



Miljøministeriet
Naturstyrelsen

Radiofrekvens- styret termisk oprensning

Demonstrationsforsøg med oprensning af
jordforurening

MUDP, 2015

Titel:

Radiofrekvens-styret termisk oprensning

Redaktion:

Orbicon A/S
Kresten L. B. Andersen
Simon Hansen
Pernille Palstrøm
Thomas H. Larsen

Udgiver:

Naturstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø
www.naturstyrelsen.dk

Foto:

Simon Hansen, Orbicon A/S

Illustration:

Orbicon A/S

År:

2015

Kort:

Orbicon A/S

ISBN nr,

978-87-92256-69-0

Ansvarsfraskrivelse:

Naturstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Naturstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Naturstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

| | |
|--|-----------|
| Forord | 4 |
| Konklusion og sammenfatning | 5 |
| Summary and Conclusion | 6 |
| 1. Indledning og baggrund | 7 |
| 2. Forsøgsopstilling | 10 |
| 2.1 RF-system | 10 |
| 2.1.1 RF-generatoren..... | 11 |
| 2.1.2 Matchbox | 12 |
| 2.1.3 SRO-anlæg | 13 |
| 2.2 Antenner | 13 |
| 2.3 Temperaturmoniteringsboringer..... | 16 |
| 2.3.1 Temperaturmålinger | 17 |
| 2.3.2 Onlinemålinger med fiberoptiske temperatursensorer | 17 |
| 2.3.3 Manuelle temperaturmålinger | 18 |
| 2.4 Feltstyrkemålinger | 19 |
| 3. Indkøring og drift af anlæg | 21 |
| 4. Resultater fra opvarmning | 23 |
| 4.1 Temperatur | 23 |
| 4.2 Feltstyrkemålinger | 28 |
| 4.3 Energiforbrug | 28 |
| 4.3.1 Sammenligning med ISTD og ERH | 29 |
| 5. Erfaringer fra projektet | 31 |
| 6. anbefalinger | 33 |
| Referencer | 34 |

Bilag 1: Situationsplan

Bilag 2: Feltstyrkemålinger

Bilag 3: Beregninger af energiforbrug

Forord

I løbet af de seneste 15 år har der været gennemført en lang række oprensninger af forurenede lokaliteter i Danmark. Opgaverne er gennemført af Amterne i Danmark, og efter 1/1 2007 Regionerne i Danmark.

Der er gennem årene opsamlet betydelig viden, men der er stadig en lang række områder, hvor der er behov for yderligere vidensudvikling og teknologiafprøvning. Specielt er dette gældende for flygtige, og/eller opløselige organiske forureningstyper, ligesom der er behov for fortsat teknologiudvikling i relation til forureninger, der har spredt sig under eller mellem installationer og/eller bygninger. Fælles for sådanne forureningssituationer er, at de er meget omkostningskrævende at håndtere, og at disse medfører betydelig risiko for forurening af grundvandsmagasiner, og/eller forårsager uacceptable indeklimaproblemer for borgere i de ejendomme, der ligger på sådanne forureninger.

Tidligere pilotforsøg med oprensning ved radiobølgeopvarmning har vist at metoden kunne være et vigtigt værktøj overfor truende grundvandsforureninger i Danmark, særligt i byområder. Disse pilotforsøg har ligeledes vist, at metoden kunne være energi –og tidseffektiv end de øvrige termiske metoder.

På trods af disse fordele vil den nye og forholdsvist uafprøvede teknik være i hård konkurrence med eksisterende, veldokumenterede teknikker. Der er derfor behov for, at de enkelte dele af processen (herunder installation af elektroder, opvarmning, bortventilering, påvirkning af bygninger og installationer) dokumenteres grundigt, og det verificeres, at enkeltdelene understøtter det overordnede formål. Derfor koncentrerer indsatsen i dette projekt om én af delene; om det er muligt at opvarme moræneler til 100 °C via radiobølger, og i så fald hvor stor en radius det er muligt.

I denne rapport beskrives resultaterne af demonstrationsforsøget med radiofrekvens-styret termisk oprensning. Demonstrationsforsøget er udført af Orbicon A/S, Hans Frisesdahl A/S og UFZ i 2013. Projektet er finansieret af Region Hovedstaden, Naturstyrelsens MUDP pulje og Orbicon.

Projektets følgegruppe har bestået af følgende personer:

- Nancy Hamburger, Region Hovedstaden
- Mads Terkelsen, Region Hovedstaden
- Lis Morthorst Munk, Naturstyrelsen

Herudover har Krüger været behjælpelige med at fremskaffe data for ISTD oprensningen på Vadsbyvej.

Konklusion og sammenfatning

Regionerne i Danmark efterlyser nye metoder til at oprense forurening. Især kan det være vanskeligt at udføre oprensninger i lavpermeable aflejringer under bygninger og mellem mange installationer i jorden, som vi ofte ser i byområder. På denne baggrund er den nye teknik ”radiofrekvens-styret termisk oprensning” forkortet RFH (på engelsk Radio Frequency Heating) afprøvet.

Metoden er afprøvet på Region Hovedstadens testgrund i Skovlunde. Forsøget er udført med 1 ”varm” antenne og 7 temperatur monitoringsboringer til at overvåge temperaturudviklingen under forsøget. Der var en del opstarts vanskeligheder med mange nedbrud på anlægget. Herefter var der en forsøgsperiode på 4 uger, hvor de præsenterede resultater er indhentet.

Rapporten gengiver resultaterne af demonstrationsforsøget med RFH. Metoden er under udvikling, men har vist lovende resultater både omkring opvarmning af jorden og den fleksible installation i jorden.

På baggrund af demonstrationsforsøget kan der drages følgende hovedkonklusioner:

- Det er muligt at opvarme moræneler ved hjælp af radiobølger til 100 °C i en radius på ca. 0,5 meter fra antennen.
- Der er inden for en driftsperiode på 4 uger opnået opvarmning af jorden til 40-50 °C i min. 2 meters afstand fra antennen.
- Der er observeret højest temperaturstigning i 2-4 m u.t., hvilket er højere end placeringen af den ledende del af antennen, placeret 4-6 m u.t. Det skyldes sandsynligvis, at der er mættede forhold fra ca. 3 m u.t.

På baggrund af resultaterne fra projektet anbefales, at mulighederne for at videreudvikle metoden mht. antenneudformning og at mere effektive RF-generatorer undersøges.

Summary and Conclusion

The regions of Denmark calls for new in situ remediation techniques. In particular, it is difficult to remediate contaminations in low permeability sediments within buildings and between installations in the ground which is often see in urban areas. Based on this a new technique Radio Frequency Heating abbrivated RFH has been tested.

The method was tested on the Capital Region of Denmark's test site in Skovlunde. The experiment was carried out with 1 "hot" antenna and 7 temperature monitoring wells to monitor the temperature during the study. There were some start-up difficulties with many breakdowns at the facility. Then there was a test period of 4 weeks, where the presented results were obtained.

The report presents the results of the demonstration experiment with RFH. The method is emerging but has shown promising results both about heating the soil and the flexible installation in the ground.

The conclusions of the experiment are:

- It is possible to heat till clay, using radio waves to 100 ° C at a distance of app. 0,5 meter from the antenna.
- There is during an operational period of 4 weeks achieved heating to 40-50 ° C at a distance at min. 2 meter from the antenna.
- The highest temperature increase was observed 2-4 m below surface, which is higher than the location of the conductive part of the antenna, located 4-6 m below. It is probably due to the saturated conditions from 3 m below surface.

Based on the results from the project it is recommended to develop the method in terms of antenna design and more efficient RF generators.

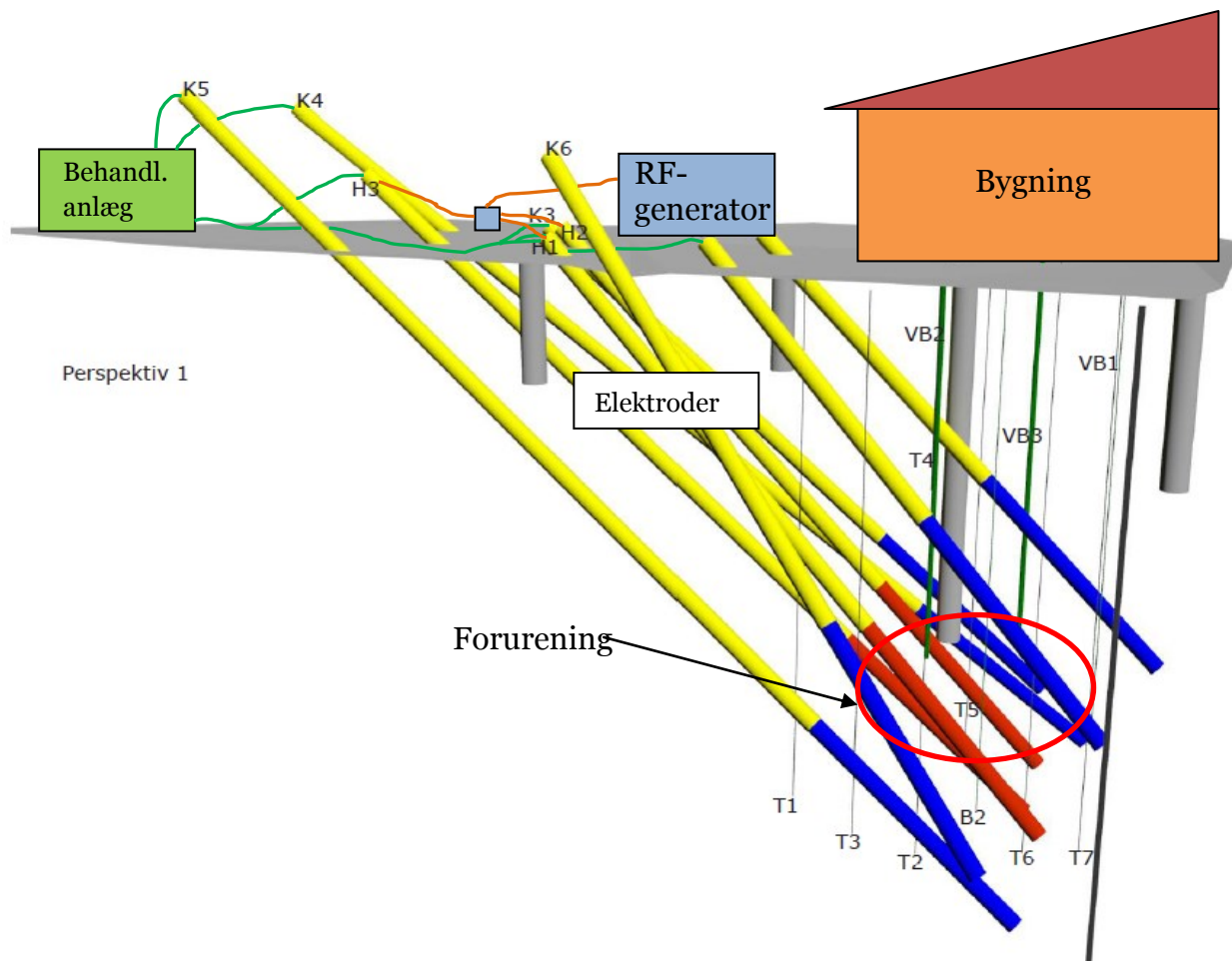
1. Indledning og baggrund

I løbet af de seneste 15 år har der været gennemført en lang række oprensninger af forurenede lokaliteter i Danmark. Opgaverne er gennemført af Amterne i Danmark, og efter 1/1 2007 Regionerne i Danmark.

