

Efterbehandling av DDT-förorenad jord

Åtgärdsmatris för f.d. skogsplantaskolor

Beställare: SGU, Hanna Wåhlén/Karin Eliason
Beställarens projektnummer: Dnr 3415-655/2020
Konsultbolag: Structor Miljöteknik AB
Uppdragsnamn: Åtgärdsmatris - efterbehandling av DDT-förorenad jord
Uppdragsnummer: 6669-044
Datum: 2020-12-21
Uppdragsledare: Ulrika Martell
Handläggare/utredare: Emil Svärd
Granskare: Jens Johannisson
Referensgrupp: Johan Nordbäck, Peter Carlsson
Status: Granskningshandling

Sammanfattning

Inledning

Under 2019 har SGU låtit Luleå tekniska universitet göra en utredning av möjliga åtgärdstekniker för att reducera DDT och dess nedbrytningsprodukter i jord (LTU, 2019). Rapporten pekar på att det finns ett fåtal tekniker som skulle kunna fungera, men de kräver utveckling och anpassning. SGU behöver nu ta resultaten från denna sammanställning vidare och ta fram en matris för utvärdering av tänkbara åtgärder.

Denna rapport beskriver uppdraget och är en läsanvisning till åtgärdsmatrisen.

Uppdrag

Beställaren har delat in uppdragets genomförande i tre steg, där steg 1 och 2 ska omfatta en sammanställning av en åtgärdsmatris med möjliga åtgärdstekniker för reduktion av DDX. Matrisen ska vara uppställd så att möjlighet finns att jämföra teknikerna inbördes på ett relevant sätt. Underlag till matrisen ska vara tekniker som har beskrivits i LTUs rapport. I uppdraget ingår även att identifiera potentiella kunskapsluckor i utredningsskedet avseende parametrar som behövs för att kunna utvärdera åtgärdsteknikerna.

Utifrån matrisen och utvärdering av tillgängliga tekniker avses lämpliga leverantörer av åtgärdsmetoderna att intervjuas i steg 3 för att få en fylligare beskrivning av förutsättningar för åtgärderna.

Avgränsning

Uppdraget avgränsas till efterbehandling av DDT-föreningar i jord. Övriga medier har inte bedömts kräva åtgärder.

Föreningar ska för detta uppdrag antas förekomma i mullhaltig jord i översta 0,3 m av jordprofilen och härstamma från tidigare skogsplantskola. Föreningar kan förekomma längre ner i jordprofilen, men huvuddelen av föreningarna antas ändå förekomma i översta 0,3 m. Eventuella övriga föreningar som härstammar från skogsplantskolans verksamhet kommer endast beröras i utvärdering av åtgärdsmetoder för DDT-föreningar.

Den förorenade ytan ska antas vara relativt stor, omkring tiotal hektar mark. Dagens markanvändning av de fd odlingsfälten varierar och några exempel är bostadsområde, vallodling, boskapsskötsel, åkermark, hästhage och ridskola.

Åtgärdsmatrisen ska vara inriktad på åtgärder där medelhalt av summa DDT i jorden innan åtgärd är omkring 5-15 mg/kg TS. Det mätbara åtgärds målet för dessa massor ska vara 2-4 mg/kg TS.

Förutsättningar i övrigt är att marken är tillgänglig och inte bevuxen med träd eller är bebyggd. Marken förutsätts vidare kunna återställas till motsvarande betesmark. Vidare avgränsas uppdraget till att omfatta de tekniker som tas upp i LTUs rapport.

I utförandet av steg 3 av uppdraget har även tillkommit att mycket översiktligt ta med information som erhållits vid intervjuer som rör sanering av hot-spot föroreningar (områden med kraftigt förhöjda halter av DDT) samt att söka information direkt från högskola/universitet för metoder som inte kom med i intervjufasen i steg 3.

Resultat steg 1 och 2

De biologiska metoderna Daramend och Gene expression factor samt metoder med fytoremediering, daggmaskar, svampar och biokol bedöms ha tekniker som bäst kan hantera stora ytliga arealer. Reaktorbaserade metoder där den aktuella jorden ska schaktas upp och behandlas har inte bedömts lämpliga annat än för hot-spot områden.

Daramend kan tillhandahållas av PeroxyChem, USA (med filialer i Spanien/Tyskland).

Gene expression factor-metoden kan tillhandahållas av BioTech Restorations, LCC, Florida, USA.

Det finns ett par svenska företag, Phytoenvitech och Clean Nature, som sysslar med fytoremediering och forskning om fytoremediering pågår vid Stockholms universitet.

För övriga metoder har inga potentiella leverantörer hittats.

Resultat steg 3

I steg 3 skickades en RFI ut som besvarades av följande leverantörer/leverantörsgrupper med följande förslag till åtgärdsmetod.

Leverantör (land)	Föreslagen metod	Typ av reagent som används	Typ
EDL (Nya Zeeland)	Mekanokemisk nedbrytning (MCD)	Mekanisk energi	On site
Geosyntec och Kemakta (Storbritannien/Sverige)	Kemisk/biologisk nedbrytning	ZVI ensamt eller i kombination med växtbaserade tensider, fast kol eller flytande kol.	In situ/ ex situ
Phytoenvitech (Sverige)	Fytoremediering	Växt	In situ
RGS Nordic (Sverige)	1) Fytoremediering 2) Reduktiv deklorering i behandlingscell	1) Växt 2) Bakterier tillsammans med tillsats, t ex Fe ⁰	In situ/ On site

Slutsats i steg 1 och 2 var att det för behandling av stora arealer inte bedömdes lämpligt med reaktorbaserade metoder där den aktuella jorden ska schaktas upp och behandlas. Utifrån det perspektivet är metod med MCD och reduktiv deklorering i behandlingscell inte lämpliga annat än för behandling av hot-spot föroreningar.

Begrepp

DDX	Samlingsbegrepp innefattande DDT samt dess nedbrytningsprodukter DDE och DDD.
Ex situ-sanering	Saneringsåtgärd utförd genom att jordmassor schaktas upp från sitt ursprungsläge för vidare transport till behandlingsanläggning eller deponi. Ex situ sanering kan även utföras on site i portabel reningsanläggning.
In situ-sanering	Saneringsåtgärd utförd genom behandling av förorenade jordmassor direkt på plats. Kan innefatta mekanisk omblandning genom t ex plöjning.

Innehåll

Inledning	3
Uppdrag	3
Avgränsning	3
Resultat steg 1 och 2	4
Resultat steg 3	4
Begrepp	5
1. Inledning	8
2. Uppdrag	8
2.1. Uppdrag och syfte	8
2.2. Avgränsningar	8
3. Problembeskrivning	9
4. Åtgärds mål	10
4.1. Mätbart åtgärds mål	10
4.2. Övergripande åtgärds mål	10
5. Utvärderingskriterier	10
6. Åtgärds tekniker utifrån litteraturstudie	12
6.1. Allmänt	12
6.2. Biologisk nedbrytning	13
6.2.1. Bakteriell	13
6.2.2. Svampar	14
6.2.3. Växter	15
6.2.4. Daggmaskar	15
6.3. Termisk behandling	16
6.3.1. Termisk desorption	16
6.3.2. Vittrifiering	17
6.3.3. Förbränning	17
6.4. Kemisk behandling	17
6.4.1. Oxidativ nedbrytning	17
6.4.2. Reduktiv deklorering	18
6.4.3. Kombination av kemisk reduktion och oxidation	18
6.4.4. Lösning med baserad extraktion	18
6.4.5. Mekanokemisk deklorering	19
6.5. Andra metoder	19
6.5.1. Behandling med biokol	19
6.5.2. Behandling med hydroxypropyl- β -cyclodextrin	20
6.5.3. Jordomvändning	20

7. Åtgärds tekniker utifrån intervjuer med entreprenörer	21
7.1. MCD	22
7.2. ZVI	22
7.3. Fytoremediering	22
8. Utvärdering av åtgärdsalternativ	23
8.1. Grad av måluppfyllelse	23
8.2. Teknik	23
8.3. Ekonomi	24
8.4. Miljö	25
8.5. Rekommenderade åtgärdsalternativ	25
9. Krav på miljöundersökningar	26
10. Uppföljning	27
11. Referenser	28
BIL 1 Åtgärdsmatris med behandlingsmetoder för DDT-haltig jord	31
BIL 2 Sammanställning av intervjuer	32

1. INLEDNING

Under 2019 har SGU låtit Luleå tekniska universitet göra en utredning av möjliga åtgärdstekniker för att reducera DDX i jord (LTU, 2019). Rapporten pekar på att det finns ett fåtal tekniker som skulle kunna fungera, men de kräver utveckling och anpassning. SGU behöver nu ta resultaten från denna sammanställning vidare och ta fram en matris för utvärdering av tänkbara åtgärder.

Denna rapport beskriver uppdraget och är en läsanvisning till åtgärdsmatrisen.

2. UPPDRAG

2.1. Uppdrag och syfte

Structor Miljöteknik AB har på uppdrag av SGU tagit fram en matris för utvärdering av efterbehandlingstekniker för DDT-förorenad jord från f.d. skogsplanteskolor.

Uppdragets har av beställaren beskrivits omfatta;

Steg 1 och 2 - sammanställning

- Sammanställa åtgärdstekniker som kan vara möjliga från LTUs rapport i en åtgärdsutredningsmatris
- Ta fram förslag till utvärderingskriterier för dessa åtgärder så att de kan jämföras med varandra på ett relevant sätt
- Identifiera potentiella kunskapsluckor i utredningsskedet avseende parametrar som behövs för att kunna utvärdera åtgärdsteknikerna.

Steg 3 – Intervjufas och inhämtande av data från entreprenörer

Utifrån sammanställningen och i samråd med beställaren upprätta kontakt med några entreprenörer för dessa åtgärdstekniker och genomföra fördjupad hearing kring åtgärdstekniken för att fånga upp under vilka förutsättningar som teknikerna kan fungera, vilka bieffekter som kan uppstå och vilka förutsättningar i övrigt som kan krävas i form av infrastruktur, tillstånd, kontroll et.c. Resultat från steg 1 och 2 revideras utifrån erhållna uppgifter i denna fas.

2.2. Avgränsningar

Uppdraget avgränsas till efterbehandling av DDT-föreningar i jord. Övriga medier har inte bedömts kräva åtgärder.

Föreningar ska för detta uppdrag antas förekomma i mullhaltig jord i översta 0,3 m av jordprofilen och härstamma från tidigare skogsplanteskola. Föreningar kan förekomma

längre ner i jordprofilen, men huvuddelen av föroreningarna antas ändå förekomma i översta 0,3 m. Eventuella övriga föroreningar som härstammar från skogsplantskolans verksamhet kommer endast beröras i utvärdering av åtgärdsmetoder för DDT-föroreningar. Den förorenade ytan ska antas vara relativt stor, omkring tiotal hektar mark. Dagens markanvändning av fd odlingsfälten varierar och några exempel är bostadsområde, vallodling, boskapsskötsel, åkermark, hästhage och ridskola.

Åtgärdsmatrisen ska vara inriktad på åtgärder där medelhalt av summa DDT i jorden innan åtgärd är omkring 5-15 mg/kg TS. Det mätbara åtgärds målet för dessa massor ska vara 2-4 mg/kg TS.

Förutsättningar i övrigt är att marken är tillgänglig och inte bevuxen med träd eller är bebyggd. Marken förutsätts vidare kunna återställas till motsvarande betesmark eller liknande.

