

Pilotprojekt: Habitat- og havbundskortlægning af Gamborg Fjord ved brug af grøn lidar

Udført af De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) for Miljøstyrelsen

Mikkel S. Andersen, Lars Ø. Hansen, Zyad Al-Hamdani & Verner B. Ernstsen

Pilotprojekt: Habitat- og havbundskortlægning af Gamborg Fjord ved brug af grøn lidar

Udført af De Nationale Geologiske Undersøgelser for
Danmark og Grønland (GEUS) for Miljøstyrelsen

Mikkel S. Andersen, Lars Ø. Hansen, Zyad Al-Hamdani & Verner B. Ernstsen

Indhold

1.	Indledning	3
2.	Data og Metoder	4
2.1	Flybåren batymetrisk lidar (ALB) data og RGB-billeder	5
2.2	Ground truth data	5
2.3	Batymetri og ortofoto	5
2.4	Morfometri og morfologi	6
2.5	Substrattyper	8
2.6	Naturtyper	11
2.7	Vegetationsdække	11
2.8	Menneskelig påvirkning	13
3.	Resultater	14
3.1	Batymetri og ortofoto	14
3.2	Morfometri og morfologi	18
3.3	Substrattyper	28
3.4	Naturtyper	30
3.5	Overordnede habitattyper	32
3.6	Vegetationsdække	32
3.7	Menneskelig påvirkning	37
4.	Diskussion og perspektivering	39
4.1	Optimering af flybåren havbundskortlægning på lavt vand	39
5.	Konklusion	42
6.	Referencer	43

1. Indledning

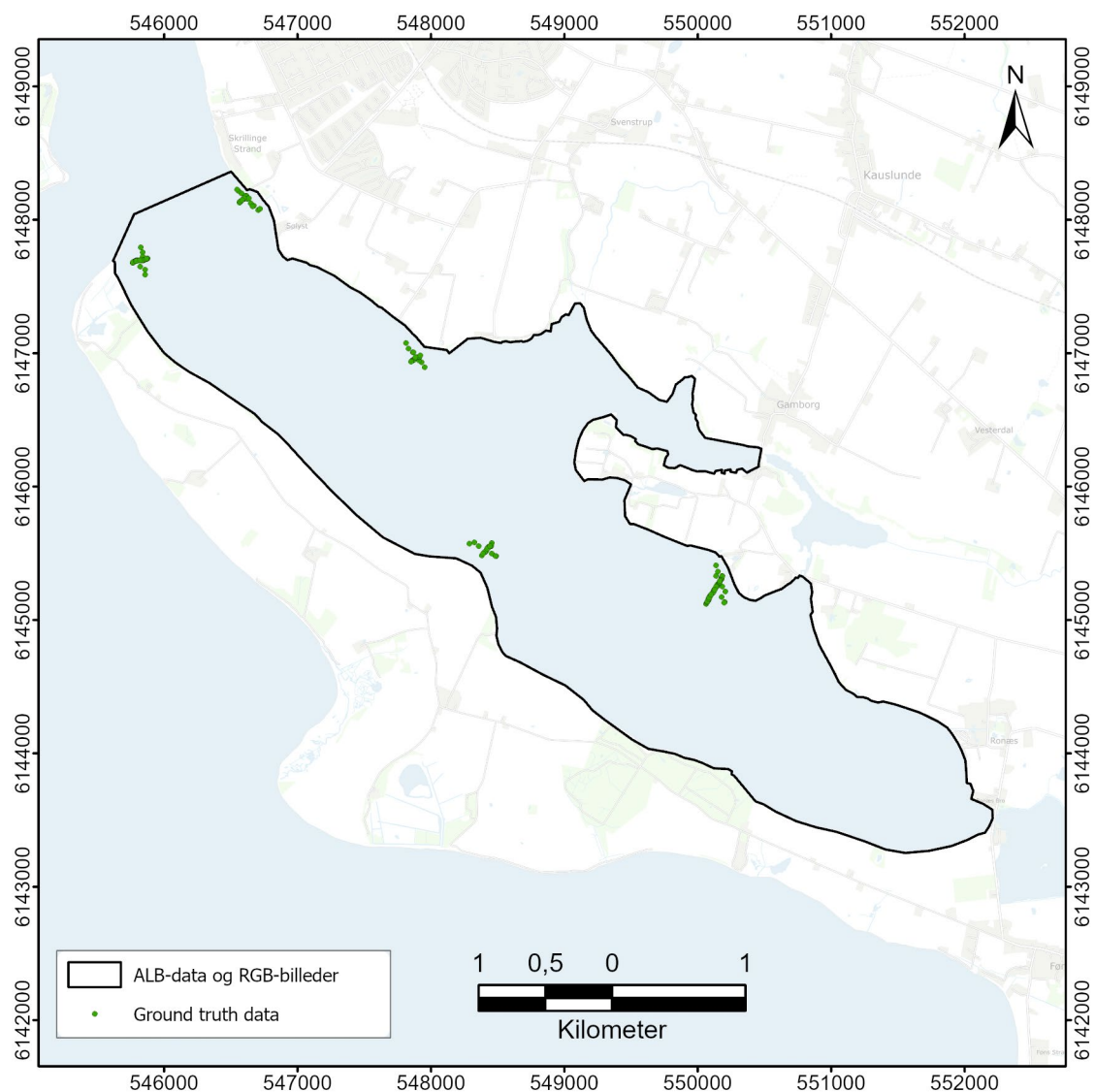
Projektets formål er at forbedre data, information og viden om Gamborg Fjord med henblik på at optimere naturforvaltningsgrundlaget.

Projektets mål er at kortlægge havbunden i Gamborg Fjord mht. batymetri, morfometri, morfologi, substrattyper (jf. Miljøstyrelsen), naturtyper (jf. Habitatdirektivet), overordnede habitattyper (jf. Havstrategidirektivet), vegetationsdække og menneskelig påvirkning. Kortlægningen er baseret på flybåren scanning (grøn lidar og RGB) i kombination med ground truth data.

Flybåren havbundskortlægning er state-of-the-art i lavvandede kystnære områder og muliggør en fladedækkende og detaljeret (højopløselig og højpræcis) 3D kortlægning af havbundsoverfladen med en sømløs overgang til land på tværs af kystlinjen.

2. Data og Metoder

Havbundskortlægningen i Gamborg Fjord er baseret på flybåren batymetrisk lidar (Airborne Lidar Bathymetry, forkortet "ALB") data og RGB-billeder kombineret med ground truth data indsamlet og leveret af Miljøstyrelsen. Oversigtskort med angivelse af området med flybåren dataindsamling og lokationer med ground truth er vist i Figur 1.



Figur 1: Område med flybåren dataindsamling (ALB-data og RGB-billeder) og punkter med ground truth data fra Miljøstyrelsen.

2.1 Flybåren batymetrisk lidar (ALB) data og RGB-billeder

ALB-data og RGB-billeder blev indsamlet af AirborneHydroMapping GmbH (AHM) d. 31/8-2023. Vinden på dagen var svag med middelvindhastigheder på 2-4 m/s fra sydvest (DMI vejrarkiv). Natten forinden var der faldet ca. 10 mm regn i området.

Der blev brugt en tomotoret Tecnam P2012 SMP-flyvemaskine med en RIEGL VQ-880-G laser-scanner integreret i den forreste del af flyet. Laserscanneren udsender en grøn laserstråle med en bølgelængde på 532 nm med en gentagelseshastighed af laserpulsen på op til 550 kHz. Flyvehøjden var 400-500 m, hvilket kombineret med en laserstråledivergens på 0,7 mrad giver et maksimalt fodaftryk af laserstrålen på ~0,4 m i diameter. Laserscanningsmønsteret er cirkulært med en indfaldsvinkel på 20°, hvilket genererer et scanningsmønster af buede parallelle linjer med en bredde på ~400 m. Punkttætheden er 10-20 point/m² ved en flyvehøjde på 400-500 m og en flyvehastighed på ~200 km/t. Ifølge RIEGL er den typiske maksimale vanddybde 1,5 Secchi-dybde.

RGB-billeder blev optaget af et kamera (Hasselblad H3D-39 med en brændvidde på 35 mm) integreret bag i flyet. Opløsningen af RGB-billederne er ~8-10 cm ved en flyvehøjde på 400-500 m. Flyets position og bevægelse blev registreret af et GNSS/IMU-navigationssystem med en hastighed på 256 Hz bestående af en kompakt GNSS-antenne (NovAtel 42G1215A-XT-1-1-CERT) monteret uden på flyet og en IMU (IGI AEROcontrol) monteret ovenpå laserscanneren.

2.2 Ground truth data

Ground truth video data blev indsamlet af Miljøstyrelsen på 5 stationer i Gamborg Fjord d. 12/6-2023. Videoer blev optaget langs transekter på tværs af kysten og efterfølgende blev dækningsgraden af vegetation tolket på punkter med ca. 2-5 m mellemrum langs transektet. Derudover blev der noteret punkter på hver side af transekterne, som markerede ålegræssets udbredelse ud til en dækningsgrad på 10% samt den maksimale udbredelse.

2.3 Batymetri og ortofoto

Præ-processeringen af ALB-data blev foretaget af AHM. Data skal igennem en række processeringskridt for at gå fra rå laserdata til punktsky data til endelig højdemodel. De overordnede processeringskridt er:

1. Beregning af nøjagtig flyposition ved korrektion af flyets navigationsdata på baggrund af GNSS-data (SDFI-a, Dataforsyningen)
2. Full-waveform processing for at forbedre dækningen på dybere vand
3. Georeferering af punktskyen

4. "Strip adjustment" til korrigerende af swaths på baggrund af overlap samt overlap med referencedata. Referencedata var klassificerede bygninger og terræn fra Danmarks Højdemodel punktsky (SDFI-b, Dataforsyningen)
5. Klassificering af terræn og vandoverflade i punktskyen
6. Modellerende af vandoverfladen
7. Korrigerende for refraktion af laserstrålen for alle punkter under vandoverfladen
8. Konverterende af punktsky til digital højdemodel (DEM) med en opløsning på 50 cm

RGB-billederne blev georefereret og derefter "syet" sammen til et samlet ortofoto.

2.4 Morfometri og morfologi

De morfometriske analyser blev baseret på den processerede lidar højdemodel med 50 cm opløsning. De morfometriske analyser bestod af overfladens hældning, kurvethed, ruhed og landskabsformer.

Hældningen blev beregnet med værktøjet "Slope" i ArcGIS Pro. Hældningsgraden for hver celle i højdemodellen blev beregnet, og et nyt hældnings-grid blev produceret, hvor hver celleværdi repræsenterer overfladens hældning på det pågældende sted. Beregning af hældning:

1. **Input:** Lidar højdemodel (50 cm cellestørrelse).
2. **Beregning:** For hver celle i højdemodellen findes den maksimale ændring i højden til de omgivende 8 celler (3x3 celleområde). Derefter beregnes hældningen i grader fra cellen til den omgivende celle med maksimal ændring i højden.
3. **Output:** Resultatet er et nyt hældnings-grid, hvor hver celled værdi repræsenterer hældningen i grader (0 til 90).

