



Effektivisering af grundvands- kortlægnings- projekter

MUDP-projekt

MUDP

November 2025

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:
Kristoffer S. Mohr

Grafiker/bureau:
SkyTEM Surveys

Fotos:
SkyTEM Surveys

ISBN: 978-87-7564-056-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Indledning	5
1.1	Projektets mål	6
2.	Metodebeskrivelse	7
3.	Gennemførelse af projekt - opfyldelse af delmål	8
3.1	Delmål a) Udvikle vibrationsdæmpning af modtagersystem	8
3.2	Delmål b) Reducere forstærkerstøj og optimering af spoleparametre.	11
3.3	Delmål c) Udvikling af bæretårn til de nye modtagersystemer	12
3.4	Delmål d) Udvikling og optimering af digital modtager system	14
3.4.1	Digitalt modtagersystem	14
3.4.2	Integrationssoftware	17
3.4.3	Udvikling af integreret forforstærker og IMU	17
3.4.4	Støjfænomen fra test i november/ december 2018	18
3.4.5	Dataformat	19
3.4.6	Reduktion af støj gennem gatestruktur	20
3.4.7	Udnyttelse af ny gatestruktur	20
3.4.8	B-felts resultater fra integrations test marts 2019	22
3.5	Delmål e) Integrations- og verifikationstest	25
3.5.1	Hvad gik godt og hvad gik ikke godt	26
3.5.2	Samlet oversigt over test, integrationstest og videre forløb	26
3.5.3	Integrationstest	27
3.5.4	Efterfølgende forløb	28
4.	Resume	29
5.	Konklusion og afsluttende bemærkninger	30

1. Indledning

De globale klimaforandringer udgør en stadig større udfordring ift. at opretholde en stabil vandforsyning, og en kortlægning af grundvandsressurserne spiller derfor en stadig større rolle for de enkelte landes udvikling. Det forventes desuden at kunne være årsag til store geopolitiske konflikter i årene frem, og aktuelt er Sydafrika og Cape Town fanget i en krise med mangel på vand. En række lande har allerede større planer om kortlægning af ressourcerne, bl.a. USA, Australien, Indien og Canada. Kortlægning af ressourcen vil blive en væsentlig forudsætning for at kunne finde bæredygtige løsninger på vandforsyningen mange steder i verden fremover. Kortlægning af grundvandsressourcen er ofte regional og omfatter meget store arealer, samtidig med at ressourcerne findes stadig dybere på grund af den højere udnyttelse. Udvikling af SkyTEM's måleudstyr er helt afgørende for at imødekomme denne efterspørgsel samt for at bibeholde nuværende unikke position på grundvandskortlægningsmarkedet.

I denne sammenhæng har SkyTEM forestået udvikling af et luftbårent måleudstyr til kortlægning af grundvandsressourcen fra luften. Udstyret er monteret på bærerammer båret af en helikopter. Det er således muligt at operere med dette udstyr uden stor mobilisering overalt i verden og selv i svært tilgængeligt terræn såsom sump, skov og bjergområder.

Fremtidens krav til luftbårne målesystemer til grundvandskortlægning er, at det kan "se dybt" og samtidig give målinger, der kan opløse de overfladenære lag, hvori beskyttelsen af grundvandet ofte er lokaliseret i form af ikke-permeable lerformationer eller andre formationer, hvor forureningen tilbageholdes eller omdannes.

Det drejer sig ofte om store arealer, der skal kortlægges. Derfor er det nødvendigt, at metoden er omkostnings-effektiv, så den vil være attraktiv at benytte eller mulig at benytte inden for de ofte stramme økonomiske rammer, der er i forbindelse med grundvandsundersøgelser.

Kortlægningen foregår ved, at områderne overflyves langs tætliggende flyvelinjer, mens der måles med udstyret. Udgiften til helikopteren, som er en timeafregning, udgør den største del af det samlede budget (typisk 50 – 60 %) og det er derfor væsentligt at nedbringe denne omkostning ved at øge flyvehastigheden.

Dette projekt handler om at udvikle 3. generationsmodtagersystem med reduceret støjniveau, større båndbredde samt digital støjundertrykkelse. Alt dette vil gøre, at projektgruppen bedre kan udnytte denne hurtigt flyvende platform, da støj stiger med hastigheden, eller udnytte det forbedrede signal/støjforhold til at reducere vægten på dette sendersystem.

1.1 Projektets mål

Der er fem delmål i projektet:

- a) Udvikle vibrationsdæmpning af modtagersystem.
- b) Reducere forstærkerstøj og optimering af spoleparametre
- c) Udvikling af bæretårn til de nye modtagersystemer.
- d) Udvikling og optimering af digital modtager system.
- e) Integration og verifikationstest

Delmålene er alle rettet mod udvikling af et luftbåret system til kortlægning af de øverste samt dybe grundvandsressurser, hvor:

- Hastigheden gennem lufthavet er høj, så omkostningerne til helikopter kan reduceres
- Fuel på helikopteren bliver den begrænsende faktor i ekstreme miljøer.

2. Metodebeskrivelse

For at have en overordnet forståelse af den luftbårne TEM-metode og dermed en baggrund for indsigt i de nedenfor beskrevne udviklinger, vil metoden være kort gennemgået.

I TEM-metoden [Transient Elektromagnetisk Metode] induceres - ved hjælp af udsendt strøm i en senderspole anbragt på en bæreramme - en hvirvelstrøm i de ledende lag i den underliggende jordformation. Senderspolen udsender et magnetisk moment, som er bestemmende for størrelsen af det inducerende felt og dermed for de i jordlagene inducerede strømme. Momentets størrelse er en essentiel parameter for en stor dybdeindtrængning.

Efter strømmen er afbrudt, og magnetfeltet fra senderspolen klinget ud, måles responserne fra de inducerede hvirvelstrømme i jordlagene med en modtagerspole ligeledes anbragt på bærerammen.

Det forholder sig således, at responser målt til tidlige tider [få μ sek.] - efter slukket - hidrører fra hvirvelstrømme i de øverste dele af jordformationen, og responser målt til sene tider [få milisek.] - efter slukket - refererer til de dybere ledende dele af jordformationen.

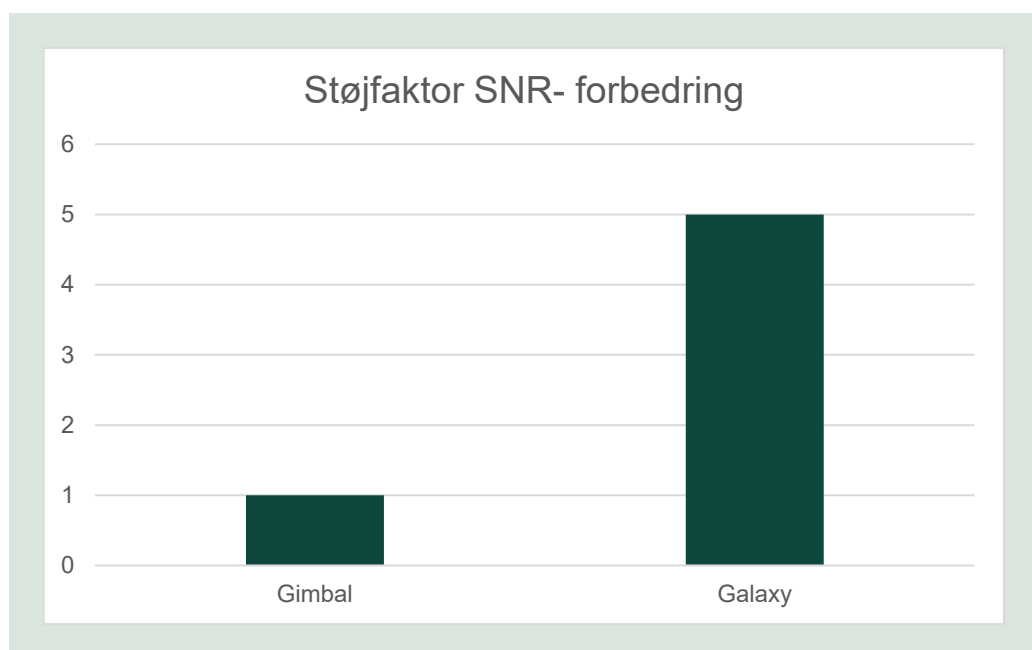
Disse hvirvelstrømme og deres magnetiske respons kan simuleres i en matematisk/fysisk model. Fortolkningen af de målte responser foregår gennem en iterativ proces, hvor den elektriske ledningsevne/modstand af de enkelte lag bestemmes og derefter danner grundlag for den hydrogeologiske fortolkning og dermed for bestemmelse af grundvandsmagasinerne placering, deres indbyrdes sammenhænge og deres beskyttelse i de øvre jordlag.