Vidare avgränsas uppdraget till att omfatta de tekniker som tas upp i LTUs rapport.

I utförandet av steg 3 av uppdraget har även tillkommit att mycket översiktligt ta med information som erhållits vid intervjuer som rör sanering av hot-spot föroreningar och också sökt information direkt från högskola/universitet för metoder som inte kom med i intervju fasen i steg 3.

3. PROBLEMBESKRIVNING

DDT påträffas ofta på stora ytor på de tidigare odlingsfälten och eventuell schaktsanering kan innebära ca 50–100 tusen ton massor kan behöva transporteras bort. Att hitta återfyllnadsmassor med en kvalitet som möjliggör återskapande av områdenas ekologiska funktion är en annan stor utmaning eftersom plantskolorna har varit lokaliserade på fina sandiga avlagringar, inom områden som har till synes höga naturvärden, vilka blir starkt påverkade av en schaktsanering.

SGU arbetar därför aktivt med att försöka bidra till att utveckla alternativ ny teknik för on site eller in situ-behandling av DDT-förorenade jordar i skandinaviskt klimat. Detta för att kunna hantera de förorenade områden som, baserat på utförda riskbedömningar, är i behov av någon form av riskreduktion. Förhoppningen är att vara med att utveckla någon form av behandling som bryter ner, avlägsnar eller på annat sätt reducerar riskerna med den DDT som finns i marken genom att utföra pilottester och fullskaleförsök på skogsplantskolor där ett åtgärdsbehov har konstaterats. Detta skulle kunna ske genom exempelvis markvitalisering eller biologisk nedbrytning, kanske i kombination med fyto remediering, eller genom till exempel inblandning av biokol eller annat ämne för fastläggning.

Denna åtgärdsmatris ska utgöra underlag för val av lämpliga åtgärdsmetoder samt vilka parametrar som ska undersökas för att bedömning ska kunna göras om åtgärdsmetoden är lämplig. Vid de undersökningar som har utförts har både högre och lägre halter påträffats, men SGU bedömer att relevanta åtgärdstekniker för dessa områden bör utgå från halter på omkring 5-15 mg/kg TS av summa DDT.

4. ÅTGÄRDSMÅL

4.1. Mätbart åtgärds mål

Åtgärds målet 2-4 mg/kg TS för summa DDT har angivits som önskat mål av SGU.

Värdet är baserat på envägs koncentrationer för generella riktvärdet för känslig markanvändning, KM. Styrande för hälsoriktvärdet är envägs koncentrationen för intag av växter, 4 mg/kg TS och riktvärdet för skydd av grundvatten är satt till 2,3 mg/kg TS, se tabell 4.1. Hälsoriskbaserat riktvärde uppgår till 3,4 mg/kg TS.

Skydd för markmiljö är styrande för generella riktvärdet för KM, som är 0,1 mg/kg TS för summa DDT. Det innebär att risker för markmiljön inte kan uteslutas även om valt mätbart åtgärds mål uppfylls.

Tabell 4.1 Envägs koncentrationer styrande för generella riktvärdet för KM (mg/kg TS).

Ämne	Envägs koncentrationer (mg/kg)						Hälsorisk-baserat riktvärde	Skydd av markmiljö (mg/kg)	Spridning (mg/kg)			Avrundat riktvärde (mg/kg)
	Intag av jord	Hudkontakt jord/damm	Inandning damm	Inandning ånga	Intag av dricksvatten	Intag av växter			Skydd mot fri fas	Skydd av grundvatten	Skydd av ytvatten	
DDT, DDD, DDE	31	380	35000	4500	170	4	3,4	0,1	data saknas	2,3	150	0,10

4.2. Övergripande åtgärds mål

Utifrån det mätbara åtgärds målet och problemformuleringen har de övergripande åtgärds målen antagits vara att;

- marken kan användas som odlingsmark/betesmark eller liknande efter åtgärden
- befintliga fina sandiga avlagringar inom områden med höga naturvärden ska kunna behållas

5. UTVÄRDERINGSKRITERIER

I åtgärds utredningar görs bedömningar av vilken åtgärd som är mest optimalt för det aktuella objektet med hänsyn till vad som är miljömässigt motiverat, ekonomiskt rimligt och tekniskt möjligt.

En översiktlig värdering utifrån de uppgifter som funnits tillgängliga för respektive åtgärdsmetod har sammanställts i matrisen som snabbvärdering med syfte att vara vägledande i ett inledningsskede.

Ekonomi:

Kostnaden för det valda alternativet måste ställas i relation till den miljövinst som uppnås med åtgärden. Till exempel är ett dyrt alternativ som endast för med sig en kortsiktig minskning av miljörisk eller endast marginellt reducerar utläckage av föroreningar olämpligt.

Värdering av hur hög kostnaden är ska bedömas utifrån förutsättningarna i varje enskilt fall. I åtgärdsmatrisen har snabbvärdering av kostnaden för åtgärderna översiktligt utgått ifrån utifrån att det är 50-500 tusen ton massor som ska behandlas.

Behandlingskostnader har värderats enligt nedan.

- 1 Låga: < 250 kr/ton.
- 2 Måttliga: 250-800 kr/ton.
- 3 Höga: 800-1 500 kr/ton.
- 4 Mycket höga: > 1 500 kr/ton.

Teknik:

I en åtgärdsutredning värderas tekniken oftast utifrån att det skall vara en teknik som ska finnas på marknaden och vara funktionell för den aktuella föroreningen. Åtgärden skall vara tekniskt genomförbar och anpassad för platsens förutsättningar. Ingen snabbvärdering för denna aspekt finns i åtgärdsmatrisen då platsens förutsättningar förväntas variera ganska stort.

Miljö:

Åtgärdsutredningar kräver en skälighetsbedömning kring vad som är miljömässigt motiverat. I denna åtgärdsmatris har det antagits att åtgärden på ett godtagbart sätt ska minska, eller i vilket fall som helst ej förvärra situationen, för såväl kort- som långsiktiga miljörisker. Det eventuella utläckaget av DDX orsakat av genomförd entreprenad skall minimeras och ej överskrida acceptabla nivåer. Åtgärden skall i så liten grad som möjligt bidra till utsläpp som bidrar till global påverkan. För objekten utvärderas även hur påverkan på naturvärden samt markens markmiljö och struktur kan bibehållas eller förbättras. Åtgärdsteknikens påverkan på naturvärden har för en första snabbvärdering värderats enligt nedan.

- 1 Låg inverkan. Naturvärden kan bevaras relativt intakta.
- 2 Måttlig påverkan. T ex schakt påverkar naturvärden, men återställning är möjlig.
- 3 Stor påverkan. Bearbetning av massor har stor påverkan liten eller ingen möjlighet till återställning.

Åtgärdsteknikens påverkan på mikrober och markkemi har värderats enligt nedan.

- 1 Låg påverkan. Mikrober och markkemi påverkas i låg grad och återhämtas inom ett kort tidsperspektiv.
- 2 Måttlig påverkan. Återhämtning görs inom ett längre tidsperspektiv.
- 3 Stor påverkan. Risk för att återhämtning inte är möjlig.

Tidsperspektiv:

Vid val av en åtgärdsteknik bör tidsperspektivet för utförande vägas in. Planering för genomförande av ett projekt bedöms försvåras ju längre tid projektet tar i anspråk, då det kan uppstå svårigheter att förutse exempelvis yttre faktorer som kan påverka entreprenaden. Svårigheter kan även uppstå vid fastställande av en budget som ska täcka för eventuella oförutsedda kostnader.

Ett kortare tidsperspektiv på en åtgärd kan även vara till fördel om det föreligger ett behov av att snabbt återställa marken för att återigen kunna utnyttja den för t ex jordbruk eller bete.

Tidsperspektivet för utförande av en saneringsåtgärd har för en första inledande bedömning i snabbvärdering i åtgärdsmatrisen värderats enligt nedan.

- 1 0-1 år. Liten risk för påverkan från yttre faktorer.
- 2 1-5 år. Måttlig risk för påverkan från yttre faktorer.
- 3 >5 år. Stor risk för påverkan från yttre faktorer.

6. ÅTGÄRDSTEKNIKER UTIFRÅN LITTERATURSTUDIE

6.1. Allmänt

I LTUs rapport har flera åtgärdstekniker för nedbrytning av DDX sammanställts och översiktligt beskrivits. En grov kategorisering utifrån de presenterade metodernas egenskaper kan göras enligt nedan. Metoderna presenteras översiktligt i följande kapitel.

- Biologisk behandling (kapitel 6.2)
- Termisk behandling (kapitel 6.3)
- Kemisk behandling (kapitel 6.4)

LTUs rapport har huvudsakligen använts som underlag för beskrivning av dessa åtgärdstekniker men en översiktlig genomgång av litteratur har gjorts för att ge utökade kunskaper om beskrivna metoder. Samtliga referenser anges i kapitel 11 och i åtgärdsmatrisen finns även angett vilka referenser som bidragit till fakta om respektive teknik.

6.2. Biologisk nedbrytning

Principen bakom dessa metoder innebär ett utnyttjande av biologiska processer för nedbrytning av DDX. Olika organismer används inom respektive metod, däribland bakterier, svampar, växter och dagmaskar.

6.2.1. Bakteriell

För dessa metoder nyttjas olika tillsatser för att skapa en god miljö för tillväxt av bakterier som ingår i nedbrytningsprocessen av DDX. Aeroba och anaeroba förhållanden utnyttjas var för sig eller i kombination för att uppnå nedbrytning. I Tabell 6.1 listas de metoder för bakteriell nedbrytning som har ingått i denna undersökning samt tillsatser som är nödvändiga för respektive saneringsmetod.

Tabell 6.1 Metoder för bakteriell nedbrytning samt metods specifika tillsatser.

Metod	Tillsats
Xenorem	Gödsel, träflis, halm
Daramend	Organiskt material, näringsämnen, Fe ⁰
Sabre	Kultiverade bakterier
Kompostering	Hästgödsel
Gene expression factor	Proteiner, kalk och näringsämnen

Majoriteten av metoderna kan utföras in situ eller on site (med undantag av Xenorem), dock kan det krävas schakt för att lägga upp jordmassor på en bädd där nedbrytning kan ske (Kompostering) eller för att mata en portabel bioreaktor med de jordmassor som ska behandlas (Sabre).

Xenorem och Daramend använder sig av cykelvisa aeroba och anaeroba förhållanden för att uppnå nedbrytning genom oxidation och reduktion. Detta uppnås genom att växelvis undvika omblandning av de jordmassor som behandlas för att uppnå en syrefattig miljö för att därefter blanda om för att uppnå en syrerik miljö. Sabre-metoden nyttjar istället en bioreaktor för att uppnå lämpliga förhållanden.

Metoden benämnd Kompostering tillämpas genom att jordmassor läggs upp i högar på en bädd och blandas med hästgödsel. Omblandning sker emellanåt för att växelvis skapa aeroba och anaeroba förhållanden.

Gene expression factor kräver en inledande identifiering på laboratorium av lämpliga platsspecifika bakterier som finns i jorden som ska behandlas. Det är emellertid oklart vilka bakterier som är lämpliga för ändamålet och om dessa bakterier finns i svenska förhållanden. En tillsats av protein i kombination med kalk och näringsämnen sker därefter i jorden vid saneringen för att stimulera tillväxt av dessa bakterier.

