

## NOTAT

<b>Projekt</b>	<b>Region Syddanmark – Banegravsdepotet i Grindsted</b>
<b>Projektnummer</b>	<b>1341700005</b>
<b>Kundenavn</b>	Region Syddanmark
<b>Emne</b>	Nye metoder til rensning/fiksering af tungmetalforurening i Banegravsdepotet i Grindsted
<b>Projektleder</b>	Claus Westergaard
<b>Revisionsnr.</b>	3
<b>Udgivet</b>	22. november 2017

### 1 INDLEDNING

I Banegravsdepotet i Grindsted har det daværende Grindstedværket i perioden 1934-1962 deponeret store mængder affald indeholdende blandt andet tungmetaller, herunder kviksølv, klorerede opløsningsmidler og en lang række medicinske stoffer fra virksomhedens produktion af lægemidler. Derudover er der påvist indhold af insektbekæmpelsesmidler i depotet. Ved undersøgelsen af depotet i 2010 blev det samlede indhold af forurenende stoffer estimeret til ca. 27 tons, heraf blev indholdet af tungmetaller inkl. kviksølv estimeret til at udgøre ca. 24 tons /2/. Depotet er etableret i en lavning i terrænet, dannet i forbindelse med udgravning af materiale (sand) til etableringen af en banedæmning til Trolldhedebanen.

I forbindelse med at regionrådet i 2011 vedtog at gennemføre en afværgeindsats på depotet, som skulle hindre fysisk kontakt med den forurenede jord samt minimere risikoen for, at folk udsættes for afdampning fra forureningen, blev det besluttet, at der skulle igangsættes undersøgelse og udvikling af nye rensnings- og/eller fikseringsteknikker, som kunne anvendes på stedet til oprensning/fiksering af tungmetallerne i depotet.

Ønsket om at rense eller fikserne tungmetallerne i Banegravsdepotet var begrundet i, at der med tiden vil udvaskes betragtelige mængder af tungmetaller fra depotet, primært kviksølv, zink, cadmium, nikkel og bly, som potentielt vil ende i Grindsted Å.

Mængden af tungmetaller, der vil blive udvasket fra depotet kan blive påvirket af ændringer i grundvandsstanden som følge af klimaforandringer eller ophør/ændring af indvindingen ved DuPont, ændrede kemiske forhold i depotmaterialet ved en ændret nedbørsmængde og en ændring af redoxforholdene på grund af gennemstrømning af oxideret grundvand.

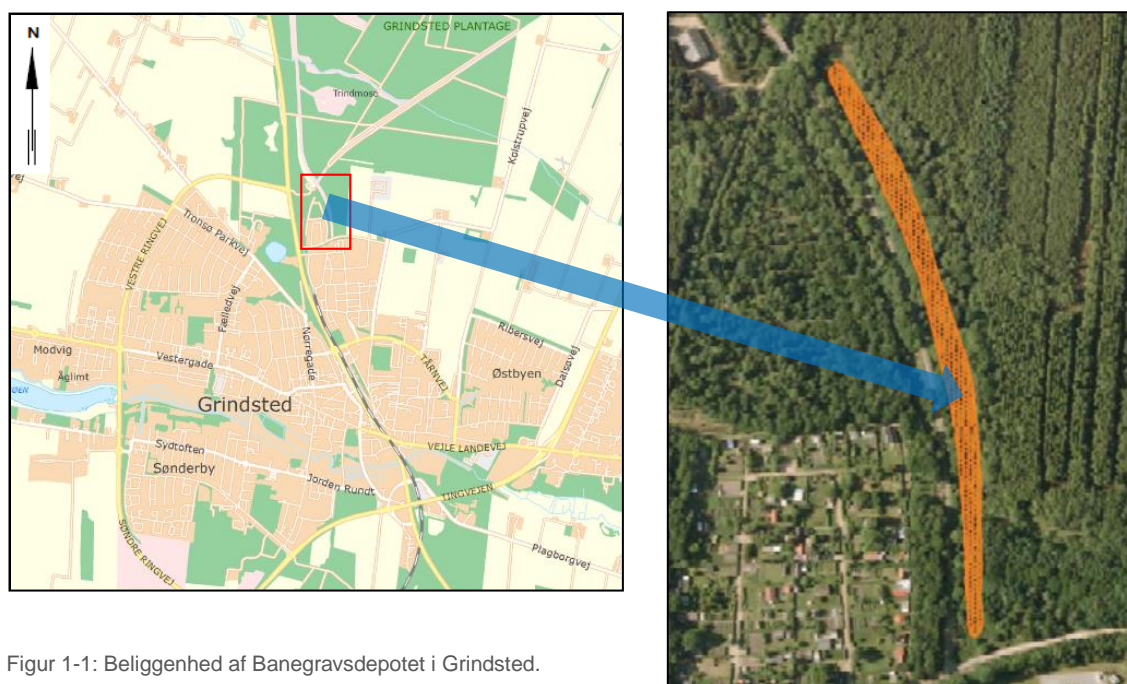
Som første del af arbejdet med at undersøge og udvikle nye rensnings- og/eller fikseringsteknikker, som kan anvendes til at hindre eller begrænse udvaskningen af tungmetallerne i banegravsdepotet, har Region Syddanmark nedsat en projektgruppe med deltagelse af følgende personer:

Lone Dissing, Region Syddanmark  
Sanne Skov Nielsen, Region Syddanmark  
Jørn K. Pedersen, Region Syddanmark  
Kim Jensen, Arkil Fundering A/S  
Loren Ramsay, VIA University College  
Claus Westergaard, Orbicon A/S

Dette notat beskriver resultatet af projektgruppens arbejde.

## 1.1 Baggrund

Banegravsdepotet dækker et areal på ca. 8.600 m<sup>2</sup> - 410 m langt, 18-25 m bredt og 1-2,5 m tykt. Depotet ligger i et område, hvor geologien består af hedeslette (sand) med et terrænnært grundvandsmagasin, der træffes mellem 3 og 6 m u. t. Grundvandet strømmer i sydvestlig retning mod Grindsted Å med en gradient på ca. 2,3 ‰ /2/. Beliggenheden af Banegravsdepotet ses på Figur 1-1.



Figur 1-1: Beliggenhed af Banegravsdepotet i Grindsted.

