

Erfaringer med monitorering af stenrev ved brug af fotodokumentation assisteret af kunstig intelligens



**Center for Marin
Naturgenopretning**

Kolofon

Titel:	Erfaringer med monitorering af stenrev ved brug af fotodokumentation assisteret af kunstig intelligens
Forfattere:	Benjamin P. Christensen, Peter A.U. Stæhr, Federica Montesanto Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet, sektion for marin biodiversitet og eksperimentel økologi,
Bedes citeret:	Christensen P.B., Stæhr, P.A.U., Montesanto, F. (2025). Erfaringer med monitorering af stenrev ved brug af fotodokumentation assisteret af kunstig intelligens. Tekniskrapport fra Nationalt Center for Marin Naturgenopretning.
Udgivet:	December 2025
Faglig kvalitetskontrol:	Torben Bramming Jørgensen
DCE kvalitetskontrol:	Anja Skjoldborg Hansen
kommentering:	Vordingborg kommune, Møns sportsdykkerklub
Finansieret af:	Vordingborg kommune
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) på Centrets hjemmeside
Forsidefoto:	Undervandsfotograf: Torben Christiansen, Møns sportsdykkerklub

Udgivet af:



Sammenfatning:	Denne tekniske rapport gennemgår praktiske overvejelser i forbindelse med anvendelsen af billedbaseret monitorering af marine habitater. Metoden muliggør indsamling af data af frivillige organisationer og anvendelsen af kunstig intelligens til at analysere dækningsgrader af substrat, flora og fastsiddende fauna. Resultaterne er baseret på en case udført i forbindelse med forundersøgelser for et genopretningsprojekt af et stenrev udført for Vordingborg kommune. Rapporten afvejer fordele og ulemper ved anvendelsen af metoden som et muligt alternativ til traditionelle monitoreringsmetoder.
----------------	---

Indhold

1. Indledning	4
Funktionen af stenrev	4
2. Metode	6
Overvejelser forud for monitorering	6
Etablering af transekter	7
Anvendelse af frivillige indsatser i billedindsamlingen.....	7
Anvendelsen af kunstig intelligens i billedanalyse	8
Forundersøgelser og efterfølgende monitorering i stenudlægningsprojekter	9
Forundersøgelser foretaget i Interreg projektet Supported by nature.....	10
AI-assisteret Annotering	10
3. Resultater	13
4. Diskussion	14
Potentiale i frivillig inddragelse	15
Anvendelsen af kunstig intelligens.....	16
Supplerende data til billedbaseret analyse	16
5. Tak	17
6. Referencer.....	17

1. Indledning

Stenrev udgør en væsentlig naturtype i danske farvande og fungerer som kernehabitater for en lang række marine organismer. Stenrevene som habitat er i de danske farvande blevet alvorligt reduceret som følge af historisk stenfiskeri, råstofindvinding og påvirkning fra slæbende fiskeredskeer. Stenfiskeriet, som fandt sted frem til 1999, resulterede i fjernelsen af store mængder sten fra lavvandede områder, hvilket har medført en betydelig reduktion i stenrevenes udbredelse og økologiske funktion. Hertil kommer et ukendt tab af sten i forbindelse med bifangst ved muslingeskrab og andre aktiviteter.

Stenrevenes betydning for marine økosystemer er veldokumenteret gennem systematiske overvågningsprogrammer siden 1980'erne. De fungerer som stabile substrater for fastsiddende flora og fauna, herunder makroalger, der bidrager til primærproduktion og skaber levesteder for en bred vifte af arter. Derudover understøtter stenrev komplekse fødekæder og bidrager til økosystemtjenester.

Genopretning af stenrev har i de senere år fået stigende opmærksomhed som en strategi til at genopbygge marine økosystemer og opnå miljømål fastsat i EU's Habitatdirektiv og Havstrategidirektiv. For at sikre, at genopretningsprojekter opfylder deres økologiske og funktionelle mål, er det nødvendigt med detaljerede forundersøgelser og løbende monitorering. Fotodokumentation er en metode der kan anvendes til at overvåge stenrevenes tilstand og udvikling. Gennem systematisk billedanalyse kan substrattyper, makroalgers dækning og samfundsstruktur samt fastsiddende fauna kortlægges og evalueres over tid.

Funktionen af stenrev

Stenrev er vigtige marine habitater, der understøtter en bred vifte af organismer, herunder fisk, invertebrater og makroalger. I de indre danske farvande har en intensiv udnyttelse af stenrev resulteret i fjernelsen af cirka 8,3 millioner kubikmeter sten, hvilket svarer til tabet af stenrevsområder på mindst 55 km² mellem 1950'erne og 2010 (Helmig et al., 2020). De fjernede sten blev primært anvendt til konstruktion af havne og kystbeskyttelse (Mikkelsen et al., 2013; Stenberg et al., 2015). Et eksempel på dette er Sønderborg lystbådehavn, hvor omkring 42.000 tons sten blev brugt til konstruktionen (Helmig et al., 2020). Efterspørgslen på sten til kystnære konstruktioner har haft en betydelig negativ effekt på de danske marine habitater, især i lavvandede områder under 10 meters dybde. Denne fjernelse har haft alvorlige konsekvenser for stenrevene i littoralzonen og de arter, der er afhængige af disse habitater (Stenberg et al., 2015).

Reduktionen af stenrev har formindsket levestederne for økonomisk vigtige fiskearter som torsk (*Gadus morhua*). Juvenile torsk foretrækker komplekse strukturer som stenrev, da disse reducerer rovdyrenes effektivitet (Gotceitas & Brown, 1993). Derudover tiltrækker stenrev topprædatorer som marsvin (*Phocoena phocoena*), da revene øger tilgængeligheden af fødekilder (Mikkelsen et al., 2013).

Tilstedeværelsen af stenrev påvirker også den marine flora betydeligt. I stedet for at udvikle rødder, besidder makroalger særlige morfologiske strukturer der fungerer som fasthæftningsorgan på hårdt substrat. For at sikre tilstedeværelsen af et makroalgесамfund i et givent habitat, er det derfor nødvendigt at sikre, at der er hårdt substrat til stede.

For at opretholde vækst og overlevelse kræver makroalger et minimum af lysindstråling. Da lys absorberes og spredes gennem vandsøjlen, er der mere tilgængeligt på lavere dybder, hvilket giver højere vækstrater for makroalger her. Da stenfiskeriet var målrettet rev på vand lavere end 10 meter (Helmig et al., 2020), er disse fotiske rev blevet mest påvirkede, og dermed er egnede habitater for makroalgevækst reduceret markant.

Eutrofiering har yderligere forværret situationen ved at reducere lysindtrængningen og sænke dybdegrænsen for makroalgers vækst, hvilket især påvirker de store flerårige habitatdannende arter

som sukkertang (*Saccharina latissima*) og blæretang (*Fucus vesiculosus*), der har højere lyskrav (Stæhr et al., 2020).