Kurvetheden blev beregnet med værktøjet "Curvature" i ArcGIS Pro. Kurvetheden er den beregnede "profil" kurvethed, som blev beregnet på baggrund af overfladens hældning. Profil kurvetheden indikerer om overfladen har en konveks eller konkav form. Beregning af kurvethed:

1. **Input:** Hældning af lidar højdemodel (50 cm cellestørrelse).
2. **Beregning:** For hver celle i hældnings-griddet findes den maksimale ændring i hældning til de omgivende 8 celler (3x3 celleområde). Derefter beregnes hældningen fra cellen til den omgivende celle med maksimal ændring i hældning. Der beregnes dermed "hældningen af hældningen", hvilket indikerer om den stejleste hældning er accelererende eller decelererende:
 - Positive værdier indikerer en decelererende hældning, og dermed konveks overflade, fx på toppen af forhøjninger i terrænet.
 - Negative værdier indikerer en accelererende hældning, og dermed konkav overflade, fx i bunden af lavninger i terrænet.
 - Værdien 0 indikerer en flad overflade med konstant hældning.

3. **Output:** Resultatet er et nyt kurvetheds-grid, hvor hver celled værdi repræsenterer profil-kurvetheden langs den stejleste hældning.

Ruheden blev beregnet med værktøjet "Terrain Ruggedness Index (TRI)" i QGIS. Ruheden blev beregnet på baggrund af lidar højdemodellen som den gennemsnitlige forskel i højden mellem en celle og dens naboceller. Beregning af ruhed:

1. **Input:** Lidar højdemodel (50 cm celledørrelse).
2. **Beregning:** For hver celle i højdemodellen beregnes ruheden ved at:
 - Analysere højdeforskellene mellem den centrale celle og dens omkringliggende celler indenfor nabocellerne i et 3x3 celledørråde.
 - Summere de absolutte forskelle i højde mellem den centrale celle og hver af de omkringliggende celler.
 - Beregne gennemsnittet af disse forskelle.
3. **Output:** Resultatet er et nyt ruheds-grid, hvor hver celled værdi repræsenterer overfladens ruhed på det pågældende sted.

Landskabsformer blev kortlagt med værktøjet "Geomorphon Landforms" i ArcGIS Pro. Landskabsformerne blev identificeret og klassificeret baseret på en analyse af lidar højdemodellen:

1. **Input:** Lidar højdemodel (50 cm celledørrelse).
2. **Beregning:** For hver celle i højdemodellen analyseres de omgivende celled højdeværdier inden for et bestemt søgeområde. Input parametre i analysen er 1) Tærskelværdi for fladt terræn, 2) Maksimum søgeradius, og 3) Minimum søgeafstand. Landskabsformer identificeres ved at analysere mønstre indenfor søgeområdet og derefter klassificere mønstrene i 10 forskellige klasser.
3. **Output:** Resultatet er et nyt grid med 10 landskabsformer, hvor hver celled værdi repræsenterer en bestemt landskabsform: Flat, Peak, Ridge, Shoulder, Spur, Slope, Hollow, Foothlope, Valley og Pit.

Forskellige input parametre blev testet, og efter evaluering af de resulterende landskabsformer blev de optimale input parametre til fremhævning af landskabsformer bestemt således at tærskelværdien for fladt terræn = 0,6 grader, maximum søgeradius = 25 m og minimum søgeradius = 2 m.

Til den morfologiske analyse blev de morfometriske kort og lidar batymetrien brugt som input til identifikation af morfologiske elementer og som grundlag for afgrænsningen. De kortlagte morfologiske elementer var Høj, Højderyg, Kant, Kanal, Depression, Revler, Odde og Bundformer. Herunder følger en beskrivelse af de morfologiske elementer og metoden til identifikation og afgrænsning:

- **Høj og højderyg:** Positive, opragende morfologiske elementer. De adskiller sig ved formen, hvor en højderyg er mere aflang end en høj. Til identifikation og afgrænsning anvendtes lidar batymetrien samt kurvetheden og landskabsformerne (peaks og ridges).

- **Kant:** Skarpe kanter i havbunden med stor hældning hvor vanddybden er kraftigt stigende over kort afstand. Til identifikation og afgrænsning blev anvendt lidar batymetrien samt hældningskortet, hvor sammenhængende områder med hældning $> 8^\circ$ blev kortlagt som kanter.
- **Kanal og depression:** Negative morfologiske elementer, som tager form af lavninger i havbunden. De adskiller sig ved formen, hvor en kanal er mere aflang end en depression. Til identifikation og afgrænsning anvendtes lidar batymetrien samt kurvetheden og landskabsformerne (valleys og pits).
- **Revler:** Aflang og opragende kystparallelt element, som ofte findes tæt på kysten og i flere parallelle rækker. Revlerne består primært af sand og er dannet af bølgepåvirket kystnormal sedimenttransport. Til identifikation og afgrænsning anvendtes lidar batymetrien samt kurvetheden og landskabsformerne (ridges og valleys).
- **Odde:** Aflang og opragende, ofte tilnærmelsesvist kystparallelt element. Til forskel fra revlerne, er en odde dannet af kystparallel sedimenttransport, og dækker oftest (men ikke altid) et større areal. Til identifikation og afgrænsning anvendtes lidar batymetrien og hældningen.
- **Bundformer:** Opragende morfologiske elementer, som er dannet af dynamiske processer fra bølger og strøm (og som ikke tydeligt kan defineres som revler). Til identifikation og afgrænsning anvendtes lidar batymetrien samt kurvetheden og landskabsformerne.

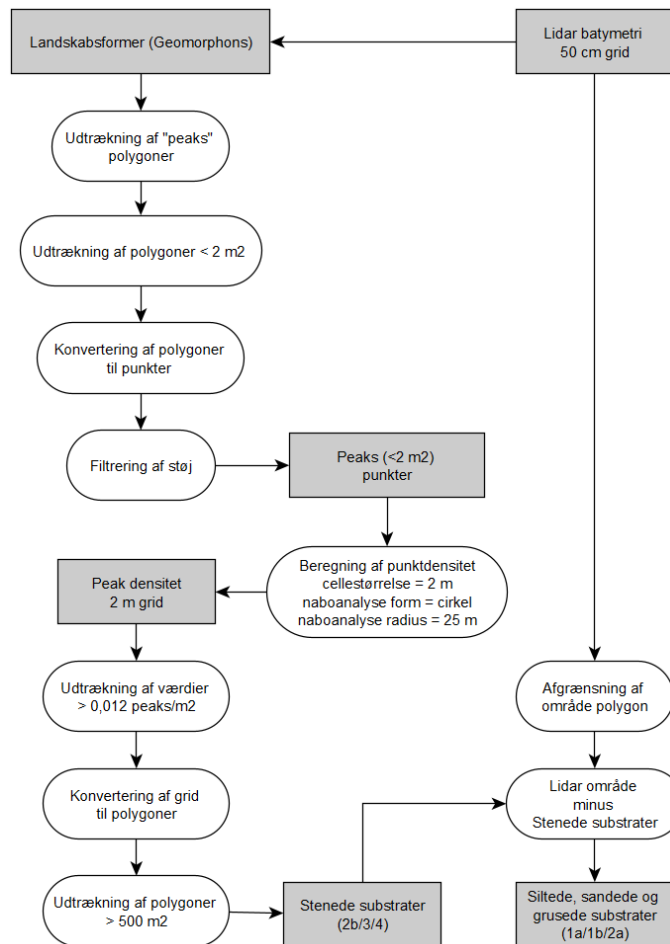
2.5 Substrattyper

Klassifikation af substrattyper tog udgangspunkt i de substrattypeklasser, som er defineret og fastlagt i samarbejde med Miljøstyrelsen (Naturstyrelsen, 2012), og som tidligere er anvendt i danske substrat- og naturtype-kortlægninger (Miljøstyrelsen 2019, 2021, 2023; Naturstyrelsen, 2015, 2016). Definitionerne af substrattypeklasserne kan ses i Tabel 1. Klassifikationen er traditionelt baseret på tolkning indenfor arealenheder af 25 x 25 m.

Tabel 1: Definition af substrattyper (Efter Miljøstyrelsen, 2023)

Substrattype	Definition
1a. Blødbund	Homogen siltet sandbund eller dynd, hvor bunden ikke er dynamisk påvirket, og hvor sedimentet består af silt og siltet sand eller dynd.
1b. Sand	Homogen fast sandbund (sand er defineret som kornstørrelser fra 0,06–2,0 mm) præget af en vis form for dynamik med bølgeribber m.m. Denne substrattype kan også have varierende indslag af skaller, grus og silt.
1c. Mønstret sandet bund med ler	Område bestående af ler eller større relikte lerblokke på en siltet til sandet havbund, hvor det høj-reflektive ler giver havbunden et mønstret udseende. Disse ler-mønstre kan have meget markante strømstriber.
2a. Sand, grus og småsten	Meget varierende substrattype, domineret af sand og groft sand med varierende mængder af grus og småsten. Substratet består af en blanding af sand, groft sand og grus med en kornstørrelse på ca. 0,06 - 20 mm og småsten med størrelser på ca. 2 til 10 cm.
2b. Sand, grus og småsten samt bestrøning (< 10 %) med sten >10 cm	Meget varierende substrattype, domineret af sand og groft sand med varierende mængder af grus og småsten samt spredte store sten. Substratet består af en blanding af sand, groft sand og grus med en kornstørrelse på ca. 0,06 - 20 mm og småsten med størrelser ca. 2 til 10 cm. Substrattypen kan også indeholde større sten >10 cm, dog kun op til 10 % dækning.
3. Sand, grus og småsten samt bestrøning (10 - 25 %) med sten >10 cm	Område bestående af blandede substrater med sand, grus og småsten og med bestrøning af større sten >10 cm. Substrattypen indeholder et større antal sten >10 cm, oftest som bestrøning med en dækning på 10 % - 25 %.
4. Sten > 10 cm dækkende >25 %	Område domineret af sten >10 cm, men også med varierende indslag af sand, grus og småsten. Stenene ligger enten spredt på havbunden eller som et tæt lag af sten med en dækning >25 %.

Kortlægningen af substrattyper blev baseret på den processerede højdemodel fra lidar batymetri. En semi-automatisk metode blev udviklet til klassifikation af henholdsvis stenede substrater (substrattype 2b, 3 og 4) og siltede, sandede og grusede substrater (substrattype 1a, 1b og 2a) som vist i Figur 2. Substrattype 1c indgår ikke i de to klasser, hvilket der vil blive gjort rede for i diskussionen.



Figur 2: Flowdiagram for den semi-automatiske metode til kortlægning af substrattyper baseret på lidar batymetri.

Lidar batymetriens højdemodel blev brugt til klassifikation af landskabsformer (se metode i afsnit 2.4). Landskabsformen "peaks" blev herefter ekstraheret med antagelse af, at peaks kan indikere sten ogstensamlinger. Øvrige elementer i højdemodellen kan dog også være klassificeret som peaks, fx toppen af bundformer eller områder med vegetation. Ved nærmere inspektion i området var vurderingen, at mange af disse elementer havde et større areal. For at skelne imellem sten og øvrige elementer blev alle peaks < 2 m² ekstraheret til videre analyse. Hver peak-polygon blev herefter konverteret til et punkt, placeret i centrum af hver polygon. Ved inspektion af punkterne, sammenholdt med højdemodellen og klassifikationen af landskabsformer, blev punkter filtreret, hvor der kunne identificeres unøjagtigheder i klassifikationen grundet støj i lidar data. De ekstraherede peak-punkter blev brugt i den videre analyse til klassifikation af stenede substrattyper (2b, 3 og 4). Ved erkendelse af, at punkt-datasættet fortsat kunne indeholde spredte øvrige elementer, sammenholdt med det faktum at også substrattype 1a, 1b og 2a kan have indslag af spredte sten, anvendtes densiteten af peak-punkter som parameter for afgrænsningen af stenede substrattyper. Beregningen af punktdensitet blev udført i ArcGIS Pro med værktøjet "Point density". Udgangspunktet i beregningen var et grid med 2 m cellestørrelse dækkende hele undersøgelsesområdet. Hver celle fik en punktdensitets-værdi (peaks/m²), som blev beregnet ud fra antallet af punkter indenfor en radius på 25 m omkring den givne celle.