Metoderna bedöms kunna erbjudas av etablerade saneringsföretag på svenska marknaden, men pilotskaletester bedöms vara nödvändiga då metoderna inte i större omfattning är utprovade i svenskt klimat.

6.2.2. Svampar

Nedbrytning med hjälp av svampar har studerats uteslutande i laboratoriemiljö och litteratur om försök i större skala har inte påträffats inför sammanställande av denna rapport. Nedbrytning med tre grupper av svampar har beskrivits i LTUs rapport: white rot, brown rot och ostronmussling. Studerad litteratur har endast omfattat försök med nedbrytning av DDT, inte av dess nedbrytningsprodukter.

Ett tiotal white rot-svampar har undersökts i olika studier, där resultaten visar på att nedbrytning av DDT kan uppnås till en viss nivå. Det är dock oklart om alla eller enbart vissa av de undersökta svamparna har någon påverkan på nedbrytningen.

Brown-rot svampar är inte lika utforskade men har i en studie uppnått en viss nedbrytning av DDT.

Ostronmussling har undersökts genom att avfallssubstrat från svampen blandats i DDT-förorenad jord med nära på en halvering av DDT-koncentrationen under 28 dagars försökstid.

Ingen känd kommersiell metod eller leverantörer av tjänsten har hittats inom ramen för denna utredning. Bedömningen är att det även saknas studier som visar på effekt och tillvägagångssätt i nordiskt klimat, vilket kan bidra till att leverantörer saknas. För att vidare kunna utvärdera metoden med nedbrytning med hjälp av svampar i denna åtgärdsmatris kan en väg vara att utföra en inledande studie som underlag för pilotskaletest. Enligt SLU (Sveriges lantbruksuniversitet) skulle en sådan studie kunna utföras på testjordar från aktuella skogsplanteskolor först i laboratoriemiljö och sedan även in-situ på försöksytor som pilotskaletest. Labskaleförsök skulle uppskattningsvis kunna utföras med hjälp av ett antal befintliga isolat (2-10 st) av olika svampsorter som myllas ner i jorden med sågspån/kutterspån eller liknande som svampen kan växa på och det kontrolleras vilken förmåga svampen har att växa igenom jorden och om DDX-halten i jorden förändras. Ett sådant test bedöms ta ca 6 månader (kan utföras vintertid) och kosta omkring 0,5-1 MSEK, beroende på utvärderingstid och antal isolat som används och ska utvärderas. För de isolat som bedöms vara lämpliga kan sedan pilotskaleförsök utföras under en växtsäsong för att bedöma metodens potential för nedbrytning av DDX. I studien bör även beaktas att valet av isolat är naturligt förekommande svampar på de platserna som avses åtgärdas, så att man inte tillför organismer på en plats där de riskerar att bli invasiva arter eller på annat sätt störa ekosystemen på platsen. Om resultat från sådana studier visas positiva på nedbrytning av DDX bedöms det kunna utgöra underlag för utvärdering i denna åtgärdsmatris och för att metoden senare ska kunna utföras i full skala.

6.2.3. Växter

Växter som saneringsmetod, även kallad fyto Remediering, kan tillämpas på olika sätt beroende på art. Växten kan antingen nyttjas för att ta upp en förorening från jord för att därefter transportera föroreningen till olika växtdelar. Växten skördas därefter och destrueras, oftast genom förbränning. Om det kan ske i anläggning för energiutvinning blir det bättre ekonomi i metoden. Ett annat alternativ är att använda en art som har förmåga att bryta ner föroreningen.

Växter som saneringsmetod för DDX har undersökts i ett flertal studier, omfattande ett antal arter, däribland solros, rajgräs, pumpa och alfalfa. Utifrån dessa studier kan slutsatser dras om att ett begränsat upptag av DDT från jord sker antingen till rotsystem eller gröna växtdelar, beroende på art.

Vid kombination mellan rajgräs och en bakterie påvisades en hög nedbrytning av DDT och DDE genom reduktiv deklorering. Ingen nedbrytning av DDD påvisades emellertid.

Ett försök i full skala med hybridpopplar har utförts i North Carolina, USA, där 3 500 träd planterades i ett område förorenat med DDT. Inga uppföljningar har emellertid gjorts avseende nedbrytningsgrad och det har inte kunnat dras några slutsatser om försöket.

Det finns flera leverantörer av denna metod, se även kapitel 7, men pilotskaletester antas krävas för att optimera effekten av metoden på den aktuella platsen. Om metoden övervägs som åtgärdsmetod rekommenderas att odlingsförutsättningar i övrigt med näringsvärde, pH, jordart, vattentillgång utreds i undersökningsfasen. Vilka arter som kan lämpa sig för uppdraget i den aktuella klimatzonen måste också definieras.

6.2.4. Daggmaskar

Nedbrytning av DDX med hjälp av daggmaskar har studerats i laboratorieförsök och visat på en tydligt ökad nedbrytning av såväl DDT som nedbrytningsprodukter. Två olika arter studerades i testet och resultatet pekar på att maskarna på olika sätt bidrar till stimulering av reduktiv deklorering, oxidativ nedbrytning och mikrobiologisk nedbrytning. Nedbrytning sker i maskarnas tarmsystem, de avsöndrar sekret som stimulerar nedbrytning och de luckrar även upp jorden som förbättrar förutsättningar för den oxidativa nedbrytningen. Studierna är utförda på ganska hög densitet av maskar i jorden, ca 30 respektive 15 individer per kg jord.

Inga uppgifter om pilotskaletest eller fullskaleförsök med denna metod finns avseende DDT. Inga uppgifter har heller framkommit om hur daggmaskarna påverkas av DDT. Ytterligare studier kring detta rekommenderas innan metoden utreds vidare. Liksom för metod med svampar bedöms det saknas studier som visar på effekt och tillvägagångssätt i nordiskt klimat, vilket kan bidra till att leverantörer saknas. För att vidare kunna utvärdera metoden med nedbrytning med hjälp av daggmaskar i denna åtgärdsmatris kan en väg vara att utföra en inledande studie som underlag för pilotskaletest. I studien bör även beaktas att valet av arter av daggmaskar inte riskerar att störa ekosystemen på platserna som ska behandlas.

Ingen känd kommersiell metod eller leverantörer av tjänsten har hittats inom ramen för denna utredning. Studien som använts som bakgrundsmaterial i denna rapport har sitt ursprung i Kina.

6.3. Termisk behandling

I detta kapitel avhandlas metoder där värme nyttjas som behandlingsmetod för att stimulera nedbrytning. Metoderna har överlag uppvisat mycket hög effektivitet avseende reduktion av DDX.

Principen bakom metoderna är en uppvärmning av föroreningarna till höga temperaturer för att uppnå ett sönderfall av skadliga kemiska sammansättningar. Som konsekvens bildas mindre skadliga molekyler eller sådana som inte bedöms vara skadliga alls. Vid uppvärmning bildas gaser som tas omhand genom olika reningsprocesser, t ex kolfilter och skrubbers.

6.3.1. Termisk desorption

Gemensamt hos de metoder för termisk desorption som tas upp här (se

Tabell 6.2) är att det krävs en reaktor för genomförande. De flesta metoderna kräver en platsbyggd reaktor, med undantag för Anaerobic Thermal Processor där det har konstruerats portabla reaktorer som kan flyttas mellan olika siter. Platsbyggda reaktorer kan dock byggas upp i närheten av där förorenad jord som ska behandlas finns, dock med undantag för metoderna Directly-heated Thermal Desorption och Gas-Phase Chemical Reduction där det krävs stora ytor för själva reningsanläggningen och ekonomiska medel för uppbyggnad. Dessa typer av behandlingsanläggningar har istället konstruerats på en central plats dit förorenad jord från olika förorenade områden kan transporteras.

Samtliga metoder uppges i studier att ge nära på en fullständig nedbrytning av DDX, förutom Anaerobic Thermal processor där endast nedbrytning av DDT anges i studien.

Tabell 6.2 Olika metoder för behandling genom termisk behandling samt typ av reaktor för metoden.

Metod	Utförande	Temperatur jord	Typ av reaktor
LTTA (Low Temperature Thermal Aeration)	Uppvärmad luft för behandling av jord	150-430 °C	Platsbyggd reaktor
LTTD (Low Temperature Thermal Desorption)	Direktverkande värme	400 °C	Platsbyggd reaktor
Vacuumförbättrad LTTD	Direktverkande värme i vacuum	180 °C	Platsbyggd reaktor
Anaerobic Thermal Processor	Uppvärmning i anaerob miljö	760 °C	Portabel reaktor
Directly-heated thermal desorption	Direktverkande värme	300-450 °C	Platsbyggd reaktor
Gas-phase chemical reduction	Direktverkande värme i anaerob miljö	600 °C	Platsbyggd reaktor

6.3.2. Vitrifiering

I denna kategori innefattas en metod benämnd Geomelt. Detta är en in situ-metod för behandling av ett flertal föroreningar genom förglasning av den behandlade jorden. Utförandet innefattar att elektroder förs ner i marken och elektricitet kopplas på. Därmed uppstår en hög värme mellan elektroderna, vilket leder till en förglasning av jorden däremellan samt en nedbrytning av föroreningar. Föroreningar som inte sönderfaller kapslas istället in i glaset. Gaser som uppstår vid uppvärmning fångas upp och tas omhand i en reningsanläggning. Glaset behöver därefter svalna under lång tid (uppemot ett år) innan det kan schaktas bort från det sanerade området. Leverantören av metoden lyfter fram att glaset potentiellt kan användas inom byggbranschen tack vare dess hållfasta egenskaper.

Vid behandling av förorenad jord med Geomelt vid Parsons Chemical/ETM Enterprises Superfund Site, Grand Ledge, Michigan, uppnåddes en reduktion av DDX på 99,9 %. Behandlingen utfördes i segment, där behandling pågick under flera dagars tid per segment. Metoden krävde tillgång till stora mängder elektricitet där förbrukningen vid ett tillfälle uppgick till 1 000 000 kWh, vid behandling av ett marksegment med ca 550 ton jord under ca 20 dagar. Elförbrukningen är emellertid beroende av segmentets omfattning i plan och djup samt behandlingstid.

6.3.3. Förbränning

En metod har undersökts där förbränning har nyttjats för behandling av DDT-förorenad jord, vilket ger en nära på fullständig nedbrytning av DDX. Metoden innefattar två steg där förorenad jord leds in i en roterande ugn med hög temperatur (650 °C). Vid förbränningen uppstår gaser som leds in i andra steget, bestående av en efterbränningskammare med en temperatur över 1 100 °C. Ytterligare reningssteg följer därefter för vidare rening av gaser samt separering av partikulärt material.

Komponenterna till reningsanläggningen transporteras på lastbilar till det förorenade området och anläggningen byggs upp på plats. Schakt krävs därefter för transport av förorenade massor till reningsanläggningen.

6.4. Kemisk behandling

Här tas metoder upp innefattande nedbrytning genom tillsats av kemikalier. Ett flertal av dessa metoder har endast undersökts i labbskala och ytterligare studier kan behövas innan metoderna kan tillämpas i full skala.

6.4.1. Oxidativ nedbrytning

Laborariestudier har utförts där oxiderande kemikalier och katalysatorer har tillsatts för att skapa fria radikaler som angriper organiska molekyler och bryter ner dem. En god nedbrytning har uppnåtts av DDX. Tillsatser har vanligtvis bestått av bl a väteperoxid, natriumperoxisulfat, kalcium och magnesium, peroxider, järn och EDTA.

