrationen af tungmetaller i piletræerne er fastsat ved at analysere piletræer af samme sort, men som kun har groet i uforurennet jord.

I depotet blev der høstet en lille mængde materiale i efteråret for at dokumentere metodens potentiale inden udgangen af 2005, samt for at få fastsat indholdet af metaller i

bladene, inden træerne tabte dem. Prøverne blev udtaget vilkårligt og homogeniseret inden analyse.

Ellers er pilen beskåret i uge 3, 2006 – dvs. at alle skud er klippet af to til tre cm fra stammen. I visse områder af beplantningen er planterne døde. Her er hele planten høstet, for at vurdere, om det var pga. forhøjede tungmetalkoncentrationer, at nogle af planterne døde. Der blev også udtaget separate prøver fra de ca. 20 piletræer, som ved etableringen blev plantet dybere end de øvrige piletræer. Det høstede materiale er analyseret på Institut for Miljø & Ressourcer på DTU. Før analysen er materialet blevet vejjet. For hver fraktion blev det indsamlede plantemateriale homogeniseret inden, der blev udtaget materiale til analyse.

I uge 3 er forsøgsserierne i vækstkammeret afsluttet og alle 72 planter er høstet. Under høsten er de enkelte plantedele holdt adskilt, så der kan gives et bud på, om optaget er størst i plantens grønne dele eller i veddet. Ligeledes er planterne i de enkelte forsøgsserier og de enkelte jordtyper holdt for sig, så det bliver muligt at give et bud på, hvad behandlingen har af betydning for metaloptaget på de tre jorde. Metodebeskrivelser for jordbunds- og metalanalyser er vedlagt i bilag 4.

3.6 Databehandling

De vejninger, som er foretaget løbende i vækstkammeret, er noteret for hver enkelt plante for at følge planternes transpiration. Den gennemsnitlige daglige transpiration (GDT) er et mål for træernes vandforbrug (g/d) og findes ved at beregne væggtabet siden sidste vejning. GDT kan variere meget fra træ til træ og kan også variere efter, hvor lang tid planterne forspires inden forsøgsstart. Derfor kan GDT kun bruges til at vurdere, hvordan de enkelte forsøgsserier trives og ikke til en direkte sammenligning af de forskellige forsøgsserier.

Den normaliserede relative transpiration (NRT) kan til gengæld bruges til at sammenligne planternes vækst i de forskellige jorde. Ved at normalisere transpirationen i forhold til den initiale transpiration kan træer med forskellig initial transpiration sammenlignes. Ved derefter at dividere med den normaliserede transpiration for kontrolplanterne viser NRT, hvordan planterne gror i den forurenede jord i forhold til planterne i den uforurenede jord. Hvis NRT for planterne i den forurenede jord er < 100% viser det, at planterne gror dårligere end planterne i kontroljorden.

NRT beregnes som:

$$NRT(jord,t) = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_i(jord,t) / T_i(jord,0)}{\frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m T_j(kontrol,t) / T_j(kontrol,0)}$$

hvor *jord* er hhv. jord 1, 2 eller 3, *kontrol* er kontroljorden, *t* er tidsperioden (d), *T* er absolut transpiration (g/d), *i* er prøve 1, 2, ..., n og *j* er kontrol 1, 2, ..., m (Trapp *et al.*, 2000).

4 Resultater og diskussion

4.1 Jordbundsanalyser

Undersøgelser af indholdet af forureningskomponenter i jorden i klasse 4 depotet viser, at jorden især indeholder høje koncentrationer af tungmetallerne zink (Zn), kobber (Cu), cadmium (Cd) og bly (Pb) (Se bilag 5). Heraf må især koncentrationen af de tre førstnævnte metaller forventes at påvirke pilen. Bly er hårdt bundet i jorden, og dermed meget lidt plantetilgængeligt (Garcia *et al* 2003).

De tre jorde fra depotet, som bruges i vækstkammeret samt kontroljorden, er alle analyseret for at fastsætte jordens kemiske egenskaber. Resultaterne kan ses i bilag 6. pH for jord 1-3 ligger omkring 7,5, hvilket er typisk for en kalkholdig jord. Dette bekræftes af røntgenanalysen, hvor der blev fundet calcite i jord 1-3. Derimod er der ingen calcite i kontroljorden. Heri er pH målt til 4.4. En historisk gennemgang af grunden, hvorfra jorden i depotet stammer, viser at arealerne som nogle af de sidste i Københavns Kommune har været anvendt til landbrug. I den forbindelse kan der være anvendt mergel og kalksalpeter til jordforbedring (Eriksen 2006). Begge dele indeholder en del kalk.

Sigteanalysen viser, at alle jordene er lerholdige med kontroljorden som den mest lerede.

Analyse af tungmetaller i alle jordene (Tabel 4.1) viste, at koncentrationerne af zink og cadmium er ca. dobbelt så høj i jord 1 og 3 som i jord 2, mens koncentrationen af kobber er ca. en faktor 20 højere. Da planterne rent visuelt gror bedre i det område, hvor jord 1 er udtaget, end de gør, hvor jord 2 er udtaget, kan det indikere, at det ikke er tungmetalkoncentrationerne i jorden men andre faktorer, der er bestemmende for planternes vækst. Således er jorden generelt meget kompakt. I nogle områder måske mere end andre. Dette kan give problemer for træernes rodudbredelse, samt problemer med dræningen.

Tabel 4.1. Koncentrationer (tørvægt) af zink (Zn), kobber (Cu) og cadmium (Cd) i jord 1-3 og kontroljord. Gennemsnit af 10 målinger. Standardafvigelse er angivet i parentes.

Jord	Koncentration (mg/kg TS)		
	Zn	Cu	Cd
Kontrol	30 (2)	7.4 (0.3)	0.3 (0.0)
1	3340 (310)	1360 (211)	17.8 (1.9)
2	1667 (197)	60 (10)	8.0 (0.8)
3	3110 (114)	1136 (42)	16.0 (0.8)

4.2 In-situ forsøget

Analyserne af den mindre mængde pil, der blev høstet i depotet i efteråret 2005 viste, at koncentration af alle metallerne var signifikant højere i både stamme og blade for træerne i depotet sammenlignet med kontroltræer (Tabel 4.2). Det skal nævnes, at plantematerialet ikke blev vasket/skyllet, inden det blev analyseret for tungmetaller. Partikelforurening på plantematerialet vil derfor bidrage til målingen af tungmetaller i

plantematerialet. Det forventes dog, at partikelforureningens bidrag til den samlede mængde tungmetal er begrænset.

For alle metallerne var koncentrationen højere i bladene end i stammen. Specielt for cadmium blev der fundet en overraskende høj koncentration i bladene og sammenlignes der med de tilsvarende værdier for jorden (Tabel 4.1), er der for cadmium en opkoncentringsfaktor > 5. Dette kan indikere, at den største fjernelse af cadmium fra jorden vil ske, hvis piletræerne høstes inden løvfald. Derved kan en spredning af tungmetallerne gennem løvet til omgivelser også undgås. Til gengæld opstår der det problem, at høst før vækstsæsonen er slut kan være direkte skadeligt for træernes vækst. Den optimale løsning vil være at høste træerne netop i den periode, hvor de står med visne blade, men ikke har tabt dem endnu.

Tabel 4.2. Koncentrationer (tørvægt) af zink (Zn), kobber (Cu) og cadmium (Cd) i kontrolpiletræer og piletræer, der har groet på depotet. Gennemsnit af 10 målinger. Standardafvigelse angivet i parentes.

		Koncentration (mg/kg TS)		
		<i>Zn</i>	<i>Cu</i>	<i>Cd</i>
Stamme	<i>Kontrol</i>	63.6 (4.3)	6.5 (0.9)	2.1 (0.2)
	<i>Depot</i>	452 (33)	14.1 (1.9)	29.0 (1.7)
Blade	<i>Kontrol*</i>	194	18.9	2.7
	<i>Depot</i>	2645 (126)	26.7 (0.8)	83.1 (7.2)

*Kun en måling

Analyserne af det materiale, der blev høstet i uge 3, 2006, viste bl.a. at kobberindholdet i de døde planter var signifikant højere end i de levende planter, mens koncentrationerne af de øvrige metaller var lavere i de døde planter i forhold til de øvrige planter (Tabel 4.3). Dette kan indikere, at det er planternes optag af kobber, der har slået dem ihjel. Jordbundsanalyserne viser, at der ikke er højere indhold af kobber i jorden, hvor planterne er døde (jord 3) end hvor jord 1 er udtaget, og her gror planterne godt. Derfor kan det tænkes, at kobberet findes på en mere plantetilgængelig form i de områder af depotet, hvor planterne er døde. I disse områder kan det overvejes at efterplante med andre arter, der har vist stor kobbertolerance. For de levende planter er de målte koncentrationer tæt på de koncentrationer, der blev målt i stammen inden løvfald (Tabel 4.2), dog med undtagelse af cadmium, der er en anelse lavere.

Forsøget med at plante nogle planter dybere viser ikke et mærkbart større optag af metaller. Hvis der skal være nogen effekt af at plante dybere, skal den da ligge i at planterne, der er plantet dybere, producerer en større biomasse. Det er dog umiddelbart svært at sammenligne, da de planter, der er plantet dybere, var større, da de blev plantet.

Tabel 4.3. Koncentrationer (tørvægt) af zink (Zn), kobber (Cu) og cadmium (Cd) i levende, døde og dybere plantede piletræer (stamme) der har groet på depotet. Gennemsnit af 10 målinger. Standardafvigelse angivet i parentes.

Stamme	Koncentration (mg/kg TS)		
	Zn	Cu	Cd
Levende planter*	429 (30)	13.0 (0.8)	20.2 (0.5)
Døde planter	156 (6)	29.3 (1.3)	4.5 (0.5)
Dybere planter**	313 (10)	13.4 (1.3)	10.9 (0.5)

*Gennemsnit af 20 målinger

**Planter der ved etableringen blev placeret i 50 cm dybde

Den totale høst af levende planter var 6,4 kg, hvilket i tørvægt svarer til 3,4 kg. Dette giver en samlet fjernelse på 1469 mg zink, 45 mg kobber og 69 mg cadmium, hvilket er en relativ lille delmængde af det samlede indhold af metaller i jorden. Disse værdier er dog ikke repræsentative for de kommende sæsoner. Både fordi biomassen ventes mangedoblet over de næste vækstsæsoner og fordi der ved beskæringen i uge 3, 2006, hovedsagligt blev høstet stammemateriale (og koncentrationen har vist sig at være størst i bladene).

4.3 Ex-situ forsøg

Ændringer i en plantes transpiration er som tidligere nævnt et godt mål for plantens velbefindende. I vækstsæsonen vil piletræer hele tiden øge deres transpiration, da deres bladareal og biomasse øges. Dette gælder også for piletræerne i vækstkammeret. Hvis planterne trives under forholdene, og forholdene ikke ændres, viser erfaringer fra tidligere forsøg, at de vil øge transpirationen i hvert fald de første 2-3 måneder, efter de er blevet plantet.