Opfyldningen af banegraven foregik fra syd mod nord, hvilket betyder, at de ældste deponeringer findes i den sydligste del af depotet. Den store og mangearterede produktion vurderes at være en væsentlig årsag til store inhomogeniteter i depotfyldet.

Før gennemførelse af afværgeforanstaltninger i 2012 var depotfyldet overdækket af et lag dækjord med en tykkelse mellem 0 og 0,6 m – tyndest i den nordlige ende. Dækjorden består af sort muld med et varierende indhold af sand og grus samt større stykker bygningsaffald. Dækjorden indeholder flere steder lige så meget forurening som depotfyldet /2/.

Under depotfyldet findes ca. 0,2 til 0,5 m intakt sandjord, som er påvirket af udvasket forurening fra depotet. Der er ca. 2 m fra bunden af depotfyldet til grundvandsspejlet. En principskitse af Banegravsdepotet er vist på Figur 1-2 /2/.



Figur 1-2: Principskitse af Banegravsdepotet /2/.

Selve depotfyldet består hovedsageligt (ca. 90 vol. %) af finkornet aktivt kul og slam, og en meget lille andel af andet materiale, overvejende byggeaffald. Det intakte forurenede sand umiddelbart under depotet er sort grå misfarvet /2/.

Der er udført undersøgelser af poreluften i depotet, den atmosfæriske luft over depotet, dækjorden, depotfyldet og den intakte jord under depotet samt af det terrænnære grundvand /2/.

I dækjorden er der påvist indhold af kviksølv (op til 513 mg/kg TS) og andre tungmetaller (bl.a. kobber op til 3.600 mg/kg TS, bly op til 3.200 mg/kg TS og nikkel op til 1.000 mg/kg TS), samt medicinalrester og små mængder herbicider. Indhold af tungmetaller er påvist i dækjorden på hele depotet, men i

varierende koncentrationer. Ligeledes er kviksølv påvist i dækjorden over hele depotet, men med de højeste indhold i de nordligste 100 m af depotet /2/.

I depotfyldet er der påvist indhold af primært kviksølv (op til 728 mg/kg TS) og andre tungmetaller (bl.a. zink op til 24.000 mg/kg TS, kobber op til 2.100 mg/kg TS og bly op til 1.800 mg/kg TS), BTEX (toluen op til 1.120 mg/kg TS), sekundært medicinalrester, herbicider og klorerede forbindelser. Kviksølv forekommer i hele depotet, men med de højeste indhold i specielt den nordligste del af depotet. De fleste forureningskomponenter i depotet, såvel organiske som uorganiske, er hovedsagelig adsorberet til det aktive kul og jordens fine fraktioner samt til det organiske stof i jorden. Der er meget store variationer i typen og koncentrationsniveauer af påviste metaller, hvilket understreger, at depotfyldet er meget inhomogent /2/.

Indholdet af kviksølv i depotet består alt overvejende af total kviksølv og kun i mindre grad af metylkviksølv, der er meget giftigt for mennesker og dyr. Det er vurderet, at dannelsen af metylkviksølv i depotet er både langsom og begrænset, fordi kviksølvet hovedsageligt er deponeret som kviksølvulfid /5/.

I den intakte jord umiddelbart under depotet er der primært påvist indhold af tungmetaller, herunder kviksølv, samt BTEX. Der er i mindre grad påvist indhold af medicinalrester og herbicider. Stofferne forekommer i lavere koncentrationer end i dækjorden og depotfyldet /2/.

De forurenede jordvolumener er beregnet til ca. 4.200 m<sup>3</sup> dækjord, ca. 10.000 m<sup>3</sup> depotfyld og ca. 8.600 m<sup>3</sup> forurenede intakt jord umiddelbart under depotet – i alt ca. 22.800 m<sup>3</sup> forurenede jord /2/.

I atmosfærisk luft udtaget henholdsvis 10 cm og 60 cm over terræn på Bane-gravsdepotet er der påvist indhold af PCE og BTEX samt amylnaloner. På den nordligste del af depotet, hvor de højeste indhold af letflygtige stoffer er påvist i poreluften, er der i den atmosfæriske luft 10 cm over terræn påvist indhold af PCE og benzen i koncentrationer op til henholdsvis 130 µg/m<sup>3</sup> og 0,18 µg/m<sup>3</sup> /2/.

I den øverste ca. 1 m af grundvandet umiddelbart under depotet er der primært påvist indhold af medicinalstoffer samt bly og kviksølv. De påviste indhold af bly og kviksølv er på niveau eller under niveau for Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterier. I én enkelt prøve er der påvist indhold af lindan væsentligt over grundvandskvalitetskriteriet /2/. Der findes ikke grundvandskvalitetskriterier for medicinalstofferne.

På grund af den påviste sundhedsmæssige risiko ved direkte fysisk kontakt med den forurenede jord og påvirkningen fra afdampning fra depotet gennemførte Region Syddanmark i 2012 en afværgeindsats på depotet. Der blev lagt fiberdug, en halv meter gruspude samt 20 cm muldjord henover depotet, hvorefter området blev tilplantet med tornede buske. Formålet med afværgeforanstaltningen var at afskærme mod direkte fysisk kontakt med forureningen samt at minimere offentlig færdsel på depotarealet /7/.

## 1.2 Formål

Formålet med projektgruppens arbejde er at identificere og vurdere relevante eksisterende in situ og on site oprensings- og/eller fikseringsteknikker i forhold til udvaskning af tungmetaller.

Ud over at standse eller nedbringe udvaskningen af tungmetaller skal metoderne sikre arealanvendelsen ved depotet, dvs. at afdampningen af methylkviksølv, kulbrinter og chlorerede opløsningsmidler skal overholde afdampningskriterierne, og der må ikke være mulighed for kontakt til stofferne.

Vurderingen af relevante eksisterende in situ og on site oprensings- eller fikseringsteknikker skal munde ud i:

- Identificering af eksisterende metoder, der kan standse udvaskningen eller nedbringe den til et acceptabelt niveau.
- Identificering af metoder, der efter et rimeligt omfang af udvikling forventes at kunne standse udvaskningen eller nedbringe den til et acceptabelt niveau.
- Økonomiske overslag over omkostninger til gennemførelse af de mest lovende metoder inkl. eventuel forudgående udvikling af metoderne.

