Integreret Marin Miljøovervågning (IMM) – Analysefase (2023)
IMM-Spor: Miljødata fra satellitter

Hovedresultater fra analysefasen og konkrete forslag for det videregående arbejde i projektets implementeringsfase 2024-2026

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 21. December 2023 | **70**

AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Kategori: Forskningsnotat

Titel: Integreret Marin Miljøovervågning (IMM) – Analysefase (2023)
IMM-Spor: Miljødata fra satellitter
Hovedresultater fra analysefasen og konkrete forslag for det videregående arbejde i projektets implementeringsfase 2024-2026

Forfattere: Andreas Holbach, Sanjina Upadhyay Stæhr, Stiig Markager
Institution: Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

Faglig kommentering: Peter Anton Upadhyay Stæhr
Kvalitetssikring, DCE: Anja Skjoldborg Hansen
Sproglig kvalitetssikring: Peter Anton Upadhyay Stæhr

Rekvirent: Miljøstyrelsen

Bedes citeret: Holbach A., Upadhyay Stæhr S., Markager S., 2023. Integreret Marin Miljøovervågning (IMM) – Analysefase (2023) IMM-Spor: Miljødata fra satellitter. Hovedresultater fra analysefasen og konkrete forslag for det videregående arbejde i projektets implementeringsfase 2024-2026. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 12 s. - – Fagligt notat nr. 2023|70

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Foto forside: Peter Bondo Christensen

Sideantal: 12

Indhold

1 Baggrund 4

2 Kort metodebeskrivelse 6

3 Analysefasens hovedresultater 7

4 Anbefalinger for det videregående arbejde i IMM sporet 'Miljødata fra satellitter' 9

4.1 Optimering på satellitsiden 9

4.2 Optimering på *in situ* overvågningssiden 9

4.3 Operationalisering af et samlet Sentinel-3 baseret produkt 11

5 Referencer 12

1 Baggrund

Delprojektet Miljødata fra satellitter er et af flere spor i Miljøstyrelsens (MST) 4-årige projekt om Integreret Marin Miljøovervågning (IMM), hvor egnetheden af nye teknologier og især deres sammenspil med henblik på et moderne marint overvågningssystem skal analyseres, testes, udvikles og i sidste ende operationaliseres. MST har besluttet at dele IMM projektet op i en analysefase (2023) og en efterfølgende gennemførelsesfase (2024-2026), jævnfør Statens IT-projektmodel. De traditionelle skibsbaserede teknikker til overvågning af havmiljøet, har gennem mere end 35 år leveret værdifulde data til vurdering af miljøtilstand og dens dynamik i respons til forskellige tiltag (f.eks. vandplaner). Men skibsbaserede punktmålinger er omkostningstunge og giver ikke nødvendigvis det mest retvisende billede af miljøtilstanden pga. lav tidslig og rumlig dækning. Desuden kan de kun gennemføres i dagslys, hvilket sætte begrænsninger på brugen af de skibe som udføres overvågningen. Over de seneste årtier har nye teknologier, bl.a. automatiske målebøjer, satellitter, droner og computermodeller givet muligheden for indblik i miljøets tilstand og processer med hidtil uset høj opløsning både i rum og tid. Nye teknologier er dog ikke endnu i nævneværdig grad blevet inkorporeret i det danske marine overvågningsprogram. Kravene til miljøovervågningen er stigende med øget dokumentationsbehov ved tilstandsvurdering i henhold til både Vandrammedirektivet (VRD) og Havstrategidirektivet (HSD). Derudover er der stigende krav om overvågning for at kunne dokumentere at tiltag, der foretages for at opnå en forbedret tilstand, har de forventede effekter. Med baggrund i ovenstående udfordringer, arbejder MST på at udvikle omkostningseffektive løsninger til den løbende overvågning af de marine vandområder, som bygger på en integrering af nye teknologier samt et reduceret skibsbaseret måleprogram. IMM, som den samlede løsning, skal kunne give detaljeret indblik i den historiske og aktuelle miljøtilstand, samt muligheden for at kunne lave scenarier for den fremtidige tilstand. Dette skal foregå gennem en digital onlineplatform, hvor overvågningsdata og marine økosystemmodeller spiller sammen igennem moderne beregningsrutiner (f.eks. 'machine learning' og dataassimilering) for løbende at generere præcise og geografisk dækkende vurderinger af havmiljøtilstanden. I de seneste to år, har AU sammen med DHI arbejdet på IMM-relaterede forprojekter med fokus på udviklingen af satellitbaserede klorofylprodukter og deres integration med marine økosystemmodeller igennem dataassimilering (Holbach m.fl., 2022). Vi var i stand til at opnå en signifikant forbedring af satellitbaserede klorofylestimater for de danske marine farvande og kunne vise at deres assimilering i DHI's økosystemmodeller kan føre til en forbedret repræsentation af miljøprocesser.