En anpassning av typ av kemikalier/katalysatorer behöver emellertid göras utifrån bl a jordens pH. Ingen känd kommersiell metod har hittats inom ramen för denna utredning.

6.4.2. Reduktiv deklorering

Denna metod innebär att ett reduktionsmedel tillsätts (t ex Fe^0) för att stimulera deklorerande biologiska processer för nedbrytning av DDX. För att metoden ska fungera krävs förekomst av organiskt material, som ska agera som elektronmottagare. Högre pH och temperatur främjar processen.

Metoden Daramend, som har beskrivits i kapitel 6.2.1, faller även under denna kategori genom att Fe^0 tillsätts vid behandlingen. Det finns även metoder såsom Chemical Reducing Solution (CRS) och S-Micro Zero Valent iron (S-Micro ZVI) som används för mark- och grundvattenföroreningar. Dessa metoder fungerar dock inte på föroreningar i omättad zon, då det är svårt att hålla reducerande förhållanden i den omättade zonen. Om en mättad zon kan skapas på konstgjord väg genom tillförsel av vatten uppifrån kan metoden fungera. Metoderna skulle även kunna vara aktuella om behandling utförs i reaktor/bassäng eller om hot-spot sanering ska utföras på lite större djup.

Avgränsningen för detta uppdrag avser ytlig förorening i omättad zon och med stora avstånd till grundvattenytan. Initialt har det bedömts vara svårt att skapa ens en tillfälligt mättad zon. Därför har dessa metoder inte utvärderats vidare. I kap 7 beskrivs dock ZVI vidare.

6.4.3. Kombination av kemisk reduktion och oxidation

Oxidativ och reaktiv deklorering har i laboratoriestudier kombinerats genom tillsats av olika kemikalier för att uppnå antingen deklorering eller oxidation. Metoden anges vara effektiv för nedbrytning av DDT, men mindre effektiv för DDE och DDD.

6.4.4. Lösningssmedelsbaserad extraktion

Inom området för lösningssmedelsbaserad extraktion har metoden Terra-Kleen undersökts. Metoden har testats vid ett pilotprojekt i Corando, Kalifornien, och använder ett vattenbaserat lösningssmedel för att extrahera organiska föroreningar – däribland DDX – från jord i en anläggning som kan byggas upp för behandling på plats. Schakt krävs därefter för att transportera jorden till reningsanläggningen.

Den förorenade jorden lyfts över till en tank i reningsanläggningen och lösningssmedel tillsätts. Vid tillsats av lösningssmedel frigörs föroreningar från jorden till lösningssmedlet. Efter avslutad cykel transporteras lösningssmedlet till en sedimenteringstank, genom ett filter samt ett reningssteg för att därefter återanvändas. Den behandlade jorden genomgår därefter olika steg för att avlägsna återstående lösningssmedel.

Inom pilotprojektet behandlades sammanlagt 550 ton förorenad jord i fem tankar där ett ton jord tillsattes till respektive tank åt gången. Lösningssmedel tillsattes till respektive tank under 30-45 minuter. Om åtgärds mål inte uppnås vid en behandling kan den

förorenade jorden genomgå rening i flera cykler. Inga studier där metoden har använts på jord in-situ har hittats inom ramen för detta projekt.

6.4.5. Mekanokemisk deklorering

Denna metod, förkortad MCD, nyttjar mekanisk energi för att främja nedbrytning genom deklorering. Processen äger rum ex situ i en anläggning innefattande en sluten ”kulkvarn”, där metallsalter och en protondonator (exempelvis en alkohol, eter, hydroxid eller hydrid) tillsätts för att reagera med föroreningen för att skapa reducerade organiska ämnen och metallsalter. Metallkuler i ”kulkvarnen” används för att skapa mekanisk energi som driver på en reaktion för nedbrytning av DDX.

Metoden har tillämpats i full skala för sanering av ett förorenat område bl a i Mapua, Nya Zeeland, där höga halter av DDT har uppmätts i jord. Processen innefattade flera steg, där fuktig jord inledningsvis förbehandlades i ett torkningssteg, följt av siktning för att avskilja större fraktioner som, utifrån laboratorieanalyser, inte bedömdes kräva någon behandling.

Jorden togs därefter till MCD-steget, utformat som en cylinder innehållandes metallkuler. Här blandades jorden med metallsalter och en protondonator och behandlades därefter i cylindern under ca 15 minuter. Metoden är i huvudsak lämplig för behandling av hot-spot förorening.

6.5. Andra metoder

Nedan följer exempel på alternativa metoder som inte tagits upp i LTUs rapport, men som påträffats i samband med utformande av denna åtgärdsmatris för skogsplanteskolor. Metoderna har emellertid inte omnämnts i matrisen och har därmed inte värderats utifrån uppsatta kriterier. Detta gäller även de alternativa metoderna med reduktiv deklorering som angetts ovan.

6.5.1. Behandling med biokol

Vid pyrolys av trä uppstår ett biokol med egenskaper som kan vara användbara för sanering av förorenade områden. Flera laboriestudier har utförts där biokol har applicerats på jord och sediment innehållande olika typer av föroreningar, såväl organiska som oorganiska. En adsorption av föroreningen kan ske till biokolet då det mixas med det förorenade mediet, vilket minskar föroreningens biotillgänglighet. Det betyder att en jordomblandning krävs i de översta förorenade skikten. Biokolet kan även utgöra en tillväxtyta för mikroorganismer i marken, vilket skulle kunna gynna en biologisk nedbrytning av föroreningen.

För vissa anjoniska ämnen, t ex arsenik och krom, kan dock tillförsel av biokol till jorden öka föroreningens rörlighet i marken och hänsyn behöver därför tas till om det finns flera föroreningar med olika egenskaper. Biokol kan även påverka tillgängligheten av näringsämnen i jorden negativt och det förefaller vara viktigt att ta hänsyn till markkemi (pH, kvävehalt) innan applicering av biokol. En hänsyn behöver också tas till hur pyrolysen har utförts, vilket kan ge biokolet olika fysiska egenskaper. Det har även

rapporterats om att metod för utförande av pyrolys och val av biomassa till pyrolysen påverkar innehåll i biokolet av PAH, dioxiner och furaner som kan uppstå vid pyrolysen. Beroende på innehåll av metaller i biomassan som används till pyrolysen kan även metallhalter påverkas i det färdiga biokolet. Användning av biokol är positivt för ett projekts koldioxidbalans då biokolet i marken fungerar som en kolsänka.

Det finns även på försöksnivå studier som visat att tillsats av olika typer av kolkällor i jorden kan sänka biotillgängligheten. Testade tillsatser av aktivt kol, biokol, lignit och kolspjälkande bakterier, nanotuber och komposterat gödsel bör kunna användas som metod för att minska biotillgängligheten.

6.5.2. Behandling med hydroxypropyl-P-cyclodextrin

Ett in situ-försök utfördes 2003 med sanering av en begränsad del av ett DDT-förorenat område i Point Pelee National Park, Ontario, Kanada, genom tillsats av hydroxypropyl-P-cyclodextrin i den förorenade marken. Cyclodextriner är oligosackariner med hydrofila och hydrofobiska egenskaper och som i t ex jord kan bistå vid transport av andra ämnen med relativt hydrofobiska egenskaper. Ämnet kan därmed användas för att laka ur DDX från en förorenad jord.

In situ-försöket visade på att koncentrationen av DDX minskade betydligt i det ytliga jordlagret och att den ytliga jorden blivit mer homogen avseende halter av DDX. Utöver detta ökade jordens vattenhalt och förekomst av organiskt material under försökets gång.

Efter försöket rådde det dock oklarheter om hur stor transport av DDX som skett ner till grundvattnet i samband med tillsatts av hydroxypropyl-P-cyclodextrin och ytterligare studier kring tillämpningen av detta ämne vid sanering av förorenade områden föreslogs.

Avgränsningen för detta uppdrag avser ytlig förorening i omättad zon och med stora avstånd till grundvattenytan. Initialt har det bedömts vara svårt att kontrollera risken för spridning till grundvatten för metoder som innebär tillsats av större mängder kemikalier och vatten. Metoden har inte utvärderats vidare.

6.5.3. Jordomvändning

Ett projekt för sanering av jordbruksmark med hög organisk halt utfördes mellan 2007-2009 vid Lake Apopka, Florida, för att minska koncentrationen av DDT. Man hade noterat hög dödlighet hos fiskätande fåglar i området och härlett det till DDT-läckage från mark som översvämmas regelbundet samt en ackumulation i fisk som utgör fåglarnas föda. En förstudie konstaterade att den effektivaste metoden för att uppnå fullgod reduktion var genom att plöja den berörda jorden med jordbruksredskap, för att få en omblandning.

Pilotstudier utfördes med olika typer av plogar för att jämföra effektiviteten dem emellan, avseende reduktion av DDE efter avslutad behandling. Koncentration av DDE valdes ut som representativt värde för saneringsmetodens effektivitet och därmed

analyserades inte vare sig DDT eller DDD. Detta då DDE visats ha högre toxicitet och högre grad av bio-ackumulation än DDT och DDD.

Resultatet visade på en högre reduktion av DDE där jorden omvändes än där den omblandades. Det var dock sämre resultat där den organiska halten i jorden var låg.

Man bör se upp med dessa metoder så att det inte huvudsakligen blir en utspädning av halter i den översta jordprofilen framför nedbrytning. Det bedöms dock kunna vara ett alternativ där riskreduktion i markytan är det primära målet framför mängdreduktion.

7. ÅTGÄRDSTEKNIKER UTIFRÅN INTERVJUER MED ENTREPRENÖRER

Under hösten 2020 har SGU och Structor utfört intervjuer med entreprenörer som svarat på en RFI (Request For Information), utgiven av SGU, med syfte att utöka kunskaper kring tillgängliga saneringstekniker för DDX på marknaden. Totalt fyra entreprenörer har intervjuats med förslag på åtgärder enligt tabell 7.1.

Tabell 7.1 Översikt över intervjuade entreprenörer och föreslagna åtgärder för behandling av DDT förorenad jord.

Leverantör (land)	Föreslagen metod	Typ av reagent som används	Typ
EDL (Nya Zeeland)	Mekanokemisk nedbrytning (MCD)	Mekanisk energi	On site
Geosyntec och Kemakta (Storbritannien/ Sverige)	Kemisk/biologisk nedbrytning	ZVI ensamt eller i kombination med växtbaserade tensider, fast kol eller flytande kol.	In situ/ ex situ
Phytoenvitech (Sverige)	Fytoremediering	Växt	In situ
RGS Nordic (Sverige)	Fytoremediering/ Reduktiv deklorering i behandlingscell	Växt/Bakterier tillsammans med tillsats, t ex Fe ⁰	In situ/ On site

Slutsats i steg 1 och 2 var att det för behandling av stora arealer inte bedömdes lämpligt med reaktorbaserade metoder där den aktuella jorden ska schaktas upp och behandlas.

Utifrån det perspektivet är metod med MCD och reduktiv deklorering i behandlingscell inte lämpliga annat än för behandling av hot-spot föroreningar. En sammanfattning av metoderna MCD, kemisk/biologisk nedbrytning och fytoremediering finns nedan och fullständig sammanställning av mötesanteckningar med entreprenörer återfinns i bilaga 2.