Resultatet var et grid, som viste densiteten af peaks. Forskellige grænseværdier til klassifikation af stenede substrattyper blev testet og evalueret, og slutteligt blev en densitet på 0,012 peaks/m² (svarende til 7,5 peaks/25 m²) vurderet som en passende grænseværdi på baggrund af visuel sammenligning med lidar data og ortofoto. Celler med en densitet > 0,012 peaks/m² blev dermed konverteret til polygoner. Polygonernes areal blev beregnet, og for endnu engang at minimere indflydelsen fra unøjagtigheder i data, og derudover med inddragelse af den traditionelle arealenhed for substrattypetolkning på 25 x 25 m, blev der defineret en mindsteværdi, så polygoner > 500 m² blev klassificeret som stenede substrattyper (2b, 3 og 4). Det øvrige areal indenfor det dækkede område med lidar data, dvs. områder med lavere peak-densitet eller helt uden peaks, blev klassificeret som siltede, sandede og grusede substrattyper (1a, 1b og 2a).

2.6 Naturtyper

Naturtyper er de marine naturtyper, der er beskyttet i henhold til EU Habitatdirektivet. I Gamborg Fjord er den eneste naturtype af relevans "Sandbanker med lavvandet vedvarende dække af havvand (1110)".

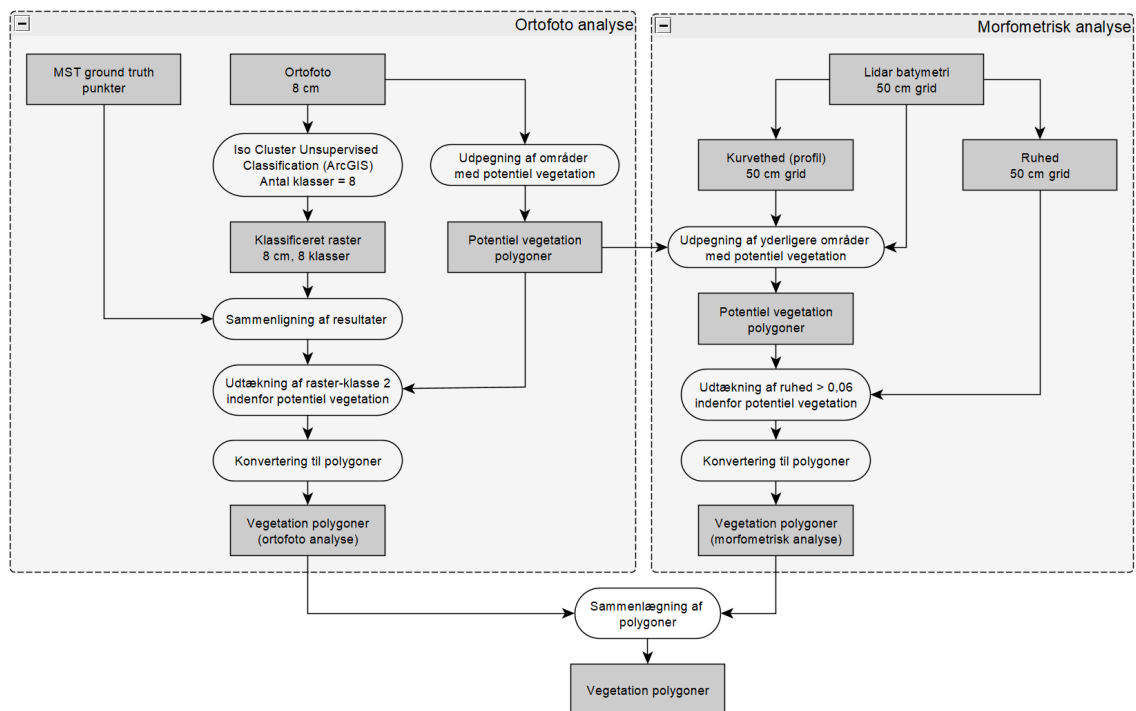
Identifikation og afgrænsning af 1110 Sandbanker følger Naturstyrelsens notat i relation til identifikation og afgrænsning af marine naturtyper (Naturstyrelsen, 2012) samt opfølgende faglige kriterier for opdatering af habitatområdernes udpegningsgrundlag for habitatdirektivets naturtyper (Miljøstyrelsen, 2021).

Sammenfattende er kriterierne for afgrænsning af 1110 Sandbanker, at bunden er opragende hvad angår havbundens morfologi (form), samt at være inkluderet i substrattype 1b Sand (jf. Naturstyrelsen, 2012). Desuden er det et kriterie, at minimumsarealet for afgrænsningen af en sandbanke er 2.500 m² (Miljøstyrelsen, 2021).

Formkriterierne med havbundens morfologi er primært vurderet på baggrund af batymetri og morfometri, herunder havbundens hældning, kurvethed og landskabsformer. Af de kortlagte morfologiske elementer er revler, bundformer og odde-strukturer vurderet anvendelige som understøttende information til kortlægningen af sandbanker. Ligeledes er substrattypen inddraget i analysen, idet kun områder med "siltede, sandede og grusede substrater" er anvendt som grundlag for afgrænsningen af sandbanker i Gamborg Fjord.

2.7 Vegetationsdække

Kortlægningen af vegetationsdække blev baseret på den processerede højdemodel fra lidar batymetrien kombineret med ortofoto og ground truth data. En semi-automatisk metode blev udviklet, som kombinerede en ortofoto analyse og en morfometrisk analyse til klassifikation af vegetationsdække, som vist i Figur 3.



Figur 3: Flowdiagram for den semi-automatiske metode til kortlægning af vegetation baseret på ortofoto og lidar batymetri.

Ortofoto analysen tog udgangspunkt i en automatisk usuperviseret klassifikation ("Iso Cluster Unsupervised Classification" i ArcGIS Pro) hvor ortofotoets pixels blev inddelt i 8 klasser på baggrund af den spektrale signatur. Resultatet blev evalueret og sammenholdt med kendte forekomster af vegetation fra ground truth data. På den baggrund blev det vurderet, at "klasse 2" dækkede forekomster af vegetation. Klasse 2 dækkede dog også øvrige elementer, fx områder med dybt vand hvor havbunden ikke ses på ortofotoet. Derfor blev der lavet en grov udpegning af områder med potentiel vegetation, baseret på mørk spektral signatur i ortofotoet, og indenfor disse områder blev klasse 2 udtrukket, hvilket afspejlede en mere detaljeret afgrænsning af vegetationsdækket. Efter konvertering til polygoner var dette resultatet af ortofoto analysen.

Den morfometriske analyse tog udgangspunkt i højdemodellen samt de afledte plan-kurvethed og ruhed (se afsnit 2.4). Et vegetationsdække har en vis horisontal udbredelse og vertikal højde i forhold til den omgivende havbund, og dette kunne tydeligt afspejles i højdemodellen og kurvetheden. På den baggrund blev yderligere områder med potentiel vegetation afgrænset (udover allerede afgrænsede områder i ortofoto analysen). Indenfor disse områder blev en defineret grænseværdi på ruheden ($> 0,06$) brugt til detaljeret klassifikation af vegetationsdækket ud fra antagelse om, at ruheden er større på vegetationsdækket end på den omgivende havbund. Slutteligt blev resultaterne af ortofoto analysen og den morfometriske analyse kombineret til den endelige kortlægning af vegetationsdække.

2.8 Menneskelig påvirkning

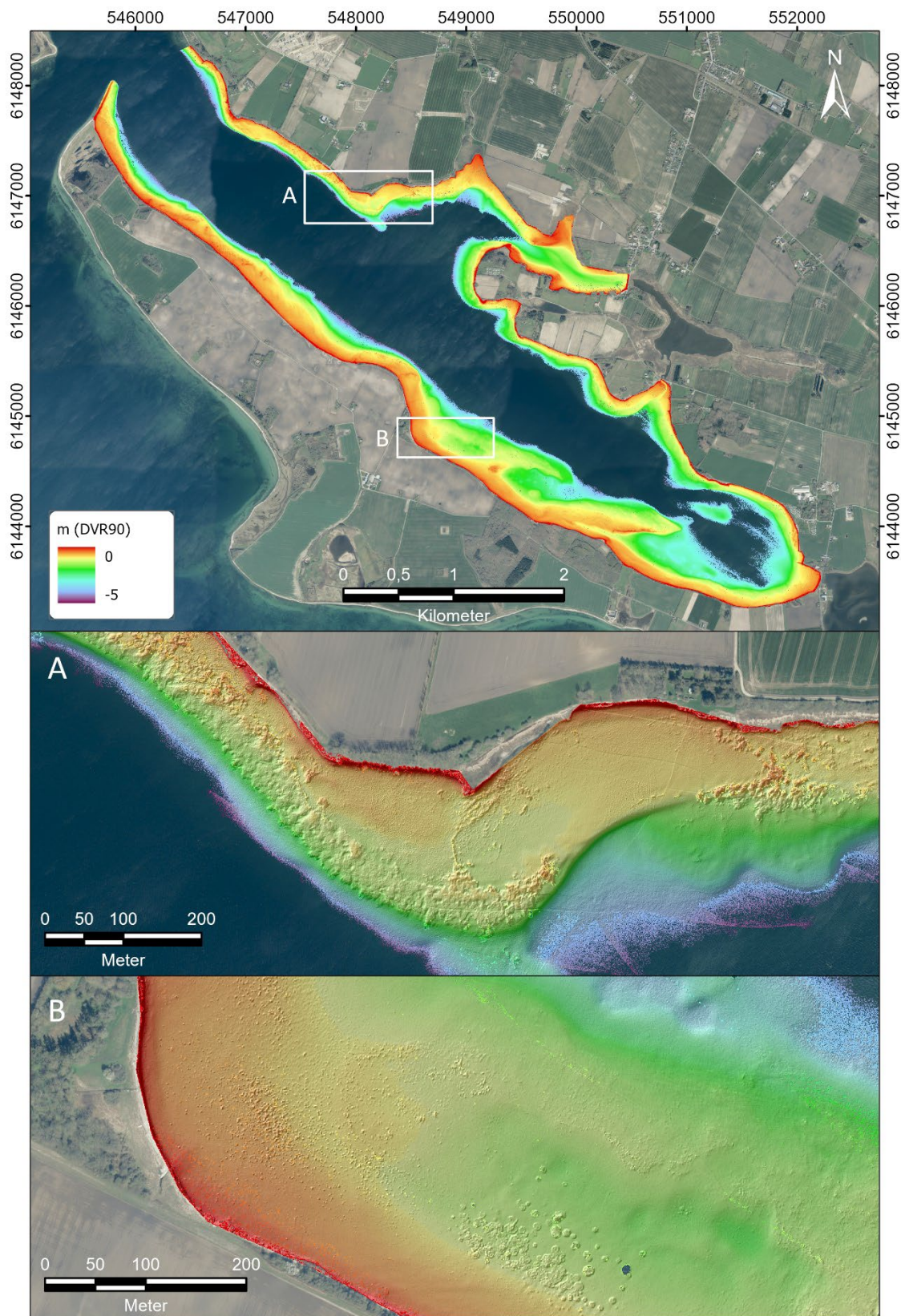
Kortlægningen af menneskelig påvirkning blev baseret på tolkning af ortofoto, lidar batymetri og morfometri. De kortlagte elementer inkluderer alle former for spor af menneskelig påvirkning, herunder infrastruktur, fx havn, høfde, bådbro og dæmning, og identificerede eller uidentificerede spor på havbunden efter menneskelig aktivitet. Identificerede spor på havbunden inkluderer vrug og morfologiske ændringer (erosion og/eller aflejring) ved fortøjningspæle og bøjer. Uidentificerede spor er kortlagt som "aktivitet" og er fundet på steder, hvor havbundens udseende (ortofoto) og morfologi forekommer unaturlig.

