

## Region Hovedstaden

---

# Pilot scale heavy metal remediation

Phytoekstraktion af tungmetaller

Januar 2016



## **Region Hovedstaden**

# Pilot scale heavy metal remediation

## Phytoekstraktion af tungmetaller

Januar 2016

Dokument nr. 2  
Revision nr. 1  
Udgivelsesdato 15-01-2016

Udarbejdet Stefan Outzen  
Kontrolleret John Bastrup

## **Indholdsfortegnelse**

<b>1</b>	<b>Baggrund og formål</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sammenfatning</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Summary</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Projektets idé</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Forsøget</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Resultater</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Vurderinger</b>	<b>19</b>
<b>8</b>	<b>Referencer</b>	<b>23</b>

## **Bilag**

**Bilag 1: Analyserapporter**

## 1 Baggrund og formål

Region Hovedstaden besluttede i februar 2014 at teste den kinesiske bregne ”pteris vittata” for evnen til under danske klimatiske forhold at akkumulere arsen og tungmetaller, som er endt i jordmiljøet.

Forsøget blev gennemført under Region Hovedstadens udviklingsprogram 2013-2014 rettet mod oprensning af tungmetaller.

Udviklingsprogrammets formål er gennem pilotforsøg at identificere egnede oprensningsmetoder for arsen-, krom- og kobberforurenede jord (CCA) og udvikle metoder til anvendelse i fuld skala.

Forsøget blev gennemført på et areal, der indtil 1970'erne er anvendt til træ-imprægnering af virksomheden Collstrop. Arealet er forurenet med arsen, krom og kobber, der har været anvendt som imprægneringsmidler på virksomheden.

Formålet med testen af bregnen ”Pteris Vittata” var dels at undersøge plantens egnethed til oprensning under danske klimatiske forhold og dels at undersøge vækstbetingelserne og lære planten at kende.

Forsøget i 2014 gav en del erfaringer med hensyn til dyrkning og vækst, og på trods af vanskelige forhold i de første måneder af projektet var de opnåede resultater tilfredsstillende. Der påvist et gennemsnitligt optag af arsen på godt 2 g/kg plantemateriale (tørstof) over en periode på 21 uger og ca. 3-4 g pr. kg i enkelte planter. Væksten anses væsentligt hæmmet af faktorer, der ikke var forudset, herunder fraværende mikrobiel aktivitet i jorden og vanskeligheder med kontrol af jordfugtigheden. Undersøgelserne er rapporteret i december 2014 /7/. Der henvises til rapporten for yderligere oplysninger.

Det er på den baggrund besluttet at videreføre forsøg i 2015 med det formål at søge vækstvilkår optimeret og optag af arsen forøget ved etableringen af et kontrolleret vækstmiljø, der sikrer mikrobiel aktivitet og optimale vilkår for næringsoptag. Det er dernæst formålet at undersøge, hvor stor en biomasse, der kan skabes pr. arealenhed. Endelig er det et formål at undersøge plantens overlevelsessevne i en dansk vinter ved afdækning med halm.

## 2 Sammenfatning

### 2.1 Baggrund

Region Hovedstaden gennemførte i 2014 en test af den kinesiske bregne "pteris vittata" for evnen til under danske klimatiske forhold at akkumulere arsen og tungmetaller, som er endt i jordmiljøet.

Testen viste, at bregnen kan optage arsen, men det blev klart, at dyrkningsforholdene spiller en væsentlig rolle for dens effektivitet og egnethed som oprensningmetode.

### 2.2 Formål

Det blev på grundlag af erfaringerne fra projektet i 2014 besluttet at gennemføre en ny test, hvor dyrkningsmiljøet søgtes udviklet inden for rammerne af, hvad et fuldskalaprojekt ville kunne bære.

Formålet med projektet i 2015 er at etablere et kontrolleret vækstmiljø, der sikrer mikrobiel aktivitet og optimale vilkår for næringsoptag. Det er dernæst formålet at undersøge, hvor stor en biomasse, der kan skabes pr. arealenhed. Endelig er det et formål at undersøge plantens overlevelsessevne i en dansk vinter ved afdækning med halm.

### 2.3 Metode

Forurennet jord fra et hotspot er opblandet med hestemøg i volumenforholdet 2:1, tilsat kalk og hønsemøg og lagt i to væksthænge à 120 x 480 cm i et område med lysforhold vekslende mellem direkte sol og skygge. Væksthængene er opdelt i otte felter (1 - 8) med en dybde à 40 cm.

Kalk er tilsat i faldende mængder fra felt 1 til 8 med henblik på at opnå forskellig surhedsgrad i vækstmediet.

Jorden er i de otte felter før udplantning analyseret for indhold af arsen, krom og kobber samt næringsstofferne kvælstof, fosfor og kalium. Endvidere er pH bestemt.

Pga. et meget koldt forår kunne udplantningen ikke som planlagt ske primo maj, men blev udsat til primo juni. Her blev planter fremavlet over vinteren 2014-2015 udsat med 50 planter pr. m<sup>2</sup>.

Ved afhøstningen i oktober er jordprøver fra felterne analyseret for arsen, krom og kobber, og plantemateriale vægtbestemt og analyseret for indhold af arsen, krom og kobber.

## 2.4 Resultater

Trods en sommer med ustabil vejrlig blev der opnået en meget fin vækst. De unge planter udviklede sig godt, og opnåede en gennemsnitlig plantevægt på ca. 3,5 g (tørstof) eller ca. en tredjedel af plantevægten opnået i 2014, hvor etårige planter blev udplantet.

Der blev ikke opnået den ønskede variation i jordens surhed ved tilsætning af kalk, hvorfor resultaterne ikke kan henføres til sådanne variationer. Jordens surhed i pH er ved afhøstningen målt til gennemsnitligt 7,2.

Den samlede biomasse pr. kvadratmeter er i 2015 mangedoblet i forhold til 2014, hvor der blev udplantet fire planter pr. kvadratmeter. Biomassen pr. kvadratmeter er i 2015 opgjort til 170 g/m<sup>2</sup> ved afhøstningen i oktober.