Makroalger kan opdeles i enårige og flerårige arter, som hver har forskellige vækststrategier. Enårige arter, der karakteriseres som opportunistiske, vokser hurtigt og har en simpel morfologi, hvilket nedsætter deres basis stofskifte (Murray & Littler, 1978; Steneck & Dethier, 1994). Opportunistiske arter er generelt næringselskende og de optræder typisk i store foreskomster i vandområder med forhøjede næringsstofkoncentrationer, fx i fjorde med et stort landbrugsopland af høj nærings-tilgængelighed (Clarke et al., 2006). Tilførsel af næringsstoffer har herved bidraget til at ændre sammensætning af makroalgesamfundene i Østersøen (Savage et al., 2010). Flerårige makroalger som sukkertang og blæretang opbygger derimod komplekse væv, som gør dem mere modstandsdygtige over for græsning og mekanisk stress. Disse arter fungerer som stabile, habitatdannende strukturer, der understøtter mange andre arter (Bulleri et al., 2002; Gutiérrez et al., 2022; Lilley & Schiel, 2006; Mark D. Bertness, 1999). Ændringerne i samfundsstrukturen af makroalger, blandt andet forårsaget af eutrofiering, har ført til, at de opportunistiske etårige typer negativt påvirker, og i en vis grad har erstattet de store flerårige og habitatdannende arter (Berger et al., 2003). Ved etablering af nye stenrev er det derfor vigtigt at kunne dokumentere udviklingen af makroalgesamfundet før-, under og efter udlægning af sten. Genskabelse af stenrev med større sten, vil forventeligt fremme de flerårige alger, da disse kræver et stabilt substrat (Stæhr et al. 2024). Endvidere er makroalger i sig selv også danner levesteder (værter) for en lang række af marine arter knyttet til stenrev. Makroalger er desuden generelt nemme at kortlægge da de er fastsiddende og relativt let genkendelige og derfor anvendelige til at vurdere tilstand og udvikling af et stenrev.

Monitorering af genetablerede stenrev er afgørende for at dokumentere de ønskede effekter af disse projekter og udgiften til monitoreringen bør derfor indtænkes i planlægningen af et nyt stenrev (Nielsen et al. 2025). Der er mange forskellige mulige tilgange til at monitorere udviklingen af fx et nyetableret stenrev. Nogle kræver stor ekspertise, mens andre metoder i et vist omfang kan udføres af frivillige (Nielsen et al. 2025). Valget af metoder afhænger af en kombination af kvalitet, reproducerbarhed og økonomi.

Resultaterne og erfaringer som ligger til grund for dette projekt, baseres på erfaringerne fra en specialerapport, hvis formål var at teste metoder til billedbaseret analyse af stenrev (Christensen 2024). Erfaringerne fra specialeprojektet, indikerede at en billedbaseret metode kan levere en præcis og systematisk dokumentation, som kan anvendes til langsigtet overvågning. Ved at kombinere denne tilgang med frivillige indsatser i billedindsamlingen og anvendelse af kunstig intelligens i genkendelsen af substrater, flora og fauna, er det forventeligt at omkostningerne yderligere reduceres.

Denne rapports formål er at beskrive fotodokumentationsmetoder til beskrivelse af sediment og biologiske forhold med afsæt i forundersøgelser foretaget i forbindelse med et genopretningsprojekt af et stenrev i Vordingborg kommune. Hovedformålet understøttes af følgende delformål:

1. Anvendeligheden af AI-teknologi til genkendelse af substrat, flora og fauna
2. Anvendeligheden af citizen science i dataindsamlingen

2. Metode

Overvejelser forud for monitorering

For at foretage analyse af billedmateriale stilles en del krav til indsamlingen af billeder for at sikre en billedkvalitet der muliggør en præcis genkendelse af arter og substrater i analysen.

De følgende aspekter er afgørende for at sikre høj datakvalitet, da de direkte påvirker præcisionen og sammenligneligheden af de indsamlede data. For at imødekomme kravene blev en rammeopstilling med fastsiddende kamera konstrueret, opsætningen ses af figur 1.

1. **Stabilitet:**

Stabilitet i kameraopsætningen er nødvendig for at undgå sløring eller forvrængning af billederne, som kan opstå ved bevægelse under optagelsen. Dette sikrer skarpe og klare billeder, der er essentielle for nøjagtig analyse af substrat og biota.

2. **Ret indgangsvinkel til bunden:**

En ensartet vinkel på kameraet i forhold til havbunden sikrer, at billederne har samme perspektiv. Dette reducerer fejl i målinger af arealdækning og gør det lettere at identificere og sammenligne strukturer, flora og fauna mellem billeder.

3. **Fast areal (0,25 m²):**

Ved at bruge en ramme, der præcist afgrænser billedarealet, sikrer man, at hvert billede repræsenterer samme størrelse af havbunden. Dette gør det muligt at kvantificere resultater, såsom dækning af substrat eller flora, og sammenligne data mellem forskellige lokaliteter og tidspunkter.

4. **Ens lysforhold:**

Ensartede lysforhold på alle billeder eliminerer variationer, der kan påvirke synligheden af detaljer på havbunden. Dette er vigtigt for at kunne identificere arter, substrattyper og andre strukturer på en pålidelig måde. Yderligere vil farvesammensætningen variere på forskellige dybder grundet forskelle i absorptionen af forskellige bølgelængder. Ens lysforhold kan sikres ved at fastmontere en lyskilde til sit kamerastativ.

Samlet set bidrager disse faktorer til at sikre, at data er nøjagtige, konsistente og reproducerbare, hvilket er afgørende for videnskabelige analyser og for at kunne drage pålidelige konklusioner om havbundens tilstand og udvikling. For at imødekomme disse krav til kameraopsætningen blev der i samarbejde med frivillige udviklet et kamerasetup der sikrede alle de overstående krav. Opsætningen ses på figur 1 og viser det stativ der blev anvendt i dette projekt

Video surveys eventuelt udført med ROV kan give et hurtigt billede af hvordan området overordnet ser ud, og denne metode kan være mere tidseffektiv, men den geografiske afgrænsning af data og det undersøgte areal kan være svært at kontrollere. Modsat giver brugen af en ramme og stillbilleder med fast areal mulighed for at vide præcist, hvor stort et område der er undersøgt og giver et mere detaljeret billede. Anvendelse af en billedbaseret tilgang med en rammekonstruktion er derfor fordelagtig til en højere datakvalitet og fast bestemmelse af undersøgt areal.



Figur 1: Rammekonstruktion til anvendelse i billedindsamling, Til venstre ses rammen for sig selv, til højre ses rammen sammen med operatør under dataindsamling. Rammen indeholder kompas, dybdemåler og plade til at notere lokation af hvert enkelt billede. Fotos: Møns sportsdykkerklub.

Etablering af transekter

For at monitorere stenrevet blev der anvendt en billedbaseret metode, hvor data blev indsamlet langs transekter, der dækkede hele revets dybdeudbredelse. Denne metode sikrer systematisk og repræsentativ indsamling af data om substrattyper, makroalgedækning og fastsiddende fauna.

Transekterne bør udvælges således, at deres udstrækning går fra revets laveste til det dybeste punkt for at dække hele dybdegradienten. Hver transekt bør markeres med GPS-koordinater ved start- og slutpunkt for at sikre gentagelighed ved fremtidige undersøgelser. Transekternes placering bør udvælges strategisk for at inkludere repræsentative områder af revet med forskellige substrattyper og eksponeringsforhold, da artssammensætninger kan variere en del, selv på korte afstande. Der skal derudover indsamles et antal billeder på alle dybder der kan repræsentere forholdene på den givne dybde. Det anbefalede antal af billeder der bør indsamles, vil variere afhængig af hvor stort og forskelligartet området er hvad angår naturtyper og dybder. Et større område med store variationer i dybde og habitattyper vil derfor kræve indsamling af mere billedmateriale for at det sikres at data er repræsentative.

