

Afprøvning af ZVI Clay metoden, Område V, Skuldelev

Beskrivelse og dokumentation af installation

Muchitsch, Nanna; Walsted, Lisbeth; Fjordbøge, Annika Sidelmann; Christensen, Anders G.; Riis, Charlotte

Publication date:
2009

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Muchitsch, N., Walsted, L., Fjordbøge, A. S., Christensen, A. G., & Riis, C. (2009). Afprøvning af ZVI Clay metoden, Område V, Skuldelev: Beskrivelse og dokumentation af installation. Region Hovedstaden.

DTU Library Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Region Hovedstaden, Koncern Miljø

**Afprøvning af ZVI Clay metoden, Område V,
Skuldelev**

**BESKRIVELSE OG DOKUMENTATION AF
INSTALLATION**

April 2009

Region Hovedstaden, Koncern Miljø

Afprøvning af ZVI Clay metoden, Område V, Skuldelev

BESKRIVELSE OG DOKUMENTATION AF INSTALLATION

April 2009

1	Rapport	20.4.2009	MUC/LXW – NIRAS AFS – DTU Miljø	AGC	CER
Udgave	Betegnelse/Revision	Dato	Udført	Kontrol	Godkendt



NIRAS A/S
Tilsluttet F.R.I

Sortemosevej 2
DK-3450 Allerød

Telefon 4810 4200
Fax 4810 4300
E-mail niras@niras.dk

1.	BAGGRUND OG FORMÅL	1
1.1	Baggrund	1
1.2	Formål	3
2.	AFPRØVNING AF ZVI-CLAY METODEN	4
2.1	Forberedende arbejder	4
2.2	Fuld skala test af ZVI-Clay metoden.	5
2.2.1	Anlægsarbejdets gennemførelse	5
2.2.2	Sikkerhed og sundhed.....	10
2.2.3	Dokumentation af udførte anlægsarbejder m.v.	11
2.2.4	Afrigning og sikkerhed.....	11
3.	DOKUMENTATION	13
3.1	Geoteknik	13
3.2	Jordprøver.....	17
3.2.1	Prøvetagning og analyser.....	17
3.2.2	Resultater af baseline prøvetagningen	18
3.2.3	Resultater af første monitoringsrunde.....	22
3.2.4	Sammenligning af baseline og 1. monitoring	25
4.	KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING	28
5.	REFERENCER.....	30

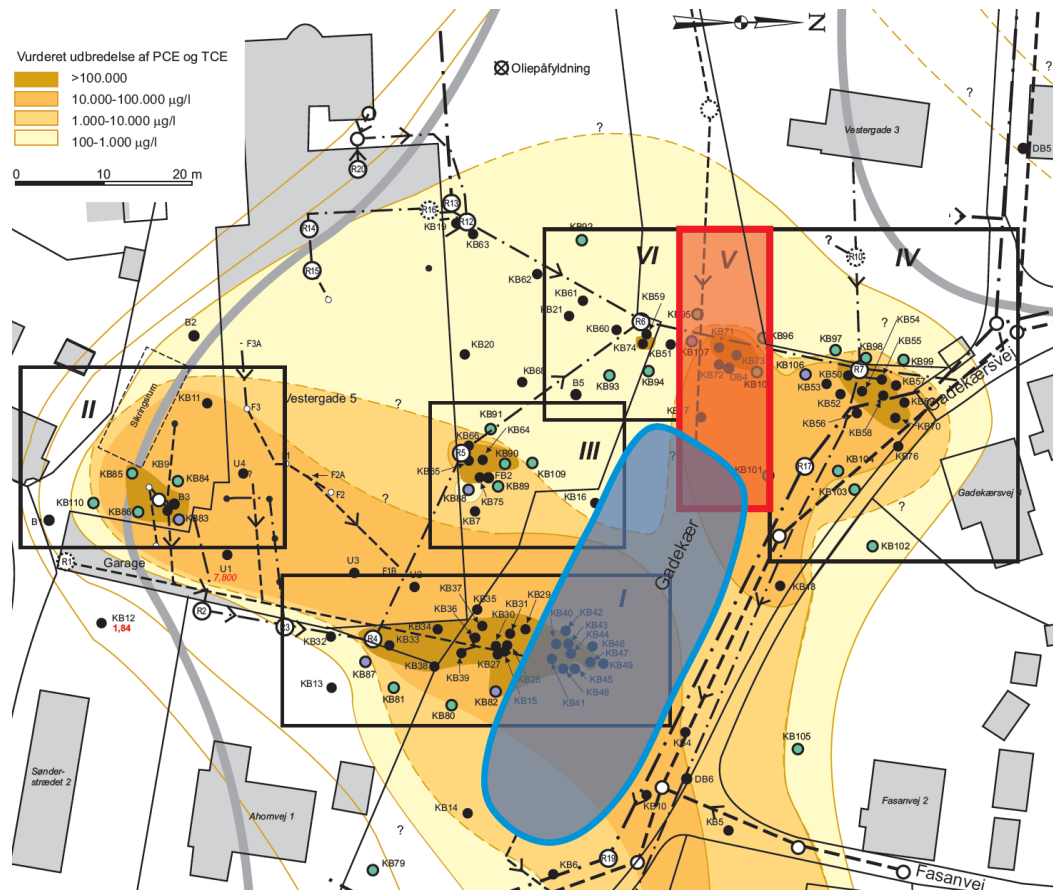
BILAGSOVERSIGT

Bilag 1	Datablad – ZVI og bentonit
Bilag 2	Boreplan – ”As build”
Bilag 3	Færdige boreddybder, ZVI-forbrug m.v – ”As build”
Bilag 4	Feltrapport – Geo- Solutions
Bilag 5	Vibrationsmålinger
Bilag 6	Vejeliste – RGS90, Kalundborg
Bilag 7	Tilsynsrapporter geoteknik

1. BAGGRUND OG FORMÅL

1.1 Baggrund

I forbindelse med undersøgelserne på lokaliteten Vestergade 5, matr. nr. 43b Skuldelev By, Skuldelev, Frederikssund Kommune, er der identificeret 5-6 ”hot-spot” områder med fri fase PCE i det sekundære grundvandsmagasin, jf. figur 1.1.



Figur 1.1 Identificerede ”Hot-spot” områder – på/ved kilden (Vestergade 5), Skuldelev.

I 2005-2006 blev der gennemført en screening af mulige afværgeteletter over for områder med fri fase. I forbindelse hermed er bl.a. en ny metode, kaldet

ZVI-Clay Metoden /1/, vurderet egnet til behandling af områder, hvor der er påvist fri fase PCE.

Metoden er baseret på in-situ opblanding af den intakte jord ved samtidig tilsætning af bentonit og reaktivt nul-valent jern (Fe^0). Herved opnås potentielt en meget stor massereduktion pga. jernets veldokumenterede evne til at nedbryde chlorerede ethener – og samtidig en næsten fuldstændig immobilisering af evt. restforurening pga. den meget lave permeabilitet, der opnås ved iblanding af bentonit.

Region Hovedstaden har valgt at afprøve ZVI-Clay metoden i fuldskala inden for ”Hot-spot V”, et ca. 25 m² stort område placeret umiddelbart nord-vest for Gadekæret. For nærmere beskrivelse af metoden henvises til /1/.

”Hot-spot V” karakteriseres ved følgende:

- stærkt forurenede med påvist fri fase DNAPL (jordkonc. > 1000 mg PCE og TCE pr. kg TS i 2-3 m u.t. henholdsvis vandkoncentrationer i bund af det sekundære magasin (6- 7,5 m u.t.) på max. 102.700 µg sum af chlorerede per liter.
- er let tilgængeligt med større entreprenørmaskiner
- blandet geologi, bestående af tørv, gytje, silt og moræneler-/sand.
- der er et relativt udbredt sandlag direkte oven på moræneleren, hvorfor større ændringer i de hydrauliske forhold, som konsekvens af tilsætning af bentonit, bør kunne påvises
- er muligt at etablere et monitoringstracé direkte nedstrøms dette ”Hot-spot” område

Fuldskala forsøget er gennemført i nært samarbejde mellem Region Hovedstaden, koncern Miljø og NIRAS A/S. Projektledelsen er varetaget af NIRAS A/S med DTU Miljø som underrådgiver. Herudover har Colorado State University (CSU) i USA været tilknyttet som underrådgiver til DTU i forbindelse med de udførte treatability-forsøg.

Endvidere er detailprojektering samt tilsyn gennemført i tæt samarbejde mellem NIRAS og Geo-Solutions, Pittsburg (USA). Den amerikanske underrådgiver var tilknyttet projektet for bedst muligt at sikre teknologioverførsel af metoden til danske forhold. Selve anlægsarbejdet er udført af Arkil Miljøteknik.

Detailprojekteringen er gennemført i perioden august- oktober 2008, mens selve anlægsfasen, inklusive forberedende arbejder samt retablering er afviklet i perioden medio november til ultimo december 2008.

1.2 **Formål**

Det overordnede formål med projektet er at afprøve ZVI-Clay Metoden i fuld skala i felten i et område med fri fase PCE.