3. Resultater

3.1 Batymetri og ortofoto

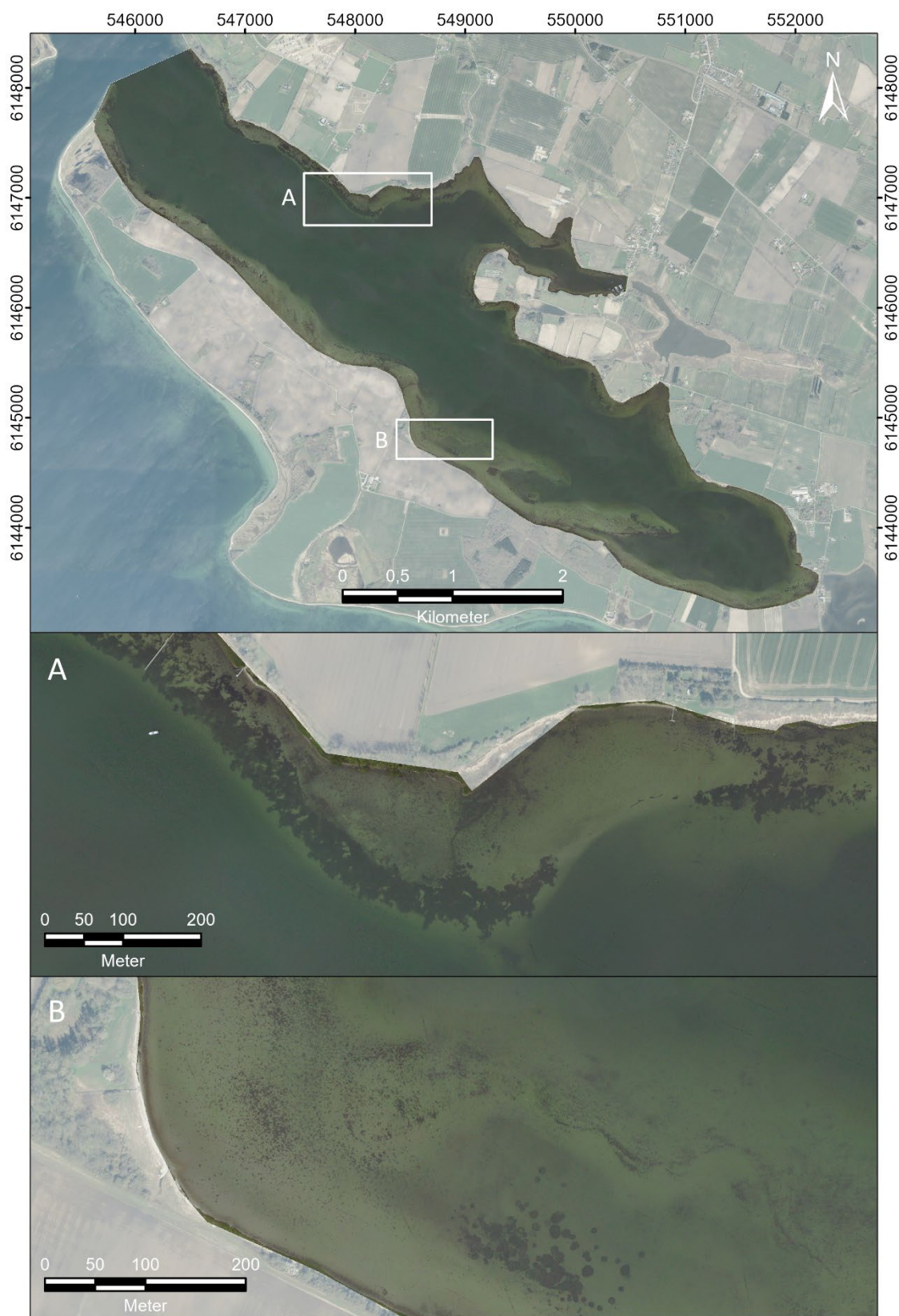
Batymetrien på lavt vand i Gamborg Fjord er kortlagt på baggrund af flybåren ALB-data (Figur 4) (se beskrivelse af data i afsnit 2.1 og processering i afsnit 2.3). Batymetrien består af et grid med en cellestørrelse på 50 cm.

Batymetrien er kortlagt på vanddybder indenfor 0-5 m, hvilket i Gamborg Fjord svarer til et kystnært bælte med varierende bredde på 100-600 m. De største kortlagte områder findes i den sydlige del af Gamborg Fjord, hvor der er større områder med vanddybder mindre end 5 m. I den nordlige del af området ligger Ellebæk Vig, som er fuldt dækket af lidar batymetrien i den inderste del på grund af den lave vanddybde i dette område.



Figur 4: Batymetri i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde) på baggrund af flybåren lidar d. 31/8-2023. Batymetrien er et grid med en celledørrelse på 50 cm. På zoom-in (A og B) ses detaljegraden af batymetrien med skyggeffekt.

Ortofoto i Gamborg Fjord på baggrund af flybårne RGB-billeder er vist i Figur 5 (se beskrivelse af data i afsnit 2.1 og processering i afsnit 2.3). Ortofotoet har en pixelstørrelse på 8 cm.

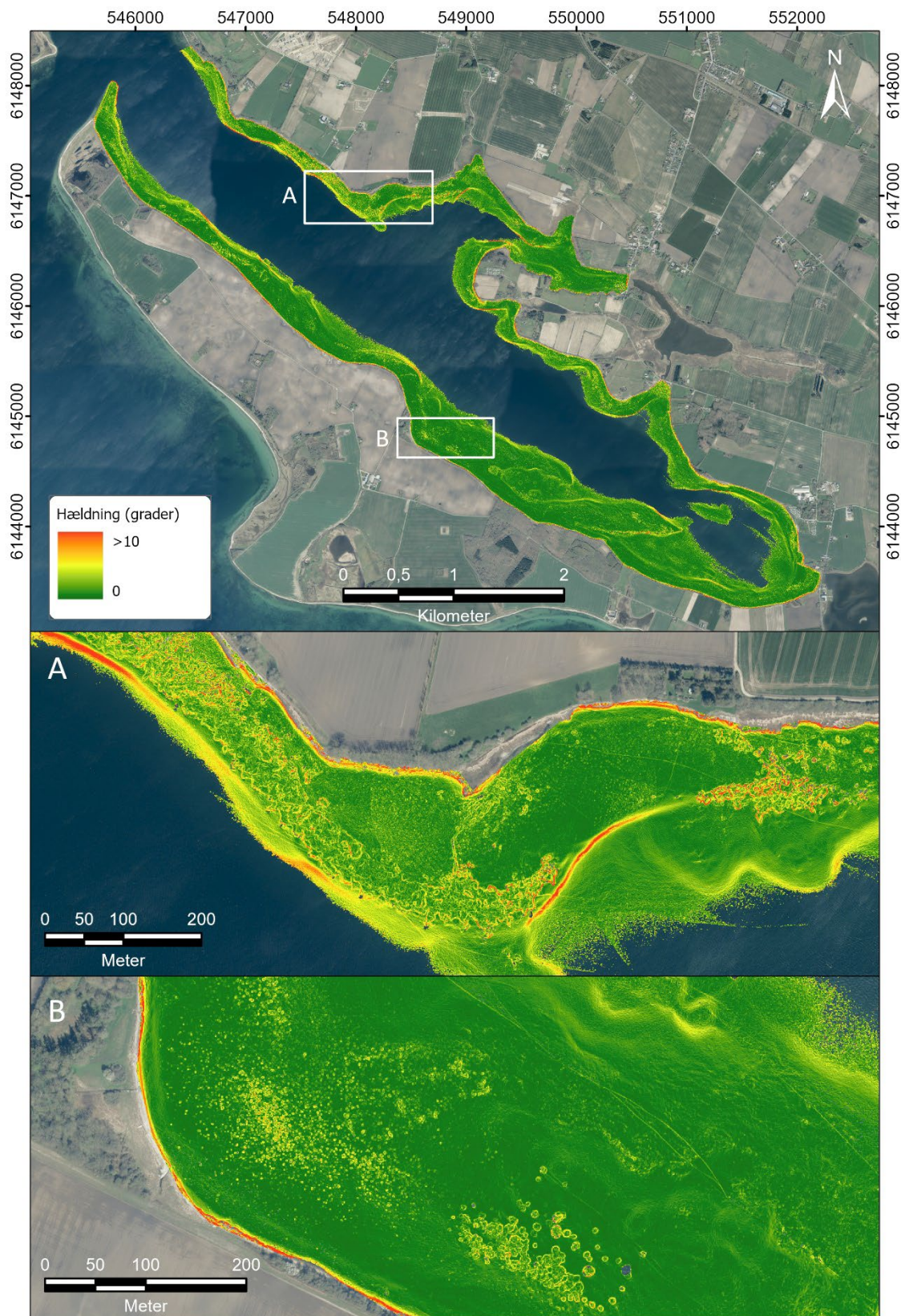


Figur 5: Ortofoto af Gamborg Fjord på baggrund af RGB-billeder indsamlet simultant med lidar data d. 31/8-2023. Ortofotoet har en pixelstørrelse på 8 cm.

3.2 Morfometri og morfologi

De morfometriske analyser (metodebeskrivelser i afsnit 2.4) blev baseret på batymetrien fra lidar kortlægningen i Gamborg Fjord (Figur 4). I den morfometriske analyse indgik overfladens hældning (Figur 6), kurvethed (Figur 7), ruhed (Figur 8) og landskabsformer (Geomorphons) (Figur 9).

Størstedelen af det dækkede område har en hældning $<2^\circ$ (Figur 6). På fladerne ses anomalier med hældninger på generelt op til ca. 10° . De største hældninger findes ved skarpe kanter på grænsen mellem det kortlagte område og ud mod dybere vand hvor hældningen er op til ca. 30° .