Anvendelse af frivillige indsatser i billedindsamlingen

Udgiften til baseline og effektmonitorering af et nyetableret stenrev kan være anselig og det vil i mange projekter derfor være optimalt at reducere denne samtidigt med at der indsamles data med tilfredsstillende kvalitet. Dette skaber et behov for at udvikle metoder, der kan reducere omkostningerne ved monitorering, så flere ressourcer kan allokeres til anlæg og genoprettelsen af stenrev.

I dette projekt blev metoder til billedbaseret analyse af stenrev anvendt for at demonstrere, hvordan denne tilgang kan bruges til en mere omkostningseffektiv monitorering. Metoden muliggør en præcis og systematisk indsamling af billedmateriale til dokumentation af revets tilstand, som kan analyseres og lagres til fremtidige sammenligninger.

En yderligere fordel ved at anvende billedbaseret analyse er muligheden for at inddrage frivillige i monitoreringsarbejdet. Ved at træne frivillige i brugen af kameraudstyr og billedindsamling kan man reducere omkostningerne ved monitorering, samtidig med at man skaber en bredere sam-

fundsmæssig opbakning til projektet. Frivillige kan rekrutteres fra lokale dykkerklubber, naturforeninger eller andre interessegrupper, som ofte har en naturlig interesse i at bevare og beskytte de lokale marine habitater.

Denne tilgang har flere fordele. For det første giver det samfundet en bedre forståelse af, hvad der foregår i forbindelse med genopretningsprojekter, og hvorfor de er vigtige. For det andet skaber det en følelse af ejerskab blandt deltagerne, hvilket kan styrke deres engagement i bevarelse og beskyttelse af stenrevne. Endelig kan inddragelse af frivillige bidrage til at bygge bro mellem forskere, forvaltere og lokalsamfund, hvilket kan føre til projekter der har bred opbakning, hvor der i fællesskab er mulighed for at lave de bedste løsninger.

Ved at kombinere omkostningseffektive metoder som billedbaseret analyse med frivillig involvering kan man således sikre en mere økonomisk bæredygtig tilgang til monitorering af stenrev. Dette giver mulighed for at allokere flere midler til selve genopretningsindsatsen og samtidig styrke samfundets deltagelse og interesse for marine bevaringsprojekter.

Anvendelsen af kunstig intelligens i billedanalyse

Kunstig intelligens (AI) anvendes i stigende grad inden for monitorering af og forskning i marine økosystemer og giver nye muligheder inden for analysen af store datamængder. AI-baserede værktøjer gør det muligt at behandle data som f.eks. billedmateriale hurtigt og omkostningseffektivt, hvilket er særligt relevant i forbindelse med monitoreringsopgaver af marine områder som f.eks. genopretningsprojekter af stenrev. Ved at udvikle og træne modeller med høj præcision i genkendelsen af substrattyper, invertebrater og makroalgесамfund kan man opnå en forståelse af habitatets sammensætning og økologiske tilstand.

Den anvendte type af AI-modeller kan med høj sikkerhed identificere og klassificere substrattyper som sten, grus og sand samt biologiske komponenter som makroalger og fastsiddende invertebrater (Christensen 2024). Denne automatisering muliggør en mere ensartet og pålidelig analyse sammenlignet med traditionelle manuelle metoder, samtidig med at processens tids- og ressourcforbrug reduceres betydeligt. Hvor det tidligere kunne tage dage at analysere billeddata fra en enkelt transekt, kan en AI-model udføre samme opgave på få minutter, hvilket gør det muligt at analysere billeder fra forskellige projekter hurtigt og effektivt. Metoden giver derudover mulighed for at eliminere menneskelige bias der forekommer i vurderinger af dækningsgrader.

Det er dog vigtigt at anerkende metodens begrænsninger. AI-baseret billedanalyse giver ikke en komplet monitorering af et område, da mobile arter som fisk og krabber kan bevæge sig ud af synsfeltet og dermed ikke registreres i billeddataene. Her vil traditionelle metoder, eller anvendelse af fastmonterede undervandskameraer der kan optage videosekvenser over en længere periode give et bedre billede af det mobile faunaliv der findes på de givne lokaliteter. Desuden er underskovsarter, der lever under store løvformede makroalger, ofte underrepræsenterede, da de kan være skjult for kameraets synsfelt. Disse begrænsninger betyder, at metoden bedst suppleres med andre monitoreringsmetoder for at give et mere omfattende billede af habitatets tilstand.

Trods disse begrænsninger har AI-baseret billedanalyse klare fordele. Metoden er et billigt alternativ til nuværende metoder, og kan med en fast fremgangsmåde og planlagt dataindsamling sikre konsistente og sammenlignelige resultater på tværs af projekter. Dette gør teknologien særligt anvendelig i større monitoreringsprogrammer, hvor ressourcerne er begrænsede. AI's evne til at standardisere og effektivisere analysearbejdet gør den til et centralt værktøj i arbejdet med at bevare og genoprette marine økosystemer.

Forundersøgelser og efterfølgende monitorering i stenudlægningsprojekter

Forundersøgelser til stenudlægning spiller en central rolle i planlægningen og udførelsen af genopretningsprojekter for stenrev. Formålet med disse undersøgelser er at sikre, at de udvalgte lokaliteter har de rette miljøforhold til at understøtte et funktionelt stenrev og de tilknyttede økosystemtjenester. Ved at undersøge substratforholdene samt makroalge- og invertebrat samfundet på forhånd kan man målrette indsatsen, ved at finde de optimale udlægningsområder og optimere sandsynligheden for, at stenudlægningen resulterer i et stabilt og biodiversitetsrigt habitat.

En vigtig del af forundersøgelserne er vurderingen af substratforholdene. Dette indebærer en analyse af bundens stabilitet og sammensætning for at afgøre, om substratet kan understøtte de udlagte sten over tid uden at synke eller blive destabiliseret. Et stabilt substrat er afgørende for at sikre, at stenene forbliver på plads og danner et stabilt fundament for det marine liv. Desuden undersøges sedimentets karakteristika, makroalgers etablering og vækst samt den tilknyttede fauna, fremmes af et stabilt hårdt substrat, men forringes ved omlejring af sand og småsten (Stæhr et al. 2024).

Flora og fauna kortlægges også som en del af forundersøgelserne. Tilstedeværelsen af bestemte arter eller samfundsstrukturer kan indikere om området allerede består af sjældne eller værdifulde arter eller naturtyper. Hvis området f.eks. består af ålegræseenge eller biogene rev, vil en udlægning af sten skade disse habitater og positionen for stenrevet bør genovervejes.

Invertebrat og makroalgесamfunds strukturer kan også fortælle om miljøforholdenes egnethed til at understøtte et stenrev. For eksempel kan dominans af opportunistiske makroalgearter, observationer af liglagen og mangel på bentiske invertebrater indikere et eutroft område med risiko for iltsvind, som muligvis ikke er egnet for etableringen af et stenrev.

Ved at gennemføre forundersøgelser kan man ikke blot vælge de mest egnede lokaliteter til stenudlægning, men også skabe et videnskabeligt grundlag for at overvåge og evaluere projektets succes. Forundersøgelserne gør det muligt at fastsætte baseline-data, der kan bruges til at vurdere ændringer i biodiversitet, substratstabilitet og økosystemfunktion efter udlægningen. Dette er afgørende for at dokumentere effekterne af genopretningsindsatsen og for at udvide vidensbasen for fremtidige projekter.