3. Gennemførelse af projekt - opfyldelse af delmål

3.1 Delmål a) Udvikle vibrationsdæmpning af modtagersystem

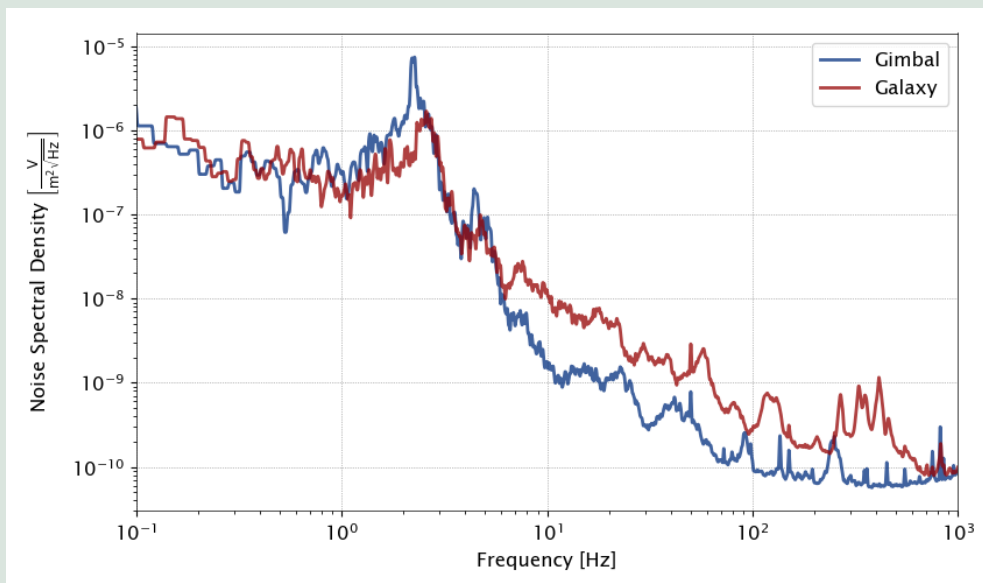
Mekanisk vibrationsdæmpning af modtagerspolesystemet er blevet videreudviklet fra tidligere generation. De kortlagte spoleparametre fra delmål b har desuden givet anledning til kombinerede forbedringer, som er indarbejdet i designet. Mange års feltoperationer er også taget med i betragtning ift. det endelige design.

Det nye design giver en reduktion i vibrationsstøj og omregnet til SNR på 5 (Signal Noise Ratio) ift. TEM-nyttesignalerne. Dette er illustreret i FIGUR 1.



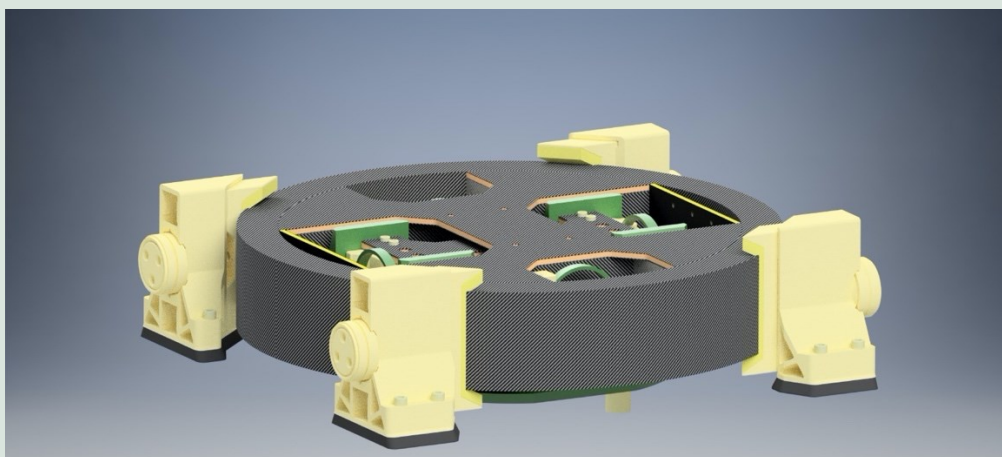
FIGUR 1. SNR fra udviklet modtagerspolesystem set ift. tidligere generation.

TEM-nyttesignalerne kommer ind ved smalle frekvensbånd omkring 25 Hz, 75 Hz, 125 Hz,...etc. Det ses i FIGUR 2 af de aktuelle målinger at forbedringen kommer i området over 7 - 8 Hz. Ved opsummeringen over alle nyttebåndene opnås forbedring.



FIGUR 2. Målt spektrogram af henholdsvis tidligere modtagersystem og udviklet modtagersystem. Der ses en tydelig reduktion i støj over 7-8 Hz.

Materialevalg har været essentielt i denne del af udviklingen, for at designet ikke skulle komme til at veje for meget og dermed ikke være realistisk at udføre. Det har betydet, at projektgruppen nu kan basere modtagerspole på kulfiber, hvilket er meget stift, men også elektrisk ledende. Den ældre type "Galaxy" af modtagerspoler var baseret på de materialer, som tidligere fastmonterede spoler var baseret på. Det betød en meget ringe mekanisk rigiditet og gav dermed anledning til resonanser, hvilket ses i FIGUR 2 i Galaxy over 100Hz. Den ældre type "Galaxy" af spoler benyttede skærm maling (materialet er halvleder) til at skærme for elektriske koblinger. Ved at kunne udnytte kulfiber i konstruktionen har det været muligt at øge spolens egne svingninger/ resonanser betydeligt. Se FIGUR 3 for design CAD-model.



FIGUR 3. CAD-model af Gimbal modtagersystemet. Denne udvikling har vist sig at være så signifikant, at der er ved at tages patent. Det er især det robuste design og muligheden for at tune systemet, der er afgørende.

Ophængningskonceptet er ændret til at tage højde for laterale vibrationer, der kobler indirekte til mekanisk støj. Det har igen været materialevalg, der har været afgørende for, at det nye design har kunnet lade sig gøre. Den gamle type af vibrationsdæmpet modtagerspole benyttede en simpel bladfeder-konstruktion, og den har været meget pålidelig. Konceptet har en grundlæggende begrænsning, der ikke tager højde for de laterale vibrationer samt kan ikke tunes til andre og lavere resonansfrekvenser.

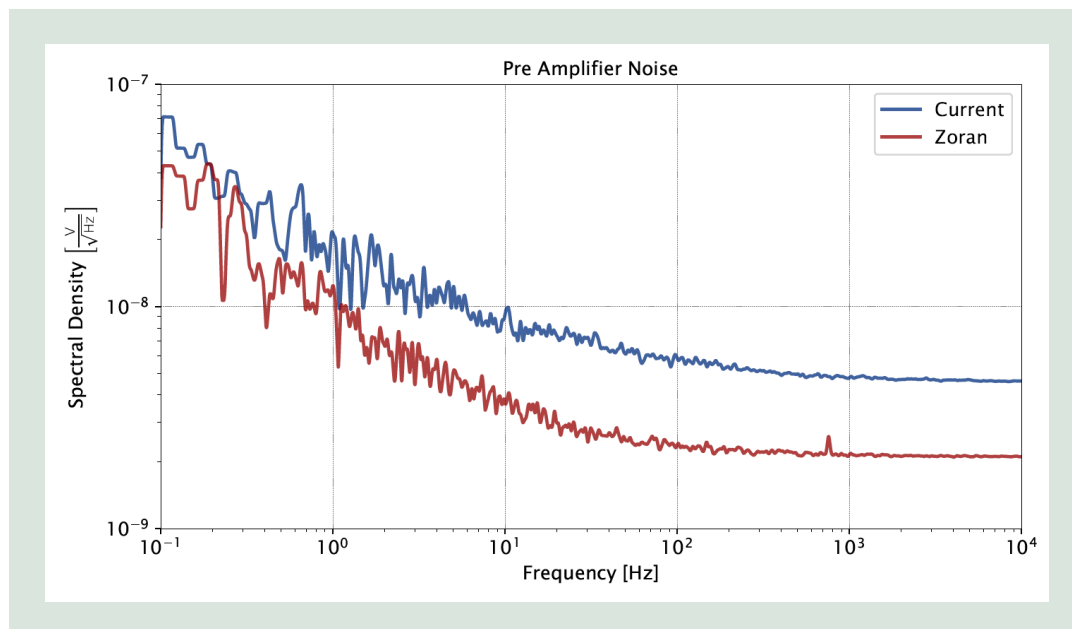


FIGUR 4. Modtagersystem monteret i testtårn. Før test af modtagersystemet.

Siden afslutningen af MUDP-projektet er modtagersystemet blevet fundet så velfungerende at projektgruppen har haft mulighed for at udnytte den til dybere geologiske mål, end projektgruppen hidtil havde troet muligt. Den har muliggjort, at der kan tilbydes 12.5 Hz data, samt for nyligt også blevet testet til at kunne levere data helt ned til 6.25 Hz. Det har kun været muligt at gennemføre igennem MUDP. Testområder har fundet sted gennem et andet projekt SmartExploration, hvor projektgruppen kom i kontakt med et andet Horizon 2020 projekt - Infact, der kunne stille relevant område til rådighed. Resultaterne har været vist på PDAC 2020. Som tidligere nævnt udtages patent på konceptet, da det har vist sig at være afgørende for disse produkter.

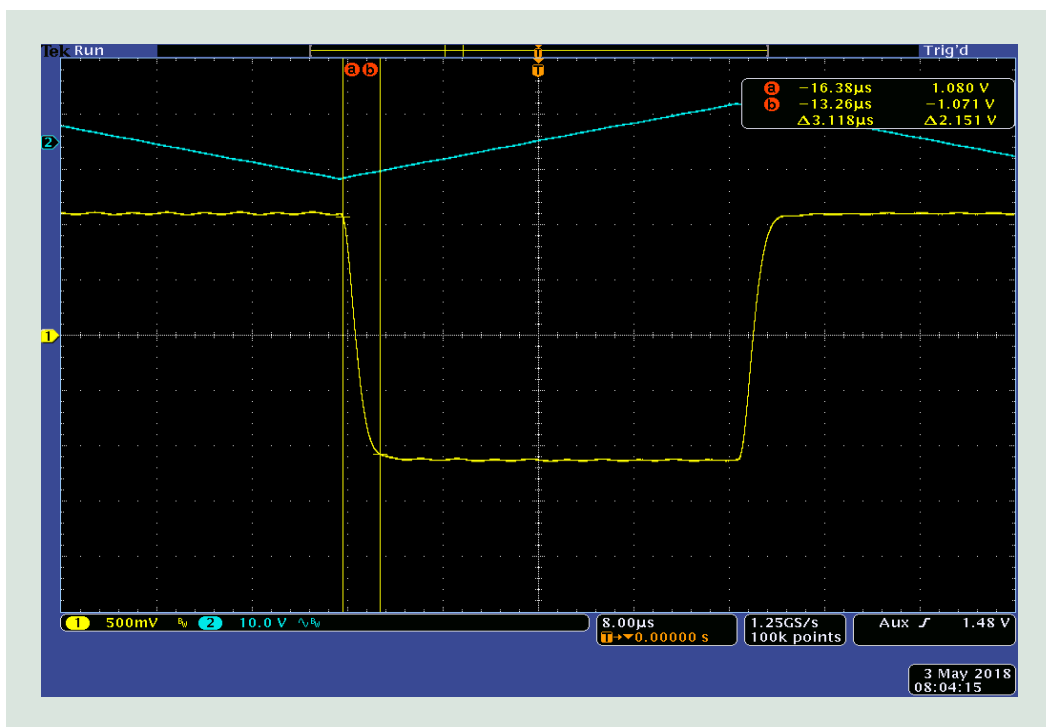
3.2 Delmål b) Reducere forstærkerstøj og optimering af spoleparametre.