Forsøgsserie a og b blev startet den 17/9-05 mens forsøgsserie c blev startet den 14/10-05. I starten af forsøgene var transpirationen meget ustabil, både fordi det tager planterne tid at omstille sig fra at gro i vand til at gro i jord, men også fordi der var tekniske problemer i forsøgscontaineren. En egentlig registrering af transpirationen for de enkelte forsøgsserier påbegyndtes først, da der var opnået en relativt stabil transpiration, hvilket for forsøgsserie a og b var henholdsvis den 11/10-05 og 21/10-05 og for forsøgsserie c den 21/10-05. Når der i nedenstående figurer 4.1 og 4.2 henvises til dag 0, menes der derfor den dag, hvor der kunne konstateres en stabil transpiration og ikke den dag, hvor piletræerne er overført til jorden. Transpirationen for samtlige planter kan ses i bilag 7.

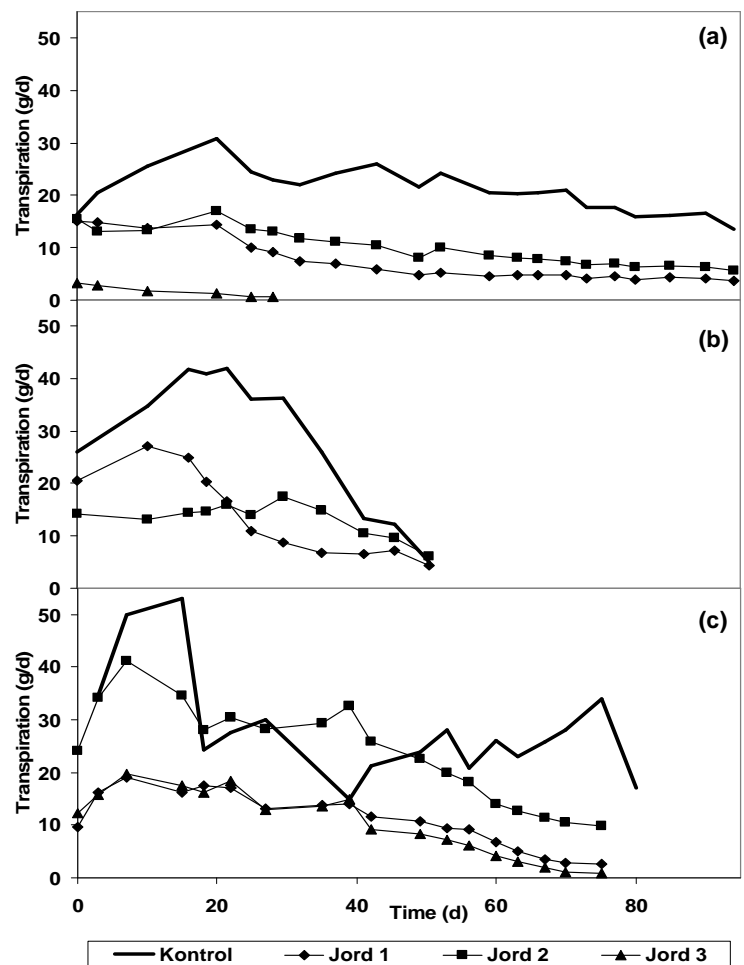
4.3.1 Gennemsnitlig daglig transpiration

Den gennemsnitlige daglige transpiration (GDT) er stigende de første 20 dage for planterne i kontroljorden i forsøgsserie a med vand (Figur 4.1 (a)). Derefter sker der et svagt fald i GDT fra 30 g/d (dag 20) til 14 g/d ved forsøgets afslutning (dag 94). For planterne i jord 1 og 2 er transpirationen lavere og relativt stabil de første 20 dage, hvorefter der også her ses et svagt fald over resten af forsøgsperioden.

For planterne i jord 3 skete der et kraftigt fald i GDT straks efter planterne var plantet i jorden. De havde tydelige vækstproblemer og var døde efter ganske få uger i jorden. At GDT for kontrolplanterne i den uforurenede jord begyndte at falde allerede efter 20 dage indikerer, at der i systemet er en væksthæmmende faktor. Dette kan muligvis være at der dannes anaerobe forhold omkring piletræernes rødder, da jorden indeholder meget ler, og ilt derfor vil have svært ved at trænge ned igennem jordsøjlen.

Det samme fald i GDT for kontrolplanterne efter ca. 20 dage sås også i forsøgsserie b (Figur 4.1. (b)). Her var faldet endda endnu hurtigere, og forsøget blev stoppet efter ca. 50 dage, da planternes tilstand på dette tidspunkt var meget ringe. Som i forsøgsserie a overlevede planterne i jord 3 kun kort tid og de er ikke medtaget i figuren. Det hurtige fald i GDT for kontrolplanterne indikerer at planterne ikke trives i næringsopløsningen. Dette kan skyldes, at jorden indeholder en del næringsstoffer og salte og når den så tilføres yderligere næringssubstrat, så bliver saltindholdet i transpirationsvandet muligvis for højt.

I forsøgsserie c er GDT for kontrolplanterne meget varierende med pludselige fald og stigninger. Det skyldes sandsynligvis, at planterne ikke har fået nok 1/4 Hoagland opløsning, hvorefter de har sænket transpiration for så at hæve den igen, når der blev tilført nyt vand. Det samme tendens ses ikke for planterne i jord 1-3. Her stiger GDT de første 10 dage for derefter, som i de øvrige serier, at falde gennem resten af forsøgsperioden (Figur 4.1. (c)). Planterne i jord 2 transpirerer væsentlig mere end planterne i jord 1 og 3. Dette kan skyldes, at planterne i jord 2 trives bedre, men det skyldes sandsynligvis at disse planter fra forsøgets start var større. Forsøgsserie c var den eneste serie, hvor det lykkedes at få planterne i jord 3 til at gro. Rent visuelt var det også den forsøgsserie, hvor planterne generelt så ud til at trives bedst. Om det skyldes, at 1/4



Figur 4.1. Gennemsnitlig daglig transpiration (g/d) for piletræer i jord 1-3 og kontroljord i (a) Forsøgsserie a med vand; (b) Forsøgsserie b med fuld Hoagland opløsning; (c) Forsøgsserie c med 1/4 Hoagland opløsning. Gennemsnit af 5-6 planter i hver jord.

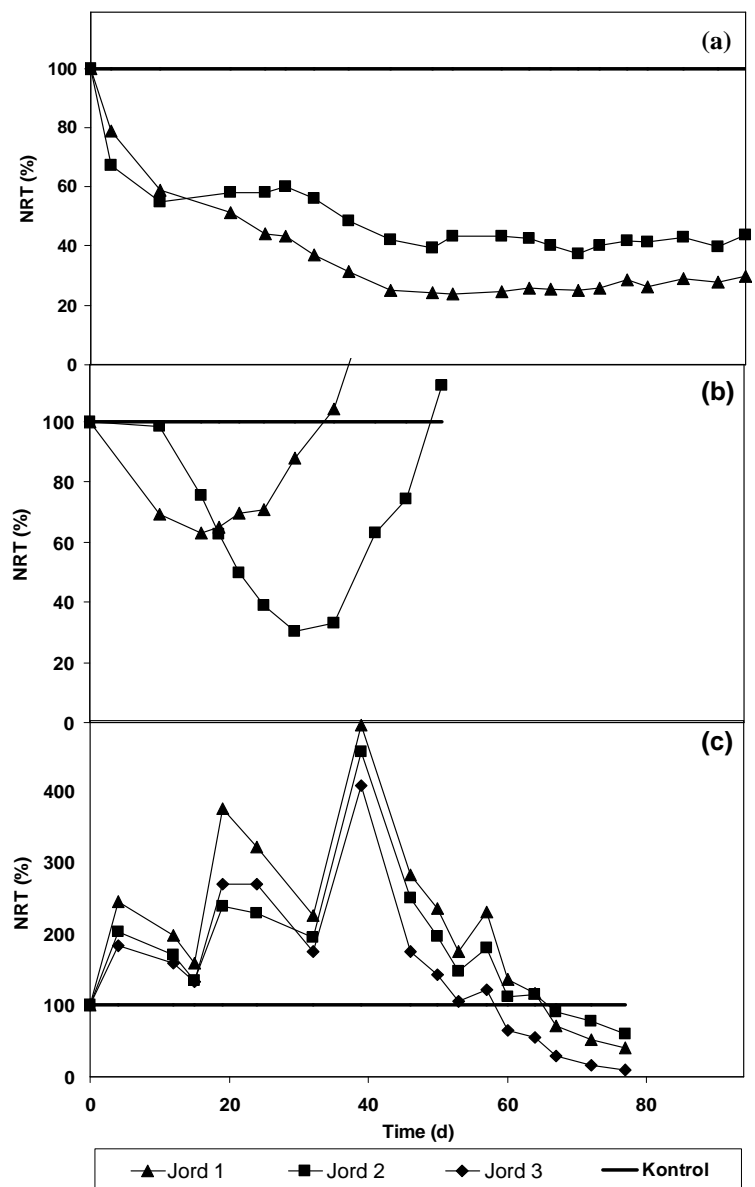
Hoagland opløsning er det bedste medie for planterne eller det skyldes, at planterne er plantet i en mindre mængde jord, så at risikoen for anaerobe forhold er mindre, vides ikke.

4.3.2 Normaliseret relativ transpiration

I forsøgsserie a ses det tydeligt at planterne i jord 1 og 2 gror væsentligt dårligere end planterne i kontroljorden (Figur 4.2 (a)). Efter ca. 40 dage er NRT for planterne i jord 1 < 30% og ca. 40% for planterne i jord 2.

I forsøgsserie b sker der også et fald i NRT for planterne i jord 1 og 2. Efter ca. 20 dage er NRT faldet til 60% for jord 1, mens den er faldet til 30% for jord 2 efter 30 dage. Herefter sker der en stigning i NRT til langt over 100% for begge jorde. Dette er ikke et udtryk for, at planterne pludselig begynder at gro meget bedre end kontrolplanterne, men skyldes udelukkende, at faldet i den gennemsnitlige daglige transpiration (GDT) for kontrolplanterne er meget stort.

Grafen for NRT for forsøgsserie c (Figur 4.2. (c)) ser meget anderledes ud end de øvrige. Det skyldes den meget svingende GDT for kontrolplanterne i forsøgsserie c (Figur 4.1. (c)). Et pludseligt fald i kontrolplanternes transpiration vil medføre en pludselig stigning i NRT for planterne i jord 1-3, som det f.eks. ses ved dag 20 og dag 40. Det er derfor desværre ikke muligt at sige noget om planternes vækst og trivsel i jord 1-3 ud fra Figur 4.2. (c).



Figur 4.2. Normaliseret relativ transpiration (NRT, %) for piletræer i jord 1-3 og kontroljord i (a) Forsøgsserie a med vand; (b) Forsøgsserie b med fuld Hoagland opløsning; (c) Forsøgsserie c med 1/4 Hoagland opløsning. Gennemsnit af 5-6 planter i hver jord.