Monitorering af et stenrev efter udlægningen af sten er afgørende for at vurdere projektets succes og forstå de økologiske effekter af genopretningen. Monitoreringen giver mulighed for at dokumentere ændringerne i økosystemet. Ved kontinuerlig overvågning af et genoprettet stenrev er det muligt at identificere, om stenrevet udvikler sig i den ønskede retning, og om det tiltrækker det forventede flora og faunaliv.

Derudover kan efterfølgende monitorering hjælpe med at identificere uventede udfordringer, såsom kraftig erosion, høje sedimentationsniveauer eller tegn på iltsvind, som kan påvirke revets fremtidige funktion. Monitoreringen har også en vigtig forvaltningsmæssig værdi, da der kan dannes dokumentation for effekten af stenudlægning og bidrage til udviklingen af fremtidige restaureringsprojekter. Desuden kan yderligere indsamlede data der hentes fra en billedbaseret tilgang til monitoreringen anvendes, til at forbedre modellerne der anvendes af kunstig intelligens, ved at udvide mængden af træningsdata der er tilgængelig.

Forundersøgelser foretaget i Interreg projektet Supported by nature

I forbindelse med forundersøgelser foretaget for Vordingborg kommune, blev der foretaget undersøgelser af de eksisterende bundforhold og samfund på det undersøgte område, inklusive en analyse af dækningsgraden af makroalger, substratforhold samt en række bentiske invertebrater ved hjælp af billedanalyse baseret på AI-teknologier.

Frivillige sportsdykkere blev trænet i at indsamle kvalitetsfotos langs transekter af ca. 160 meters længde. Disse var udvalgt mhp. at give et repræsentativt udsnit af området. Transekterne fulgte en lige linje, sikret med kompas og målebånd. For hver femte meter blev der taget 3 billeder placeret henholdsvis på transektlinjen og to meter til højre og venstre for linjen. I alt blev der indsamlet 99 billeder, hvoraf 96 billeder blev anvendt i analysen. Transektet spændte over en dybde af 5,7-6,4 meter.

For at sikre stabilitet, en ret indgangsvinkel til bunden, et fast areal og ens lysforhold på alle billeder blev et specifikt kamera setup anvendt. Opsætningen inkorporerede en ramme der afgrænsede arealet af alle billeder til at være præcist 0,25 m², et kamera var fastspændt på rammen for at sikre stabilitet og øget billedkvalitet. Opsætningen inkluderede også belysning, der var fastgjort til rammen, hvilket sikrede en optimal gengivelse af farvekompositionen i billederne (Figur 1).

Billeder af 0,25 m² rammer blev oparbejdet og analyseret gennem brug af værktøjet "Coralnet". I den AI-assisterede analyse fik hvert billede tildelt 36 tilfældigt placerede "pixel patches", hvor en AI-assisteret model blev trænet til at genkende indholdet af hver "patch". Modellen blev trænet til at genkende og placere forskellige grupper af bentiske invertebrater, sedimenttyper og funktionelle grupper af makroalger på hver "pixel patch". Modellen opnåede en præcision på 87% gennem træning på dette dataset, og alle AI-genererede annoteringer blev eftertjekket og rettet til den følgende analyse. De forskellige makroalgetyper blev grupperet på baggrund af morfologiske forskelle inspireret af tidligere studier på tangdominerede samfund (Steneck & Dethier, 1994). Makroalgerne er inddelt i 4 grupper: Filamentøse, Corticated (små hårde og flerårige), Foliose (små bladformende) og Fleshy (store kødede makroalger ofte store brunalger). Substrat blev registreret som enten grus, sand eller sten. Det vil sige at modellen ikke kan beskrive forskellige bløde substrater, og alle bløde substrater beskrives som sand.

Dækningsgraden af de forskellige grupper blev bestemt som antal observerede "pixel patches" mod det totale antal patches, derved opnås en procentvis fordeling af alle fundne substrat, flora eller fauna af hvert enkelt billede. Der blev genereret en graf for hele transektets samfundsstruktur, derudover blev transektet opdelt i 4 delområder og en graf for samfundsstrukturen af hvert delområde blev produceret herfra. Ved at opdele området i 4 forskellige dele, muliggøres det at se på eventuelle forskelle i substrat og samfund i forskellige delområder for at vurdere det samlede områdes ensformighed.

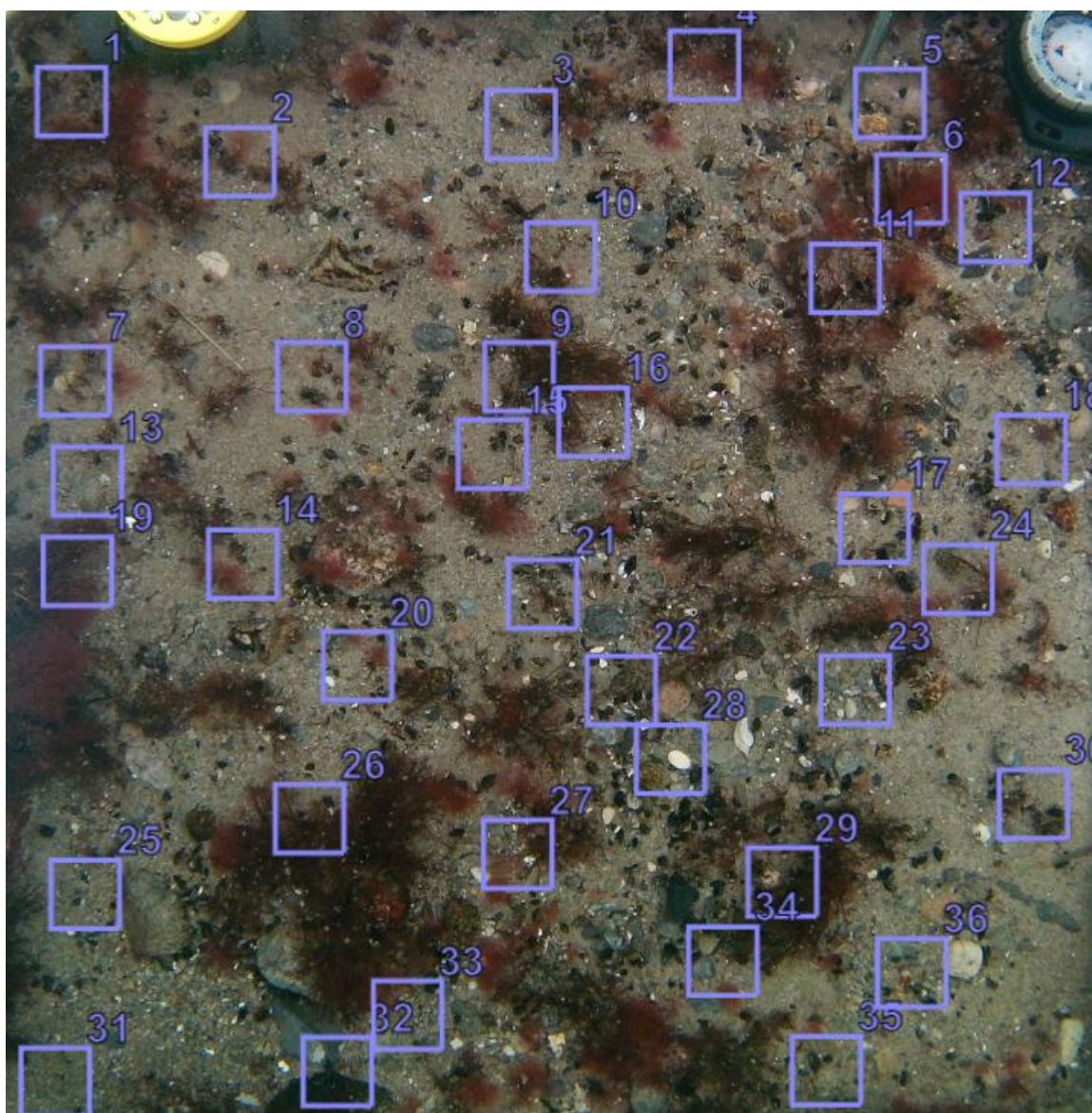
AI-assisteret Annotering

Annotering henviser til den aktivitet hvor et bestemt område af et billede kategoriseres som værende en bestemt substrattype, flora eller faunatype. I afsnittet forneden anvendes udtrykket "feature extractor" som kan beskrives som anvendelsen af et værktøj der identificerer og ekstraherer relevante data fra et billede eller et område af et billede der kan bruges til at klassificere billedområderne. En "classifier" refererer til den machine learning algoritme der anvendes til at tildele en klassifikation til et datainput, som i dette tilfælde er et område af et billede.

