



KLOROFYLINDIKATOR I VADEHAVET

Evaluering af 90. percentil som klorofylindikator i Vadehavet

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 369

2026



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

KLOROFYLINDIKATOR I VADEHAVET

Evaluering af 90. percentil som klorofylindikator i Vadehavet

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 369

2026

Jesper P.A. Christensen¹

Anders C. Erichsen²

Jacob Carstensen¹

Sophia E.B. Nielsen²

¹Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

²DHI



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 369
Kategori:	Rådgivningsrapport
Titel:	Klorofylindikator i Vadehavet
Undertitel:	Evaluering af 90. percentil som klorofylindikator i Vadehavet
Forfatter(e):	Jesper P.A. Christensen ¹ , Anders C. Erichsen ² , Jacob Carstensen ¹ , Sophia E.B. Nielsen ²
Institution(er):	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience ¹ & DHI ²
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	https://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Januar 2026
Redaktion afsluttet:	26. januar 2026
Faglig kommentering:	Stiig Markager
Kvalitetssikring, DCE:	Anja Skjoldborg Hansen
Ekstern kommentering:	Kommentarerne findes her:
Finansiel støtte:	Jysk Landboforening og Spiras
Bedes citeret:	Christensen, J.P.A., Erichsen, A.C., Carstensen, J., Nielsen, S.E.B. 2026. Klorofylindikator i Vadehavet. Evaluering af 90. percentil som klorofylindikator i Vadehavet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 23 s. - Teknisk rapport nr. 369
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten vurderer metoder til at bedømme den økologiske tilstand i Vadehavet ud fra klorofyllkoncentrationer, som indikerer algeopblomstring og næringsstofpåvirkning. Den nuværende indikator, 90. percentilen, kan være følsom over for enkelte høje målinger og dermed give usikre resultater ved begrænset datagrundlag. Analysen sammenligner P90 med gennemsnitlig sommer-klorofyl, som anvendes i andre danske kystområder. Resultaterne viser, at gennemsnittet er mere stabilt og mindre påvirket af ekstreme værdier, hvilket også understøttes af OSPAR's vurderinger for Nordsøen. Begge indikatorer korrelerer med kvælstoftilførsel, hvilket bekræfter deres relevans. Statistiske og modelbaserede beregninger af referenceværdier viser, at gennemsnittet giver en mere ensartet vurdering og en balanceret fordeling af reduktionsbehovet. Rapporten anbefaler at supplere eller erstatte P90 med gennemsnittet og beregne P90 mere robust. Dette vil styrke miljøvurderinger og sikre sammenlignelig regulering på tværs af danske kystområder samt harmonisere med international praksis. Indledende analyser indikerer, at det samlede reduktionsbehov ikke ændres markant, men fordeles mere jævnt mellem vandområderne.
Emneord:	Vadehavet, Økologisk tilstand, Klorofylindikator, 90.percentil, Sommergennemsnit Miljømål, Vandrammedirektiv, Indikatorer
Foto forside:	© Contains Copernicus Sentinel-2 data
ISBN:	978-87-7648-024-0
ISSN (elektronisk):	2244-999X
Sideantal:	23

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	7
1 Indledning	8
2 Estimat af referenceværdi	11
2.1 Metamodel	11
2.2 Mekanistisk model	12
2.3 Sammenligning af reference med meta-model og mekanistisk modellering	13
3 Vurdering af 90. percentil som indikator	14
3.1 Analyse af 90. percentilens følsomhed for enkeltmålinger	14
3.2 Analyse af 90. percentil som mål for god økologisk tilstand	16
4 Beregning næringsstofindsatser baseret på samme tilgang som i resten af DK (dvs. sommer-middel af klorofyl)	19
5 Anbefaling	21
6 Referencer	22

Forord

Denne rapport er bestilt og finansieret af Jysk Landboforening (Sagro) og Spiras. Selve bestillingen er diskuteret og beskrevet i mellem DHI, AU og Sagro, mens arbejdet har været styret og udført af DHI og AU. Ligeledes har valg af metoder, behandling af data, beskrivelse og præsentation af resultater udelukkende været DHIs og AUs beslutning og ansvar. De to leverancer som DHI, AU og Sagro er blevet enige om er:

1. Analyse af 90%-percentilen som mål for god økologisk tilstand (GØT) – samt følsomhed for enkeltmålinger
2. Gennemregning af mål og indsatser baseret på samme tilgang som i resten af DK

AU har primært haft ansvar for kapitel 1 (med input, resultater og figurer fra DHI), afsnit 2.1, 2.3 samt kapitel 3. De øvrige afsnit og kapitler har primært været DHIs ansvar. Anbefalingerne (kapitel 5) er diskuteret og skrevet i fællesskab.

Sagro og Spiras har haft mulighed for at kommentere rapporten inden offentliggørelse. Kommentarerne findes via link på databladet.

Sammenfatning

Denne rapport undersøger, hvordan man bedst vurderer den økologiske tilstand i Vadehavet ved hjælp af klorofylmålinger. Klorofylkoncentrationer kan bruges som mål for algeopblomstring og hjælpe til at forstå påvirkning fra næringsstoffer.

I dag bruger man den såkaldte 90. percentil (P90) som indikator (mål for tilstand). Det betyder, at man ser på en af de højeste målinger i datasættet. Problemet er, at P90 kan blive påvirket af enkelte meget høje værdier, især hvis der er få målinger og prøvetagningen nogle gange rammer forårsopblomstringen. Det kan give usikre resultater.

Rapporten sammenligner P90 med gennemsnittet af sommerens klorofylmålinger, som bruges i andre danske kystområder. Resultaterne viser, at gennemsnittet er mere stabilt og mindre følsomt over for ekstreme værdier. Det samme har internationale undersøgelser (i OSPAR-samarbejdet) vist for Nordsøen.

For at fastsætte miljømål skal man beregne referenceværdier for klorofyl. Det er her testet med to forskellige metoder. Her viser det sig, at den gennemsnitsbaseret indikator sandsynligvis giver en mere ensartet vurdering af tilstanden i Vadehavet, og derfor også en mere jævn fordeling af reduktionsbehovet, mellem vandområderne.

Anbefaling

Rapporten anbefaler, at man enten supplerer eller erstatter P90 med gennemsnittet og hvis man fastholder P90, så beregner den på en mere robust måde. Det vil gøre miljøvurderinger mere sikre og sammenlignelige på tværs af danske kystområder – og bringe Danmark på linje med international praksis. Hvis myndighederne fastholder brugen af P90 beregnet på den mest simple og mere usikre måde, så er det vores vurdering at den nuværende praksis med at bruge målinger fra en seksårs periode er den bedste metode.

De første analyser viser, at det samlede behov for at reducere næringsstoffer i Vadehavet ikke ændrer sig meget, hvis man bruger gennemsnittet. Men reduktionskravet formentligt bliver fordelt lidt mere jævnt mellem de fire vandområder.

Summary

This report examines how to best assess the ecological status of the Wadden Sea using chlorophyll measurements. Chlorophyll concentrations can serve as an indicator of algal blooms and help understand nutrient impacts.