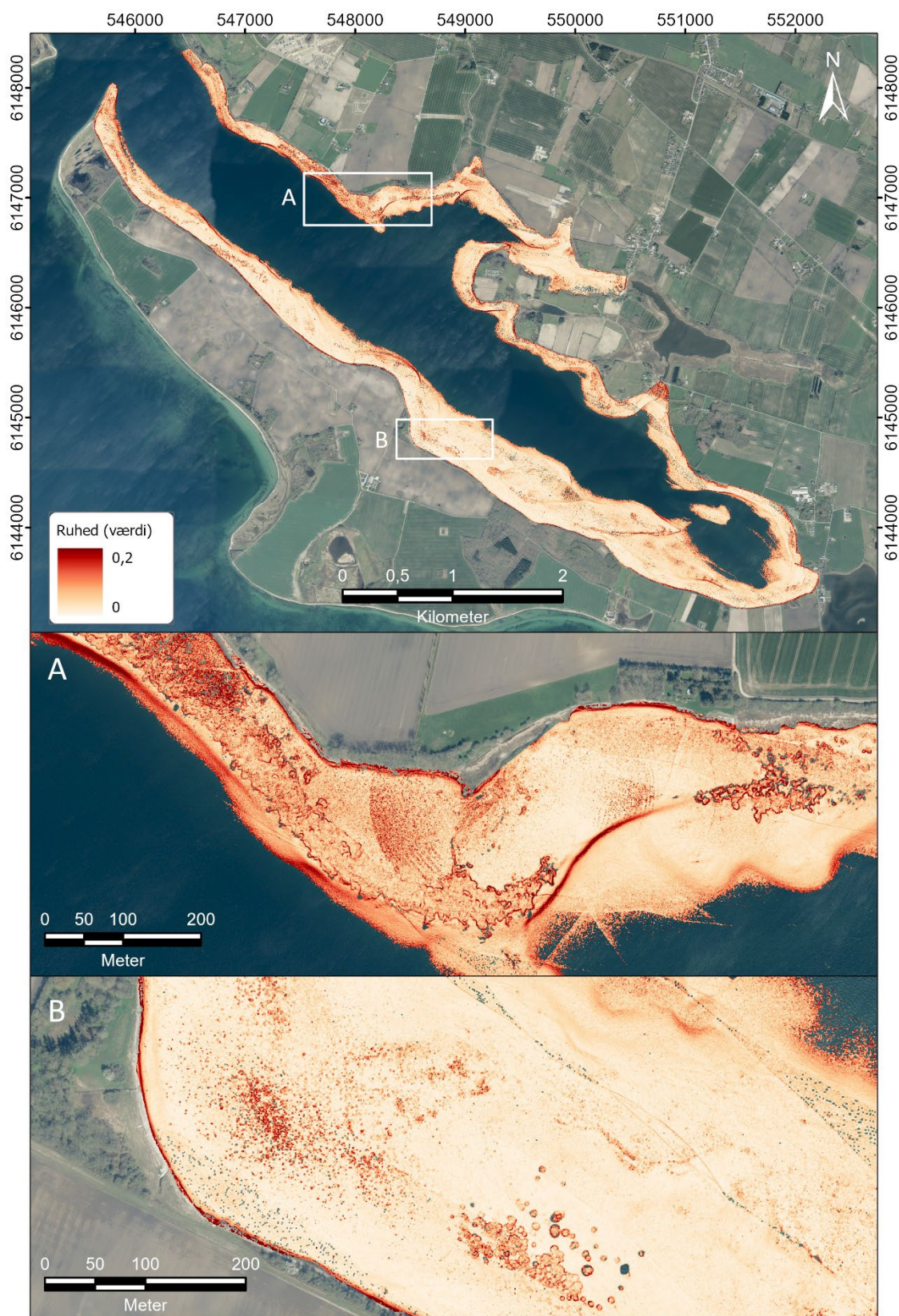
Figur 6: Hældninger i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde) afledt af lidar batymetrien. Hældningskortet er et grid med en celledørrelse på 50 cm. Skalaen er sat til max 10 grader på trods af større hældninger indenfor området for at synliggøre mindre hældningsforskelle.

Overfladens kurvethed viser store områder med en værdi tæt på 0, hvilket afspejler en flad eller konstant hældende overflade (Figur 7). Positive værdier viser områder med konveks terrænprofil, som fx ses på toppen af mindre forhøjninger, så som store sten. Negative værdier viser områder med konkav terrænprofil, hvilket fx ses ved foden af forhøjninger, så som ved overgangen imellem store sten og den omgivende havbund.



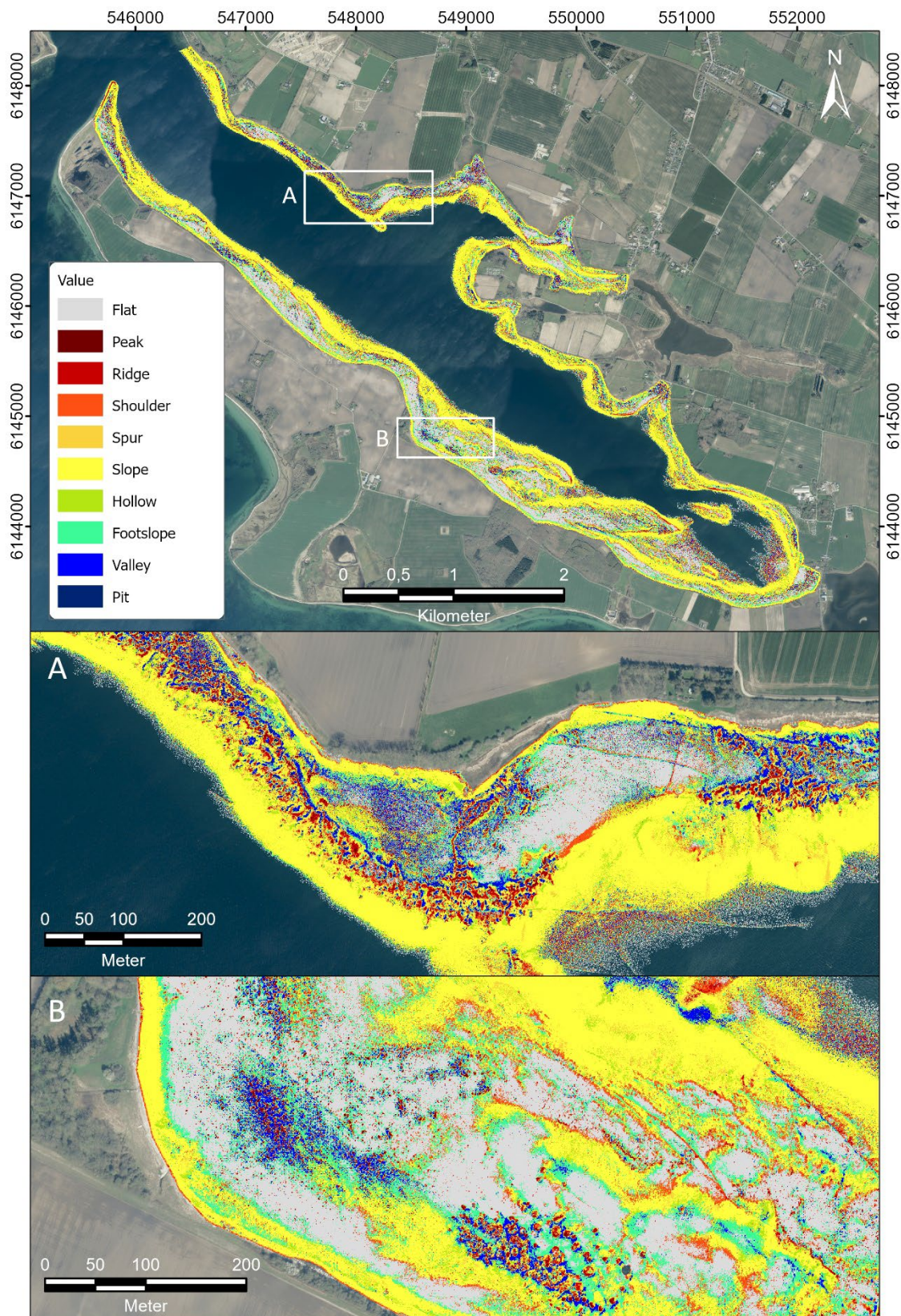
Figur 7: Profil-kurvethed i den lavvandede del af Gborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde). Positive værdier (blå) viser konveks profil og negative værdier (rød) viser konkav profil. Kurvethedskortet er et grid med en celledørrelse på 50 cm.

Ruheden giver en værdi for den lokale geometriske variation på overfladen (Figur 8). I Gamborg Fjord ses lave ruhedsværdier i områder med mindre variation, fx flade områder. Større ruhedsværdier ses i områder med større variation, som fx ved morfologiske elementer eller områder med vegetation.



Figur 8: Ruhed i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde). Ruhedskortet er et grid med en cellestørrelse på 50 cm.

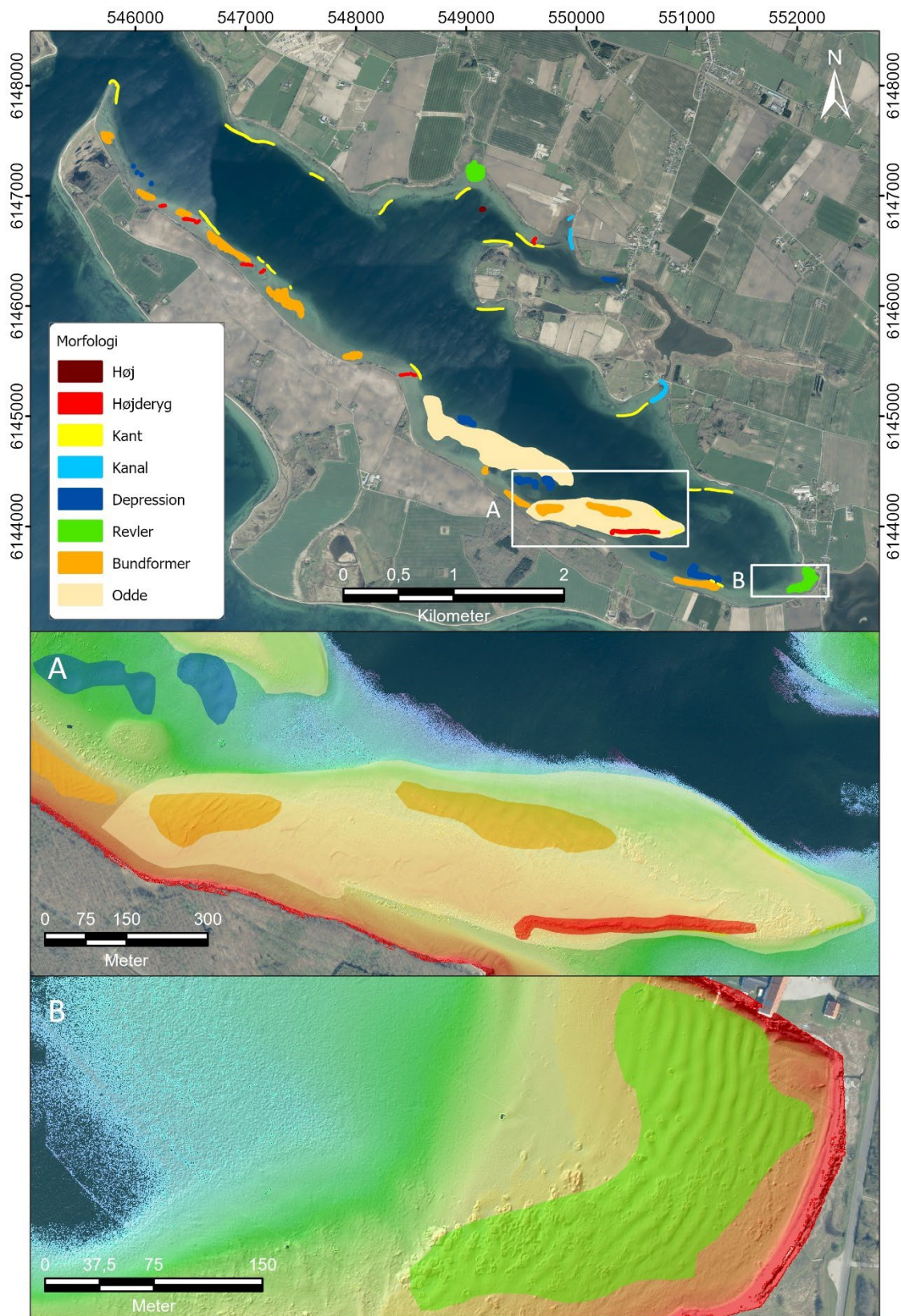
Landskabsformkortet viser de største områder som flade eller hældende (Figur 9). Generelt er der hældende helt inde ved kysten, efterfulgt af flade områder, og derefter hældende igen ud mod dybere vand. I mindre områder ses opragende landskabsformer, fx "ridges" og "peaks", eller nedsynkede landskabsformer, fx "valleys" og "pits". Disse ses i nogle områder som små isolerede landskabsformer, fx små peaks på en flade (eksempel i Figur 9-B), og i andre områder ses de som større sammenhængende opragende og nedsynkede landskabsformer (eksempel i Figur 9-A).