Følgende delformål er opstillet for projektet:

1. Opsamling af praktiske erfaringer til brug for senere projekter
2. Dokumentation af oprensningsgraden ved jern-korrosion inde i oprensningsområdet samt vurdering af tidshorisont for nedbrydning af forureningen
3. Dokumentation af effekten på de hydrauliske forhold omkring oprensningsområdet samt på udvaskningen fra oprensningsområdet som følge af opblandingen med bentonit
4. Belysning af ændringen i jordens geotekniske egenskaber inden for oprensningsområdet som følge af opblandingen med bentonit
5. Økonomisk vurdering af metoden

I nærværende afrapportering er fokus rettet mod de hidtidige resultater opnået i relation til delformål 1, 2 og 4. Resultater vedr. delformål 3 afrapporteres særskilt. Dokumentationen, jf. pkt. 2-4, er planlagt til at forløbe over en 12 måneders periode, hvorefter der udarbejdes en endelig rapport, som belyser den opnåede effekt, en økonomisk vurdering af metoden samt perspektivering for dennes fremtidige anvendelse under danske forhold.

2. **AFPRØVNING AF ZVI-CLAY METODEN**

I nærværende kapitel beskrives overordnet den anlægstekniske gennemførelse af oprensning ved den aktuelle metode på "Hot-spot V".

For uddybende beskrivelse henvises til det af NIRAS udarbejdede udbudsgrundlag (SB/SAB m.v.), /ref. 1/.

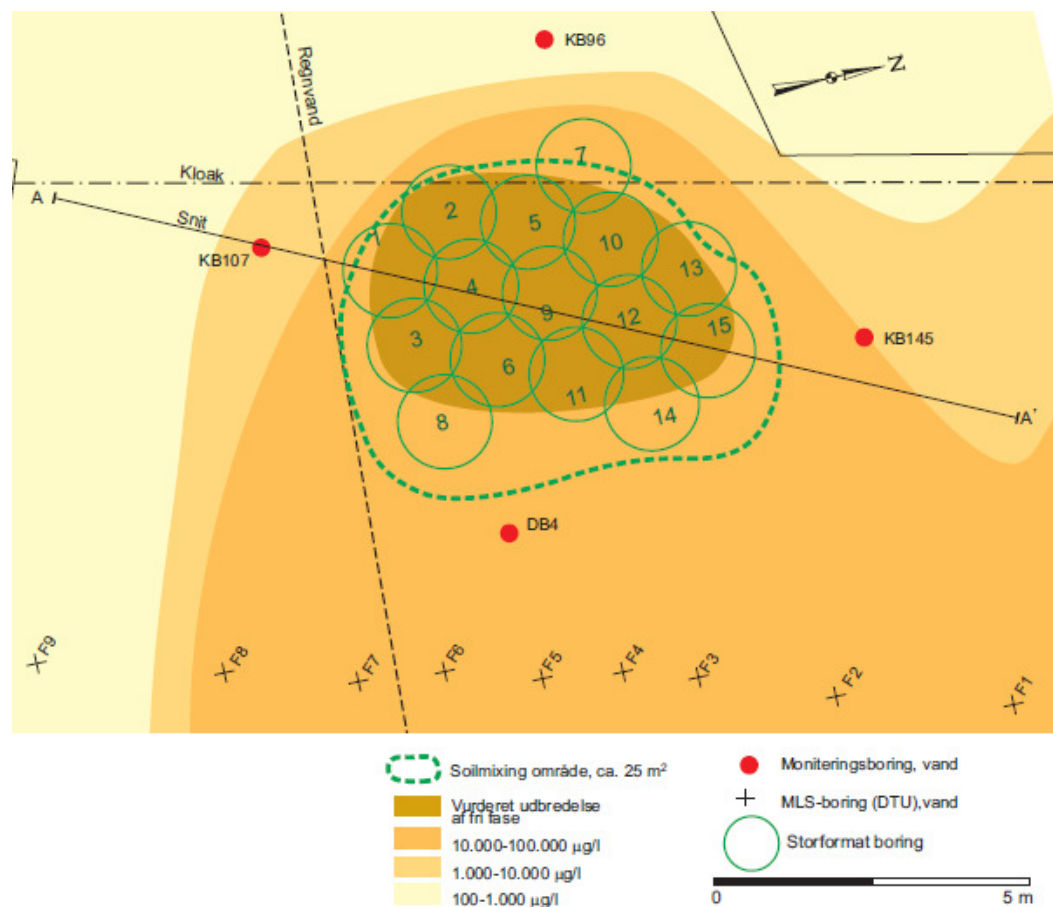
2.1 **Forberedende arbejder**

Forud for metodens afprøvning blev der gennemført følgende indledende arbejder m.v:

- Afholdelse af vejsyn samt inspektion af eksisterende kloakker o.a. ledningsanlæg placeret på/ved "Hot-spot V". Udført af Arkil, NIRAS samt Frederikssund Kommune. Kopi af disse tilsyn ligger i arkiv hos NIRAS.
- Førregistrering på de 3 adresser, der er beliggende tættest mod oprensningsområdet, dvs. adresserne Gadekærvej 1 og 3 samt Vestergade 3. Udført ved Arkil, NIRAS og med deltagelse af de berørte lodsejere.
- Rydning af offentlige arealer ved oprensningsområdet samt nødvendige tilstødende arealer (have tilhørende Vestergade 3). Udført af Arkil.
- Komplet sløjfning af undersøgelsesboringerne KB71, KB72, KB73 samt KB100, beliggende indenfor selve oprensningsområdet. Udført ved Arkil Miljøteknik
- Tilrigning af midlertidig vandforsyning fra den offentlige brandstønder placeret ca. 300 m fra oprensningsområdet (ved Brugsen) og frem til soil-mixing området.
- On-line vibrationsmåling på de 3 nærmest placerede bebyggelser, dvs. Gadekærvej 1 og 3 samt Vestergade 3. Udført af Arkils underentreprenør.
- Tilrigning af maskinel, køreplader mv., samt afspærring af arbejdsarealer med byggepladshegn. Udført af Arkil. Den af Krüger A/S allerede etab-

lerede skurby, placeret umiddelbart vest for Gadekæret, blev anvendt i hele anlægsfasen.

- Afrømning af ca. 1 m topjord, inklusive oplag i mellemdepot (tæt container med presenning).
- Afsætning af de 15 storformatboringer forud for soil-mixingens opstart. For at sikre bedst mulig behandling i oprensningsområdet, blev boringerne udført med et overlap på ca. 10 %, jf. figur 2.1. Detailboreplan – ”som udført” er udarbejdet ved Arkil og vedlagt i bilag 2.



Figur 2.1 ”Hot-spot V”, inklusive placering af de i alt 15 storformatboringer m.v.

2.2 Fuld skala test af ZVI-Clay metoden.

2.2.1 Anlægsarbejdets gennemførelse

Selve anlægsfasen, incl. tilrigning af special soil-mixing enhed m.v., blev komplet gennemført i uge 50, 2008. I forbindelse hermed blev der ført fuldtidstilsyn af NIRAS samt Geo-Solutions (Bob Schindler).

Metoden udføres ved at det forurenede sediment opblandes med en slurry bestående af et reaktivt materiale (3% ZVI-jernpulver) og et stabiliserende materiale (1 % bentonit). Datablade for anvendte ZVI og bentonit er vedlagt i bilag 1.

På anbefaling fra Geo-Solutions blev både ZVI og bentonit doseret i mængder, svarende til ca. 110 % af det ved DTU oprindeligt fastsatte design-mix /ref. 2/, for herved at kompensere for det ”spild” af design-mix der opstår, som led i produktion af overskydende boremudder.

Selve opblandingen af den forurenede jordmatrice blev gennemført ved anvendelse af en soil mixing-enhed, udviklet og patenteret ved Geo-Solutions, jf. figur 2.2



Figur 2.2 Soil-mixing udstyr (Diameter = 1,5 m) – importeret fra USA.

Mixing-enheden blev opkoblet til boreriggens hulsnegl m.v. som vist i figur 2.3.



Figur 2.3 Anstilling af borerig med tilhørende hulsnegl, doseringslange for bentonitslurry m.v.

Opblanding af bentonit-slurry (bentonit og vand) blev gennemført i en separat blandeenhed med et effektivt volumen på 9 m^3 , jf. figur 2.4.

Viskositet, densitet samt pH i den opblandede slurry blev kontrolleret umiddelbart før denne blev overpumpet via boreriggens hulsnegl og herfra videre mod soil-mixing enhedens dyser for sluttelig dosering til den forurenede jordmatrice.



Figur 2.4 Opblanding af bentonit- slurry

I forbindelse med denne opblanding blev bentonit-slurryens viskositet, densitet samt pH løbende kontrolleret. Den ”egnede” slurry kunne herefter overpumpes via boreriggens hulsnegl og herfra videre mod soil-mixing enhedens dyser for sluttelig dosering til den forurenede jordmatrice.

Afviklingen af selve soil-mixingen blev gennemført i følgende 2 trin:

Trin 1: Soil-mixing enheden blev op-/nedroteret til fuld oprensingsdybde 2-4 gange, ved samtidig iblanding af bentonit slurry ved en ydelse på 10- 15 m³/t.

Trin 2: Da den behandlede jordmatrice blev skønnet tilstrækkeligt ”opblødt” blev jernpulveret (ZVI) efterfølgende doseret direkte til terræn. Doseringen blev gennemført i 2 tempi, og imellem hver deldosering blev der igen udført 2-4 op-/nedroteringer af mixer-enheden til fuld behandlingsdybde.