Nærværende forskningsprojekt har til formål at undersøge muligheden for at generere et nyt satellitbaseret produkt, som leverer estimater for lyssvækkelsen (K_d), også omtalt som vandets klarhed. Vandets klarhed er en helt afgørende faktor for miljøtilstanden, som påvirker udbredelsen af bentiske planter, forekomsten af fisk og fordelingen af fytoplankton vækst og dermed forekomsten af iltsvind. Såfremt akkurate og repræsentative værdier for $K_d$kan estimeres fra satellit i nær-realtid, vil sådanne data fremover kunne bidrage til at understøtte og fremrykke moderniseringen af den marine miljøovervågning. K_d er også en vigtig marin miljøindikator, som kan benyttes som en proxy for ålegræssets dybdegrænse (Timmermann et al., 2015) og anvendes derfor som en støtteparameter i vurderingen af økologisk tilstand i fht. vand-

rammedirektivet. Lyssvækkelsen i vandsøjlen skyldes primært opløst organisk stof (CDOM), fytoplankton (pigmenter) og suspenderede organiske (detritus) uorganiske partikler (mineraler), og endelig bidrager vand til den samlede lyssvækkelse. Bundplanter, især ålegræs, har stor betydning for de kystnære økosystemers tilstand, men næringsstoftilførsler med tilhørende opblomstringer af mikroalger og uklart vand (eutrofiering), har medført en længerevarende skade på vores kystnære økosystemer, med iltsvind og fiskedød som nogle af konsekvenserne (Hansen og Høgslund, 2023).

I det nuværende marine NOVANA program overvåges vandets klarhed med en Secchi skive (sigtdybde) og/eller ved 'Photosynthetically Active Radiation' (PAR, 400-700 nm) profilmålinger og der beregnes gennemsnitlig en K_d^{PAR} for vandsøjlen (Markager og Fossing, 2015). Lyssvækkelsen varierer dog betydeligt hen over vandsøjlen, bl.a. fordi lyset ændrer dets spektrale sammensætning med dybden. Et andet usikkerhedselement er at de skibsbaserede målinger af lyssvækkelsen udføres på målestationer som typisk er placeret længst muligt fra land. Forhold som ophvirvling af materiale ved bunden og gradienter i koncentration af CDOM og fytoplankton gør at lyssvækkelsen forventeligt er betydelig højere og mere variabel i de lavvandede kystnære områder, hvor bentisk vegetation gror. Tilsammen betyder disse forhold at den nuværende beregning af lysintensiteten ved havbunden er behæftet med stor usikkerhed. Sentinel-3 satellittens 'Ocean and Land Color Instrument' (OLCI) optager spektrale billeder hen over de danske marine farvande på daglig basis. Igennem en avanceret 'neural network' algoritme (Case-2 Regional Coast Color (C2RCC); Doerffer, 2010), kan reflektans signalet inverteres til kvantitative estimater for optiske egenskaber (kaldet 'inherent optical properties' (IOPs)) der påvirker den samlede lyssvækkelse. Disse IOPs omfatter pigmentabsorption (a_{pig}), absorption af organisk materiale (a_{dg}) og spredning ved partikler (b_{tot}). Estimeringen af IOPs gøres for hvert billedelement (pixel), og udgives ved en bølgelængde på 443 nm, som svarer til absorptionsmaksimum af klorofyl-a (Doerffer, 2010). Ved at kombinere estimater for de tre dominerende lyssvækkelseskomponenter (IOPs) med vandets egen lyssvækkelse kam man kvantificere den samlede lyssvækkelse ved 443 nm (K_d^{443}).