4.3.3. Optag af tungmetal i planter

Planterne, der blev brugt i forsøgsserie a-c, blev ved forsøgenes afslutning fjernet fra jorden og opdelt i stamme og blade+topskud. Derefter blev koncentrationen af tungmetaller (Cd, Cu og Zn) målt i både stamme og blade+topskud for samtlige planter. Forsøgsvis blev der også målt indhold af bly (Pb) i de første prøver. Da indholdet var under detektionsgrænsen, blev der ikke målt for Pb i resten af materialet. Koncentrationen af tungmetaller i planternes rødder blev ikke bestemt, da det hverken i ex-situ eller in-situ forsøgene vil være muligt eller hensigtsmæssigt at fjerne/høste planternes rødder. Samtlige data samt et eksempel på en statistisk beregning kan ses i bilag 8.

Generelt er de målte koncentrationer væsentligt højere i blade+topskud end i stamme (Tabel 4.4), men da massen af stammen er langt større end massen af blade+topskud, findes langt den største del af tungmetallerne i stammen (Tabel 4.5). Det viser dog, at metallerne transporteres med transpirationsvandet fra jorden, gennem rødderne og stammen til bladene, hvor de akkumuleres. Derfor vil man sandsynligvis se, at koncentrationen af tungmetaller i bladene vil stige gennem hele vækstsæsonen, mens koncentrationen i stammen vil forblive relativt stabil.

I forhold til de koncentrationer, der er målt i træerne, der har groet på depotet (Tabel 4.2 og 4.3), er de målte koncentrationer i træerne fra forsøgsserie a-c væsentlig lavere. Dette kan blandt andet skyldes, at planterne i depotet har transpireret mere vand. De er påvirkede af vind og der er derfor en fordampning, der er større end i vækstkommeret. Derved passerer der mere vand gennem planten.

Forskel mellem jordene

Da der findes tungmetaller i praktisk taget alle jorde, forventes det, at der også i kontroltræerne kan måles tungmetaller. Da pH i kontroljorden samtidig er væsentlig lavere, vil det også forventes at tungmetallerne i kontroljorden er mere plantetilgængelige. Et af de væsentligste spørgsmål er, hvorvidt koncentrationen af tungmetaller i planterne, der har vokset i de forurenede jorde, er højere end i planterne, der har vokset i kontroljorden. Samtidig er det selvfølgelig også interessant at se, om optaget fra de forurenede jorde er forskellig.

Som det ses i Tabel 4.4 er der for alle forsøgsserier målt lavere koncentrationer af alle tungmetaller i både blade+topskud og stamme i kontrolplanterne i forhold til planterne i jord 1-3. Statistiske test for data på cadmium viste i alle tilfælde, at koncentrationen af cadmium i kontrolplanterne er signifikant lavere på 90% niveau, og i de fleste tilfælde på 95% eller 99% niveau¹ (se bilag 8).

¹Signifikansniveau bruges til at vurdere, om der er forskel mellem gennemsnitsværdier for 2 forskellige forsøgsserier. 90% er det laveste niveau, hvor der kan tales om signifikant forskel. Jo højere signifikansniveau, jo større er den statistiske sikkerhed for, at de to gennemsnit er forskellige.

Tabel 4.4. Gennemsnitlige koncentrationer af cadmium (Cd), kobber (Cu) og zink (Zn) i henholdsvis blade og stamme for jord 1-3 og kontroljord i forsøgsserie a-c (tørvægt). Gennemsnit af 5-6 træer. Samtlige resultater, standardafvigelser, konfidensintervaller og eksempler på statistiske beregninger kan ses i bilag 8.

Forsøgsserie	Jord	C _{blade+topskud} (mg/kg TS)			C _{stamme} (mg/kg TS)		
		Cd	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn
a (vand)	1	6.6	24.7	345.6	2.9	5.2	86.5
	2	6.3	19.9	407.1	3.3	4.7	109.4
	3	8.7	19.4	288.2	3.1	4.5	84.3
	Kontrol	3.1	12.3	215.8	2.5	3.9	84.2
b (1/1 Hoagland)	1	15.3	34.0	626.9	5.0	7.5	107.2
	2	7.6	26.0	396.1	3.6	5.4	99.2
	3	8.9	18.1	367.7	3.4	6.4	89.8
	Kontrol	5.9	15.6	224.0	2.8	4.3	88.3
c (1/4 Hoagland)	1	7.7	23.2	236.8	3.8	6.0	94.7
	2	8.2	33.0	596.3	3.5	7.8	155.3
	3	9.9	33.1	277.8	4.0	13.0	107.6
	Kontrol	4.4	14.9	172.4	3.0	5.1	81.2

Hvis der ses nærmere på forskellen mellem de forurenede jorde, så kan der ikke siges noget generelt om optaget fra den ene jord i forhold til den anden jord. I nogle tilfælde er koncentrationen i planterne fra jord 1 signifikant højere end planterne i jord 2. I andre tilfælde er det omvendt, og nogle gange er der ikke signifikant forskel mellem de forskellige jorde.

Forskel mellem forsøgsserierne

Der er produceret en stor mængde data, og det er derfor nødvendigt at udvælge fokusområder. F.eks. kan der fokuseres på koncentrationen af cadmium i blade+topskud for jord 1. Her viser statistiske tests (t-test) af de målte data, at der ikke er nogen signifikant forskel på de målte koncentrationer i forsøgsserie a (vand) og forsøgsserie c (1/4 Hoagland). Bladene i forsøgsserie b (1/1 Hoagland) har derimod en koncentration af cadmium, der er signifikant højere end forsøgsserie a og c (95% niveau).

Kigges der i stedet på kobber i blade+topskud for jord a, er tendensen ikke den samme. Her er der ingen signifikant forskel mellem de 3 forsøgsserie (variationsanalyse).

Heller ikke for jord 2 og 3 ses den samme tendens for cadmium og kobber i de forskellige forsøgsserier.

Tabel 4.5. Gennemsnitlig masse af cadmium (Cd), kobber (Cu) og zink (Zn) i henholdsvis blade og stamme for jord 1-3 og kontroljord i forsøgsserie a-c (tørvægt). Gennemsnit af 5-6 træer. Samtlige resultater, standardafvigelser, konfidensintervaller og et eksempel på statistiske beregninger kan ses i bilag 8.

Forsøgsserie	Jord	Blade+topskud (mg)			Stamme (mg)			Total (mg)		
		Cd	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn
A (vand)	1	0.004	0.014	0.195	0.047	0.085	1.383	0.051	0.099	1.578
	2	0.01	0.016	0.329	0.06	0.082	1.918	0.065	0.099	2.246
	3	0.001	0.002	0.026	0.036	0.052	0.950	0.037	0.054	0.976
	Kontrol	0.004	0.017	0.311	0.044	0.068	1.438	0.048	0.085	1.749
B (1/1 Hoagland)	1	0.015	0.035	0.591	0.101	0.149	2.154	0.116	0.184	2.745
	2	0.006	0.018	0.274	0.075	0.112	2.010	0.080	0.130	2.285
	3	0.001	0.002	0.039	0.057	0.106	1.495	0.058	0.108	1.535
	Kontrol	0.003	0.007	0.101	0.035	0.053	1.075	0.038	0.060	1.176
C (1/4 Hoagland)	1	0.006	0.018	0.216	0.049	0.079	1.202	0.055	0.097	1.418
	2	0.011	0.044	0.824	0.054	0.119	2.547	0.065	0.163	3.370
	3	0.006	0.018	0.155	0.051	0.154	1.346	0.056	0.172	1.501
	Kontrol	0.009	0.030	0.352	0.027	0.044	0.703	0.035	0.074	1.055

Med baggrund i de opnåede data vurderes det ikke, at nogen af de brugte næringsopløsninger (1/4 Hoagland eller 1/1 Hoagland) vil stimulere optaget af tungmetaller i forhold til at bruge vand.

5 Konklusion

- Metoden har et potentiale idet, der er fundet et højere indhold af metaller i planter, der har groet i den forurenede jord end i planter, der ikke har groet i forurenede jord. Dog udgør det samlede optag kun en meget lille del af de metaller, der findes i jorden. Det skønnes derfor, at der er behov for en udvikling af metoden.
- Forsøget har vist, at jorden alt efter beskaffenheden bør forarbejdes inden plantning. Jorden stampes traditionelt hårdt, netop fordi den skal være så stabil som muligt. Dette princip bør fraviges i den øvre del af jordmatricen, hvis der skal plantes pil.
- Pilen bør høstes i efteråret lige inden løvfald, for at fjerne flest mulige tungmetaller fra arealet og for at undgå utilsigtet spredning af metallerne.
- Der er fundet forhøjet koncentration af kobber i de døde planter på depotet, hvilket kan indikere, at planterne døde af kobberforgiftning. Da koncentrationen af kobber i jorden generelt er meget høj, kan det give problemer i forhold til beplantning med piletræer. Der kan evt. kigges nærmere på, om kobberet findes på mere eller mindre plantetilgængelige former.
- Der kan ikke dokumenteres et større optag af tungmetaller i planterne ved brug af næringssubstrat (1/1 eller 1/4 Hoagland) i forhold til vand. Ud fra en visuel vurdering groede planterne, som blev vandet med 1/4 Hoagland, bedst.

6 Perspektivering

Forsøget er som nævnt flerårigt, og forventningen til forsøget er, at miljøeffekten kan øges med tiden – metoden kan således optimeres, så oprensingshorisonten forkortes. Metoden kan optimeres på flere måder, men der er antageligt to hovedtilgange til dette:

1) Jo større transpirationen er på arealet, jo større vil optaget alt andet lige være. Transpirationen øges i øvrigt alt andet lige, når biomassen gør det. Derfor er det vigtigt, at planternes biomasseproduktion optimeres. Dette kan gøres ved at optimere høstmetoder og behandling generelt samt ved at anvende arter, der traditionelt har en stor biomasseproduktion under danske forhold. Derudover kan biomassen pr. arealenhed også øges ved at anvende arter, der kan gro sammen i flere etager (f.eks. bregner under træer).

2) Der kan ændres på de jordbundsforhold, der er af størst betydning for metallernes frigivelse til jordvæsken og dermed deres biotilgængelighed. Dette er forhold som pH-værdien, iltindholdet i jorden (redoxforhold), indholdet af organisk stof og indholdet af phytochelatorer (enzymet planten udskiller for at øge optaget af f.eks. tungmetaller).