Udvalgte fotos relateret til gennemførelse af trin 1 og 2 er vist i figur 2.5 og 2.6.

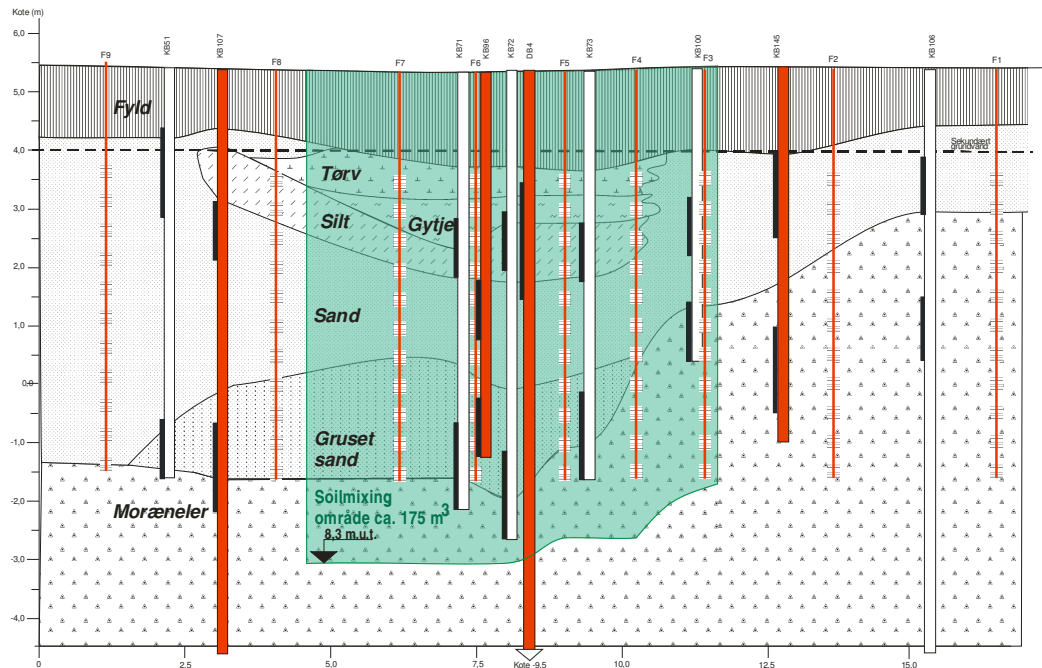


Figur 2.5 Trin 1 - Soil-mixing ved samtidig dosering af bentonitslurry.



Figur 2.6 Trin 2 - Soil-mixing ved samtidig dosering af ZVI-jernpulver

Soil-mixingen blev udført til minimum 0,5 m nede i intakt morænelersformation, jf. figur 2.7. Oprensningsområdets udbredelse er på denne figur ”highlighted” med grønlig farve, mens de 3 forskellige typer af monitoringsboringer er angivet med tyk rød (4 boringer placeret rundt om oprensningsområdet), tynd rød (9 af i alt 11 stk. niveauspecifikke boringer) henholdsvis sort streg (6 stk. boringer, hvoraf de 4 boringer placeret inden for selve oprensningsområdet blev sløjfet forud for oprensningens opstart).



Figur 2.7 Profilsnit gennem oprensningsområdet – ”Hot-spot V”

2.2.2 Sikkerhed og sundhed

I forbindelse med anlægsarbejdets gennemførelse blev der båret ”turbofiltre/friskluftsfiltre”, ligesom selve soil-mixing området blev afspærret med byggepladshegn.

Endvidere blev der udlagt køreplader helt op mod mixing området, for herved at sikre bedst mulig trykfordeling for anstillede maskiner, og herved minimere risiko for ukontrolleret ud-/sammenskrivning langs den intakte jordmatrice stødende op til mixing området.

Forud for arbejdets opstart blev der af Arkil udarbejdet en plan for sikkerhed og sundhed, ligesom anlægsarbejdet blev anmeldt til Arbejdstilsynet.

På trods af at der blev mixet i en jordmatrice med dokumenteret forekomst af fri fase DNAPL, var lugtgener samt afdampning mod terræn meget begrænsede. Dette forhold vurderes væsentligst at skulle tilskrives den ”hæmmede” afdamp-

ningsmulighed, grundet kontinuerlig dosering af bentonitslurry til den forurenede jordmatrice. Endvidere var vejrforholdene gunstige (frostklart vejr).

2.2.3 *Dokumentation af udførte anlægsarbejder m.v.*

Detailoplysninger vedrørende færdige boreddybder for hver af de i alt 15 udførte storformatboringer er udarbejdet ved Arkil, jf. bilag 3. Af dette bilag fremgår, at den færdige soil-mixing-/behandlingsdybde har ligget på mellem 6,5 -8,3 m u.t.

I alt vurderes der behandlet et forurenat jordvolumen på ca. 175 m³. Til dette volumen er der doseret ca. 59 kg 3% ZVI/m³ (designmix: 54 kg + ekstra 10%) henholdsvis ca. 20 kg 1% bentonit/m³ (designmix: 18 kg + ekstra 10 %). I alt er der forbrugt 9.057 kg ZVI henholdsvis ca. 3.000 kg bentonit, jf. bilag 3, faneblad 3).

I bilag 4 forefindes den af Geo-Solutions udarbejdede feltjournal (ISS Closeout Report). I journalens bilag 1 (Attachment 1) præsenteres en tabel med teoretiske bentonit-og ZVI-forbrug pr. storformatboring (Column) m.v. Målte viskositet, densitet og pH pr. færdigblandet bentonitslurry (Fresh Slurry) m.v. fremgår af journalens bilag 2 (Attachment 2).

I forbindelse med arbejdet blev der produceret i alt 111,36 ton forurenat overskudsjord/-mudder, jf. vejeliste vedlagt i bilag 6. Den afrømmede topjord henholdsvis overskydende boremudder/opblødt jord udgjorde hver ca. 55 ton. De overskydende materialer blev bortskaffet som et jordparti til RGS90's anlæg i Kalundborg. Den opblødte jord/boremudder blev opsuget direkte fra mixing området og til en ventende slamsuger.

Resultatet af de af Arkil udførte vibrationsmålinger i perioden 8.-12. december 2008 er præsenteret i bilag 5. Heraf fremgår, at der på *intet* tidspunkt er registreret fluktuerende/intermitterende vibrationer over den frekvensafhængige grænseværdi på $v_i \leq 3$ mm/s. Den højeste værdi, målt til 1,4 mm/s, blev registreret ved beboelsen på Gadekærvej 3, som er beliggende ca. 25 m fra soil-mixing området.

2.2.4 *Afrigning og sikkerhed*

I uge 51 2008, blev de berørte arealer midlertidigt retableret.

På selve soil-mixingområdet, inklusive ca. 1 meter inde på de tilstødende intakte arealer blev der udlagt HI-profiljern med en vandret indbyrdes afstand på ca. 1 m. Direkte ovenpå disse blev der efterfølgende udlagt et trådarmeringsnet, før området blev slutfærdiggjort med presenning. Rundt om hele arealet er der fortsat opsat byggepladshegn, inklusive skiltning med påskriften "adgang forbudt for uvedkommende på byggepladsen".

Denne relativt omfattende afdækning er udført, idet der som led i den løbende dokumentation af ZVI-Clay metodens effekt skal gennemføres en række forsøg, målinger etc., som betinger adgang til arealet for håndmand samt om muligt mindre maskinel. Endvidere skal afdækningen også hindre uvedkommende i at få adgang til et område, som umiddelbart efter soil-mixingens afslutning havde karakter af ”kviksand”. Ultimo marts 2008 fremstår afdækningen som vist på figur 2.8.



Figur 2.8 Afdækning af soil-mixing området før(tv.) henholdsvis efter(th.) udlægning af presenning.

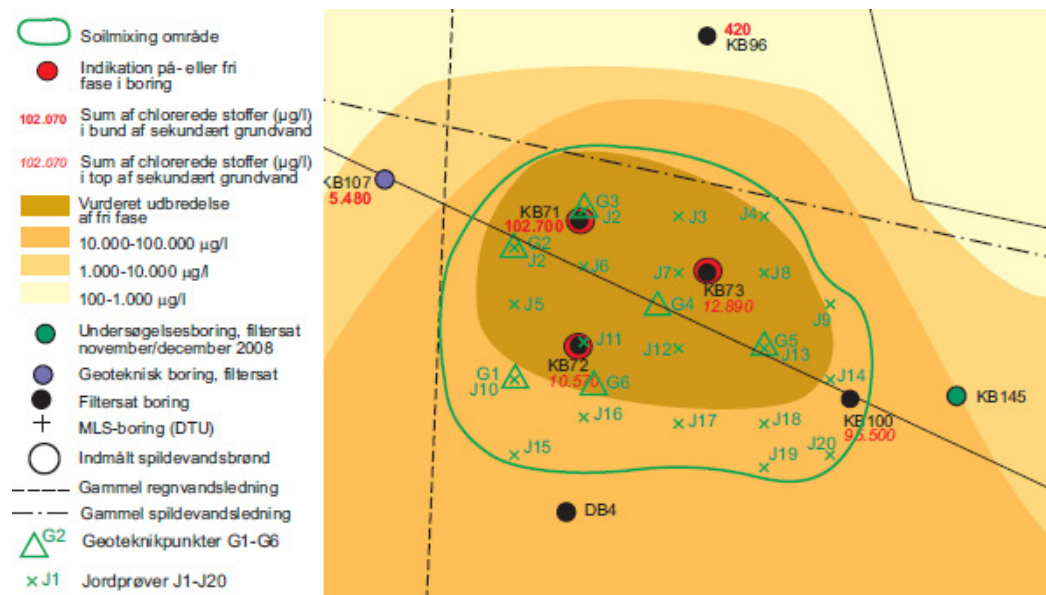
Slutretablering, incl. udplantning af træer på Vestergade 3, tilbagefyldning af oprensingsområdet til terræn, græssåning, genetablering af flisebelægning m.v. på berørte offentlige areal forventes udført ultimo 2009/primo 2010.