7.1. MCD

Entreprenör: EDL

Metoden har tidigare beskrivits i kapitel 6.4.5. Metoden är lämplig för behandling av olika typer av föroreningar och uppnår en hög reduktion (uppemot 99 %). Metoden är främst lämplig vid hot spot-sanering då den kräver att jord schaktas och transporteras till reaktor som kan byggas upp på plats. Vid behandling förändras jordens struktur i samband med mekanisk nötning och ut kommer ett nedmalet pulver, med förändrade egenskaper mot den ursprungliga jorden. En pilotstudie kan vara nödvändig innan metoden växlas upp i full skala.

Metoden bedöms inte vara tillämpbar på de åtgärdsområden som matrisen är avsedd för då det är måttligt förhöjda halter över stora ytor där jorden på platsen bedöms vara ett skyddsobjekt. Metoden ändrar kornstorleksmatrisen, vilket bedöms vara för stor påverkan på skyddsobjektet för att metoden ska anses användbar. Behandling av mindre hot-spots bedöms dock vara möjlig.

7.2. ZVI

Entreprenör: Kemakta/Geosyntec

Denna metod tillämpar en kemisk/biologisk nedbrytning av DDX genom tillsats av Fe⁰ och vid behov ytterligare tillsats med antingen växtbaserade tensider, fast kol eller flytande kol. Metoden bygger på cykelvis aerob och anaerob miljö genom periodvis omblandning med hjälp av t ex jordbruksredskap. Tillgång till vatten är avgörande då kontinuerlig bevattning av den behandlade jorden är nödvändig. Metoden kan därför appliceras antingen in situ eller ex situ, beroende på vilka förutsättningar som finns. För metoden är det av vikt att följa upp påverkan på grundvatten med hänsyn till riklig användning av vatten och metoden bedöms vara mindre lämplig där vattentäcker finns inom påverkansområdet. På de åtgärdsområden som matrisen är avsedd för är också avståndet till grundvatten stort. Det är oklart vilken påverkan det har för genomförande av metoden.

7.3. Fytoremediering

Entreprenör: Phytoenvitec och RGS Nordic (oberoende av varandra)

Förstudie krävs för att fastställa art/klon som är mest lämplig för ändamålet. Båda entreprenörerna förordar odling med salix som gröda i det här skedet. Valet av salix baseras mest på att det är en beprövad gröda att odla i nordiskt klimat. Litteraturen anger andra grödor som pumpa och gurka som skulle kunna ge ett större upptag, men det är inte prövat i nordiskt klimat. Begränsad eller ingen nedbrytning av DDX sker i växten, däremot ett upptag både i rötter och i stam/bladverk. Då Salix producerar en stor mängd biomassa i förhållande till en del andra växter som kanske kan ha ett större upptag, bedöms Salix ändå kunna vara ett konkurrenskraftigt alternativ. Växtdelar ovan jord skördas med jämna mellanrum för att avlägsna DDX från platsen med hjälp av växten. Om möjligt förbränns skördade plantor för energiutvinning i värmeverk. Även

rotsystem kan avlägsnas för massreduktion av DDX från platsen. Vid möjlighet till försäljning av skördad gröda för energiutvinning skulle projekt med fyto Remediering kunna vara delvis självfinansierande. Saneringsåtgärd skulle troligtvis pågå i tiotal år.

Användning av fyto Remediering med t.ex. salix begränsar även möjlighet för exponering och spridning av föroeningen och kan ibland vara lämplig i kombination med andra metoder.

8. UTVÄRDERING AV ÅTGÄRDSALTERNATIV

8.1. Grad av måluppfyllelse

Få studier på åtgärds effektivitet vid reducering av halter på mellan 5-15 mg/kg TS för summa DDT till det mätbara åtgärds målet, 2-4 mg/kg TS, har utförts. Det finns dock inga uppgifter på att reduktion i de haltintervallen inte skulle vara möjliga, varför samtliga åtgärder antas kunna uppnå det mätbara åtgärds målet. Det kan dock för vissa metoder som har lägre effektivitet krävas upprepade och längre behandlingstider.

Utifrån det mätbara åtgärds målet och problemformuleringen har de övergripande åtgärds målen antagits vara att;

- marken kan användas som betesmark eller liknande efter åtgärden
- befintliga fina sandiga avlagringar inom områden med höga naturvärden ska kunna behållas

För åtgärder där marken förändras (t.ex. vitrifiering), där kornstorleken förändras grovt, där schakt krävs eller där behandling sker i reaktor bedöms påverkan på de befintliga avlagringarna med höga naturvärden i området bli stor och de övergripande åtgärds målen kommer inte med säkerhet att kunna uppfyllas.

De biologiska metoderna ZVI, Daramend och Gene expression factor samt metoder med fyto Remediering, dagmaskar, svampar och biokol bedöms inte ha dessa begränsningar, men istället är det mer oklart om fullständig nedbrytning av DDX sker med dessa metoder jämfört med t.ex. termiska metoder. Användning av biokol har i försök visats minska biotillgängligheten hos DDX i jordar med ursprungliga halter kring 5-15 mg/kg TS som denna matris är avsedd för. Det bedöms inte påverka reduktionen av halter, men kan vara ett komplement för att minska riskerna.

8.2. Teknik

De tillgängliga åtgärds teknikernas tillämpbarhet på stora arealer mark, omkring tiotal hektar mark, är begränsande för flera tekniker. De tekniker där det krävs att massorna förflyttas för behandling bedöms inte vara lämpliga på så stora ytor. Där det endast innebär att ytjorden ska förläggas i strängar på markytan för vidare behandling, t ex vid

kompostering och sedan kan återföras på platsen så bedöms dock tekniken vara mer tillämpbar.

De termiska teknikerna har beskrivits med huvudsaklig hantering i reaktorer och generellt för de fall där förorenad jord hanteras med termiska metoder bedöms de vara mer tillämpbara för sanering av hot-spots framför stora ytor med relativt lägre halter. Då det är ytlig jord som ska hanteras skulle en termisk metod med värmeelement som läggs på markytan och riktar värmen ner i marken kunna vara mer anpassad, men någon sådan metod har inte hittats i litteraturen. Det är därför oklart om det finns teknik som skulle kunna värma upp ytjorden på ett effektivt sätt till de temperaturer som krävs för att få önskad reaktion. Vid behandling av ytjord är det lätt att värmen avgår till atmosfärluft istället för till uppvärmning av marken. De höga temperaturerna kommer med största sannolikhet ha en negativ påverkan på mikrober i marken och det kan behöva utredas om det är möjligt att återställa marken ur denna aspekt.

De kemiska metoderna Terra-Kleen och MCD har i huvudsak testats i reaktorer och bygger på att en behandlingsvätska eller fast material ska komma i kontakt med jorden för att reaktion/extraktion ska uppstå och metoderna är i det utförandet inte applicerbara på stora arealer av ytlig jord. Tidsåtgången, baserat på behandlingstider i pilotskala, för att behandla de stora arealerna blir orimlig. Distribution och uppsamling av kemikalier och/eller extraherad fraktion blir också begränsande. MCD har dock i andra projekt även utförts utan tillsatser, men oavsett det kommer jordmatrisen som läggs tillbaka ha förändrats till ett mycket finkornigt material. Metoden skulle kunna vara ett rimligt alternativ för hot spot-sanering.

De biologiska metoderna ZVI, Daramend och Gene expression factor samt metoder med fytoremediering och biokol bedöms emellertid ha tekniker som kan hantera stora arealer utan större anpassningar. Däremot finns begränsningar som att det för Daramend och ZVI kan uppstå lakvatten som behöver hanteras, kontrolleras och provtas. För Gene expression factor krävs labbskaleförsök innan åtgärder i full skala kan ske. Är det större arealer kan det råda olika förutsättningar inom olika delområden, så metoden behöver anpassas allt eftersom. Avseende fytoremediering så kan det uppstå större mängder avfall som ska hanteras, vilket bedöms vara en nackdel men inte begränsning.

Även behandling med daggmaskar och svampar antas kunna utföras rationellt på större arealer. Men dessa tekniker har endast testats i labbskala och anpassning till stora ytor och svenskt klimat är därför endast uppskattad.

8.3. Ekonomi

För flera av aktuella åtgärds tekniker saknas relevanta kostnadsuppskattningar. De biologiska teknikerna har relativt sett låga behandlingkostnader framför de termiska och kemiska metoderna.

Kostnadsuppskattningarna i matrisen är dock gjorda utifrån de olika studiernas storlek och kostnad per mängd behandlad jord ökar sannolikt ju lägre kvantiteter som ska behandlas och vice versa. Därmed bedöms inte kostnadsuppskattningarna vara fullt ut

jämförbara med varandra beroende på studiernas olika storlek samt att ingen hänsyn tagits till förändring av prisindex.

Vid interjuver med entreprenörer har en grov kostnadsuppskattning erhållits för behandling med MCD och ZVI, se bilaga 2.

För tekniker med daggmaskar, svampar och biokol saknas uppgifter helt. Ytterligare studier i svenskt klimat bedöms krävas för att fått en uppfattning om kostnader.

8.4. Miljö

Åtgärdstekniker med termisk behandling samt fyto Remediering genererar avfall. De termiska metoderna använder bland annat aktivt kol och annat filtermaterial för att rena luft/gas som avdrivs i processen som blir ett avfall och fyto Remediering innebär att om växtdelar ska skördas så måste de destrueras/omhändertas. Det bedöms i sig inte vara ett hinder, men negativt vid värdering av alternativ. Avfallet i sig kan påverka miljön med transporter, och energianvändning vid hantering.

I jämförelse med de termiska och kemiska metoderna har de biologiska teknikerna relativt sett en liten påverkan på miljön på platsen, såvida de utförs genom att substrat eller bakterier tillförs i marken, plöjs ner samt att inget avfall eller schakt genereras.

8.5. Rekommenderade åtgärdsalternativ

De biologiska metoderna ZVI, Daramend och Gene expression factor samt metoder med fyto Remediering, daggmaskar, svampar och biokol bedöms ha tekniker som bäst kan hantera stora arealer utan större anpassningar.

Av dessa har Daramend testats i pilotskala i Sverige vid Kårehogen, dock utan ett tydligt positivt utfall avseende reduktion av DDX. Det bedöms finnas orsaker till det mindre positiva resultatet och metoden har visats fungera vid utländska försök. Vid de utländska försöken har metoden använts direkt på yttlig jordbruksmark, medan det i försöket vid Kårehogen utfördes i container p g a att området låg inom ett vattenskyddsområde. Metoden bedöms därmed fortfarande kunna vara applicerbar på svenska förhållanden. Daramend kan tillhandahållas av PeroxyChem, USA (med filialer i Spanien/Tyskland).

Gene expression factor bedöms också vara en tänkbar åtgärds metod för aktuella typområden. Metoden kräver en inledande identifiering på laboratorium av lämpliga platsspecifika bakterier som finns i jorden som ska behandlas. En tillsats av protein sker därefter till jorden tillsammans med andra tillsatsämnen som kalk, organiskt material och näringsämnen, för att stimulera tillväxt av dessa bakterier. Därefter ska ytan vattnas och metoden kan även vara beroende av flera klimatfaktorer. Metoden kan tillhandahållas av BioTech Restorations, LCC, Florida, USA.