Der er gennem årene opsamlet betydelig viden, men der er stadig en lang række områder, hvor der er behov for yderligere vidensudvikling og teknologiafprøvning. Specielt er dette gældende for flygtige, og/eller opløselige organiske forureningstyper, ligesom der er behov for fortsat teknologiudvikling i relation til forureninger, der har spredt sig under eller mellem installationer og/eller bygninger, særligt i lavpermeable aflejringer. Fælles for sådanne forureningssituationer er, at de er meget omkostningskrævende at håndtere, og at disse medfører betydelig risiko for forurening af grundvandsmagasiner og/eller forårsager uacceptable indeklimaproblemer for borgere i de ejendomme, der ligger på sådanne forureninger.

I 2008 startede Orbicon et samarbejde med Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ) i Leipzig i Tyskland, der gennem de sidste 10 år har udviklet et oprensningskoncept baseret på radiofrekvens opvarmning af jord (RFH). UFZ har fremstillet operationsklart udstyr (containere) til oprensning af begrænsede jordvoluminer op til 500 m³. Metoden er tidligere med succes anvendt til opvarmning og oprensning af sandformationer, men er ikke afprøvet i mere lavpermeable jordarter, herunder lerjord.

Region Hovedstaden har i 2009-2010 medfinansieret gennemførelsen af et OPI-demonstrationsprojekt ved opvarmning med radiobølger baseret på UFZ's koncept. Metoden er baseret på installation af en række elektroder ("antenner") i jorden, som fungerer som ledere for radiobølgerne og afsætter radiobølgeenergien i jorden, som dermed opvarmes indtil kogepunktet for forureningsstofferne opnås, typisk ved 95-100 °C. Antennerne er samtidigt perforerede og hule indvendigt, således at forureningsdampene kan ventileres ud af jorden og ledes til et behandlingsanlæg på jordoverfladen. Princippet er vist på **Figur 1-1**.



Figur 1-1: Skitse af fuldskala oprensingsprojekt ved hjælp af radiobølger. En række elektroder er installeret skråt, således at den aktive del af elektroderne (blå og røde) er placeret i et forurenet jordvolumen under en bygning. En radiofrekvens (RF) generator producerer radiobølgeeffekten, som ledes til en række af de centralt placerede elektroder (de røde). Alle elektroderne er hule og perforerede i den nederste del, således at de bortkogte forureningsdampe kan ventileres (suges) ud af jorden og behandles i et behandlingsanlæg, f.eks. ved rensning over aktivt kul.

Målet var at afprøve teknologiens muligheder for oprensning af svært tilgængelige forureninger med chlorerede opløsningsmidler i moræneler under eksisterende bygninger. Projektet blev gennemført ved et tidligere renseri i Kokkedal. På grund af en uforudset høj afkøling fra gennemstrømmende grundvand, var det dog ikke muligt at opnå det ønskede resultat, nemlig at opvarme jorden til 100 °C og fjerne den uønskede forurening med chlorerede opløsningsmidler /1/. Til brug for det foreslåede projekt er der fundet en egnet lokalitet i Skovlunde, hvor der ikke skulle være risiko for grundvandsafkøling.

Oprensning ved RFH kan vise sig at være et vigtigt værktøj overfor truende grundvandsforureninger i Danmark, særligt i byområder. Teknikken kan vise sig at være mere effektiv end tilsvarende teknikker under danske geologiske forhold, både mht. tids- og energiforbrug.

På trods af disse fordele vil den nye og forholdsvist uafprøvede teknik være i hård konkurrence med eksisterende, veldokumenterede teknikker. Der er derfor behov for, at de enkelte dele af processen (herunder installation af

elektroder, opvarmning, bortventilering, påvirkning af bygninger og installationer) dokumenteres grundigt og det verificeres at enkeltdele understøtter det overordnede formål. Derfor koncentrerer indsatsen i dette projekt om én af delene; om det er muligt at opvarme murænder til 100 °C via radiobølger, og i så fald hvor stor en radius det er muligt.

I løbet af projektet er formålet blevet udvidet til at også at omfatte beregning af metodens energieffektivitet ved, så det kan sammenlignes med de andre termiske metoder, samt at se på metodens styrker, svagheder og udviklingspotentiale under danske forhold.

2. Forsøgsopstilling

I dette afsnit beskrives den forsøgsopstilling, der er anvendt ved gennemførelsen af demonstrationsprojektet. Afsnittet indeholder en beskrivelse af de hovedkomponenter, som indgår i det opstillede radio frekvens (RF) system, konstruktion af antenner og anvendt måleudstyr til monitorering af temperaturforløb og måleudstyr til overvågning af feltstyrke i forsøgsområdet.

2.1 RF-system

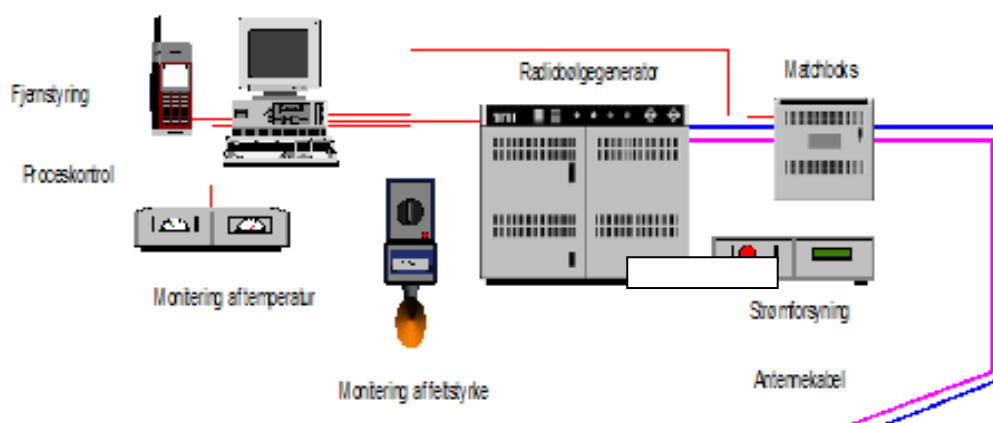
Til demonstrationsprojektet er der benyttet et forsøgsanlæg udviklet og patenteret af Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ), i Leipzig i Tyskland, der gennem de sidste 10 år har forsket i og udviklet et oprensningkoncept baseret på dielektrisk opvarmning (RFH) af jord.

Der er indgået en licensaftale vedrørende de tilknyttede patentrettigheder, mellem UFZ og entreprenørfirmaet Hans Frisesdahl A/S, som udover licensholder også har været hovedentreprenør på opgaven.

RF-systemet er installeret i en 20 fods container. RF-systemet består af en RF-generator, som omdanner lavfrekvent (50 Hz) vekselstrøm til elektromagnetiske bølger med en frekvens på 13,56 MHz. Containeren indeholder endvidere et vandbaseret kølesystem til afkøling af den varme, som dannes, når elektrisk energi omdannes til elektromagnetiske bølger.

Til overvågning, styring og regulering af RF-systemet er der installeret et PC-baseret SRO-system, som også opsamler alle relevante driftsdata fra systemet herunder elforbrug, afsat energi, udvikling af temperaturforløb i jorden mv.

På Figur 2-1 ses en principskitse af RF-systemet.



Figur 2-1. Principskitse af RF-systemet

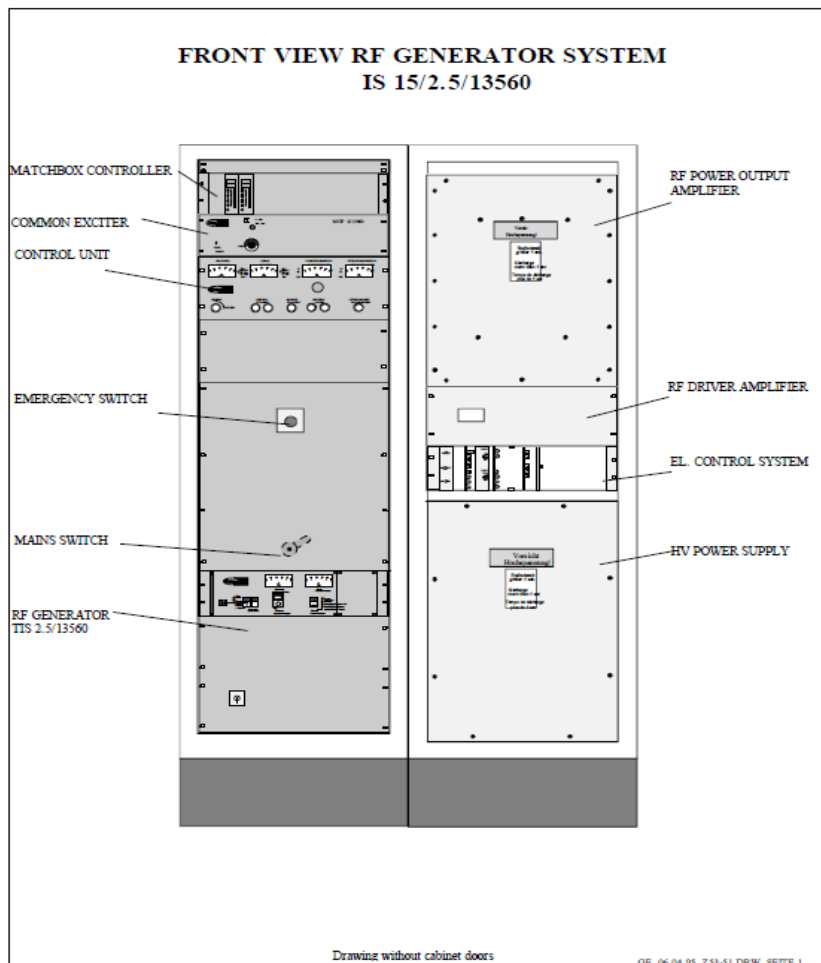
2.1.1 RF-generatoren

RF-generatoren er af typen IS 15/2,5/13560, som normalt anvendes til plasmaprocesser som f.eks. svejsning af plastemner. RF-generatoren er fremstillet af Hüttinger Elektronik GmbH i Freiburg i Tyskland. RF-generatoren har en ydelse på maksimalt 15 kW med en frekvens på 13,56 Mhz. Denne frekvens ligger i de såkaldte ISM-bånd, som frit kan anvendes til industrielt formål, hvor de ikke generer f.eks. radio- og telekommunikation.

Fra RF-generatoren overføres signalet via et antennekabel til en matchbox, hvis funktion er, at fastholde en konstant impedans mellem RF-generator og de tilsluttede antenner. Fra matchboxen overføres energien til de antenner, som er tilsluttet.

RF-containeren er tilsluttet en elforsyning på 3 x 400 V, 125 Amp, 50 Hz som anvendes som energiforsyning til RF-generatoren, drift af kølesystem, drift af matchbox og som strømforsyning til containerens SRO-system. Ved generering af radiobølger i RF-generatoren sker der et tab af energi i form af varme, som ikke udnyttes, og derfor medfører, at ca. 50 % af den energi, der tilføres generatoren, går tabt som varme. Det medfører, at der ved den maksimale ydelse på 15 kW fra generatoren skal anvendes ca. 30 kW fra elnettet svarende til en effektivitet på 50 %.

På nedenstående Figur 2-2 ses en principskitse af generatoren med angivelse af hovedkomponenter.



Figur 2-2. Principskitse af RF-generator med angivelse af hovedkomponenter

2.1.2 Matchbox

Matchboxen er model series PFM 3000 A produceret af Hüttinger Elektronik GmbH i Freiburg.