I 2006 startes forsøg op, hvor virkningen af en sænkning af pH undersøges. Som det fremgår af bilag 6, er pH i jorden relativ høj. Bindingsforholdene i jord er generelt således, at tungmetallerne netop er hårdest bundet ved høje pH-værdier. Derfor vil en sænkning af pH sandsynligvis medføre en øget mobilisering af stofferne. Dette må forventes at øge planteoptaget, men kan også risikere at føre til en øget udvaskning. Forsøgene startes under kontrollerede forhold i vækstkammeret, hvor der kan opnås erfaringer med, hvor stor en pH-sænkning planterne kan tåle og med hvilken hastighed, det kan gøres. Det er vigtigt at kortlægge, hvilke pH-værdier, der frigiver en mængde metaller, der er stor, men ikke så stor at planterne dør. Ligesom det er nødvendigt ikke at frigive mere, end planterne rent faktisk optager. For at klarlægge disse forhold nøje, er det planen at kortlægge jordens udvaskningsegenskaber. Det gøres ved at pH-sænkningen efterfølgende udføres i et af de lysimetre, der etableres i klasse 4 depotet på Selinevej (se bilag 9). Her kan udvaskningen over tid følges. Efterfølgende kan der opstilles brugervenlige modeller for renseeffekt og akkumulering af jordens forureningsparametre gennem kendskabet til nedbrydningen og udvaskningen. Disse kan fungere som vigtige styreredskaber ved anvendelse af metoden – også på andre lokaliteter.

De to tilgange (1+2) bør kombineres: Viden om planters transpiration under danske forhold, samt deres evne til at gro sammen, kan som nævnt udnyttes til at maksimere transpirationen pr. arealenhed. Dette er vigtigt, når der ændres på jordens egenskaber, så metallernes frigivelse til jordvæsken øges, da det kan give større risiko for udvaskning af forureningsparametre til grundvandet. En stor transpiration hos planterne modvirker udvaskningen og sikrer samtidig, at optaget i planterne bliver størst muligt.

Idet planterne optager størstedelen af metallerne gennem den jordvæske, de forbruger, kan man forestille sig, at man ved at anvende metoden netop får nedbragt den mængde af metaller, der er mest mobile og som derfor også har størst risiko for at spredes til f.eks. grundvandet. Dette kan undersøges ved udvaskningstests, idet disse giver mulighed for at

følge udvaskningen for jord, der er tilplantet med pil og jord, der ikke er tilplantet med pil.

For jorde forurenet med tungmetaller gælder, at oprensning med nuværende teknikker er relativt dyr og belastende for miljøet, ligesom jordens fysiske og kemiske egenskaber ødelægges. Netop derfor er forsøgene indtil nu koncentreret om tungmetalforurenede jorde. På sigt kunne det være interessant at beskæftige sig med jorde, der ikke kun indeholder tungmetaller. Der er påvist et stort potentiale af metoden i forhold til organiske forureninger (f.eks. olie- og cyanidforurenede jorde). Ved at udvikle metoden på blandingsforurenede jorde, kan der måske spares store ressourcer: Pt. renses de blandingsforurenede jorde først for de organiske komponenter, hvorefter de deponeres. Oprensningstrinnet kunne måske på sigt undlades ved, at jorden i stedet renses med pil eller andre arter, efter den er deponeret.

Sidst men ikke mindst kan fyto Remediering kombineres med andre metoder til oprensning af forurenet jord, f.eks. geooxidation, hvor der sendes strøm gennem jorden for at gøre forureningskomponenterne mere mobile og tilgængelige for f.eks. mikroorganismer.

7 Referencer

Andersen, L. ; Holm, P.E.; Lehmann, N. K. J.; L. Samsøe-Petersen, U. Jørgensen & J. Vestergård Madsen (2000): *Phytooprensning af metaller*. Forprojekt. Miljøprojekt nr. 536. Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen.

Buhl, H. (2005): Personlig meddelelse. Arresø pil. www.arresoe-pil.dk

Eriksen, J. (2006): Personlig meddelelse. Kontor for Jordforurening og afværgeforanstaltninger, Miljøkontrollen, Københavns Kommune.

Garcia, G.; Faz, A. & Conesa, H. M. (2003): Selection of autochthonous plant species from se spain for soil lead phytoremediation purposes. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 3. pp 243-250.

Kalisova-Spirochova, I.; Puncocharova, J; Kafka, Z; Kubal, M.; Soudek, P. & Vanek, T. (2003): Accumulation of heavy metals by in vitro cultures of plants. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 3. pp. 269-276.

McIntyre, T. (2003): Phytoremediation of Heavy Metals from Soils. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, Vol. 78.* pp 97-123.

Miljøstyrelsen (2000): *Planter kan rense forurennet jord*. Netpublikation: http://www.mst.dk/udgiv/artikler/2000/00_110.htm.

Prasad, M.N.V. (2003): Phytoremediation of Metal-Polluted Ecosystems: Hype for Commercialization. *Russian Journal of Plant Physiology.* Vol. 50, no 5. pp. 686-700.

Trapp, S.; Zambrano, K.C.; Kusk, K.O. og Karlson, U. (2000): A phytotoxicity test using transpiration of willows. *Arch. Environ. Con. Tox.* 39. pp 154-160.

Bilag 1 Transpiration

Bilaget beskriver, hvorfor transpirationen er en vigtig faktor samt hvordan, der tages hensyn til dette under forsøgsgangen i ex-situ forsøget.

B 1.1 Transpiration generelt

Når planternes transpiration er en vigtig faktor at fastsætte skyldes det, at optaget af tungmetaller netop sker med transpirationsvæsken. Transpirationen bruges til at måle toksiciteten med. Vha. kontrollerne i ren jord kan det fastsættes, hvor meget vand et ”sundt” piletræ transpirerer. Hvis træerne, som gror i den forurenede jord, transpirerer mindre, tyder det på, at tungmetallerne har en toksisk effekt på piletræerne.

Ved at måle transpirationen og metalindholdet i træerne, kan koncentrationen af metal i den transpirerede væske derudover beregnes. Hvis koncentrationen af metal i jordvæsken samtidig måles, kan det vurderes, om planterne optager alt det opløste metal eller om de er i stand til at ekskludere metallet, det vil sige, optage vandet *uden* at optage metallet. Derved bliver det muligt at vurdere, om det kan lade sig gøre, at få planterne til at optage mere metal ved at ændre jordbundforhold og derved frigive flere metaller.

I forsøgsgangen tages der hensyn til, at transpirationen er en vigtig faktor: Kolberne skal lukkes tæt fordi transpirationen udelukkende fastsættes ud fra vægten af kolberne med planter i; det er derfor vigtigt, at der ikke fordamper væske fra kolberne. Ligeledes må træernes orientering i forhold til omgivelserne ikke ændres, i det de da vil ændre deres transpiration pga. ændret lysindfald, træk, temperatur m.m. Dette vil gøre det umuligt at konstatere, om en ændring i transpirationen over tid skyldes ændrede vækstbetingelser eller en toksisk effekt.

B 1.2 Fastsættelse af initialtranspiration

For forsøgsrække c gælder, at planterne er fordelt til de fire jordtyper alt efter størrelsen af deres initial-transpiration.

Initialtranspirationen fastsættes som følger: De 24 planter er til at starte med placeret i vand i kolberne i tre døgn. Hver 24. time vejes de for at se, hvor meget de har transpireret. Planterne rangordnes efter, hvor meget de i gennemsnit har transpireret pr. døgn. Herefter fordeles planterne til de 4 jordtyper således, at der både er planter med et stort transpirationspotentiale og planter med et mindre transpirationspotentiale for hver jordtype. Metoden er almindelig anvendt (Trapp *et al.* 2000). Den sikrer, at der ikke ved et tilfælde er foregået en skæv fordeling, f.eks. sådan at de seks planter med det største transpirationspotentiale alle er samlet på den samme jordtype. Det ville give et skævt billede af tungmetalloptaget de fire jordtyper imellem.

Bilag 2 Næringssubstrat

Ved tilsætning af næringsstoffer til planterne i vækstkammeret er Hoaglands næringssubstrat anvendt.

1 liter færdigblandet næringssubstrat indeholder følgende:

Makronæringsstoffer:

6,0 ml KNO_3

4,0 ml $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$

2,0 ml $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

2,0 ml $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Mikronæringsstoffer (samlet 2 ml):

KCL

H_3BO_3

$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

H_2MoO_4

Herudover:

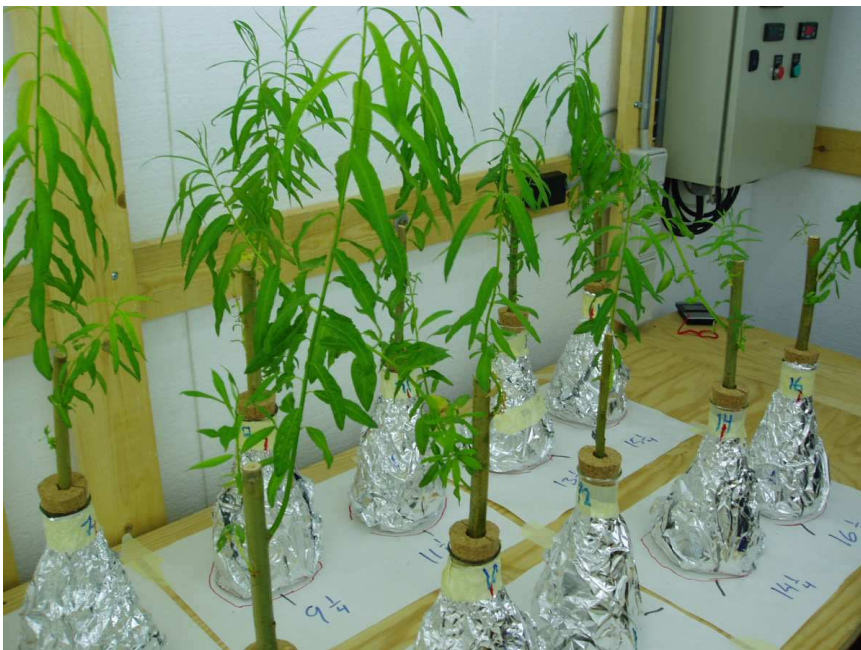
0,3 ml NaFeDTPA

Ovenstående er anvendt til forsøgsserie b. Substratet anvendt til forsøgsserie c består af de samme stoffer i samme forhold, men er fortyndet så en del færdigblandet næringssubstrat efterfølgende er tilsat tre dele vand.

Bilag 3 Billeder



Billede 1: Pil plantet i depotet. Af billedet fremgår det, at pilen gror ret forskelligt. De 2 rækker er sunde, mens rækken yderst til venstre har meget lav tilvækst, og for mange planters vedkommende helt er gået ud.



Billede 2: Planterne i vækstkammeret responderede på, at de groede i forskellig jord, samt fik forskellige mængder af næringssubstrat. Her ses planter på jord 1 og 2, som vandes med $\frac{1}{4}$ Hoagland opløsning, for forsøgsserie c.



Billede 3: Planter der gror på jord 3 og som vandes med vand i forsøgsserie a. Planterne døde kort efter forsøgets start. Af størst betydning er nok, hvilken jord de er plantet i.