De målte indhold af arsen er i 2015 med en gennemsnitlig koncentration på 3,4 g/kg TS 58 % højere end i 2014, mens indholdet af både krom og kobber er lavere.

## 2.5 Perspektiver

Med et gennemsnitligt optag af arsen på 4 g/kg vil der være fjernet 0,6 g As/m<sup>2</sup> i en vækstperiode. I forsøget nåede rødderne ned til 20 cm ut, og således har planterne fjernet 0,6 g arsen fra 300 kg jord.

I en jord, der har et arsenindhold på 40 mg/kg TS, vil der i 300 kg være 12 g arsen. På 20 år vil denne mængde principielt være fjernet fra jorden og flyttet op i planterne, eller på ti år vil man nå en koncentration på niveau med jordkvalitetskriteriet.

Det anses på baggrund af resultaterne og erfaringerne fra både 2014 og 2015 for sandsynligt, at biomassen vil kunne øges, ligesom det vil være muligt at øge optaget af arsen ved hjælp af tilsætning af fosforit.

## 3 Summary

### 3.1 Background

In 2014 the Capital Region in Denmark carried out a test of the Chinese brake fern "pteris vittata" to examine its capability to accumulate arsenic and heavy metals from soil under Danish climatic conditions.

The test showed that the plant can uptake arsenic but it became also clear that the growing conditions are crucial for its efficiency and ability as soil cleaning method.

### 3.2 Objective

Based on the experience from the 2014 test it was decided to carry out a new test aimed at improved growing conditions within a realistic framework for a full scale project.

The objective of the 2015 project is to establish a controlled growth environment securing microbial activity and optimal conditions for nutrient uptake. Next it is the objective to investigate how big it is possible to develop the volume of the biomass per square unit. Finally, it is an objective to investigate the ferns ability to survive during a Danish winter under a cover of straw.

### 3.3 Method

Contaminated soil from a hotspot is mixed with horse manure in the volume ratio 2:1 and calcium and chicken manure is added before put into two hotbeds of 120 x 480 cm placed in an area with both sun and shadow. The hotbeds are divided into eight fields (1-8) with a depth of 40 cm.

Calcium is added in falling concentrations from field 1 to 8 with the purpose of establishing different sourness in the growth media.

Before the planting the soil is analyzed for arsenic, chromium and copper and also the nutrients nitrogen, phosphor and potassium. Finally the acidity in pH is measured.

Due to a very cold spring the planting could not take place in early May as planned but was put forward to early June. Plants pricked out during the winter 2014-2015 were put with 50 per m<sup>2</sup>.

At the harvest in October the soil from the fields was analyzed for arsenic, chromium and copper and the plants were weighed and likewise analyzed for contents of arsenic, chromium and copper.

### 3.4 Results

Despite a summer of unstable weather an excellent growth was achieved. The young plants developed fine and reached an average weight of 3,5 g (dry matter) or about one third of the plant weight achieved in 2014 on second season plants.

The aimed variation in acidity was not achieved by the addition of calcium why the results cannot refer to such variations. The soil acidity in pH is measured to 7,2.

The total biomass per square meter is multiplied compared to 2014 where four plants were planted per square meter. The biomass per square meter is in 2015 measured to 170 g/m<sup>2</sup> at the harvest in October.

The measured content of arsenic reached in 2015 an average of 3,4 g/kg dry matter which is 58 % higher than in the 2014 test while the contents of both copper and chromium are lower.

### 3.5 Perspectives

Given the achieved biomass per square meter and an average uptake of arsenic of 4 g/kg dry matter a total of 0,6 g As/m<sup>2</sup> will be removed during a growth season. In the test the roots were measured to 20 cm and thereby the plants have removed 0,6 g arsenic from 300 kg soil.

An amount of 300 kg soil with an average concentration of arsenic at 40 mg/kg dry matter contains 12 g arsenic. Thus, the removal of the arsenic will last 20 years or the soil quality criterion will be met in ten years.

Based on the experiences from both 2014 and 2015 it is likely to believe that it is possible to increase the biomass and also increase the uptake of arsenic by adding phosphate rock to the soil.



## 4 Projektets idé

### 4.1 Pteris vittata

Bregnen "pteris vittata" er hjemhørende i troperne i Asien og Afrika, hvor den typisk gror på limstensformationer i klima med høj luftfugtighed. Bregnen optræder på listen over invasive arter i USA. Den påkaldte sig opmærksomhed i Florida i 2001, hvor den blev fundet på en grund, der tidligere havde været anvendt til en træimprægneringsvirksomhed med samme teknologi som Collstrop ved Hillerød.

Forskere ved University of Florida i Miami undersøgte den for indhold af tungmetaller og opdagede usædvanlige høje indhold af arsen. Efter 8 ugers vækst i arsenforurenede jord målte indhold af arsen op til 22.000 mg pr. kg biomateriale (tørstof) /1/. Således karakteriseres planten som hyperakkumulator af arsen.

Langt hovedparten findes i bladene, mens der måles meget lidt i rødderne. Under ideelle vækstvilkår vil en plantes vægt nå ca. 50 g. Vandindholdet er ca. 75 %, og således vil tørstoffet udgøre ca. 12,5 g i en plante. En enkelt plante vil således i princippet kunne fjerne 100 mg arsen fra jorden i en vækstperiode.

Ifølge Rathinasabapathi /2/ kan planten tåle arsenkoncentrationer i jorden på op til 1.500 mg/kg TS.

### 4.2 Vækst og miljø

#### 4.2.1 Arsen

Arsen er et udbredt grundstof i jordmiljøet. Den naturlige tilstedeværelse er normalt associeret med andre metaller eller med sulfidmalme, men det findes også som følge af spredning af vulkansk aske og gennem afsætning af andre luftbårne partikler i både jordoverflade og dybere jordlag.

Begge former for tilførsel henregnes til baggrundsværdier. Der kan være store variationer givet de forskellige jordmaterialer, ligesom tilførsel kan resultere i variationer.

