

ArkæoDrone

Kortlægning af Dansk Arkæologisk Kulturarv ved Geofysiske Droneobservationer

Forskningsansøgning til A.P. Møller Fonden

DTU Space

Nationalmuseet

Vikingskibsmuseet

Projektets rammer

Varighed

Startdato: 1. april 2019

Slutdato: 31. april 2022

Måneder: 36

Totale budget

Ansøgt beløb (DKK)	7.780.098
Egenfinansiering (DKK)	4.461.596,8
Totale budget (DKK)	12.241.695

Hovedansøger

- DTU Space, Danmarks Tekniske Universitet

Projektleder

Arne Døssing (Seniorforsker)

Afdeling for Geomagnetisme, DTU Space

Diplomvej 371, 2800 Kgs. Lyngby

Email: ards@space.dtu.dk

Tlf: +45 45 25 97 73

Co-leder (Forskningsformidling, konceptudvikler, workshop-ansvarlig)

Hanne Thomasen (Specialkonsulent)

Afdeling for Innovation og Forskningsbaseret rådgivning, DTU Space

Diplomvej 371, 2800 Kgs. Lyngby

Email: hthom@space.dtu.dk

Tlf: +45 45 25 96 71

Medansøgere

- Nationalmuseet

Projektleder

Mads Dengsø Jessen (Seniorforsker, Forhistorisk Arkæologi)

Afdeling for Danmarks og Middelhavslandenenes Oldtid

Frederiksholms Kanal 12

DK 1220 København K

Email: Mads.Dengsoe.Jessen@natmus.dk

Tlf: +45 25 13 05 68

- Vikingskibsmuseet, Roskilde

Projektleder

Morten Johansen (Museumsinspektør, Marinarkæologiske undersøgelser)

Vikingskibsmuseet

Vindeboder 12

DK-4000 Roskilde

Email: mj@vikingskibsmuseet.dk

Tlf: +45 51 20 18 64

- Skanderborg Museum

Projektleder

Ejvind Hertz (Museumsinspektør, leder af den arkæologiske afdeling)

Museum Skanderborg

Adelgade 5

8530 Skanderborg

Email: ehz@museumskanderborg.dk

Tlf: +45 25 32 54 01

Kort projektbeskrivelse

Kortlægning af arkæologisk kulturarv – især i Danmark – sker ofte på baggrund af tilfældige fund i forbindelse med udgravning til større anlægsprojekter, landmændenes årlige pløjning af markerne, eller amatørarkæologernes detektorafsøgninger. Mange af disse fund finder sted i lettilgængelige områder, mens mindre tilgængelige områder, såsom moser, søer og kystnære områder, med det største bevaringspotentiale ofte forbliver sporadisk undersøgte pga ineffektive kortlægningsmetoder.

I **ArkæoDrone** projektet ønsker vi, at udvikle og demonstrere en droneplatform til geofysiske opmålinger specifikt med henblik på arkæologisk kortlægning i svært tilgængelige områder, såsom moser, søer og lavtvandede kyster. Vi ønsker at opbygge en teknologi og viden på tværs af DTU og de danske museer således, at systematisk og non-destruktiv arkæologisk kortlægning vha dronebaserede geofysiske opmålinger i fremtiden bliver standard ved arkæologiske forundersøgelser med henblik på at sikre og få et kvalificeret og sammenligneligt overblik over den danske arkæologiske kulturarv.

Med projektet forventer vi, at DTU og den danske museumforskning kommer helt med i front i Europa inden for anvendelsen af avancerede droneteknologiske platforme til løsning af kulturhistoriske samfundsbehov. Vi søger således A.P. Møller Fonden om projektstøtte, da projektets fokus er oversigt og sikring af den danske kulturarv på basis af udvikling af en viden og en teknologi, der kan komme samtlige museer i Danmark til gode.

I **ArkæoDrone** ønsker vi, at integrere kommerciel multirotor droneteknologi med højteknologiske geofysiske sensorer i et unikt setup, specialdesignet med henblik på indsamling af højkvalitets magnetiske, 3D LiDaR topografiske og 3D multi-beam bathymetriske data til kortlægning af arkæologisk kulturarv på jordoverfladen, i de nære jordlag samt på og under bunden af søer og kystnære farvande. Vi vil i projektet bygge direkte på eksisterende teknologiske løsninger og viden på DTU Space inden for dronebaseret geofysik. Den højteknologiske know-how skal kombineres med den indgående arkæologiske viden hos Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet og bidrage til en gennemtænkt og gennemtestet geofysisk droneplatform til arkæologiske undersøgelser.

En række kulturområder i det danske landskab er blevet udvalgt til at teste **ArkærDronen**, mens den udvikles. Områderne er udvalgt med særligt blik for deres svære tilgængelighed, da det er i disse geografiske rammer, at en dronebaseret teknologi vil have størst praktisk betydning: store flade områder, moser og lavtvandede kystområder og søer.

Projektet vil kombinere eksisterende viden og erfaringer indenfor arkæologi og teknologi med nye analysemetoder til fortolkning af data, ligesom det vil bygge på allerede opbygget teknologisk infrastruktur. Kompetencerne, der erhverves gennem projektets løbetid vil bla. blive forankret gennem uddannelse af to ph.d.'ere samt ansatte hos samarbejdspartnerne i projektet: DTU Space, Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet, men vil på længere sigt blive bredt ud til en vid skare af interessenter såsom lokale museer, universiteter og styrelser med ansvar for sikring af kulturarv.

Baggrund

Geofysiske metoder, herunder f.eks. magnetisk kortlægning af jordens magnetfelt, anvendes med stor succes inden for større geologiske studier (Døssing et al., 2013; 2017), mineralefterforskning (Teskey et al., 1993; Nabighian et al., 2005) samt geotekniske undersøgelser ifbm. kortlægning af ikke-eksploderede granater og miner (UXO; Unexploded Ordnance) i tidligere og nuværende konfliktzoner (Davis et al., 2010; Li et al., 2013; Gavazzi et al., 2016).

Magnetiske målinger har i 20-30 år desuden været anvendt som en værdifuld og non-destruktiv metode til kortlægning og afgrænsning af arkæologisk kulturarv i de nære jordlag ("arkæomagnetisme"). Dette er muligt, fordi moderne magnetometre i dag er så følsomme, at de kan registrere selv minutiøse forskelle i jordens magnetfelt stammende fra f.eks. begravede samlinger af jerngenstande eller stensætninger samt potentielt endda kontrasten imellem et leret uforstyrret jordlag og forstyrrede jordlag ved formullede stolpehuller fra fortidens træhuse. Ved brug af systematiske og præcise arkæomagnetiske målinger kan man derfor præcist kortlægge et område for arkæologisk kulturarv skjult under overfladen (Campana and Piro, 2009, og referencer deri; Cella and Fedi, 2015; Cheyney et al., 2015; Schettino et al., 2017; Fedi et al., 2017; Hatakayama et al. 2018).

De minutiøse magnetiske signaler fra arkæologisk kulturarv ift. de naturlige variationer i jordens magnetfelt kræver, at systematisk arkæomagnetisk kortlægning foretages: (i) i tætliggende linjer, (ii) få meter fra jordens overflade, (iii) med minimum 2 højpræcisions magnetometre i en kendt horisontal eller vertikal afstand. Sådanne opmålinger foretages derfor som regel vha. helikopterbaserede platforme eller ved gående personel-baserede løsninger med håndholdt udstyr (Figur 1).



Figur 1 Traditionelle magnetiske opmålingsmetoder. (Venstre) Helikopter-baserede setup med magnetometre placeret for enden af "booms". (Højre) Gående setup med håndholdte magnetometre.

Brug af helikopterbaserede opmålinger er yderst sjælden inden for arkæologisk forskning, da denne platform er dyr, ufleksibel (kræver piloter, specialudstyr, flyvetilladelse, og åbent terræn) og invasiv pga. kraftig støjforurening. Derudover foreligger der en væsentlig sikkerhedsmæssig risiko ifbm. lav flyvning. Arkæomagnetisk kortlægning foretages derfor især ved gående personel (Smekalova, Voss & Smekalov 2008, Campana and Piro, 2009, og referencer deri; Cella and Fedi, 2015; Cheyney et al., 2015; Schettino et al., 2017; Fedi et al., 2017; Hatakayama et al. 2018). Denne metode er imidlertid meget kostineffektiv.



pga et højt tidsforbrug (mange mandstimer) og ofte direkte mangelfuld, især i utilgængelige områder (Figur 2), såsom moser, søer, og lavtvandede kystområder, hvor gående personel ikke kan komme til. Netop i vådområder er der grundet ofte lavt iltindhold og forsuring mulighed for gode bevaringsmuligheder af fortidslevn.

Figur 2. Områder som er svært tilgængelige for typiske arkæologiske undersøgelser men som ofte viser sig at indeholde fortidslevn. (Øverst, venstre) Mose. (Øverst, højre) Sø. (Nederst) Lavtvands kyster (f.eks vejlerne som vist her)

Den udbredte mangel på systematiske geofysiske forundersøgelser, herunder især præcis arkæomagnetisk opmåling kombineret med detaljeret opmåling af overflade topografi eller bathymetri, skyldes især en kombination af:

- (1) Manglende erfaring med geofysiske metoder hos de ansvarshavende museer i Danmark.
- (2) Manglende samarbejde imellem museer og teknisk-naturvidenskabelige universiteter med den nødvendige geofysiske ekspertise og arbejdskraft (f.eks ved inddragelse af studerende ifbm bachelor- og specialeprojekter).
- (3) Manglende økonomi hos det enkelte museum til indkøb og vedligehold af geofysisk udstyr og/eller til indkøb af geofysiske forundersøgelser hos private selskaber.
- (4) At mange områder med godt bevaringspotentiale (se Figur 1) er utilgængelige for de traditionelle geofysiske opmålingsmetoder med gående personel.