Fra RF-generatoren overføres radiobølgerne via et antennekabel til en matchbox. Matchboxens funktion er at fastholde en konstant impedans mellem RF-generator og de tilsluttede antenner. Matchboxen regulerer de indbyggede kondensatorer med en mikrokontroller (lille computerenhed).

Denne løbende regulering er nødvendig, fordi impedansen ændres efterhånden som jorden opvarmes som følge af ændringer af den dielektriske modstand, når jorden omkring antennerne udtørres. I demonstrationsprojektet er der anvendt en fast impedans på 50Ω .

Matchboxen overvåger endvidere den energi, der afsættes i jorden, og hvor meget energi der reflekteres tilbage i systemet. Det er formålet at afsætte så meget energi i jorden som muligt, så det ikke reflekteres tilbage som stråling.

Matchboxen er tilsluttet 240 V og holdes afkølet med kølevand fra det samme kølesystem som benyttes til RF-generatoren. Kommunikationen mellem matchbox og RF-generator sker via fiberoptiske kabler for at undgå forstyrrelse fra antennekablet.

Ved opstart foretages der en manuel grovindstilling af kondensatorerne ved meget lav effekt på RF-generatoren, typisk i intervallet 200-500 W. Når den reflekterede effekt tilbage til RF-generatoren er minimal (0-10 W), sættes matchboxen til automatisk at finjustere indstillingen af kondensatorerne.

På nedenstående foto 1 ses matchboxen uden den ydre afskærmning. Kondensatorerne ses til højre på fotoet.

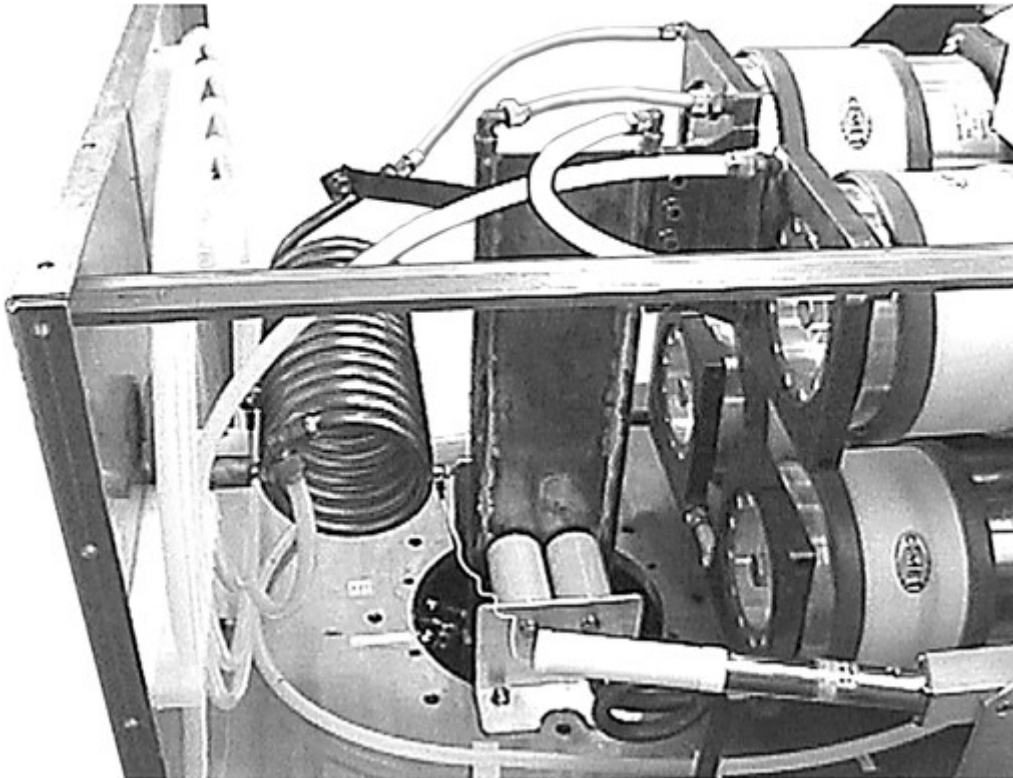


Foto nr. 1. Foto af matchbox uden ydre afskærmning.

RF-signalet overføres til den tilsluttede antenne via et stykke kobberplade (6-8 cm). Denne tilslutning giver den bedste energioverførsel, da radiobølgerne "løber" på ydersiden af kobberpladen. (se foto nr. 2)



Foto nr. 2. Foto af tilslutning mellem matchbox og antenne.

2.1.3 SRO-anlæg

UFZ har udviklet et PC-baseret system til styring, overvågning og regulering (SRO) af det samlede RF-system. Der foretages dataopsamling af alle relevante data. Det omfatter energiforbrug, reflekteret energi tilbage til systemet, indstillinger af kondensatorer i matchboxen, temperaturmålinger fra de optiske temperaturføler, der er monteret i jorden omkring antennerne mv. Endvidere er der en fejllog, som automatisk registrerer fejl og eventuelle nedbrud på systemet for at gøre fejlfinding nemmere. Ved fejl eller ved overskridelse af alarmgrænser på kritiske parametre sender SRO-systemet en sms til de mobilnumre, som er indtastet i alarmsystemet.

Der er adgang til SRO-systemet via mobilt internet, og de vigtigste funktioner kan styres via denne adgang, hvor også de opsamlede data kan hentes.

2.2 Antenner

Til at overføre energien fra RF-generatoren til det jordvolumen, der skal opvarmes, er der i forsøgsopstillingen installeret 4 antenner med en længde på i alt 6 m, hvor af de sidste 2 m er selve den ledende del af antennen, hvor varmen kan afsættes i jorden. De 4 antenner er ens opbyggende. Foto af antennen er vist på foto nr. 3 og 4.

Den ens opbygning af antennerne gav mulighed for, at flere konfigurationer kunne anvendes under forsøget, f.eks. ved at koble flere antenner til matchboxen og dermed eventuelt optimere energioverførelsen til jorden.

I demonstrationsforsøget var der en konfiguration med 1 "varm" antenne og 3 "kolde", hvor den "varme" antenne er koblet til matchboxen, mens de 3 "kolde" er koblet til jordspyd. Formålet med de "kolde" antenner er at styre udbredelsen af radiobølger indenfor området med de "kolde" antenner.

Antennerne er opbygget i en "isoleret" og en "ledende" del som vist på foto nr. 3 og 4.

Den isolerede del af antenne skal sikre, at radiobølgerne ledes frem til den ledende del af antenne, hvor der er direkte kontakt mellem antenne og den omkringliggende jord. Det er på denne måde muligt at afsætte energien i en bestemt dybde.

Den isolerede del af antennerne er opbygget af et Ø200 mm glasfiberarmeret kompositrør. I dette rør er der monteret et 1" jernrør som leder radiobølgerne ned til ledende del af antenne. Jernrøret er centreret i midten af røret ved hjælp af "styr".

For at undgå refleksioner i glasfiberrøret holdes luftfugtigheden nede ved, at der konstant tilføres varm tør luft fra en lille sidekanalsblæser via en 10 mm PE-slange.

Den ledende del af antennen er opbygget af en 2 m lang jernplade med slidser, som er valset til et rør. Slidserne gør det muligt, at ekstrahere de dampe, der dannes ved opvarmning af jorden. Disse dampe vil i forbindelse med en egentlig oprensning udover vanddamp også bestå af f.eks. chlorerede opløsningsmidler.



Foto nr. 3: 4 stk. antenner i 6 m's længde

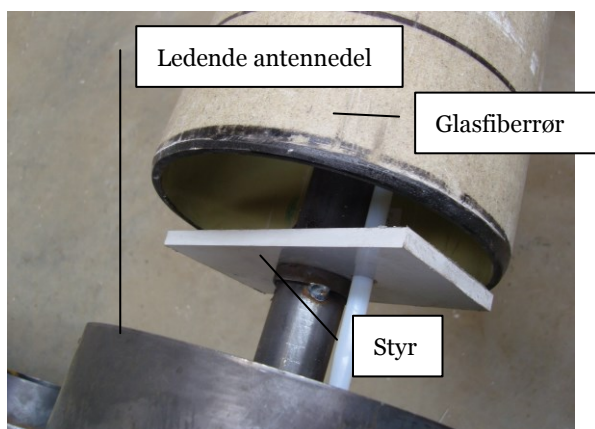


Foto nr. 4: Overgang mellem den isolerede og ledende del af antennerne



Foto nr. 5 Boring til antenne



Foto nr. 6 Gruskastning af antenneboring

Antennerne er monteret i borerer udført med en $\text{Ø}400$ mm hulsnegl (se foto nr. 5). Omkring den ledende del af antennen er der gruskastet med Dansand 7 til 30 cm over ledende del af antennen, efterfulgt af et tyndt lag betonitpiller (se foto nr. 6). Herefter er der støbt med "Storebæltbeton" til 0,5 under terræn.

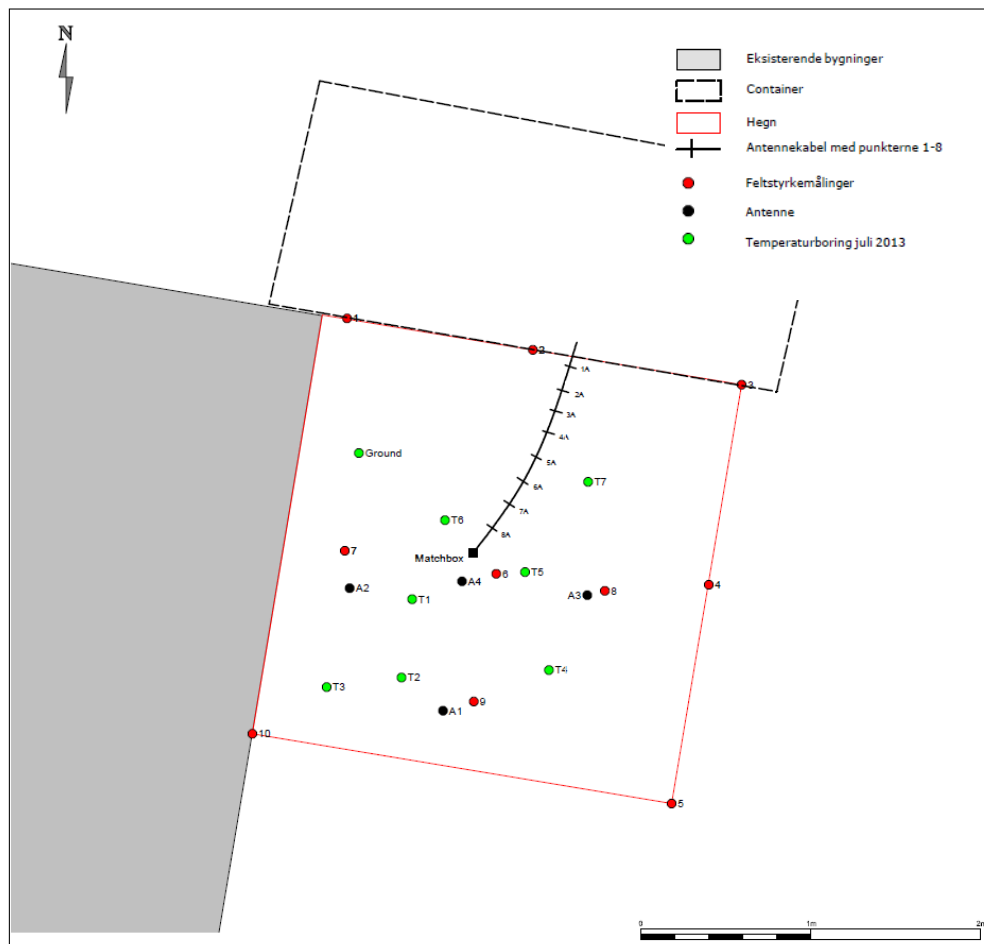
Omkring de 4 antenner er der monteret en afskærmning (Faradays bur), for at sikre personer i og omkring testfeltet mod uacceptable niveauer af elektromagnetisk stråling (se afsnit 2.4). Afskærmningen er udført i aluminiumsplader og mellem antennerne i "spirorør"², ligeledes i aluminium og tilsluttet jordforbindelse (se foto nr. 7).