I 1991 gennemførtes den såkaldte ”kvadratnetundersøgelse”, der indsamlede data for i alt 413 målepunkter ud over hele landet og fra jorde anvendt til forskellige formål. Data er behandlet og sammenfattet i rapport 1996 /3/.

Det fremgår heraf, at det naturlige baggrunds niveau er på ca. 3,3 mg pr kg TS. I jorden optræder arsen altovervejende som uorganisk arsenat.

Arsen kan også være spredt til miljøet gennem menneskers aktiviteter. Frem til begyndelsen af tresserne blev blyarsenat anvendt som bekæmpelsesmiddel inden for frugtavl. I en periode på omkring 100 år fra 1860’erne har man anvendt svovlkis til fremstilling af svovlsyre. Restproduktet kisasken indeholder meget høje koncentrationer af arsen, der således er tilført miljøet med deponeringer og spredning af kisasken. Endelig har man anvendt kromateret kobberarsenat (CCA) som træimprægneringsvæske i en ca. 40 år lang periode fra slutningen af 1930’erne /4/.

Arsenat (As V), er den dominerende specie under aerobe forhold, mens arsenit (As III) overvejende findes under anaerobe forhold. Ofte optræder begge specier dog samtidigt, formentlig fordi omdannelsen sker langsomt. Arsen findes desuden som organiske forbindelser, der er markant mindre toksiske. Disse dannes i jorden ved mikrobiel aktivitet og er hyppigt forekommende ved arsenforureninger.

#### 4.2.2 Mekanismen

Arsenat optages i rødderne og transporteres via fosfat-transportsystemet op gennem plantevævet til bladene, hvor det under medvirken af proteiner i karvævet omdannes til arsenit.

I 2013 blev det opdaget, at tilstedeværelsen af lavt tilgængelig fosfor medførte en markant øget biomasse og et større optag af arsen.

*Pteris vittata* er hjemmehørende på jord, som er karakteriseret ved lavt tilgængelig fosfor og/eller høje koncentrationer af arsen. Arsenat og fosfat fungerer pga. af beslægtede egenskaber som konkurrerende inhibitorer. Forskere ved Florida University gennemførte på den baggrund forsøg, hvor man testede hypotesen om, at en begrænset tilgængelighed af fosfor ville medføre højere optag af arsen og en bedre vækst over og i jorden.

Forsøget blev gennemført ved sammenligning af planter i to vækstmiljøer, hvor man i det ene tilføje fosforit, der har en lav tilgængelighed, og i det andet en kunstgødning med fosfor.

Forsøgene viste et ca. 50 % større optag af arsen, længere rødder og større biomasse over jorden /5/.

## 5 Forsøget

### 5.1 Indledende overvejelser

Erfaringerne med udplantning direkte i et hotspot, jf. /7/, kan sammenfattes kort. For det første viste jorden sig at være for forurenet til at tillade normal vækst, idet jorden viste fravær af mikrobiel aktivitet. For det andet skulle den døde jord vise sig for kompakt til at kunne opsuge og bortlede regnvand, hvilket efter to uger medførte oversvømmelse af arealet pga. kraftig nedbør. Disse udfordringer skulle løses i en fase 2, gennemført i 2015.

Endvidere er det antagelsen, at arsen mobiliseres lettere i et basisk jordmiljø, ligesom det er antagelsen, at *pteris vittata* foretrækker et basisk miljø, da den typisk er udbredt i limstensformationer. Det er således også antagelsen at en mobilisering af arsen vil fremme transporten med porevandet mod rødderne. Der ses i nærværende sammenhæng bort fra, at en mobilisering af arsen principielt også vil kunne befordre en nedadrettet udvaskning ved kraftig nedbør. I vækstteltet vandes begrænset, og jorden udsættes derfor ikke for en egentlig nedvaskning.

Det er en præmis for forsøget, at det skal kunne opskaleres, og det er således tilstræbt at etablere forsøgsopstillingen på en måde, der praktisk vil kunne kopieres i større skala.

### 5.2 Opstilling

To vækstbænke à 120 x 480 cm er opstillet i et område med lysforhold vekslende mellem direkte sol og skygge. Vækstbænkene er opdelt i otte felter med en dybde à 40 cm. Felterne er benævnt 1-8. Bænkene er vist i figur 1-3.

Jord fra hotspot er opblandet med hestemøg i volumenforholdet 2-1 og iblandet hønsemøg. Jorden er udlagt i vækstbænkene, hvor den er tilsat kalk i faldende mængder fra felt 1 til felt 8.

Jord, hestemøg, kalk og hønsemøg er blandet i blandemaskine for at opnå et homogent vækstmedium og derefter udlagt i drivbænkene.

Der er i alt udlagt en blanding af 3 m<sup>3</sup> jord og 1,5 m<sup>3</sup> hestemøg. Blandingen er tilsat i alt 25 kg hønsemøg svarende til ca. 3 kg i hvert felt.

Der er i alt tilsat 60 kg perlekalk. I felt 1 og 2 er der tilsat ca. 8 kg til hvert felt, i felt 3 og 4 er tilsat ca. 7 kg, i felt 5 og 6 er tilsat ca. 6 kg og i felterne 7 og 8 er der tilsat ca. 5 kg.



*Figur 1 Opstilling af vækstbænke*



*Figur 2 Vækstbænke set fra øst. Felt 1 bagerst og felt 8 nærmest*



*Figur 3 Vækstbænke set fra vest*

Før udplantning blev der d. 27. april udtaget jordprøver for analyse af indhold af næringsstoffer og bestemmelse af jordens surhed. Resultaterne heraf fremgår af tabel 1.

Tabel 1 Analyser af jord udtaget 27. april 2015

<b>Felt</b>	<i>Kvælstof total mg/kg TS</i>	<i>Kalium total mg/kg TS</i>	<i>Fosfor total mg/kg TS</i>	<i>pH</i>
1-2	13100	1880	375	7,9
3-4	5590	7370	864	8,0
5-6	1740	1800	534	7,6
7-8	2030	2120	562	7,8
<i>Gns</i>	5615	3292	583	7,8

Der blev endvidere analyseret for indhold af arsen, kobber og krom, jf. tabel 2.