Ovenstående resulterer i, at mange områder med vigtig arkæologisk kulturarv ikke bliver fundet – eller værre, at kulturarven bliver helt eller delvist ødelagt ifbm anlægsprojekter, markpløjning osv.

Professionel brug af droner, dvs. flyvning af droner uden for afgrænsede modelflyvepladser og med specifikke formål, er i kraftig vækst i disse år. Droner anvendes i stigende grad som platform for andre teknologier, dog oftest ifbm simple kameraløsninger til visuel eller termisk inspektion af jordoverfladen eller bygninger. Professionaliseringen af dronemarkedet er drevet frem af en kommerciel udvikling indenfor effektiv batteriteknologi, præcis GPS positionering, avancerede mikroprocessorer, forbedrede produktionsomkostninger og produktionsmetoder. Sideløbende med dette er der sket en udvikling i design af diverse letvægts sensortyper, herunder også avancerede geofysiske sensorer såsom dronekompatible letvægts magnetometre. Den hastige udvikling har medført, at dronemarkedet i dag er det hurtigst voksende marked inden for geofysisk kortlægning.

I Danmark har enkelte museer testet droneteknologi til arkæologiske undersøgelser, dog primært ifbm overfladekortlægning vha. termiske og visuelle kameraløsninger samt vha. "LiDaR" (Light Detection and Range) sensor teknologi (<https://videnskab.dk/teknologi/laserteknologi-revolutionerer-dansk-arkaeologi>). Selvom sådanne overfladescanninger kan afstedkomme betydelige fund (<https://videnskab.dk/kultur-samfund/forsker-efter-kaempe-maya-fund-det-er-kun-toppen-af-isbjerget>), så vil fortidslevn gemt nede i jorden, i moser samt på – eller under – sø-, fjord- eller havbund forblive skjult.

Beskrivelse af tekniske formål

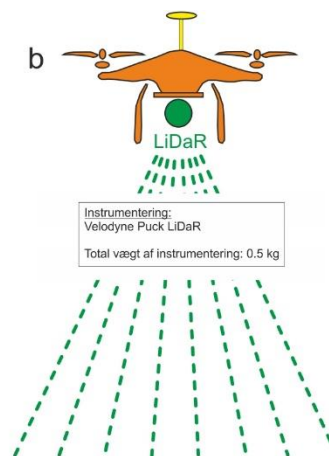
Vi vil i **ArkæoDrone** projektet fokusere på arkæomagnetiske gradiometer målinger i kombination med

- 3D LiDaR topografisk scanning på land (Figur 3 og 4)
- 3D multibeam bathymetrisk scanning til vands, m.a.o. søer, fjorde og lavt vands kystområder (Figur 5 og 6).

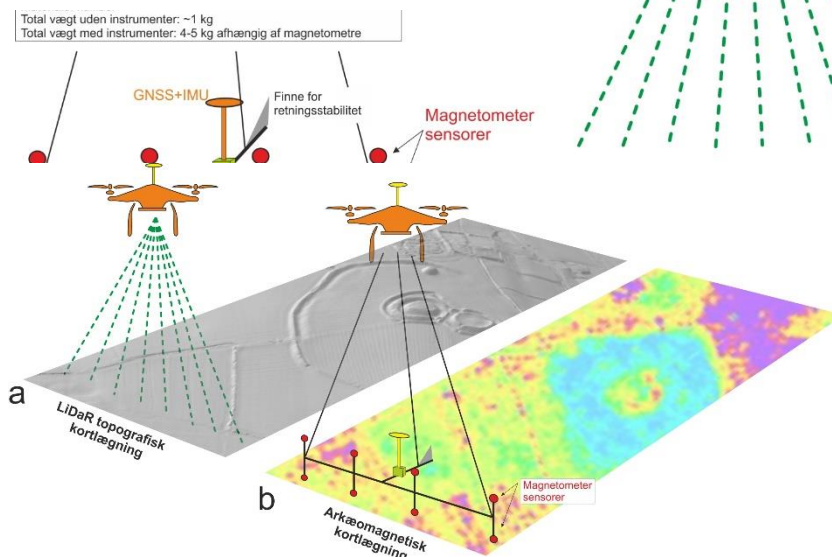
Målet er således, at **ArkæoDronen** bliver en fleksibel droneplatform til non-destruktiv, systematisk kortlægning af arkæologisk kulturarv, både på og under landoverfladen samt på og under sø- og havbunden.



Figur 3. ArkæoDronens instrumentering og setup til opmåling på land. (a) Magnetisk gradiometer setup i ophængt kulfiber-ramme nedenunder dronen med 4-8 stk magnetometre. (b) LiDaR sensor setup.

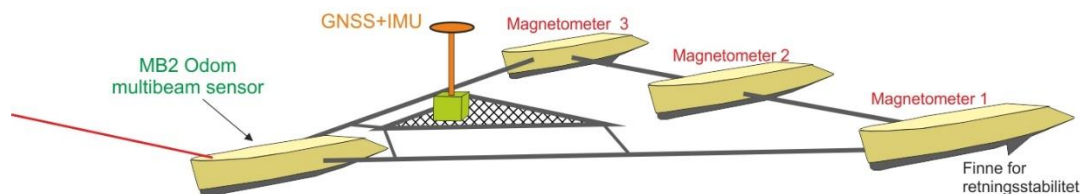


Figur 4. ArkæoDronen i eksemplificeret aktion over et landområde. (a) LiDaR topografisk scanning. (b) Magnetiske gradiometer målinger til undersøgelse af skjulte fortidslevn under overfladen.

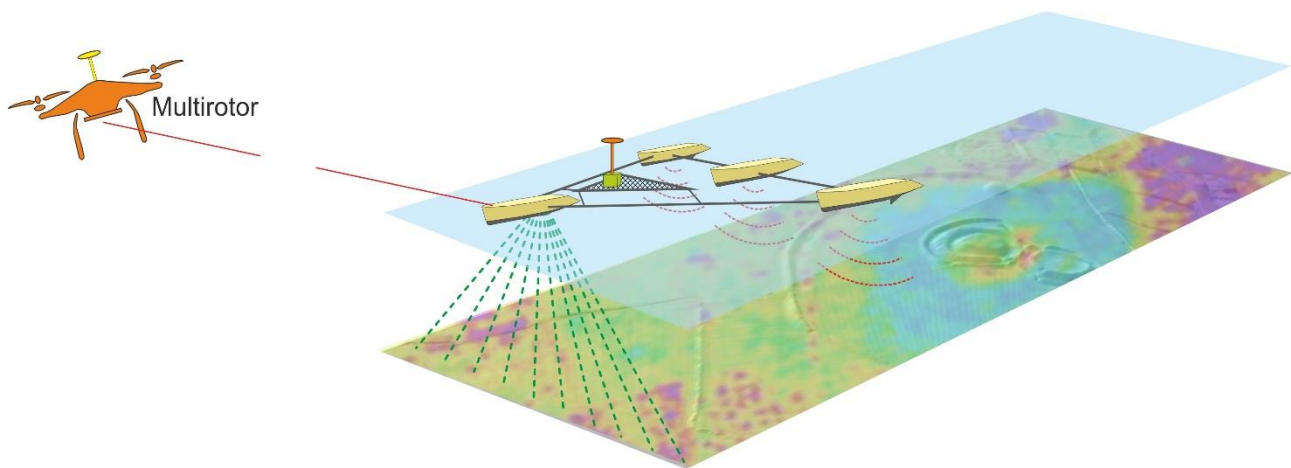


Instrumentering: på flydepram
 Magnetometre: 3 stk absolutte (GSMP-35U)
 Multibeam sensor: MB2 Odom fra Reson (Danmark)
 GNSS+IMU: Novatel multifrekvens GNSS integreret med IMU

Dimensioner af flydepram:
 Bredde: 3-3.5 meter afhængig af antal magnetometre og vanddybde (kan ændres efter behov)
 Længde: ~3 meter
 Materiale: kulfiber og skumplast
 Total vægt uden instrumenter: ~3 kg
 Total med instrumenter: ~15 kg
 Vægt i vand: ~4 kg



Figur 5. ArkæoDronens instrumentering og setup til opmåling til vands. Her skitseret en flydepram med 3 magnetometre og multibeam sensor til simultan magnetisk og bathymetrisk opmåling af både bunden og fortidslevn under bunden. Prammen gøres sødygtigt til søer, fjorde og lavtvandede kystområder.



Figur 6. ArkæoDronen i eksemplificeret aktion til vands. Bemærk at flydeprammen med instrumenter trækkes af en multirotor drone og der foretages bathymetrisk og magnetiske gradiometer målinger på samme tid.

Vi forventer med **ArkæoDronen** at den detaljerede magnetiske opmåling – både til lands og til vands – kombinereret med 3D detaljeret topografi/bathymetri opmåling vil muliggøre kortlægning af fortidslevn i hidtil utilgængelige områder og endvidere forbedre afgrænsningen i allerede undersøgte lettere tilgængelige områder.

I projektet vil vi udnytte den eksisterende viden på DTU Space om design, konstruktion, integration og tests af avancerede dronebårne sensorsystemer. Vi vil endvidere udnytte erfaringen omkring selve dronehåndteringen ift. flyvning, tilladelser, reparationer og vedligehold.

Specifikt skal der i **ArkæoDrone** indkøbes en kommerciel og gennemtestet multirotor-drone (se Bilag 1 for kravspecifikationer). Multirotor dronen skal fungere som bærende platform for fuldt integrerede geofysiske sensorsystemer specifikt til arkæologiske opmålinger til hhv. land (**ArkæoDrone-1**; Figur 3) og til vands (**ArkæoDrone-2**; Figur 5).