Currently, the so-called 90th percentile (P90) is used as an indicator (a measure of status). This means looking at one of the highest values in the dataset. The problem is that P90 can be influenced by a few very high measurements, especially when the dataset is small. This can lead to uncertain results.

The report compares P90 with the average summer chlorophyll concentration, which is used in other Danish coastal areas. The results show that the average is more stable and less sensitive to extreme values. International studies (within the OSPAR cooperation) have shown the same for the North Sea.

To set environmental targets, reference values for chlorophyll must be calculated. Two different methods were tested here. The findings show that the average-based indicator provides a more consistent assessment of the Wadden Sea's status and therefore a more balanced distribution of reduction requirements among the water bodies.

Recommendation

The report recommends either supplementing or replacing P90 with the average or calculating P90 in a more robust way. This will make environmental assessments more reliable and comparable across Danish coastal areas—and align Denmark with international practice. If authorities maintain the use of P90 calculated in the simplest way, we consider the current practice of using measurements from a 6-year period to be the best approach.

Initial analyses indicate that the overall need to reduce nutrient inputs in the Wadden Sea will not change significantly if the average is used. However, the reduction requirement will likely be distributed slightly more evenly among the four water bodies.

1 Indledning

Klorofyl-a koncentrationen er en central indikator for eutrofiering i kystnære økosystemer og anvendes bredt i vurderingen af økologisk tilstand i henhold til EU's Vandrammedirektiv (VRD). I de danske farvande anvendes i dag to indikatorer for det biologiske kvalitetselement fytoplankton: Aritmetiske gennemsnitskoncentration fra maj til september (Chl5-9), som er interkalibreret med Sverige og Tyskland i den baltiske interkalibreringsgruppe (Baltic Sea GIG) (Carstensen 2016), og 90. percentilen (P90) fra marts til september af klorofylkoncentrationen, som er interkalibreret med Tyskland og Storbritannien i den nordøst atlantiske interkalibreringsgruppe (NEA GIG).

Denne rapport evaluerer 90. percentilens anvendelighed som indikator for økologisk tilstand i danske kystvande, da tidligere rapporter (Carstensen et al. 2008) har vist at usikkerheden omkring 90. percentilen er væsentlig større end for gennemsnitskoncentrationer, især ved små stikprøvestørrelse. Det undersøges også om Chl5-9 kan erstatte eller supplere P90 i den danske del af Vadehavet i NEA GIG områderne.

I arbejdet med indikatorer for økologisk tilstand, er det centralt at forstå, hvordan forskellige statistiske mål reagerer på variation i data, og hvordan dette påvirker indikatorernes følsomhed og anvendelighed. I Carstensen et al. (2008) blev der gennemført en omfattende analyse af præcisionen af to centrale indikatorer for fytoplanktonbiomasse: sommermiddel (Chl 5-9) og 90. percentilen af klorofyl a-koncentrationer. Analysen viste, at 90. percentilen generelt er forbundet med væsentligt større usikkerhed end middelværdien – både ved små og store stikprøvestørrelser. Dette skyldes, at percentiler i høj grad påvirkes af ekstreme værdier i datamaterialets høje ende, f.eks. hvis datasættet indeholder data fra forårsopblomstringer, hvilket især er problematisk i eutrofe områder med stor år-til-år variation i fytoplankton-opblomstringer, og hvor timingen af forårsblomsten kan få forholdsmæssig stor betydning.

For at undersøge følsomheden nærmere blev der lavet simuleringer med både normal- og lognormalfordelte data samt bootstrap-analyser baseret på danske overvågningsdata. Bootstrap er en ikke-parametrisk metode til at vurdere usikkerhed ved gentagne gange at udtage tilfældige stikprøver fra datasættet med tilbagelægning. Denne proces gentages typisk mange gange, f.eks. 1000 iterationer. Resultaterne viste, at usikkerheden udtrykt som "standard error" for 90. percentilen kan være 3-5 gange højere end for middelværdien, hvilket har direkte betydning for indikatorens anvendelighed i tilstandsklassificering under VRD. På den baggrund anbefalede Carstensen et al. (2008), at 90. percentilen ikke anvendes som primær indikator for fytoplanktonbiomasse, medmindre det kan dokumenteres, at den har en stærkere kobling til næringsstofbelastning end middelværdien – hvilket ikke var tilfældet i de analyserede datasæt.

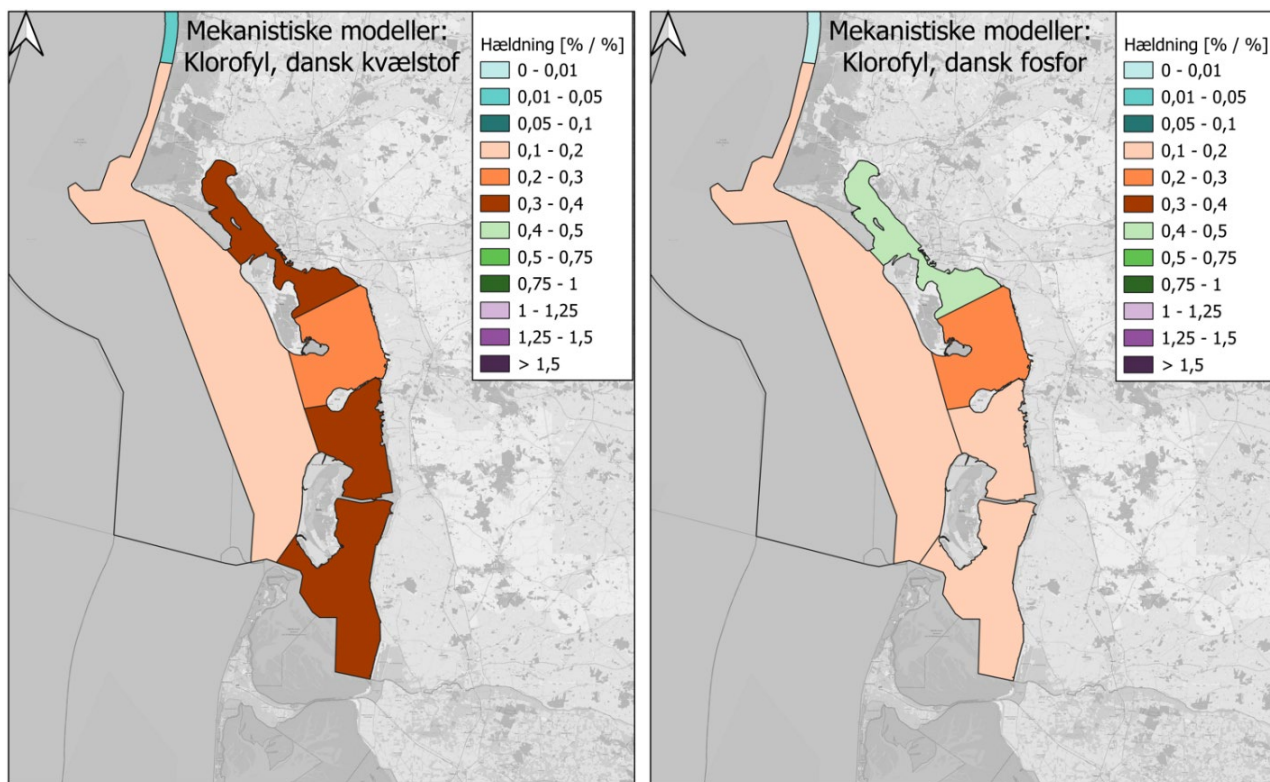
Denne konklusion understøttes af resultaterne i Carstensen et al. (2007), som præsenterede en anden metode til at måle algeopblomstringer. I deres tilgang blev en opblomstring defineret som en observation, der ligger markant uden for den forventede sæsonvariation. Den forventede variation blev beregnet for hver station ved hjælp af en normalfordelingsmodel, der inkluderede en sæsonkomponent. Denne tilgang tillod en mere robust og kontekstafhængig identifikation af opblomstringer og gjorde det muligt at skelne mellem

opblomstringsfrekvens og -intensitet. Det blev vist, at opblomstringsfrekvensen havde en signifikant sammenhæng med total kvælstofkoncentration (TN) i vandområdet, mens intensiteten i højere grad var afhængig af lokale forhold som f.eks. forekomst af lagdeling og iltsvind.