De afgørende spoleparametre er blevet kortlagt og optimeret. Det har vist sig, at projektgruppen kunne opnå den største forbedring i forforstærkerkredsløbet til spolerne. Forforstærkerkredsløbet har projektgruppen udviklet på, og er ved at undersøge, om kredsløbstopologien er patenterbar. Det nye design giver en reduktion i den elektroniske støj og omregnet til SNR på 2.5 (Signal Noise Ratio). Dette ses i FIGUR 5.



FIGUR 5. Spektrogram af ældre forforstærker kredsløb vs. nyere design.

Den forbedrede forforstærkerkredsløbstopologi og de optimerede spoleparametre har yderligere givet anledning til et større spoleareal ved flere vindinger (flere vindinger giver normalt anledning til lavere båndbredde), en øget båndbredde og omregnet til en SNR-forbedring på ca. 3. Dvs. at projektgruppen har opnået en båndbredde på 300 kHz, hvor den før ville ligge på omkring 90-100 kHz. Dette ses i FIGUR 6.



FIGUR 6. Måling af båndbredden ved at se på indsvingning efter ændring af input.

Svagstrømsingeniør Bo Bjerre og fysiker Gregers Poulsen har forestået arbejdet med at kortlægge spoleparametrene og udvikle et helt nyt forforstærkerkredsløb, og de har produceret flere forskellige prototyper samt indbygget det i nye prototyper af modtagerspoler (WP 1). Ifb. med indledende test i april 2018 har de vist, at forbedringerne også gør sig gældende på selve TEM-systemet. Nyere viden: Der viste sig ved efterfølgende analyse, at der opstod sporadisk støj, hvilket de brugte efterfølgende mere end 1,5 år på at få styr på.

Det har været ret afgørende for projektet at spoleparametrene blev kortlagt så tidligt som muligt for at give input til det videre forløb i WP 1 og WP 3. Det er desuden meget afgørende ift. at kortlægge de øverste jordlag, at båndbredden af modtagersystemet er høj.

3.3 Delmål c) Udvikling af bæretårn til de nye modtagersystemer

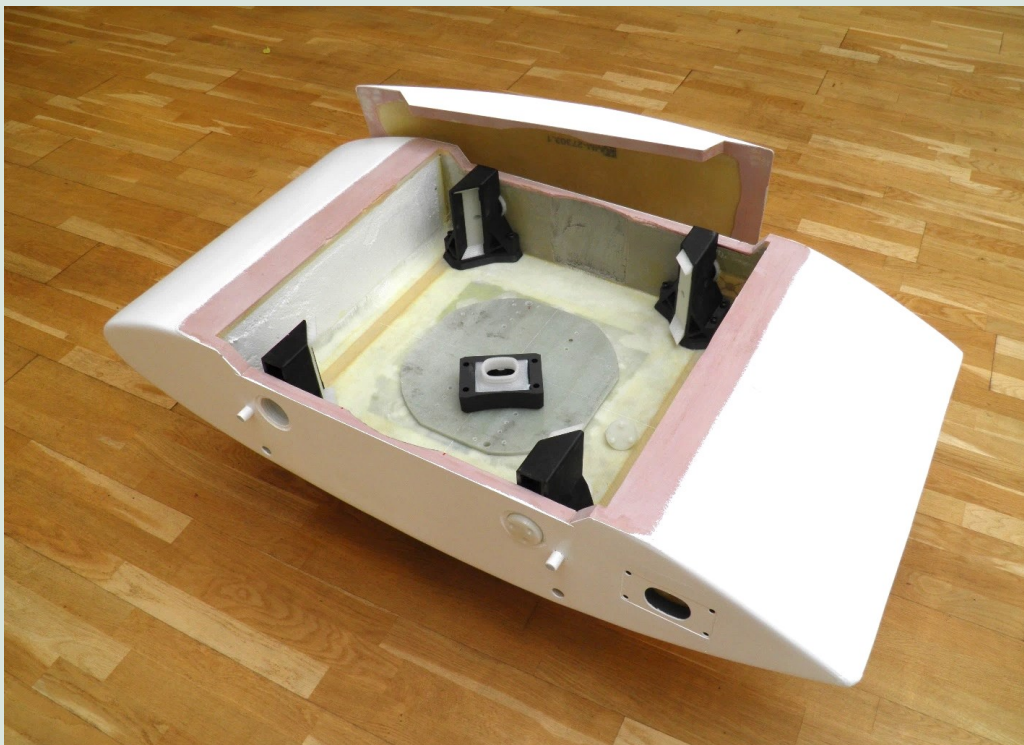
Et bæretårn til de nye modtagerspoler er udviklet. Mekanisk støj er blevet reduceret, og test har vist vejen frem mod et endnu bedre koncept, der forsøges patenteret. Projektgruppen har investeret i 3D-print for at kunne udvikle i større hastighed; her viser materialevalg og produktionsvalg sig at være afgørende for hastigheden.

Bæretårnet er lavet efter at kunne indgå i det nuværende koncept, så projektgruppen kunne komme til at afprøve de nye modtagerspoler. I FIGUR 7 herunder ses tårn med låg.



FIGUR 7. Modtagertårn til udviklet modtagersystem.

Tårnet er lavet i en glasfiberforstærket skal med skum indvendigt til at reducere vibrationer, inden de når bæreplatformen. Test viste, at visse elementer skulle forstærkes, og at et koncept til at kunne transportsikre modtagerspolerne ville være essentielt. Det har dog været muligt at tilføje disse elementer ved at benytte 3D-print. Transportsikringerne ses i FIGUR 8. 3D-print har også muliggjort, at en ny metode til at stille spole i en korrekt position er indarbejdet, hvilket muliggør endnu mere præcis indstilling af modtagersystemet og vil dermed kunne give anledning til bedre data til tidligere tider.



FIGUR 8. Modtagertårn udviklet til at indeholde nyeste modtager system med indbygget transportsikring.

3.4 Delmål d) Udvikling og optimering af digital modtager system

Dette delmål har givet flest udfordringer af alle. Resultater fra delmålet har ladet vente på sig og har derfor skubbet afrapporteringen af MUDP-projektet. Det har været et stort ønske at få udnyttet udviklingerne kommercielt. Delmålet har dog også muliggjort flere landvindinger, som SkyTEM nu kan høste frugterne af. Nye systemer er her et år efter ved at blive introduceret til markedet. Se [opslag på LinkedIn](#).

3.4.1 Digitalt modtagersystem

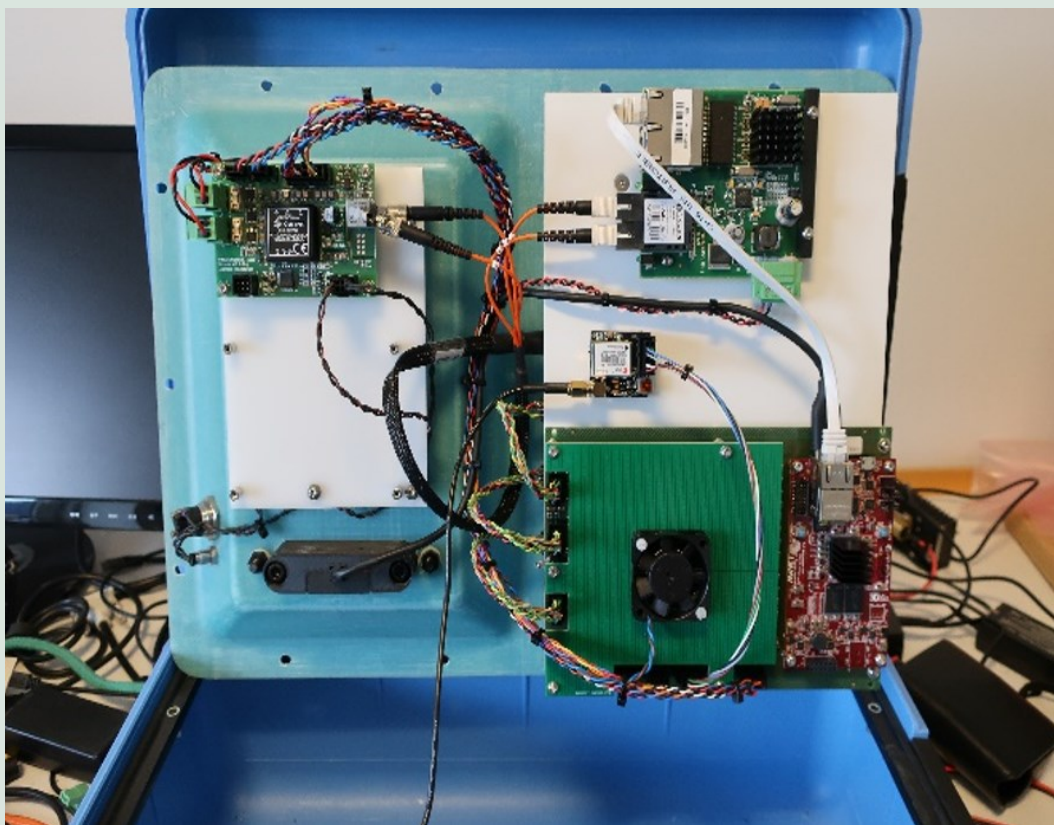
Den digitale modtager er bygget op omkring en FPGA, der operer ved 5 MHz sampling og med et indarbejdet digitalt filter med en afskæringsfrekvens på 1 MHz. Det muliggør mere end en tredobling af båndbredden på SkyTEM's modtagersystemer fremadrettet og baner dermed vejen for tidligere tids data og dermed en nøjagtig opløsning af de øvre lag af jorden. Denne udvikling og sammen med de øvrige delmål bl.a. delmål b optimering af forforstærkeren kan projektgruppen nu kigge ind i systemer, der muliggør tidligere tidsdata.