De metoder/teknikker, der vurderes mest lovende skal måles og vurderes i forhold til deres funktion i forhold til formålet, oprensningsmæssig effekt, velafprøvet, robusthed, arbejdsmiljø, behov for udvikling, klimarobusthed, økonomi og drift samt rekreative forhold.

## 2 AFHOLDT WORKSHOP, VURDERING AF AFVÆRGEMETODER

Den 15.08.2017 afholdt projektgruppen en workshop i regionshuset i Vejle.

På workshoppen orienterede Region Syddanmark om Banegravsdepotet i Grindsted og redegjorde for resultaterne af de gennemførte undersøgelser og afværgetiltag ved lokaliteten.

Ved en efterfølgende brainstorm i forhold til in situ og on site afværgemetoder der kan begrænse eller hindre udvaskningen af tungmetaller fra depotet, blev nedenstående metoder/teknikker bragt på banen. For hver metode/teknik er projektgruppens overordnede vurderinger af metodens egnethed i forhold til formålet beskrevet. Overordnet blev det vurderet, at in situ metoder anvendt i selve depotet kunne være problematiske på grund af forureningens inhomogene fordeling i jorden. On site metoder, hvor jorden graves op inden behandlingen, vil lettere kunne komme om ved inhomogenitetsudfordringen.

- **Bortgravning og deponering**  
Afggravning af forureningen har tidligere været behandlet af Region Syddanmark. Prisen blev vurderet til ca. 110 mio. kr. /7/.
- **Termiske tekniker**  
Anvendt in situ vurderes metoden ikke egnet, da depotet udstrækker sig over et stort areal og tykkelsen af depotet er beskeden. Depotets inhomogenitet taler endvidere imod metoden. Prisen er meget høj - vurderes at være omkring 80 mio. kr. Anvendt on site med forureningen placeret i miler kunne termisk behandling muligvis være en relevant metode. Metoden vil kunne fjerne kviksølv, men ikke øvrige tungmetaller.
- **Cementstabilisering**  
Ved Solidifikation/Stabilisering er det ikke nødvendigt at opgrave forureningen. Der er usikkerhed om, hvor meget udvaskningen reduceres, hvad metoden betyder for infiltrationen, og hvilke kemiske processer der benyttes. Prisen vurderes at være omkring 10-15 mio. kr.
- **Indkapsling**  
Opgravning af forureningen og indkapsling i kælkebakke, skatebane eller lignende kunne være en egnet afværgeløsning. Formentlig vil det også være nødvendigt at opgrave forurenede intaktjord umiddelbart under depotet. Forhold omkring tæthed og levetid af topmembran (cement, ler, asfalt, plastic) blev drøftet.
- **Permeabel reaktiv barriere**  
En grundvandsafværge i form af en permeabel reaktiv barriere bør undersøges nærmere. Grundvandsafværge vil ikke medføre ar-

bejdsmiljøproblemer ved håndtering af forurenede jord. Region Syddanmark kontakter Palle Ejlskov med henblik på at høre om Ejlskovs erfaringer med metoden i forhold til bl.a. oprensningstid, levetid og pris.

- **Soil Amendments**

Ved denne metode tilsættes forskellige stoffer til jorden enten ved injektion eller ved mixing. Kim Jensen omtalte Metafix-metoden. Det undersøges nærmere hvilke reagenter og tilsætningsstoffer metoden er baseret på.

- **Jordvask**

Jordvask (sortering, våd sigtning/separation) vurderes at være en brugbar metode, der kunne udføres on site. Metoden vil kræve et pilotforsøg med ca. 25 tons jord.

- **Phytoremediering**

Depotets inhomogenitet taler imod metoden. Desuden vil den lange oprensningstid (der vil være tale om århundreder) og usikkerhed omkring effektiviteten betyde, at metoden ikke vil være velegnet til Banegravsdepotet. Endvidere kan der med phytoremediering være risiko for spredning af tungmetaller til fødekæden.

- **Elektrokemi**

Depotets inhomogenitet taler imod elektrokinetisk oprensning. Metoden er stadig under udvikling, og der findes en del dårlige erfaringer med anvendelse af metoden. Elektrokemisk jordrensning er endnu ikke udviklet til at håndtere store jordmængder. Forsøg med opskalering har vist, at metoden egner sig dårligt hertil.

Med baggrund i brainstormen blev det besluttet, at projektgruppen skulle arbejde videre med følgende metoder/teknikker, der blev vurderet bedst egnede på lokaliteten:

1. Bortgravning og deponering
2. Reaktiv permeabel barriere
3. Cementstabilisering in situ
4. Indkapsling on site
5. Soil amendments
6. Jordvask



### 3 DETALJERET BESKRIVELSE AF UDVALGTE METODE

I det følgende er der foretaget en detaljeret beskrivelse af udvalgte metoder/teknikker. De enkelte metoder er vurderet i forhold til deres funktion i forhold til formålet, effekt i forhold til at hindre at der sker udvaskning af tungmetaller, velafprøvet, robusthed, arbejdsmiljø, behov for udvikling, klimarobusthed, økonomi og drift samt rekreative forhold. Ved vurdering af de enkelte metoders omkostninger anvendt på Banegravsdepotet er der tale om skønnede, afrundede beløb i hele mio. kr.

#### 3.1 Bortgravning og deponering

Opgravning af depotet inkl. dækjord og forurenede intaktjord under depotet, i alt 22.800 m<sup>3</sup>, med efterfølgende ekstern behandling/deponering er tidligere vurderet af Region Syddanmark. Baseret på erfaringspriser fra oprensning i Kærgård Klitplantage blev prisen for opgravning og levering til Kommune Kemi vurderet til ca. 110 mio. kr. /7/.

##### 3.1.1 Fordele

- Gennemprøvet og robust afværgemetode
- Kræver ikke videreudvikling
- Bortgravning til ca. 3 meters dybde i umættet zone er uproblematisk
- Ingen efterfølgende driftsomkostninger
- Sikker effekt
- Klimarobust

##### 3.1.2 Ulemper

- Meget dyr afværgemetode
- Transport af opgravet jord over store afstande
- Der skal foretages omfattende foranstaltninger til sikring af arbejdsmiljø i forbindelse med opgravning af depotet
- Vil kræve foranstaltninger for at hindre vindspredning af forurenede jord
- Støjgener og sandsynligvis også lugtgener i forhold til naboer i afværgefasen
- Der må forventes en øget afdampning i afværgefasen

#### 3.2 Reaktiv permeabel barriere

Ved at etablere en reaktiv permeabel barriere umiddelbart nedstrøms Banegravsdepotet der er designet på en sådan måde, at tungmetaller udfældes ved grundvandets passage af barrieren, vil det være muligt at sikre, at tungmetaller ikke føres videre mod Grindsted Å.