Figur 9: Kortlagte landskabsformer (jf. ArcGIS Geomorphon landform analyse) i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde). Geomorphon landskabsformkortet er et grid med en celledørrelse på 50 cm.

Morfologiske elementer i Gamborg Fjord er kortlagt på baggrund af lidar batymetrien og de morfometriske kort (Figur 10). Der er kortlagt 8 forskellige morfologiske elementer: Høj, Højderyg, Kant, Kanal, Depression, Revler, Bundformer, Odde.

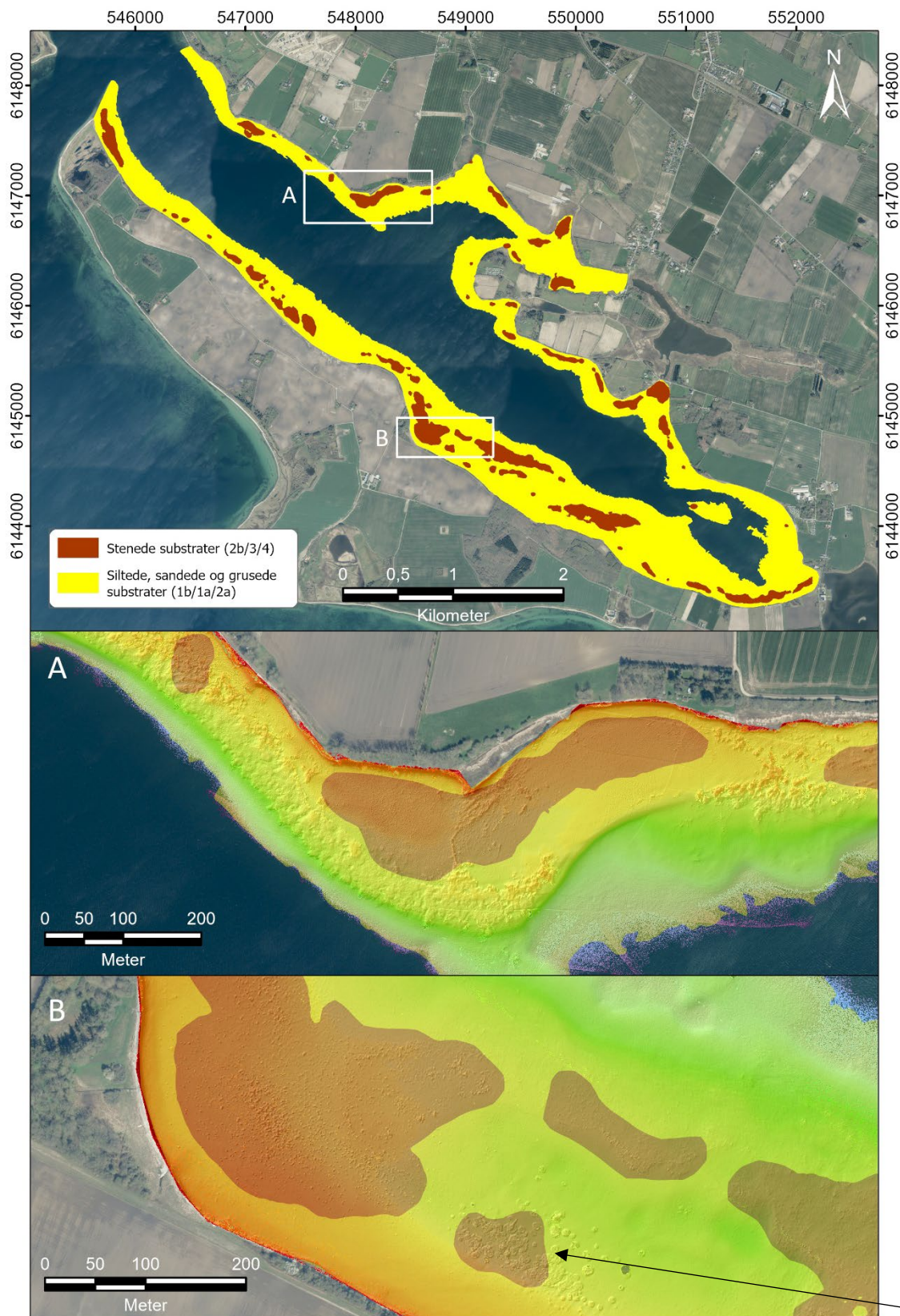
Det største areal udgøres af to odde-formationer i den sydlige del af området. Langs fjordens sydlige kyst er der ligeledes områder med bundformer, højderygge og depressioner (eks. Figur 10-A). I to områder er der tydelige revle-strukturer (eks. Figur 10-B), og i to andre områder har strømforholdene omkring dæmning og åudløb skabt kanaler i havbunden. Spredt i hele området er der skarpe kanter med høj hældning, hvor vanddybden er kraftigt stigende fra et udgangspunkt på ca. 1-2 m vanddybde.



Figur 10: Morfologisk kort i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde). I de to zoom-in visninger (A og B) er de morfologiske elementer gjort halv-transparente og overlejret lidar batymetrien.

3.3 Substrattyper

Der er kortlagt substrattyper i kategorierne "Stenede substrater (substrattype 2b, 3 og 4)" og "Siltede, sandede og grusede substrater (substrattype 1a, 1b og 2a)" (metodebeskrivelser i afsnit 2.5). De kortlagte substrattyper er vist i Figur 11.



Figur 11: Substrattyper i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde). I de to zoom-in visninger (A og B) er substrattyperne gjort halv-transparent og overlejret lidar batymetrien.

3.4 Naturtyper

Habitatdirektivets marine naturtyper er kortlagt, og som det fremgår af naturtypekortet er sandbanker den eneste naturtype i undersøgelsesområdet (Figur 12). Sandbankerne er generelt kortlagt i områder med opragende morfologiske elementer som revler, bundformer og odde-strukturer, og hvor der i samme områder ikke er kortlagt stenede substrater.



Figur 12: Habitatdirektivets naturtyper udgøres af sandbanker, her kortlagt i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde).

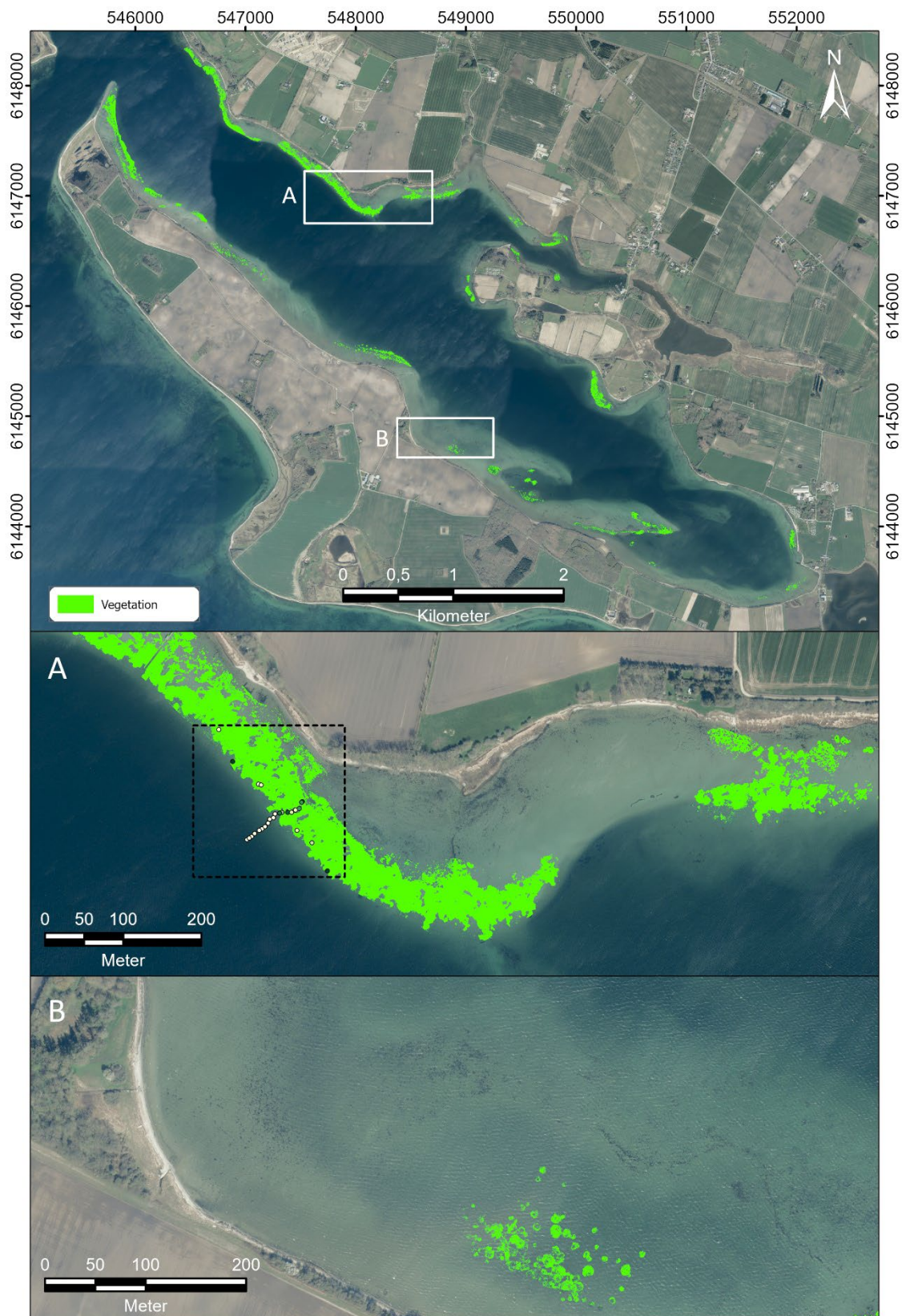
3.5 Overordnede habitattyper

Substratyperne indgår som input i modelleringen af de overordnede habitattyper, og den eksisterende kortlægning af overordnede habitattyper kunne potentielt ændres på baggrund af de kortlagte substratyper. Det har dog ikke været muligt i dette projekt, da de kortlagte substratyper er inddelt i to grupperinger, henholdsvis "1a, 1b, 2a" og "2b, 3, 4". Yderligere opdeling af substratyperne er nødvendig for at indgå som input til kortlægning af de overordnede habitattyper. Dette behandles nærmere i diskussionen.