Endvidere må der, under særskilt entreprise, forventes gennemført et mere gennemgribende kloakprojekt for sløjfning og/eller omlægning af udvalgte kloakledninger med tilhørende brønde etc.

3. DOKUMENTATION

Til dokumentation af opblandingen og koncentrationen af chlorerede opløsningsmidler i området, hvor der er udført soil-mixing med ZVI clay, er der udtaget og analyseret sedimentprøver fra området. Der er på nuværende tidspunkt udtaget sedimentprøver umiddelbart efter soil-mixingen (baseline) og ca. 9 uger efter soil-mixingen (1. monitoringsrunde). Der er desuden udført geotekniske undersøgelser i området for at dokumentere styrken af jordmassen umiddelbart efter soil-mixingen samt efter ca. 10 uger.

Af figur 3.1 fremgår placeringen af de punkter inden for soil-mixingområdet, hvor der er udført geoteknik og udtaget jordprøver.



Figur 3.1: Soil-mixingområdet med placering af punkter for geotekniske undersøgelser og jordprøver.

3.1 Geoteknik

Der er i soil-mixingområdet udført geotekniske undersøgelser i december 2008 en uge efter soil-mixingen og i februar 2009 ca. 10 uger efter soil-mixingen. De geotekniske forsøg er udført manuelt, da det grundet skredfare ikke var forsvarligt at lade en borerig holde på kanten af området. Forsøgene er derfor udført

ved at føre en lang stålstang med en vinge for enden ned gennem jordmassen for at vurdere modstanden i jorden. Hvor der er truffet modstand er der udført vingeforsøg. I bilag 7 findes tilsynsrapporter for de geotekniske undersøgelser med en mere detaljeret beskrivelse af resultaterne.

Under de første geotekniske forsøg umiddelbart efter oprensningen er der udført geotekniske forsøg i 6 punkter (G1-G6), placeringen af disse fremgår af figur 3.1. Jordmassen er i de øverste 4-5 m meget blød og har konsistens som kviksand. Stangen synker selv ned eller kan presses ned med håndkraft. Fra 4-5 m er der truffet modstand i forskellige grad. Der er en generel tendens til stigende vingestyrker over dybden. De intakte vingestyrker svarer til blød moræneler, men der ses lave omrørte vingestyrker. De geotekniske forsøg er udført til ca. 6-6,5 m u.t., hvor den intakte moræneler under oprensningsområdet ikke er nået.

I punkt G1 og G2 i den sydligste del af oprensningsområdet blev der under den første geoteknikrunde ikke mødt nævneværdig modstand i de øverste 6-6,5 m, hvorfor der ikke er udført vingeforsøg.

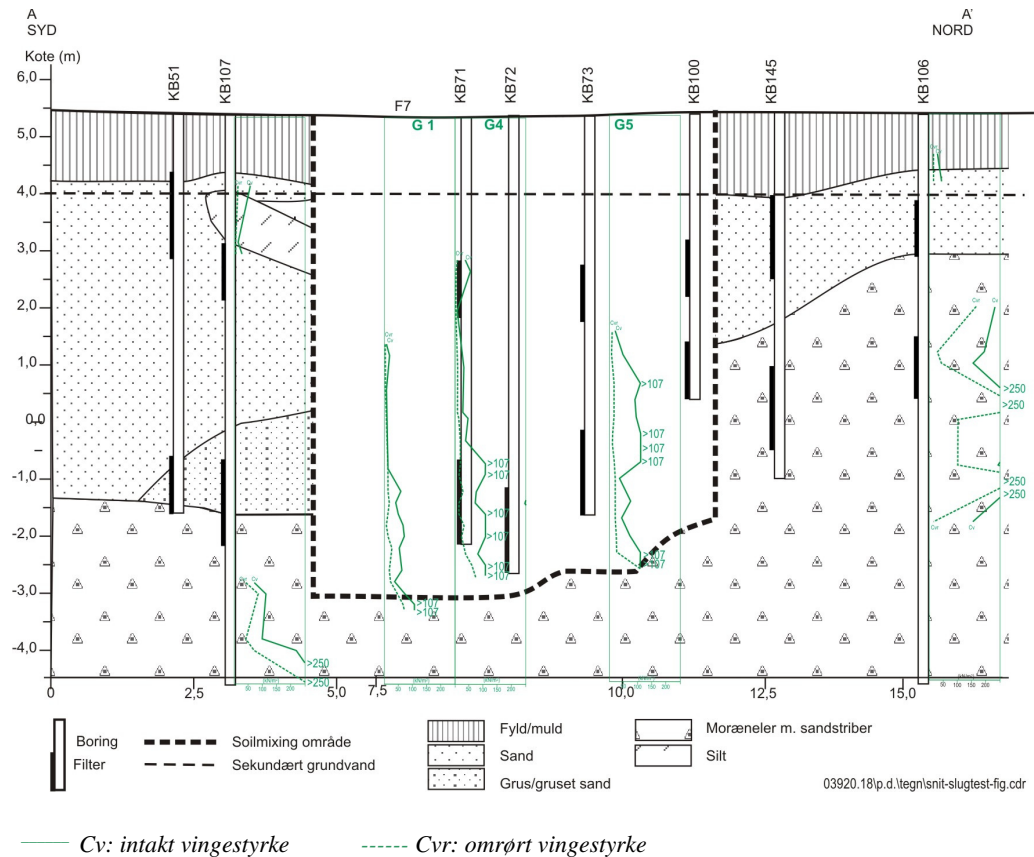
I punkt G3, G4 og G6 længere mod nord er der generelt ikke mødt modstand før omkring 5 m u.t. Vingeforsøgene viser generelt en intakt vingestyrke på mindre end 50 kN/m².

I punkt G5 beliggende længst mod nord i oprensningsområdet er der mødt modstand omkring 4 m u.t. Vingeforsøg fra 4-5 m u.t. viser vingestyrker beliggende i intervallet 50-100 kN/m², hvilket svarer til en blød moræneler. I dybden 5,2 m u.t. var det ikke muligt at banke stangen yderligere ned, hvorfor der ikke er udført forsøg under denne dybde.

Ved de geotekniske undersøgelser udført ca. 10 uger efter soil-mixingen er der udført forsøg i 4 punkter indenfor oprensningsområdet. Punkterne svarer til punkt G1, G3, G4 og G5 fra første forsøgrunde og placeringen fremgår af figur 3.1. Forsøgene er udført til 8-9 m u.t. til den intakte moræneler under oprensningsområdet med sikkerhed er nået.

Jordmassen har i de øverste 3-4 m konsistens som kviksand og der er ingen modstand. Fra 3-4 m u.t. er der truffet modstand, dog er de målte vingestyrker minimale <30 kN/m² svarende til marint dynd. I området fra 5-7 m u.t. stiger de intakte vingestyrker generelt og ligger i intervallet 50-100 kN/m² svarende til blød moræneler. De omrørte vingestyrker er her relativt lave. Det vurderes, at jordmassen fra 5-7 m u.t. er hærdet lidt mere op sammenlignet med forholdene en uge efter soil-mixingen.

I dybden fra 7-9 m u.t. øges de omrørte vingestykker væsentligt, hvilket stemmer overens med, at den intakte moræneler findes i dette niveau.