Bilag 4 Analysemetoder

Tungmetaller

Tungmetaller i jord og planter blev analyseret ifølge ISO 15586:2004 standard for tungmetaller i sediment. Jord og planter blev ovntørret ved 105°C i 2 timer hvorefter stammerne fra planterne blev findelt i en affaldskværn. Metallerne blev opløst fra det ovntørrede materiale med 7M HNO₃ i en autoclave (125°C, 2 atm, 30 min.). De opløste metaller blev målt på en Perkin Elmer 5000 Atom Absorptions Flamme Spektrofotometer.

pH

pH i jorden blev målt ifølge ISO 10390:2005 standard. Jorden sigtes til diameter < 2 mm. 1 del jord udrystes i 5 minutter i 5 dele 1M KCl. pH måles efter 2 og 23 timers henstand.

TOC (total organisk carbon)

En sedimentprøve eller jordprøve tørres ved 105°C og homogeniseres. Prøven afvejes i digler og forbehandles herefter med svovlsyrling (H₂SO₃) for at fjerne evt. uorganisk carbon. Efter sidste behandling med svovlsyrling tørres prøven i varmeskab 105°C. Der analyseres på en Leco Analyzer (Leco Cs-225). På Leco analyzieren brændes prøven af ved 800°C i en induktionsovn og forbrændingsgassens indhold af CO₂ detekteres ved hjælp af en IR-detektor, hvorved prøvens indhold af total carbon bestemmes.

Overfladeareal

Jordprøvernes specifikke overfladeareal blev målt med gas adsorption (nitrogen) ifølge metoden udviklet af Brunauer, Emmet og Teller (BET). Målingerne blev udført på en MICROMERITICS GEMINI III-2375 Surface Area Analyzer.

Sigteanalyse

Bestemmelse af jordens partikelstørrelsesfordeling (tekstur), samt separation af lerfraktionen kræver, at partiklerne er dispergerede i en vandig opløsning. I få tilfælde kan dette opnås blot ved at ryste jorden i vand ellers ved en ultrasonisk behandling af jorden. Efter dispergering, passerer jorden gennem en 63 µm sigte. Fraktionerne >63 µm bestemmes herefter ved yderligere sigtning gennem sigter med forskellige størrelser af netmasker. Til at separerer fraktionen mindre end 63 µm anvendes en sedigraf.

Røntgenanalyse

X-rays (røntgenstråler) består af energiholdig elektromagnetisk stråling, der ioniserer det stof, de rammer. Dette sker ved at der fraspaltes elektroner fra de enkelte atomer i stoffet. Graden af ionisering, absorption og ændring af stoffets molekylære struktur afhænger af strålingens kvantitet og kvalitet. Hvert stof har dets eget unikke, karakteristiske X-ray mønster, som kan bruges til at identificere stoffet.

Bilag 5 Jordbundsanalyser



RGS 90
Selinevej 4
2300 København S

Att: Frank Lauersen, afd 87

Journal nr.:
G205-02518
Side 1 af 1
02.04.2005 CP
Direkte telefon til laboratoriet: 79 24 72 51

A/S AnalyCen
CVR nr. 17 14 86 72
Vesterballevej 4 · DK-7000 Fredericia
Tlf. (+45) 75 94 50 30, fax (+45) 75 94 50 37
www.analycen.dk

Undersøgelse af Jord

Kunde sagnr: 40025
Kunde sagnavn: KMC/MSO
Prøve modtaget: 30.03.2005 13:50
Analyse påbegyndt: 30.03.2005
Analyse afsluttet: 02.04.2005

Løbenummer: 01 02 03
Prøve ID: 1A 2A 3A

Undersøgelser	Metode	CV%	DL	Enhed	873000	891000	882000
Torstof	DS.204			mg/kg VV			
Total kulbrinter	KG.22A			mg/kg TS	41	52	50
C6H6-C10	KG.22A		2,0	mg/kg TS	<2,0	<2,0	<2,0
>C10-C25	KG.22A		5,0	mg/kg TS	9,8	12	15
>C25-C35	KG.22A		20	mg/kg TS	32	40	34
Fluoranthen	KG.17		0,005	mg/kg TS	0,20	0,35	0,21
Benz(b)kfluoranthen	KG.17		0,005	mg/kg TS	0,21	0,38	0,22
Benz(a)pyren	KG.17		0,005	mg/kg TS	0,14	0,26	0,15
Indeno(1,2,3)pyren	KG.17		0,005	mg/kg TS	0,093	0,17	0,098
Dibenz(a,h)anthracen	KG.17		0,005	mg/kg TS	0,022	0,043	0,025
#Sum 7 Stk MST PAH	KG.17			mg/kg TS	0,67	1,20	0,71
Cadmium	KM 9	15	0,05	mg/kg TS	7,7	15	7,3
Chrom	KM 9	11	0,2	mg/kg TS	7,4	10	12
Kobber	KM 9	12	0,5	mg/kg TS	620	1200	490
Nikkel	KM 9	12	0,6	mg/kg TS	7,4	9,7	11
Bly	KM 9	14	0,9	mg/kg TS	280	470	220
Zink	KM 9	10	0,5	mg/kg TS	2100	3300	1700
Arsen	KM 9	12	1	mg/kg TS	28	25	15

G205-2518.1-3:

Kromatogrammet viser indhold af kulbrinter med et kogepunktsinterval som motor/smøreolie.

Prøven til analyse for totalkulbrinter er ekstraheret med pentan indeholdende brombenzen og ortho-terphenyl som interne standarder.

Prøven til analyse for PAH'er er ekstraheret med toluen indeholdende phenanthren-d10, fluoranthen-d10 og benz(a)pyren-d12 som interne standarder

Med venlig hilsen

Laborant Christina Pedersen

CV% Målesikkerhed DL: Detektionsgrænse
Undersøgelser mærket # er ikke omfattet af akkrediteringen.
Analyserapporten vedrører kun det prøvede emne. Analyserapporten må ikke gengives udtagen i sin helhed.

Bilag 6 Jordens kemiske egenskaber

Tabel 1. pH, total organisk kulstof (TOC) samt overfladeareal for jord 1-3 og kontroljord.

Jord	pH*		TOC (%)		Overfladeareal (m ² /g)	
	pH efter 2 t.	pH efter 23 t	Av. (n=10)	Std. Dev	Av. (n=6)	Std. Dev
1	7.2	7.3	1.41	0.101	9.46	0.25
2	7.6	7.4	1.44	0.081	8.43	0.26
3	7.5	7.4	1.26	0.119	8.80	0.29
Kontrol	4.4	4.4	1.00	0.297	5.73	0.14

Tabel 2. Sigteanalyse af jord 1-3 og kontroljord.

Maskevidde (mm)	Vægt %			
	Jord 1	Jord 2	Jord 3	Kontrol
2.000	18.06	13.09	13.41	5.58
1.000	4.31	4.50	4.50	2.96
0.600	4.26	5.06	4.55	2.95
0.355	6.54	8.15	7.22	5.64
0.250	8.59	9.66	9.96	6.92
0.180	8.73	8.54	10.01	7.85
0.125	8.40	8.85	9.10	9.82
0.900	6.18	6.26	6.47	8.63
0.063	3.20	2.68	3.05	5.50
Bund (silt og ler)	31.74	33.20	31.73	44.15
Sum	100.00	100.00	100.00	100.00

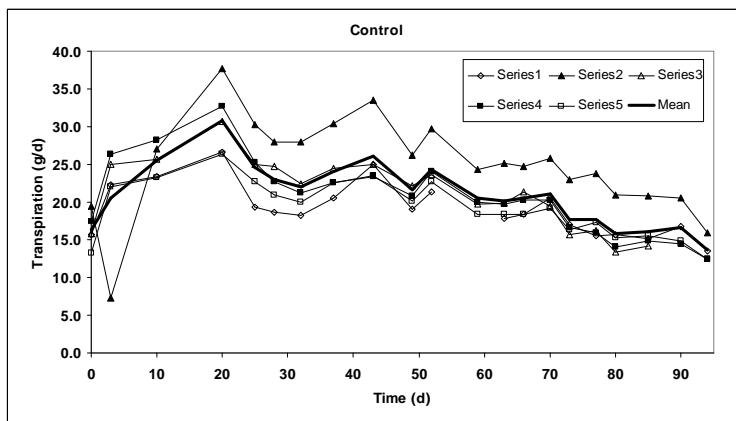
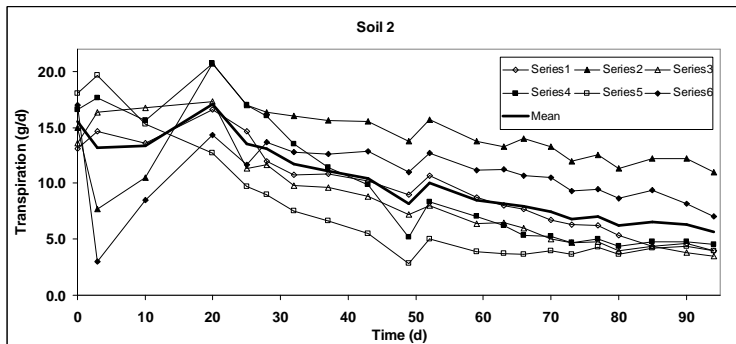
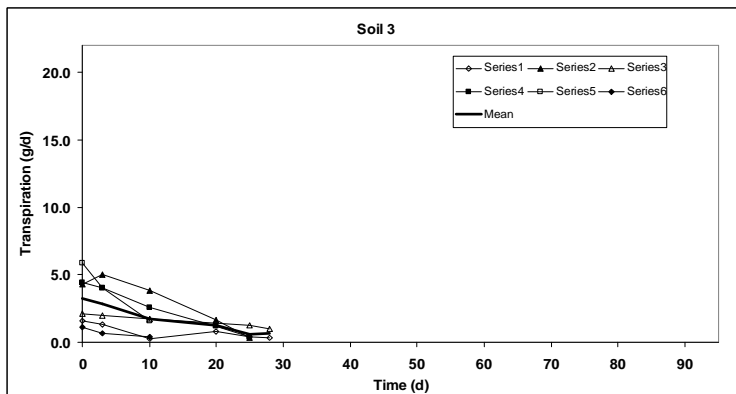
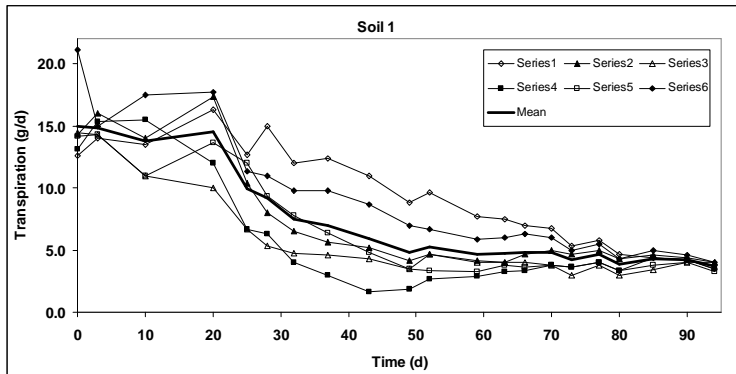
Tabel 3. Røntgenanalyse af jord 1-3 og kontrol jord.