Samlet set peger disse resultater på, at indikatorers følsomhed og præcision ikke alene afhænger af den valgte statistiske parameter, men også af den underliggende fordeling af data og de økologiske mekanismer, der driver variationen. Det er derfor afgørende, at indikatorvalg og klassifikationsgrænser baseres på en grundig analyse af datagrundlaget og dets statistiske egenskaber, herunder fordeling, variansstruktur og ekstreme værdiers indflydelse.

Ifølge artiklen "Application of Ecological Indicators" (Niemi & McDonald 2004) fremhæves flere centrale egenskaber, som gør en økologisk indikator effektiv og anvendelig. Blandt andet at en indikator skal være baseret på målbare karakteristika af økosystemets struktur og funktion, reagere tydeligt på antropogene (menneskeskabte) stressfaktorer og have kendt præcision, nøjagtighed og variabilitet. Derfor er et centralt element i vurderingen af økologisk tilstand i kystvande at der er en kobling mellem næringsstofbelastning og fytoplanktonbiomasse, ofte repræsenteret ved klorofyl-a koncentrationer. I Carstensen et al. (2008) blev denne relation kvantificeret gennem en række sted-specifikke statistiske modeller (regressioner). Resultaterne viste at den log-transformerede form af data gav en god lineær sammenhæng. Den sted-specifikke variation imellem modellerne afspejlede forskelle i retentionstid, tilførsel af terrestrisk kvælstof og intern recirkulation, herunder sedimentflux (intern belastning) og iltsvind (redoxforhold).

I modeludviklingen bag vandområdeplanerne 2021-2027 (VOP3) blev der udviklet to typer af modeller; statistiske modeller, hvor klorofyl-a målinger blev korreleret til en række parametre som salinitet, vind, temperaturer og ikke mindst næringsstofftilførsler fra land til det aktuelle vandområde, og mekanistiske modeller, som beskriver de mekanistiske sammenhænge (biogeokemiske processer) mellem f.eks. næringsstofftilførsler og klorofyl-a koncentrationer (se figur 1.1). Observationer fra de respektive vandområder indgår ikke direkte i de mekanistiske modeller, men udgør centrale datasæt i kalibrering/validering af modellerne.



Figur 1.1. Dosis-respons (hældning i % ændring i klorofyl-a koncentration per % ændring i tilførsel af henholdsvis TN og TP) sammenhæng mellem tilførsel af kvælstof fra danske landbaserede kilder (venstre kort) eller fosfor (højre kort) og klorofylkoncentrationen ifølge reduktionsscenarier gennemført i DHIs mekanistiske biogeokemiske model.

Baseret på resultater i tidligere studier samt resultater fra modelleringen, som indgår i VOP3 rådgivningen forventes det at en klorofyl-a indikator baseret på gennemsnit er en anvendelig og mere robust (mindre usikker) indikator for fytoplankton end P90 også i Vesterhavet.

2 Estimat af referenceværdi

2.1 Metamodel

Metodebeskrivelse: Modellering af referenceværdier for klorofyl-a

Denne metode har til formål at estimere referenceværdier for sommer klorofyl-a i danske kystvande ud fra statistisk modellering baseret på hydromorfologiske fysiske meta-data. Modellen er udviklet som led i arbejdet med at fastlægge type-specifikke referenceforhold i henhold til Vandrammedirektivet.

Modellen anvender to modelresultater af klorofyl-a referenceværdier for størstedelen af de danske kystvandområder. Resultaterne af de to modeller bliver efterfølgende kombineret ved hjælp af en række fysiske og hydromorfologiske karakteristika for danske kystvande.

De fysiske og hydromorfologiske er

- Ferskvandstilførsel (m^3/s)
- Gennemsnitlig vanddybde (m)
- Sedimenttype (ler, mudder, sand)
- Vandudveksling og salinitet

Modelstruktur

Modellen er en kombineret metamodel, hvor klorofyl-a referenceværdien (responsvariabel) modelleres som funktion af typologiske forklaringsvariable, hvor ferskvandstilførsel (log-transformeret), gennemsnitlig dybde (log-transformeret) og sedimenttype indgår som faste effekter (forklarende faktorer) mens modeltype (mekanistisk vs. statistisk) indgår som tilfældig effekt. Modellen estimeres i R med pakken lme4, og forskellige modelvarianter sammenlignes ved hjælp af kriterium (Akaike's Information Criterion = AIC) for at identificere den bedst passende model.

Modelvalidering og usikkerhed

Metamodelens prædiktioner sammenlignes med de individuelt modellerede referenceværdier og R^2 beregnes for at vurdere modellens forklaringskraft.

Anvendelse

Den endelige model anvendes til at beregne meta-referenceværdier for klorofyl-a for alle vandområder i de indre danske farvande (undtaget Vestkysten og Vadehavet) i typologidasættet. Disse værdier gemmes og anvendes som input til videre analyser og vurderinger af økologisk tilstand.

Til denne opgave har vi ligeledes anvendt metamodelen i Vadehavet for at komme med et realistisk bud på, hvad referencekoncentrationen for klorofyl i Vadehavet kunne være (tabel 2.1). Resultaterne skal dog tages med forbehold, da vandområderne i Vadehavet ikke indgår i den oprindelige kalibrering af modellen og sandsynligvis er påvirket af tidevand og afstrømning fra f.eks. Elben, hvilket adskiller dem markant fra de øvrige områder, som indgår i modellen.

Tabel 2.1. Referencekoncentrationen for gennemsnitligt sommerklorofyl for de fire vandområder i Vadehavet, estimeret med en meta-model, der kombinerer referencescenarier fra de to typer af modeller, som er anvendt til VOPIII i en metamodel med typologivariable som forklaringsvariable.

Vandområde ID	Vandområdenavn	Meta klorofyl a indikator reference
107	Juvre Dyb	2.1
111	Lister Dyb	1.6
120	Knudedyb	1.8
121	Grådyb	2.5

2.2 Mekanistisk model

Metodebeskrivelse: Modellering af referenceværdier for klorofyl-a

Denne metode har til formål at estimere referenceværdier for sommer klorofyl-a i danske kystvande ved hjælp af de mekanistiske modelresultater, som ligger til grund for VOP3.