Foto nr. 7. Afskærmning af antenne (Faradays bur) vist med låget taget af.

2.3 Temperaturmoniteringsboringer

Til monitering af temperaturstigningen som følge af den afsatte energi fra radiobølger til jorden er der i testfeltet placeret 7 temperaturmoniteringsboringer (T1-T7) i forskellige afstande (0,6 til 2,0 m) til den ”varme” antenne. Placeringen er vist på Figur 2-3.



Figur 2-3: Situationsplan med placering af antenner og temperaturmoniteringsboringer. Figuren er ligeledes vedlagt i bilag 1.

Temperaturmoniteringsboringerne er udført med 4" snegl til 7 m under terræn. I boringerne er der monteret et teflonrør Ø25 mm med bundprop. Boringerne er afproppet med "Storebæltsbeton" fra bund af boring til terræn. Teflonrørene er herefter skåret af i samme kote ca. 20 cm over terræn.

2.3.1 Temperaturmålinger

Der er udført temperaturmålinger med to metoder. Onlinemålinger udført med fiberoptiske sensorer som ikke interfereres af radiobølgerne (se foto nr. 8). Der er endvidere udført manuelle øjebliksmålinger med 8 stk. type k-temperaturfølere som via en datalogger var koblet til en bærbar PC. Disse er udført, mens anlægget har været slukket.

2.3.2 Onlinemålinger med fiberoptiske temperatursensorer

Til forsøgsanlægget er der i SRO-systemet mulighed for, at benytte op til 16 fiberoptiske temperatursensorer. Af de 16 temperatursensorer var det muligt at opnå stabile målinger med 12 sensorer. De 12 temperatursensorer blev tilsluttet et instrument, som omsætter signalet fra de fiberoptiske temperatursensorer til en temperatur, hvor data efterfølgende opsamles af SRO-systemet. Temperaturdata er opsamlet med 1 minuts frekvens.

De 12 fiberoptiske sensorer blev monteret i temperaturmoniteringsboringerne T1, T5 og T6. I hver af disse boringer blev sensorerne placeret i følgende dybder under terræn 3,5; 4,5; 5,5 og 6,5 m, således at der er blevet

moniteret på temperaturen fra 0,5 m over den varme del af antennen og til 0,5 m under. Onlinemålingerne er suppleret med manuelle temperaturmålinger, se afsnit 2.3.3.



Foto nr. 8 Signalomsætter til fiberoptiske temperatursensorer

2.3.3 Manuelle temperaturmålinger

Som supplement til onlinemålinger af temperatur er der udført manuelle temperaturmålinger én gang ugentligt i driftsperioden. De manuelle målinger er udført med en PICO-datalogger med 8 indgange til type k-temperaturfølere (se foto nr. 9). Fra dataloggeren er målinger overført til en bærbar PC.

Af hensyn dels til sikkerhed og for at få nøjagtige temperaturmålinger er RF-generatoren lukket ned i forbindelse med temperaturmålingerne.

I afsnit 2.4 er der redegjort for de sikkerhedskrav, der er opsat i sikkerhedsinstruksen.

Den større nøjagtighed på temperaturmålinger når RF-generatoren er lukket ned, skyldes at type-k temperaturfølerne indeholder metal, som under påvirkning af radiobølger vil fungere som "antenner" og derfor opvarmes.



Foto nr. 9: Foto af 8-kanals PICO-datalogger til manuelle temperaturmålinger

De 8 temperaturfølere er monteret med 1 meters afstand. Målingerne er udført ved at nedsænke temperaturfølerne i monitoringsboringerne. Når der var opnået stabile værdier, blev temperatur kablet med temperaturfølerne hævet en $\frac{1}{2}$ m. På den måde er der målt temperatur for hver $\frac{1}{2}$ meter fra 7 m under terræn til 0,5 m under terræn.

Der er desuden målt temperatur i de 4 antenner efter ovenstående princip.

Der er i forbindelse med indkøringen og driften af anlægget målt temperatur manuelt ca. 1 gang om ugen. Ved målingerne er der truffet grundvand ca. 3 meter under terræn i antenneboringerne. Grundvandet er blevet pumpet ud af antenneboringerne ved de manuelle målerunder. Antagelsen om, at der ikke var terrænnært grundvand på den valgte lokalitet, var dermed ikke korrekt. Det terrænnære grundvand kan vanskeliggjort en effektiv opvarmning.

Alle temperaturmålinger er anvendt i forbindelse med beregning af metodens effektivitet i forhold til andre termiske metoder.

2.4 Feltstyrkemålinger

Ved anvendelse af højfrekvente radiobølger er der regler for elektromagnetisk kompatibilitet (EMC), der skal overholdes. Der er derfor udarbejdet en sikkerhedsinstruks og en Arbejdspladsvurdering (APV) for projektet.

Ved arbejde omkring de højfrekvente elektromagnetiske felter kan der omkring især RF-generator, antenner og koaksialkablet, der forbinder RF-generator og matchbox, opstå risiko for eksponering i form af kontaktspænding, kropsstrømme, varmepåvirkning og påvirkning af implantater som f.eks. pacemakere.

Derfor er området omkring testfeltet opdelt i 3 eksponeringszoner.

Eksponeringszone 0

- Omfatter skabet med RF-generatoren og det indre af Faraday-afskærmningen.
- Mens RF-systemet er i drift, skal skabet med RF-generatoren og Faraday-afskærmningen være helt lukket.
- Kun uddannet og instrueret personale har efter nedlukning af RF-systemet lov til at udføre opgaver i Eksponeringszone 0.
- I almindelighed er adgang ikke tilladt i Faraday-afskærmningen under RF-generatorens drift.

Eksponeringszone 1

- Omfatter området omkring Faraday-afskærmningen og indtil 3 meter fra den aktive antenne.
- Dette område skal afgrænses af et hegn samt af informations- og advarselsskilte.
- Den tilladte elektriske feltstyrke må ikke overskride 61,4 V/m. Højere feltstyrker skal reduceres til den tilladte grænse ved at nedsætte RF-effekten, og den driftsansvarlige skal underrettes.
- Adgang er kun tilladt for uddannet og instrueret personale. Der er adgang forbudt for personer med aktive eller passive implantater i kroppen.
- Under drift af RF-systemet er adgang kun tilladt efter måling af feltstyrkerne med et feltstyrkemeter og anvendelse af feltstyrkedosimetre ved andet end kortvarige ophold.

Eksponeringszone 2

- Omfatter området mellem Eksponeringszone 1/inderhegnet og yderhegnet omkring området.
- Den tilladte elektriske feltstyrke må ikke overskride 27,5 V/m. Dette skal påvises med kontrolmålinger og skal dokumenteres.

De udførte feltstyremålinger er målt med et håndholdt feltstyrkemeter.

Der er ved opstart og ved tilsyn i forsøgsperioden målt feltstyrke ved 18 faste målepunkter. I bilag 2 er der en oversigt over feltstyrkemålingerne på de faste målepunkter. Herudover er der udført målinger af feltstyrken, når der kortvarigt har været udført aktivitet indenfor byggepladshegnet.

3. Indkøring og drift af anlæg

Det tyske forsøgsanlæg har stået opmagasineret hos entreprenør Hans Friesesdahl A/S, der som før nævnt har licensrettighederne i Danmark.

Inden anlægget blev transporteret til forsøgslokaliteten er anlægget blevet testet. Ved testen blev der konstateret følgende fejl:

- Gennemtæring i matchboxens kølesystem.
- Backup batteri til SRO-systemets PC var faldet ”sammen”.
- Problemer med at opnå kontakt til alle fiberoptiske temperaturfølere.

Der var ikke muligt at tjekke adgang til SRO-systemet via mobil internetforbindelse pga. dårlige signalforhold.

Efter reparation af kølesystem og udskiftning af backup batteri blev anlægget transporteret til Region Hovedstadens forsøgsgrund i Skovlunde.

Anlægget blev sat op og tilsluttet til en antenne. Temperaturføler blev monteret i temperaturmoniteringsboringerne.

Ved opstart viste det sig, at der var problemer med elektronikken i matchboxen. UFZ blev kontaktet og ankom til lokaliteten. UFZ konstaterede, at matchboxen skulle repareres, og der rekvireredes en tekniker fra fabrikanten, og et defekt printkort blev udskiftet. UFZ forsøgte også at få de fiberoptiske temperaturfølere til at fungere. Efter flere forsøg var konklusionen, at et multiplexsmul var ødelagt.

UFZ tog udstyret med tilbage til Leipzig, og udstyret blev forsøgt repareret.

Det viste sig endvidere, at når anlæggets vandkøler blev belastet, kunne der ikke opnås tilstrækkelig køling af RF-generatoren og matchboxen. Der blev konstateret gennemtæring af et kølerør i vandkøleren, som medførte, at der ikke var kølevæske i systemet, og at der var vand i kølerens kompressor.

Det defekte rør blev udskiftet sammen med kompressoren.

Ovenstående forsinkede opstarten af forsøget og medførte, at anlægget ikke kørte stabilt ved fuld belastning (15 kW). Efter flere nedbrud på anlægget kunne der opnås en stabil drift ved en ydelse på 10-12 kW.

De problemer, der er beskrevet i ovenstående, medførte, at der over en periode ikke kunne opnås en stabil drift og dermed stabil tilførsel af energi til jorden.

Beregningerne udført i afsnit 4 tager derfor udgangspunkt i den temperaturstigning, der blev opnået fra den 10. september 2013. Gennemsnitstemperatur var på dette tidspunkt 30 °C i et jordvolumen på 37 m³.

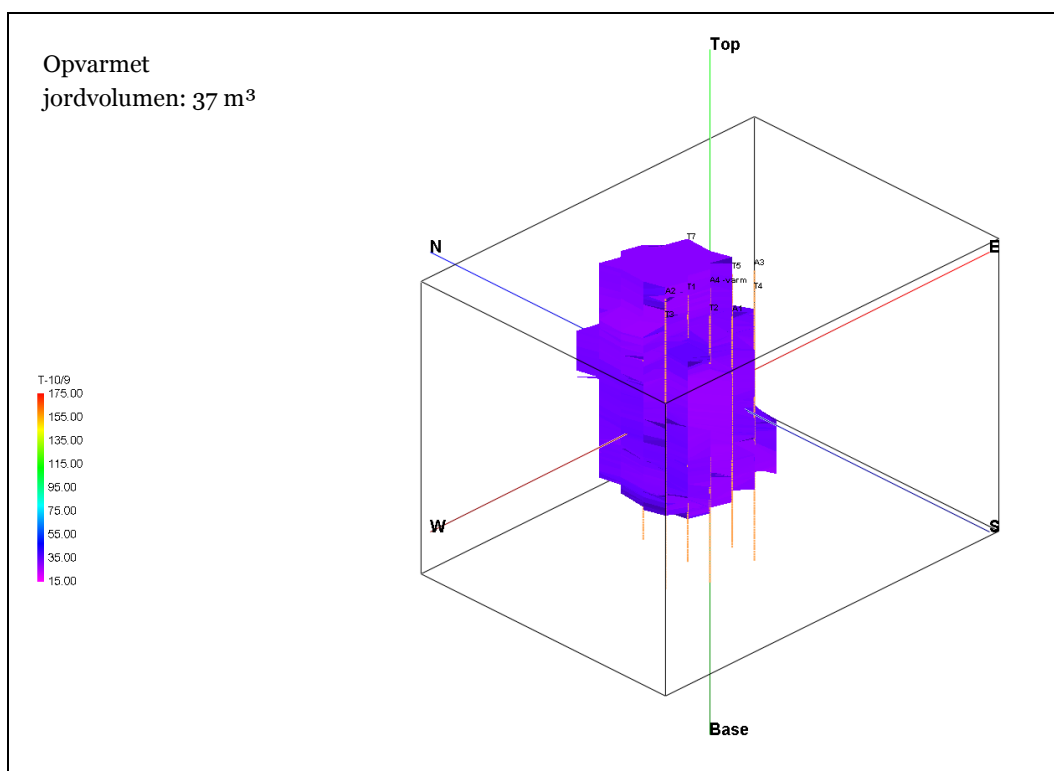
Fra dette tidspunkt var driften stabil, indtil det besluttet at afslutte opvarmningen den 9. oktober 2013, hvor der var opnået en temperatur på 100 °C.