Selvom de tilfældigt genererede felter inden for hvert kvadrat i denne undersøgelse blev manuelt annoteret, blev en deep learning-engine (CoralNet 1.0) samtidig trænet til at klassificere de samme tilfældigt genererede felter. Dette gjorde det muligt at teste effektiviteten af en AI-baseret tilgang til analyse af dækning og forekomst af arter og funktionelle typer i forhold til en manuel tilgang til billedanalyse.

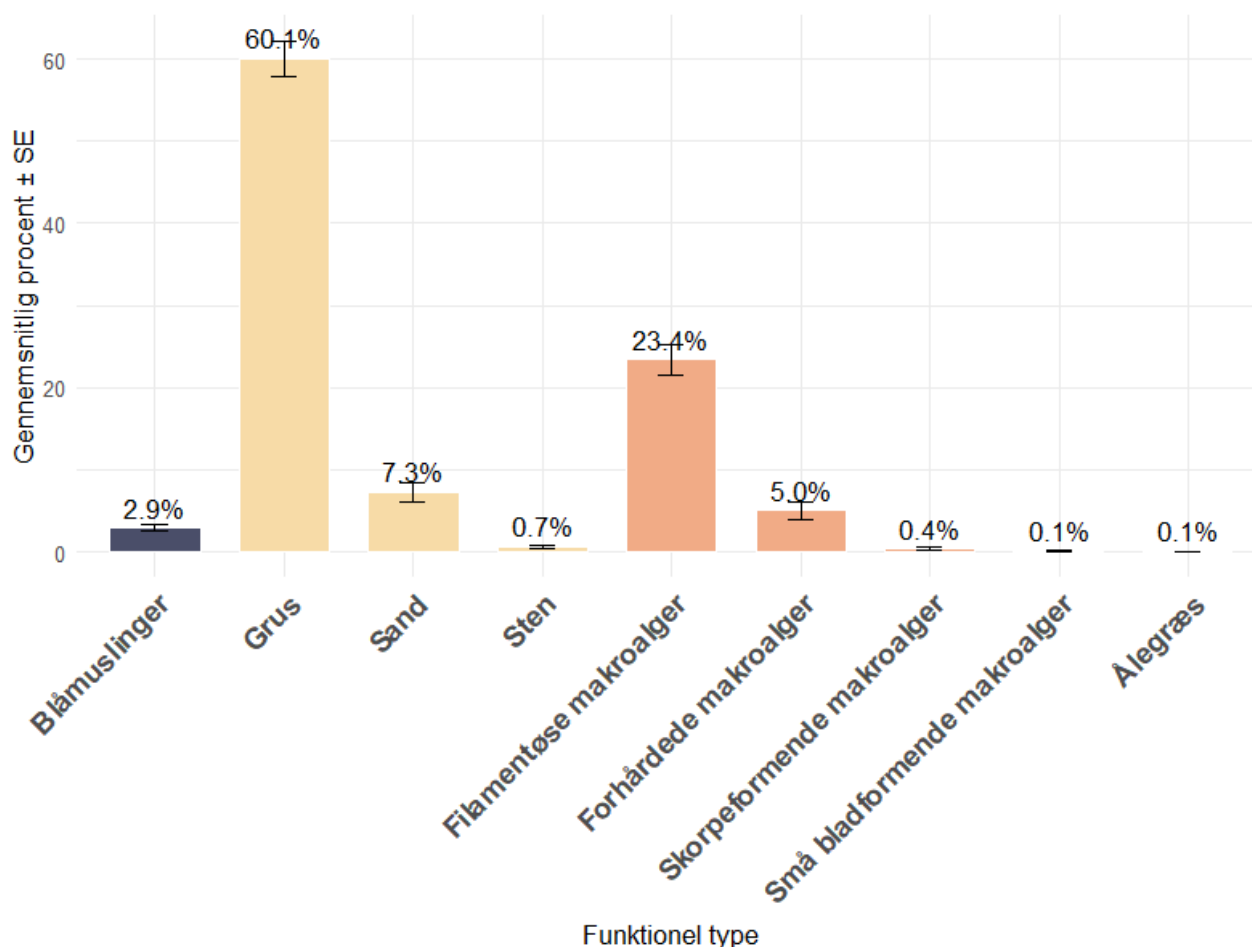
Brugen af CoralNets "deep learning engine" gjorde det muligt at implementere AI-værktøjer og forbedre træningseffektiviteten i genkendelsen af de forskellige substrater, flora og fauna i monitoreringen af stenrevne. CoralNets deep learning-motor fungerer ved hjælp af en "deep network-feature extractor" og en "classifier", der gør det muligt at tildele de tilfældigt genererede felter den bedst passende kategori. "Feature extractoren" genererer "feature vektorer", der indfanger centrale visuelle informationer og gør det muligt at skelne mellem forskellige funktionelle grupper. "Feature extractoren" er trænet på et stort datasæt bestående af 590.000 billeder fra 330 projekter (Qimin Chen, 2021). Da modellen allerede er trænet på et stort dataset, kan man med ved relativt få eksempler fra sit eget datamateriale finjustere modellen til at genkende objekter fra et ønsket habitat. Denne metode er både hurtigere og mere præcis end at træne en AI-model fra bunden, der oftest kræver store mængder data. For hurtigere anvendelses skyld, blev CoralNets værktøjer derfor anvendt til at klassificere indholdet af billedmaterialet. Den anvendte "classifier" vurderer et specifikt felt og tildeler en "likelihood to fit" score til alle funktionelle typer i det pågældende projekt. Sammen gør disse funktioner i CoralNets deep learning netværk det muligt at udføre automatisk annotering af punkter for et helt projekt, når træningen af "feature extractoren" og "classifieren" er fuldført.

I dette projekt blev en model trænet baseret på 3456 manuelle annoteringer fra 96 uploadede billeder af de undersøgte rev og testet på 427 enkeltpunktsfelter ved hjælp af CoralNets feature extraction (EfficientNet) og klassifikationsværktøj.



Figur 2: Eksempel på et billede der er analyseret ved brug af AI i projektet. Indholdet af hver enkelt blå kasse kategoriseres som en bestemt, substrat, flora eller fauna type.