Ifbm **ArkæoDrone-1** skal der:

- Designes og konstrueres en multi-sensor "magnetometer-ramme" af kulfiber til magnetisk opmåling over land (Figur 3 - venstre). Formålet med rammen er at isolere de magnetiske sensorer fra den magnetiske støj fra dronen og minimere afstanden til de magnetiske kilder i undergrunden. Rammen vil blive ophængt via et nyligt DTU-patenteret (Døssing og Jakobsen, 2018) sensor-ophængningssystem, som bidrager til øget flyvestabilitet. Rammens instrumentering skal være specificeret til arkæomagnetiske undersøgelser over land via:
 - Højpræcisions og non-magnetisk GNSS-IMU system til præcis positionering.
 - 8 stk absolutte Geometrics MFAM magnetometre eller 4 stk GSMP-35U magnetometre på parallelle, horisontale bomme adskilt med ca. 0.5 meter for at give optimal magnetisk opløsning af selv små magnetiske forstyrrelser ved nær-overflade målinger.
- Indkøbes og integreres en højpræcisions LiDaR sensor til 3D topografisk overfladescanning (Figur 3 – højre).

Ifbm **ArkæoDrone-2** skal der:

- Designes og konstrueres en multi-sensor "magnetometer flyderamme" af kulfiber til parallel indsamling af hhv magnetiske og multibeam data til vands (Figur 5). Flyderammen skal trækkes henover vandet vha multirotor dronen (Figur 6) og skal være specificeret til detaljeret opmåling vha:
 - Højpræcisions og non-magnetisk GNSS-IMU system til præcis positionering.
 - 3 stk absolutte GSMP-35U magnetometre i horisontal konfiguration adskilt med ca. 1-1.5 meter.
 - Reson MB2 Odom Multibeam specielt designet til kortlægning af bundforhold på søer, fjorde og kystnært farvand.

Til både **ArkæoDrone-1** og **ArkæoDrone-2** skal der:

- Udvikles processerings software til magnetometer systemerne. Softwaren skal baseres på eksisterende DTU Space software. Kommerciel software licens indkøbes til processering af LiDaR og multibeam data.
- Foretages testflyvninger og dataindsamling ifbm 3 udvalgte og kendte arkæologiske sites i Danmark.

Den tekniske baggrund for ovenstående er beskrevet i Bilag 1.

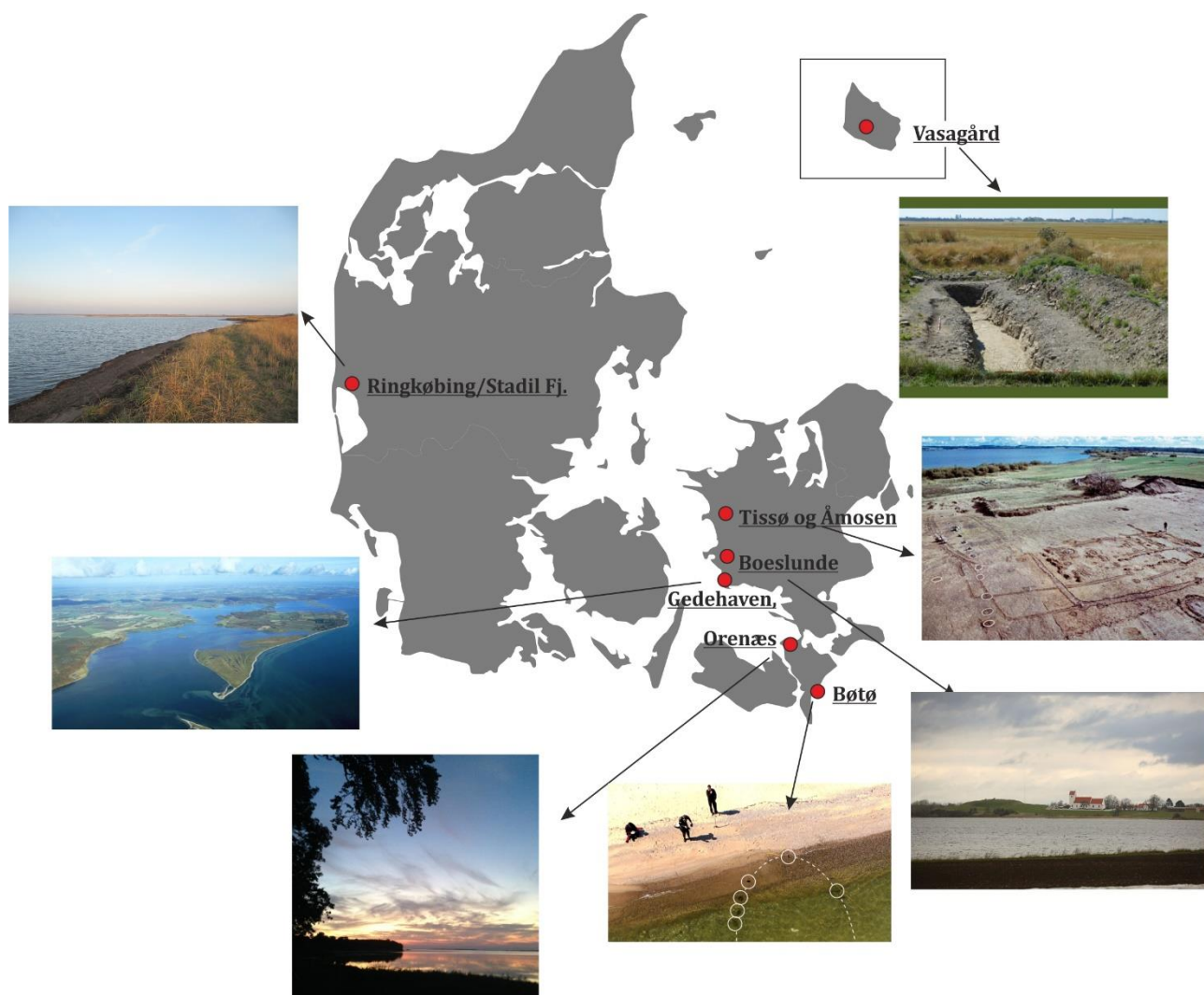
Forsøgsområder i det danske kulturlandskab

Vi har udvalgt et antal områder til test med **ArkæoDronen** (Figur 7). Vi forventer at testflyve over minimum 3 lokaliteter. Vi har dog udvalgt 7 relevante områder i første omgang, og de vil alle undergå en nærmere evaluering ift deres egnethed til test af **ArkæoDronen**. I følgende gives en kort beskrivelse af lokaliteterne og deres formodede såvel som kendte arkæologiske relevans:

- **Tissø (Vestsjælland):** et kulturarvsareal af international betydning fra yngre jernalder og vikingetid (550-1050). Landskab i og nær sø/mose. Tissø på Vestsjælland er udtaget til forsøgsområde, da det indeholder vigtige arkæologiske levn langs vestbredden af Tissø, mens de tilstødende og utilgængelige lavtliggende mose-, våd- og søområder ikke er nærmere undersøgt. Vi vil detaljoverflyve dele af området, både for at verifisere kendte levn og strukturer (såsom grubehuse) samt for at lave en systematisk kortlægning af dele af de endnu ikke undersøgte lavtliggende områder. Da Tissø-området for en stor del er ejet af Staten, vil tilladelse til overflyvning være uproblematisk. Hele området er kulturarvsareal af international betydning. Tissø som testområde vil derfor tilføje projektet muligheden for at sammenkæde en kendt og ekstensivt udgravet lokalitet med de innovative, nondestruktive analyser *ArkæoDrone* repræsenterer.
- **Boeslunde (Vestsjælland):** et kulturarvsareal af international betydning fra bronzealderen (Sjælland). Agrart kuperet landskab med små søer og vådområder. I dette fossile landskab er fund af Sydskandinaviens største mængde af guldfund fra yngre bronzealder bl.a. 6 guldsåle og 5 edsringe). Inden for den senere årrække er fund af mere end 2000 guldspiraler samt et depotfund med bronzegenstande ligeledes fra yngre bronzealder. Området er tillige kendetegnet ved rige fund fra både jernalder og vikingetid. De arkæologiske undersøgelser af området er forholdsvis begrænsede, hvorfor bosteder og depotfund kan lokaliseres. Boeslunde som testområde giver derfor mulighed for at afklare et fossilt kulturlandskabs udvikling over både et større og varieret geografisk areal, såvel som i et langtidsperspektiv. Dette vil medvirke til en kronologisk og korologisk afklaring af ArkæoDrones potentiale.
- **Illerup Ådal (Østjylland):** Vådbundsområde med store ofringer fra jernalder såsom våbenoffer og hærofring i Alken Enge. I et 7 km langt dalstrøg i Illerup Ådal er der gennem jernalderen foretaget flere bemærkelsesværdige ofringer. Det er Danmarks største våbenoffer og Europas hidtil største og mest velbevarede fund af ofrede skeletdele fra individer i en slagen hær. Dette er sammen med en mindre offerplads ved Forlev Nymølle de eneste kendte offersteder i jernaldersøer i Ådalen. Imidlertid beskriver en ældre kilde, at søer ligger som perler på en snor ned gennem ådalen. Det tolkes som, at der tilbage i jernalder har været adskillige søbassiner med potentielle ofringer. Områder i Ådalen er stadig utilgængelig for en slæde med geoteknisk udstyr trukket af en ATV. Nyt udstyr monteret på drone vil nemt og hurtigt kunne afsøge vådbundsområderne og lokalisere yderligere søer, som må være til stede i Ådalen og dermed kortlægge dalen for yderligere potentielle ofringer. Ved våbenofret er der ikke foretaget geoarkæologiske undersøgelser i nyere tid og i Alken Enge er større områder endnu ikke geoarkæologisk kortlagt. En ny kortlægning med drone vil give helt nye input til videre forskning i hele Illerup Ådal.
- **Ringkøbing/Stadil Fjord (Vestjylland):** Fossilt landskab, hvor store områder kan kortlægges systematisk. Dette gælder særligt landområderne mellem fjordene (mellem Sandene og Stadilø), samt den nu lukkede indsejling ved Søndervig. Dette område er et historisk landskab, der ændredes dramatisk i Vikingetid og Middelalder, med tilsandingen af Stadil Fjord. Området giver derfor mulighed for en komparativ analyse af en historisk kendt, geografisk ændring i en relativt tætbebygget situation under Vikingetiden, der herefter blev kendetegnet ved mere marginale bebyggelser i de senere, historiske perioder, og deraf følgende ændring i social organisering.
- **Vasagård (Bornholm):** Stenalderlokalitet, der er kendt for sine grøfts-systemer og ofrede solskiver. Der er muligvis også erkendt et mindre alter i midten af en større stenansamling på pladsen. De markante grøfts-systemer er nedgravet i grus og skifferlag, og er i flere tilfælde

opgravet i flere omgange. Lokaliteten ligger ret ned til et større moseområde, der er forbundet til Læså-systemet. Pladsen er allerede afdækket med traditionel magnetometer og data herfra kan sammenkøres med ArkæoDrone-data. Undergrunden er også anderledes i forhold til de øvrige lokaliteter og vil derfor give nye data.