2 Kort metodebeskrivelse

Med udgangspunkt i IOPs ved 443 nm, er der i IMM projektets analysefase blevet udviklet en spektral modeltilgang for at omregne Sentinel-3 satellittens OLCI level-2 produkter til spektre (PAR, 400-700 nm) af fire IOPs (Holbach m.fl., 2023):

1) a_{pig}: fytoplanktonpigmenternes absorptionskoefficient

2) a_g: colored dissolved organic matter ('gelbstoff') absorptionskoefficient

3) a_d: detritus' absorptionskoefficient

4) b_{tot}: den samlede spredningskoefficient af suspenderede partikler

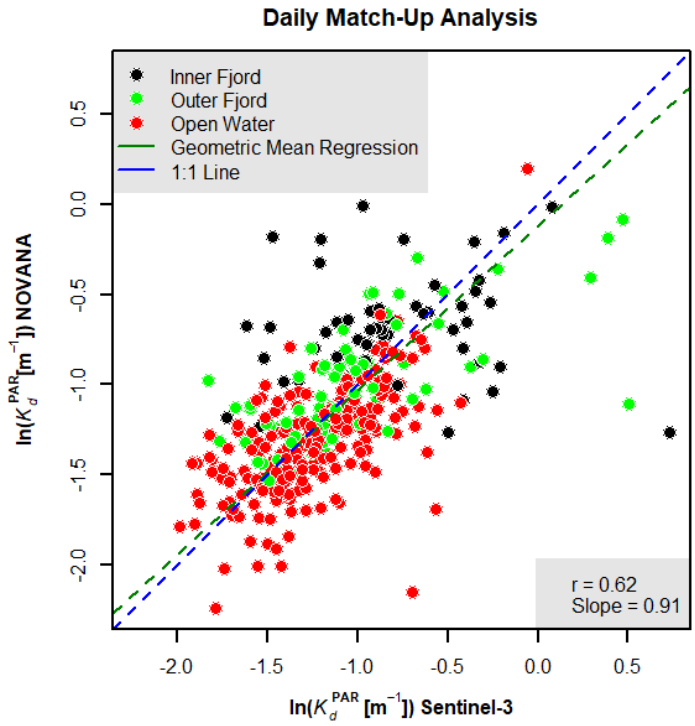
Denne tilgang gør brug af eksisterende viden og data fra danske farvande om 1) pigmentabsorption (Stæhr og Markager, 2004) og 2) CDOM absorption (Stedmon et al., 2000), såvel som litteraturbaserede reference spektre for detritus absorption og spredning af suspenderede partikler i vandsøjlen (Doerffer, 2010). Sammen med absorptions- og spredningsegenskaber af rent havvand (Hedley, 2019) og solvinklen, har vi været i stand til at omregne Sentinel-3 estimater fra 443 nm til spektrale (400-700 nm) IOPs og på basis af disse beregne lyssvækkelsen for hver bølgelængde (K_d^λ) ved hjælp af en eksisterende empirisk model (ligning 11 i Lee m.fl., 2005).