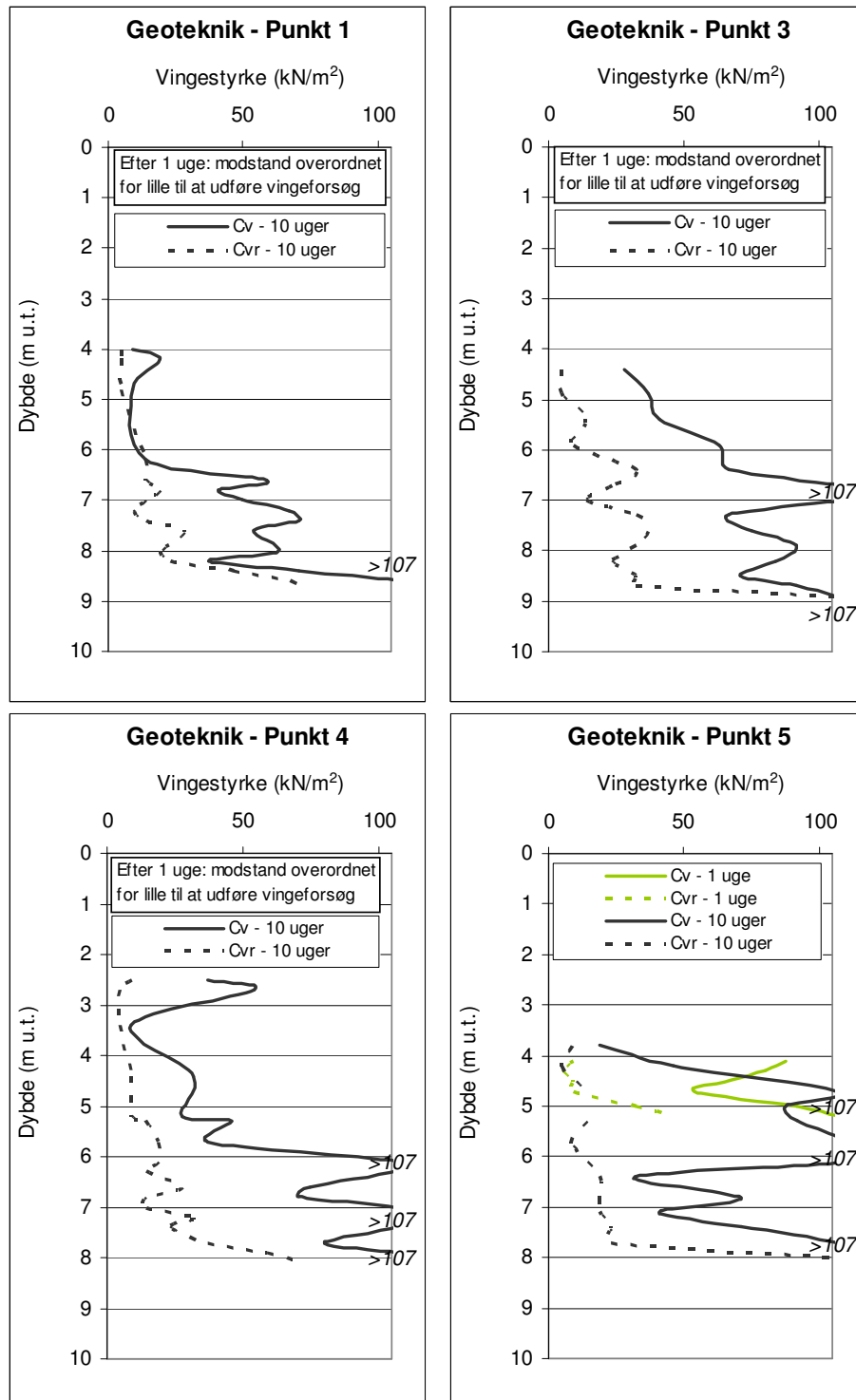


Figur 3.2: Geologisk profil med illustration af vingestykker over dybden. De viste vingestykker i soil-mixingområdet er fra feb. 2009. Vingestykker uden for området (KB106-107) er fra tidligere undersøgelser (aug. 2008).

I figur 3.2 er vingestykkerne fra de geotekniske undersøgelser udført i februar 2009 plottet over dybden for punkterne G1, G4 og G5. Da der som nævnt ikke blev truffet modstand i de øverste 3-4 m, er der ingen vingestykker i dette område. I figuren fremgår desuden vingestykker fundet ved tidligere udførte geotekniske undersøgelser i KB106 og KB107. De geotekniske undersøgelser fra februar viser en tendens til, at vingestykken stiger over dybden samt fra syd mod nord.

Sammenholdes resultaterne af de geotekniske undersøgelser fra hhv. 1 og 10 uger efter soil-mixingen, ses at vingestykken generelt er steget. Umiddelbart efter soilmixingen var det stort set ikke muligt at udføre vingeforsøg i punkterne G1, G3 og G4, mens det 10 uger efter soil-mixingen generelt har været muligt at udføre vingeforsøg fra 2-3 m u.t. og til den intakte moræneler er truffet.

I figur 3.3 er vingestykkerne i punkt 1, 3, 4 og 5 illustreret over dybden.



Figur 3.3: Illustration af vingestykker i soil-mixingområdet over dybden.

Når de geotekniske undersøgelser udført 1 og 10 uger efter soil-mixingen sammenholdes, tyder resultaterne overordnet på, at området er ved at hærde. I den sydligste del af oprensningsområdet var det efter én uge ikke muligt at udføre vingeforsøg, hvorimod der efter 10 uger træffes modstand.

3.2 **Jordprøver**

3.2.1 *Prøvetagning og analyser*

Jordprøverne til baseline bestemmelser er udtaget i uge 51 og 52 i 2008, mens første monitoringsrunde er udført i uge 7 og 8 i 2009. Prøverne er til dels udtaget med et håndholdt GeoProbe-system (AT-660 Series Large Bore Soil Sampler), samt et større maskinellet/mekanisk GeoProbe-system.

I uge 51 blev der udtaget 20 sedimentprøver, jf. figur 3.1 i et horisontalt plan 2-2,5 m u.t. med det håndholdte GeoProbe-system, mens der i uge 7 blev udtaget 17 prøver i 2-2,5 m u.t. og 11 prøver i 4,5-5 m u.t.

I uge 52 blev der udtaget sedimentprøver som kerner fra bunden (7-8 m u.t.) af det ZVI-Clay opblandede område vha. skrånstillede borer med GeoProbe-systemet. Det høje vandindhold og den lave jordstyrke besværliggjorde processen, hvorved kun 3 sedimentprøver blev udtaget. I uge 8 blev der udtaget 10 prøver i 7-8 m u.t. vha. samme metode.

Delprøver fra hver sedimentprøve blev indsamlet umiddelbart efter udtagningen. Til analyse af chlorerede opløsningsmidler blev der indsamlet delprøver i to forskellige sæt prøve vials, mens en delprøve blev indsamlet i pose til de andre analyser.

Alle analyser af jordprøver er udført på DTU og er ikke akkrediterede analyser.

Det første sæt delprøver blev tilsat redcap flasker sammen med 20 mL vand og 10 mL pentan. Der blev tilsat ca. 15 g sediment, og prøverne blev sat på rystebord i 5 timer efter hjemkomst til laboratoriet. Ved denne proces overføres de chlorerede forbindelser til den organiske fase, hvorefter pentan ekstraktet kan udtages og opbevares på køl ved 4 °C uden yderligere kontakt med det reaktive jern. Disse prøver er analyseret for PCE og TCE via GC (Gas Chromatography) med en ECD (Electron Capture Detector). GC kolonnen er 30 m lang med en indre diameter på 0,53 mm og 3 µm DF. Trichlorobrommethan blev brugt som intern standard.

Ved det andet sæt delprøver blev omkring 0,2 g sediment tilsat GCMS Headspace prøve vials med 1,5 mL af en vandig opløsning indeholdende en intern standard (chloroform). Pga. den meget lille mængde er prøverne ikke nær så repræsentative som sedimentprøverne der ekstraheres, til gengæld kan analysen på

GCMS giver et indblik i tilstedeværelsen af mindre chlorerede nedbrydningsprodukter såsom cis-DCE og VC, samt desuden ethan og ethan, hvilket ikke ses ved brug af ECD'en.

Ved hjemkomst til laboratoriet blev en delprøve udtaget til analyse af vandindhold. Den tørrede prøve blev efterfølgende homogeniseret og anvendt til bestemmelse af total jern, og for baseline prøverne ligeledes for total organisk kulstof (TOC).

Total jern blev bestemt ved at analysere syreoplukkede sedimentprøver på en Perkin Elmer AAS. Prøverne blev syreoplukket i 7 M HNO₃ under autoklavering ved 125 °C og 1.5 bar i en halv time. Udover prøverne fra felten blev der analyseret på to reference jorde, det tilsatte CMS jern, og en ren sandjord tilsat 1 % bentonit og 3 % jern. Indholdet af total jern i jorden på lokaliteten før opblanding med jern vurderes på baggrund af indholdet i leret under det behandlede område.

TOC er bestemt på en Leco Analyzer (Leco Cs-225), hvor prøven brændes af ved 800 °C i en induktionsovn og forbrændingsgassens indhold af CO₂ detekteres ved hjælp af en IR-detektor, hvorved prøvens indhold af total carbon bestemmes.

3.2.2 *Resultater af baseline prøvetagningen*

I tabel 3.1 ses resultaterne af analyserne af baseline prøvetagningen i et horisontalt plan i 2-2,5 m u.t., mens tabel 3.2 viser baseline resultaterne for de enkelte dybere prøver taget i 7-8 m u.t.

Tabel 3.1: Vandindhold, chlorerede opløsningsmidler, TOC, total jern og pH 2-2,5 m u.t. ved baseline prøvetagningen i december 2008.