Den inhomogene fordeling af forureningen i Banegravsdepotet har mindre betydning for den oprensningsmæssige effekt af en reaktiv barriere.



Udformningen og placeringen af banegravsdepotet i forhold til grundvandets strømningsretning betyder, at en reaktiv barriere placeret nedstrøms depotet skal have en betydelig længde – depotets længde plus min. 25 m i hver ende, i alt min. ca. 460 m. En reaktiv permeabel barriere kan muligvis etableres i Grindsted Plantage umiddelbart øst for Simmelbrovej.

Som grundlag for at etablere en permeabel reaktiv barriere nedstrøms Banegravsdepotet vil det være nødvendigt at foretage en detailkortlægning af grundvandets strømningsretning, strømningshastighed og forureningsspredningen horisontalt og vertikalt i magasinet ved Banegravsdepotet.

Ved en afværgeløsning med en reaktiv barriere skal der tages stilling til, hvilket kemisk grundlag, barrieren skal baseres på. Det er en mulighed at basere barrieren på udfældning af jernoxider, der har en enorm overflade og god bindingsevne overfor mange metaller. For at sikre at jern befinder sig på formen jern(III), skal der herske aerobe forhold og en høj pH-værdi i grundvandet ved barrieren. Barrieren må ikke inkludere organiske stoffer, da sådanne stoffer vil sænke pH og gøre kviksølv og andre metaller mere mobile samt øge methyleringen af uorganisk kviksølv.

En anden mulighed kunne være at undersøge, om barrieren kan baseres på udfældning af sulfider, hvor jern befinder sig på formen jern(II). En sådan løsning kræver lave redoxforhold/iltfattigt miljø ved barrieren.

Region Syddanmark har haft kontakt til Ejlskov A/S, der har betydelig erfaring med etablering af permeable reaktive barrierer /6/. Ejlskov oplyser, at en sikker barriere kræver et stabilt miljø, hvor der ikke forekommer komplekser, der kan mobilisere kviksølv. Det vil derfor være nødvendigt at skabe oxiderede forhold, som holder kviksølv stabilt som Hg(II) adsorberet til immobile mineralfraktioner. Samtidig skal det sikres, at der ikke kan dannes methylkviksølv, og at eventuelt dannet methylkviksølv møder et miljø, der kan fremme demethylering.

Fra en tidligere vandprøvetagning i december 2016 af monitoringsboringerne placeret langs den vestlige side af banestien vides, at grundvandets pH ligger på 4,5-5,5, samt at der hersker aerobe forhold med et iltindhold på ca. 10 mg/l og et redoxpotentiale på ca. 200 mV.

For at sikre et optimalt miljø for udfældning/komplexbinding af tungmetallerne i depotet, vil pH skulle hæves til et stabilt niveau omkring på 8-10 i barrieren. Dette kunne ske ved tilsætning af f.eks.  $\text{NaCO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$  og evt. også jordbrugskalk for også at få en mere langsomt opløselig buffer.

Tilsætning af  $\text{Fe(III)Cl}_3$  vil bevirke en udfældning af  $\text{Fe(III)}$  i barrierezonen, som vil danne kompleksbindinger med tungmetaller. Fordelen med  $\text{Fe(III)}$  er, at det i basisk miljø danner okker, der har en enorm overflade med høj affinitet for metalioner. Okker vil være ubegrænset stabilt ved et redoxpotentiale på omkring 200 mV. Ved et sådan højt redoxpotentiale, vil der ikke være nogen anaerob aktivitet, og derfor ikke være noget forbrug af jern, når først det er dannet. Jernet vil således forblive aktivt så længe pH holdes på et passende højt niveau. Levetiden af barrieren vurderes at være årtier til århundreder. Så længe pH er stabil i det basiske område 8-10, vil barrieren fungere efter hensigten.

Ejlskov A/S foreslår at designe den reaktive barriere som 4-6 rækker af injektionspunkter på tværs af forureningsudbredelsen (1,5-2,5 m mellem hvert injektionspunkt/række). Herved opnår man en reaktionszone på 6-10 meter i grundvandets strømningsretning. Vertikalt injiceres der for ca. hver 0,5 m indenfor det forudbestemte injektionsinterval (f.eks. 3,5 - 6 m u. t. = 6 injektionsniveauer). Fastlæggelse af barrierens længde baseres på gennemgang af de foreliggende data suppleret med nye prøvetagninger og pilottests.

$\text{NaCO}_3/\text{CaCl}_2$ , jordbrugskalk og  $\text{Fe(III)Cl}_3$  blandes op med vand, hvorefter det injiceres i barrierezonen. Med de oxiderede forhold i magasinet vil jorden måske allerede indeholde tilstrækkeligt udfældet  $\text{Fe(III)}$  - med mindre dette er udvasket pga. grundvandets lave pH.

Omkostningerne forbundet med at etablere en reaktiv permeabel barriere nedstrøms banegravsdepotet incl. pilotforsøg, entreprenøromkostninger, reaktanter samt monitoring og dokumentation vurderes at blive i størrelsesordenen 8-10 mio. kr. Der kan derudover være en - omend mindre - driftsudgift til opretholdelse af basiske forhold.