Tabel 2 Analyser jord udtaget 27. april 2015

<b>Felt</b>	<i>Arsen mg/kg TS</i>	<i>Krom total mg/kg TS</i>	<i>Kobber mg/kg TS</i>
1-2	699	219	772
3-4	466	112	659
5-6	624	184	1020
7-8	702	279	1080
<i>Gns</i>	622	199	883

Sammenholdt med analyserne taget direkte i hotspot ved første fase i 2014 ses en reduktion i koncentrationerne af arsen, kobber og krom, således som tilsigtet.

Tilsætningen af kalk ses ligeledes at have givet et mere basisk jordmiljø, men en ønsket variation i surhed blev af uvisse årsager ikke opnået.

### 5.3 Udplantning og pasning

Et kort forår betød, at udplantningen blev rykket til ca. en måned senere end planlagt. Planter fremavlet i perioden oktober 2014 - maj 2015 blev udsat d. 3. juni 2015. Planterne er fremavlet af Botanisk Have ved opsamling af sporer og prikling.

De i laboratorium overvintrende planter blev sat i felt 1. I felt 2 sattes planter, der havde overvintret under vintermåtte på forsøgsstedet 2014.

I felterne 3-8 sattes de unge planter, jf. figur 4 og 5. Der er sat 9 rækker à 8 planter i hvert felt, hvilket svarer til 50 planter/m<sup>2</sup>.

Planterne er frem til afhøstning 19. oktober tilset 2-3 gange om ugen for vanding og regulering af temperatur.



*Figur 4 Væksttelt efter udplantning (felt 5-8)*



*Figur 5 Felt 3 efter udplantning*

#### **5.4 Prøver af plantemateriale**

Efter en vækstperiode på 20 uger blev der opnået en hæderlig vækst trods en sommer med moderate temperaturer og omskifteligt vejr.

Planterne opnåede en vægt på ca. 25 g og en højde på ca. 40 cm, jf. figur 6. Det er lidt mindre end opnået i 2014, hvor de udplantede bregner var etårige, mens de i 2015 udsatte var udprykket i januar 2015.



Figur 6 *Plantevækst i felt 3 før afhøstning oktober 2015*

Planterne blev delvist afhøstet d. 19. oktober 2015. Enkelte planter blev skåret helt ned med henblik på at bestemme vægt og optag i enkeltplanter, mens resten blev efterladt hele.

Tre planter blev opgravet ved dybe stik for at sikre, at alle rødder blev taget med op. Bregnen har trævlerødder som udbreder sig tæt busket ned i jorden. De opgravede planter var meget lig hinanden og nåede en dybde på ca. 20 cm, mens de horisontalt bredte sig i en diameter på ca. 15 cm. Den opblandede jord havde en dybde på ca. 40 cm. Rødderne nåede således ikke i bund af mistbænken.

Der blev udtaget i alt 7 prøver af plantematerialet med henblik på at få et tal for gennemsnitlige koncentrationer i hvert felt. Der blev udtaget én prøve af en hel plante af gennemsnitsstørrelse for dels at se eventuelle variationer og for at få bestemt en enkelt plantes tørvægt.

## 5.5 Afhøstning og nedlukning

Den 29. oktober blev planterne vandet og afdækket med tør halmstrøelse i en tykkelse på ca. 30-40 cm, jf. figur 7.

Afdækning med halm blev valgt frem for vintermåtter, fordi det kort inde i vækstperioden blev klart, at de 10 overvintrende planter sat i felt 2 ikke tålte omplantningen og alle døde på nær en enkelt.



Det kolde forår og det dermed uforudset lange ophold under vintermætter tålte planterne ikke. Der er derfor ikke foretaget analyser af jord og planter fra felt 2.



*Figur 7      Afdækning med halm for vinteren*

## 6 Resultater

### 6.1 Jord

Analyserne af jord tjener det formål at karakterisere jorden med hensyn til omtrentlige koncentrationer af arsen, kobber og krom.

Med de usikkerheder der er forbundet med analyser for indhold af tungmetaller i jord, er der på forhånd ikke planlagt målinger af effekt. Jordanalyserne er dog gentaget ved afslutningen af vækstperioden.

I tabel 3 og 4 er vist analyser af jordprøver udtaget i forbindelse med afhøstning 19. oktober. Jordprøver er udtaget som blandeprøver af fem stik i hvert felt.

Tabel 3 *Næringsindhold jord*

<b>Felt</b>	<i>Kvælstof total mg/kg TS</i>	<i>Kalium total mg/kg TS</i>	<i>Fosfor total mg/kg TS</i>	<i>pH</i>
1	6340	1200	404	7,1
3	3290	594	322	7,1
4	9130	1250	932	7,2
5	9230	1450	658	7,2
6	6220	1470	727	7,1
7	7330	1290	508	7,3
8	4820	955	480	7,2
<i>Gns</i>	6623	1173	576	7,2

Tabel 4 Analyseresultater for jordens indhold af arsen, kobber og krom

Prøve	Arsen mg/kg TS	Krom total mg/kg TS	Kobber mg/kg TS
1	902	320	1080
3	1063	307	1610
4	543	152	808
5	604	162	889
6	611	188	867
7	818	262	961
8	524	278	1020
Gns.	724	238	1034

Resultaterne af analyserne fra forår og efterår svarer i gennemsnit nogenlunde overens, men viser indbyrdes en variation, der må forklares ved de usikkerheder, der er forbundet med prøveudtagning i jord.

## 6.2 Planter

### 6.2.1 Analysemetode

Prøverne er udtaget på rilsanposer, hvor de er vejjet før åbning. De er herefter frysetørrede, nedknust og vejjet igen. Blade og stængler er ikke adskilt. Prøverne er ekstraheret ved mikrobølge assisteret syreoplukning, jf. US EPA 3051A med HNO<sub>3</sub> og HCl analyse ved ICP-MS Agilent 7700. Alle kvalitetskontroller er certificeret materiale.