- **Gedehaven (Skælskør Fjord):** Havne eller moleanlæg. Den sydlige del af Skælskør Yderfjord er afspærret med 2 parallelle pælerækker over et ca. 700 meter langt forløb og med indbyrdes afstand på ca. 10 meter. Konstruktionen, som har været markeret på søkort så sent som 1798 er dateret til sidste halvdel af 1400-tallet. Anlægget er ved normal vandstand dækket af ca. 90 cm vand. Udover at have været mål for flere arkæologiske undersøgelser har anlægget i perioder været synligt på luftfoto og vil således være velegnet til verificering af ArkæoDrones præcision og opløsning gennem vand.
- **Orenæs (Storstrømmen):** Stenalderlokalitet. To større fundhorisonter, som knytter sig til én eller muligvis flere kystnære bosættelsesfaser fra den yngre del af jægerstenalderen med bevaret genstandsmateriale af bl.a. flint, knogle og træ. Lokaliteten er udgravet over en strækning på 12 meter, hvor der nu er nedgravet et stærkstrømskabel. Vanddybden på stedet er 1-2 meter. En af de største udfordringer ved submarine udgravninger er at det ikke er praktisk muligt at afdække større arealer. Dette vanskeliggør lokalisering af bopladsanlæg som hyttestrukturer, grave, ildsteder og lign. Såfremt ArkæoDrone er i stand til at registrere komprimeringsgrad og/eller sammensætning af havbundssedimenterne kan disse data vise sig banebrydende for stenalderforskningen.
- **Bøtø (Falster):** Vrag, udateret. Vraget ligger med forstævnen lige i havstokken skråt ud fra kysten med de højeste punkter omtrent i niveau med daglig middelvandstand. Der er tale om et område på ca. 10 x 7 meter; bunden/forenden af et kravelbygget fartøj med kraftige enkeltspanter, som med trænegler er forbundet til hhv. inder- og yderklædning, som er i ét enkelt lag. En formodet kimingsvæger er dog forbundet til spanterne med jernbolte. Agterenden af vraget er udokumenteret.



Figur 7. Kort over udvalgt testokaliteter.

Konkrete forventede resultater

Der vil i løbet af **ArkæoDrone** projektet være et stort element af vidensopbygning og vidensdeling mellem forskellige faglige domæner, bl.a. sikret ved deltagelsen af en ph.d. studerende og en postdoc, som indskrives på DTU Space men som vil dele deres tid imellem universitet og de to museer: Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet.

Det direkte udkomme af **ArkæoDrone** projektet er:

- En fuldt integreret, gennemtestet og unik geofysisk droneplatform – både hardware og softwaremæssigt – til (i) arkæomagnetiske målinger til land og til vands samt til (ii) detaljeret 3D hhv topografi og bathymetri.
- 2 videnskabelige Ph.D. afhandlinger samt et antal artikler i internationale peer reviewed tidsskrifter

- En tværfaglig vidensopbygning på DTU, Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet på grundlag af et tværdisciplinært humanistisk, teknologisk og naturvidenskabeligt forskningssamarbejde.
- Opbygning af dansk ekspertise inden for avancerede geofysiske metoder og droneteknologi til systematiske arkæologiske forundersøgelser som det førende sted i Norden og med tiden i Europa.
- Populærvidenskabelig formidling i diverse nyhedsmedier, inkl. lokalaviser, landsdækkende aviser samt på nettet (projekthjemmeside og sociale media)
- Afholdelse af tre nordeuropæiske workshops (Danmark, Sverige, Norge, England, Tyskland og Holland) med det formål at opbygge et tæt tværfagligt netværk mellem universiteter og museer omkring geofysiske droneobservationer. De tre workshops vil afholdes på henholdsvis DTU, Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet.

Perspektiv

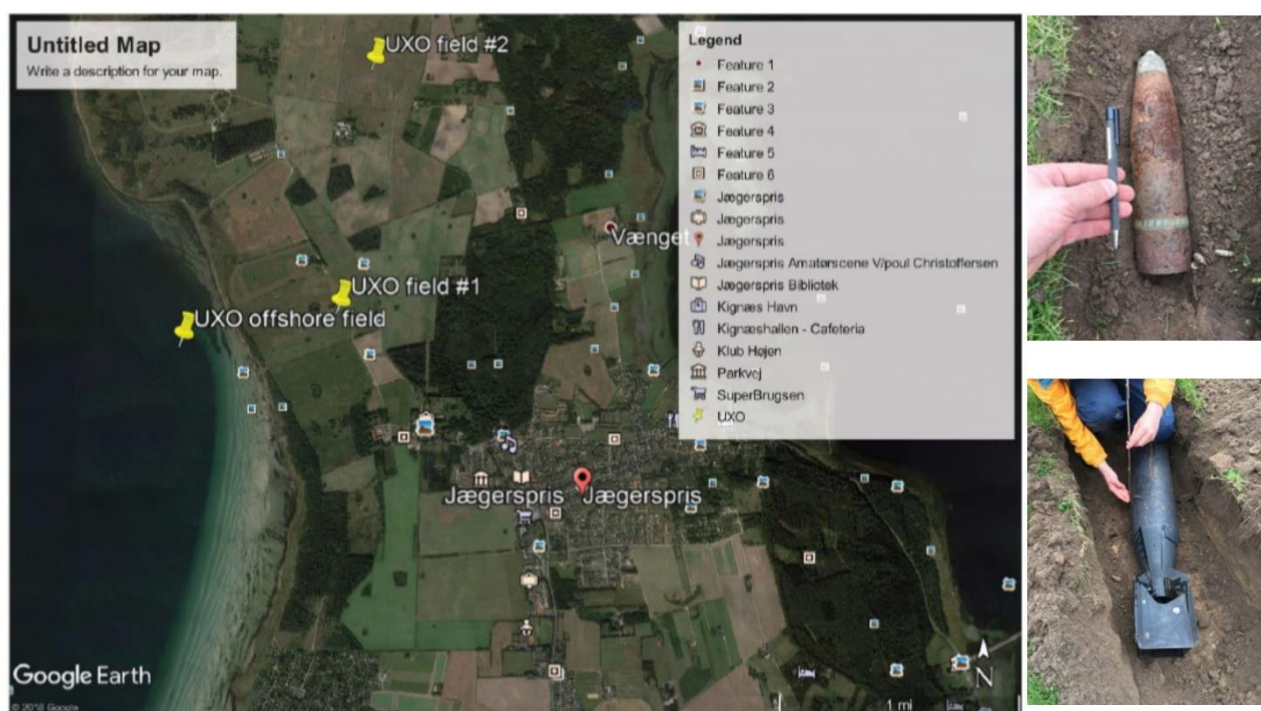
ArkæoDrone tager udgangspunkt i et samarbejde mellem DTU Space, Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet i Roskilde. Vi ønsker dog med projektet at opbygge et teknologisk setup og en viden, som efter projektet skal komme samtlige museer i Danmark til gode. Dette skal gøres bl.a. vha de tre planlagte workshops, der har til formål at sammenkalde interessenter og eksperter fra Danmark og Noreuropa med erfaring og/eller interesse inden for arkæologisk forskning ift geofysiske undersøgelser og droneteknologi. De tre workshops skal udbrede kendskabet til geofysiske metoder og droneteknologi inden for arkæologisk forskning og ikke mindst etablere en tæt kontakt imellem lokale aktører (museer, kommuner, osv.) og teknisk-naturvidenskabelige universiteter.

Ligesom det allerede er blevet påvist med overfladetopografisk kortlægning vha LiDaR teknologiske droneobservationer i hhv. Danmark (<https://videnskab.dk/teknologi/laserteknologi-revolutionerer-dansk-arkaeologi>) og udlandet (<https://videnskab.dk/kultur-samfund/forsker-efter-kaempe-maya-fund-det-er-kun-toppen-af-isbjerget>), forventer vi, at **ArkæoDronens** avancerede arkæomagnetiske setup (Figur 3 og Figur 5) kombineret med detaljeret 3D topografi over land og 3D bathymetri til vands vil gøre helt nye og ikke mindst skjulte landskaber tilgængelige for arkæologiske undersøgelser og i en langt større skala end for nuværende. Dermed vil **ArkæoDrone** bidrage til at opnå et overblik over det samlede bevarede kulturlandskab i Danmark. Den færdige platforms forventede kosteffektive kortlægningspotentiale vil således bidrage til at optimere arbejdsprocesser indenfor museernes statslige ansvarsområder, herunder danefæ og myndighedsrådgivning, ligesom det vil bidrage til en effektiv og fremtidssikret bevaring af danske kulturlandskaber uanset hvilke geografiske områder og tidsperioder.