4. Resultater fra opvarmning

4.1 Temperatur

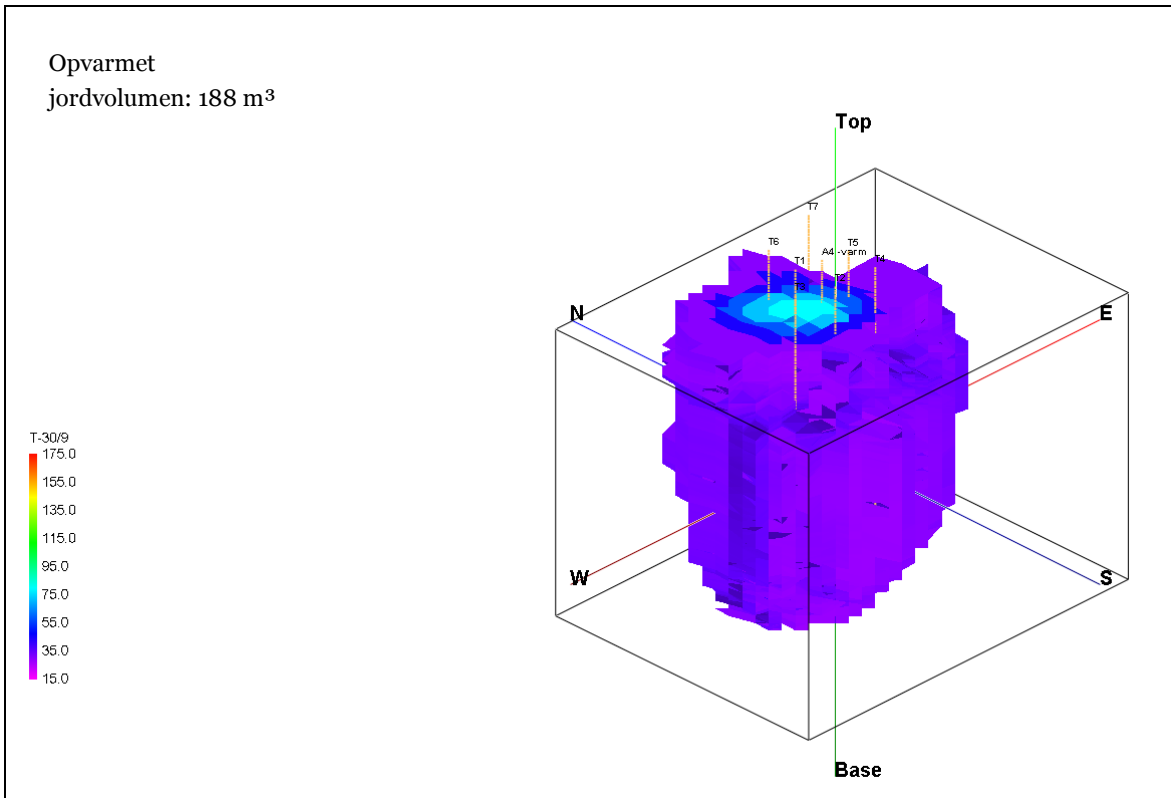
Temperaturdata fra de manuelle målerunder samt SRO systemet er indtastet i programmet Rockworks, hvor data kan vises som 3D visualiseringer.

På nedenstående Figur 4-1 er udbredelsen af en temperatur på 30 °C vist ved opstart af driftsperioden, svarende til et volumen på 37 m³. Temperaturen er forholdsvis høj ved opstarten, da indkøringen havde været meget ustabil, og anlægget dermed havde varmet op inden den egentlige driftsperiode startede.

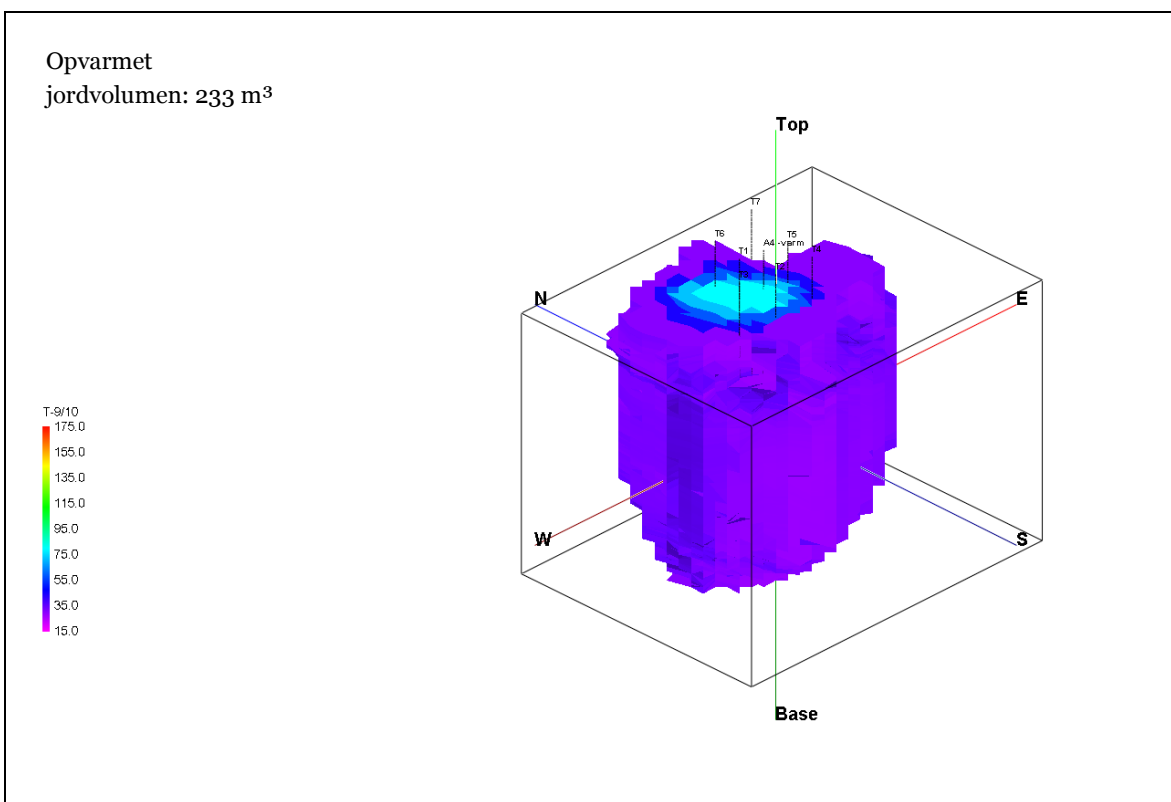


Figur 4-1: Temperatur udbredelse 30 °C den 10. september 2013

I de nedenstående Figur 4-2 og Figur 4-3 er temperaturen lig 30 °C vist den 30. september 2013 og den 9. oktober 2013, hvor det opvarmede jordvolumen var henholdsvis 188 m³ og 223 m³.

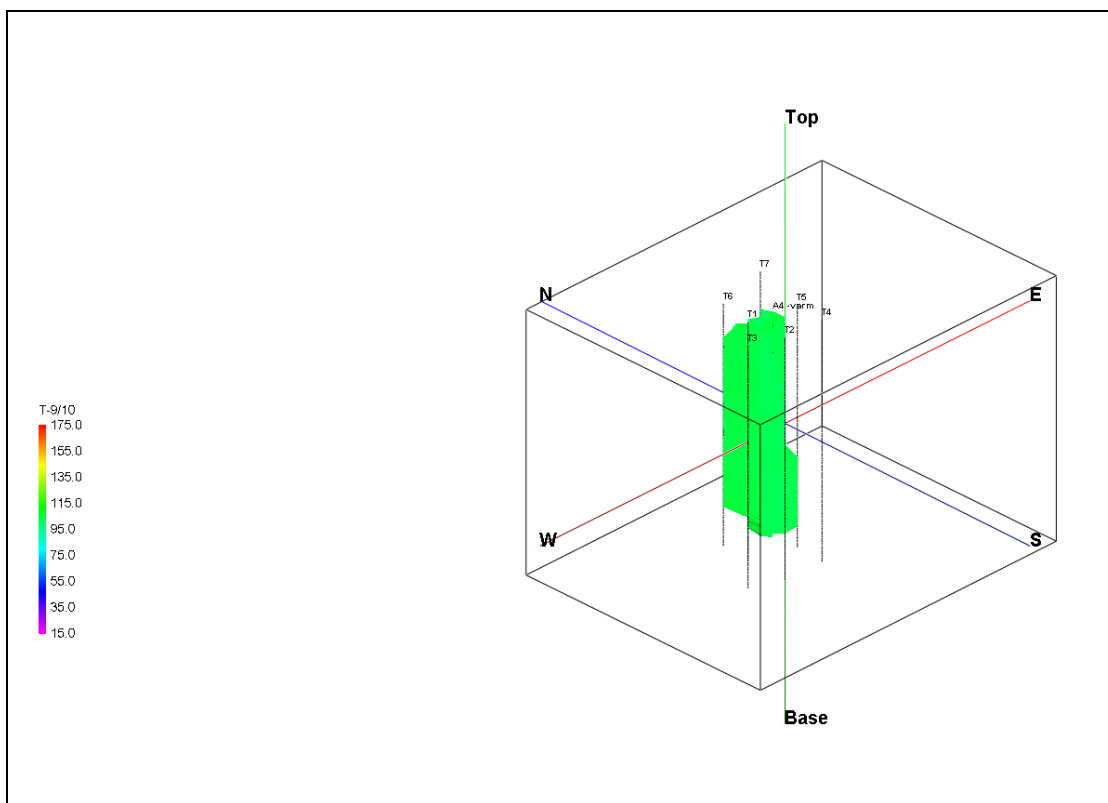


Figur 4-2: Temperatur udbredelse 30 °C den 30. september 2013



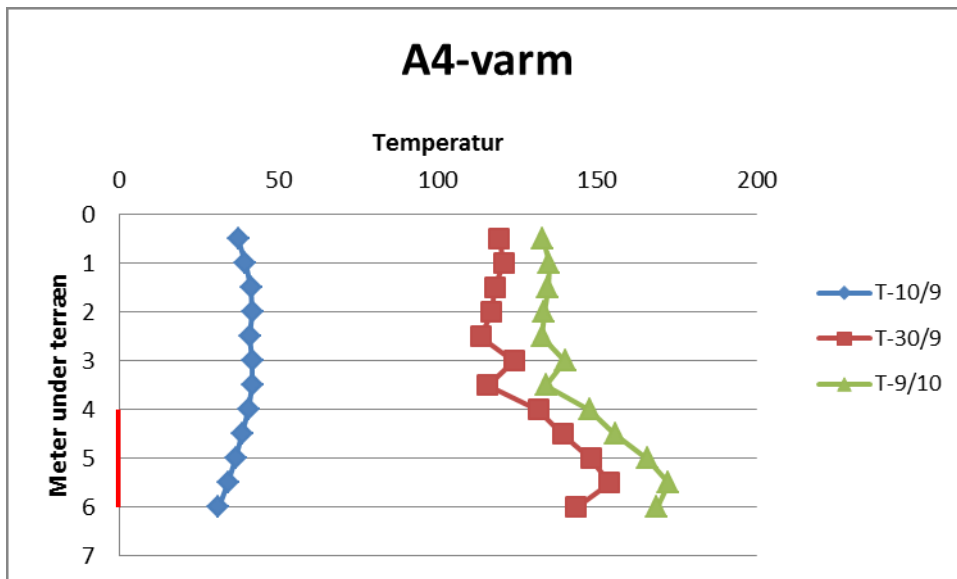
Figur 4-3: Temperatur udbredelse 30 °C den 9. oktober 2013

I nedenstående Figur 4-4 er temperaturudbredelse på 100 °C d. 9. oktober 2013 vist. Udbredelsen svarer til et volumen på 7 m³.