FIGUR 9. Harddiskholder og dobbelt batteriholdere til standard 18 V makita-batterier muliggør, at projektgruppen kan undlade at skulle sende batteri med som farligt gods.

Udvikling i denne retning har stor betydning for at holde konkurrenterne fra vandkortlægning, som SkyTEM er kendt for og er første valg i denne sammenhæng.

Den digitale modtager kan potentielt måle 3 spoler på samme tid, igennem 6 kanaler, dvs. 2 kanaler til hver spole. Den ene kanal måler nuværende dB/dt, denne har indbygget en front gate, som slukker for forforstærkeren under primærsignalet/feltet fra sender system. Det muliggør, at forforstærkeren ikke er forstyrret, når den skal måle de svageste signaler, og gain kan derfor sættes højere, hvorved projektgruppen dermed kan måle med mindre støj til senere tider. Den anden kanal måler B ved at integrere dB/dt igennem hele måle sekvensen dvs. gennem primærfeltet. Dette giver et produkt der giver målinger til senere tider. Denne sidste del med B-felts data blev testet i marts 2019 sammen med de afsluttende integrationer.



FIGUR 10. Undersiden af fiberlåget på den digitale modtager, med batteristyring, GPS, FPGA og netværk. Giver nemt adgang til at inspicere og servicere.

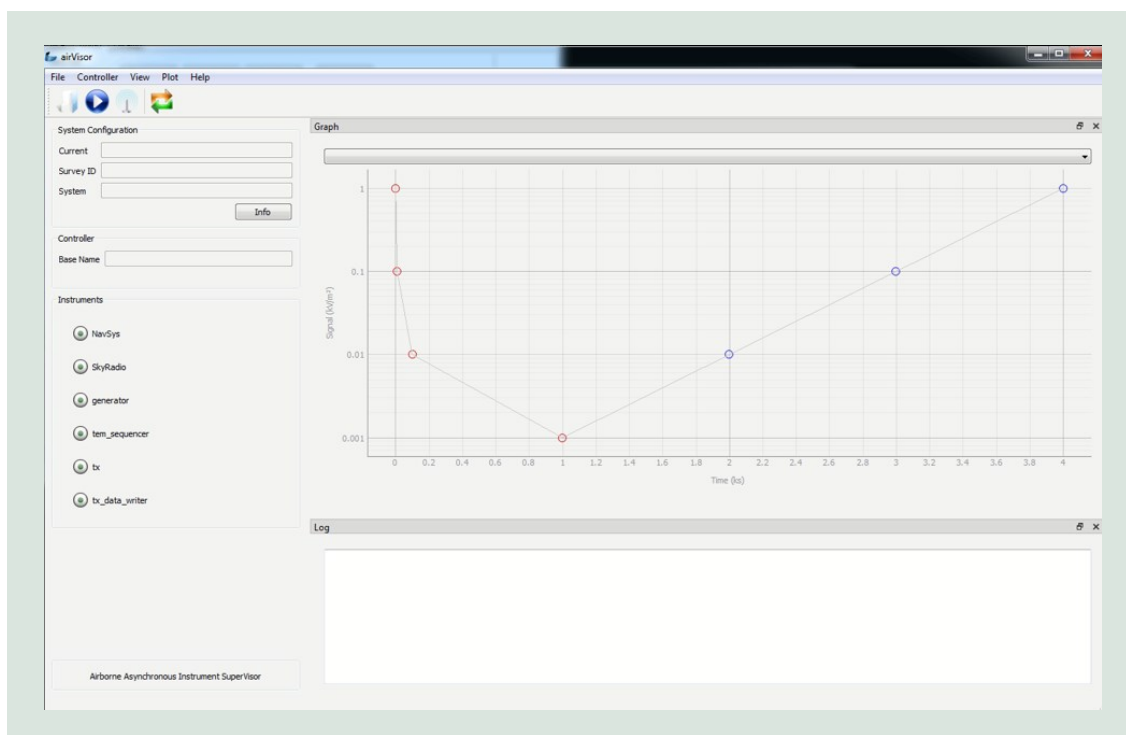
Den digitale modtager er blevet bygget op på en kompositplade, se FIGUR 10, (udviklet og støbt in house) og opbygningen gør det nemt at kunne servicere. Der er udviklet en ny type strømforsyning, der muliggør operation med dobbelt batteri, hvilket giver ekstra sikkerhed og gør det muligt at skifte batteri uden at skulle nedlukke systemet.



FIGUR 11. Indgange placeret på et skråplan, så ledningerne ikke bliver bukket.

3.4.2 Integrationssoftware

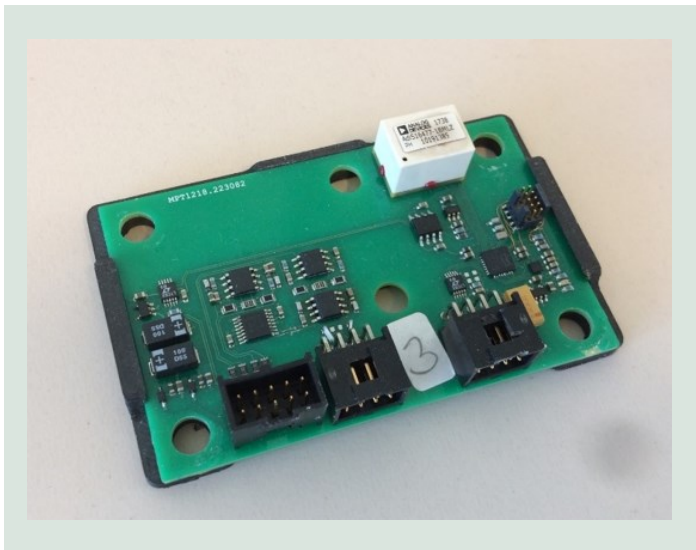
En stor del af kræfterne er gået med at få integreret den digitale modtager i nuværende operationssystem. Det har været vigtigt ift. at kunne operere systemet til felttest og efterfølgende i felten. Et af de mest synlige beviser på dette er Airvisor software. Softwaren tjekker, at alle systemer er startet og at de melder "fri for fejl", før en operation kan afvikles. En af udfordringerne har været at gøre det muligt at binde gamle systemer sammen med nye samt at integrere programmer baseret på forskellige sprog.



FIGUR 12. Airvisor interface til digitalt modtagersystem.

3.4.3 Udvikling af integreret forforstærker og IMU

Efter resultaterne fra forforstærkerudviklingen i delmål b fortsatte udviklingen med at integrere IMU og forforstærker på et samlet print. Det arbejde var afsluttet før testene i november 2018, se FIGUR 13.



FIGUR 13. Forforstærker integreret med IMU enhed.

Integrationen muliggjorde at minimere kabling inde i modtagerkonstruktionen og dermed ikke at underminere den mekaniske performance af modtagersystemet på trods af ekstra kabling til de flere forbindelser.

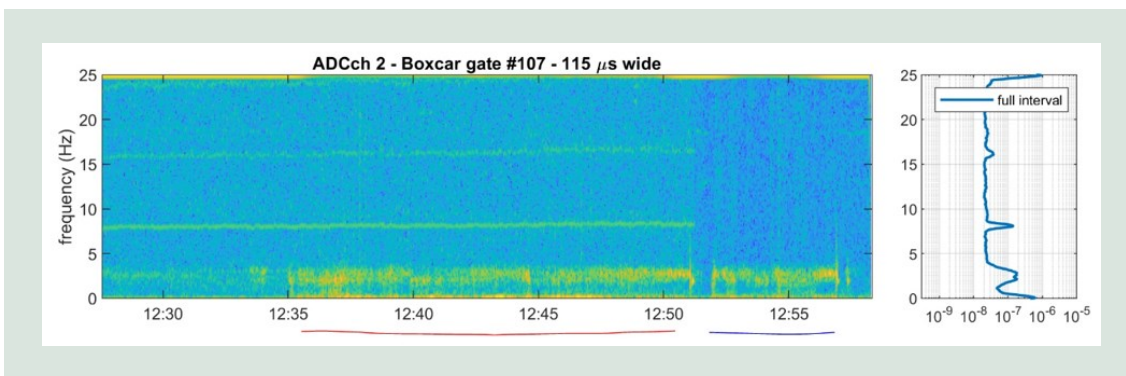
I de senere integrationstest viste det sig desværre, at støjfænomener ikke muliggjorde et sådan design.