Som en del af modeludviklingen bag VOP3 indgik estimering af referenceværdier som et helt centralt element i fastlæggelse af miljømål, og dertilhørende reduktionskrav for kvælstof og fosfor. De data og den metode, der indgår i modeludviklingen, er beskrevet i detaljer i Erichsen & Timmermann (2022) og Timmermann et al. (2021), mens metoden kort opsummeres her:

- De mekanistiske modeller er forceret med den samme meteorologi som selve modelkalibreringen, dvs. data fra 2002-2016
- Sedimentpuljer og initialværdier er reduceret i henhold til estimerede sedimentreduktioner beregnet med den model, som er udviklet under Baltic Nest Institute (Gustafsson et al. 2012, 2017)
- Tilførsler til Nordsøen fra nabolande er reduceret i henhold til estimater fra Gadegast & Venohr (2015) svarende til reduktioner på 60% for TN og 71% for TP
- Danske næringsstofftilførsler er reduceret i henhold til data indsamlet i år med lille antropogen påvirkning (10% landbrug for TN og <20% landbrug for TP) og varierer over landet (se Erichsen & Timmermann (2022) for detaljer)
- Atmosfæriske depositioner er estimeret på baggrund af historiske emissioner (Geels et al. (2012) og Ellermann et al. (2013))

Baseret på ovenstående opsummerende liste af ændringer i data mellem statusmodelleringen og reference-scenariet, er de mekanistiske modeller afviklet for perioden 2002-2016, og relative ændringer i sommer klorofyl-a koncentrationer estimeret og benyttet sammen med målte sommer klorofyl-a status koncentrationer til estimering af tilhørende reference koncentrationer (Tabel 2.2).

Tabel 2.2. Beregnede sommer-klorofyl-a indikator referenceværdier baseret på mekanistisk modellering.

Vandområde ID	Vandområdenavn	Mekanistisk klorofyl a indikator reference
107	Juvre Dyb	2.2
111	Lister Dyb	1.2
120	Knudedyb	1.5
121	Grådyb	1.3

2.3 Sammenligning af reference med meta-model og mekanistisk modellering

Som det fremgår af tabel 2.1 og tabel 2.2 er der ikke voldsom stor forskel på referenceværdierne baseret på henholdsvis meta-modellen og den mekanistiske modellering. Overordnet set har den mekanistiske model en tendens til at estimere lidt lavere værdier, sammenlignet med meta-modellen, og det er i overensstemmelse med tidligere estimater af referenceværdier for hele Danmark.

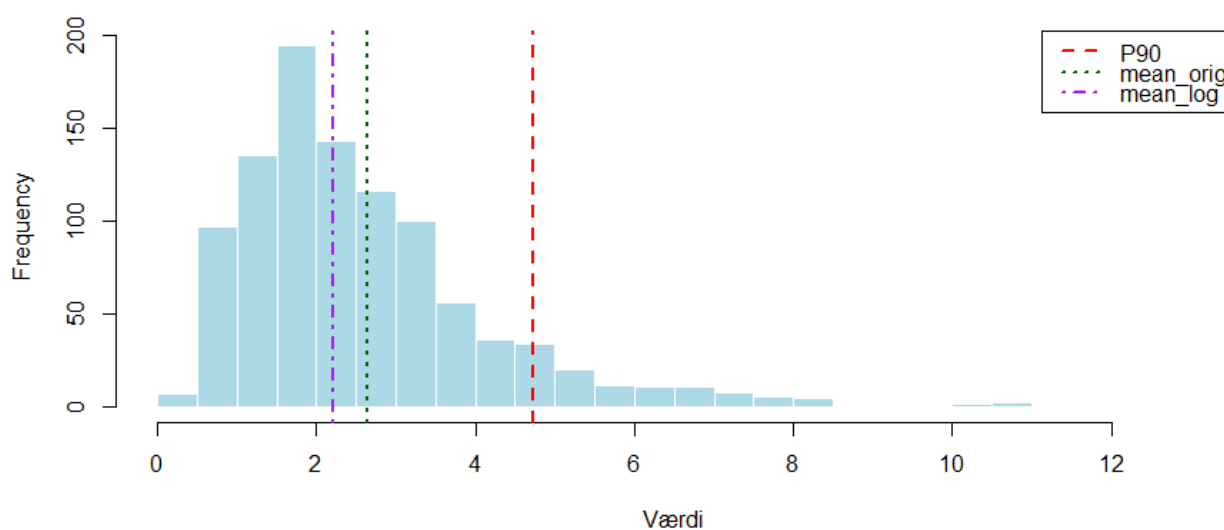
For Grådyb er forskellen noget større, og her er den direkte påvirkning fra de danske næringsstofkilder ligeledes større (udvekslingen med Nordsøen er større for de tre andre dyb). I den resterende del af Danmark ses tilsvarende tendenser med relativt høje klorofyl referenceværdier tæt på kilderne ved brug af meta-modellen, men i resten af landet indgår også lys i beregningerne af næringsstofreduktioner, hvilket ikke er tilfældet i Nordsøen, og dermed bliver usikkerheden på reduktionsbehov større for eksempelvis Vadehavet.

3 Vurdering af 90. percentil som indikator

Som beskrevet i indledningen må der forventes en del større usikkerhed på indikatorer, som er baseret på fraktiler i det yderste (halerne) af en sandsynlighedsfordeling (f.eks. P90) end de indikatorer, som er baseret på centrale tendenser (f.eks. median og gennemsnit). Anvendelsen af P90 kan dog i nogen grad retfærdiggøres, hvis det kan eftervises, at den er mere anvendelig som mål for den økologiske tilstand. I dette kapitel sammenlignes usikkerheden af P90 med usikkerheden på geometrisk og aritmetisk middelværdi, samt parametrisk bestemt P90. Derefter undersøges det om der er forskel i sammenhængen mellem presfaktor og de fire forskelligt beregnede indikatorer, som er et af kriterierne for, at en indikator er anvendelig som mål for den økologiske tilstand.

3.1 Analyse af 90. percentilens følsomhed for enkeltmålinger

For at illustrere hvor følsomme de enkelte indikatorer er overfor antallet af observationer, har vi simuleret et datasæt med en log-normal fordeling, som man ofte anvender for klorofylkoncentrationer (se figur 3.1).