Efterfølgende har vi anvendt et referencespektrum fra studieområdet for det indkommende lys' fotonfluxdensitet og de enkelte bølgelængder, til at propagere lyset ned igennem en homogen modelvandsøjle (konstant K_d^λ) og beregne lyssvækkelsen i 1 m dybdeintervaller. Denne proces fortsættes indtil der enten opnås den lokale vanddybde, eller en fotonflux <1% af fotonfluxen over vandoverfladen. Ligesom for feltmålinger af PAR dybdeprofiler (Markager og Fossing, 2015) kan der så beregnes lineær regression på $-\ln(I_z/I_0)$ versus vanddybden z og regressionsfunktionens hældning svarer til et estimat for den overordnede K_d^{PAR} af den pågældende vandsøjle.

I løbet af analysefasen lykkedes det at gennemføre denne beregning for alle dagspræcise match-ups mellem NOVANA programmets *in situ* baserede data og S3 OLCI level-2 produkt-baserede IOP-estimater for alle tilgængelige data fra årene 2022-2023 fra marts-oktober. Data udenfor denne periode er ikke medtaget da satellitmålingerne kræver en tilstrækkelig solvinkel over horisonten. Desuden har vi heller ikke medtaget stationer med vanddybder <= 2 m da reflektionen herfra er domineret af bundforhold (f.eks. sand og vegetation) og ikke optiske komponenter i vandsøjlen.

3 Analysefasens hovedresultater

I alt fandt vi 335 match-ups fra 71 NOVANA stationer (ud fra i alt 112 stationer med godkendte lysprofilmålinger). Figur 3.1 viser alle disse match-ups som scatterplot og farvekodet ift. NOVANA stationens hydrologiske reference. Der var en signifikant ($p < 0.01$) korrelation ($r = 0.62$) mellem satellitbaserede og PAR profil-baserede estimater for $\ln(K_d^{PAR})$. Derudover viser 'geometric mean linear regression' en hældning på 0.91, som ligger meget tæt på den ideelle 1:1 linje. Samlet set kan vi konstatere, at metoden kan give valide estimater forK_d^{PAR} ud fra satellitbaserede data.

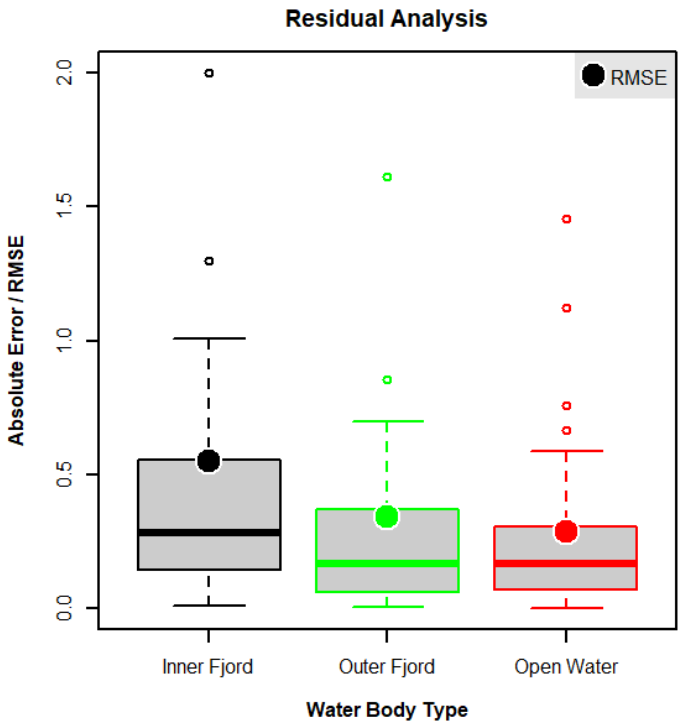


Figur 3.1. Match-up analyse mellem PAR-profil (y-akse, NOVANA) og satellitbaseret (x-akse, Sentinel-3) estimering af Kd-PAR i danske marine farvande for årene 2022-2023. I alt fandt vi 335 NOVANA baserede Kd-PAR estimater, som overlapper med estimater fra Sentinel-3 (samme dag og pixel på 500x500 m). Farvekoden indikerer hydrologisk reference af tilhørende NOVANA overvågningsstation. Linjerne repræsenterer 'geometric mean regression' mellem punkterne (mørkegrøn) og den ideelle 1:1 linje (blå). Korrelationskoefficienten er signifikant ($p = 0.01$) og ligger på $r = 0.62$. Regressionsfunktionens hældning ligger på 0.91, meget tæt på den ideelle værdi af 1.