Arbejdet fortsatte med IMU-enheden, dog separat fra forforstærkeren. Igen viste det sig i integrationstest, at end ikke dette var muligt og som beskrevet. Potentialet for en IMU-løsning er derfor sat på en anden udviklingsvej, hvor projektgruppen vil kunne eftervise, hvor meget der vil kunne opnås ved at udnytte den mekaniske overføringsfunktion til at trække uønsket støj-signaler ud af det målte data. Rent operationelt kan IMU-delen udnyttes til at monitorere den mekaniske performance ved mistanke om fejl eller pålidelighed og er derfor ikke spildt arbejde.

3.4.4 Støjfænomen fra test i november/ december 2018

I FIGUR 14 ses det, at IMU'en støjede mere, end projektgruppen ville forvente under flyvning i tidsrummet fra 12:35 til 12:50, mens det i en kort flyvning omkring 12:55, hvor IMU'en er slukket, ses, at støjen er reduceret (mørkere farveskala).

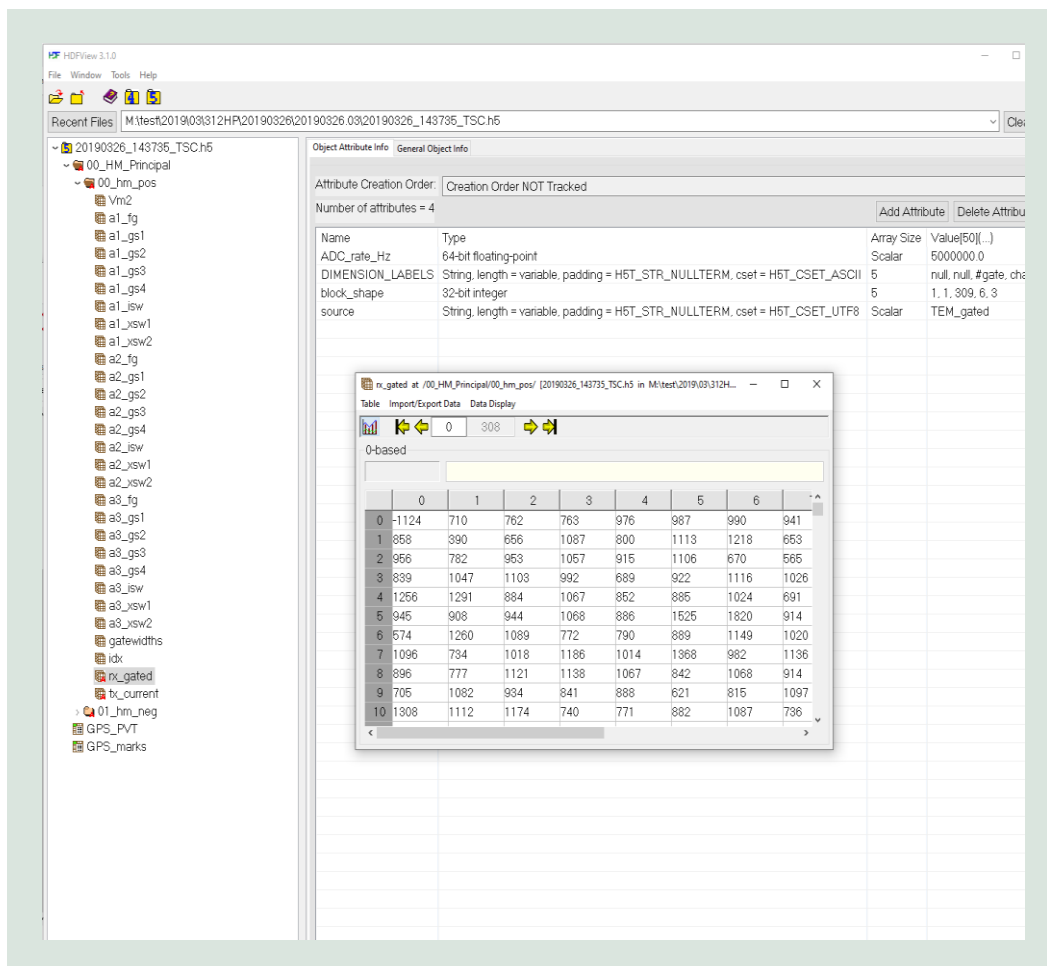
Det har efterfølgende vist sig at være relateret til samplingsraten på 2 kHz, som ikke var forventet, men formodes at kunne koble sig ind via det synkrone strømtræk, fra de involverede elektriske komponenter.



FIGUR 14. Testdata fra test i december 2018.

3.4.5 Dataformat

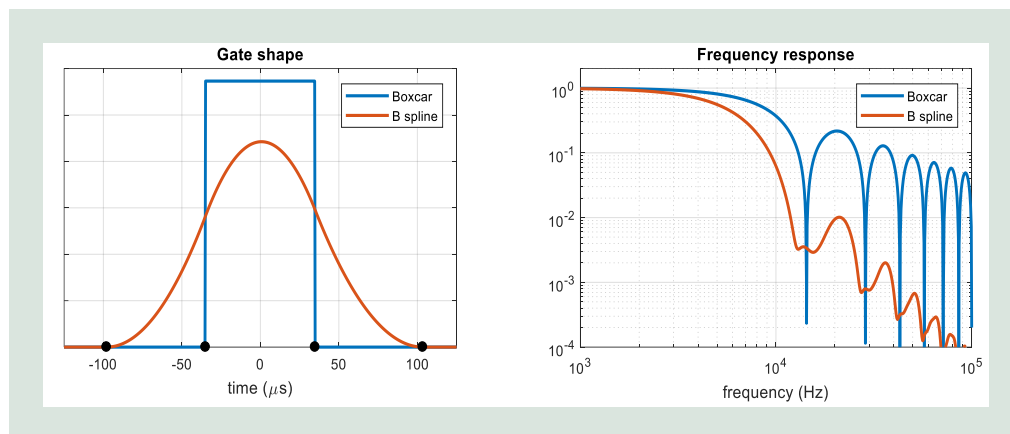
I det nye digitale modtagersystem er softwaren blevet udviklet til at udnytte et nyt innovativt dataformat HDF5, hvor alle data kan ordnes i strukturer. Det har bl.a. været nødvendigt pga. den meget højere datarate med flere kanaler og dermed øget datamængde, da den nye datastruktur gør det muligt for efterfølgende databehandlingsprogrammer eller QC-værktøjer at åbne data uden at skulle loade det ind i hukommelsen først. Det forbedrer processen med at kunne tjekke data og gør det væsentlig mindre resursekrævende.



FIGUR 15. HDFView eks. på data fra den digitale modtager.

3.4.6 Reduktion af støj gennem gatestruktur

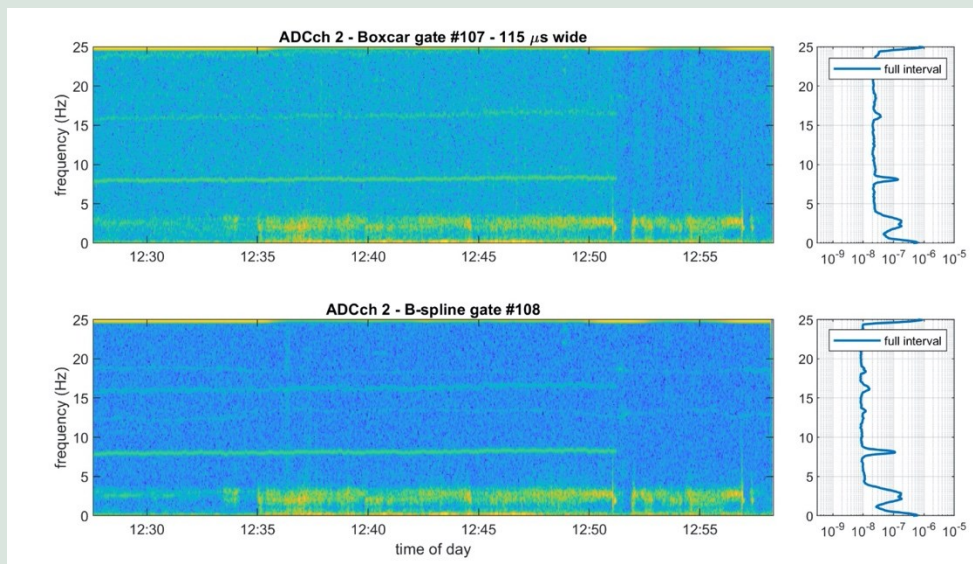
Der er blevet udviklet en ny type af gatestruktur, der gør det muligt at sammenflette netop den filtertype, som er ønskværdig, om det er Boxcar eller en nyere og blødere type – kaldet B-splines – som giver reduktion af LF, VLF-støj, det ses i den teoretiske frekvenskarakteristik i FIGUR 16, hvor de højfrequente signaler ruller af ved $1/f^3$ for B-spline mod $1/f$ for boxcar.



FIGUR 16. Gateudformning af henholdsvis boxcar og B-spline samt deres tilhørende frekvenskarakteristik.