3. Resultater

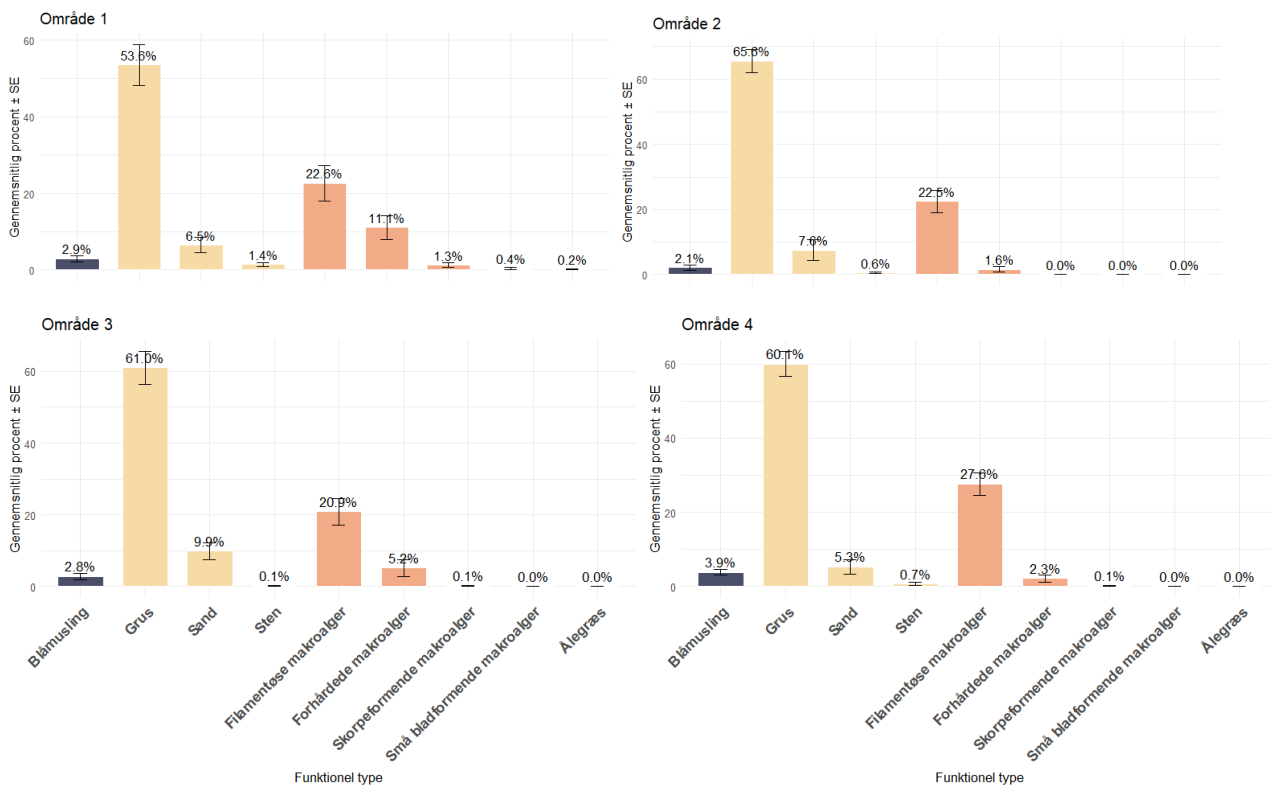


Figur 3: Dækningsgraden af fundne invertebrater, sedimenttyper og flora for det samlede område. Dækningsgrader er udregnet som procentdelen af pixels der er kategoriseret som den gældende type. Dækningsgraden er vist i tal over hver bar, standard error er også vist som errorbar på hver bar.

Resultaterne fra figur 3 viser at området generelt er karakteriseret ved at bestå af en gruset sandbund. Af de testede substrattyper var grus den hyppigst forekommende med 60,1% herefter efterfulgt af sand med 7,3% dækning og sidst forekom større sten med en forekomst på 0,7%.

Af alle faunatyper der blev undersøgt for, var der kun observationer af blåmuslinger, blåmuslingerne forekom med en dækningsgrad på 2,9%.

Af de 5 makroalgetyper der blev undersøgt for, var filamentøse typer mest forekommende med en dækningsgrad på 23,4, efterfulgt af forhårdede typer med 5,0% forekomst, skorpeformende med 0,1% forekomst og sidst blev der ikke fundet nogen observationer af store læderformende typer. Ålegræs forekom med en dækningsgrad på 0,1%.



Figur 4: Dækningsgraden af fundne invertebrater, sedimenttyper og flora for 4 delområder. Dækningsgrader er udregnet som procentdelen af pixels der er kategoriseret som den gældende type. Dækningsgraden er vist i tal over hver bar, standard error er også vist som errorbar på hver bar.

Ved opdeling af det undersøgte område i 4 delområder jf. figur x ses det at grus forekommer i 53,6-65,6% dækningsgrad, sand forekommer i 5,3-9,9% dækningsgrad og sten forekommer i 0,1-1,4% dækningsgrad.

Filamentøse makroalger forekommer med mellem 27,6-20,9% dækningsgrad, forhårdede typer forekommer med 1,6-11,1% dækningsgrad, skorpeformende typer forekommer med 0,0-1,3%, små bladformende typer forekom i 0,0-0,4% dækningsgrad, ålegræs blev observeret med mellem 0,0-0,2% dækningsgrad.

4. Diskussion

Af analysen blev der i dette studie fundet, at der ved brug af frivillighed i dataindsamlingen og anvendelse af AI-teknologi til benthisk billedanalyse effektivt kunne laves en monitorering af det undersøgte område. Resultaterne viste en gruset sandbund som tyder på et sediment der kan være bærende ved fremtidig udlægning af sten. Der blev undersøgt om området indeholde forekomster af bevaringsværdige naturtyper samt fauna og floraarter. Resultaterne viste forekomst af blåmuslinger og ålegræs i området. Blåmuslingerne var alle juvenile (<1 cm) og forekom i 2,9% af området. Der blev ikke fundet forekomster af adulte blåmuslinger eller egentlig bankedannelse af disse. Det er usikkert i hvor høj grad de juvenile muslinger vil vokse op og udvikle en stabil bestand. Trusler mod juvenile muslinger uden hårdt stabilt substrat kan være storme eller prædation (Carrington, 2002). Ofte vil disse derfor ikke nå voksne stadier og området kommer til at fungere som "sink" for produktionen af nye muslingelarver. Det er dog vist, at kompleksiteten af substratet har en stor rolle for levedygtigheden af juvenile blåmuslinger (Frandsen & Dolmer, 2002). Selv hvis udlægningen af sten initielt kan være skadende for den stående population af muslinger i området, vil der på længere sigt gives mulighed for dannelse af mere stabile blåmuslingepopulationer i området.

Der blev fundet forekomster af ålegræs i området, men kun i meget lave dækningsgrader (0,1% figur 3). Forekomsterne kan derfor beskrives som ubetydelige, og da forekomsterne af ålegræsset var i form af enkeltstående strå, var der ikke tale om egentlige ålegræsenge. Der er derfor ikke fundet ålegræs i mængder der udelukker området fra at udlægge sten.

Sedimentet der var domineret af grus og med forekomster af større sten tydede på en bund der kan være bærende for udlægning af sten. Og observationer i felten viste en betydelig forekomst af ler, specielt på de dybere lokationer. Der blev foretaget yderligere undersøgelser i felten med metaltspyd der også viste en tæt sammenhængende bund der er bærende for større sten.