	Vandindhold [% (w/w)]	PCE [mg/kg TS]	TCE [mg/kg TS]	TOC [%C]	Fe [g/kg TS]	pH -
1	38.6	111	18	3.2	34	8.21
2	56.0	72	9.3	3.4	44	8.47
3	27.4	106	53	2.3	12	7.60
4	32.2	106	2.6	1.0	54	8.52
5	32.3	79	3.3	1.9	66	8.35
6	56.4	1820	193	7.4	25	7.65
7	30.5	93	21	2.3	25	7.72
8	23.9	110	1.1	1.2	54	8.59
9	20.5	52	0.4	0.9	54	8.72
10	28.6	71	3.8	1.5	49	8.58
11	32.5	52	6.4	1.8	30	7.79
12	30.4	93	1.2	1.6	55	8.25
13	22.7	55	0.6	0.7	54	8.65
15	41.9	-	-	3.1	50	9.00
16	24.3	47	2.2	1.1	66	8.97
17	23.2	64	0.9	1.1	77	8.84
18	23.8	23	0.4	0.9	60	8.77
19	30.1	79	1.0	1.0	58	8.50
20	26.4	56	1.4	1.1	49	8.43

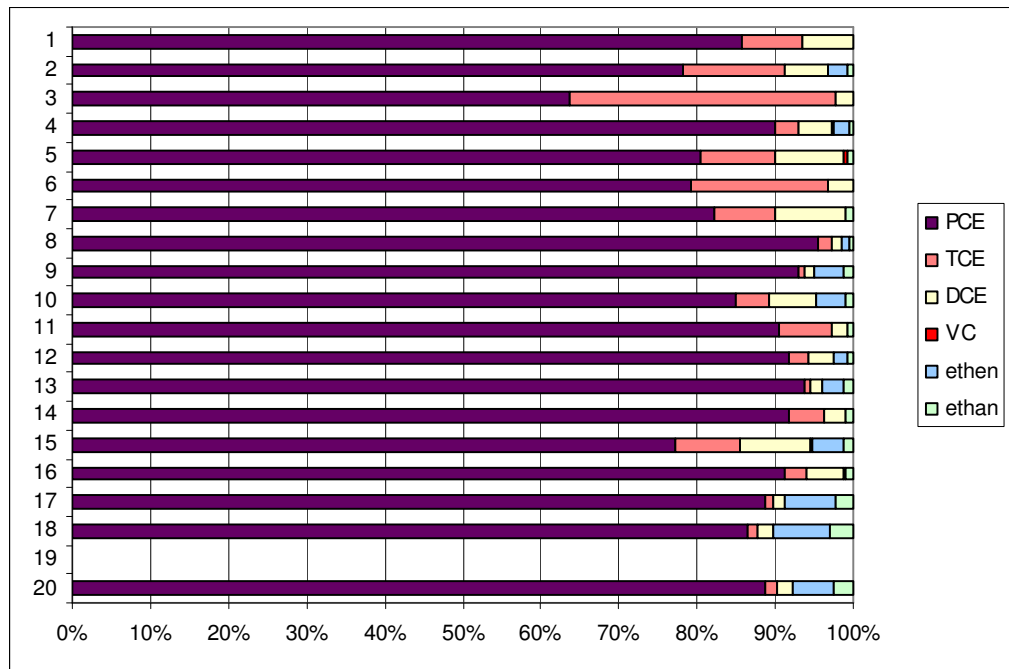
Tabel 3.2: Vandindhold, chlorerede opløsningsmidler, TOC, total jern og pH i 7-8 m u.t. ved baseline prøvetagningen i december 2008.

	Vandindhold [% (w/w)]	PCE [mg/kg TS]	TCE [mg/kg TS]	Fe [g/kg TS]	pH
10	26.4	4.4	-	19	-
11	20.1	30	3.1	54	7.85
18	43.7	393	-	3	-
Lerbund 18 (lav/nord)	11.5	3.0	-	7	-
Lerbund 11 (dyb/syd)	15.4	9.3	-	6	-

Af tabel 3.1 ses det, at vandindholdet er relativt højt med værdier mellem 21 % og 56 % og et gennemsnitligt vandindhold på 32 %.

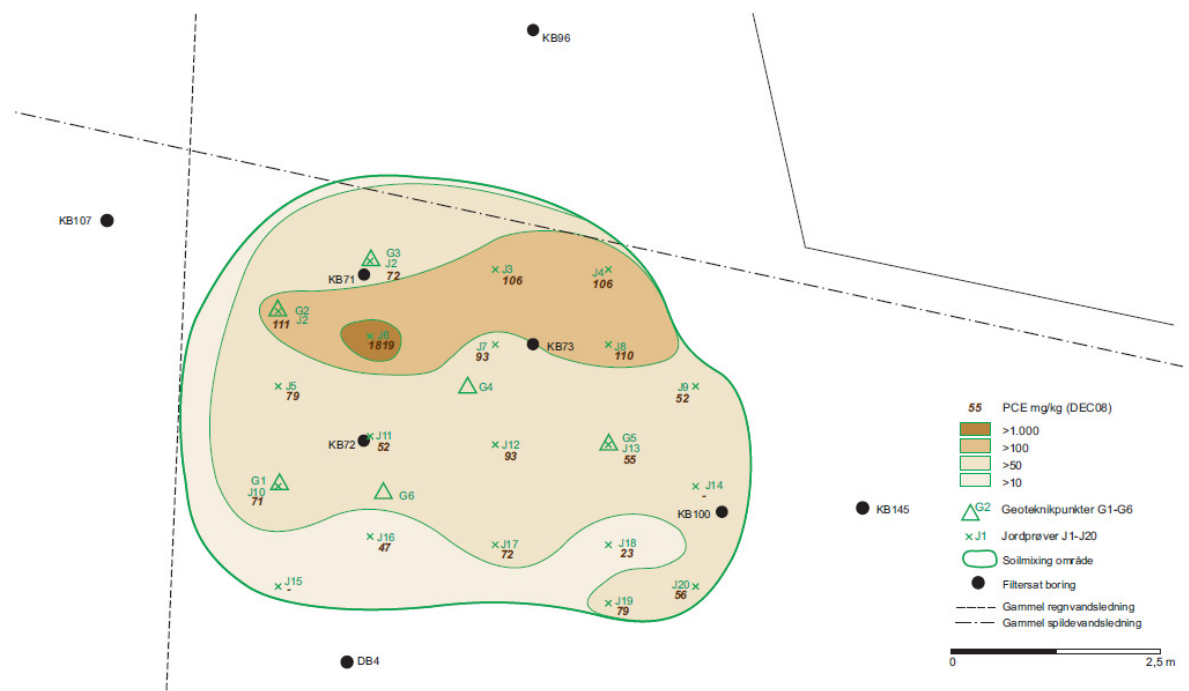
Indholdet af chlorerede opløsningsmidler er meget højt i punkt 6 tæt på det tidligere KB71 hotspot, jf. figur 3.1. I dette punkt er indholdet 1.820 mg/kg PCE og 193 mg/kg TCE. For resten af området er der fundet koncentrationer på 23-111 mg/kg for PCE og 0,4-53 mg/kg for TCE. Til sammenligning blev der før soil-mixingen fundet 11-12.000 mg PCE/ kg i KB71. GCMS-analyserne på headspace bekræftede denne fordeling med PCE som den klart dominerende forbindelse. Analyserne viste desuden et indhold af cis-DCE i samme størrelsesorden som

TCE indholdet, mens der ikke blev fundet betydelige mængder af andre nedbrydningsprodukter. Figur 3.4 viser fordelingen af chlorerede forbindelser målt på GCMS udtryk i molfraktioner.



Figur 3.4: Fordelingen af PCE, TCE, DCE, VC, ethan og ethan 2-2,5 m u.t. ved baseline målingen beregnet som molfraktioner på baggrund af GCMS analyse resultater.

På figur 3.5 er koncentrationerne af PCE i jordprøverne fra 2,0-2,5 m u.t. ved baseline prøvetagningen illustreret.



Figur 3.5: PCE koncentration i sedimentprøver udtaget 2,0-2,5 m u.t. ved baseline prøvetagningen.

Indholdet af de chlorerede opløsningsmidler ses som forventet at have en vis sammenhæng med indholdet af TOC. Således findes også det klart højeste indhold af chlorerede stoffer i punkt 6, hvor der er 7,4 % C. I resten af området er indholdet af TOC 0,7-3,4 % C. Indholdet af TOC er generelt relativt højt, hvilket må formodes at skyldes opblandingen af det tørvelag der befandt sig i 1,5-3 m u.t. før opblandingen.

De laveste koncentrationer af chlorerede opløsningsmidler findes sammen med et TOC indhold omkring 1 % C. De findes desuden i den østlige del af det opblandede område, som også før var den mindre forurenede del af området. Dette er som forventet ud fra, at der ikke sker en opblanding i den horisontale retning under soil-mixingen.

Mht. indholdet af det tilsatte jern der blev et masseindhold på 3,3 % eller 33 g/kg tilstræbt under opblandingen. Det ses af tabel 3.1, at jernindholdet ligger på 12-77 g/kg med et gennemsnit på 48 g/kg. Analyse af lerlaget under det opblandede område viser et total jernindhold på omkring 6-7 g/kg. Koncentrationer over 36-37 g/kg må altså vurderes at have opfyldt opblandingskriteriet. Dette er tilfældet for langt de fleste af punkterne. Udover jernanalyserne er pH målt for sedimentet, denne indikerer ligeledes tilstedeværelsen af jern, hvor en relativ høj pH-værdi indikerer et højt jernindhold og omvendt. Det ses, at alle pH-værdier under 8 er sammenfaldende med et jernindhold under 30 g/kg.