	Quartz	Feldspar*	Calcite
Jord 1	+	+	+
Jord 2	+	+	+
Jord 3	+	+	+
Kontrol	+	+	-

*kalium feldspar/plagioclase

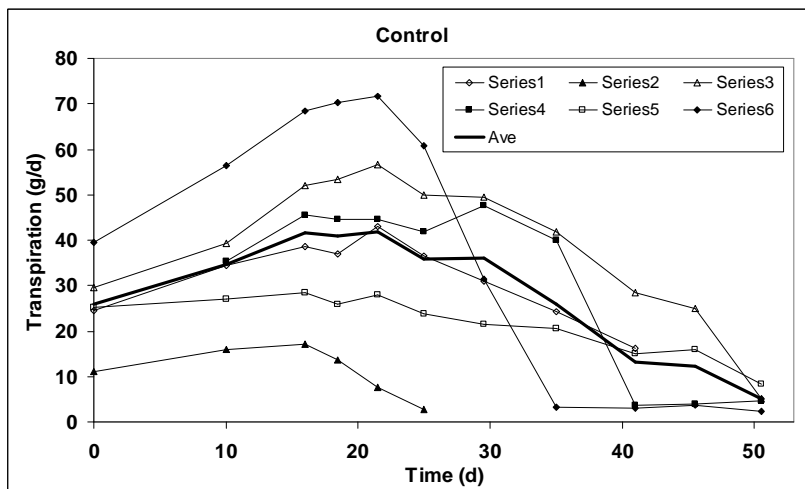
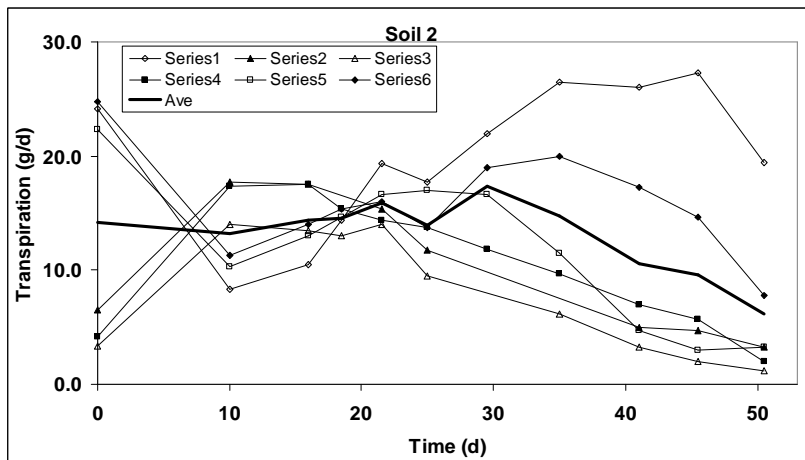
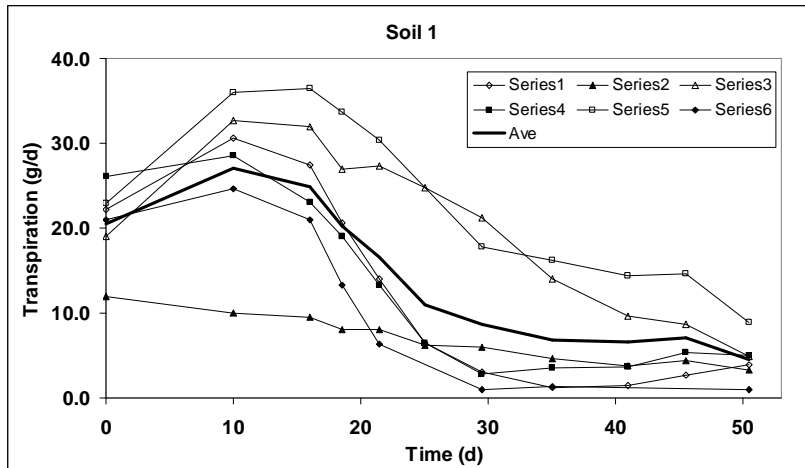
Bilag 7 Transpiration for samtlige planter i forsøgsserie a-c

Forsøgsserie a



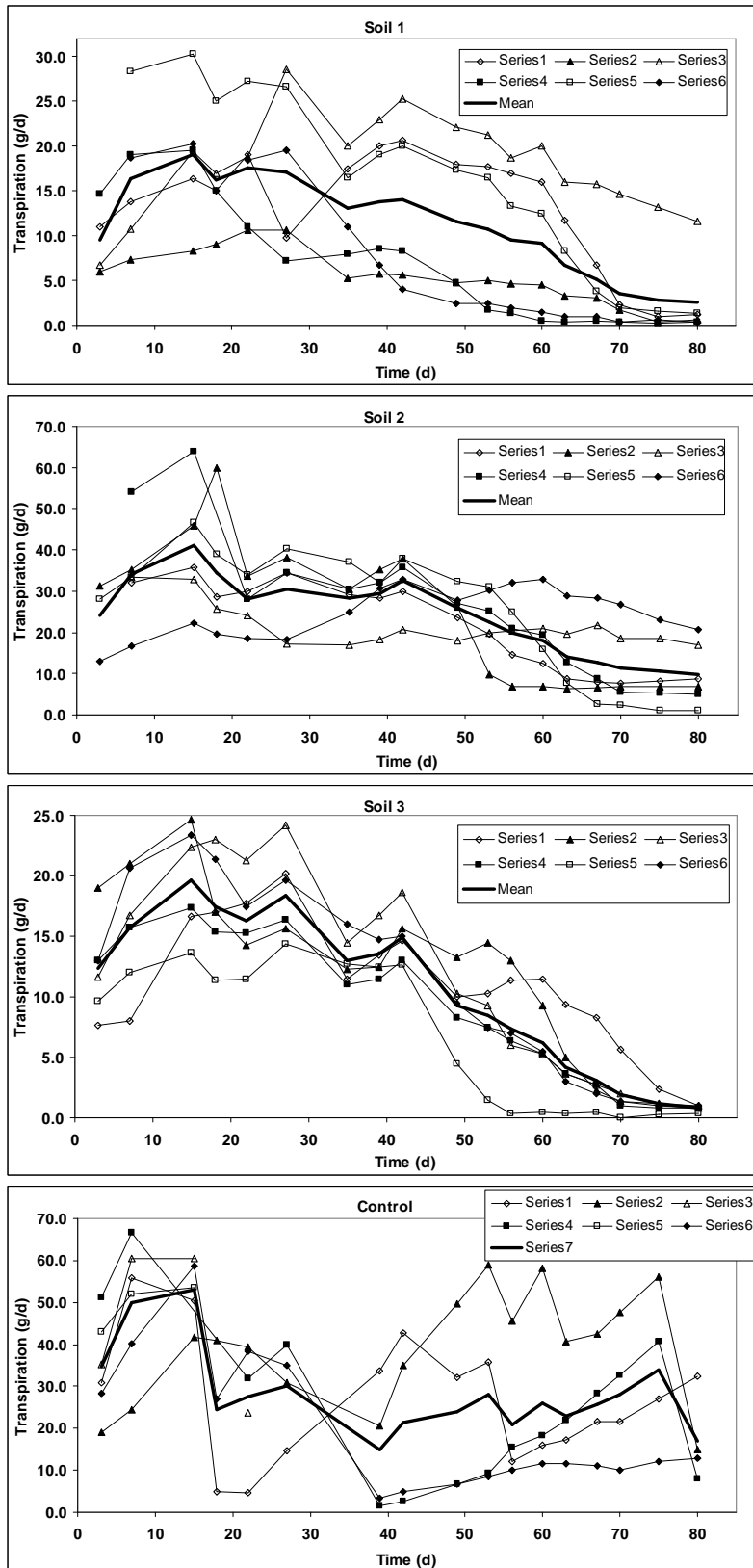
GDT for samtlige planter på hhv. jord 1-3 samt kontroljorden.

Forsøgsserie b



GDT for samtlige planter på jord 1 og 2 samt kontroljorden.

Forsøgsserie c



GDT for samtlige planter på hhv. jord 1-3 samt kontroljorden.

Bilag 8 Data og statistik for koncentrationer af metaller i planterne for ex-situ forsøg

Tungmetalkoncentrationer i blade og topskud for samtlige træer i forsøgsserie a-c.