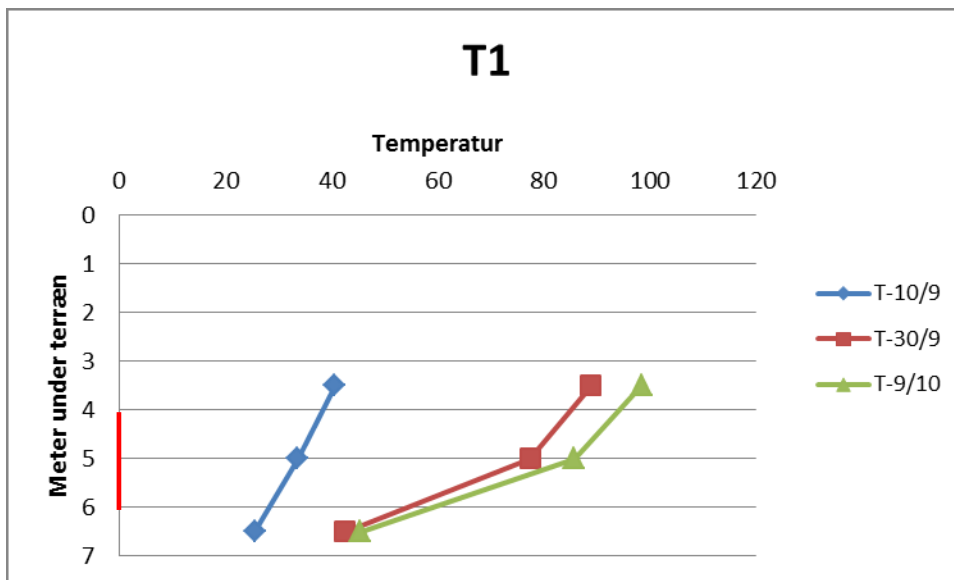


Figur 4-4: Temperatur udbredelse 100 °C den 9. oktober 2013. Denne grønne farve kan ikke ses på tidligere figurer, da temperaturen ikke har været så høj.

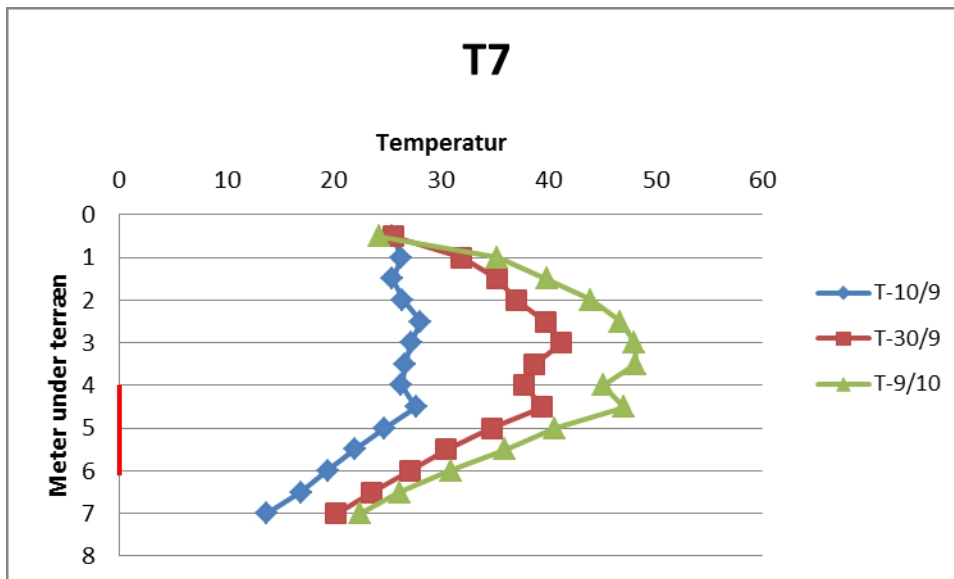
Som det fremgår af Figur 4-4 er der forskel i temperaturen afhængigt af dybden og afstanden fra antennen. I de nedenstående figurer er temperaturen vist som funktion af dybden. Som det ses af Figur 4-5 er der en høj starttemperatur omkring 30 °C omkring antennen, da der inden den egentlige driftsperiode havde været en lang indkøringsfase, hvor anlægget var startet og stoppet. Det ses ligeledes af figuren, at temperaturen i boring A4 er forholdsvis stabil ned til 4 m u.t., hvorefter temperaturen aftager. Af Figur 4-6 og Figur 4-7 ses det, at der er observeret højere temperaturer i monitoringsboringerne tættest på den varme antenne. I boring T1 placeret ca. 0,5 meter fra den varme antenne er der påvist op til 100 °C, mens der i boring T7 placeret ca. 2 meter fra den varme antenne er målt op til 50 °C.



Figur 4-5: Temperaturudbredelse med dybden i den varme antenne A4. Den ledende del af antennen er markeret med rød streg fra 4-6 m u.t.

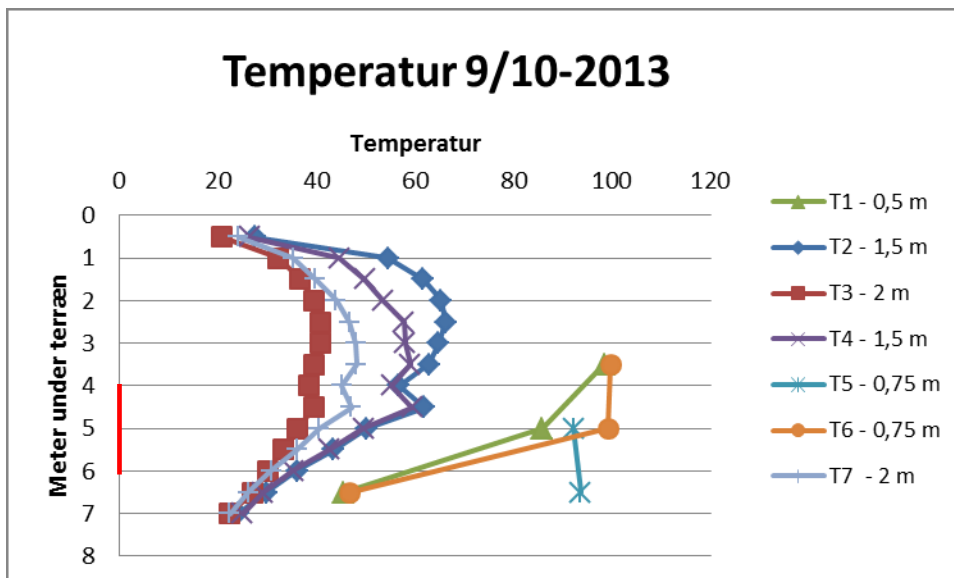


Figur 4-6: Temperaturudbredelse med dybden i temperaturmonitoringsboring T1 placeret ca. 0,5 meter fra A4. Den ledende del af antennen er markeret med rød streg fra 4-6 m u.t.



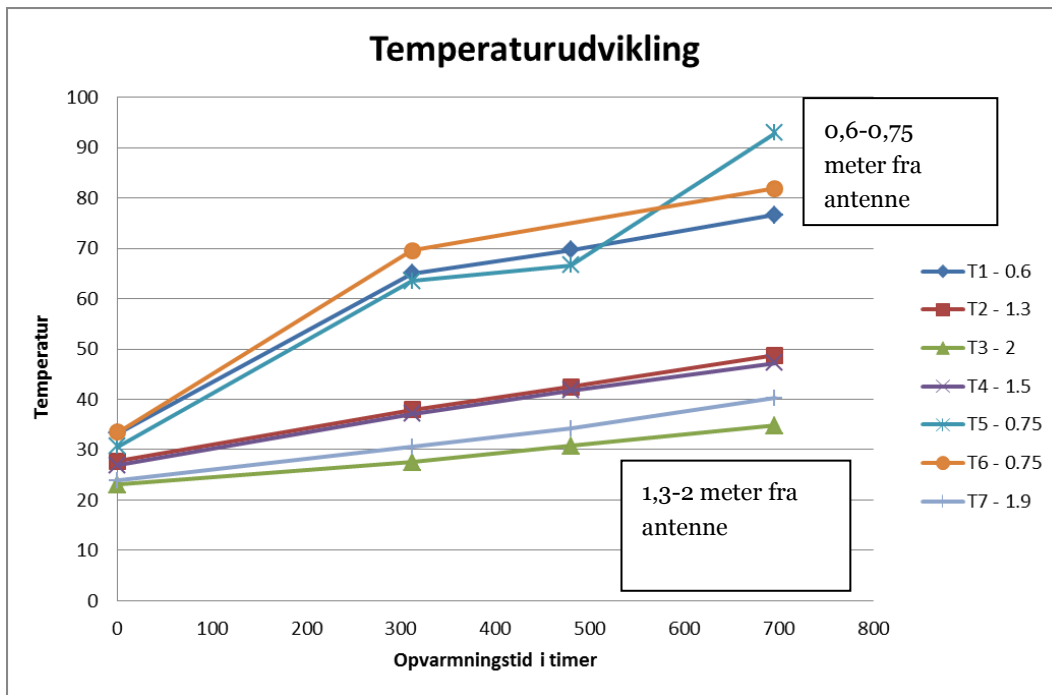
Figur 4-7: Temperaturudbredelse med dybden i temperaturmoniteringsboring T7 placeret ca. 2 meter fra A4. Den ledende del af antennen er markeret med rød streg fra 4-6 m u.t.

I temperaturmoniteringsboringerne ses der ikke en ensartet opvarmning over dybden, som vist i Figur 4-8. De højeste temperaturer ses i dybden 2-4 m u.t., hvorefter de aftager kraftigt ned mod 7 m u.t. Årsagen til, at der er aftagende temperaturer med dybden, kan skyldes tilstedeværelsen af terrænnært grundvand.



Figur 4-8: Temperaturudbredelse med dybden i samtlige temperaturmoniteringsboringer – 9. oktober 2013. Den ledende del af antennen er markeret med rød streg fra 4-6 m u.t.

På Figur 4-9 er den gennemsnitlige temperaturudvikling vist i samtlige temperaturmoniteringsboringer. Af figuren ses en hurtigere opvarmning i moniteringsboringerne tæt på den varme antenne i forhold til moniteringsboringerne længere væk fra boringen, hvilket også var forventet.