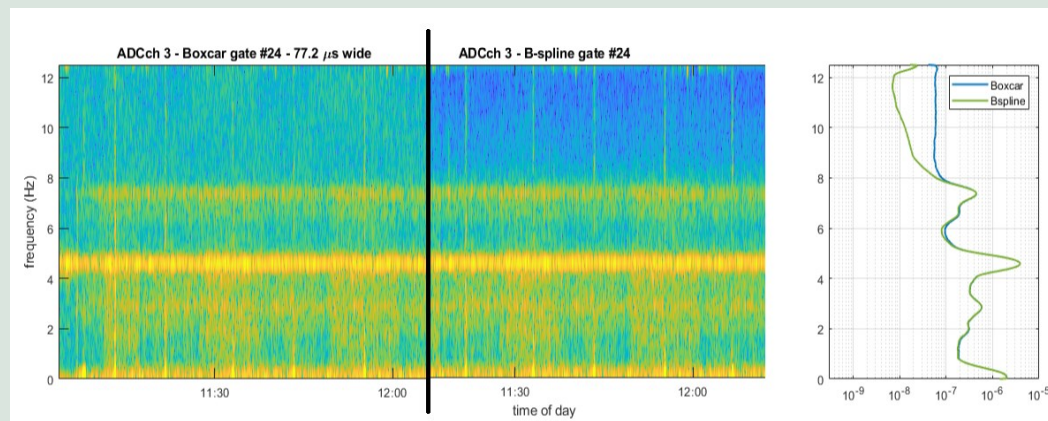
3.4.7 Udnyttelse af ny gatestruktur

Reduktion af VLF og LF-støj har projektgruppen efterfølgende eftervist, da analyseværktøjerne blev udviklet efter afslutning på projektet. Reduktionen ses tydeligt i resultater på testdata fra december 2018, se FIGUR 17, Normal Boxcar gating i øverst plot vs. B-spline gating i nederste plot. Det er især tydeligt i den periode, hvor IMU-systemet er tændt, at støjniveauet falder til den mere dyblå i farveskala. Det blev foreslået, da projektgruppen indså IMU-støjfænomenet var utæmmeligt, at B-spline gates kunne fjerne støjbidraget fra IMU-systemet, men desværre er der stadig et signifikant bidrag, som ikke er ønskværdigt, selvom de bløde gates tager det meste.



FIGUR 17. Testdata fra test i december 2018 – nederst ses de bløde gates effekt på støjen.

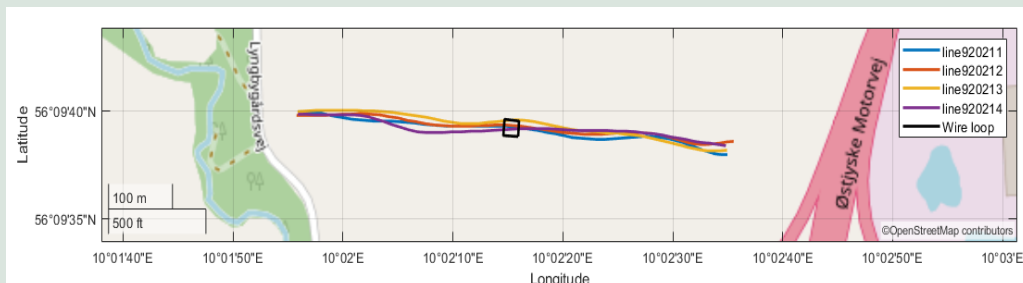
Der ses også en tydelig forbedring, mens IMU er slukket, og efterfølgende har teknikken vist sin værdi på data fra et af de første surveys i Sverige. Resultaterne har været overraskende ift. X-spole data, da støjkilderne udbreder sig hovedsageligt i denne retning. Det har givet projektgruppen en helt ny indsigt i X-spole-ophæng, da projektgruppen har reduceret støjgulvet væsentligt, se FIGUR 18.



FIGUR 18. Spectrogram-sammenligning af X-data viser, at mekaniske ophæng dæmper bedre end ventet.

3.4.8 B-felts resultater fra integrations test marts 2019

Fokus blev skiftet fra IMU og støjproblematikker til fuld integrationstest af det, der var klar. Den nye vibrationsdæmpede modtager og tårntop, forforstærker og optimerede spole samt det digitale modtagersystem. Det var derfor afgørende at vise, at den fulde digitale modtager virkede. Dvs. både dB/dt- samt B-kanalen skulle testes.



FIGUR 19. Linjer fløjet over target.

For at kunne sikre at systemet virkede fuldt ud, har projektgruppen i løbet af projektet udviklet en strømmåler, som kunne integreres med den digitale modtager, så en fuld bølgeform kunne modtages sammen med de målte data. Den er baseret på Rogowski-princippet, men skaleret til ledninger og forforstærkere.

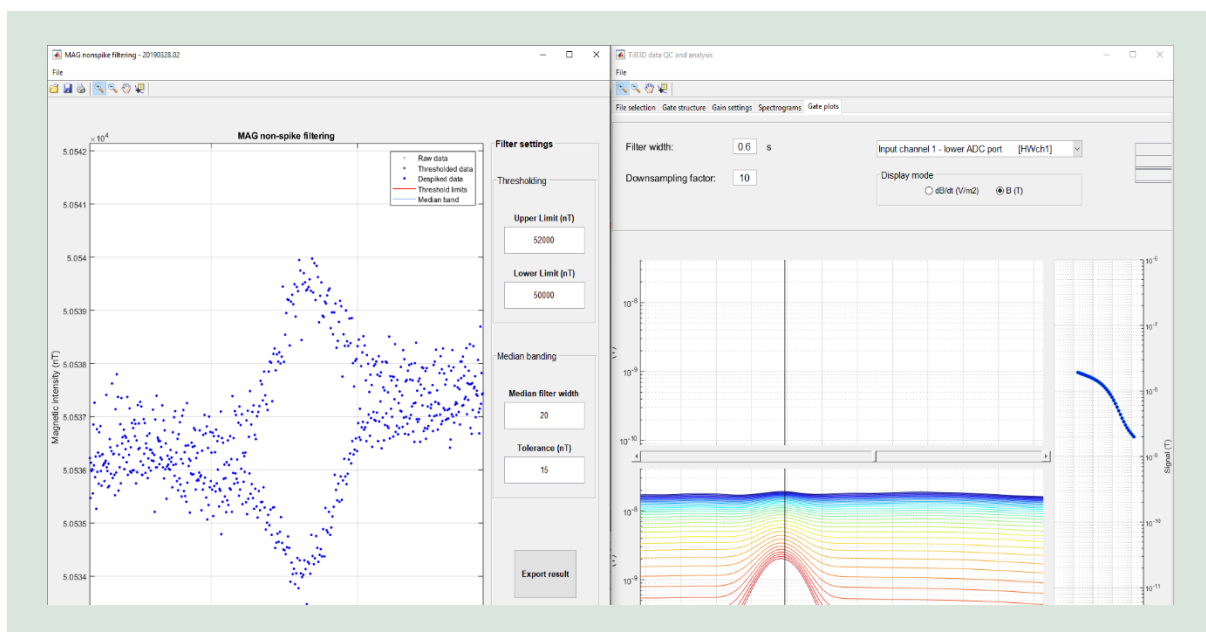
Sendersystemets styring blev opdateret til at kunne håndtere lange ontime-tider og offtime-tider, så andre basefrekvenser var mulige ift. at kunne se data til senere tider og dermed dybere target samt estimere deres Tau-værdier.

Der blev derfor fundet en løsning til at skabe et target, der kunne tændes og slukkes for. Dette target blev lagt ud på det nationale teststed, se FIGUR 20.



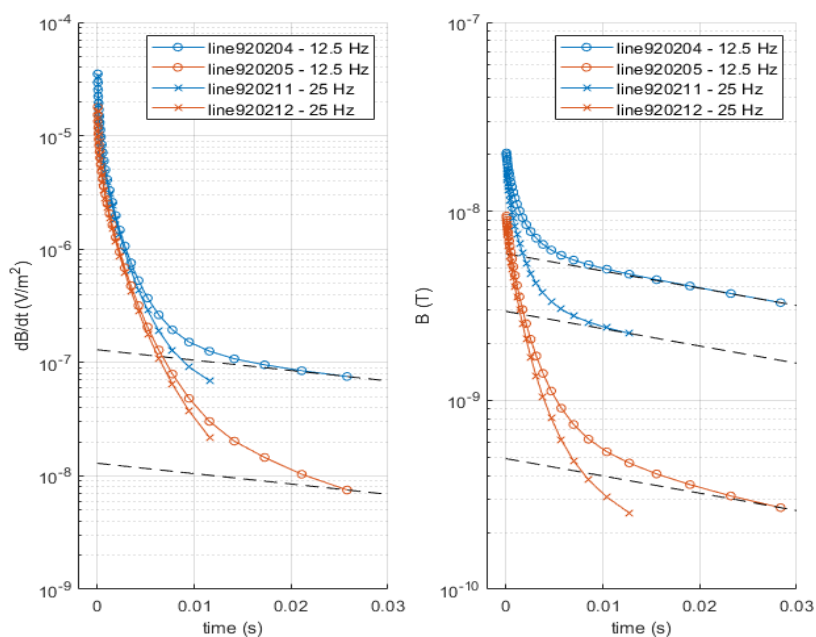
FIGUR 20. Target - 4 loop af 508 typen blev lagt ud.

Tauværdien blev målt til 47 ms og brugt til efterfølgende at fastlægge, om data ville kunne estimere tauværdien. Der blev fløjet flere gange over det firkantede mål, se FIGUR 19, både med systemet tændt og slukket samt med forskellige konfigurationer og i forskellige højder. De første resultater viste, at både Geometrics totalfeltmagnetometer og B-felts målinger, se FIGUR 21, kunne vise B-feltet fra target og at der var fin overensstemmelse mellem teori og praksis.



FIGUR 21. Første resultater, hvor sammenhæng ml. magnetometer data og B-felt target viser overensstemmelse i teori og praksis.

I FIGUR 22 ses, at der opnået et betydeligt større signal, eftersom ontiden ved lavere basefrekvens sender mere signal i jorden. Den længere offtime giver mulighed for at følge målet længere ud i dens tau og dermed estimere målet mere nøjagtigt.