Forsøgsserie A - vand								Forsøgsserie b - 1/1 Hoagland								Forsøgsserie c - 1/4 Hoagland									
		blade+topskud			Stammer					blade+topskud			Stammer					Blade+topskud			Stammer				
		Cd	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn			Cd	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn			Cd	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn		
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg			mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg			mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
Jord 1	V1	5.6	17.4	261	2.9	4.8	74		Jord 1	1	17.8	30.3	721	5.7	11.9	102		Jord 1	1¼	8.3	23.4	225	3.5	6.6	84
	V2	2.1	8.3	108	2.6	5.7	87			2	27.5	41.7	1020	6.0	8.2	138			2½	9.4	31.8	244	4.5	6.1	94
	V3	4.9	24.9	325	3.0	5.1	102			3	10.2	29.7	493	5.3	6.5	103			3¼	8.2	21.7	344	3.1	5.1	74
	V4	15.0	57.7	877	3.4	4.7	91			4	9.3	30.1	337	4.0	5.9	99			4¼	6.4	20.5	163	4.4	7.9	119
	V5	4.0	17.3	242	2.3	4.6	88			5	11.7	37.1	405	4.3	6.5	95			5¼	7.7	23.1	255	3.2	5.0	91
	V6	8.3	22.3	261	3.2	6.0	78			6	15.6	35.1	786	4.7	5.9	106			6¼	6.1	18.4	190	4.1	5.3	107
	Av	6.6	24.7	345.6	2.9	5.2	86.5			Av	15.3	34.0	626.9	5.0	7.5	107.2			Av	7.7	23.2	236.8	3.8	6.0	94.7
	Std dev	4.6	17.2	269.8	0.4	0.6	9.9			Std dev	6.8	4.8	260.8	0.8	2.3	15.5			Std dev	1.2	4.6	62.7	0.6	1.1	16.2
	95% CI	4.8	18.0	283.2	0.4	0.6	10.4			95% CI	7.1	5.1	273.7	0.9	2.4	16.3			95% CI	1.3	4.9	65.8	0.6	1.2	17.0
Jord 2	V7	4.4	13.1	319	3.5	6.1	117		Jord 2	7	8.7	28.2	378	3.0	5.2	73		Jord 2	7¼	9.3	35.3	935	3.3	5.9	115
	V8	6.5	18.3	341	3.5	4.3	93			8	7.1	25.3	372	3.2	5.6	92			8¼	6.8	29.5	427	3.1	6.3	121
	V9	6.8	20.3	399	3.2	4.8	100			9	4.2	22.7	290	2.6	5.3	142			9¼	11.8	39.9	915	3.5	7.4	109
	V10	6.3	21.8	419	3.3	4.5	118			10	6.4	21.0	313	3.2	5.3	89			10¼	7.1	38.3	467	3.8	9.7	346
	V11	7.5	25.1	555	3.1	4.0	120			11	8.3	28.5	495	4.4	6.1	101			11¼	6.3	32.1	258	3.5	6.6	118
	V12	6.2	20.9	409	3.2	4.4	108			12	11.1	30.3	529	4.9	4.9	99			12¼	7.8	23.0	576	3.5	10.9	122
	Av	6.3	19.9	407.1	3.3	4.7	109.4			Av	7.6	26.0	396.1	3.6	5.4	99.2			Av	8.2	33.0	596.3	3.5	7.8	155.3
	Std dev	1.1	4.0	82.9	0.2	0.7	10.9			Std dev	2.3	3.6	96.5	0.9	0.4	23.1			Std dev	2.0	6.2	274.5	0.2	2.0	93.6
	95% CI	1.1	4.2	87.0	0.2	0.8	11.5			95% CI	2.4	3.8	101.2	0.9	0.4	24.2			95% CI	2.1	6.5	288.1	0.2	2.1	98.2
Jord 3	V13	6.0	18.9	374	2.8	4.3	95		Jord 3	13	7.6	17.0	397	3.5	7.8	91		Jord 3	13¼	13.4	51.4	421	4.0	50.0	140
	V14	10.9	18.4	232	3.4	4.5	79			14	6.0	18.1	246	2.6	8.8	76			14¼	10.0	29.9	241	3.5	4.9	102
	V15	9.3	31.0	263	3.2	4.5	90			15	12.0	16.1	435	3.8	4.9	79			15¼	13.2	45.8	324	4.3	5.5	98
	V16	9.6	15.6	210	2.6	3.8	68			16	11.3	16.8	376	4.3	6.0	111			16¼	8.0	28.3	224	3.3	4.6	75
	V17	9.5	17.8	394	3.5	4.4	79			17	8.5	23.2	395	3.0	6.0	90			17¼	7.3	17.2	225	4.3	5.5	115
	V18	6.9	14.8	256	3.0	5.6	94			18	8.1	17.4	357	3.4	5.1	93			18¼	7.5	25.7	232	4.7	7.7	116
	Av	8.7	19.4	288.2	3.1	4.5	84.3			Av	8.9	18.1	367.7	3.4	6.4	89.8			Av	9.9	33.1	277.8	4.0	13.0	107.6
	Std dev	1.9	5.9	76.8	0.3	0.6	10.7			Std dev	2.3	2.6	64.9	0.5	1.6	12.5			Std dev	2.8	12.9	79.8	0.5	18.2	22.0
	95% CI	1.9	6.2	80.6	0.4	0.6	11.3			95% CI	2.4	2.7	68.1	0.6	1.6	13.1			95% CI	2.9	13.6	83.8	0.5	19.1	23.1
Kontrol	V19	2.8	14.3	161	2.6	3.3	85		Kontrol	19	4.2	16.2	174	2.6	3.9	87		Kontrol	19¼	4.8	19.7	205	2.8	4.4	64
	V20	3.8	12.3	164	3.1	4.3	74			20	6.0	14.7	268	2.9	4.2	79			20¼	3.0	9.7	140	2.8	5.2	88
	V21	3.6	12.4	183	2.6	3.9	78			21	8.2	18.1	252	2.7	4.0	75			22¼	4.4	13.5	146	2.7	5.0	82
	V22	2.8	13.2	174	2.0	4.1	81			22	6.9	14.7	277	2.7	5.0	95			24¼	5.4	16.7	199	3.5	5.6	91
	V23	2.6	9.1	398	2.3	3.7	103			23	6.8	20.9	250	3.4	5.4	118			Av	4.4	14.9	172.4	3.0	5.1	81.2
	Av	3.1	12.3	215.8	2.5	3.9	84.2			24	3.1	8.9	123	2.7	3.5	75			Std dev	1.0	4.3	34.3	0.3	0.5	11.8
	Std dev	0.5	2.0	102.3	0.4	0.4	11.1			Av	5.9	15.6	224.0	2.8	4.3	88.3			95% CI	1.7	6.8	54.6	0.5	0.8	18.8
	95% CI	0.7	2.4	127.0	0.5	0.4	13.8			Std dev	1.9	4.1	61.7	0.3	0.7	16.4									
										95% CI	2.0	4.3	64.7	0.3	0.7	17.2									

Vådvægt, tørvægt og masse af tungmetaller i samtlige planter for forsøgsserie a-c

Forsøgsserie A - vand														
Prøve Nr	Vådvægt (g)		Tørvægt (g)		Cd (mg)			Cu (mg)			Zn (mg)			
	Stamme	Blade	Stamme	Blade	Stamme	Blade	Total	Stamme	Blade	Total	Stamme	Blade	Total	
1 V	35.1	3.3	18.79	0.75	0.055	0.004	0.060	0.090	0.013	0.103	1.38	0.20	1.580	
2 V	33.4	3.9	17.88	0.89	0.047	0.002	0.049	0.101	0.007	0.108	1.55	0.10	1.645	
3 V	23.3	2	12.47	0.45	0.037	0.002	0.039	0.064	0.011	0.075	1.27	0.15	1.417	
4 V	24.5	1.7	13.12	0.39	0.045	0.006	0.051	0.062	0.022	0.084	1.19	0.34	1.525	
5 V	27.6	3.3	14.77	0.75	0.034	0.003	0.037	0.068	0.013	0.081	1.30	0.18	1.482	
6 V	38.4	3.6	20.56	0.82	0.066	0.007	0.072	0.124	0.018	0.142	1.60	0.21	1.818	
			16.265	0.673	Av	0.047	0.004	0.051	0.085	0.014	0.099	1.383	0.195	1.578
					Std dev	0.012	0.002	0.013	0.025	0.005	0.025	0.164	0.081	0.141
					95% CI	0.012	0.002	0.014	0.026	0.006	0.026	0.172	0.086	0.148
7 V	22.6	4	12.10	0.91	0.042	0.004	0.046	0.073	0.012	0.085	1.41	0.29	1.703	
8 V	52.5	8	28.10	1.82	0.099	0.012	0.111	0.120	0.033	0.153	2.61	0.62	3.234	
9 V	33.1	2.4	17.72	0.54	0.057	0.004	0.061	0.085	0.011	0.096	1.78	0.22	1.996	
10 V	31.9	2.9	17.08	0.66	0.056	0.004	0.060	0.076	0.014	0.091	2.01	0.28	2.291	
11 V	25.7	1.8	13.76	0.41	0.043	0.003	0.046	0.055	0.010	0.065	1.65	0.23	1.881	
12 V	35.2	3.7	18.84	0.84	0.060	0.005	0.065	0.083	0.018	0.100	2.03	0.34	2.373	
			17.933	0.862	Av	0.06	0.01	0.065	0.082	0.016	0.099	1.918	0.329	2.246
					Std dev	0.02	0.00	0.024	0.021	0.009	0.029	0.413	0.150	0.545
					95% CI	0.02	0.00	0.025	0.022	0.009	0.031	0.433	0.157	0.572
13 V	14.2	0.2	7.60	0.05	0.022	0.000	0.022	0.032	0.001	0.033	0.72	0.02	0.737	
14 V	30.5	0.9	16.33	0.20	0.056	0.002	0.058	0.074	0.004	0.078	1.30	0.05	1.342	
15 V	14.7	0.4	7.87	0.09	0.025	0.001	0.026	0.036	0.003	0.038	0.71	0.02	0.735	
16 V	41.8	0.7	22.38	0.16	0.059	0.002	0.060	0.084	0.002	0.086	1.51	0.03	1.545	
17 V	16.2	0.3	8.67	0.07	0.031	0.001	0.031	0.038	0.001	0.039	0.69	0.03	0.716	
18 V	15.3	0.1	8.19	0.02	0.025	0.000	0.025	0.046	0.000	0.046	0.77	0.01	0.778	
			11.839	0.098	Av	0.036	0.001	0.037	0.052	0.002	0.054	0.950	0.026	0.976
					Std dev	0.017	0.001	0.017	0.022	0.001	0.023	0.359	0.014	0.369
					95% CI	0.017	0.001	0.018	0.023	0.001	0.024	0.377	0.015	0.387
19 V	28.9	5.1	15.47	1.16	0.040	0.003	0.043	0.052	0.017	0.068	1.32	0.19	1.506	
20 V	40	7.7	21.41	1.75	0.067	0.007	0.073	0.091	0.021	0.113	1.58	0.29	1.867	
21 V	25.5	5.4	13.65	1.23	0.036	0.004	0.040	0.053	0.015	0.068	1.06	0.22	1.286	
22 V	43.1	6.4	23.07	1.45	0.047	0.004	0.051	0.094	0.019	0.113	1.88	0.25	2.128	
23 V	24.6	6.7	13.17	1.52	0.031	0.004	0.035	0.049	0.014	0.063	1.35	0.61	1.966	
			17.355	1.421	Av	0.044	0.004	0.048	0.068	0.017	0.085	1.438	0.311	1.749
					Std dev	0.014	0.001	0.015	0.023	0.003	0.026	0.306	0.169	0.344
					95% CI	0.017	0.002	0.019	0.028	0.004	0.032	0.380	0.210	0.427
Forsøgsserie b - 1/1 Hoagland														
Prøve Nr	Vådvægt (g)		Tørvægt (g)		Cd (mg)			Cu (mg)			Zn (mg)			
	Stamme	Blade	Stamme	Blade	Stamme	Blade	Total	Stamme	Blade	Total	Stamme	Blade	Total	
1	31.2	6.7	16.70	1.52	0.096	0.027	0.123	0.198	0.046	0.244	1.708	1.097	2.805	
2	24.3	2.2	13.01	0.50	0.079	0.014	0.092	0.107	0.021	0.127	1.795	0.509	2.304	
3	54.7	7.8	29.28	1.77	0.156	0.018	0.174	0.189	0.053	0.242	3.008	0.872	3.880	
4	50	6.9	26.77	1.57	0.106	0.015	0.121	0.159	0.047	0.206	2.652	0.527	3.180	
5	46.2	4.9	24.73	1.11	0.107	0.013	0.120	0.160	0.041	0.202	2.351	0.450	2.802	
6	24.8	0.5	13.28	0.11	0.062	0.002	0.064	0.079	0.004	0.083	1.410	0.089	1.500	
					Av	0.101	0.015	0.116	0.149	0.035	0.184	2.154	0.591	2.745
					Std dev	0.032	0.008	0.037	0.047	0.019	0.065	0.616	0.351	0.804
					95% CI	0.034	0.009	0.038	0.049	0.020	0.068	0.646	0.369	0.843
7	42.2	5.6	22.59	1.27	0.068	0.011	0.079	0.117	0.036	0.153	1.654	0.480	2.134	
8	47.3	1.6	25.32	0.36	0.081	0.003	0.083	0.141	0.009	0.150	2.321	0.135	2.457	
9	28.4	0.8	15.20	0.18	0.043	0.001	0.044	0.080	0.004	0.084	2.157	0.053	2.209	
10	41.3	1	22.11	0.23	0.072	0.001	0.073	0.116	0.005	0.121	1.967	0.071	2.038	
11	39	3.8	20.88	0.86	0.093	0.007	0.100	0.126	0.025	0.151	2.106	0.427	2.533	
12	35.2	4	18.84	0.91	0.093	0.010	0.103	0.093	0.027	0.120	1.858	0.480	2.338	
					Av	0.075	0.006	0.080	0.112	0.018	0.130	2.010	0.274	2.285
					Std dev	0.019	0.005	0.021	0.022	0.013	0.027	0.236	0.209	0.192
					95% CI	0.020	0.005	0.022	0.023	0.014	0.028	0.248	0.219	0.201
13	34.6	0.2	18.52	0.05	0.064	0.000	0.064	0.144	0.001	0.145	1.680	0.018	1.698	
14	29.4	0.6	15.74	0.14	0.044	0.001	0.045	0.139	0.002	0.141	1.197	0.034	1.231	
15	27.7	0.6	14.83	0.14	0.056	0.002	0.057	0.072	0.002	0.075	1.169	0.059	1.228	
16	41	0.8	21.95	0.18	0.094	0.002	0.096	0.132	0.003	0.135	2.443	0.068	2.511	
17	23.8	0.1	12.74	0.02	0.038	0.000	0.038	0.076	0.001	0.077	1.141	0.009	1.150	
18	27.1	0.6	14.51	0.14	0.049	0.001	0.050	0.073	0.002	0.076	1.343	0.049	1.392	
					Av	0.057	0.001	0.058	0.106	0.002	0.108	1.495	0.039	1.535
					Std dev	0.020	0.001	0.021	0.035	0.001	0.036	0.505	0.023	0.517
					95% CI	0.021	0.001	0.022	0.037	0.001	0.037	0.530	0.025	0.542
19	19.6	1	10.49	0.23	0.027	0.001	0.028	0.041	0.004	0.045	0.913	0.039	0.953	
20	35.9	0.6	19.22	0.14	0.056	0.001	0.057	0.080	0.002	0.082	1.522	0.036	1.558	
21	26.5	2.2	14.19	0.50	0.038	0.004	0.042	0.057	0.009	0.066	1.070	0.126	1.196	
22	18.7	3.6	10.01	0.82	0.027	0.006	0.033	0.050	0.012	0.062	0.951	0.227	1.178	
23	16.3	2.3	8.73	0.52	0.030	0.004	0.034	0.047	0.011	0.058	1.030	0.130	1.160	
24	24	1.7	12.85	0.39	0.034	0.001	0.035	0.045	0.003	0.049	0.966	0.047	1.014	
					Av	0.035	0.003	0.038	0.053	0.007	0.060	1.075	0.101	1.176
					Std dev	0.011	0.002	0.010	0.014	0.004	0.013	0.226	0.075	0.211
					95% CI	0.011	0.002	0.011	0.015	0.005	0.014	0.237	0.079	0.222