Figur 4-9: Gennemsnitlig temperaturudvikling i temperaturmoniteringsboringerne.

4.2 Feltstyrkemålinger

I forbindelse med indkøringen og driften af anlægget er der udført feltstyrkemålinger for at sikre, at feltstyrken ikke oversteg 27,5 Volt/meter udenfor byggepladshegnet.

Resultaterne fremgår af bilag 2 og placeringen af målepunkterne i bilag 1. I første målerunde blev der i punkt 1 målt højere feltstyrke end tilladt, hvorefter der blev udført justeringer i afskærmningen for at nedbringe feltstyrken. Herefter er der ikke påvist overskridelser af den fastsatte grænse for feltstyrken.

4.3 Energiforbrug

Data vedrørende opvarmningen og energiforbruget er vist i nedenstående Tabel 4-1. Af Tabel 4-1 fremgår det, at der er brugt 14.391,3 kWh i forbindelse med demonstrationsforsøget, heraf er det kun ca. halvdelen af energien, der er blevet afsat som HF-energi i den varme antenne. For at sammenligne energiforbruget med øvrige termiske metoder er energiforbruget udregnet pr. m³ opvarmet jord. Dette giver et energiforbrug på ca. 2.000 kWh/m³ fra 30 til 96°C.

Tabel 4-1 Data fra opvarmning ved radiobølger. Det er valgt en sluttemperatur på 96 °C for at kunne sammenligne med energiforbruget til ISTD og ERH.

| Opvarmning ved radiobølger | |
|--|----------|
| Temp start (°C) | 30 |
| Temp slut (°C) | 96 |
| Timer brugt til opvarmning til 96 °C (timer) | 620 |
| Opvarmet volumen (m ³) | 7 |
| Energi tilført (total) (kWh) | 14.391,3 |
| Energi tilført (elektrode) pr. elektrode (kWh) | 7521,9 |
| Energiforbrug pr. m ³ opvarmet jord (total) (kWh/m ³) | 2055,9 |
| Energiforbrug pr. m ³ opvarmet jord (elektrode) (kWh/m ³) | 1074,6 |

4.3.1 Sammenligning med ISTD og ERH

For at undersøge om energiforbruget ved RFH er sammenligneligt med øvrige termiske metoder, som ISTD og ERH har vi ud fra statusnotater på 2 andre termiske oprensninger udført i Region Hovedstaden udregnet energiforbruget for henholdsvis ISTD og ERH. Beregninger er udført på baggrund af statusnotater udarbejdet i forbindelse med de to oprensninger, samt data udleveret af Krüger for ISTD oprensningen.

Tabel 4-2: Sammenligning af energiforbrug, radiobølger, ISTD og ERH.

| | Radiobølger | ISTD-Vadsbyvej | ERH-Bregnerødvej |
|--|--------------|----------------|------------------|
| Temperatur start | 30 | 10,6 | 13 |
| Temperatur slut | 96 | 96,6 | 96 |
| Timer brugt til opvarmning til 96 °C (timer) | 620 | 2184 | 2520 |
| Opvarmet volumen | 7 | 71 | 47 |
| Energi tilført (total) pr. elektrode (kWh) | 14.391 | 25.686 | 11.905 |
| Energi tilført (elektrode) pr. elektrode (kWh) | 7.522 | 22.764 | 10.476 |
| Energiforbrug pr. m³ opvarmet jord (total) (kWh/m³) | 2.056 | 363 | 253 |
| Energiforbrug pr. m ³ opvarmet jord (afsat i elektrode) (kWh/m ³) | 1.075 | 322 | 222 |

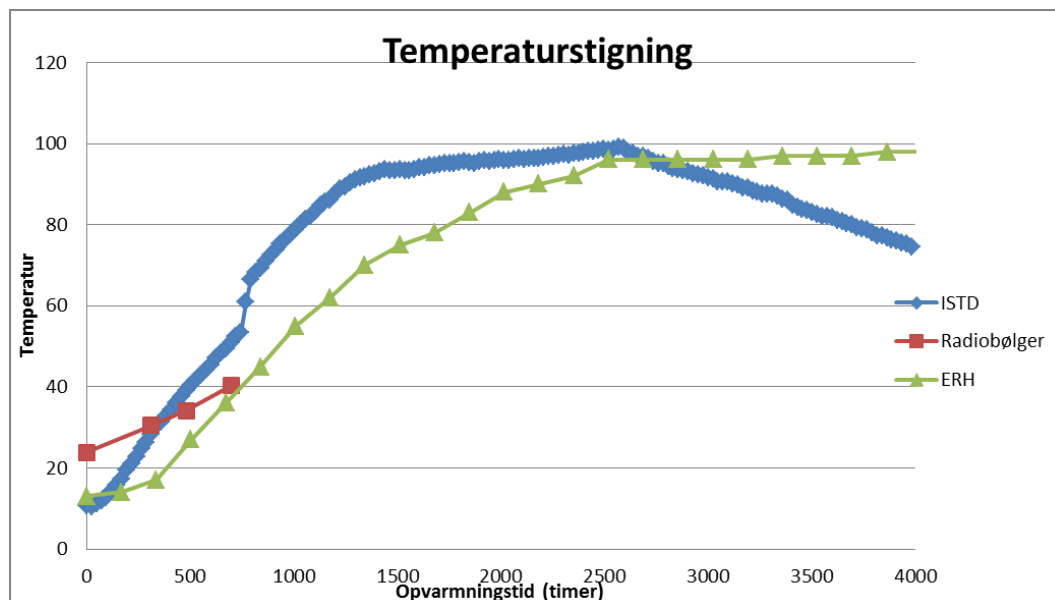
Ved alle tre beregninger er det forudsat, at jorden er opvarmet af én antenne/elektrode, hvilket i tilfældet med ISTD og ERH oprensningerne ikke er tilfældet. Vi har forsøgt at anvende data fra en elektrode placeret i yderområdet af oprensningsområdet samt en temperaturmoniteringsboring i samme afstand fra elektroden fra ERH/ISTD oprensningen, som det var tilfældet i demonstrationsforsøget med radiobølger. Beregningerne er vedlagt i bilag 3.

Som det ses af Tabel 4-2 har ISTD og ERH et væsentligt lavere energiforbrug end radiobølgerne. Dette skyldes i høj grad, at antagelsen om, at opvarmningen ved ISTD og i særdeleshed ERH kun er sket ved 1 elektrode ikke er korrekt. Forskellen i energiforbruget mellem ISTD og ERH afspejler også denne antagelse, da hele konceptet med ERH bygger på at opvarmningen sker fra flere elektroder.

I statusnotaterne udarbejdet af henholdsvis Krüger og Geo på de to sager, er energiforbruget til den samlede opvarmning angivet til 439 kWh/m³ for ISTD /2/ og 219 kWh/m³ for ERH /3/.

UFZ har i et tidligere opvarmningsforsøg angivet et energiforbrug på 945 kWh/m³ ved opvarmning med RFH /4/.

På nedenstående Figur 4-10 er gennemsnitstemperaturerne for de valgte temperaturboringer vist. Af figuren ses, at der i dette tilfælde sker en hurtigere opvarmning med ISTD og ERH i forhold til radiobølger.



Figur 4-10: Gennemsnitlig temperaturudvikling over tid med henholdsvis ISTD, radiobølger og ERH.

Det store energiforbrug ved demonstrationsforsøget kan delvis forklares ved et større varmetab, da vi, i modsætning til ISTD oprensningen på Vadsbyvej 16A og ERH oprensningen på Bregnerødvej 94, har opvarmet et væsentligt mindre område og kun med 1 antenne.

I nedenstående tabel 4-3 er det opvarmede areal i forhold til jordvolumenet udregnet for de tre metoder, og de områder brugt i energiudregningerne. Som det ses af tabellen, er der opvarmet et større areal pr. volumen ved demonstrationsforsøget med RFH i forhold ISTD og ERH oprensningerne. Forskellen mellem de tre metoder er dog ikke så stor, at det kan forklare hele det større energiforbrug.

Tabel 4-3: Udregning af forhold mellem opvarmet areal og volumen. For ERH er anvendt hele det opvarmede areal og volumen til beregningerne, da metoden er baseret på opvarmning ved flere elektroder.

| | Radiobølge | ISTD | ERH |
|---------------|------------|------|------|
| Areal | 63 | 108 | 860 |
| Volumen | 37 | 71 | 2100 |
| Areal/volumen | 1.70 | 1.53 | 0.41 |

5. Erfaringer fra projektet

Forløbet og resultaterne af aktiviteterne gennemført i projektet har vist, at der er tilknyttet en del udfordringer ved udførelse af termisk opvarmning med radiobølger.

Udfordringerne har især været knyttet til følgende:

- Drift af anlægget
- Kontrol af varmeudbredelse
- Tilstrømmende vand

Nedenstående tabel sammenfatter erfaringerne fra projektet.

Tabel 5-1: Erfaringer fra demonstrationsforsøget med termisk oprensning med radiobølger

|  |  |
|---|---|
| Metodemæssigt | |
| Der har ikke været målt overskridelser af de fastsatte grænser for feltstyrken i forbindelse med demonstrationsforsøget | Der er risiko for elektromagnetisk stråling ved metoden. Strålingsniveauet ændres igennem oprensningsforløbet i takt med at jorden udtørres. Det kan være vanskeligt at styre, hvor strålingen sker, så der skal være fokus på afskærmning. |
| Der er udviklet mere effektive generatorer, så energiforbruget kan mindskes. | Højt energiforbrug til at generere radiobølger. I forsøget er ca. halvdelen af energien brugt til at omsætte elektricitet til radiobølger. |
| Anlægsteknisk | |
| Fleksibel opstilling mulighed for skrå borer. I modsætning til ERH og ISTD, hvor der kun kan udføres lodrette borer. | Design og drift af anlæg kræver en stor grad af specialviden. |
| Forventede færre geotekniske udfordringer, grundet lavere temperaturer. | Svært at styre varmeudbredelsen præcist. Dette vurderes til dels at skyldes tilstedeværelsen af indstrømmende terrænnært grundvand. |
| Kan anvendes til opvarmning under bygninger, da antenner kan bores skråt ind under bygninger. | Temperaturmålinger, styring af generator og matchbox ved fiberoptiske kabler, der let går i stykker. Dette kan sandsynligvis mindskes ved brug af nyere kabler. |
| Den nye type af generatorer kan give en mere simpel opstilling med lavere energiforbrug end den anvendte i forsøgsopstillingen. | RF anlægget anvendt ved forsøget er et ældre anlæg og er udtjent. |
| | Der har ikke været muligt at opstille designparametre for fremtidige anlæg, da der har været for mange driftsproblemer. |

| | |
|-------------------------------------|---|
| Lokalitetsspecifikke forhold | |
| | <p>Tilstrømning af grundvand nedsætter udbredelsen af opvarmningen, da den dielektriske konstant for vand er 4 gange større for vand end jord. Indtrængningsdybde er dermed væsentlig mindre, hvis der er vand til stede, da energien hovedsageligt afsættes i vandet. Tilstrømmende grundvand vil herudover medvirke til yderligere nedkøling af jorden. Grundet vandindholdet er en stor del af energien anvendt til at opvarme og fordampe vand nær antennen i stedet for at opvarme jorden.</p> |
| Forsøgsdesign | |
| | <p>Varmetabet har været stort, da der er valgt et relativt lille område med en enkelt antenne til testen.</p> |

6. Anbefalinger

På baggrund af erfaringer med projektet vil vi anbefale, at mulighederne for at videreudvikle metoden mht. antenneudformning og en mere effektiv generator undersøges. Det forventes, at metodens energiforbrug vil være væsentligt lavere, hvis forsøgsområdet udvides, så der vil være et forholdsvis mindre varmetab og hvis der ikke sker en tilstrømning af grundvand forsøgsområdet.