Den eksakte placering af prøvetagningspunkterne for de dybere prøver er noget usikker, da disse er taget i en vinkel gennem siden af det opblandede område, numrene i tabel 3.2 angiver dog det punkt de vurderes at være tættest på. Kvaliteten af de udtagende prøver var varierende, således at der for prøverne ved punkt 10 og 18 kun blev udtaget en meget lille mængde sediment over lerlaget, mens prøven ved punkt 11 fyldte GeoProbe prøverøret godt op.

Af resultaterne for de dybere prøver ses det, at der er en stor spredning over to størrelsesordener på koncentrationsniveauet af PCE (4 til 400 mg/kg). Desuden synes der at være en mulig tendens til et lavere jernindhold umiddelbart over lerbunden

3.2.3 Resultater af første monitoringsrunde

I tabel 3.3-3.5 ses resultaterne af analyserne af første monitoringsrunde i form af hhv. vandindhold, total jern og PCE koncentrationer.

Tabel 3.3: Vandindhold i % (w/w) ved første monitoringsrunde efter 9 uger.

	2-2,5 m u.t.	4,5-5 m u.t.	7-8 m u.t.
1	30.9	18.4	16.9
2	27.5	23.8	22.3
3	25.3	13.6	-
4	25.5	-	-
5	26.9	16.5	19.3
6	33.7	20.3	18.0
7	35.2	-	-
8	23.3	-	-
9	17.8	16.6	13.5
10	27.3	19.2	-
11	25.6	19.5	12.4
12	21.8	12.9	-
13	22.6	-	13.5
14	22.0	-	12.5
16	25.7	14.5	14.7
19	24.1	14.4	12.8
20	19.4	-	-

Det ses af tabel 3.3, at vandindholdet aftager med dybden, således at det gennemsnitlige vandindhold er 26 % i 2-2,5 m u.t., 17 % i 4,5-5 m u.t. og 16 % i 7-8 m u.t. Vandindholdet er altså især højt i de øverste par meter.

Sammenlignet med vandindholdet ved baseline målingerne er vandindholdet dog gennemsnitligt 6 %-point mindre, og variansen er ligeledes mindre.

På lokaliteten så man, at vandet i det opblandede området i en vis grad var drænet fra, således at kun den dybere sydlige del af området efter to måneder stadig var dækket af et vandlag.

Tabel 3.4: Indhold af total jern [g/kg TS] ved første monitoringsrunde efter 9 uger.

	2-2,5 m u.t.	4,5-5 m u.t.	7-8 m u.t.
1	29	35	24
2	38	16	5
3	14	38	-
4	58	-	-
5	50	41	5
6	44	24	14
7	21	-	-
8	31	-	-
9	66	24	108
10	52	64	-
11	10	58	15
12	57	67	-
13	61	-	51
14	96	-	32
16	66	54	61
19	49	28	26
20	54	-	-

Af tabel 3.4 ses det, at der ikke er sket en fuldstændig homogen opblanding i den vertikale retning. Opblandingen vurderes dog overordnet tilfredsstillende i forhold til designmixet, da jernindholdet i langt i fleste prøver ligger mellem 20 og 60 g/kg.

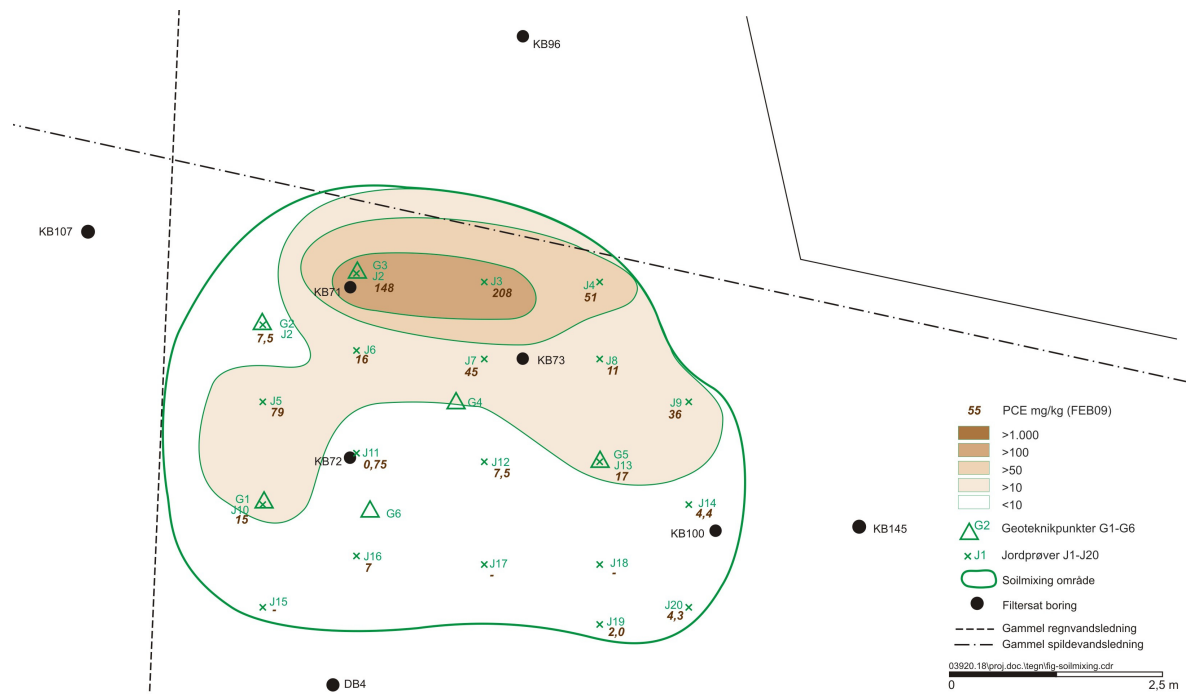
For total jern koncentrationerne er der generelt god overensstemmelse (i de fleste tilfælde indenfor 20 %) mellem indholdet i december og indholdet i februar.

Sammenlignes koncentrationerne af chlorerede opløsningsmidler med værdierne under baseline målingerne i december, da er koncentrationerne generelt faldet efter de første to måneder. Med undtagelse af punkt 2 og 3 er alle koncentrationerne lavere i februar. For TCE er de fleste koncentrationer nu under detektionsgrænsen, mens PCE er faldet med 30-99 % eller gennemsnitligt 78 %. Eftersom der i treatability studiet blev fundet halveringstider på 2-10 måneder er dette gennemsnitlige fald i PCE koncentrationerne sket hurtigere end forventet.

Tabel 3.5: Indhold af PCE [mg/kg TS] ved første monitoringsrunde efter 9 uger.

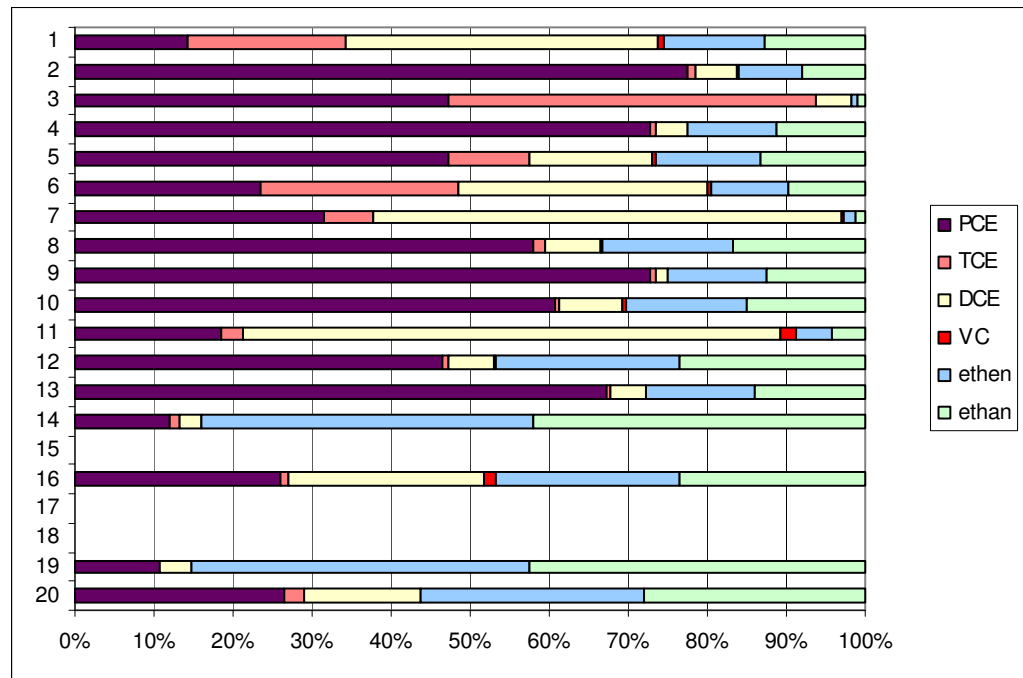
	2-2,5 m u.t.	4,5-5 m u.t.	7-8 m u.t.
1	7.5	13	13
2	148	10	-
3	208	2.7	-
4	51	-	-
5	31	5.9	<DT
6	16	1.7	-
7	45	-	-
8	11	-	-
9	36	33	2.4
10	15	6.5	-
11	0.7	0.1	0.4
12	7.5	-	-
13	17	-	7.2
14	4.4	-	1.9
16	7.0	3.5	-
19	2.0	2.2	1.3
20	4.3	-	-

På figur 3.6 er koncentrationerne af PCE i jordprøverne fra 2,0-2,5 m u.t. ved 1. monitoringsrunde illustreret.