ArkæoDronen bygger videre på teknologi og viden opnået under UAV-QMS projektet, som er et 4-årigt Innovationsfondsprojekt ledet af DTU Space. Formålet med UAV-QMS er at designe en fuldt integreret geofysisk droneplatform m.h.p. indsamling af magnetiske data over større og relativt flade områder til kortlægning af større granater og miner fra 2. Verdenskrig (se beskrivelse af UAV-QMS i Bilag 1). Ved at udvikle på metoder i to domæner simultant opnås en særdeles effektiv krydsbefrugtning. Således vil **ArkæoDrone**-projektet kunne bidrage til at optimere metoder til minesøgning:

- Med **ArkæoDrone-1** platformen (Figur 3 og Figur 4) vil vi kunne optimere især de magnetiske målinger ift UAV-QMS teknologien ved at anvende 4-8 magnetometre frem for kun 2 sensorer, som det er tilfældet i UAV-QMS. Instrumenteringen og magnetometersystemerne i **ArkæoDrone** projektet er tilpasset en langsommere og kraftigere droneplatform, og vi opnår derfor at kunne kortlægge tættere på landskabet, i langt højere detaljegrad og i mere komplekse landskabstyper.
- Derudover vil vores planlagte setup over vand med **ArkæoDrone-2** (Figur 5 og Figur 6) give mulighed for at kortlægge selv forholdsvis små granater og miner i hhv søer og lavt vandede kystområder, hvilket i dag ikke er muligt med UAV-QMS teknologien.

Via UAV-QMS projektet vil vi i **ArkæoDrone** få daglig adgang til hurtige tests på (i) en testmark i Jægerspris (Figur 8) med nedgravede miner og granater, samt (ii) et kystnært og lavt vandsområde ud for skydeterrænet i Jægerspris, hvor teknologien i **Arkæodrone** projektet kan testes for fejl og mangler inden de 3 store arkæologiske feltkampagner rundt i landet.



Figur 8. (Venstre) UAV-QMS testområder i Jægerspris. I ArkæoDroneprojektet vil vi benytte os af UXO field #1 og UXO offshore field. (Højre) Eksempler på granater og miner (UXO) fundet i danske farvande og kyster.

Fremtidssikring af projektet

Resultaterne af **ArkæoDrone** er henholdsvis udvikling af en arkæologisk undersøgelsesmetode på baggrund af teknologi og henholdsvis kompetenceopbygning i tolkning og brug af geofysiske data inden for arkæologiske undersøgelser. Ekspertisen opbygges hos projektpartnerne, men skal allerede under projektets udførelse udbredes til andre interessenter, når tests er blevet gennemgået. Efter projektets afslutning i april 2022, vil der derfor være behov for fortsat dialog og samarbejde, hvor den arkæologiske og teknologiske ekspertise kan stilles til rådighed på forskellige måder, herunder som myndighedsbetjening indenfor f.eks. bevarings- og danefæ-rådgivning, i projektsamarbejder indenfor forskning eller nøddugravinger og som konsulentydelse. Vi forestiller os et scenari, hvor DTU f.eks. forestår den teknologiske myndighedsbetjening i form af droneflyvning og magnetisk data processing

vha DTU software, mens LiDaR og Multibeam processing vha kommerciel software samt integreret magnetik og LiDaR datatolkning forestår primært hos Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet. Projektleder Arne Døssing er indehaver af et professionelt dronercertifikat.

Projektpartnere

ArkæoDrone er et tværfagligt projekt, der bygger på foreningen af humanistiske, natur- og teknisk videnskabelige ekspertiser repræsenteret ved de tre samarbejdspartnere i fællesskab:

DTU Space

Er Danmarks nationale rumforskningscenter med en international forskningsprofil og er anerkendt som højt kvalificeret samarbejdspartner og leverandør til ESA og NASA af både instrumentering og videnskab. Ved hjælp af satellitter, fly, droner og jordbaserede målestationer forsker Afdeling for Geomagnetisme under DTU Space i jordens magnetfelt og er ansvarlig for de nationale data på området.

Projektleder Arne Døssing (DTU Space) er seniorforsker ved Afd. for Geomagnetisme og har 15+ års erfaring inden for geofysisk datatolkning, indsamling og processing. AD har i de seneste 2 år arbejdet med droneteknologi i hhv UAV-QMS projektet samt MuVerDrone projektet, begge specifikt med henblik på avancerede sensorsystemer inden for dronebaserede magnetiske observationer. Han er geolog-geofysiker af baggrund og har en lang erfaring inden for både bjergartsmagnetisme, magnetisering i granater og miner, samt inden for flybårne magnetiske målinger.

Co-leder, forskningsformidler og workshop-ansvarlig Hanne Thomasen (DTU Space) har en PhD grad i klassisk arkæologi og 15+ års erfaring med arkæologisk forskning og museumsarbejde på henholdsvis Nationalmuseet og Ny Carlsberg Glyptotek. HT står for innovation, entreprenørskab og myndighedsrådgivning på DTU Space. I nærværende projekt er HT's rolle forskningsmæssigt bindeled imellem DTU Space og de to tilknyttede museer, Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet, dels for at sikre den bedst mulige overførelse af teknisk videnskab til arkæologi og dels for at optimere projekresultaternes fremtidige udbredelse som en værdiskabende metode for danske museer.

DTU campus giver adgang til kernefaciliteter, såsom 3D printer og vindtunnel produktion af prototyper af magnetometersystemer, diverse produktionslaboratorier inkl laserskærer og metalværksteder, geomagnetisk værksted og observatorie, samt professionelle dronepiloter.

Nationalmuseet

Er nationalt hovedmuseum og førende indenfor flere arkæologiske forskningsområder på nationalt såvel som internationalt plan. Projektet vil være forankret i Danmarks og Middelhavslændenes Oldtid (DMO), der har stor erfaring med arkæologiske udgravninger, tolkninger og publicering på internationalt niveau. Afdelingen huser det nationale beretningsarkiv over udgravninger, der vil danne grundlag for detailstudier af den kulturhistoriske landsskabsudvikling.

Projektleder Mads Densø Jessen (DMO) er seniorforsker og pt. projektleder af Førkristne Kultpladser, og har mange års erfaring med arkæologiske udgravninger og et stort og bredt kendskab til Danmarks forhistorie med fokus på bebyggelsesudvikling og -organisering. MDJ har en PhD grad i arkæologi (Aarhus Universitet) med titlen *The sacred space in a time of religious change – material and conceptual*

interaction in ritual environments during the Christianization of South Scandinavia. MDJ har adskillige forskningspublikationer bag sig og stor erfaring med redaktionelle processer og projektledelse,

Museumsinspektør Josefine Franck Bican arbejder pt. Ligeledes på Førkristne Kultpladser som hhv. redaktør og skribent på publikationen af Tissø. JFB har et stort og indgående kendskab til området og arkæologien ved Tissø og mange års erfaring med arkæologiske udgravninger. JFB har flere publikationer bag sig og har stor formidlingsmæssig erfaring.

Vikingskibsmuseet

Vikingskibsmuseet i Roskilde er Danmarks museum for mennesket, skibet og havet i oldtid og middelalder og er kendetegnet ved et tværfagligt forskningsmiljø, hvor håndværkere, akademikere og sejlere tilsammen udforsker fortidens maritime kulturhistorie. De metodiske tilgange fra såvel den eksperimentelle som den maritime arkæologi er udgangspunkter i museets forskning.

Vikingskibsmuseet i Roskilde varetager det marinarkæologiske ansvar for alle kulturhistoriske perioder på dansk søterritorie øst for Storebælt. Museets forskning tager afsæt i ansvarsområdet og er særligt koncentreret om vikingetid samt skib, søfart og bådebygningskultur.

Forskningsresultaterne bidrager til den maritime forskning nationalt og internationalt, og resultaterne skriver sig ind i den forskning, der foregår på et bredere felt, og bliver dermed relevant for et bredt kulturhistorisk forskningsmiljø i ind- og udland.

Projektleder Morten Johansen er museumsinspektør for marinarkæologi, og arbejder fortrinsvis med projektledelse ved forundersøgelser og udgravninger af submarin stenalder. MJ har mange års erfaring med marinarkæologiske udgravninger og arkæologisk tolkning af marin geofysik samt udvikling af og implementering af nye udgravnings- og dokumentationsmetoder.

Museum Skanderborg

Museum Skanderborg er et statsanerkendt lokalmuseum med Skanderborg Kommune som arkæologisk ansvarsområde. Centralt i kommunen ligger Illerup Ådal, som for nylig blev udpeget af en arbejdsgruppe under Slots- og Kulturstyrelsen til at huse hele to superikonlokaliteter. Våbenofferfundet i ådalen og hærofringen i Alken Enge.

Museum Skanderborg har siden 2005 arbejdet med hærofringen i Alken Enge og indgik i 2009 et samarbejde med Aarhus Universitet (Geoscience og Forhistorisk Arkæologi) samt Moesgård Museum i et større forsknings- og udgravningsprojekt af hærofringen i Alken Enge, finansieret af Carlsbergfondet. Se: <http://www.pnas.org/content/115/23/5920>

Projektleder Ejvind Hertz er museumsinspektør med ansvar for den arkæologiske virksomhed på Museum Skanderborg. Initiativtager til genoptagelsen af de arkæologiske undersøgelser i Alken Enge og udgravningsleder på undersøgelserne fra 2008-9 og igen fra 2012-14. Er p.t. projektleder på in situ bevaringsprojekter på både våbenofret og hærofringen i Alken Enge.