Forsøgsserie c - 1/4 Hoagland														
Prøve Nr	Vådvægt (g)		Tørvægt (g)		Cd (mg)			Cu (mg)			Zn (mg)			
	Stamme	Blade	Stamme	Blade	Stamme	Blade	Total	Stamme	Blade	Total	Stamme	Blade	Total	
1 1/4	38.2	5.5	20.45	1.25	0.072	0.010	0.083	0.136	0.029	0.165	1.718	0.280	1.999	
2 1/4	23.6	1.6	12.63	0.36	0.057	0.003	0.060	0.077	0.012	0.089	1.181	0.088	1.270	
3 1/4	31.3	7.2	16.76	1.63	0.052	0.013	0.066	0.085	0.035	0.120	1.239	0.562	1.801	
4 1/4	13.4	0.4	7.17	0.09	0.031	0.001	0.032	0.057	0.002	0.059	0.855	0.015	0.870	
5 1/4	30.4	5.1	16.27	1.16	0.052	0.009	0.060	0.081	0.027	0.108	1.474	0.295	1.769	
6 1/4	13	1.3	6.96	0.30	0.029	0.002	0.030	0.037	0.005	0.043	0.744	0.056	0.800	
					Av	0.049	0.006	0.055	0.079	0.018	0.097	1.202	0.216	1.418
					Std dev	0.016	0.005	0.020	0.033	0.014	0.044	0.367	0.206	0.512
					95% CI	0.017	0.005	0.021	0.035	0.015	0.046	0.385	0.216	0.538
7 1/4	25.7	6.4	13.76	1.45	0.046	0.014	0.059	0.082	0.051	0.133	1.584	1.358	2.942	
8 1/4	35	6.5	18.74	1.48	0.059	0.010	0.069	0.117	0.044	0.161	2.264	0.630	2.893	
9 1/4	45.3	4.9	24.25	1.11	0.085	0.013	0.098	0.180	0.044	0.225	2.651	1.018	3.669	
10 1/4	36	7.8	19.27	1.77	0.073	0.013	0.086	0.187	0.068	0.255	6.669	0.827	7.496	
11 1/4	18.9	2.2	10.12	0.50	0.035	0.003	0.039	0.066	0.016	0.082	1.196	0.129	1.325	
12 1/4	14	7.5	7.49	1.70	0.026	0.013	0.039	0.082	0.039	0.121	0.917	0.980	1.897	
					Av	0.054	0.011	0.065	0.119	0.044	0.163	2.547	0.824	3.370
					Std dev	0.022	0.004	0.024	0.053	0.017	0.065	2.121	0.417	2.185
					95% CI	0.024	0.004	0.025	0.055	0.018	0.069	2.226	0.437	2.294
13 1/4	20.7	0.9	11.08	0.20	0.044	0.003	0.047	0.555	0.010	0.565	1.557	0.086	1.643	
14 1/4	27.1	3.5	14.51	0.79	0.051	0.008	0.059	0.070	0.024	0.094	1.473	0.191	1.665	
15 1/4	19.7	2.2	10.55	0.50	0.045	0.007	0.051	0.058	0.023	0.081	1.032	0.162	1.194	
16 1/4	34.2	2.5	18.31	0.57	0.061	0.005	0.065	0.083	0.016	0.099	1.365	0.127	1.492	
17 1/4	17	3	9.10	0.68	0.039	0.005	0.044	0.050	0.012	0.062	1.044	0.153	1.197	
18 1/4	25.8	4	13.81	0.91	0.065	0.007	0.072	0.107	0.023	0.130	1.605	0.211	1.816	
					Av	0.051	0.006	0.056	0.154	0.018	0.172	1.346	0.155	1.501
					Std dev	0.010	0.002	0.011	0.197	0.006	0.194	0.252	0.045	0.258
					95% CI	0.011	0.002	0.012	0.207	0.006	0.203	0.265	0.047	0.271
19 1/4	39.2	13.7	20.98	3.11	0.059	0.015	0.074	0.093	0.061	0.154	1.353	0.638	1.991	
20 1/4	27	19	14.45	4.31	0.041	0.013	0.053	0.075	0.042	0.117	1.274	0.603	1.878	
21 1/4														
22 1/4	30.5	18.1	16.33	4.11	0.056	0.022	0.079	0.092	0.069	0.160	1.481	0.816	2.297	
23 1/4														
24 1/4	17.8	7	9.53	1.59	0.003	0.002	0.005	0.005	0.007	0.011	0.113	0.054	0.167	
					Av	0.040	0.013	0.053	0.066	0.045	0.111	1.055	0.528	1.583
					Std dev	0.026	0.009	0.034	0.042	0.028	0.069	0.634	0.329	0.961
					95% CI	0.027	0.009	0.035	0.044	0.029	0.072	0.666	0.345	1.008

Eksempel på t-test, hvor det for forsøgsserie a testes, om koncentrationen af cadmium i stammerne på træer fra jord 1-3 er højere end koncentrationen i kontrolstammerne. $P(T \leq t)$ one-tail benyttes til at vurdere signifikansniveauet. Hvis $P(T \leq t)$ one-tail < 0.1 , er koncentrationen af cadmium signifikant højere end kontrolstammerne på 90% niveau. Hvis $P(T \leq t)$ one-tail er < 0.05 er koncentrationen af cadmium signifikant højere på 95% niveau osv.

	<i>jord 1</i>	<i>Jord 2</i>	<i>Jord 3</i>	<i>Kontrol</i>
Mean	2.918881	3.293638	3.093925	2.537712
Variance	0.159933	0.026215	0.115802	0.158413
Observations	6	6	6	5
Pooled Variance	0.159258	0.08497	0.13474	
Hypothesized Mean Differ	0	0	0	
df	9	9	9	
t Stat	1.577361	4.282627	2.502397	
$P(T \leq t)$ one-tail	0.074584	0.001021	0.016864	
t Critical one-tail	1.833114	1.833114	1.833114	
$P(T \leq t)$ two-tail	0.149168	0.002042	0.033729	
t Critical two-tail	2.262159	2.262159	2.262159	

Bilag 9 Udvaskningsforsøg på KMC

Kalvebod Miljøcenter (KMC) gennemfører en række udvaskningstests af jord- og affaldsfraktioner for at skaffe mere viden om konsekvenserne ved deponering. KMC skal bruge den nye viden i forbindelse med vurdering af risikoen ved drift af kommunens depoter på KMC og på Prøvestenen.

Udvaskningstestene foretages i såkaldte lysimetre, en form for testceller, hvor fraktionernes udvaskningsprofil kan bestemmes under kontrollerede forhold. Hver testcelle indeholder ca. 3 m³ jord/affald. Forsøget etableres i klasse 4 depotet på KMC, og der projekteres i første omgang med opstilling af 16 lysimetre, der hver indeholder en jord- eller affaldsfraktion som ønskes testet.

Projektet er designet og planlagt pt. med følgende parter; KMC, AV Miljø, Danwaste Consult A/S og DHI – Institut for Vand og Miljø. Danwaste fungerer som projektsekretær, mens DHI bistår med rådgivning ved følgende aktiviteter:

- Deltagelse i planlægning og opbygning af forsøgsanlæg
- Medvirke til karakterisering af produkter til udvaskningstest
- Foreslå analyseprogram på baggrund af karakteriseringen
- Bistå med vurdering og rapportering af analyseresultater
- International koordinering

Affaldstyper til test

Primære affaldstyper der planlægges gennemført udvaskningsforsøg på:

- 1 lysimeter med tung olie
- 2 lysimetre med klasse 2-3 jord
- 2 lysimetre med klasse 4 forurenede jord
- 1 lysimeter med pesticidforurenede jord
- Evt. 1 lysimeter med ren jord
- 2 lysimetre med shredderaffald
- 2 lysimetre med blandet affald
- 1 lysimeter med gipsaffald
- 1 lysimeter med vejopfej
- 1 lysimeter med havnesediment
- 1 lysimeter med olieforurenede skærver
- 1 lysimeter med materialer fremstillet af bygningsaffald