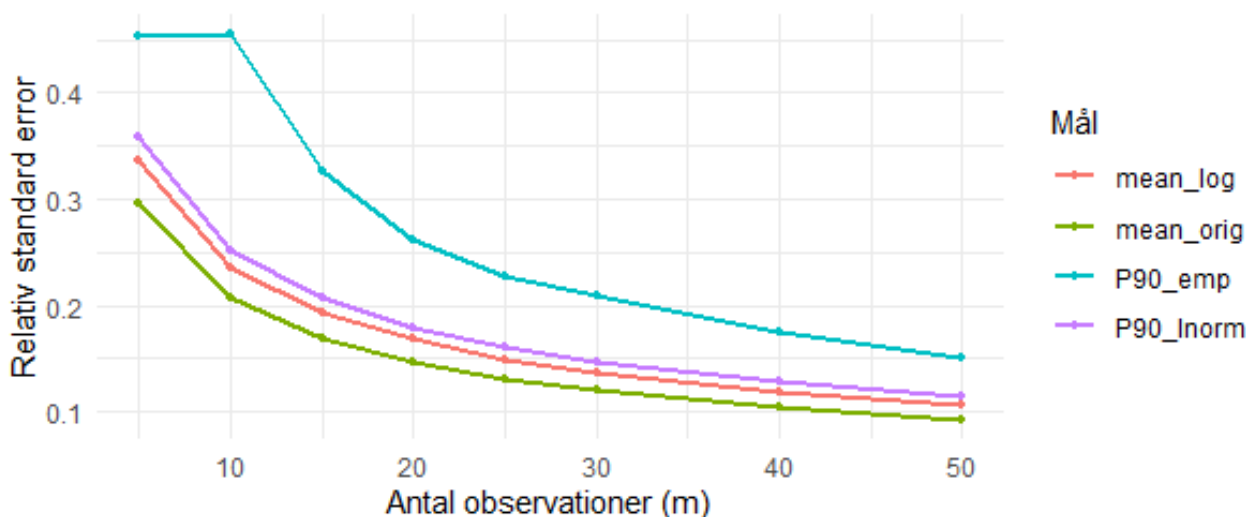
Figur 3.1. Simuleret datasæt af log-normal fordeling. Den røde linje markerer 90. percentilen, den grønne linje markerer gennemsnittet baseret på de ikke-transformerede værdier (aritmetisk middelværdi) og den lilla linje markerer, hvor gennemsnittet af log-transformerede værdier ligger (geometrisk middelværdi).

Det simulerede datasæt har den fordel, at vi kender den ægte bagvedliggende middelværdi og 90%percentil, og vi derfor kan kvantificere, hvor gode de forskellige mål (eller indikatorer) er til at ramme den "ægte" værdi som funktion af et varierende antal observationer (figur 3.2). De fire værdier, som vi tester, er:

1. Empirisk 90-percentil (P90_emp), som beregnes på sammenlignelig måde, som de danske myndigheder beregner indikatorværdien for klorofyl i vandområderne langs Vestkysten. Den beregnes ved at rangere de målte koncentrationer fra lavest til højest og derefter inddele datasættet i de 90 % laveste og 10 % højeste værdier. Den værdi,

som adskiller de laveste fra den højeste del af datasættet er 90. percentilen (den røde streg i figur 3.1). Hvis datasættet indeholder 10 eller færre observationer, er det i praksis en vægtet interpolering mellem højeste og næsthøjeste værdi, hvor vægtningen afhænger hvilke percentiler de to observationer repræsenterer. Fordelen ved metoden er, at den er non-parametrisk, dvs. at den ikke forudsætter, at man kender den underliggende fordeling af datasættet. Ulempen er, at den er meget følsom overfor enkelte høje målinger, især ved et lille antal observationer.

2. Derfor tester vi også en parametrisk bestemt P90, som forudsætter, at observationerne kan beskrives ved en parametrisk fordeling. Her tilpasses en log-normal fordeling til observationerne og 90. percentilen bestemmes ud fra denne fordeling (P90_Inorm). Den parametriske P90 har den fordel, at den anvender information fra alle observationer i datasættet og dermed er mindre følsom overfor enkelte ekstreme observationer. Ulempen er, at man ikke altid kender den underliggende fordeling – dog er det vist adskillige gange, at klorofyl-data ofte kan beskrives ganske godt med en lognormal fordeling (Feng et al 2015).
3. Den næste værdi vi tester er et aritmetisk gennemsnit af log-transformerede observationer (mean_log). Fordelen er, at metoden anvender alle observationer og er nem at beregne. Ulempen er, at metoden kan tillægge lave koncentrationer for stor vægt, hvis antagelsen om log-normalfordeling af klorofyl-a koncentrationen ikke holder.
4. Den sidste værdi vi tester er et gennemsnit på ikke-transformerede data, svarende til beregning af indikatoren for sommer klorofyl-a koncentration, der anvendes til tilstandsvurdering i de øvrige danske vandområder. Fordelen ved denne indikator er ligeledes, at den anvender hele datasættet (i sommerhalvåret), og at den er nem at beregne. Ulempen er, at den forudsætter, at data er normalfordelt og derfor ikke velegnet til at bestemme percentiler i højreskæve fordelinger. De øvrige egenskaber som beregning af usikkerhed omkring gennemsnittet er heller ikke retvisende, når antagelsen om fordelingen ikke følger virkeligheden (f.eks. kan usikkerhedsmålene antage negative værdier, hvilket bliver forhindret ved antagelse om log-normal fordeling).



Figur 3.2. viser relativ standard error (RSE) for forskellige aggregeringsværdier som funktion af stikprøvestørrelsen (m), når data kommer fra en log-normal fordeling. RSE er baseret på en simulering, hvor det trækkes tilfældige stikprøver 10.000 gange fra en log-normal fordelt population med et gennemsnit på 0.8 og en sigmaværdi (udtryk for hvor skæv fordelingen er) på 0.6. De viste mål er: *P90_emp*: empirisk 90-percentil; *P90_Inorm*: 90-percentil baseret på log-normal fit; *mean_orig*: aritmetisk middel på original skala; *mean_log*: aritmetisk middel af log-transformerede data

Grundet den store usikkerhed på den empirisk bestemte 90-percentil anvendes den ikke på enkelt år i den nuværende danske tilstandsvurdering. Her puljes data for hvert enkelt vandområde for en statusperiode på seks år. Dette gør estimatet mere sikkert, men har den ulempe, at man ikke kan følge variationen og udviklingen fra år til år.

3.2 Analyse af 90. percentil som mål for god økologisk tilstand

Forudsætningen for om en indikator er egnet som mål for økologisk tilstand er, som tidligere skrevet, at den reagerer på presfaktorer, at den er målbar, og at den er central for økosystemets funktion.

Der er en hel del studier, som viser at klorofylkoncentrationen i mange tilfælde er en god indikator for næringsstofpåvirkning. Både koncentrationen, samt frekvensen og størrelse af algeopblomstringer øges ved tilførsel af flere næringsstoffer (primært kvælstof og fosfor) (Vollenweider 1992, Doering et al. 2018, Wurtsbaugh et al. 2019).

Overvågningsdata fra det danske overvågningsprogram (NOVANA), viser også generel god sammenhæng mellem klorofyl og næringsstofpåvirkning, både i tid og rum, der er dog i de seneste årtier sket en forskydning i forhold til den tidlige sammenhæng, som kan skyldes øget betydning af interne næringsstofpuljer eller ændret klima (Hansen et al 2024). I forbindelse med VOP3 er det blevet vist, at der generelt er empirisk sammenhæng mellem observerede gennemsnitlig sommer klorofylkoncentration og næringsstofftilførsel fra lokale landbaserede kilder i de fleste danske vandområder (Shetty et al 2021). I Vadehavet er det dog ikke lykkedes at vise en simpel sammenhæng mellem de lokale landbaserede kilder og koncentrationen af klorofyl i alle fire vandområder. Der er kun fundet en signifikant sammenhæng mellem næringsstofftilførsel og klorofyl i Knudedyb, som også er det bassin med det største opland. Det er forventeligt, at den direkte sammenhæng mellem lokal næringsstofftilførsel og klorofylkoncentration er usikker i et område som Vadehavet, hvor hydrodynamikken spiller en stor rolle for områdets økologi. Det kræver en eller anden form

for hydrodynamisk model for, at man kan kompensere for udvekslingens betydning for klorofylkoncentrationen, hvis man skal have en retvisende sammenhæng mellem tilførsel og koncentration. Det kan f.eks. gøres med mekanistiske modeller som dem, der er anvendt under VOP3, som også viser en klar sammenhæng mellem tilførsler og klorofyl-a koncentrationer.