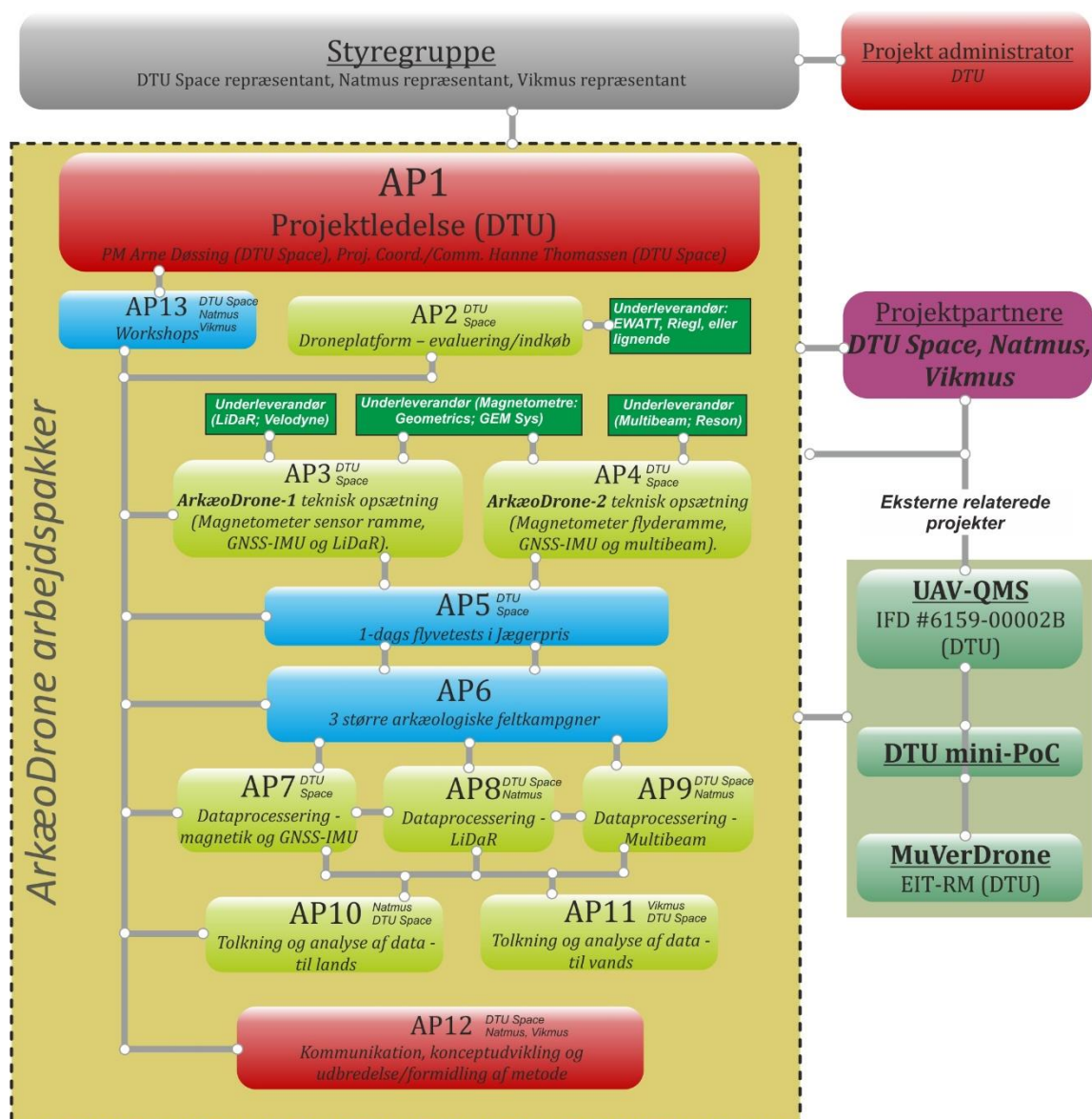
Projektets gennemførelse

ArkæoDrone vil få en overordnet styregruppe bestående af en repræsentant fra hver partner samt en repræsentant fra bevillingshaver, hvis ønskeligt. Styregruppen tager de overordnede beslutninger om projektet, mens den daglige projektledelse påhviler DTU Space med Arne Døssing som faglig leder og Hanne Thomasen som co-leder og koordinator mellem partnerne.

Arbejdspakker

Projektet er organiseret i 13 arbejdsplaner (APs), der er indbyrdes afhængige, som vist på Figur 9. Der vil være en af projektpartnerne som hovedansvarlig for hver arbejdsplan udførelse, men det fratager ikke de andre relevante projektpartnere for ansvar for levering og gennemførelse til den aftalte tid.

For en mere detaljeret beskrivelse af arbejdsplanerne jf. Bilag 2.



Figur 9. Pert Chart der viser den interne afhængighed imellem de 13 arbejdsplaner (APs) i ArkæoDrone projektet. Figuren viser ligeledes eksterne DTU Space projekter der bidrager med software eller hardware til projektet samt den overordnede projektorganisation. De 13 arbejdsplaner er beskrevet detalje i Bilag 2.

Tidsplan

ArkæoDrone projektet vil skydes i gang den 1/4-2019 med et planlagt kick-off møde for alle projektpartnere. Den videre tidsplan for projektet er vist i tabellen nedenfor.

	2. kv	3. kv	4. kv	1. kv	2. kv	3. kv	4. kv	1. kv	2. kv	3. kv	4. kv	1. kv
	2019	2019	2019	2020	2020	2020	2020	2021	2021	2021	2021	2022
AP 1												
AP 2												
AP 3												
AP 4												
AP 5												
AP 6												
AP 7												
AP 8												
AP 9												
AP 10												
AP 11												
AP 12												
AP 13												

Detaljeret budget (inkl egenfinansiering)

Nyansættelser

- Tekn. Assist., Aerospace-Mekanik-ingeniør (DTU): 1 årsværk
- Tekn. Assist., Elektro-ingeniør (DTU): 1 årsværk
- PhD #1: Dronebaseret teknologi inden for arkæomagnetisk kortlægning (DTU): 3 årsværk
- PhD #2: Dronebaseret teknologi inden for 3D topografisk og bathymetrisk kortlægning vha LiDaR og Multibeam (DTU): 3 årsværk

Beskrivelse af udgifter

Budget					
	april 2019 - april 2020	april 2020 - april 2021	april 2021-april 2022	ansøgt beløb i alt	egenfinansiering i alt
Løn					
DTU					
Faglig projektledelse 1 årsværk	183.000	183.000	183.000	549.000	
projektkoordinering, Kommunikation og formidling 1 årsværk	183.000	183.000	183.000	549.000	
Tekn. assist. Elektroingeniør 1 årsværk (til datalogger og droneservice)	240.000	120.000	120.000	480.000	
Tekn. assist. Aerospace-Mekanik ingeniør 1 årsværk (til sensorsystemer)	240.000	120.000	120.000	480.000	
Geomagn. instrumentering 0,25 årsværk	45.800	45.800	48.500	140.100	
Egenfinansiering DTU 20% OH	178.427	178.427	178.427		535.280,80
Nationalmuseet					
1 årsværk Nationalmuseet (12 t. ugentligt fordelt på 3 år)	183.000	183.000	183.000	549.000	
Egenfinansiering 3 årsværk Nationalmuseet (25 t. ugentligt)	389.890	389.890	389.890		1.169.670
Egenfinansiering 3 mdr. per år fra tre medarbejdere	184.882	184.882	184.882		554.646
Vikingskibsmuseet					
0,5 årsværk	91.666	91.666	91.666	274.998	
Ph.d. studerende tilknyttet projektet					
Ph.d. #1	408.000	408.000	408.000	1.224.000	
Ph.d. #2	408.000	408.000	408.000	1.224.000	
Egenfinansiering DTU ph.d. 40%	544.000	544.000	544.000		1.632.000
Udstyr					
EWATT EWZ-H6 multirotordrone (70.000 S) eller lignende	450.000			450.000	
Reson MB2 Odom lavtvands multibeam bathymetri sensor inkl IMU+SVP	500.000			500.000	
Reson MB2 Odom multibeam processeringssoftware	100.000			100.000	
Velodyne Puck topografi LiDar sensor - integration + software	150.000			150.000	
Højpræcisions GNSS og IMU (Novatel) + Antenne	90.000			90.000	
Micro laser altimeter til magnetometerramme	20.000			20.000	
4 nye Geometrics MFAM sensorer til Arkæodrone 1	290.000			290.000	
Arkæodrone 1 magn.-ramme prototypeudvikling (3D print, materialer)	35.000	40000		75.000	
Arkæodrone 2 magn. Flydepram prototype udvikling (3D print, materialer)	35.000	40000		75.000	
Magn. Ramme og magn. Flyderamme færdigproduktion (kulfiber)			150.000	150.000	
Egenfinansiering DTU (3 GSMP-35U mag. til Arkæodrone 2 inkl. afskrivning)	240.000				240.000
Egenfinansiering DTU (4 nye Geometrics MFAM sensorer til Arkæodrone 1)	290.000				290.000
Egenfinansiering DTU Matrice 600 Pro drone m D-RTK til indl. tests inkl. afskrivning	40.000				40.000
Andre udgifter					
1-dags feltkampagne Jægerspris indledende tests (billeje, forplejning)	20.000	20.000	10.000	50.000	
Feltarbejde ifdm. 3 arkæologiske sites (3-5 dg per site) i DK		35.000	70.000	105.000	
Droneflyvningskursus x 2 PhD (Certifikat 2)	30.000			30.000	
Workshops (1 årligt)	75.000	75.000	75.000	225.000	
i alt				7.780.098	4.461.596,8

Alle udgifter er eks. moms. Projektet er et forskning/udviklingsprojekt og dermed fritaget for moms.