### 3.2.1 Fordele

- Gennemprøvet og robust afværgemetode der vurderes at kunne opfylde formålet, såfremt grundvandets strømningsretning kan styres
- In situ afværgemetode, dvs. ikke nødvendigt at fjerne depotet
- Inhomogeniteter i depotet har mindre betydning for effekten af en reaktiv barriere
- Beskedne arbejdsmiljøproblemer, da der kun i beskedent omfang skal håndteres forurenede jord
- Beskedne gener for naboer, mest i form af støj
- Ingen efterfølgende drift af afværgen udover at der muligvis skal tilføres kalk af og til
- Forventelig relativ lang levetid
- Nuværende afværgeforanstaltning berøres ikke

### 3.2.2 Ulemper

- Uforholdsmæssig dyr afværgemetode grundet depotets udformning og placering i forhold til grundvandets strømningsretning
- Der skal gennemføres nærmere undersøgelser og pilotforsøg
- Nødvendigt med løbende monitorering til sikring af at barrieren fungerer efter hensigten
- Udfældningen af okker kan muligvis ændre den hydrauliske ledningsevne, således at strømningsforholdene lokalt ændres ved barrieren med risiko for at barrierens effekt reduceres.
- Barrieren har formentlig kun en begrænset levetid. Barrierens effekt er afhængig af, at redoxforholdene forbliver stabile med oxiderede eller nitratreducerende forhold
- En fremtidig højere grundvandsstand grundet f.eks. klimaændringer eller ophør/ændring af indvindingen ved DuPont kan bevirke, at grundvandets strømningsretning ændres, hvorved den reaktive barrieres effektivitet kan blive reduceret
- Barrieren har ingen oprensende effekt på chlorerede opløsningsmidler, BTEX eller sulfonamider
- Der skal foretages foranstaltninger til sikring af arbejdsmiljø

### 3.3 Cementstabilisering in situ

Ved en stabilisering af den forurenede jord i depotet sker der en ændring af forureningernes og/eller jordens fysiske og kemiske egenskaber, således at udvaskningen af tungmetaller og andre forureningskomponenter reduceres væsentligt. Stabiliseringen foregår in situ i selve depotet.

Ved stabiliseringen nedsættes permeabiliteten af den forurenede jord, ligesom det forurenede overfladeareal, der er tilgængeligt overfor udvaskning, reduceres. Endvidere kan kemiske processer bevirke, at tungmetallerne bindes, hvilket også er medvirkende til at nedsætte udvaskningen fra depotet.

Stabiliseringen af den forurenede jord i Banegravsdepotet kan ske ved at opblande den forurenede jord med f.eks. et cementbaseret produkt.

Iblandning af cement eller cementbaserede produkter som en slurry til den forurenede jord kan gennemføres in situ f.eks. ved hjælp af en "Allu Mixer" (storformat stavblender, hvor slurryen injiceres til jorden gennem dyser). Den beskudte tykkelse af depotet inkl. dækjord og forurenede intakt jord under depotet betyder, at metoden vil være velegnet på lokaliteten. Ved tilsætning af cement som en slurry, vil der ske en effektiv homogenisering af depotfyldet.

Det vil være nødvendigt at gennemføre udvaskningsforsøg i laboratoriet med forskellige cementbaserede tilsætningsstoffer dels for at undersøge

hvilken type cement, der virker bedst på depotfyldet, og dels for at undersøge hvor meget cement der skal tilsættes.

Ved cementstabilisering skal der bruges forholdsvis meget vand. Det vurderes, at der skal etableres 3 indvindingsboringer langs depotet. Tilsætningen af cement som en slurry betyder endvidere, at problemer med støv bliver beskedne.

Det vurderes at være muligt at stabilisere ca. 125 m<sup>2</sup> depotareal til 3 meters dybde (depotfyld incl. det oprindelige dæklag og ca. 0,5 m intakt jord under depotet) pr. dag.

Arbejdet foreslås udført ved dagligt at starte med at afrømme sand- og muldlaget udlagt ved afværgeforanstaltningen i 2012, svarende til ca. en dagsproduktion for stabiliseringen. Sand- og muldjorden lægges i et midlertidigt depot på et areal ved arbejdsstedet, hvorefter stabiliseringen påbegyndes. Når stabiliseringen er afsluttet hver dag, lægges den rene dækjord tilbage, for på den måde at konsolidere det omrørte depotfyld.

Det vurderes, at der skal bruges mellem 100 og 200 kg cement pr. m<sup>3</sup> depotfyld for sikre en tilstrækkelig tæthed i kornstrukturen til at udvaskning forhindres. Den nødvendige mængde cement fastlægges ved tests.

Tilsætningen af cement og vand til depotfyldet bevirker, at depotets volumen øges. Antages det, at der skal bruges 100 kg cement til at stabilisere 1 m<sup>3</sup> fyld, skal der tilsættes et volumen i form af vand og cement på ca. 90-100 m<sup>3</sup> pr. dag svarende til en volumenforøgelse på omkring 15-20%. Ved at lægge den afrømmede dækjord på det stabiliserede depotfyld, når hærdningen af den øverste del af depotfyldet er tilstrækkelig langt fremskreden til at bære topjorden, vil der ske en vis komprimering af depotet, svarende til en blivende volumenforøgelse på omkring 10%.

Med en arbejdsproces der starter med afrømning af ren dækjord om morgenen, derefter stabilisering og til slut afdækning inden fyraften, vurderes det at tage ca. 70 arbejdsdage at stabilisere hele depotet. Da kun en meget lille del af depotet "blottes" hver dag, vil lugtgenerne blive begrænsede.

Afslutningsvist planeres området, og der plantes tornebuske eller lignende på depotet.

Omkostningerne forbundet med at stabilisere jordforureningen i Banegravsdepotet ved iblanding af 100-200 kg cement pr. m<sup>3</sup> depotfyld vurderes at blive i størrelsesordenen 10-14 mio. kr. Heri er indeholdt udgifter på 1 mio. kr. til forskellige forsøg.

### 3.3.1 Fordele

- Stabilisering af jord med cement er en velafprøvet teknik
- Kræver ikke videreudvikling
- Stabilisering til 3 m u. t. i umættet zone er uproblematisk
- Kræver ingen opgravning og transport af forurenede jord
- Kun i begrænset omfang problemer med støv
- Ingen efterfølgende drift af afværger
- Der forventes en meget lang levetid
- En fremtidig højere grundvandsstand grundet f.eks. klimaændringer eller ophør/ændring af indvindingen ved DuPont vurderes ikke at nedsætte effekten af afværger

### 3.3.2 Ulemper

- Der sker ingen fjernelse eller nedbrydning af forureningen
- Kræver gennemførelse af forsøg
- Der skal foretages foranstaltninger til sikring af arbejdsmiljø svarende til entreprenørarbejde i forurenede jord
- Støjgener for naboer samt formentlig lugtgener og øget afdampning må forventes i afværgefasen
- Behov for monitorering i en kortere årrække til kontrol af afværgeeffekt.