Der er udført to analyser af hver prøve.

### 6.2.2 Vækst

Ved forsøgets afslutning i oktober 2015 var planterne ca. 10 måneder gamle. På det tidspunkt var planterne væsentligt større end de etårige planter, der blev udsat i 2014.

### 6.2.3 Optag af arsen, kobber og krom

I tabel 5 og 6 er analyseresultater og vægtbestemmelser for afhøstede plantematerialer vist. Prøvenummereringen henviser til feltnummer. Prøve 3H er en hel plante udtaget af felt 3. Der blev ikke taget prøver fra felt 2, da planterne her ikke overlevede omplantningen efter en lang vinter under vintermætter.

Tabel 5 Analyseresultater for planter

<b>Prøve</b>	<b>Arsen mg/kg TS</b>	<b>Krom total mg/kg TS</b>	<b>Kobber mg/kg TS</b>
1-1	3600	3,68	14,1
1-2	3580	3,12	12,9
3-1	4030	2,50	16,6
3-2	4130	2,06	15,6
3H-1	3410	8,63	25,2
3H-2	3540	8,52	28,7
4-1	3830	3,44	14,6
4-2	4060	3,37	13,6
5-1	3020	8,49	23,1
5-2	3210	9,02	22,6
6-1	2890	7,47	25,2
6-2	2980	6,89	21,4
7-1	2750	6,49	18,6
7-2	2960	7,14	21,6
8-1	2980	7,49	26,1
8-2	3060	7,46	21,8
Gns.	3377	5,99	20,1
Max	4130	9,02	28,7
Min	2750	2,50	12,9
Gns. 2014	2132	12,49	66,05
Max 2014	3617	40,67	154,41
Min 2014	1321	2,12	24,14

Tabel 6 Plantevægt

<b>Prøve</b>	<b>Høstet vægt (g)</b>	<b>Frysetørret vægt (g)</b>	<b>Vandindhold (%)</b>
1	44,76	9,59	78,6
3	40,29	6,95	82,8
3 Hel	22,3	3,4	84,8
4	44,49	7,8	82,5
5	56,22	9,5	83,1
6	33,93	6,36	81,3
7	44,97	7,07	84,3
8	47,65	7,51	84,2

## 7 Vurderinger

### 7.1 Optag i planterne

På trods af en sen udplantning, er der over en vækstperiode på 20 uger opnået optag, der i gennemsnit er 58 % højere end ved forsøget i 2014. Der påvises et gennemsnitligt optag af arsen på 3,4 g/kg plantemateriale (tørstof) og et højeste optag på 4 g/kg.

Der ses variationer, men der synes ikke umiddelbart at kunne udpeges forhold, der kan forklare variationerne. Det bemærkes, at optaget i de toårige planter ikke afviger fra optaget i de etårige.

### 7.2 Dyrkningserfaringer

Det er heller ikke i 2015 forsøget lykkedes at skaffe fosforit for at stimulere vækst og optag af arsen. Der er efter anbefalinger fra forskerholdet ved University of Florida tilført hønsemøg, der indeholder både kvælstof, kalium og fosfor. Sidstnævnte er principielt mindre tilgængeligt for planterne og vurderes at have en effekt svarende til fosforit. Det er dog ikke undersøgt nærmere inden for rammerne af dette projekt.

Væksten synes at have været rigtig god, idet planterne på ti måneder blev væsentligt større end de i 2014 udplantede etårige planter var ved udplantningen. Vægten af en enkelt plante nåede i 2014 op på ca. 50 g, dvs. det dobbelte af vægten pr. plante i 2015.

Fra litteraturen ved vi, at bregnen trives godt i kalkholdig jord, ligesom det som udgangspunkt er underbygget, at arsen er mere mobilt i basisk miljø. Det er trods en rigelig tilførsel af kalk ikke lykkedes at skabe de forudsatte betingelser med et basisk jordmiljø.

Jordens surhed synes at stige med faldende pH fra start til slut. Der gives ikke nogen forklaring på dette.

### 7.3 Nutidsværdiberegninger

Der er meget overslagsmæssigt udført en sammenlignende konsekvensberegning (nutidsværdiberegning) af metoden, sammenholdt med at lave en opgravning og ex site fjernelse. Der er opstillet en række forudsætninger for dette, og tillige lavet 2 scenarier, hvor det ene omhandler en svag forurening, tilsvarende ovennævnte, der vil have en varighed på mellem 8 og 12 år

for at oprense grunden. Det andet scenarie vedrører en meget forurenede grund, på niveau med Collstrop grunden. Der behandles kun jord fra de øverste 0,5 m hvilket betyder at formålet med en oprensning at bevare grundvandsressourcen/sikre mod risikoen for nedsivning til recipienten (Esrom sø) muligvis ikke er opfyldt ved oprensningerne, som derfor kun skal ses som rent overslagsmæssige. Der regnes således med at der skal behandles et tænkt areal på 100 x 100 m<sup>2</sup> (1 ha) med de 2 metoder (svarende til 10.000 tons jord). Den fysiske fjernelse og behandling er sat til hhv. mellem 900 kr/tons og 1.400 kr/tons (kraftige forurening), og mellem 400 til kr/tons og 700 kr/tons (svage forurening) alt incl.

For phytooprensningen regnes med at jorden behandles og der sættes store drivhuse op for at sikre kontrollerede forhold under oprensningen. Dette sættes til en skønnet anlægsomkostning på mellem 3 og 7 mio. kr., da det afhænger meget af hvilken løsning der vælges. Herudover regnes med en oprensningstid på mellem 8 og 12 år med en årlig driftsomkostning på mellem kr. 150.000,- og kr. 350.000,- for den svage forurening. For den kraftige forurening regnes med en meget urealistisk lang oprensningstid på mellem 150 og 300 år. Dette vil give beregninger med et meget stort spænd på grund af de store usikkerheder. Beregningerne fremgår af tabel 7.