Tilstedeværelsen af mindre sten og grus i området tillod en mindre bevoksning af makroalger hvor filamentøse makroalger var de mest dominerende med 23,4% dækning (figur 3+4), dækningsgraden af de flerårige typer (forhårdede, små bladformende, læderformende og skorpeformende) var samlet på 5,5% dækning hvilket indikerer at området ikke besidder en stabil struktur der kan understøtte et flerårigt makroalgesamfund. Denne sammensætning af makroalgesamfundet er forventelig med den substratfordeling vi finder, hvor kun meget få større sten er til stede (figur 3+4). Efter anlægning af stenrevet forventes det at makroalgesamfundet vil besidde flere flerårige habitatdannede arter, da stabilt substrat herefter vil være til stede.

Der blev ikke observeret nogen mobil fauna af billedmaterialet som forventet, for at undersøge tilstedeværelsen af disse, bør andre metoder anvendes som tidligere diskuteret.

Denne undersøgelse har demonstreret potentialet i fotodokumentationsmetoder assisteret af kunstig intelligens til monitorering af stenrev. Resultaterne viser, at billedbaseret analyse kan give en detaljeret kortlægning af substratfordeling, makroalgesamfund og fastsiddende invertebrater. Imidlertid er der flere metodiske og praktiske aspekter, som bør overvejes for at forbedre fremtidige monitoreringsprogrammer.

Potentiale i frivillig inddragelse

Et vigtigt aspekt ved monitoreringen udført i dette projekt var anvendelsen af frivillige sportsdykkere til billedindsamling. Erfaringer fra dette studie understøtter at det er muligt at indsamle kvalitetsdata ved at samarbejde med frivillige i dataindsamlingen. Dette indikerer at der er gode muligheder for at opnå en effektiv indsamling af kvalitetsdata, der kan anvendes til efterfølgende analyser og vurderinger af marine habitaters udseende og tilstand. Dette forudsætter at der er en tæt dialog med de frivillige, som trænes grundigt i dataindsamlingen. Selve dataanalysen blev i dette projekt udført af eksperter, og kan pt ikke gennemføres af frivillige alene.

Borgerinddragelse giver desuden en god mulighed for at opbygge et bredere vidensgrundlag og styrke interessen for bevarelse af marine habitater. Ved at involvere lokale dykkere og naturforeninger kan monitoreringsindsatsen inddrage samfundet i bevaringen af marine områder. Efter validering af data og den videre analyse af billedmaterialet foretaget af relevante specialister sikres validiteten af undersøgelserne og samtidig anvendes en standardiseret og effektiv monitorering af de marine områder.

Den præsenterede metode hvor frivillige sportsdykkere indsamler undervandsfotos som efterfølgende analyseres vha AI modeller, har potentiale til at muliggøre indsamlingen af store mængder data fra hele landets marine områder. På lavvandede områder kan norkeldykning langs transekter endvidere anvendes at indhente billedmateriale (Christensen 2024), hvilket giver mulighed for en bredere skare af frivillige at deltage.

Anvendelsen af kunstig intelligens

Brugen af AI-assisteret billedanalyse har vist sig at være en effektiv metode til at reducere den manuelle arbejdsbyrde og økonomiske omkostning der bruges på monitorering, for at sikre en mere ensartet klassifikation af substrat og biota. Den AI-trænede model opnåede en præcision på 87% på et begrænset træningsdataset, hvilket viser teknologiens potentiale til hurtig og effektiv analyse. Det vil derudover være mulighed for at øge præcisionen af AI-modellen ved kun at medtage data der har høj konfidens, hvilket de fleste AI modeller har mulighed for at bestemme. Dette vil være anvendeligt i situationer hvor man ønsker af finde bestemte arter med høj konfidens. Dog vil forøgelsen af konfidens niveauet sænke antallet af detekterede substrattyper og organismer, da detektioner med lav konfidens fjernes fra datasættet. Hvis bestemte typer af data bestemmes med lavere konfidens vil disse typer derfor frasorteres oftere. Det er derfor værd og overveje om data skævvrides før man hæver konfidensniveauet.

Med 87% har modellen opnået en høj præcision på et mindre dataset sammenlignet med lignende studier. Andre studier viser nøjagtigheder af annoteringer på 65-67% (Hartoni et al., 2022), 74% (Garcia et al., 2018), 78% (Piechaud et al., 2019), 80 % (Ierodiaconou et al., 2011), mellem 83.5% og 88.5% (Zhang, 2015), 89% (Bravo et al., 2021), 87,5-91,8% (Reshma et al., 2023), hvoraf de fleste analyserer kun få funktionelle grupper med andre modeller.

Brugen af kunstig intelligens i billedbaseret monitorering af stenrev har potentiale til at revolutionere måden, hvorpå marine økosystemer kan monitoreres. Ved at indhente datamateriale i form af billeder muliggør man en digitalisering af dataene fremfor at data skal baseres på observationer i felten af trænede erhvervsdykkere. Billedbaseret dataindsamling muliggør dermed en automatisering af processen gennem anvendelse af kunstig intelligens, hvor tid og ressourcer bedre kan udnyttes, samt give en mere objektiv tilgang til vurdering af forskellige substrat, flora og fauna fordelinger, da subjektiviteten af vurderinger foretaget i felten elimineres. Med tid og mere træningsdata kan præcisionen af modellerne forbedres yderligere, og skabe endnu mere præcise vurderinger af habitaters udseende og tilstand.

Supplerende data til billedbaseret analyse

Den anvendte metode kan bruges som en mulig kost-effektiv metode der giver en minimums vurdering af tilstanden på marine habitater. Det er vigtigt at omtale de områder hvor metoden bør suppleres med andre monitoreringsmetoder når ønsket er at lave en komplet overvågning af flora og fauna i området.

I disse undersøgelser blev der foretaget forundersøgelser på en gruset sandbund med enkelte forekomster af større sten. Makroalgesamfundet var derfor ikke præget af flere lag af makroalger og de udfordringer der er i at bedømme artssammensætningen i underskoven er derfor ikke udtrykt her. Underskovsarterne kan dog blive underrepræsenteret i den fortsættende monitorering efter stenudlægning og etableringen af et flerlaget makroalgesamfund. Hvis der specifikt ønskes en undersøgelse af underskovsarterne i et makroalgesamfund bør andre metoder som indsamling af vegetationsprøver til artsgenkendelse i laboratorie anvendes. Det ses dog at diversiteten og det samlede makroalgesamfund er styret af tilstedeværelsen af store løvformende arter, der er nemme at analysere dækningsgraden af med en billedbaseret tilgang (Eriksson et al., 2006; Klemens Eriksson et al., 2007). Derfor kan en billedbaseret tilgang, der kun ser todimensionalt, måske sige lige så meget om makroalgesamfundet som en analyse af alle niveauer i samfundet.

5. Tak

Denne rapport bygger på et stærkt samarbejde med frivillige fra Møns Dykkerklub og Danmarks Naturfredningsforening i Vordingborg. Deres entusiasme og engagement var altafgørende for at projektet lykkedes så godt som det gjorde.