Uoverensstemmelsen mellem de to metoder til K_d^{PAR} bestemmelse aftager langs gradienten fra indre fjorde og ud i det åbne hav (Figur 3.2).

Derudover opdagede vi en del udfordringer ift. satellitbaserede produkter om lyssvækkelse/undervandslys, der kræver en del videregående forsknings- og udviklingsarbejde for at være i stand til at levere optimale og operationelle satellitbaserede produkter for både undervandslys og klorofylkoncentration.

Figur 3.2. Residual analyse af match-up punkterne vist i Figur 2.1. Boxplots viser fordelingen af absolutte afvigelser mellem PAR-profil (NOVANA) og satellit-baseret (Sentinel-3) estimering af Kd-PAR i danske marine farvande for årene 2022-2023, opdelt i NOVANA stationernes hydrologiske reference. Store punkter viser tilsvarende værdier for 'root mean squared error'. Uoverensstemmelse mellem begge metoder aftager langs gradienten fra indre fjorde og ud i det åbne hav.



4 Anbefalinger for det videregående arbejde i IMM sporet 'Miljødata fra satellitter'

4.1 Optimering på satellitsiden

Kvalitetssikring af Sentinel-3 OLCI level-2 produktet kan laves på baggrund af såkaldte 'water quality and science flags' (wqsf). Disse wqsf er tilknyttet datasættet og muliggør at identificere pixels påvirket af forskellige potentielle fejlkilder (som f.eks. skydækning, sun glint, skum på vandoverfladen). Afhængig af hvilket produkt der skal analyseres kan forskellige wqsf kombinationer give mening, og den optimale kombination ifb. lyssvækkelse bør undersøges. Derudover, kunne der udvikles en multivariat maskeringalgoritme, der på baggrund af IOP-kombinationer detekterer sandsynligvis fejlbehæftede pixels igennem multivariat outlier kontrol.

Disse wqsf tilknyttet satellitproduktet baserer dog kun på en kombination af Sentinel-3 satellittens sensorsignaler. Analyse af andre fejlindikatorer, som f.eks. meteorologiske forhold (vind/bølger/strøm) bør undersøges ifb. outliers/afvigelser i datasættet. Der findes en del tilsvarende nærrealtidsprodukter på Copernicus platformen, der med fordel kunne bruges for at udvikle en optimeret maskeringsprocedure for marine optiske satellitprodukter.

På baggrund af valide satellitbaserede klorofyl og lyssvækkelsesestimater vil det endvidere være muligt at udvikle et yderligere satellitbaseret produkt om fytoplanktons primærproduktion.

4.2 Optimering på *in situ* overvågningssiden

Overvågningsprogrammet for undervandslys i NOVANA

De nuværende målinger af lyssvækkelse sker ved to sensorer for PAR som vender henholdsvis opad og nedad. De måles i forhold til en reference sensor på skibet der måler overfladeindstrålingen. Tidligere var der kun en undervandssensor. Samtidig er der kommet sensorer for FDOM og turbiditet. Samlet betyder det, at man kan anvende en spektral tilgang til at beregne Kd. Her kan man anvende viden om vandets egen spektrale lyssvækkelse, fordeling a klorofyl ned gennem vandsøjlen (Klorofylfluorescens sensor), data for fytoplanktonets spektrale absorption, data for FDOM og viden om den spektrale absorption i danske farvande samt data for turbiditet fra sondens sensor. Samlet kan disse data anvendes i samme type spektral lyssvækkelsesmodel som beskrevet i afsnit 2 for satellitmålinger. Målingerne kan valideres mod egentlige målinger af spektral lyssvækkelse, f.eks. ved at anvende et instrument af typen Satlantic eller ACs (Miljøstyrelsen råder over en ACs).