En videreudvikling af metoden kunne udmøntes i et udredningsprojekt i samarbejde med f.eks. DTU Space, hvor muligheder for udformninger af antenner undersøges. Dette projekt kan også indbefatte afprøvning af forskellige antenntyper og en mere effektiv generator i en simpel opsætning. Herudover kunne det undersøges, om der er mulighed for at nedramme antenner i stedet for at skulle installere antennerne i borer. Det anbefales ikke at afprøve en mere effektiv generator i den anvendte forsøgsopstilling.

Referencer

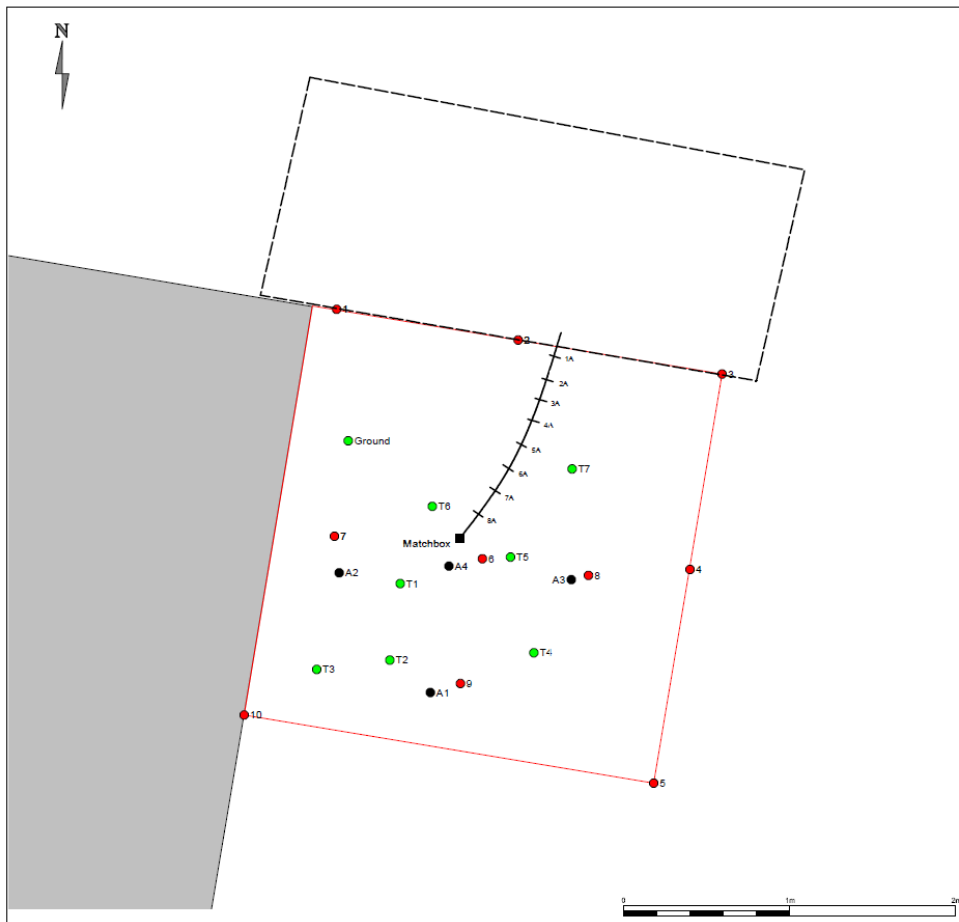
/1/: Capital Region of Denmark: Remediation action, Ådalsparkvej 63, Hørsholm, Denmark, Orbicon A/S, april 2012

/2/: Krüger, Statusrapport nr. 7, Vadsbyvej 16A, 7. december 2010.

/3/: GEO, Statusrapport nr. 23, Bregnerødvej 94, 9. oktober 2013.

/4/: Roland, U., mfl.. Engineering Aspects of Radio-Wave Heating for Soil Remediation and Compatibility with Biodegradation, Environmental Science and Technology 2008, 42, 1232-1237

Bilag 1: Situationsplan



Region Hovedstaden
Skovlunde Byvej 96A

- Eksisterende bygninger
- Container
- Hegn
- Antennekabel med punkterne 1-8
- Feltstyrkemålinger
- Antenne
- Temperaturboring juli 2013

Projekt: Radiobølge

| | | | |
|---|------------------|------------------------|------------------|
| Emne: Placering af antenner og temperaturboringer | | Skala: 1:40 | Dokument: DVR90 |
| Bygning: GITS | Indretning: KLBA | Ordre: OLEF 3641300003 | Dato: 20.02.2014 |
| Side: 1 | | Blad: 1 | |

Orbicon Ringstedvej 20 4000 Roskilde Tlf.: 46300310 www.orbicon.dk
 Fax: 46300311 mail@orbicon.dk

Bilag 2: Feltstyrkemålinger

| Dato | 15-08- 2013 | 28-08- 2013 | 10-09- 2013 | 18-09- 2013 | 25-09- 2013 | 01-10- 2013 |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Antennekabel | | | | | | |
| Pkt. 1 | 92 | 81 | 125,2 | 43,1 | 64,6 | 80 |
| Pkt. 2 | 135 | 106,7 | 183 | 75,8 | 78 | 122 |
| Pkt. 3 | 163 | 176,1 | 258 | 103,4 | 125,5 | 162,9 |
| Pkt. 4 | 200 | 130,4 | 212 | 103,3 | 106 | 123 |
| Pkt. 5 | 250 | 377 | 527 | 153 | 288 | 412 |
| Pkt. 6 | 240 | 85,5 | 98 | 80 | 69 | 108 |
| Pkt. 7 | 211 | 181,2 | 300 | 140 | 162 | 235 |
| Pkt. 8 | 125 | 60 | 142 | 40 | 59,5 | 62,3 |
| Målinger på byggepladshegn | | | | | | |
| Pkt. 1 | 34 | 16 | 25,5 | 3,2 | 12 | 12 |
| Pkt. 2 | 18 | 12 | 16 | 9 | 9 | 10,9 |
| Pkt. 3 | 3 | 2,1 | 2,5 | 1 | 10,5 | 17,3 |
| Pkt. 4 | 19 | 13,3 | 24,8 | 7 | 15 | 12,9 |
| Pkt. 5 | 18 | 16 | 25,2 | 8,5 | 10 | 8 |
| Pkt. 6 | 204 | 126,2 | 175 | 74,5 | 97,5 | 100,2 |
| Pkt. 7 | 97 | 88 | 119,2 | 55 | 74,3 | 76,2 |
| Pkt. 8 | 127 | 112,5 | 196 | 53,5 | 77 | 97,2 |
| Pkt. 9 | 216 | 168 | 243 | 82 | 140 | 153,5 |
| Pkt. 10 | 90 | 65,5 | 92 | 40 | 54 | 48,7 |

Bilag 3: Beregninger af energiforbrug

Data brugt til udregningen stammer fra de opsamlede data i forbindelse med demonstrationsforsøget. For ISTD er der anvendt data fra statusrapport af 7. december 2010 for oprensningen udført på Vadsbyvej 16 samt temperaturdata udleveret af Krüger A/S. For ERH er der anvendt data fra statusrapport nr. 23, uge 41 2013 for oprensningen udført op Bregnerødvej 94.

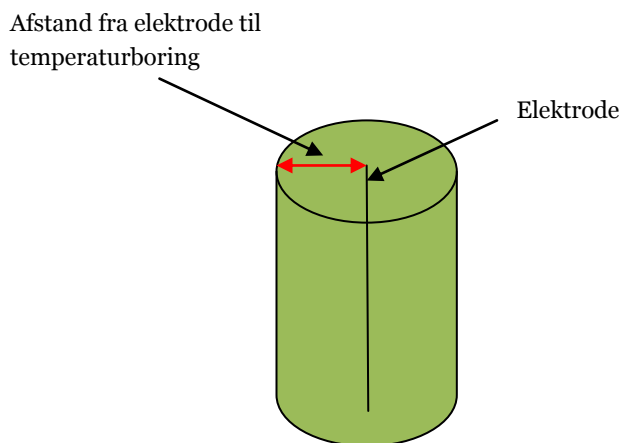
Tabel 1: Opsummering af data.

| | Radiobølger | ISTD-Vadsbyvej | ERH- Bregnerødvej |
|--|--------------|----------------|-------------------|
| Temperatur start | 30 | 10,6 | 13 |
| Temperatur slut | 96 | 96,6 | 96 |
| Timer brugt til opvarmning til 96 °C (timer) | 620 | 2184 | 2520 |
| Opvarmet volumen | 7 | 71 | 47 |
| Energi tilført (total) pr. elektrode (kWh) ¹ | 14.391 | 25.686 | 11.905 |
| Energi tilført (elektrode) pr. elektrode (kWh) | 7.522 | 22.764 | 10.476 |
| Energiforbrug pr. m³ opvarmet jord (total) (kWh/m³) | 2.056 | 363 | 253 |
| Energiforbrug pr. m ³ opvarmet jord (elektrode) (kWh/m ³) | 1.075 | 322 | 222 |

¹Energiforbruget pr. elektrode er direkte aflæst for radiobølger, for ISTD og ERH er det beregnet ved at dividere det samlede energiforbrug med antallet af elektroder. For ISTD på Vadsbyvej var der 22 elektroder. For ERH på Bregnerødvej var der 21 elektroder.

Forudsætninger:

For alle tre metoder er der beregnet ud fra en antagelse om at opvarmningen sker ved 1 elektrode og opvarmningen sker som en cylinder. Princippet er vist på figuren nedenfor.



Beregning af volumen:

Det opvarmede volumen for radiobølger er beregnet på baggrund af den opstillede 3D model.

For ISTD og ERH er volumenet beregnet ved:

Tabel 2: Beregning af volumen

| | Længde af elektrode (meter) | Afstand mellem elektrode og temperaturmonitoring (m) | Volumen (m ³) |
|-------------------|-----------------------------|--|---------------------------|
| ISTD ¹ | 10 | 1,5 | 71 |
| ERH ² | 15 | 1 | 47 |

¹For ISTD er data brugt fra T4. Antaget at den kun får opvarmning fra 1 varmeboring (HV18).

² For ERH er data brugt fra T4. Antaget at den kun får opvarmning fra 1 elektrode (E4B).

Demonstrationsforsøg for radiofrekvens-styret termisk oprensning

Regionerne i Danmark efterlyser nye metoder til at oprense forurening. Især kan det være vanskeligt at udføre oprensninger under bygninger og mellem mange installationer i jorden, som vi ofte ser i byområder.

I rapporten er resultaterne af et demonstrationsforsøg med radiofrekvens-styret termisk oprensning afprøvet. Metoden er under udvikling men har vist lovende resultater både omkring opvarmning af jorden og den fleksibelt installation i jorden.

Forsøget viser, at det er muligt at opvarme moræneler til 100 °C, men at energiforbruget er væsentligt højere end for andre termiske metoder. Metoden er dog stadig mere fleksibel end de øvrige termiske metoder og derfor anbefales det at fortsætte med at udvikle på antenne udformning og installation samt installation af antennerne i jorden.



Miljøministeriet
Naturstyrelsen

Haraldsgade 53
DK - 2100 København Ø
Tlf.: (+45) 72 54 30 00

www.naturstyrelsen.dk