Tabel 7. Nutidsværdiberegninger

Pteris Vitata. Phyto oprensning.														Collstrop grunden. Hillerød	
Kapitalisering af omkostninger til alternative afværgelsesninger												Kalkulationsrente p.a. (%)		Høj	Lav
														5,0	2,0
Alternative oprensningemetoder															
Afværgemetode	Supplerende undersøgelser og pilotforsøg 1.000 kr		Etablering incl. projektering og indkøring 1.000 kr		Sum undersøgelser og etablering 1.000 kr		Drift pr. år incl. tilsyn 1.000 kr		Drifttid År		Demontering 1.000 kr		Samlet omkostning (nutidsværdi) 1.000 kr		
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Afgravning kraftig forurening	100	300	9.000	14.000	9.100	14.300	0	0	0,0	0,0	0	50	9.100	14.350	
Afgravning svag forurening	100	300	4.000	7.000	4.100	7.300	0	0	0,0	0,0	0	0	4.100	7.300	
Phyto oprensning kraftig forurening	100	300	3.000	8.000	3.100	8.300	150	350	150,0	300,0	100	300	6.098	25.755	
Phyto oprensning svag forurening	100	300	3.000	8.000	3.100	8.300	150	350	8,0	12,0	100	300	4.137	12.238	

Det fremgår, at afgravning højst sandsynligt er den mest kosteffektive ved den kraftige forurening, mens det vil være anlægsomkostningerne til drivhuse mv. som er afgørende ved den svage forurening. Her vil man sandsynligvis med fordel foretage phytooprensning, såfremt formålet dækkes tilstrækkeligt og arealet alligevel ikke benyttes. Som nævnt vil det være urealistisk ved den kraftige forurening at beslaglægge arealet i flere hundrede år. Herudover skal man huske på at det kun er den øvre 0,5 meter jord der behandles. Der er desuden noget praktisk omkring behandlingen af jorden fra 0,2-0,5 mut. Man skal have optimeret rodlængden inden disse tiltag vil kunne igangsættes ellers skal man bruge den dobbelte plads, hvilket fjerner den sidste rest af tvivl om metodens fremtid.

## 7.4 Effekt

I det gennemførte forsøg er der udplantet 50 planter pr. m<sup>2</sup>, og den opnåede plantemasse svarer til ca. 170 g (tørvægt).

Med et gennemsnitligt optag af arsen på 4 g/kg vil der være fjernet 0,6 g As/m<sup>2</sup> i en vækstperiode. I forsøget nåede rødderne ned til 20 cm ut, og således har planterne fjernet 0,6 g arsen fra 300 kg jord.

## 7.5 Konklusioner og perspektiver

I en jord, der har et arsenindhold på 40 mg/kg TS, vil der i 300 kg være 12 g arsen. På 20 år vil denne mængde principielt være fjernet fra jorden og flyttet op i planterne, eller på ti år vil man nå en koncentration på niveau med jordkvalitetskriteriet.

Det anses på baggrund af resultaterne og erfaringerne fra både 2014 og 2015 for sandsynligt, at biomassen vil kunne øges, ligesom det vil være muligt at øge optaget af arsen ved hjælp af tilsætning af fosforit.

Det er ligeledes antagelsen, at det vil være muligt at øge røddernes længde ved en vanding, der tvinger rødderne længere ned for at nå vand.

På Collstrop-grunden er der i hotspots koncentrationer af arsen på op til 1.000 mg/kg, og overskridelser af jordkvalitetskriteriet kan måles ned til 3 meter under terræn. Kobber findes i lignende koncentrationer, og krom måles i koncentrationer omkring 300 mg/kg TS.

Forsøget i 2014 viste, at jorden i hotspots er helt uden mikrobiel aktivitet. Dette forhold kan tilskrives de høje koncentrationer af både krom, arsen og kobber. Forsøget i 2015 viste, at det er muligt at behandle jorden og således dels fortynde forureningen og dels at tilvejebringe et jordmiljø, der befordrer mikrobiel aktivitet og dermed plantevækst. Forsøget i 2015 giver ikke svar på, om det skabte jordmiljø vil være i balance over tid, eller om der kræves yderligere behandlinger gennem en oprensningsperiode.

Det synes imidlertid klart, at en phyto-oprensning af jord for arsen i koncentrationer på niveau med jorden på Collstrop-grunden ikke er praktisk gennemførlig ved anvendelse af *pteris vittata*.

Ved koncentrationer af arsen på 20 - 100 mg/kg TS vil det være muligt at fjerne arsenet i øverste jordlag over en årrække under den forudsætning, at planterne sikres overlevelse gennem vinterperioderne. Forsøget i 2015 er afsluttet med en afdækning af planterne i vækstbænkene med halm. Planterne er således dels sikret mod nedbør og dels beskyttet mod kulde ved en isolering, der tillader en iltning.

Ordningen er valgt for at undersøge, om dette vil være tilstrækkeligt for at sikre planternes overlevelse inden for en praktisk gennemførlig ramme. Alternativet vil være at opstille en form for opvarmet væksthus.

Et opvarmet væksthuse vil selvsagt fordyre en oprensning med *pteris vittata*. Det er imidlertid snarere den forholdsvis lange tidshorisont, hvor en grund ligger ubenyttet hen, der vil være den største økonomiske byrde ved at anvende phytooprensning ved hjælp af bregnen *pteris vittata*.