Fyto Remediering har i utförda studier inte kunnat påvisas ha så stor effekt, men bedöms ändå kunna vara ett tänkbart alternativ utifrån tekniken. Om fyto Remediering kan utföras med odling av energiskog eller liknande kan det ge positiva effekter om halterna DDX

inte förhindrar att energiskogen används som flisbränsle. Så länge det växer på platsen blir det även en positiv koldioxideffekt av åtgärden genom lagring i virket. Ytterligare forskning och utveckling för anpassning mot DDT krävs för att metoden ska rekommenderas vidare. Metoden kan tillhandahållas av företagen Phytoenvitec och RGS Nordic som båda har uppgivit att *Salix* skulle kunna vara en lämplig gröda för ändamålet. Inget av företagen har emellertid tillämpat fytoremediering specifikt på DDX-förorenad jord.

Metod med daggmaskar och svampar finns presenterat i forskningsrapporter, men någon kommersiell metod har inte hittats inom ramen för denna utredning. SLU har uppskattat tid och kostnader för en initial studie i laboratorieskala avseende svampar som skulle kunna ge underlag för en pilotstudie under en växtsäsong. Utifrån en sådan studie, med positivt utfall, skulle en utförandeentreprenad vara möjlig för fullskaleförsök. Avseende daggmaskar rekommenderas i första hand att eventuell negativ påverkan på daggmaskar eller andra organismer utreds, då biotillgängligheten har angetts öka med metoden.

Metoder med biokol, markvitalisering, jordomvändning och hydroxypropyl-P-cyclodextrin kräver ytterligare forskning och utveckling för anpassning mot DDT för att rekommenderas vidare.

Övriga metoder kan vara aktuella efter vidare anpassningar för hantering av större arealer eller vid andra förhållanden på åtgärdsområdet än vad som varit aktuellt för detta uppdrag.

9. KRAV PÅ MILJÖUNDERSÖKNINGAR

Utifrån studerade åtgärdsmetoder har det inte framkommit specifika parametrar som kräver utredning redan i miljöundersökningsskedet utöver det som krävs för utförande av riskbedömning av föroreningssituationen. I regel krävs, utöver representativa halter av aktuell förorening i plan och profil, även platsspecifik beskrivning av jordartförhållanden, hydrologiska förhållanden, skyddsobjekt och spridningsförhållanden. För alla typer av åtgärdsutredningar krävs även utredning om tillgänglighet och infrastruktur på platsen och förutsättningar i övrigt för genomförande av entreprenader. Några metoder kräver t.ex. riklig tillgång på vatten, vilket bör utredas hur det i så fall kan distribueras på platsen.

Flera föreslagna metoder baseras på biologisk behandling och för genomförande av dessa krävs normalt sett att jordens förutsättningar som näringsämnen, organisk halt, pH och redox kontrolleras. Vissa av dessa parametrar är även intressanta för metoder som bygger på oxidativ eller reduktiv deklorering. Den hydrauliska konduktiviteten, kornstorleksfördelningen, bedöms vara relevant för bedömning av metoder som bygger

på att en vätska ska distribueras i den förorenade jorden. Dessa parametrar kan även undersökas i projekteringen och i samband med åtgärdsförberedande undersökningar.

Studier på mikroorganismer, arter och mängd individer, kan vara av vikt för biologiska metoder. Det bedöms dock vara metodspecifikt och bör tillhöra projekteringen av åtgärderna. Vid positivt utfall från forskningsprojekt med BioLearning kanske analyser av e-DNA, där artsammansättning och mängder organismer maskinellt kan bestämmas, vara en metod som bör ingå i miljöundersökningsskedet i framtiden.

I steg 3 intervjuer framkom att anpassade kontrollprogram och pilotstudier krävs innan metoderna kan rekommenderas fullt ut för ett objekt. Utifrån det bedöms de specifika analyser som krävs för att bedöma förutsättningar för respektive åtgärdsmetod kunna undersökas i åtgärdsförberedande undersökningar.

10. UPPFÖLJNING

För att utvärdera åtgärdsmetodernas effekt krävs uppföljning. Då åtgärdsmetoderna är inriktade på behandling av jord bör uppföljning i första hand ske genom provtagning av jordmatrisen som behandlats. De åtgärdsmetoder som rekommenderats har inte i befintligt underlag visats innebära spridning av nedbrytningsprodukter, biprodukter eller tillsatta medel till omgivande mark eller vatten, men kontrollprovtagning av omgivande jord och grundvatten samt eventuella närliggande ytvatten kan vara aktuell för att utesluta ökad spridning. Spridning till luft bedöms dock inte utgöra risk för de aktuella objekten som inte är bebyggda, varför uppföljning i luft inte är aktuell.

Uppföljning av jorden bör ske genom systematisk provtagning av den behandlade jorden för att få ett representativt resultat. Det kan föreligga en risk att det vid avslutad behandling förekommer en heterogenitet avseende DDX-koncentrationer i jorden, beroende på såväl inledande halter som den utvalda saneringsmetodens effektivitet i olika delar av den behandlade jorden (t ex olika förutsättningar avseende markkemi, tillgång till mikroorganismer, organiskt material et c). Samlingsprovtagning i delområden är att föredra då enskilda stickprover kan vara svåra att utvärdera och även kan ge resultat som inte är representativa för området.

Eftersom behandling sker av yttlig jord kan provtagning med fördel ske med spade alternativt med stickspjut. Om stora arealer ska provtas finns dock mer automatiserade metoder att tillgå, där en provtagningsanordning monteras på t ex en traktor eller fyrhjuling. Anordningen tar automatiskt ut ett prov på önskad plats och operatören behöver därmed endast navigera fordonet för att tillse att provtagning sker inom rätt område.

För specifika åtgärds mål som innebär att marken ska bibehålla sitt höga naturvärde som odlingsmark krävs även kontroll av markegenskaper såsom näringsvärde, pH,

konduktivitet och mullhalt både före och efter åtgärd för bedömning av åtgärdens påverkan. Även halt organiskt material och vattenhalt i jorden kan ha betydelse för haltvariationer av DDX, vilket bör ingå i analyspaket vid uppföljning av åtgärder.

Uppföljningsmetoder bör väljas så att samma typ av uppföljning sker före som efter åtgärd för att utvärdering ska kunna göras på bästa sätt.

11. REFERENSER

- Badley, J. (2003). *REMEDIATION OF DDT CONTAMINATED SOIL: A FIELD STUDY*. Hamilton, Ontario: McMaster University .
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Brett, R., & Sizmur, T. (2011). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation. *Environmental Pollution* 159, 3269-3282.
- BioTech Restorations. (2005). *Remediation of petroleum and chlorinated hydrocarbon contaminated soils utilizing gene expression factors (Factor)*. : BioTech Restorations.
- Chattopadhyay, S., & Chattopadhyay, D. (den 26 November 2015). Remediation of DDT and Its Metabolites in Contaminated Sediment. *Curr Pollution Rep*, ss. 248–264.
- Dahmer , C. P. (2016). *REMEDIATION STRATEGIES FOR DICHLORODIPHENYLTRICHLOROETHANE AND DIELDRIN CONTAMINATED SOILS AT POINT PELEE NATIONAL PARK*. the Royal Military College of Canada.
- Frazar, C. (2000). *The Bioremediation and Phytoremediation of Pesticide-contaminated Sites*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Harald, S., Sjöström, L. (2020). DDT Förorenade områden - Potentiella tillsatser och metoder för att minska biotillgängligheten,
- Golder Associates. (2018). *Pilotstudie Kårehogen*. Göteborg: Golder Associates.
- Lin, Z., Li, X.-m., Li, Y.-t., Huang, D.-y., Dong, J., & Li, F.-b. (2012). Enhancement effect of two ecological earthworm species (*Eisenia foetida* and *Amyntas robustus* E. Perrier) on removal and degradation processes of soil DDT. *Journal of Environmental Monitoring*, (14), 1551.
- LTU. (2019). *EFTERBEHANDLINGSTEKNIKER FÖR DDT-FÖRORENADE MATERIAL*. Luleå: Luleå tekniska universitet.

- Meckes, M. C., Engle, S. W., & Kosco, B. (2012). Site Demonstration of Terra-Kleen Response Group's Mobile Solvent Extraction Process. *Journal of the Air & Waste Management Association*(46), 971-977.
- PeroxyChem. (2014). *DARAMEND® Case Study - 240-Acre Future Residential Development Site, Ontario, Canada*. PeroxyChem.
- PeroxyChem. (2020). *BENCH-SCALE TREATABILITY INVESTIGATION DARAMEND® TREATMENT OF DDT-IMPACTED SOIL FINAL REPORT*. : PeroxyChem Environmental Solutions.
- Purnomo, A. S., Mori, T., Takagi, K., & Kondo, R. (den 13 Maj 2011). Bioremediation of DDT contaminated soil using brown-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 691-695.
- Sizmur, T., Quilliam, R., Puga, A. P., Moreno-Jiménez, E., Beesley, L., & Gomez-Eyles, J. L. (2015). Application of Biochar for Soil Remediation. *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers.*, SSSA Special Publication 63.
- U.S. DOE. (2003). *THE USE OF ENHANCED BIOREMEDIATION AT THE SAVANNAH RIVER SITE TO REMEDIATE PESTICIDES AND PCBS*. Oak Ridge, TN: U. S. Department of Energy.
- U.S. EPA. (1993). *On-Site Incineration at the FMC Corporation - Yakima Pit Superfund Site Yakima, Washington*. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
- U.S. EPA. (1993). *T H Agriculture & Nutrition Company Superfund Site*. Washington, DC: U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
- U.S. EPA. (1994). *Parsons Chemical/ETM Enterprises Superfund Site*. Washington, DC: U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
- U.S. EPA. (1995). *Low temperature thermal aeration (LTTA) process - Canonic environmental service, Inc*. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (1995b). *Thermal Desorption at the Pristine, Inc. Superfund Site, Reading, Ohio*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (1998a). *Terra-Kleen response group, Inc - Solvent extraction technology*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (1998b). *Vacuum-Enhanced, Low-Temperature Thermal Desorption at the FCX Washington Superfund Site Washington, North Carolina*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.

- U.S. EPA. (2000). *Cost and Performance Summary Report Bioremediation at the Stauffer Management Company Superfund Site, Tampa, Florida*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2003). *Cost and Performance Summary Report - Thermal Desorption at Site B, Western United States*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2003). *Cost and Performance Summary Report Thermal Desorption at Site B, Western United States*. Washington, DC: U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
- U.S. EPA. (2005). *Reference guide to non-combustion technologies for remediation of persistent organic pollutants in stockpile and soil*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2010). *Reference guide to non-combustion technologies for remediation of persistent organic pollutants in stockpile and soil*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Vijgen, J. (2002). *Evaluation of Demonstrated and Emerging Remedial Action Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III)*. Holte: State-of-the-Art.