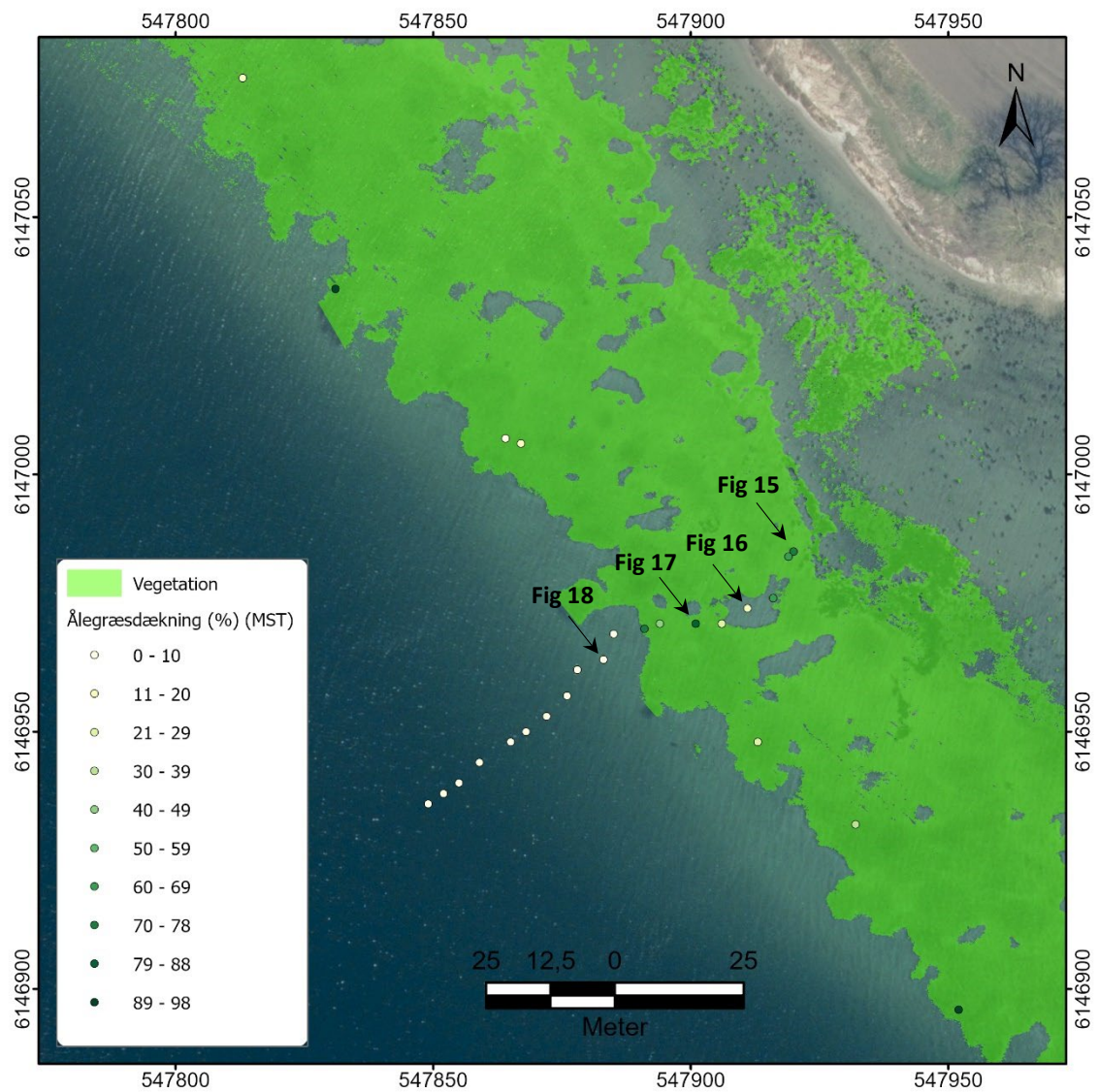
3.6 Vegetationsdække

Vegetationsdække er kortlagt som vist i Figur 13. De største områder med vegetation ses i den nordlige del af Gamborg Fjord, mens der er mere spredte områder i resten af fjorden. Vegetationen ligger på dybder indenfor ca. 0-3,5 m vanddybde (DVR90).

I Figur 14 er der zoomet ind på et mindre område for at sammenligne resultatet af vegetationskortlægningen med ålegræsdækningen fra video ground truth (leveret af MST). Her ses generelt god overensstemmelse imellem vegetationskortlægningen og ground truth langs de kystnormale transekt-punkter. Ground truth videobilleder (Figur 15, Figur 16, Figur 17 og Figur 18) viser en varierende ålegræsdækning, hvilket stemmer overens med kortlægningen af vegetationsdække (Figur 13).



Figur 13: Vegetation i den lavvandede del af Gødborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde). I zoom-in A er der tilføjet MST's ground truth punkter og en stipleet sort firkant som henviser til kortudsnittet i Figur 14.



Figur 14: Kortlagt vegetation indenfor mindre område hvor der eksisterer ground truth i form af punktbaseret ålegræsdekning i procent (ground truth leveret af MST). Kortudsnittets placering kan ses i Figur 13. Angivelserne med pile markerer positionerne af videobillederne på Figur 15, 16, 17 og 18.



Figur 15: Ground truth videobillede (leveret af MST) med registreret ålegræsdækning på 70%. Billedets position er vist i Figur 14.



Figur 16: Ground truth videobillede (leveret af MST) med registreret ålegræsdækning på 10%. Billedets position er vist i Figur 14.



Figur 17: Ground truth videobillede (leveret af MST) med registreret ålegræsdækning på 80%. Billedets position er vist i Figur 14.



Figur 18: Ground truth videobillede (leveret af MST) med registreret ålegræsdækning på 0%. Billedets position er vist i Figur 14.

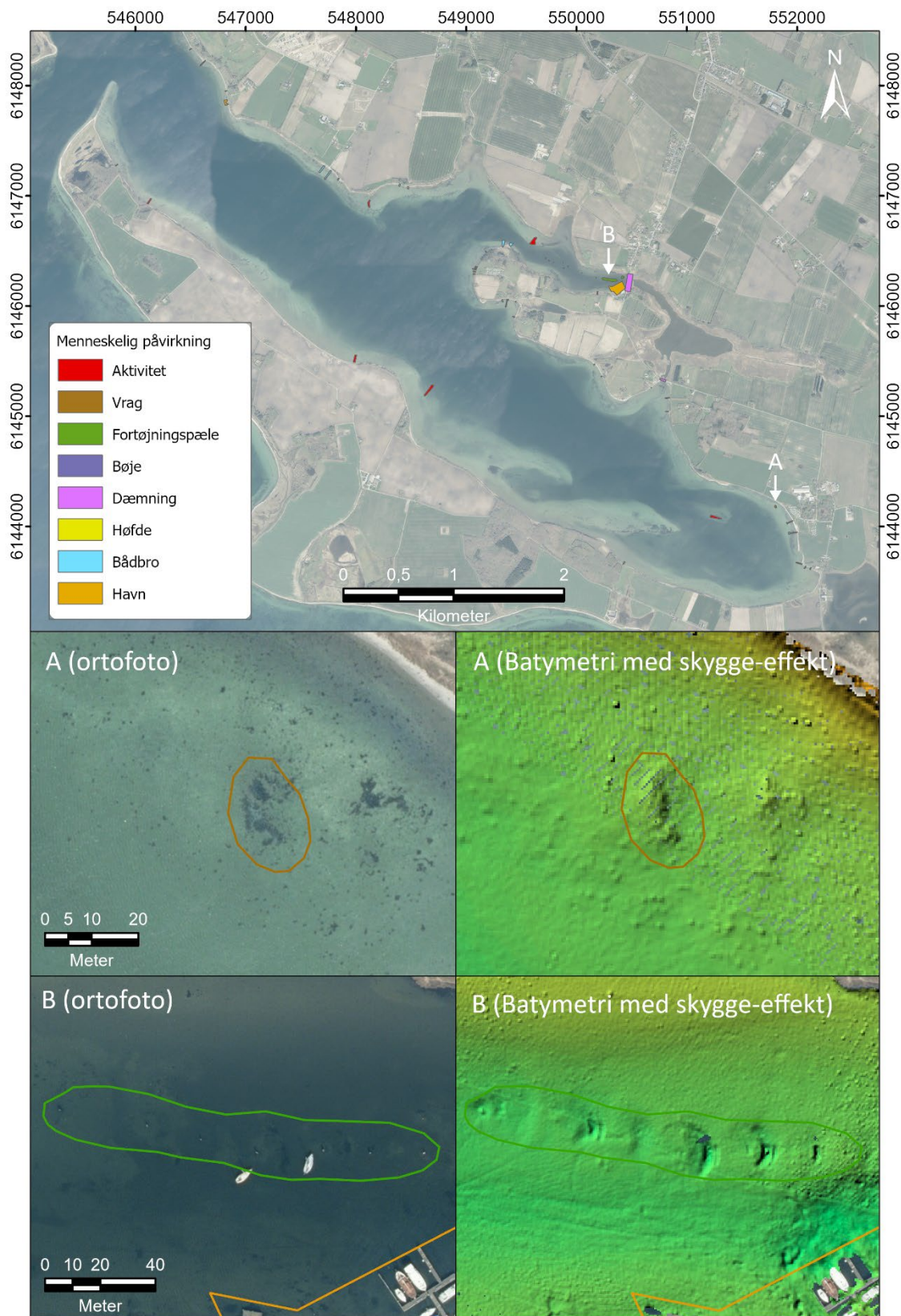
3.7 Menneskelig påvirkning

Områder karakteriseret af menneskelige påvirkning er vist i Figur 19.

Der er et enkelt vrage i den sydøstlige del af området, som er kendt og markeret på søkortet. Det fremstår tydeligt på lidar batymetrien som et areal på ca. 20 x 10 m med opragende form i forhold til havbunden.

I bunden af Ellebæk Vig ligger en havn. Ud for havnen kan der på ortofotoet identificeres fortøjningspæle og både. Havbunden kan ikke ses på ortofotoet, men på lidar batymetrien kan der identificeres halvmåneformede fordybninger i havbunden øst for fortøjningspælene.

Der er fundet spredte uidentificerede spor, som kan skyldes menneskelig aktivitet, hvilket er kortlagt i klassen "Aktivitet".



Figur 19: Menneskelig påvirkning i den lavvandede del af Gamborg Fjord (ca. 0-5 m vanddybde). "Aktivitet" er en potentiel menneskelig påvirkning af ukendt karakter.