Risici forbundet med projektet

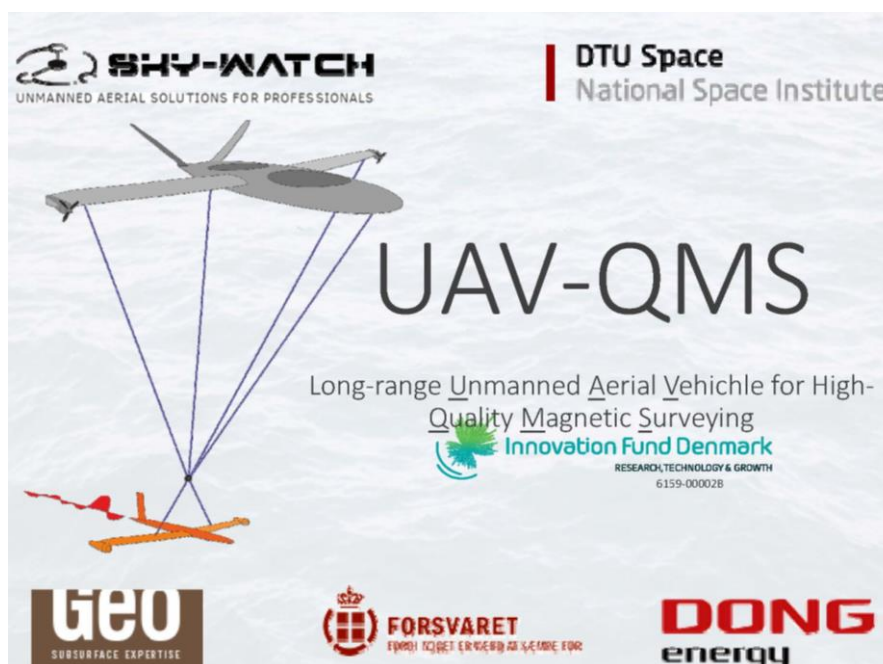
Risici	Alvorlighed (1-5)	Sandsynlighed (1-5)	Work-around	Ansvar
Integrering af 6-8 MFAM sensorer forsinkes	2-3 (Medvirker at projektet forsinkes og dataindsamling til de to PhD studerende forsinkes).	2-3	Magnetiske data til PhD #1 studerende kan indsamles via UAV-QMS teknologien, således at den studerende kan oparbejde erfaring med data. LiDaR data kan stadig indsamles til PhD #2 studerende.	DTU Space
Integrering af 6-8 MFAM sensorer fejler	4 (Det teknologiske setup skal redefineres).	1-2	Størrelse på magnetometer-rammen gøres mindre og der påmonteres (i) færre MFAM sensorer eller (ii) 3-4 af de allerede kendte GSMP-35U sensorer, som DTU Space kender og besidder to af. I dette tilfælde vil DTU Space indkøbe 2 ekstra GSMP-35U. En mindre ramme og færre sensorer vil gi lavere opløsning på data og kræve flere flyvelinjer.	DTU Space
Flyvetilladelse fratages på en af 3 udvalgte sites	Vi må flytte test til alternativt site	2 (Vi kommer til at flyve i statslige områder uden for byrænsere og vil planlægge kortlægning væk fra særligt naturfølsomme og beskyttede områder, hvor der kan være flyveforbud)	Nationalmuseet og Vikingeskibsmuseet fremlægger alternative sites.	Nationalmuseet Vikingeskibsmuseet
Dronen styrter og udstyr ødelægges helt eller delvist	2-4 (Hvis dronen og udstyr ødelægges helt eller delvist, vil det medføre en vis forsinkelse i projektet da nyt skal bestilles/bygges op)	2-3 (Grundet den nye teknologi og flyvning med et forholdsvis stort eksternt payload i form af en magnetometer-ramme, vil der være en vis risiko for styrt i begyndelsen af projektet. DTU Space har dog allerede erfaringer med at flyve med eksterne payloads i UAV-QMS – hvilket er gjort uden styrt indtil videre).	Vi vil i projektet bestæbe os på at lave minimum 2 versioner af alt udstyr (datalogger, ramme osv), således at eventuelle skader hurtigt kan omgås via andet udstyr. I Tilfælde af ødelæggelse/beskadigelse af magnetometre, LiDaR sensor eller selve dronen er DTU Space selvforsikret og nyt udstyr kan bestilles uden yderligere omkostninger for projektet – andet end forsinkelse forbundet med levering (< 1 måned)	DTU Space

Bilag 1 (Teknisk baggrund)

Relation til andre projekter

UAV-QMS (DTU)

I UAV-QMS projektet udvikler DTU Space i samarbejde med en række danske virksomheder et konkurrencedygtigt alternativ til eksisterende platforme (helikopter og terrængående køretøjer) til kortlægning af granater og miner fra 2. verdenskrig. I projektet kombineres den nyligt danskudviklede (DTU Space og Sky-Watch A/S) Smart UAV drone (se Figur 10) med et specialdesignet dronekompatibelt dobbelt-sensor magnetometer system til kortlægning over større afstande med flad topografi.



Figur 1 Præsentationsforside for UAV-QMS projektet. På billedet ses Smart UAV'en (grå drone) med en dobbelt-sensor magnetometer system (orange) ophængt nedenunder vha det DTU-patenterede ophængningssystem (Døssing og Jakobsen, 2018)

Smart UAV'en er en hybrid drone, m.a.o. den kan lave vertikal take-off og landing (VTOL) som en helikopter men flyver som et almindeligt fly (fixed-wing). Dens VTOL egenskaber gør den ideel til montering af et magnetometer system nedenunder, mens dens fixed-wing egenskab giver den lang rækkevidde og høj hastighed. Dvs Smart UAV'en egner sig til kortlægning af store og flade områder. Imidlertid egner den sig ikke til lav flyvning i områder med varierende topografi eller omkringliggende bevoksning, hvilket ofte er tilfældet for arkæologiske sites nær søer og moser. Magnetometersystemet i UAV-QMS projektet udvikles endvidere med en aerodynamik specielt til Smart UAV'ens høje hastigheder. Smart UAV'en kan derfor heller ikke flyve med en decideret magnetometer-ramme som vist på Figur 3 eller trække en flydende ramme henover vandoverfladen som i Figur 5. I UAV-QMS projektet udvikles magnetisk processerings software til 2 GSMP-35U magnetometre, som vi vil videreudvikle til de arkæomagnetiske målinger i **ArkæoDrone** projektet.

MuVerDrone (DTU)

MuVerDrone er et DTU Space projekt – også baseret på den store Smart UAV platform – med henblik på at integrere hardware og software-mæssigt 3 MFAM magnetometer-sensorer på selve platformen til brug inden for mineralefterforskning i Europa. Projektet er støttet af EU under European Institute of Technology and Innovation – Raw Materials (EIT-RM) og løber frem til 2021. Erfaringen med integrering og test af flere MFAM sensorer på samme tid fra MuVerDrone projektet indgår direkte i **ArkæoDrone**.

Mini-PoC (Proof of Concept) (DTU)

Dette projekt er bevilget til instrumentindkøb m.h.p. at teste og udvikle MFAM magnetometre til egentlig brug.

Teknisk baggrund **ArkæoDrone**

Magnetometer sensorer

Kritisk for detaljeret magnetisk kortlægning er, at man kan måle fra flere magnetometre på samme tid og i velkendt og konstant indbyrdes sensorafstand. Sådanne målinger kaldes for gradiometermålinger. Et eksempel på gradiometer setup er vist på Figur 3 og Figur 5 med hhv 4-8 magnetometre samt 3 magnetometre. Mens gradiometermålinger giver en væsentlig bedre opløsning af detaljer i magnetfeltet, kræver det en mere avanceret processeringssoftware, præcis attitude (3D vinkler) og position af rammesystemet.

Afdeling for Geomagnetisme ved DTU Space har for nylig erhvervet sig et sæt af de nye MFAM magnetometre fra det amerikanske firma Geometrics med henblik på test og færdigudvikling. De nye sensorer har en vægt på ca. 150 gram, et strømforbrug på 1 watt og en sampling på 1000 Hz. DTU Space forventer at have en færdigintegreret løsning for MFAM klar i efteråret 2018, herunder en specialdesignet datalogger. I **ArkæoDrone** projektet ønsker vi, at integrere op imod 8 MFAM sensor sæt på **ArkæoDrone-1** (Figur 3). Vi vil genbruge den viden, vi har opnået i UAV-QMS projektet og overføre denne til design og konstruktion af en specialdesignet datalogger til 8 MFAM sensorer. Vi vil ligeledes benytte os af den viden, vi har opnået i UAV-QMS ifbm design og tests af ophængte magnetometer systemer.

Såfremt **ArkæoDrone** projektet bevilges, vil DTU Space egenhændigt indkøbe 4 nye sæt MFAM sensorer specifikt til projektet. Værdi: 290.000 DKK.

Til **ArkæoDrone-2** forventer vi at anvende 3 stk GSMP-35U absolutte magnetometre fra GEM Sys til målinger til vands (Figur 4 og Figur 5). GSMP-35U har en total vægt på ca. 1000 g og et strømforbrug på 15W, men har til gengæld en mindre dead-zone end MFAM. Da magnetometrene skal trækkes henover vandoverfladen i en specialdesignet hydrodynamisk flyve-ramme vil vægten af magnetometrene reduceres kraftigt, og vi kan benytte os af samme multirotor-drone som til **ArkæoDrone-1** over land.

Såfremt **ArkæoDrone** projektet bevilges, vil DTU Space bidrage med 3 stk GSMP-35U sensorer fra UAV-QMS projektet. Værdi efter afskrivning: 240.000 DKK.

LiDaR (Light Detection and Ranging)

3D detaljeret topografisk kortlægning, f.eks. til afkodning af delvis skjulte arkæologiske levninger i selve overfladen, kan gøres ved hjælp af en højpræcisions LiDaR sensor. Vi foreslår at integrere den avancerede og velkendte Velodyne PUCK LiDaR på **ArkæoDrone-1** (Figur 3 – højre), da denne er gennemtestet og udbredt inden for geofysisk kortlægning med droner.

Multibeam

3D detaljeret bathymetrisk kortlægning kræver brug af en multibeam sensor i vandet. Vi vil benytte os af MB2 Odom multibeam systemet fra danske Reson (Teledyne), som er specielt udviklet til kystnære farvande og lettere fartøjer, såsom en flyde-ramme (Figur 5).