## 8 Referencer

1. Kate Rude: Ferns Remove Arsenic from Soil and Water, in: Geonome News Network, August 2004
2. Bala Rathinasabapathi et al.: Arsenic Hyperaccumulating Ferns and their Application to Phytoremediation of Arsenic Contaminated Sites, in: Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology Volume III, 2006 Global Science Books, UK
3. John Jensen et al.: Tungmetaller i danske jorder, Danmarks Miljøundersøgelser 1996
4. Sanne Skov Nielsen, Rasmus Jakobsen og Peter Kjeldsen: Lokalitet nr. 219-3 Collstrupgrunden. Udredning vedr. forureningssituationen på og omkring grunden 1977 – 2009. DTU Miljø, april 2010
5. Jason T. Lessl† and Lena Q. Ma: Springly-Soluble Phosphate Rock Induced Significant Plant Growth and Arsenic Uptake by *Pteris vittata* from Three Contaminated Soils, in: Environmental Science and Technology nr. 47, 2013
6. Luu Thai Danh et al.: A Critical Review of the Arsenic Uptake Mechanisms and Phytoremediation Potential of *Pteris vittata*, in: International Journal of Phytoremediation 16:5, 429-453, 18 Oct 2013
7. Phytoekstraktion af tungmetaller. Rapport 1. Geo og Outzen Pro for Region Hovedstaden 2014-12-17



Pilot scale heavy metal remediation

## **Bilag 1: Analyserapporter**



TEST Reg.nr. 361

ALS Denmark A/S  
Bakkegårdsvej 406 A  
DK-3050 Humlebæk  
Telefon: +45 4925 0770  
www.alsglobal.dk

**ANALYSERAPPORT**

**Udskrevet:** 20-05-2015  
**Version:** 2  
**Modtaget:** 27-04-2015  
**Påbegyndt:** 27-04-2015  
**Ordrenr.:** 296257

Geo  
Maglebjergvej 1  
2800 Lyngby  
Att.: John Bastrup

**Sagsnavn:** 37521  
**Lokalitet:** Jespervej, Collstropgrunden  
**Udtaget:** 27-04-2015  
**Prøvetype:** Jord  
**Prøvetager:** GEO  
**Kunde:** Region Hovedstaden, Kongens Vænge 2, 3400 Hillerød

Prøvenr.:	54004/15	54005/15	54006/15	54007/15		
<b>Prøve ID:</b>	1	2	3	4		
<b>Dybde:</b>	- m u.t	- m u.t	- m u.t	- m u.t		
<b>Kommentar</b>	*1	*1	*1	*1		
Parameter					Enhed	Metode
Tørstofindhold	82.7	63.6	74.4	69.5	%	DS 204
Total kvælstof, N	13100	5590	1740	2030	mg/kg TS	Nordforsk 1975:6
Kalium, total	# 1880	7370	1800	2120	mg/kg TS	DS259+ICP
Arsen, As	699	466	624	702	mg/kg TS	DS259+ICP
Bly, Pb	15	11	12	24	mg/kg TS	DS259+ICP
Cadmium, Cd	0.41	0.43	0.42	0.49	mg/kg TS	DS259+ICP
Chrom (total), Cr	219	112	184	279	mg/kg TS	DS259+ICP
Kobber, Cu	772	659	1020	1080	mg/kg TS	DS259+ICP
Nikkel, Ni	3.6	3.8	3.4	4.0	mg/kg TS	DS259+ICP
Zink, Zn	72	119	56	73	mg/kg TS	DS259+ICP
Total phosphor, P	375	864	534	562	mg/kg TS	DS259+ICP
pH	7.9	8.0	7.6	7.8	pH	Vand/jord 2.5 PD 8A

**Kommentar**

\*1 Ingen kommentar

Dorte Lund Troelsen



ALS Denmark A/S  
Bakkegårdsvej 406A, DK-3050 Humlebæk  
Tlf. +45 4925 0770, Fax +45 4925 0771

### Jordklassificering Sjælland m. klasse 0

37521, Jespervej, Collstropgrunden

I henhold til "Vejledning i håndtering af forurenede jord på Sjælland (Bilag A3, 27.09.2010)"

Udskrevet 20-05-2015

Stof		Resultat			
		54004/15	54005/15	54006/15	54007/15
		1 -	2 -	3 -	4 -
Arsen (As)	mg/kg TS	699	466	624	702
Bly (Pb)	mg/kg TS	15	11	12	24
Cadmium (Cd)	mg/kg TS	0.41	0.43	0.42	0.49
Chrom Total (Cr total)	mg/kg TS	219	112	184	279
Kobber (Cu)	mg/kg TS	772	659	1020	1080
Nikkel (Ni)	mg/kg TS	3.6	3.8	3.4	4.0
Zink (Zn)	mg/kg TS	72	119	56	73
<b>Forureningsklasse</b>		<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>

Grænseværdier				
Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
10	20	20	50	50
40	40	120	400	400
0,5	0,5	1	5	5
50	500	500	750	750
30	500	500	750	750
15	30	40	100	100
100	500	500	1500	1500
<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>



TEST Reg.nr. 361

ALS Denmark A/S  
Bakkegårdsvej 406 A  
DK-3050 Humlebæk  
Telefon: +45 4925 0770  
www.alsglobal.dk

**ANALYSERAPPORT**

**Udskrevet:** 17-12-2015  
**Version:** 2  
**Modtaget:** 03-11-2015  
**Påbegyndt:** 03-11-2015  
**Ordrenr.:** 314842

Geo  
Maglebjergvej 1  
2800 Lyngby  
Att.: John Bastrup

**Sagsnavn:** 37521  
**Lokalitet:** Jespervej, Collstropgrunden  
**Udtaget:** 02-11-2015  
**Prøvetype:** Jord - j  
**Prøvetager:** rekv. geo  
**Kunde:** Region Hovedstaden, Kongens Vænge 2, 3400 Hillerød

Prøvenr.:	147686/15	147687/15	147688/15	147689/15	147690/15		
<b>Prøve ID:</b>	1	3	4	5	6		
<b>Dybde:</b>	- m u.t	- m u.t	- m u.t	- m u.t	- m u.t		
<b>Kommentar</b>	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Tørstofindhold	73.2	73.2	52.4	68.2	63.0	%	DS 204:1980
Total kvælstof, N	6340	3290	9130	9230	6220	mg/kg TS	Nordforsk 1975:6
Kalium, total	# 1200	594	1250	1450	1470	mg/kg TS	DS259+ICP
Arsen, As	902	1063	543	604	611	mg/kg TS	DS259+ICP
Bly, Pb	18	19	11	12	12	mg/kg TS	DS259+ICP
Cadmium, Cd	12	14	6.9	7.5	7.7	mg/kg TS	DS259+ICP
Chrom (total), Cr	320	307	152	162	188	mg/kg TS	DS259+ICP
Kobber, Cu	1080	1610	808	889	867	mg/kg TS	DS259+ICP
Nikkel, Ni	3.7	4.0	3.4	3.3	3.6	mg/kg TS	DS259+ICP
Zink, Zn	114	79	81	83	85	mg/kg TS	DS259+ICP
Total fosfor, P	404	322	932	658	727	mg/kg TS	DS259+ICP
pH	7.1	7.1	7.2	7.2	7.1	-	Vand/jord 2.5+DS 287