## 3.4 Indkapsling on site

En bortgravning af Banegravsdepotet og efterfølgende deponering og indkapsling af den forurenede jord on site vil sikre, at der ikke sker udvaskning af tungmetaller og andre stoffer til grundvandet.

Opgravning af depotet inkl. dækjerd og forurenede intakt jord vil kræve, at der skal flyttes 22.800 m<sup>3</sup> jord. Den opgravede jord kan f.eks. indbygges i en bakke, der efterfølgende anvendes rekreativt som f.eks. kælkebakke eller skate-bane. Der skal i givet fald findes en egnet placering til anlægget.

Udformes den opgravede jord f.eks. som en pyramidestub med en grundflade ved terræn på 75 m x 75 m og ved toppen på 25 m x 25 m, bliver bakkens højde 8,4 m. Hældningen på bakken bliver 18,6 grader, svarende til en sidehældning med anlæg 1:3.

For at sikre at der hverken vil ske udvaskning af tungmetaller til grundvandet eller afdampning af flygtige stoffer til atmosfæren, skal bakken med den opgravede depotjord indkapsles med en tæt topmembran.

Al jorden fra depotet (22.800 m<sup>3</sup>) skal graves op, transporteres til bakken og indbygges successivt (inkl. komprimering). Når den sidste depotjord er placeret i bakken og siderne er afrettet, lægges en tyndt lag stenfrit sand ud og

ovenpå det en bentonitmembran. En bentonitmembran er relativ fleksibel til at modstå eventuelle sætninger, ligesom membranen formentlig også vil bervirke, at eventuel afdampning fra depotet reduceres væsentligt. Membranen vurderes at have en levetid på i størrelsesordenen århundreder.

Ovenpå membranen udlægges et sand/gruslag, hvori der etableres et drænsystem, således af nedbør på kontrolleret måde kan transporteres til foden af depotet uden at erodere i overfladen. Endelig udlægges den rene topjord fra banegravsdepotet på drænlaget.

Anlægsarbejdet i forbindelse med flytning og indbygning af depotjorden i en bakke vil formentlig give væsentlige gener med lugt og støv.

Omkostningerne forbundet med at opgrave og indkapsle depotjorden i en bakke vil andrage i størrelsesordenen 10 mio. kr. excl. evt. køb af areal, hvor bakken skal etableres.

#### 3.4.1 Fordele

- Gennemprøvet og robust afværgemetode der vurderes at kunne sikre, at tungmetallerne og øvrige forurenende stoffer i depotet ikke udvaskes
- Velkendt teknologi som ikke kræver videreudvikling
- Ingen transportomkostninger. Den opgravede jord deponeres umiddelbart ved Banegravsdepotet
- Beskedne driftsomkostninger til løbende vedligehold af overjorden på depotet
- Arealet vil kunne anvendes rekreativt til f.eks. kælkebakke, skatebane eller lignende
- Klimarobust, et stigende grundvandsspejl vil ikke påvirke depotet
- Indkapslingen af depotet vurderes at ville sikre, at der ikke sker ud-sivning af forurening til grundvandet i en meget lang årrække - i størrelsesordenen århundreder

#### 3.4.2 Ulemper

- Forureningen fjernes ikke
- Der skal foretages omfattende foranstaltninger til sikring af arbejdsmiljø i forbindelse med opgravning og genindbygning af den forurenede jord
- Vil kræve foranstaltninger for at hindre spredning af forurenede støv, ligesom der vil være støjgener og sandsynligvis også lugtgener for naboer
- Der må forventes en øget afdampning i afværgefasen
- Der efterlades en lang lavning i terrænet, hvor depotet oprindeligt var placeret.

### 3.5 Soil Amendments

Ved soil amendments teknikken fikseres forureningen i depotet ved sorption og ved udfældning, således at udvaskningen af tungmetaller reduceres væsentligt. Tilførsel af soil amendments kan foregå in situ i selve depotet, enten ved soil mixing eller ved injektion som slurry.

Normalt anvendes amendments bestående af uorganiske stoffer. De anvendte amendments kan bestå af en blanding af flere af stoffer, herunder nulvalent jern, jernsulfider, jernoxider, kalk og aktivt kul. Ved brug af nulvalent jern og jernsulfider skal der sikres lave redoxforhold, som skal holdes vedlige, hvis de naturlige redoxforhold er oxiderede.

Vælges en amendment baseret på udfældning af metalsulfider, er løsningen mindre afhængig af pH-værdien end en løsning baseret på udfældning af metalhydroxider.

Der findes færdigudviklede produkter, hvor den kemiske formulering indeholder bl.a. nulvalent jern, jernsulfider, jernoxider og aktivt kul. En sådan sammensætning, der baseres på flere fysiske og kemiske processer, vurderes at ville have en forholdsvis stor robusthed i forhold til fiksering af forureningen selv ved ændringer i pH og redoxforhold.

Fastlæggelse af den rigtige dosering og type af amendment, der skal tilsættes, vil kræve gennemførelse af bench-scale treatability tests. Dosering af amendments sker ofte i mængder på 0,5 % - 2 % vægt/vægt.

Overordnet set vil anvendelsen af soil amendments teknikken på Bane-gravsdepotet skulle gribes an næsten identisk med cementstabiliseringen. Man afrømmer det areal, man kan nå at mikse pr. arbejdsdag, og lukker mere eller mindre arret til fyraften hver dag. Det vurderes, at opgravningen skal ske med roterskovl, hvor hver skovlfuld tilsættes reaktanten, imens jorden homogeniseres igennem den roterende rist.

Omkostningerne forbundet med at fikserer depotet ved tilførsel af soil amendments ved tilsætning af 1 % vægt/vægt vurderes at andrage i størrelsesordenen 16-18 mio. kr. incl. laboratorieforsøg.