6. Referencer

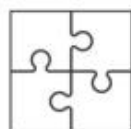
- Berger, R., Henriksson, E., Kautsky, L., & Malm, T. (2003). Effects of filamentous algae and deposited matter on the survival of *Fucus vesiculosus* L. germlings in the Baltic Sea. *Aquatic Ecology*, 37, 1-11.
- Bravo, G., Moity, N., Londoño-Cruz, E., Muller-Karger, F., Bigatti, G., Klein, E., Choi, F., Parmalee, L., Helmuth, B., & Montes, E. (2021). Robots versus humans: Automated annotation accurately quantifies essential ocean variables of rocky intertidal functional groups and habitat state. *Frontiers in Marine Science*, 8, 691313.
- Bulleri, F., Benedetti-Cecchi, L., Acunto, S., Cinelli, F., & Hawkins, S. J. (2002). The influence of canopy algae on vertical patterns of distribution of low-shore assemblages on rocky coasts in the northwest Mediterranean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 267(1), 89-106.
- Carrington, E. (2002). Seasonal variation in the attachment strength of blue mussels: causes and consequences. *Limnology and Oceanography*, 47(6), 1723-1733.
- Christensen P.B. (2024). Characterization of Established Boulder Reefs using AI-assisted Image Analysis: Effects of environmental factors and reef age on macroalgal cover and functional type dominance patterns. Master thesis. Aarhus University.
- Clarke, A., Weckström, K., Conley, D. J., Anderson, N. J., Adser, F., Andrén, E., de Jonge, V. N., Ellegaard, M., Juggins, S., & Kaupila, P. (2006). Long-term trends in eutrophication and nutrients in the coastal zone. *Limnology and Oceanography*, 51(1part2), 385-397.
- Eriksson, B. K., Rubach, A., & Hillebrand, H. (2006). Community dominance by a canopy species controls the relationship between macroalgal production and species richness. *Limnology and Oceanography*, 51(4), 1813-1818.
- Frandsen, R., & Dolmer, P. (2002). Effects of substrate type on growth and mortality of blue mussels (*Mytilus edulis*) exposed to the predator *Carcinus maenas*. *Marine Biology*, 141, 253-262.
- Garcia, R. A., Lee, Z., & Hochberg, E. J. (2018). Hyperspectral shallow-water remote sensing with an enhanced benthic classifier. *Remote Sensing*, 10(1), 147.
- Gotceitas, V., & Brown, J. A. (1993). Substrate selection by juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*): effects of predation risk. *Oecologia*, 93, 31-37.
- Gutiérrez, J. L., Hacker, S. D., Coombes, M. A., Wild, C., Pereira-Filho, G. H., & Palomo, M. G. (2022). Marine Hard Substrate Communities. In *Marine Biology* (pp. 232-273). CRC Press.
- Hartoni, H., Siregar, V. P., Wouthuyzen, S., & Agus, S. B. (2022). Object based classification of benthic habitat using Sentinel 2 imagery by applying with support vector machine and random forest algorithms in shallow waters of Kepulauan Seribu, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 23(1).
- Helmig, S. A., Nielsen, M. M., & Petersen, J. K. (2020). *Andre presfaktorer end næringsstoffer og klimaforandringer – vurdering af omfanget af stenfiskeri i kystnære marine områder*. DTU Aqua.
- Ierodiaconou, D., Monk, J., Rattray, A., Laurenson, L., & Versace, V. (2011). Comparison of automated classification techniques for predicting benthic biological communities using hydroacoustics and video observations. *Continental Shelf Research*, 31(2), S28-S38.
- Klemens Eriksson, B., Rubach, A., & Hillebrand, H. (2007). Dominance by a canopy forming seaweed modifies resource and consumer control of bloom-forming macroalgae. *Oikos*, 116(7), 1211-1219.
- Lilley, S. A., & Schiel, D. R. (2006). Community effects following the deletion of a habitat-forming alga from rocky marine shores. *Oecologia*, 148, 672-681.
- Mark D. Bertness, G. H. L., Jonathan M. Levine, Paul R. Schmidt, Aubrey O. Ingraham. (1999). TESTING THE RELATIVE CONTRIBUTION OF POSITIVE AND NEGATIVE

INTERACTIONS IN ROCKY INTERTIDAL COMMUNITIES. *Ecology*.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[2711:TTRCOP\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[2711:TTRCOP]2.0.CO;2)

- Mikkelsen, L., Mouritsen, K. N., Dahl, K., Teilmann, J., & Tougaard, J. (2013). Re-established stony reef attracts harbour porpoises *Phocoena phocoena*. *Marine Ecology Progress Series*, 481, 239-248.
- Murray, S. N., & Littler, M. M. (1978). Patterns of algal succession in a perturbed marine intertidal community 1. *Journal of Phycology*, 14(4), 506-512.
- Nielsen, P., Banke, T.L., Freitas, P.S., Hansen, F.S., Kjær, R.A., Flindt, M.R., Montesanto, F., Saurer, C., Steinfurth, R.H., Steinmann, A., Stæhr, P.A.U., & Taylor, D. (2025) Monitoring Guideline: Ecosystem Services provided by restored biogenic reefs, boulder reefs or eel-grass meadows. Scientific report from The National Center for Marine restoration. [fi-nal_monitoringsvejledning.pdf](#)
- Piechaud, N., Hunt, C., Culverhouse, P. F., Foster, N. L., & Howell, K. L. (2019). Automated identification of benthic epifauna with computer vision. *Marine Ecology Progress Series*, 615, 15-30.
- Qimin Chen, O. B., Stephen Chan, Haoming Zhang, Jessica Bouwmeester, and David Kriegman (PI). (2021). *A NEW DEEP LEARNING ENGINE FOR CORALNET*. Coralnet.
- Reshma, B., Rahul, B., Sreenath, K., Joshi, K., & Grinson, G. (2023). Taxonomic resolution of coral image classification with Convolutional Neural Network. *Aquatic Ecology*, 57(4), 845-861.
- Savage, C., Leavitt, P. R., & Elmgren, R. (2010). Effects of land use, urbanization, and climate variability on coastal eutrophication in the Baltic Sea. *Limnology and Oceanography*, 55(3), 1033-1046.
- Stenberg, C., Støttrup, J., Dahl, K., Lundsteen, S., Göke, C., & Andersen, O. N. (2015). *Ecological benefits from restoring a marine cavernous boulder reef in Kattegat, Denmark*. National Institute of Aquatic Resources, Danmarks Tekniske Universitet.
- Steneck, R. S., & Dethier, M. N. (1994). A functional group approach to the structure of algal-dominated communities. *Oikos*, 476-498.
- Stæhr, P. A., Markager, S., Høgslund, S., Hansen, J. W., Tonetta, D., Upadhyay, S., & Nielsen, M. M. (2020). Stenrev som muligt kvælstofvirkemiddel: Vækstbetingelser for bentiske alger og deres betydning for ilt-og næringsstoffdynamikken i Limfjorden.
- Stæhr P.A.U., Canal-Vergés P., Dahl K., Göke C., Holbach A.M., Krause-Jensen D., Steinfurth R.C.H., Svendsen J.C., Jørgensen T.B. (2024). Forhold af betydning for naturgenopretning af stenrev Videnskabelig rapport fra Nationalt Center for Marin Naturgenopretning. <https://marinnatur.dk/media/72560/forhold-af-betydning-for-naturgenopretning-af-stenrev.pdf>
- Zhang, C. (2015). Applying data fusion techniques for benthic habitat mapping and monitoring in a coral reef ecosystem. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 213-223.

Center for Marin Naturgenopretning er et samarbejde mellem Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, DTU Aqua Institut for Akvatiske Ressourcer, Syddansk Universitet, Biologisk Institut, og Limfjordsrådet.



Centeret er finansieret af Miljøministeriet og Velux Fonden.



Centerets hovedformål er at fremme en vidensbaseret implementering af marin naturgenopretning, med henblik på at styrke marine økosystemers modstandsdygtighed, økologiske balance og en lang række økosystem tjenester i danske farvande.