Figur 3.6: PCE koncentration i sedimentprøver udtaget 2,0-2,5 m u.t. ved 1. monitoringsrunde.

GCMS analyserne viste et højere indhold af ethen og ethan end ved baseline målingerne. Figur 3.7 viser fordelingen af chlorerede forbindelser målt på GCMS udtrykt i molfraktioner.

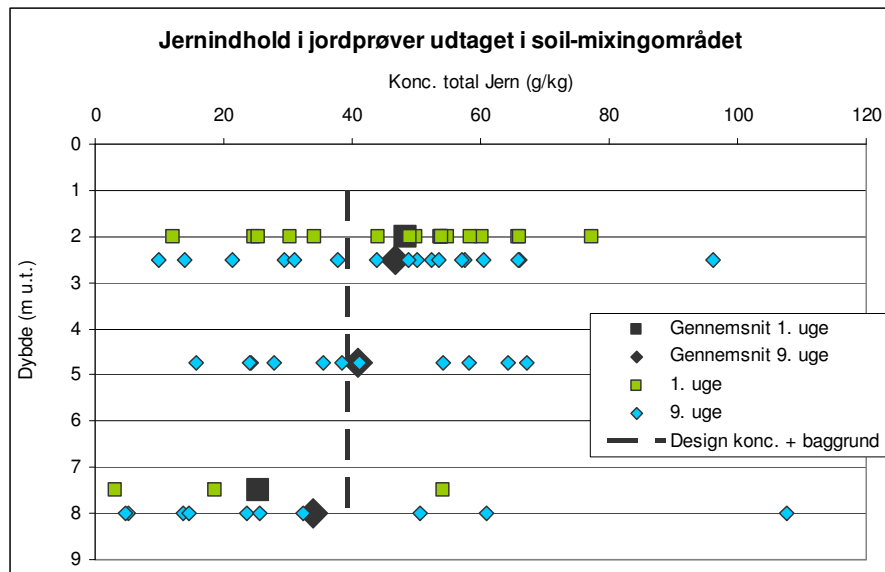


Figur 3.7: Fordelingen af PCE, TCE, DCE, VC, ethen og ethan 2,0-2,5 m u.t. ved første monitoringsrunde beregnet som molfraktioner på baggrund af GCMS analyse resultater.

I forhold til fordelingen af chlorerede forbindelser umiddelbart efter opblandingen, hvor stort set kun PCE var til stede, da er der i løbet af de første to måneder sket en klar ændring til en større dekloreringsgrad.

3.2.4 Sammenligning af baseline og 1. monitoring

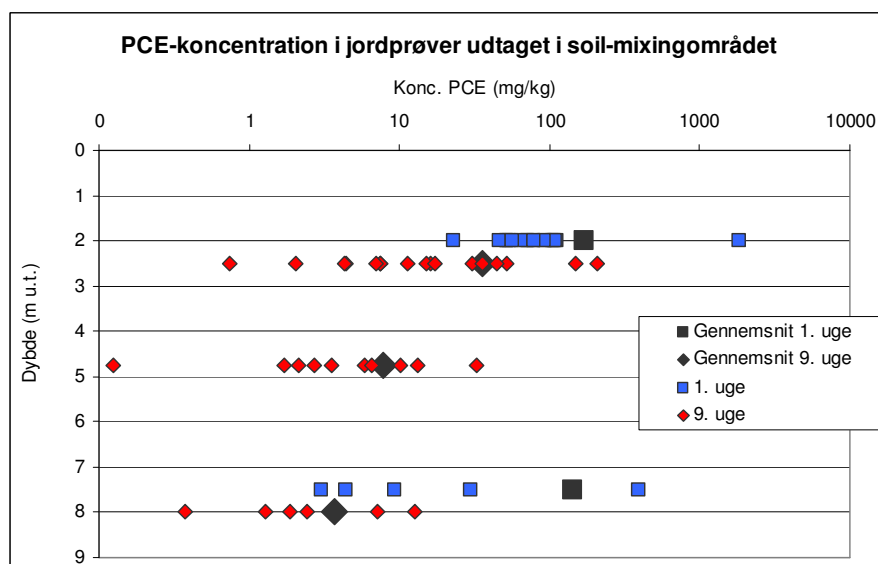
Ved sammenligning af indholdet af total-jern i jordprøverne udtaget i soil-mixingområdet ses at jernindholdet både ved baseline og 1. monitoringsrunde ligger i stort set samme interval, jf. figur 3.8. Sammenholdes gennemsnitskoncentrationen i de forskellige dybder ses, at disse stort set er i overensstemmelse med designkoncentrationen plus baggrundskoncentrationen i jorden.



Figur 3.8: Jernindhold i jordprøver udtaget i soil-mixingområdet plottet over dybden for baseline og 1. monitoringsrunde (hhv. 1 og 9 uger efter soil-mixingen).

Ved sammenligning af PCE koncentrationerne i soil-mixingområdet efter hhv. 1 og 9 uger efter opblandingen med ZVI-Clay ses en tydelig tendens til, at koncentrationen er reduceret.

I figur 3.9 er PCE koncentrationerne plottet over dybden for både baseline målingerne og 1. monitoringsrunde.



Figur 3.9: PCE koncentration i jordprøver udtaget i soil-mixingområdet plottet over dybden for baseline og 1. monitoringsrunde (hhv. 1 og 9 uger efter soil-mixingen).

Af figuren ses, at PCE koncentrationen er faldet fra 1. til 9. uge efter opblandingen med ZVI-Clay. Dette underbygges desuden ved sammenligning af figur 3.4 og 3.7, hvor fordelingen af PCE, TCE, DCE, VC, ethen og ethan i jordprøverne er illustreret. Sammenligningen af disse to figurer viser tydeligt, at der sker en signifikant deklorering i det opblandede område.

4. **KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING**

Erfaringerne med anvendelse af ZVI Clay/soil-mixing metoden viser, at metoden rent teknisk er velegnet til anvendelse under de givne forhold. Da det komplette test-setup var på plads, blev der således behandlet godt 100 m³ forurenede sediment pr. dag.

I forhold til metodens fremtidige anvendelse skal fokus, ud over den rent proces- og anlægstekniske tilgang, særligt rettes mod de sikkerheds- og stabilitetsmæssige forhold, idet den behandlede formation får egenskaber af ”kviksand”.

Den planlagte geotekniske monitoring vil belyse, hvor hurtigt og i hvor høj grad den behandlede formation stabiliseres og hvilke geotekniske egenskaber, der kan opnås i testområdet. Erfaringer fra amerikanske oprensninger viser, at overskudsvandet afdræner i løbet af ½-1 år.

Endvidere bør det overvejes om overskydende materialer – typisk 10-20 % - kan On Site afvandes og behandles, for herved at reducere udgiften til transport og ekstern jordbehandling. Desuden skal der grundlæggende fokuseres på altid at begrænse produktionen af overskydende materialer.

Erfaringerne med det aktuelle fuld skala pilotforsøg viser endvidere, at anstillingsomkostningerne er betragtelige, hvorfor ZVI-Clay metoden kun i sjældne tilfælde vil være relevant at anvende på mindre forureningslokaliteter.

Jordprøver udtaget fra soil-mixingområdet hhv. 1 og 9 uger efter opblandingen med ZVI-Clay, viser at der sker en reduktion i PCE koncentrationen. Desuden ses at der efter 9 uger er dannet nedbrydningsprodukter som TCE, DCE, ethen og ethan, hvilket viser at der sker nedbrydning i det opblandede område. Koncentrationerne i soil-mixingområdet følges fortsat til dokumentering af oprensningseffekten. Jordprøverne viser ydermere, at der er sket en tilfredsstillende opblanding af jernet.

Monitoring af oprensningseffekten og de geotekniske egenskaber inden for det behandlede volumen, fortsætter sammen med dokumentation af fluxreduktionen året 2009 ud.

Primo 2010 udarbejdes en afsluttende rapport, hvori såvel de oprensingsmæssige som økonomiske aspekter relateret til ZVI-Clay metoden beskrives.

5. REFERENCER

- /Ref. 1/ Region Hovedstaden. Koncern Miljø. ”Afværgetiltag – afprøvning af ZVI-Clay metoden til oprensning af DNAPL. Særlige betingelser (SB) Særlige arbejdsbeskrivelser(SAB) og inkl. TBL. Dateret 12. august 2008. Udarbejdet ved NIRAS.
- /Ref. 2/ Region Hovedstaden. Koncern Miljø. ”Afprøvning af ZVI-Clay metoden til oprensning af DNAPL på lokaliteten Vestergade 5, Skuldelev. FASE 1: Litteraturstudie og treatability forsøg. Særlige betingelser (SB) Særlige arbejdsbeskrivelser(SAB) og inkl. TBL. Dateret 12. august 2008. Udarbejdet ved NIRAS/DTU. Dateret April 2008.