BIL 1 ÅTGÄRDSMATRIS MED BEHANDLINGSMETODER FÖR DDT-HALTIG JORD

Åtgärdsmatris för f.d. skogsplantkolor - anpassat för yttlig jord på stora arealer

Metod	Biologisk		Termisk		Kemisk		Genomförande										Snabbvärdering				Underlag och kommentarer																
	Bakteriell	Fyto	Mesofila	Svamp	Termisk desorption	Vitrifiering	Förbränning	Oxidativ nedbrytning	Reduktiv deklorering	Melanomisk deklorering	Lösningsmedelbaserad	In situ-metod	On site-metod	Cykelbaserad	Schakt nödvändigt	Skördning nödvändigt	Kräver tillsats av substrat el dyll	Förutbest reaktor krävs	Plasbyggt reaktor krävs	Kräver biädd	Komplett nedbrytning (DDX)	Genererar avfall	Ekonomi	Tidsperspektiv	Effekt på naturvärden	Effekt på mikrober/markkemi	Klarar lägre halter	Kräver växelvis förhöjd fukthalt. Vatten behöver tillföras.	Kräver på fukthalt i jord för effektivitet	Kräver på klimat (temp, nederbörd)	Reduktion % (DDT, DDD, DDE)	Reduktion mg/kg (DDT, DDD, DDE)	Tid (behandling)	Mängd behandlad jord	Kostnad angiven i referens	Kostnad i SEK (med antagande om \$1 = SEK 9,50 och 1m³ = 1,8 ton)	Anmärkning
Daramend	x							x			x		x			x				x		1	1	2	1	Ja. Baserat på att försök utförts på olika halter med gott resultat.	Kräver växelvis förhöjd fukthalt. Vatten behöver tillföras.	Försök vid Kårehogen indikerar att låga temperaturer minskar effektiviteten.	68; 57 (en cykel); 66	2,05 -> 0,66 DDD ej angivet 2,37 -> 0,80	4 mån 2 cykler	Ca 100 ha	Ca \$21/ton	200 kr/ton	In situ-metod endast tillämpbar på yttliga jordar, tillgängliga för jordbruksredskap. Lakvatten kan uppstå.	Peroxychem 2014	
Gene expression factor	x										x					x						2	1	2	1	Enligt resultat från olika pilotstudier klarar metoden högre halter (156) ner till låga (0,48) med god reduktion.	Kräver tillförelse av vatten	Optimal temp ej angiven.	DDT/DDE: 98	DDT-DDE: 8,8 -> 0,1	26 v	Ca 1 680 m³	Ca \$30-60/ton + \$30 000 labbkostnad	285-570 kr/ton + 285 000 kr labbkostnad	Aktivering av befintliga mikroorganismer på platsen. Kräver analyser på labb innan bioremediering kan påbörjas i full skala.	Biotech restorations 2005, US EPA 2010	
Fytoremediering		x									x				x						?	x	?	3	1	1	Anges ej	Anges ej	Anges ej	Anges ej	Anges ej	Pågående fr 1999-	3 ha	\$450 000 (för hela projektet)	4 275 000 kr (för hela projektet)	Övre jordlagret schaktades bort och behandlades termiskt. 3 500 hybridpopplar planterades på mellan 0,5 till 3,6 m djup.	LTU 2019
Daggmaskar			x					x	x		x											?	3	1	1	Labbförsök utfört på 2 resp 4 mg/kg	Tillräckliga förhållanden för daggmaskens leverne	Tillräckliga förhållanden för daggmaskens leverne	DDT: 46,4 resp 37,5	DDT: 4,0 -> ca 1,8 resp 2,0 -> ca 0,75	1 år	2 kg	Underlag saknas	Underlag saknas	Har endast testats i labbskala. Ingen nedbrytning av DDT-metaboliter.	Lin Z et al 2012	
Ostronmussling				x							x											?	?	2	?	Anges ej	Anges ej	Anges ej	DDT: 48	Anges ej	28 dagar	Anges ej	Underlag saknas	Underlag saknas	Har endast testats i labbskala. Avfallssubstrat från svampodling blandas i den förorenade jorden.	LTU 2019	
White rot				x							x											?	?	2	?	Anges ej	Anges ej	Anges ej	DDT: 47-95	Anges ej	Anges ej	Anges ej	Underlag saknas	Underlag saknas		LTU 2019	
Brown rot				x							x											?	?	2	?	Definieras ej	Definieras ej	Temperatur under labbförsöket var 30°C	DDT: 43	Anges ej	14 dagar	2 g	Underlag saknas	Underlag saknas	Ökade halter av nedbrytningsprodukt DDD.	Pumomo et al 2011	
Xenorem	x												x	x		x						2	1	2	1	Underlaget anger att metoden ÄVEN är effektiv på högre halter (se kolumn t h). Labbförsök har gjorts på lägre halter, men dessa halter anges inte.	Ej angivet vad som är optimalt, endast vilka förhållanden som rådde vid försöket.	Metoden är ex situ och utförs på en plats med rätt förutsättningar. I övrigt inte angivet vilka som är optimala förhållanden.	98; 90,5; 40	88,4 -> 1,2 242 -> 23 11,3 -> 6,8	48 v	765 m³	Ca \$100/m³	528 kr/ton	Tillsats av näringsämnen kan öka jordmassan med 40 %. Lakvatten behöver tas omhand	LTU 2019, US EPA 2000, US EPA 2005	
Sabre	x										x		x		x	x						2	1	2	1	Klarar lägre halter	Utförs i bioreaktor där rätt förutsättningar ges.	Utförs i bioreaktor där rätt förutsättningar ges.	-	Några ppm DDT till under detektionsgräns	23 dgr	Ca 4 200 m²	Ca \$73/m³	385 kr/ton	Effektiv nedbrytning sker av flera bekämpningsmedel. Oklart om nedbrytningsprodukter till DDT bryts ner.	LTU 2019, Frasar 2000	
Kompostering	x										x		x		x	x						4	1	2	1	Anges ej	Kräver tillförelse av vatten	Temperatur bör ligga under 40°C. Över 50 grader dör mesofila bakterier.	83-96; 44 till ökade halter; 60-76	Anges ej	3 mån	Ca 460 m³	Ca 6521 kr/m³	3 623 kr/ton	Effektiv nedbrytning av DDT och DDE. Dock en ökning av DDD vid behandlingen, troligtvis p g a nedbrytning av DDT. Men indikatorer gavs att fortsatt nedbrytning ändå pågick	LTU 2019	
LTTA					x						x		x				x		x	x	x	4	1	3	3	Anges ej. Begränsade studier av jord med olika halter.	Optimalt med fukthalt under 20 %. Kan kräva avvattnings anmars.	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	99,8-99,9; 98,8-99,9; 81,9-97,8	321 -> <0,004 206 -> <0,01 48 -> 0,94	12,5 dgr (beräknat)	51 000 ton	\$133-209/ton	1 264-1 986 kr/ton	Kräver ca 1000 m² yta för att rigga anläggning.	US EPA 1995a	
LTTD					x						x		x				x		x	x	x	2	1	3	3	Anges ej. Begränsade studier av jord med olika halter.	Optimalt med fukthalt under 20 %. Kan kräva avvattnings anmars.	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	97; 99; 94	5,98 -> 0,18 23,22 -> <0,029 10,98 -> 0,43	5 mån	26 000 ton	\$125/ton	660 kr/ton	Liknande metod som LTTA. Problemfylld pilot.	US EPA 2003	
Vacuumförbittrad LTTD					x						x		x				x		x	x	x	3	1	3	3	Anges ej. Begränsade studier av jord med olika halter.	Optimalt med fukthalt under 20 %. Kan kräva avvattnings anmars.	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	Anges ej	"Total pesticides pre-treatment concentration" 3226 -> 0,0252, 57,2 -> 0,0292, 57,7 -> 0,187	12 mån	10,4 m³	\$95/m3	501 kr/ton	Liknande metod som LTTA men arbetar i lägre temperatur tack vare vaccum.	US EPA 1998b	
Anaerobic Thermal Processor					x						x		x				x			?	x	?	1	3	3	Anges ej. Begränsade studier av jord med olika halter.	15-20% inom försöket	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	DDT: 99,9	DDT: 0,11-8,2 -> <0,0086-0,0096	5 mån	12 800 ton	Anges ej	-	Framgår inte om DDD och DDE också bryts ner	US EPA 1995b	
Directly-heated thermal desorption					x						x		x				x		x	x	?	1	3	3	Anges ej. Begränsade studier av jord med olika halter.	Jord torkas i reaktor	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	99,9; 99,9; 99,9	DDX: 469-1520 -> <0,05-1,39	9-10 mån	27 000 m³	Anges ej	-	Ej mobil anläggning. Kräver konstruktion av anläggning.	LTU 2019		
Gas-phase chemical reduction					x						x		x				x		x	x	?	1	3	3	Anges ej. Begränsade studier av jord med olika halter.	Jord torkas i reaktor	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	DDX: 99,99	Anges ej	>5 år	Anges ej	Anges ej	-	Ej mobil anläggning. Kräver uppbyggnad. Användes under lång tid för jordmassor från många olika siter.	LTU 2019		
GeoMelt											x		x								x	3	1	3	3	Halter i studien är i enlighet med detta uppdrag	Anges ej	Anges ej.	DDT: 99,9	DDT: 340 -> <0,016	1 år	5 440 ton	\$205/m³	1 082 kr/ton	Jord kan inte återanvändas. Restprodukter kapslas in. Glaslet kan enligt leverantör användas i konstruktioner.	LTU 2019, US EPA 1994	
Förbränning											x		x				x			x	x	4	1	3	3	Anges ej, utöver de halter som innefattades i projektet.	Jord torkas i reaktor	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	DDX: 99,99	210 -> ?; 76 -> ?; 28 -> ?	5 mån	4 256 m³	\$6 000 000 (för hela projektet)	7 440 kr/ton		US EPA 1993	
Terra-Kleen											x		x				x			x	x	4	1	3	3	Anges ej. Begränsade studier av jord med olika halter.	Kräver lägre fukthalt. Processen inkluderar ett avvattningssteg.	Anges ej. Utförs däremot i reaktortank där förhållanden kan styras.	99,9; 99,8; 99,4	80 -> 0,093 12,2 -> 0,024 1,5 -> 0,009	3 cykler	550 ton	Ca \$170-300/ton	1 615-2 850 kr/ton	Oklart kring hur jorden påverkas avseende mikroorganismer etc efter avslutad behandling. Lägre effektivitet i leriga jordar.	US EPA 1998a	
MCD											x		x				x			x	?	4	2	3	3	Anges ej, utöver de halter som innefattades i projektet.	Jord torkas i reaktor	Utförs i reaktor där förhållanden styrs.	DDX: 91	DDX: 717 -> 64,8	Anges ej	5 500 m³	Anges ej	7 677 kr/ton	I pilotprojekt \$8 milj för uppbyggnad och behandling av 5 500 m³ i 2,5 års tid. Jord ändrar karaktär från sandig till mer finomig efter åtgärd.	US EPA 2010	

BIL 2 SAMMANSTÄLLNING AV INTERVJUER

Sammanställning anteckningar från möte med entreprenörer.