Droneplatform

Vi ønsker i **ArkæoDrone** at gøre vores sensorsystemer og software uafhængige af selve droneplatformen, således at dronen med tiden kan opgraderes eller udskiftes uden, at det har indflydelse på kortlægningen. Vi ønsker derfor at designe og teste vores sensorsystemer (Figur 3 og Figur 5) på en kommercielt tilgængelig og gennemtestet droneplatform med følgende kravsspecifikationer:

- Multi- eller singlerotor type (VTOL).
- Autonom cruise hastighed ~7 m/s
- Differentiel-Real Time Kinematics (D-RTK) til præcis 3D positionering.
- Minimum payload (sensor bæreevne): 10 kg.
- Minimum flyvetid inkl. payload: >45 minutter.
- Motor og GNSS-IMU redundans.
- Vejrbestanding, m.a.o. skal kunne flyve under let regn og i vind omkring 10-12 m/s.
- Autonom flyvning med brugervenlig flyvekontrol og survey-setup

Et eksempel på egnet platform er EWATTS kommende EWZ-H6 Hybrid multirotor drone (tilgængelig fra juli 2018) med både batteri og forbrændingsmotor. En anden mulighed er Riegls Ricopter. I de første 2 måneder af **ArkæoDrone** vil projektleder Arne Døssing foretage en grundig research af kommercielt tilgængelige droner, før en beslutning om indkøb foretages.

Bilag 2 Arbejdspakker – detaljeret beskrivelse

AP1 Projektledelse

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Faglig projektledelse (inkl phd vejledning, møder med AP-ansvarlige)
- Tværinstitutionel projektkoordination
- Afrapportering (videnskabelige og økonomiske årsrapporter)

AP2 Droneplatform – evaluering og indkøb

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Deltagelse i AUVSI XPONENTIAL (Denver, April 2019) og besøg hos udvalgte droneproducenter.
- Beslutningsprocess ift valg af droneplatform til ArkæoDrone
- Indkøb af platform
- Flyvetræning, teknisk træning ift reparation, mv. (leveres af droneproducent ved køb)

AP3 ArkæoDrone-1 – teknisk opsætning og tests

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Aerodynamisk og mekanisk design af magnetometer ramme og ophæng.
- 3D print af prototyper – tests af system i Jægerspris (AP5) – iterative forbedringer
- GNSS-IMU integration, inklusiv datalogger.
- Konstruktion af sensorhuse til alle 4-8 stk magnetometre.
- Integration af magnetometre ift bægt versus datakvalitet og kompleksitet.
- Tests i Jægerspris – iterative forbedringer af design
- Konstruktion af fuld-skala ramme og ophængningssystem
- Integration af Velodyne PUCK payload.

AP4 ArkæoDrone-2 – teknisk opsætning og tests

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Aerodynamisk og mekanisk design af magnetometer flyderamme
- 3D print af prototyper – tests af system i vandet ud for Jægerspris (AP5) – iterative forbedringer
- Integration af magnetometre og MB2 multibeam
- Tests i Jægerspris – iterative forbedringer af design
- GNSS-IMU integration, inklusiv datalogger.
- Konstruktion af fuld-skala flyderamme

AP5 1-dags flyvetests i Jægerspris

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- 1-dags flyvetests i Jægerspris af ArkæoDrone-1 og ArkæoDrone-2. I første omgang benyttes en DJI Matrice 600 Pro indtil vi ved at systemere er stabile at flyve med.

AP6 3 større arkæologiske feltkampagner

Hovedansvarlige: Nationalmuseet, Vikingeskibsmuseet, DTU Space

Indhold:

- Evaluering af foreslåede feltområder og deres egnethed til tests. Udvælgelse af 3 kampagneområder til test af hhv **ArkæoDrone-1** og **-2**.
- Forberedelse til feltkampagner
- Feltkampagner (3-5 dages varighed)
 - Område 1 (Nationalmuseet ansvarlig)
 - Område 2 (Vikingeskibsmuseet ansvarlig)
 - Område 1 (Nationalmuseet ansvarlig)

AP7 Dataprocessering – magnetik og GNSS-IMU

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Udvikling af processeringssoftware til
 - **ArkæoDrone-1** magnetometer-ramme og 8 stk MFAM magnetometre
 - **ArkæoDrone-2** magnetometer-flyderamme og 3 stk GSMP-35U magnetometre
- Processering af data fra 1-dags felttest-kampagner i Jægerspris
- Iterative software-forbedringer baseret på 1-dags felttest-kampagner
- Processering af data fra de 3 hovedfeltkampagner.

AP8 Dataprocessering – LiDaR

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Indkøb af kommerciel software til Velodyne LiDaR
- Processering af data fra 1-dags felttest-kampagner i Jægerspris
- Processering af data fra de 3 hovedfeltkampagner.

AP9 Dataprocessering – Multibeam

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Indkøb af kommerciel software til MB2 Odom Multibeam sensor
- Processering af data fra 1-dags felttest-kampagner i Jægerspris
- Processering af data fra de 3 hovedfeltkampagner.

AP10 Tolkning og analyse af data til lands

Hovedansvarlig: Nationalmuseet

Indhold:

- Sammenkædning af kendte udgravningsdata, magnetometer- og 3D LiDaR topografi data.
- Kobling til historiske kort og vurdering af recente kontra geologiske kontra kulturhistoriske udslag/anomalier i magnetometerdata.
- Prospektering af lokaliteternes reelle udbredelse, samt præcisering af eventuelle mindre, nye satellit-lokaliteter i nærmiljøet.
- Vurdering af muligheden for differentiering af anlægstyper og kontekster på baggrund af **ArkæoDrone-1** målingerne.
- Eventuel stikprøvegravninger af (nye) udvalgte kontekster til verificering af **ArkæoDronen**.

AP11 Tolkning og analyse af data til vands

Hovedansvarlig: Vikingeskibsmuseet

Indhold:

- Verificering og eventuel prøvegravning af udpegede magnetomateranomalier
- Sammenkædning af kendte udgravningsdata og øvrige data for analyse af ArkæoDrones præcision og opløsning gennem vand
- Prospektering af lokaliteternes reelle udbredelse
- Vurdering af muligheden for differentiering af anlægstyper og kontekster på baggrund af **ArkæoDrone-2** målingerne.

AP12 Kommunikation/formidling og udbredelse/konceptudvikling af metode

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Populærvidenskabelige artikler i dagblade og på nettet
- Formidling til interessenter ved møder, workshops o.lign
- Information på partnernes hjemmesider

AP13 Workshops

Hovedansvarlig: DTU Space

Indhold:

- Workshop 1 i 2. kvartal 2019 på DTU med fokus på udveksling af erfaringer i internationalt regi
- Workshop 2 i 1. kvartal 2021 på Nationalmuseet med fokus på opfølgning af resultater fra feltarbejde
- Workshop 3 i 1. -2. kvartal af 2022 som afslutning på projektet med fokus på næste skridt: forankring og videreførelse af kompetencer.

Bilag 3 Referencer

Davis, K., Y Li, M Nabighian (2010). Automatic detection of UXO magnetic anomalies using extended Euler deconvolution. *Geophysics*.

Campana, S., S Piro (2009). Seeing the unseen. *Geophysics and landscape archaeology*.

Cella, F., M Fedi (2015). High-Resolution Geophysical 3D Imaging for Archaeology by Magnetic and EM data: The Case of the Iron Age Settlement of Torre Galli, Southern Italy. *Surveys in Geophysics* (Springer).

Cheyney, S., S Fishwick, IA Hill (2015). Successful adaptation of three-dimensional inversion methodologies for archaeological-scale, total-field magnetic data sets. *Geophysical Journal International*.

Døssing, A., C Gaina, JM Brozena (2017). Building and breaking a large igneous province: An example from the High Arctic. *Geophysical Research Letters*.

Døssing, A., HR Jackson, J. Matzka, I. Einarsson (2013) On the origin of the Amerasia Basin and the High Arctic Large Igneous Province—results of new aeromagnetic data. *Earth and Planetary Science Letters*.

Døssing, A., J. Jakobsen (2018). Sensor system with an attachment element for a manned or unmanned aircraft. / Døssing Andreasen, Arne (Inventor); Jakobsen, Jakob (Inventor). IPC No.: B64C31/00; B64C39/02; B64D3/00; G01V3/08; G01V3/16; G01V3/40. Patent No.: WO2017EP68246. Feb 15.

Fedi, M., F Cella, G Florio, M La Manna, V Paoletti (2017). *Geomagnetometry for archaeology. Sensing the Past* (Springer).

Gavazzi, B., P Le Maire, M Munschy (2016). Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys. *The Leading Edge*.

Hatakeyama, T., Y Kitahara, S Yokoyama (2018). Magnetic survey of archaeological kiln sites with Overhauser magnetometer: A case study of buried Sue ware kilns in Japan. *Archaeological Prospecting*.

Li, Y., SGR Devriese, RA Krahenbuhl (2013). Enhancement of magnetic data by stable downward continuation for UXO application. *IEEE Transactions on Geophysics*.

Nabighian, MN., VJS Grauch, RO Hansen, TR LaFehr (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*.

Schettino, A., D Çondi, R Perna (2017). Searching for the Antigonea Theatre: A Magnetic Survey in an Ancient Epirus City. *Archaeological Prospecting*.

Smekalova, Tatyana N., Olfert Voss, Sergey L. Smekalov (2008) Magnetic surveying in archaeology : more than 10 years of using the Overhauser GSM-19 gradiometer. Højbjerg.

Teskey, DJ., PJ Hood, LW Morley (1993). The aeromagnetic survey program of the Geological Survey of Canada: contribution to regional geological mapping and mineral exploration. *Journal of Earth Sciences - NRC Research Press*