I forbindelse med denne rapport er sammenhængen mellem næringsstofftilførsel og klorofylkoncentration, i perioden 1990-2024, blevet undersøgt for Knudedyb med det formål at estimere usikkerheden på korrelationskoefficienter mellem fire forskellige indikatorer og kvælstoftilførslen i det agro-hydrauliske år (oktober til september). Det er ikke blevet testet om der er særlige perioder eller om det særligt er kvælstof eller fosfor der er af størst betydning for de fire indikatorer. Da variation i næringsstofftilførsel primært er drevet af ferskvandsafstrømningen, kan det også være usikkert at skille effekten af kvælstof og fosfor. Typisk for de kystnære vandområder er det dog fosfortilgængeligheden der betyder mest om foråret og kvælstoftilgængeligheden der betyder mest sommer og sensommer. Derfor kan man godt forvente at P90 mange steder er lidt mere fosforfølsom end sommer-klorofyl-gennemsnittet da P90 i højere grad er påvirket af forårsopblomstringen, men det er ikke testet. Til sidst blev det blevet testet, om korrelationerne mellem N-tilførsel og indikator er statistisk forskellige fra hinanden.

Til dette formål anvendes en *delete-d jackknife resampling-metode*, hvor der i modsætning til den klassiske *jackknife*, som fjerner én observation ad gangen, fjernes fem observationer per iteration (svarende til ca. 14 % af datasættet). Denne tilgang reducerer bias og giver et mere realistisk estimat af variabiliteten, især i tidsserier med afhængighed mellem observationer. Resampling gentages 500 gange for at opnå en stabil fordeling af korrelationsestimater.

Efter beregning af korrelationsfordelingerne for hver indikator testes forskelle mellem indikatorerne ved hjælp af en ensidet-ANOVA, efterfulgt af Tukey's HSD post-hoc test for parvise sammenligninger. Resultaterne er vist i figur 3.2, hvor bogstavgrupper angiver statistisk signifikante forskelle.

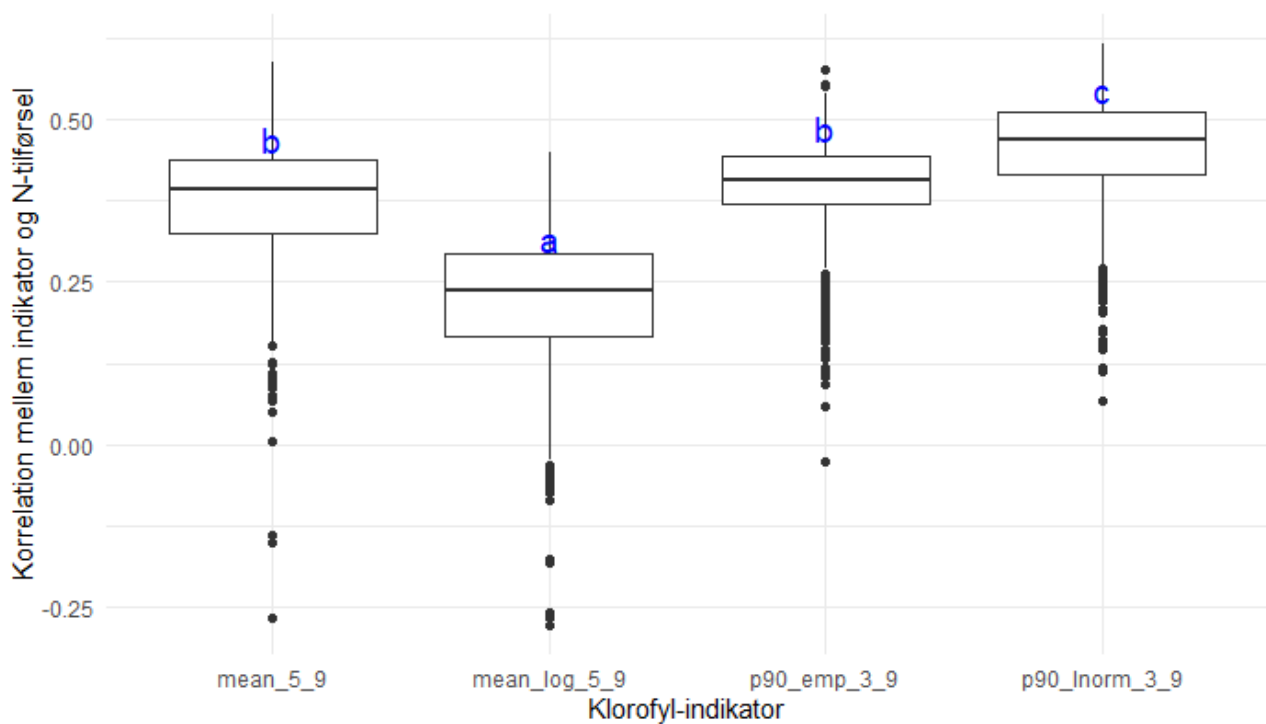


Figure 3.2. Boksplot af korrelationskoefficienten for sammenhængen mellem årlig kvælstoftilførsel til Knudedyb og potentielle klorofylindikatorer i perioden 1990-2024. De testede indikatorer er gennemsnitlig sommerkoncentration (mean_5-9), geometrisk gennemsnit af sommerkoncentration (mean_log_5_9), empirisk bestemt 90-percentil (p90_emp_3_9) og parametriske bestemt 90-percentil (p90_Inorm_3_9). Korrelationskoefficienten er bestemt som Pearsons korrelationskoefficienten og usikkerheden er estimeret ved af sub-sample i datasættet, hvor fem observationer er blevet udelukket i forskellige kombinationer (Jack-knifing). En ANOVA-test indikerede, at der var signifikant forskel på korrelationskoefficienterne resultaterne af en post-hoc test (Tukey's HSD) er vist med bogstaverne a, b og c.