#### 3.5.1 Fordele

- Forholdsvis stor robusthed i forhold til fiksering af metallerne i depotet ved ændringer i pH og redoxforhold såfremt der anvendes en amendment baseret på udfældning som sulfider
- Ingen transportomkostninger
- Ingen driftsomkostninger
- Forventning om en lang levetid



### 3.5.2 Ulemper

- Forureningen fjernes ikke
- Der skal gennemføres nærmere undersøgelser og pilotforsøg
- Der skal foretages foranstaltninger til sikring af arbejdsmiljø svarende til entreprenørarbejde i forurenede jord
- Vil kræve foranstaltninger for at hindre spredning af forurenede støv, ligesom der vil være støjgener og sandsynligvis også lugtgener for naboer
- Anvendes der en amendment baseret på stabilisering med jernoxider, er metodens effekt afhængig af, at der opretholdes aerobe forhold
- Metoden har ingen oprensende effekt på organiske forureningskomponenter som f.eks. chlorerede opløsningsmidler, BTEX og sulfonamider
- Ved brug af jernoxider som amendment vil en stigende grundvandsstand som følge af f.eks. klimaændringer kunne fjerne effekten af de tilsatte jernoxider, hvis der opstår jernreducerende forhold i depotet

### 3.6 Jordvask

Jordvask er en gruppe af metoder, der enten ved separation/sigtning af jorden i forskellige fraktioner, ved vask af jorden eller ved en kombination af vask og separation, anvendes til at separere forurening bundet til de fine partikler fra de renere, større partikler.

Anvendt på Banegravsdepotet vil rensning af depotfyldet med jordvask betyde, at den forurenede jord separeres i en fin fraktion af aktiv kul og slam, der vil indeholde hovedparten af forureningen, og en grovere fraktion, der vil være lettere forurenede. Den forurenede fine fraktion, ca. 90 vol. %, skal deponeres eksternt, mens den grove, lettere forurenede fraktion skal genindbygges i banegravsdepotet.

Ved behandlingen af depotfyldet i et jordvaske-anlæg forventes hovedparten af tungmetallerne at blive fjernet fra Banegravsdepotet. Den fremtidige udvaskning af tungmetaller fra depotet vil dermed blive væsentligt reduceret.

Separationen af jorden i en fin og en grovere fraktion kan foregå på/ved lokaliteten med et mobilt jordvaske-anlæg.

Med et forventet stort indhold af aktivt kul, hvor det forventes at langt størsteparten af forureningen sidder, må man forvente, at der vaskes relativt store mængder finstof ud. Antages det, at der vægtmæssigt vaskes ca. 30 % ud af den samlede masse, vil det dreje sig om i alt ca. 9.200 ton ( $22.800 \text{ m}^3 \times 1.350 \text{ kg/m}^3 \times 0.3$ ).

Størstedelen af kviksølvet og mange af de andre forurenende stoffer formodes at sidde på finfraktionen. Det kan derfor muligvis ende med, at restproduktet skal deponeres på f.eks. Fortum Waste Solution (det tidligere Kommune Kemi) eller tilsvarende til en pris på måske 4-5 kr./kg.

Da depotfyldes skal læsses og transporteres frem til vaskeanlægget, hvor den tippes og føres gennem anlægget, vil generne for omgivelserne i form af lugt, støj og støv blive betydelige.

Vurdering af metodens anvendelighed på Banegravsdepotet vil kræve, at der udføres pilotforsøg på ca. 25 tons jord.

Omkostningerne forbundet med at opgrave Banegravsdepotet, behandle den forurenede jord on site i et jordvaske-anlæg, genindbygge den grove fraktion og deponere den fine fraktion eksternt på f.eks. Fortum Waste Solution anslås at andrage i alt i størrelsesordenen 60 mio. kr., heraf 40 mio. kr. til ekstern deponering.

Kim Jensen har haft kontakt til Umweltschutz Ost i Tyskland med henblik på at undersøge muligheder og pris for vask af jorden fra Banegravsdepotet. Umweltschutz Ost har oplyst, at de ikke ser sig i stand til at vaske selve depotfyldet på grund af det forventede meget store indhold af aktivt kul.

### 3.6.1 Fordele

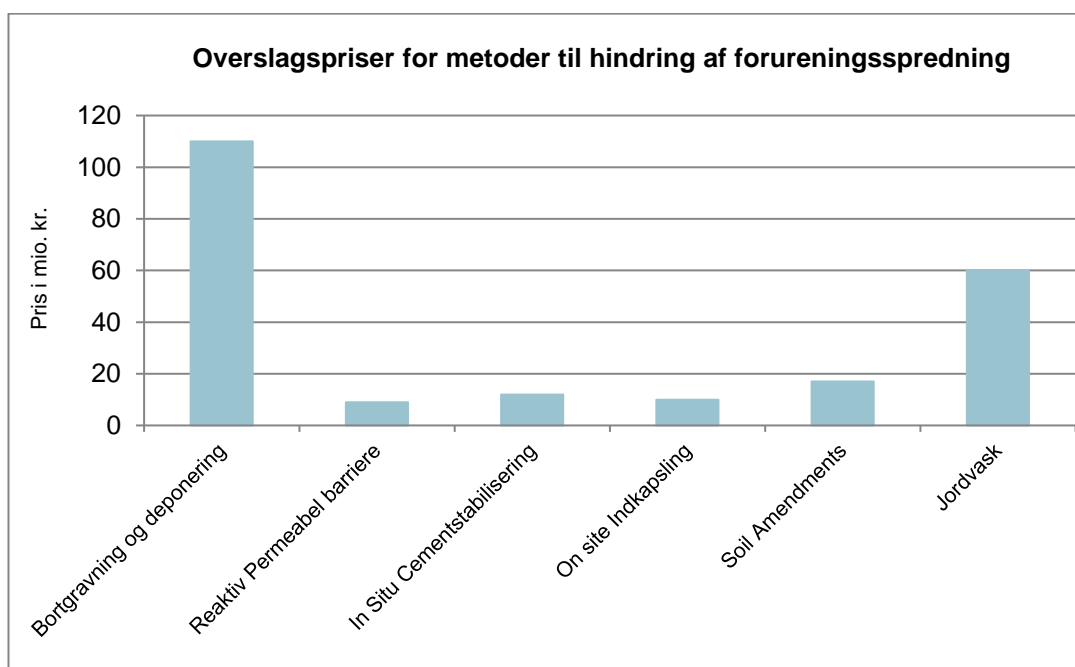
- Jordvaske-teknikken er overordnet velegnet, når forureningen er inhomogen fordelt i jorden
- Dæklaget og den intakte jord under depotet vil kunne behandles i et jordvaskeanlæg
- Ingen efterfølgende driftsomkostninger
- Afværgemetoden er klimarobust