Samlet vil denne tilgang give mulighed for en væsentlig mere korrekt beskrivelse af lyssvækkelsen, både for de nuværende målinger og ved at genberegne gamle profiler for K_d^{PAR}. Desuden vil det styrke sammenhængen til de satellitbaserede estimater af K_d, og dermed forbedre deres validitet.

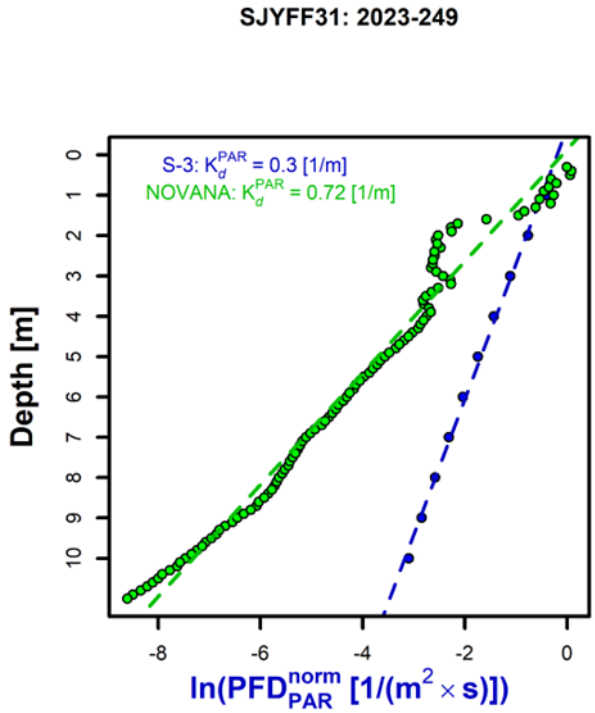
Miljøstyrelsen bør være opmærksom på, at de nuværende estimater af lyset ved bunden – som ligger til grund for tilstandsvurderinger i forhold til udbredelsen af den bentiske vegetation – er meget usikre, og kun giver et groft

estimat af den faktiske lysmængde, som er til rådighed for bundvoksende planter.

Udvalg og kvalitetssikring af PAR-lysprofiler til sammenstilling med satellitbaserede data

Satellitbaserede K_d estimater tager udgangspunkt i vandets overflade, hvor størstedelen af reflektansen stammer fra. Derudover ligger der 2 to antagelser til grunds for C2RCC algoritmen: Vandsøjlen er 1) homogen og 2) uendelig dybt. Dvs. at kun hvis disse forhold nogenlunde bliver overholdt, kan Sentinel-3 OLCI level-2 baserede data give fornuftige estimater for K_d^{PAR}. Til gengæld er *in situ* PAR målinger tæt på vandoverfladen behæftet stor usikkerhed (f.eks. pga. bølger og skibets bevægelse). Det fører til en del tilfælde, hvor lysvækkelsen med de to metoder bliver baseret på målinger fra helt forskellige dele af vandsøjlen. Derfor anbefales, at der udarbejdes en systematisk metode til specifikt udvalg af NOVANA baserede data til sammenligning med optiske satellitdata.

For nogle PAR-lysprofiler i vores analyse opdagede vi tilfælde, hvor kvalitetssikringen ikke er blevet udført i tilstrækkelig god kvalitet (f.eks. Figur 3.1). Brug af tilsvarende afledte K_d^{PAR} værdier til validering af et satellitbaseret produkt er meget problematisk og bør undgås i videst muligt omfang. Optimering af kvalitetssikringsproceduren anbefales.



Figur 3.1. PAR lysprofil fra NOVANA station SJYFF31 d. 06.09.2023 (grøn) i sammenstilling med den beregnede lysprofil baseret på Sentinel-3 målinger (blå). Der kan tydelig ses fejlbehæftede PAR målinger i dybdeintervallet fra 2-4 m, som skulle have været fjernet i kvalitetssikringsproceduren.