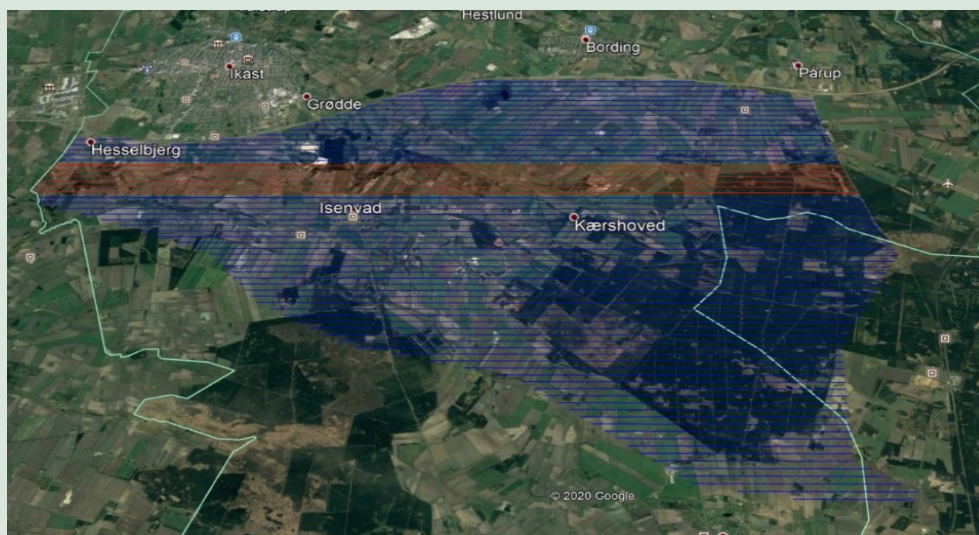
FIGUR 22. dB/dt og B fra testen i henholdsvis 30 m og 50 m over target.

3.5 Delmål e) Integrations- og verifikationstest



FIGUR 23. To TEM-systemer ligger klar til test i starten af november 2018.

Integrationstestenes forløb var oprindelig planlagt til slut 2018, men under integrationstestene i november/ december indså projektgruppen, at der var delelementer, som risikerede ikke at ville virke efter hensigten, og anmodede om forlængelse af projektet til ultimo marts 2019. Der blev fløjet i forbindelse med den danske kortlægning i slutningen af 2018, og den 20. november kunne projektgruppen drage til sitet i Isenvad, efter at SkyTEM's produktionssystem havde kortlagt området. Der var planlagt at flyve 6 linjer på Isenvad-sitet, se FIGUR 24.



FIGUR 24. Planlagte linjer i Isenvad-området - november 2018.

Linjerne er valgt ud for at kunne eftervise det nye systems fordele. Det forløb ikke helt efter planen, og der måtte flyves ad flere omgange. Det viste sig, at IMU-systemet ikke helt var stabilt, på trods af at der havde været lavet mange jordtest samt løbende blevet lavet rettelser af systemet på jorden op til testene i november. Efter de 6 linjer blev taktikken ændret til 2 linjer, der blev fløjet før status, så der kunne komme en hurtigere evaluering af, om data var indsamlet eller ej.

Der skulle flyves med IMU tændt og efterfølgende slukket. Desuden var det første gang, at det digitale system skulle indsamle data i lidt større stil. Det optimerede modtagersystem blev testet både under Isenvad-produktionslinjerne i det førnævnte survey og under testene, så en sammenligning kunne foretages mellem ældre version af modtagersystemet og den digitale modtager.

3.5.1 Hvad gik godt og hvad gik ikke godt

Det digitale modtagersystem samlede succesfuldt data ind, men projektgruppen blev opmærksomme på, hvor let det var at gå galt i byen med at indstille systemet, da der er mange parametre at skrue på. Dataene var svære at håndtere på dette tidlige stadie, da analyseværktøjerne ikke var på plads på dette tidspunkt, hvilket gav en begrænsning ift. at teste forskellige konfigurationer

De foreløbige konklusioner på dette tidspunkt var:

IMU'en var ustabil, stoppede undervejs med at samle data ind, efterfølgende viste IMU-dataene at de var korrupte og blev fortolket forkert af opsamlingssoftwaren samt IMU-indsamling gav anledning til støj i EM-data. Der blev fundet en kablingsfejl, som senere viste sig ikke at betyde noget og kunne ikke retfærdiggøre de dårlige resultater, projektgruppen først så i november og siden i december.

Flyvning fra december 2018 gav dog anderledes pote. Et intenst arbejde fra november til december gjorde at projektgruppen fik IMU data, der gav mening, se FIGUR 25. IMU'en blev gjort mere stabil, så den kunne levere data til den videre udvikling. Rettelser på kablingen blev udført plus projektgruppen havde fokus på at få et bedre sammenligningsgrundlag for IMU tændt og ikke tændt.

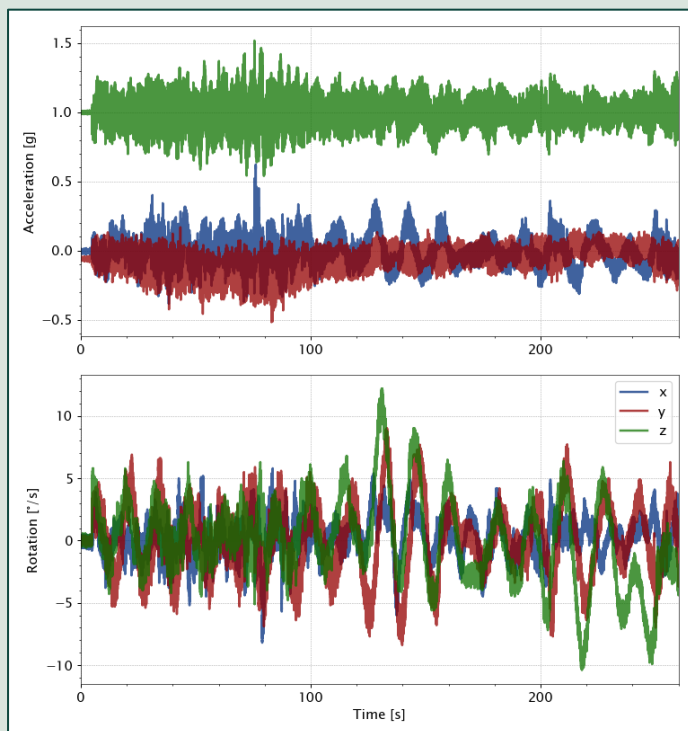
Det mekaniske modtagersystem virkede efter hensigten, da det både blev testet på det traditionelle system samt det nye digitale.

Den nyeste forforstærkertopologi, som var blevet udviklet i tidligere arbejdsplaner, viste sig ikke at kunne levere på de støjtal, som projektgruppen forventede. Denne underliggende støjproblematik blev dog først evalueret midt i januar 2019. Denne konklusion og sammenhængen omkring softwareproblemstillinger, valgte projektgruppen som tidligere nævnt at opgive IMU-delen.

Alt fokus blev rettet mod software integration af digitale modtagersystem, samt forforstærker designet.

3.5.2 Samlet oversigt over test, integrationstest og videre forløb

2018 04: Test af nye forforstærkere problemer med støj, samt det nye modtagersystem.



FIGUR 25. Data fra IMU december 2018.

2018 07: Skærmfolie omkring hele spolen giver ikke det forventede resultat. IMU tændt uden EM-system på. Første test af B-felt på jord tændt/ ikke tændt. Uden reference. Nye lettere senserledninger bliver testet for første gang; også udviklet under MUDP. Giver anledning til en vægtreduktion på op mod 40 kg.

3.5.3 Integrationstest

2018 11/12: test af IMU + ny forforstærker og opgraderet tårn med højere båndbredde.

2019 03 stor B-felt referencemåling med dokumenteret target samt alle typer af systemer testes. IMU er droppet efter analyse af støjdata og udskudt til et andet tidspunkt.



FIGUR 26. System ligger klar til test marts 2019.

3.5.4 Efterfølgende forløb

2019.06. - Mulighederne med det nye modtagersystem forsøges udvidet med dybere konfigurationer - 6.25 hz.

2019.07. Ludvika Sverige, første site med digitalt modtagersystem – forforstærkere af ældre type benyttes.

2019.09. - Forforstærker giver stadig anledning til problemer, testes på Dyssen.

2019.11. - Forforstærker med stabiliseret design testes på Dyssen – succesfuldt, og reelle forbedring opnås. Båndbredden er øget og den elektriske støj er en faktor 2 lavere.

2019.11/12. - Bergslagen i Sverige første site med opgraderet båndbredde og LM ontime på 312 HP. Dybe target og samtidig vises data fra overfladenære.

4. Resume

Hovedformålet i MUDP-projektet "Effektivisering af grundvandskortlægningsprojekter" for projektgruppen var at udbygge SkyTEM Surveys forspring indenfor grundvandskortlægning og dermed cementere SkyTEM Surveys position som første valg indenfor grundvandskortlægning ved at udnytte tidligere udviklinger, der muliggjorde høj hastigheds HTEM-systemer.

Her er delmålene, der alle har været rettet mod udvikling af et luftbåret system til kortlægning af de øverste samt dybe grundvandsressurser, hvor:

- Hastigheden gennem lufthavet er høj, så omkostningerne til helikopter kan reduceres
- Fuel på helikopteren bliver den begrænsende faktor i ekstreme miljøer.