4. Diskussion og perspektivering

4.1 Optimering af flybåren havbundskortlægning på lavt vand

I dette projekt er der indsamlet flybårne data i form af batymetrisk lidar (ALB) og RGB-billeder, som er processeret til detaljeret og fulddækkende højdemodel og ortofoto i kystzonen ned til ca. 5 m vanddybde. Traditionelt er denne lavvandede kystnære zone svær at kortlægge, og en tilsvarende detaljerings- og dækningsgrad kan ikke opnås med andre teknologier end de anvendte. Skibsbåren dataindsamling møder flere udfordringer på lavt vand, først og fremmest en grænse for hvor langt ind mod kysten skibet kan sejle uden at gå på grund, og dernæst dækningsgraden af de indsamlede data som mindskes kraftigt på lavere vand. I praksis gør dette, at skibsbåren dataindsamling på lavt vand i værste fald er umuligt og i bedste fald er urentabelt, når formålet er at opnå høj detaljerings- og dækningsgrad. Med håndholdt dGPS kan der opmåles punkter med høj nøjagtighed, men til gengæld vil det i praksis være umuligt at opnå tilnærmelsesvis samme detaljerings- og dækningsgrad som ALB. Satellitbilleder giver mulighed for en tilsvarende dækningsgrad samt mulighed for at undersøge ændringer over tid. Dog har satellitbillederne ikke samme nøjagtighed og detaljeringsgrad som flybåren lidar og RGB, og adskiller sig desuden ved at basere sig på passiv energi (solens stråler), som ikke indeholder samme information som retursignalet fra lidar-systemets aktive laserstråle.

Det er demonstreret hvorledes ALB kan anvendes til at opnå detaljeret information om havbundens morfometri og morfologi, hvilket sammen med ortofoto fungerer som inputs til lavvandet kortlægning af substrattyper, naturtyper og vegetationsdække. Samlet set forbedres data- og vidensgrundlaget i en grad, som ikke ville være mulig med andre teknologier i de lavvandede områder i Gamborg Fjord. Dog skal det bemærkes, at ALB brugt i naturforvaltning, herunder til substrattype-, naturtype- og vegetationskortlægning, er en relativt ny anvendelsesform, som kræver udvikling og optimering. I den henseende danner dette projekt et fundament for yderligere udvikling. I det følgende beskrives nogle af mulighederne for udvikling og optimering, og derefter diskuteres muligheder for optimering til at opnå de bedst mulige resultater.

Havbundskortlægning på lavt vand:

- 1) Substrattyper. I MST's definition er der 7 forskellige substrattyper. I analysen i dette projekt er de reduceret til 2 grupperinger baseret på tilstedeværelse/fravær af store sten (desuden er substrattype 1c udeladt). Det skyldes at de eksisterende definitioner er designet til traditionel kortlægning med skibsbårne data (sidescan sonar, multibeam ekkolod og sedimentekkolod) og ikke flybårne data. Som datatype kan ALB sammenlignes med skibsbåren multibeam på dybere vand. Både ALB og multibeam processeres til en digital højdemodel for havbunden, som kan give information om havbundens morfometri og morfologi. Dette kan, som i dette projekt, give indikationer om substrattypen, men dog ikke give samme niveau af information om substratet som sidescan sonar

data. ALB giver desuden kun information om overfladen af havbunden, og dermed ikke data om sedimentlagene under havbunden ligesom sedimentekkolod. Dermed opnås med ALB ikke samme niveau af viden om substrattypen som med skibsbårne data. Substrattype 1c er udeladt, da den ikke har været mulig at klassificere på baggrund af de tilgængelige data. Dog er det værd at understrege at ALB er en unik datakilde på lavt vand, som ikke kan erstattes af skibsbårne data, dat dette som tidligere beskrevet, ikke er en mulighed i praksis.

- 2) Naturtyper. De oftest forekommende naturtyper i en dansk kontekst er Sandbanker (1110) og Stenrev (1170). I dette projekt er afgrænsningen af sandbanker delvist baseret på grupperingen af "siltede, sandede og grusede substrater (1a, 1b, 2a)". Dermed inkluderes andre substrattyper end 1b, som normalvis anvendes som substrat-input til kortlægningen af sandbanker. Det er i analysen forsøgt imødegået ved at anvende morfologiske elementer (odde, bundformer, revler) som typisk primært består af sand, men både silt og grus kan forefindes i disse landskabsformer. Stenrev er defineret som substrattype 4, og substrattype 3 hvor denne er forbundet til type 4. Med grupperingen "Stenede substrater (2b, 3, 4)" er det ikke muligt at skelne stenrev fra områder med lavere dækningsgrad af sten (substrattype 2b). Baseret på de tilgængelige datasæt vurderes det, at der ikke er substrattype 4 i Gamborg Fjord, og dermed vurderes det, at der ikke er stenrev. Fremtidig metodeudvikling er nødvendig for at afdække muligheden for at opdele de stenede substrater i klasser med varierende dækningsgrad, fx substrattype 2b, 3 og 4.
- 3) Overordnede habitattyper. Substrattypen er et primært input i modelleringen af overordnede habitattyper, og her er det afgørende, om substrattypen fx er mudder (1a) eller sand (1b). For nuværende kan disse ikke skelnes med grupperingen af substrattyper. Derfor er der behov for at udvikle substrattypeklassifikationen til at skelne flere af MST's substrattyper så det er muligt at modellere de overordnede habitattyper.

Optimering af havbundskortlægning på lavt vand:

Ground truth. Det er nødvendigt med ground truth til detaljeret kortlægning af substrattyper, naturtyper og vegetationsdække. Dette gælder også for de flybårne data, der ikke indeholder samme information om substratet som skibsbårne data. Ground truth bruges til at få nøjagtig viden om, hvad der findes på en specifik lokation. Det er vigtigt for at kunne verificere og evt. korrigere resultaterne af den flybårne kortlægning. Det hjælper desuden til at opnå en generelt bedre forståelse af signaturerne i de flybårne data, og kan dermed forbedre resultaterne, ikke kun på de specifikke punkter, men i hele undersøgelsesområdet. I planlægningen af indsamlingen af ground truth data er det vigtigt at gøre sig nogle overvejelser omkring mængde/fordeling, tidspunkt og type af ground truth. Ground truth data skal typisk fordeles således at alle substrat- og vegetationstyper er dækket i forskellige dybder og med en rumlig spredning indenfor undersøgelsesområdet. Der er ligeledes forskellige muligheder hvad angår typen af ground truth til flybåren kortlægning:

- Video: Dette kan både være på punkter, typisk optaget med ROV, eller langs transekter, typisk optaget med dykker eller slæbt kamera. Det afgørende for optimal video ground truth er tydelige billeder af havbunden og præcis lokationsbestemmelse. Der kan anvendes eksisterende videoer (med forbehold for ændringer over tid) og nye indsamlede videoer.
- Sedimentprøver: Prøver af havbundssedimentet, typisk indsamlet med grab, som kan bruges som visuel ground truth af substrattypen og som kvantitativ ground truth ved kornstørrelsesanalyse i laboratorium.
- Skibsbårne data: Geofysiske skibsbårne data (sidescan sonar, multibeam ekkolod og sedimentekkolod) anvendes traditionelt til substrat- og naturtypekortlægning, men vil også kunne anvendes som ground truth i forbindelse med flybåren kortlægning. Som beskrevet tidligere kan en egentlig kortlægning med skibsbårne data ikke lade sig gøre i de lavvandede områder, men med en enkelt eller få sejlede linjer som overlapper de flybårne data, vil dette kunne fungere som ground truth og derved optimere den flybårne kortlægning.

5. Konklusion

Der er indsamlet flybåren batymetrisk lidar (ALB) data og RGB-billeder i Gamborg Fjord d. 31/8-2023. De indsamlede ALB-data er processeret fra rå data til processeret punktsky til endelig højdemodel, og RGB-billederne er processeret til et samlet ortofoto (jf. resultater i afsnit 3.1).

Morfometriske analyser er udført på baggrund af højdemodellen, herunder hældning, kurvet-hed, ruhed og landskabsformer (jf. resultater i afsnit 3.2)

En semi-automatisk metode er udviklet til kortlægning af substrattyper på baggrund af flybåren data. Metoden er baseret på klassifikation af områder med sten, hvilket er fundet på baggrund af ALB-data som områder med højere densitet af landskabsformen "peaks". Substrattyper er kortlagt i to kategorier: "Stenede substrattyper (2b, 3 og 4)" og "Siltede, sandede og grusede substrattyper (1a, 1b og 2a)" (jf. resultater i afsnit 3.3).

En semi-automatisk metode er udviklet til kortlægning af vegetationsdække på baggrund af flybåren data og ground truth data. Metoden baserer sig på en kombination af spektral analyse af ortofoto og morfometrisk analyse af lidar højdemodellen (jf. resultater i afsnit 3.6).

Menneskelig påvirkning, herunder både identificerede og uidentificerede spor af menneskelig aktivitet, er kortlagt ved tolkning af ortofoto, lidar batymetri og morfometri (jf. resultater i afsnit 3.7)

Nærværende pilotprojekt bidrager med ny data, information og viden om Gamborg Fjord med potentiale til at forbedre naturforvaltningsgrundlaget.

Helt specifikt kan flybårne data med høj nøjagtighed og høj detaljeringsgrad, samt fuld dækning i kystzonen, forbedre informations- og vidensgrundlaget i lavvandede områder i en grad, som ikke er muligt med andre teknologier. De udviklede semi-automatiske metoder til kortlægning af substrattyper og vegetationsdække er en objektiv og transparent tilgang, som kan gentages og anvendes på større rumlig skala. Dette projekt danner fundament for yderligere udvikling af metoderne for at optimere anvendelsen af flybårne data i naturforvaltning.

6. Referencer

- Miljøstyrelsen (2023). Kortlægning af havbunden i beskyttede områder – Kortlægning af havbunden i fire områder i Østersøen omkring Bornholm (2022-2023). Udført af GEUS og WSP for Miljøstyrelsen.
- Miljøstyrelsen (2021). Faglige kriterier for opdatering af habitatområdernes udpegningsgrundlag for habitatnaturtyper – 2021. Miljøstyrelsen, J.nr. MST-821-00515, 3 pp.
- Miljøstyrelsen (2021). Marin Habitatkortlægning i Nordsøen 2019-2020 – Østlige Nordsøen og Doggerbanke Tail End. udført af GEUS og Orbicon for Miljøstyrelsen.
- Miljøstyrelsen (2019). Marin Habitatkortlægning i Skagerrak og Nordsøen 2017-2018. Udført af GEUS og Orbicon for Miljøstyrelsen.
- Naturstyrelsen (2016). Marin Habitatkortlægning i Skagerrak og Nordsøen 2015. Udført af GEUS og DCE for Naturstyrelsen.
- Naturstyrelsen (2015). Marin habitatkortlægning i de indre danske farvande 2014. https://naturstyrelsen.dk/media/136155/habitatkortl%C3%A6gning-2014_geus_dce.pdf, Udført af GEUS og DCE for Naturstyrelsen, 2014
- Naturstyrelsen (2012). Identifikation og afgrænsning af marine naturtyper, herunder habitatnaturtyper. Notat udarbejdet af Orbicon for Miljøstyrelsen, september 2012, 5 pp
- Naturstyrelsen (2011). Marin råstof- og naturtypekortlægning i Nordsøen 2010. Udført af GEUS og Orbicon for Naturstyrelsen
- SDFI-a. GNSS-data fra SDFI. Download via Dataforsyningen: <https://dataforsyningen.dk/data/4717>
- SDFI-b. Danmarks Højdemodel punktsky fra Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur (SDFI). Download via Dataforsyningen: <https://dataforsyningen.dk/data/3931>