Entreprenör	Typ av metod	Reagent	Översiktlig beskrivning	Tillämpats på andra föreningar	Dimensionering av entreprenad. Vilka utredningar behövs för dimensionera och kostnadsberäkna entreprenad?	Hur djupt kan åtgärden utföras?	Vilken reningsgrad kan uppnås?	Reduktion av nedbrytningsprodukter?	Kan metodens effektivitet påverkas av eller reducera andra föreningar?	Finns en risk för läckage eller mobilisering av förorening under entreprenaden (Iskvatten, förflyttning av förorening i djupled et c)?	Hur mäts åtgärdens effektivitet, dvs förorengsreduktion?	Utförandetid	Yta som behöver tas i anspråk?	Vilka störningar kan förväntas i området under genomförandet?	Skyddszon	Krav på infrastruktur?	Arbetsfordon som används?	Masshantering och eventuella mellanlagringsytor?	Uppstår avfall inom entreprenaden? Typ av avfall och uppskattade mängder?	När är området tillgängligt för nyetablering efter avslutad åtgärd?	Kostnad
EDL	Mekansisk nedbrytning (MCD) On site	Mekansisk energi	Företrad jord behandlas i reaktor, genom exponering mot mekanisk energi, vilket ger en nedbrytning av föroreningen. Resprodukt blir ett fint pulver.	POPs PFAS Asbest mm	En pilotstudie kan vara nödvändig vid stora osäkerheter. Annat alternativ är att använda fullskalantäggning från bötjan och kalibrera den för sitens förutsättningar. - Torsubstans – ju torrare jorden är, desto bättre. Behöver torkas till 99 % TS. - Jordart - på påverkar inte processen - Organiskt kol påverkar inte processen	Så djupt som schakt kan utföras.	Fullgod reduktion kan uppnås. Begränsande blir möjligheten att schakta upp alla förorenade massor. Upp till 99 % reduktion.	Ja: DDT, DDE, DDD	Kan reducera andra typer av föroreningar.	Lakvatten uppstår inte.	Ingående halter innan sanering i förhållande till utgående halter efter sanering.	Beroende på hur stor jordvolym som ska behandlas, hur många reaktorer, vattnehalt. Detta bestäms i pilotstudie.	250-400 m ² inkl föresteg	Höga ljudnivåer från reaktorn: 126 dB. Men reaktorn inlagas i en container som minskar ljudnivå till 80-86 dB. I närheten av bostadsområden kan i ex lagerbyggnader nyttjas för att rigga reaktorn, för att minska störning.	Obehöriga skall inte vistas på arbetsområdet	Tillgång till el. Maskinen kräver ca 650-750 kW.	Transport av personal och containers Grävmaskin	Kan bli aktuellt.	Resprodukt ur reaktorn är ett fint pulver, som skulle kunna återanvändas alt behandlas som avfall.	När är området tillgängligt för nyetablering efter avslutad åtgärd?	Pilotskaleförsök: \$250 000-300 000 + arbetskostnad Beror på volymen på hela siten. 100 ton: \$500-1000/ton 1000 ton: \$250-350/ton
Kemiska och Geosyntet	Kemisk/biologisk nedbrytning In situ/ex situ	ZVI ensamt eller i kombination med vätsbaserade tensider, fast kol eller flytande kol.	Blanda tillsats med jord vilket stimulerar anaerobisk och aerobisk nedbrytning. Detta sker i olika steg och cykelvis. Kräver bevattnig. Cykler är mellan 2-3 veckor. Typisk behandlingstid är mellan 3-12 cykler.	Andra OCP's (organochlorine pesticides) och PCB	Inledande utredningskede, följt av fullskala försöksföretag. - Volym DDX-företrad jord - TOC - pH - Jordart, kornstorlek - Andra föreningar	In situ: Så djupt som ombländning kan ske. Ex situ: så djupt som schakt kan utföras.	80-90 % reduktion av DDX har tidigare uppnåtts efter 3-12 cykler.	Ja: DDT, DDE, DDD	Kan reducera andra liknande föroreningar.	Mobilisering av DDX förväntas inte. Ombländning av jord och bevattnig eller utgrävning kan orsaka lokal mobilisering av föroren, dåligt sorberande sanföreningar eller icke-vattenfäsvätkor av andra föroreningar.	Ingående halter innan sanering i förhållande till utgående halter efter sanering.	Beroende på hur stor jordvolym som ska behandlas. Handlar i regel om månader.	Beror på volym jord som ska behandlas.	För jord <0.6 m förväntas inga störningar på markinstallationer vid tillämpande in situ.	Allmänheten bör inte ha tillräde under arbetet med saneringen.	Vatten är nödvändigt för bevattnig.	In situ: Traktor med plog och bevattningsanordning. Ex situ: Grävmaskin och lastbil för att flytta jordmassor	Kan bli nödvändigt med mellanlagringsytor vid stora jordvolymen i samband med ex situ.	Inga större avfallsmängder vid in situ. Vid ex situ uppstår lakvatten som behöver rensas, men kan återanvändas.	Behandlad jord är tillgänglig för återanvändning efter åtgärdsml har uppnåtts.	Kostnad utredningskede: ca 350 000 kr/site Uppskattad saneringskostnad per ton utifrån tidigare erfarenheter. ZVI + 250-300 kr ZVI + tensid – 300-400 kr ZVI + flytande kol – 450-550 kr ZVI + fast kol – 1000-1200 kr
Phytovetek	Fytoremediering In situ	Växt	Odla Salix, av särskild klon. Odla på marken, för att växten ska ta upp eller bryta ner beroende på ämne. Direkter skönda växten för att få bort DDT från platsen. Växten bör brännas eller slutförvaras på deponi.	Har tillämpats på tungmetaller, PFAS, PCB, PAH, dieselretervat. Har inte använts för DDT innan.	Avglös genom förestadie, där det avglöses vilken art som ska odlas, hur de ska odlas och hur länge. Ta kontaminerad jord och mätta halter i jord och växt efter tillväxt i klimatkammare. Halter i jord kan ha brytts ner eller omvandlats, både i jord och i växt. Räkner med att odla någon vecka till 14 dagar. Utifrån detta kan räknas ut hur det ska skalas upp för att åtgärda/ml ska uppnås. Förestadie kan göras på en månad.	Så djupt som rötter når. Avgivet djup är ett "lagom djup" för metoden.	Vissa gräs-relaterade växter (Zaccini, Pampa) har i fältstudier reat bort 65 – 95 % av DDT (+ derivat) under 3 månader. Har ingen tidigare erfarenhet av Salix.	Ja, enligt litteraturen. Ingen tidigare erfarenhet av denna typ av förorening.	Kan reducera andra föroreningar. Vissa föroreningar direkt skadliga för växten?	Läckage av DDT i marken ökar inte när växter sätts.	Kunden bestämmer. Tex följa Naturvårdsverkets riktvärden. Föredrar att mäta den biotillgängliga halten i marken (finns DDT i marken, men inget i växten). Provtagning följer ett rutiner. Generalprover tas ut (3 delprover från en meters radie) som representerar en måtpunkt.	Många år	Den yta som ska behandlas.	Området blir otillgängligt p g a vegetationen.	Bevattnig kan vara nödvändigt.	Jordbruksredskap. Ej tillämpligt.	Ej tillämpligt.	Skott och rotklumpar tas upp (med harv) för att få upp stor andel av växt under jord. Dessa går till förbehandling-deponi.	Efter flera år.	Ine ett linjärt förhållande mellan yta och kostnad. Vill inte komma med en generell kostnadsuppskattning. Har dålig uppfattning om DDT. Vill göra förestadie innan.	
RGS Nordic	Fytoremediering In situ	Växt	Plantera energiörda (Salix). Rötter tas upp under en 3-5 års skötselcykel. Mycket av föroreningarna har då bundits till rötterna.	RGS Nordic har inte tillämpat fytoremediering innan	Antal planter, förutsättningar med dikning, inbängad etc ? Dimensionering av energiörda samtligt som det ger ett extra skydd mot den förorenade jorden under. Mängd och halt av DDX, antal plant, bestämning av vilken energiörda som skall användas, näringsämnen gödningsmedel, bevattningsbehov, behov av inbängad, behov av fortligande kontrollprogram.	Så djupt som rötter når.	lügen nämndvärd reduktion på kort sikt men förhindrar exponering för människor och större djur, samt minskar spridning via grundvattnet.	"Två inte att det tas upp så mycket i stammen". Direktet sker en fytostabilisering kring växtens röttsystem.	Kan reducera både organiska och oorganiska föroreningar och medföra en minskning av dessa ämnen	Detta förhindras genom fytostabilisering	i jord och grundvattnet	Flera tiotals år	Hela ytan.	Fytosaneringen är den ekonomiska aktivitet som bedrivs på området och den som bedriver den verksamheten har full tillgång till området	Nej, området kommer ändå bli ogästvänligt för människor och större djur.	Tillgång till området med fordon	Jordbruksstrukturer med div redskap Nej	Efter att energiördan har eldats kvarstår ska att omhänderta vid värmeverket, men det ingår i dens ansvar tillstånd.	Fri tillgång till den som bedriver energiördaodlingen men inte för andra	Oklart. Metoden kan vara självfinansierande, beroende på hur avfall ska tas omhand.	
RGS Nordic	Reduktiv klorering On site	Bakterier tillsammans med tillsats, t ex Fe ²⁺	Behandlingscell placeras under grundvattnetsyta för att släppa bevattnig. Injicering av företrad jord i betongspjel. Kanste inte krävs betongbart i alla riktningar, men inf upprietas. Alternativt är att skapa en bäsning där behandlingscellen kan placeras.	RGS gjorde försök för Sveaskog för ca 10 år sedan och tog in jord till Norrköping och gjorde lite tester med reaktiv deklorering. Har även erfarenhet från pilotförsöket för SGU på Orust, Kåreholen 2017.	labörs med labbförsök. Har mycket av "olika ämnen" krävs för att öppna rätt halter. Cellerna behöver rymma den volym som skall behandlas under grundvattnetsytan så att reducerande miljön kan uppnås och bibehållas. Stökiometrisk och erfarenhetsbaserade beräkningar av mängd behandlingsprodukter som krävs för att skapa nedbrytning krävs. Mängd och halt av DDX, TOC, COD, godkemiska tilläggämnen (ex pH, redox mm), jordartsbestämning, grundvattenflöde samt erfordrad mängd saneringsprodukter.	Schaktarbet djup under grundvattnetsnivå	ERD/NSCR 75-90 % reduktion är ett troligt intervall, men vid behov kan högre uppnås till högre kostnad och längre tid.	Ja men litteraturen behöver studeras mer angående fullständig nedbrytning av nedbrytningsprodukter.	Kan reducera alla reaktivt nedbrytbara föroreningar men kräver en reducerande miljö. Höga halter av tungmetaller kan innebära att dessa mobiliseras vid lågt pH som kan uppkomma i behandlingscellerna och spridning av lösta tungmetaller utanför behandlingscellen behöver förhindras.	All schakt och hantering av företrad jord innebär risk för att sprida föroreningar (ex dammig) men så länge spridning inte sker med grundvattnet är risken mindre. Det område som den förorenade jorden schaktas upp från kan få nya hydrauliska förutsättningar så det är viktigt att verifiera att all jord tas med. Det finns även en risk för att mer lättlösliga och mobila nedbrytningsprodukter bildas temporärt.	i jord och grundvattnet	Ca 2-5 år	Så stor yta som krävs för schakbart djup under grundvattnetsnivå som krävs för att skapa en behandlingscell för all företrad jord.	Buller och dammig, placering sker lämpligen där markläggande installationer saknas	Obehöriga skall inte vistas på arbetsområdet	Tillgång till området med fordon samt vatten och el men det kan lösas med mobila enheter	Grävmaskin, bandschaktare hjalla Flytt av jord till stora lastbil/dumper behandlingsceller, täcka schakrade ytor med nya växtskikt blandningsutrustning	Nej	När behandlingscellen byggs färdigt, tillgång för att eta prover krävs dock.	Kostnad ca 200-500 kr/m ² . Behövs inga specialkemikalier eller dyra maskiner, jämförslan kan användas.	