### 3.6.2 Ulemper

- Usikkert om jordvaske-teknikken kan anvendes på selve depotfyldet på grund af den høje andel af aktivt kul i selve depotfyldet
- Der skal gennemføres nærmere undersøgelser og pilotforsøg
- Der skal foretages omfattende foranstaltninger til sikring af arbejdsmiljø i forbindelse med gennemførelsen af afværgen
- Vil kræve foranstaltninger for at hindre spredning af forurenede støv
- Jordvaske-anlægget vil medføre væsentlige støj- og lugtgener for naboer/kolonihaver
- Der må forventes en øget afdampning i afværgefasen
- Der kan være behov for rensning af vaskevandet
- Meget dyr afværgemetode, ca. 60 mio. kr., heraf 40 mio. kr. til ekstern deponering

#### 4 SAMLET VURDERING AF RENSINGS- OG FIKSERINGSTEKNIKKER

Overslagspriser for de beskrevne metoder til hindring af forureningsspredning er vist i Figur 4-1. Det fremgår, at overslagsprisen for bortgravnings- og deponeringsløsningen er betydeligt dyrere end de andre beskrevne afværge-løsninger. Billigst er metoderne reaktiv permeabel barriere, in situ cementstabilisering og on site indkapsling med omkostninger, der ligger mellem 10 og 14 mio. kr. Soil amendments-metoden er lidt dyrere med en skønnet omkostning på ca. 17 mio. kr.



Figur 4-1 Overslagspriser for metoder til hindring af forureningsspredning.

De oven for beskrevne afværgete metoder er vurderet i forhold til følgende parametre: Metodens effekt i forhold til at hindre at der sker udvaskning af tungmetaller, velafprøvet, robusthed, arbejdsmiljøgener, behov for udvikling, klimarobusthed og drift samt rekreative forhold.

Ved vurderingen af den enkelte parameter er der tildelt en score fra 1 til 5, hvor 1 er bedst/billigst og 5 er dårligst/dyrest. Da de enkelte vurderingsparametre ikke tillægges samme vægt, kan den samlede score ikke anvendes ved en overordnet sammenligning af afværgete metoderne.

Vurderingen af metoderne fremgår af nedenstående Tabel 4-1.

Da der er usikkert, om depotfyldet kan behandles i et jordvaskeanlæg, er denne afværgete metode ikke vurderet i tabellen.

Afværge- metode/-teknik	Effekt ift. udvask- ning af tungme- taller	Velaf- prøvet- hed	Robust- hed	Arbejds- miljø- gener	Behov for udvik- ling	Klima- robust- hed	Anlægs- omkost- ninger	Drifts-/ monite- rings- omkost- ninger	Rekrea- tiv effekt
Bortgravning og deponering	1	1	1	5	1	1	5	1	nej
Reaktiv permeabel barriere	2	2	3	1	2	4	1	3	nej
Cementstabilisering	2	2	2	3	2	1	2	1	nej
Indkapsling	1	1	2	5	1	1	1	1	ja
Soil amend- ments	2	3	3	3	3	1/4 <sup>1</sup>	2	1	nej
Jordvask	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup>Afhænger af om man bruger jernoxider (4) eller sulfider (1)

Tabel 4-1: Vurdering af udvalgte afværgemetoder.

## 5 ANBEFALINGER

Afværgemetoden bortgravning og deponering scorer højt på parametrene effekt, velafprøvethed, robusthed, behov for udvikling og klimarobusthed. Da anlægsomkostningerne er 7-10 gange højere end ved de øvrige afværgemetoder, kan denne metode ikke anbefales som afværgeløsning på Banegravsdepotet.

Af de fire øvrige metoder scorer soil amendments dårligst på parametrene velafprøvethed, robusthed samt behov for udvikling, hvorfor denne metode ikke kan anbefales som afværgeløsning.

De resterende tre metoder, reaktiv permeabel barriere, cementstabilisering og indkapsling, vurderes alle – med deres fordele og ulemper – at have potentiale til at kunne opfylde formålet med en afværgeløsning, der skal være i stand til at standse eller nedbringe udvaskningen af tungmetaller fra Banegravsdepotet til et acceptabelt niveau.

Samlet vurderes indkapsling at være det bedste valg som afværgeløsning, idet metoden scorer topkarakter på parametrene effekt, velafprøvethed samt behov for udvikling. Endvidere vurderes indkapsling at være en sikker og klimarobust afværgemetode. En indkapsling af depotet on site vil ikke blot

standse udvaskningen af tungmetaller, men også de øvrige forurenende stoffer i depotet. Metoden vil dog kræve omfattende foranstaltninger til at sikre arbejdsmiljøet og begrænse støj- og støvgener ved anlægsarbejdet. Indbygges depotjorden i f.eks. en kælkebakke vil der i tilgift være en rekreativ værdi ved afværgen. Ud over ovennævnte forhold er metoden blandt de billigste af de vurderede afværgemetoder.

## 6 REFERENCER

- /1/ Region Syddanmark. Notat til udvalgsmøde den 29. november 2010. Status for arbejdet med forureningerne relateret til Grindstedværkets aktiviteter. 10. november 2010.
- /2/ Region Syddanmark. Indsats over for jordforurening. Miljøteknisk undersøgelse af Banegravsdepotet, 7200 Grindsted. Februar 2011. Udarbejdet af Ejlskov A/S.
- /3/ Miljøstyrelsen. Kviksølvforurening i jord. Et litteraturstudie. Miljøprojekt nr. 1513, 2014.
- /4/ Miljøstyrelsen. Statusprojekt. Teknologiudvikling inden for afværgeforanstaltninger over for jord- og grundvandsforureninger i Danmark. Miljøprojekt nr. 1261, 2009.
- /5/ Bureau Veritas HSE DK. Vurdering af muligheden for dannelse af metylkviksølv i Banegravsdepotet (Litteraturstudium). August 2011.
- /6/ Region Syddanmark, Sanne Skov Nielsen. Personlig korrespondance med Claus Ølund, Ejlskov A/S, september 2017.
- /7/ Region Syddanmark. Forslag til afværge i banegravsdepotet i Grindsted by. Notat til udvalgsmøde d. 5. september 2011. 25. august 2011.