De fem delmål i projektet:

- a) Udvikle vibrationsdæmpning af modtagersystem.
 - a. Her udviklede projektgruppen et modtagersystem, der gav anledning til en reduktion SNR på 5.
- b) Reducere forstærkerstøj og optimering af spoleparametre
 - a. Projektgruppen reducerede forforstærker støj med en faktor 2, samt øgede båndbredden med mere end en faktor 2
- c) Udvikling af bæretårn til de nye modtagersystemer.
 - a. Et bæretårn blev udviklet til at håndtere den nye type modtagersystem med transportsikring med robusthed, pålidelighed og brugervenlighed for øje.
- d) Udvikling og optimering af digitalt modtagersystem.
 - a. Projektgruppen udviklede et nyt digitalt modtagersystem, der reducerer LF- og VLF-støj via nyere type gating, samt muliggør Bfelts målinger, samt kan levere endnu tidligere data, der løber ind i slutte forløbet.
- e) Integration og verifikationstest
 - a. Integrationstest var afgørende for at lykkes med integrationen af udviklingerne og især at få integreret det nye digitale modtagersystem.

Samlet set kan Introduktionen 306 HP med alle de udviklinger, der er udviklet under MUDP-projektet agere som synligt bevis for et succesfuldt projekt, se [opslag på LinkedIn](#). Udviklingerne tæller det nye digitale modtagersystem, nye generation af modtagerspoler med forbedring af forforstærker kredsløb med mulighed for Bfelts målinger. Vægtforbedringer i senderkabler. Måleudstyr og mere præcis målemetode til at måle strøm data i senderkablerne. 306HP systemet er lige så let, som SkyTEMs hidtil hæderkronet 304 system til grundvandskortlægning. Har samme båndbredde, mindre støj og 4 gange større sender moment på hele 500.000 Am², alle egenskaber der er afgørende for kortlægning af de øvre lag, samtidig med kortlægning af dybere grundvandsressurser, som i stigende grad er i efterspørgsel.

5. Konklusion og afsluttende bemærkninger

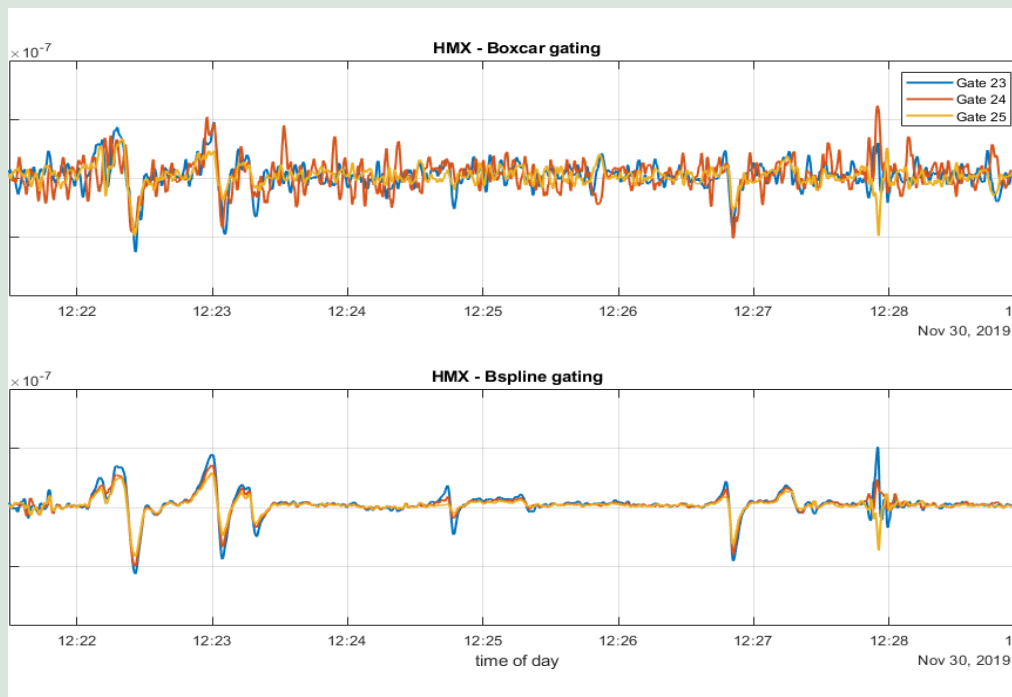
Projektet er gennemført med ønskede resultat for alle delmål på nær støjreduktion via IMU-system. Det overordnede objektive er opnået. Der var en mindre ændring i tidsrammen ift. at kunne nå at få en total integration til at virke. Projektet er gennemført stort set inden for den økonomiske ramme.



FIGUR 27. Z-data fra Sverige 2019 - tydelig forskel i støjniveau ml Boxcar og B-spline.

Det har efterfølgende vist sig i praksis at være mere arbejde i at få udviklingerne ud over rampen, så landvindingerne kunne udnyttes kommercielt.

Projektgruppen har indsendt et patent på modtagersystemet, da modtagersystemet efterfølgende har vist sig at være en mere afgørende udvikling end først antaget. Ud over at båndbredden er øget og støj niveauet lavt, har mulighederne for at tune modtagersystemet gjort det muligt at arbejde med væsentlig lavere sendefrekvenser og dermed kunne kigge ud til senere tider.

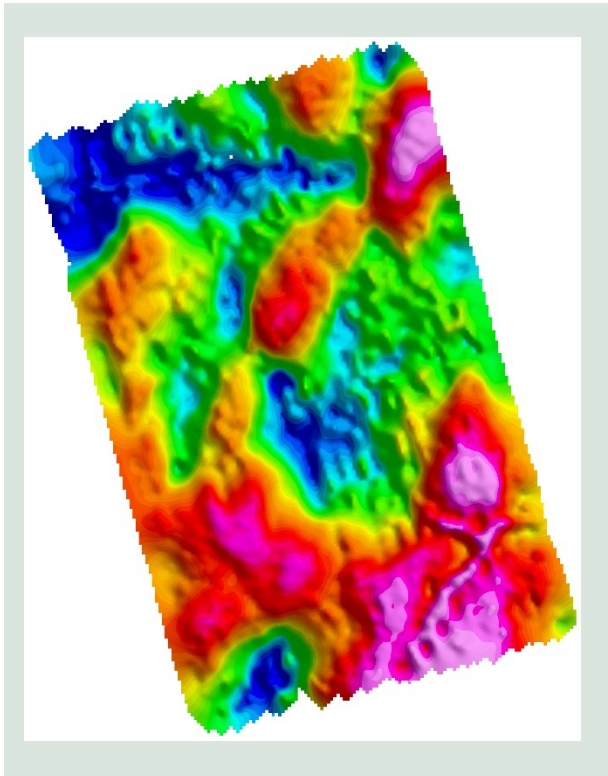


FIGUR 28. X-data fra Sverige 2019 - tydelig forskel i støjniveau ml. Boxcar og Bspline.

Projektgruppen står i dag med et digitalt modtagerkoncept, som kommercielt set allerede nu er ved at vise sit værd, og som muliggør reduktion af det kulturelle støjniveau via bløde gates og deres udformning. Det ses tydeligt i data fra et af de første test surveys, projektgruppen udførte i Sverige, se FIGUR 27 og FIGUR 28.

I det afsluttende kvartal måtte projektgruppen desværre indse, at IMU-data ikke ville blive succesfulde inden for rimelig tid ift. projektet, og af kommercielle årsager valgte projektgruppen derfor at fokusere mere på selve integrationen af den digitale modtager med det resterende system.

Lav Moment data fra under slukke-forløbet har vist et spændende potentiale på 312HP-systemet og givet hidtil uset data fra dette system, se data fra Sverige i FIGUR 29.



FIGUR 29. 312HP LM data fra blok i Sverige - Gate 11 i slukket forløbet, har kraftigere signal og pga. det korte tidsrum slukkeforløbet varer giver det anledning til yderligere mulighed for tolkning af data.

Denne data har vi ikke kunnet tilbyde før og er kun muliggjort af det nye digitale modtagersystem.

Produktionssystemet er gjort væsentligt mere stabilt og muliggjorde, at et tæt pakket testprogram kunne udføres allerede i marts 2019, hvilket baner vejen for at udnytte det kommercielt. Derudover har det accelereret udvikling i projektet, da test er blevet lettere og introduktion af nye udviklinger på systemerne ikke giver anledning til ringere kvalitet. Projektgruppen står i dag med et system, som tager markedsandele fra konkurrerende systemer allerede ved introduktionen. Det havde ikke været muligt at nå uden dette MUDP-projekt.

Effektivisering af grundvandskortlægningsprojekter – MUDP-projekt

Hovedformålet med projektet "Effektivisering af grundvandskortlægningsprojekter" for projektgruppen var at udbygge SkyTEM Surveys' forspring inden for grundvandskortlægning og dermed cementere SkyTEM Surveys' position som førstevalg inden for grundvandskortlægning ved at udnytte tidligere udviklinger, der muliggjorde højhastigheds HTEM-systemer.

Her er delmålene, som alle har været rettet mod udvikling af et luftbåret system til kortlægning af både de øverste og dybe grundvandsressourcer, hvor:

- Hastigheden gennem luften er høj, så omkostningerne til helikopter kan reduceres.
- Brændstofforbruget på helikopteren bliver den begrænsende faktor i ekstreme miljøer.

Samlet set kan introduktionen af 306 HP, med alle de udviklinger der er foretaget under MUDP-projektet, agere som synligt bevis på et succesfuldt projekt. Udviklingerne omfatter det nye digitale modtagersystem, en ny generation af modtagerpoler med forbedringer af forforstærkerkredsløb, som muliggør B-feltnmålinger, vægtforbedringer i senderkabler, måleudstyr og en mere præcis målemetode til at måle strømdata i senderkablerne.

306 HP-systemet er lige så let som SkyTEM's hidtil hædrede 304-system til grundvandskortlægning. Det har samme båndbredde, mindre støj og fire gange større sendemoment på hele 500.000 Am², alle afgørende egenskaber for kortlægning af de øvre lag samtidig med kortlægning af dybere grundvandsressourcer, som i stigende grad efterspørges. [Bagside Tekst]



Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35
5000 Odense C

www.mst.dk