Resultatet af korrelationsanalysen viste en signifikant forskel mellem korrelationskoefficienterne og en posthoc test afslørede, at geometrisk gennemsnit og parametriske P90 adskilte sig fra aritmetisk gennemsnit og empirisk P90, som ikke var signifikant forskellige. Resultatet indikerer, at der ikke er den store forskel imellem en gennemsnitsbaserede indikator (aritmetisk) og en percentilbaserede indikator, når man ser på sammenhængen til presfaktoren. Mest bemærkelsesværdige resultat er, at en indikator beregnet med geometrisk gennemsnit har markant lavere sammenhæng med lokale tilførsler end de øvrige indikatorer. Dette kan skyldes, at en 90-percentil i større udstrækning beskriver en forårsopblomstring og dermed er stærkere koblet til tilførslerne, som er størst om vinteren, hvorimod middelværdier i større udstrækning beskriver hele perioden (maj-september) og dermed mere afhænger af regenererede næringsstoffer. Timing og størrelsen af forårsopblomstringen er dog meget vejrafhængigt og kan gøre tolkningen af den kompliceret. Resultaterne skal dermed tages med et stort forbehold, da sammenhængen ikke tager højde for, hvor dynamisk Vadehavet er og hvilken periode tilførslen sker. Desuden er området udvalgt, fordi der på forhånd er fundet en signifikant sammenhæng mellem næringsstoftilførsel og gennemsnitlig sommerkoncentration af klorofyl. Hvis anvendeligheden skal evalueres mere grundigt, bør flere områder inddrages i analysen, flere forklaringsvariable bør testes og afhængighed af tilførselsperioden bør testes.

4 Beregning næringsstofindsatser baseret på samme tilgang som i resten af DK (dvs. sommer-middel af klorofyl)

I det følgende analyserer vi betydningen af de forskellige miljømål og det samlede behov for reduktion i statusværdien før klorofylmålet opnås. For at vurdere, hvilken betydning ændrede indikator har på den estimerede status, har vi omsat de officielle opgørelser og mål fra [Miljøgis](#), og til sammenligning omsat reference estimerer fra tabel 2.1 og tabel 2.2 til miljømål ved brug af en generel EQR-værdi (Ecological Quality Ratio) på 0,6.

Af [Miljøgis](#) fremgår også den respektive klassificering i henhold til den aktuelle status (se tabel 4.1), mens tabel 4.2 og tabel 4.3 viser mål og klassificering i henhold til følgende EQR-skala: Høj-God: 0,8 – God-Moderat: 0,6 – Moderat-Ringe: 0,4 og Ringe-Dårlig: 0,2.

Som det fremgår af tabel 4.1 klassificeres vandområderne Juvre Dyb, Lister Dyb og Grådyb som 'ringe', mens Knudedyb klassificeres som 'dårlig', jf. VRD-genbesøget.

Ved at benytte sommerklorofyl fremfor P90 beregnet med meta-modellen (tabel 4.2), klassificeres alle vandområderne som 'ringe', mens Lister Dyb klassificeres som 'dårlig' ved brug af den mekanistiske model alene (tabel 4.3).

Der er derfor ingen tvivl om, at Vadehavet som sådan har behov for store reduktioner i næringsstoftilførslerne for at sikre god økologisk tilstand, men der er lokale forskelle mellem metoderne, som potentielt vil have betydning for fordelingen af de samlede indsatser i området.

Tabel 4.1. Mål, status og relativ afstand mellem mål og status baseret på P90. Farven angiver klassificering i henhold til VRD-genbesøget ([Miljøgis](#))

Vandområde ID	Vandområdenavn	Mål [µg/l]	Status [µg/l]	Reduktionsbehov [%]
107	Juvre Dyb	7,5	20,0	63
111	Lister Dyb	7,5	12,5	40
120	Knudedyb	7,5	24,7	70
121	Grådyb	7,5	16,1	53

Tabel 4.2. Mål, status og relativ afstand mellem mål og status baseret på sommer-klorofyl-a reference fra metamodel. Farven angiver klassificering i henhold til VRD-genbesøget ([Miljøgis](#))

Vandområde ID	Vandområdenavn	Mål [µg/l]	Status [µg/l]	Reduktionsbehov [%]
107	Juvre Dyb	3,5	10,4	66
111	Lister Dyb	2,7	7,0	62
120	Knudedyb	3,0	6,8	56
121	Grådyb	4,2	7,3	43

Tabel 4.3. Mål, status og relativ afstand mellem mål og status baseret på reference sommer-klorofyl-a fra mekanistisk modellering. Farven angiver klassificering i henhold til VRD-genbesøget ([Miljøgis](#))

Vandområde ID	Vandområdenavn	Mål [µg/l]	Status [µg/l]	Reduktionsbehov [%]
107	Juvre Dyb	3,7	10,4	65
111	Lister Dyb	2,0	7,0	71
120	Knudedyb	2,5	6,8	63
121	Grådyb	2,2	7,3	70

Indsatsberegninger

I ovenstående tabeller har vi alene vurderet forskellen mellem klorofyl-a mål og status, og ikke omsat det til en konkret beregning af indsatsbehov. I beregningerne af indsatsbehov indgår en række antagelser omkring reduktioner fra andre lande – dvs. især Tyskland for Vadehavet – og antagelser omkring reduktioner i TP-tilførsler, som ikke er med i denne analyse. Dertil kommer, at de endelige indsatsbehov også indregner effekter fra baseline, hvilket ikke er noget, som hverken DHI eller AU-marin er involveret i. Forskellen mellem målene i tabel 4.2 og 4.3 illustrere også den usikkerhed der er forbundet med estimat af reference-niveau. I denne rapport er ikke gjort en særskilt indsats for at reducere usikkerheden eller analysere forskellene. Derfor kan det angivne reduktionsbehov i nærværende rapport ikke sammenlignes direkte med indsatsbehovene i vandområdeplanerne og resultaterne skal alene illustrere, hvilken effekt et skift til sommerklorofyl-indikatoren kan forventes at have på indsatsbehovet. Det man kan udlede af de estimerede reduktionsbehov er, at man med en anden indikator får samme gennemsnitlige procentvise reduktionsbehov til Vadehavet (57 % i gennemsnit for både P90 og sommerklorofyl) ved at anvende metamodelen til at estimere referenceværdi (dvs. samme referencemetode som i vandområdeplaneren). Dog opnår man en mere ligelig fordeling af reduktionsbehovet og tilstandsvurderingen mellem vandområderne ved at anvende samme tilgang som i de indre danske vandområder. Ligeledes får man en mere ligelig fordeling af reduktionsbehovet mellem vandområderne, når det alene er den mekanistiske model, som anvendes til at fastsætte referenceværdi for sommer gennemsnit af klorofylkoncentrationen – dog med et lidt højere gennemsnitligt reduktionsbehov end for de to øvrige scenarier.

5 anbefaling

På baggrund af de gennemførte analyser og sammenligninger mellem forskellige klorofylindikatorer anbefales følgende:

- Anvendelse af gennemsnitlig sommer-klorofylkoncentration (Chl 5-9), som primær indikator for økologisk tilstand i Vadehavet. Denne indikator udviser lavere usikkerhed og større robusthed over for enkeltstående høje målinger sammenlignet med den empirisk beregnede 90-percentil (P90_emp), især ved begrænset datagrundlag.
- Supplering eller erstatning af P90 med gennemsnitsbaserede indikatorer bør overvejes, da gennemsnittet giver en mere stabil og retvisende vurdering af tilstanden. Samtidig giver det en mere balanceret fordeling af reduktionsbehovet mellem vandområder.
- Ved anvendelse af P90 anbefales en parametrisk tilgang (P90_inorm) frem for den empiriske beregning, da den parametriske metode er mindre følsom over for ekstreme værdier og udnytter hele datasættet.
- Geometrisk gennemsnit (mean_log) kan anvendes, men endeligt indikatorvalg bør analyseres grundigere, da foreløbige analyser viser, at denne indikator har lavere korrelation med næringsstofftilførsel end både aritmetisk gennemsnit og parametrisk P90.
- Indikatorvalg bør tilpasses lokale hydrodynamiske forhold, særligt i Vadehavet, hvor udveksling med Nordsøen og tidevand har stor betydning. Her kan mekanistiske modeller med indbygget hydrodynamik give en mere retvisende kobling mellem presfaktorer og respons.
- Ved brug af empirisk bestemt P90 bør data aggregeres over længere perioder (f.eks. 6 år, som de danske myndigheder anvender til tilstandsvurdering) for at reducere usikkerheden. I forbindelse med analyse af år-til-år variation, bør en af de mere robuste indikatorer prioriteres.