Understøttende feltarbejde og *in situ* data

Siden 2021 bliver der udført dybdeprofilmålinger med sonder udstyret med FDOM og turbiditetssensorer. Der mangler dog referencemålinger for at fortolke sensorernes signaler med hensyn til deres indflydelse på lyssvækkelsen. FDOM og turbiditetsmålinger bør kunne oversættes i koncentrationsværdier af f.eks. CDOM og suspenderet materiale, og referencemålinger for deres tilsvarende spektrale lyssvækkelse vil være nødvendige for at kunne beregne

en optimal spektral lyssvækkelsesmodel. Samme gælder pigmentabsorptionsmønstret, hvor mere repræsentativ viden om dens rumlige og tidslige variation i studieområdet, ville hjælpe til at optimere lyssvækkelsesmodellen.

Derudover er forholdet mellem scattering og backscattering pt. ukendt for danske farvande. Sammenhængen kunne estimeres fra repræsentative prøveanalyser.

4.3 Operationalisering af et samlet Sentinel-3 baseret produkt

Det tidligere udviklede satellitbaserede produkt om klorofyl i danske marine farvande kan med fordel kobles op på lyssvækkelsesproduktet. Begge datasæt kan processeres samtidig som del af en operationel algoritme. Som beskrevet ovenfor, kan det også være en fordel at bruge alle IOP-produkter sammen for at udvikle en multivariat maskeringsalgoritme for at kvalitetsoptimere output datasættene så vidt som muligt.

5 Referencer

Doerffer, R., 2010. OLCI Level 2: Algorithm Theoretical Basis Document—Ocean Colour Turbid Water. Document Ref: S3-L2-SD-03-C11-GKSS-ATBD. url: https://sentinel. esa. int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci

Holbach A., Upadhyay Stæhr S., Markager, S., 2023. Modelling underwater light attenuation from space – a spectral approach for case-2 marine waters. *Article draft in preparation, not peer-reviewed.*

Holbach A., Markager S., Closter R.M., Mariegaard J.S., Erichsen A.C., Kronborg M.-B., 2022. Operationalisering og modelassimilering af satellitbaserede klorofyldata. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 74 s. - Videnskabelig rapport nr. 508, url: http://dce2.au.dk/pub/SR508.pdf

Hedley J.D., 2019. HYDROLIGHT-ECOLIGHT version 6.0.

Lee Z.-P., Du K.-P., Arnone R., 2005. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. Journal of Geophysical Research, 110, C02016, doi: 10.1029/2004JC002275

Markager S., Fossing H., 2015. Lyssvækkelse. Teknisk anvisning M06 v.3. url: https://ecos.au.dk/fileadmin/ecos/Fagdatacentre/Marin/TA_M06_Lyssvaekkelse_ver3.pdf

Stedmon C.A., Markager S., Kaas H., 2000. Optical Properties and Signatures of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Danish Coastal Waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 51(2), 267-278, doi: 10.1006/ecss.2000.0645

Stæhr P.A., Markager, S., 2004. Parameterization of the chlorophyll a-specific in vivo light absorption coefficient covering estuarine, coastal and oceanic waters. International Journal of Remote Sensing, 25(22), 5117-5130, doi: 10.1080/01431160410001716932

Hansen J.W., Høgslund S. (red.), 2023. Marine områder 2021. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE—Nationalt Center for Miljø og Energi, 220 s. - Videnskabelig rapport fra DCE nr. 529, url: http://dce2.au.dk/pub/SR529.pdf

Timmermann K., Christensen J., Murray C., Markager S., 2015. Modeller for Danske Fjorde og Kystnære Havområder – del 3 Statistiske modeller og metoder til bestemmelse af indsatsbehov. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, url: https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2015/Dokumentation_statistiske_modeller_metoder_del3_28042015.pdf