Prøvenr.:	147691/15	147692/15					
<b>Prøve ID:</b>	7	8					
<b>Dybde:</b>	- m u.t	- m u.t					
<b>Kommentar</b>	*1	*1					
Parameter			Enhed	Metode			
Tørstofindhold	65.6	71.4	%	DS 204:1980			
Total kvælstof, N	7330	4820	mg/kg TS	Nordforsk 1975:6			
Kalium, total	# 1290	955	mg/kg TS	DS259+ICP			
Arsen, As	818	524	mg/kg TS	DS259+ICP			
Bly, Pb	16	11	mg/kg TS	DS259+ICP			
Cadmium, Cd	11	6.9	mg/kg TS	DS259+ICP			
Chrom (total), Cr	262	278	mg/kg TS	DS259+ICP			
Kobber, Cu	961	1020	mg/kg TS	DS259+ICP			
Nikkel, Ni	3.5	5.7	mg/kg TS	DS259+ICP			
Zink, Zn	97	62	mg/kg TS	DS259+ICP			
Total fosfor, P	508	480	mg/kg TS	DS259+ICP			
pH	7.3	7.2	-	Vand/jord 2.5+DS 287			

**Kommentar**

\*1 Ingen kommentar

Trine Kornbeck

Sample list

Bregne Projekt

37521

Date: 19-10-2015

Date: 29-10-2015

Lab no.	Sample ID	Room temp. sample+container (g)	FreezeDryer sample+container (g)	Container Empty (g)	Dry weight (g)	Water %
51+52	1	50,29	15,12	5,53	9,59	78,6
53-54	3	45,88	12,54	5,59	6,95	82,8
55+56	3-H	27,92	9,02	5,62	3,4	84,8
57+58	4	50,13	13,44	5,64	7,8	82,5
59+60	5	61,81	15,09	5,59	9,5	83,1
61+62	6	39,31	11,74	5,38	6,36	81,3
63+64	7	50,39	12,49	5,42	7,07	84,3
67+68	8	53,06	12,92	5,41	7,51	84,2

ICP-MS analysis of "Bregne" samples

2015-11-13

Mikael Olsson

Sinh Nguyen

Susanne Kruse

Instrument DL is calculated from the standard curve

Method DL is calculated from blanks (n=7)

Conc. RSD = The same injection analysed 6 times (Contaminated soil)

Conc. RSD = The same injection analysed 2 times (Agilent, 5 ug/L)

Conc. RSD = The same injection analysed 5 times (Agilent and EnviroMAT)

DTU Miljø  
Laboratorie



		52 Cr [ He ]	63 Cu [ He ]	75 As [ He ]
<b>Controls (n=6)</b>	<b>Ref. value</b>	159.8 mg/Kg	460.4 mg/Kg	22.9 mg/Kg
Contaminated Soil Ref., Cert Ref Standard (%RSD)		8,84	2,01	3,59
Contaminated Soil Ref., Cert Ref Standard(%Recovery)		98	91	111
<b>Controls (n=2)</b>	<b>Ref. value</b>	5 ug/L	5 ug/L	5 ug/L
Agilent., Cert Ref Standard (%RSD)		5,68	3,08	5,30
Agilent., Cert Ref Standard(%Recovery)		107	109	108
<b>Controls (n=5)</b>	<b>Ref. value</b>	50 ug/L	50 ug/L	50 ug/L
Agilent, Cert Ref Standard (%RSD)		2,18	2,13	2,47
Agilent, Cert Ref Standard (%Recovery)		100	100	103
<b>Controls (n=5)</b>	<b>Ref. value</b>	242 ug/L	487 ug/L	122 ug/L
EnviroMAT Drinking Water, Cert Ref Standard (%RSD)		2,93	2,49	2,65
EnviroMAT Drinking water, Cert Ref Standard(%Recovery)		98	97	105

		52 Cr [ He ]		63 Cu [ He ]		75 As [ He ]	
Instrument DL (µg/l)		0,029		0,129		0,036	
Method DL (ug/L)		0,592		n.a.		1,060	
Method DL (mg/Kg)		2,37		n.a.		4,24	
Sample name	Sample no (lab)	Conc. [ mg/Kg TS]	Conc. RSD	Conc. [ mg/Kg TS]	Conc. RSD	Conc. [ mg/Kg TS]	Conc. RSD
1-1	51	3,68	4,01	14,1	3,44	3600	0,48
1-2	52	3,12	5,20	12,9	3,35	3580	0,78
3-1	53	2,50	8,04	16,6	1,08	4030	0,97
3-2	54	2,06	12,72	15,6	1,14	4130	1,13
3H-1	55	8,63	4,53	25,2	1,20	3410	0,33
3H-2	56	8,52	2,70	28,7	1,95	3540	0,43
4-1	57	3,44	7,66	14,6	2,36	3830	0,37
4-2	58	3,37	5,55	13,6	4,06	4060	0,34
5-1	59	8,49	6,18	23,1	0,65	3020	0,41
5-2	60	9,02	3,21	22,6	0,88	3210	0,22
6-1	61	7,47	1,48	25,2	0,97	2890	0,16
6-2	62	6,89	2,21	21,4	0,78	2980	0,68
7-1	63	6,49	4,35	18,6	2,32	2750	0,60
7-2	64	7,14	2,47	21,6	0,67	2960	0,43
8-1	67	7,49	0,60	26,1	2,54	2980	0,70
8-2	68	7,46	3,95	21,8	0,97	3060	0,23