Samlet set anbefales det, at gennemsnitlig sommer-klorofylkoncentration anvendes som primær indikator i Vadehavet, og at empirisk bestemt P90 erstattes af en parametrisk bestemt P90, som eventuelt kan anvendes som supplement til klorofylgennemsnittet. Det kan med fordel analyseres, om en kombination af sommerklorofyl og P90-indikatorerne bedre afspejler påvirkningen fra henholdsvis kvælstof og fosfor, fordi indikatorerne forventes at være følsomme over for forskellige næringsstoffer og afspejle forskellige perioder af vækstsæsonen. Skift af indikator kan argumenteres både med dataanalysen i denne rapport, tidligere analyser (Carstensen et al. 2007 og 2008) og at det regionale nordatlantiske samarbejde, OSPAR er kommet frem til samme resultat og anvender gennemsnitskoncentration i den seneste miljøvurdering (QSR 2023, OSPAR Commission 2022). Dette vil styrke grundlaget for miljøvurderinger og sikre en mere sammenlignelig regulering på tværs af danske kystområder og bedre sammenlignelighed med områder omfattet af OSPAR.

6 Referencer

Carstensen, J., Henriksen, P., & Heiskanen, A. S. (2007). Summer algal blooms in shallow estuaries: definition, mechanisms, and link to eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 52(1), 370-384.

Carstensen, J., Krause-Jensen, D., Dahl, K. & Henriksen, P. 2008: Macroalgae and phytoplankton as indicators of ecological status of Danish coastal waters. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. 90 pp. - NERI Technical Report No. 683. <http://www.dmu.dk/Pub/FR683.pdf>

Carstensen, J. 2016. Intercalibration of chlorophyll a between Denmark, Norway and Sweden. Western Baltic (BC6), Kattegat (NEA8b) and Skagerrak (NEA8a, NEA9 and NEA10). Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 38 pp. Technical Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 76 <http://dce2.au.dk/pub/TR76.pdf>

Doering, P. H., Chamberlain, R. H., & Haunert, K. M. (2006). Chlorophyll a and its use as an indicator of eutrophication in the Caloosahatchee Estuary, Florida. *Florida Scientist*, 51-72.

Ellermann T, Andersen HV, Bossi R, Christensen J, Løfstrøm P, Monies C, Grundahl L, Geels C (2013) Atmosfærisk deposition 2012. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 85 s. – Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 73. <http://dce2.au.dk/pub/SR73.pdf>

Erichsen, A. & Timmermann, K. 2022. Methods for establishing Chlorophyll-a references and target values applicable for the River Basin Management Plans 2021-2027. Background, method and data. DHI rapport. Development og Mechanistic Models, RBMP 2021-2027.

Feng, J., Durant, J. M., Stige, L. C., Hessen, D. O., Hjermann, D. Ø., Zhu, L., & Stenseth, N. C. (2015). Contrasting correlation patterns between environmental factors and chlorophyll levels in the global ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(12), 2095-2107.

Gadegast M & Venohr M (2015). Modellierung Historischer Nährstoffeinträge und -Frachten zur Ableitung von Nährstoffreferenz – und Orientierungswerten für Mitteleuropäische Flussgebiete. Technical Report

Geels C, Hansen KM, Christensen JH, Ambelas Skjøth C, Ellermann T, Hedegaard GB, Hertel O, Frohn LM, Gross A, Brandt J. (2012) Projected change in atmospheric nitrogen deposition to the Baltic Sea towards 2020. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12:2615-2629.

Gustafsson BG, Schenk F, Blenckner T, Eilola K, Meier HM, Müller-Karulis B, Neumann T, Ruoho-Airola T, Savchuk OP and Zorita E (2012). Reconstructing the Development of Baltic Sea Eutrophication 1850–2006, *Ambio*, 41(6), 534–548, doi:10.1007/s13280-012-0318-x

Gustafsson EO, Savchuk OP, Gustafsson BG and Müller-Karulis B (2017). Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea, *Biogeochemistry*, 134(3), 301–317, doi:10.1007/s10533-017-0361-6

Hansen J.W., Lønborg, C. & Høgslund S. (red.) 2024. Marine områder 2023. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 201 s. - Videnskabelig rapport fra DCE nr. 632.

OSPAR Commission. (2022). The Common Procedure for the Identification of the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area. OSPAR Agreement 2022-07 (Replaces Agreement 2013-08). [ENDORSED PRACTICE].

QSR 2023 <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/quality-status-reports/qsr-2023/indicator-assessments/chl-a-concentrations/>

Shetty N, Christensen JPA, Damgaard C & Timmermann K. 2021. Modelling chlorophyll-a concentrations in Danish coastal waters using a Bayesian modelling approach. Documentation report Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 62 pp. Scientific Report No. 469.

Timmermann, K, Christensen, J.P.A. & Erichsen, A. 2021. Establishing Chlorophyll-a reference conditions and boundary values applicable for the River Basin Management Plans 2021-2027. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 32 pp. Scientific Report No. 461 <http://dce2.au.dk/pub/SR461.pdf>

Vollenweider R.A. (1992) Coastal Marine Eutrophication: principles and control pp.1-20, In: *Marine Coastal Eutrophication*, Vollenweider R.A., Marchetti R. and Viviani R. (eds.), Elsevier, London

Wurtsbaugh, W. A., Paerl, H. W., & Dodds, W. K. (2019). Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(5), e1373.

KLOROFYLINDIKATOR I VADEHAVET

Evaluering af 90. percentil som klorofylindikator i Vadehavet

Rapporten vurderer metoder til at bedømme den økologiske tilstand i Vadehavet ud fra klorofylkoncentrationer, som indikerer algeopblomstring og næringsstofpåvirkning. Den nuværende indikator, 90. percentilen, kan være følsom over for enkelte høje målinger og dermed give usikre resultater ved begrænset datagrundlag. Analysen sammenligner P90 med gennemsnitlig sommer-klorofyl, som anvendes i andre danske kystområder. Resultaterne viser, at gennemsnittet er mere stabilt og mindre påvirket af ekstreme værdier, hvilket også understøttes af OSPAR's vurderinger for Nordsøen. Begge indikatorer korrelerer med kvælstoftilførsel, hvilket bekræfter deres relevans. Statistiske og modelbaserede beregninger af referenceværdier viser, at gennemsnittet giver en mere ensartet vurdering og en balanceret fordeling af reduktionsbehovet. Rapporten anbefaler at supplere eller erstatte P90 med gennemsnittet og beregne P90 mere robust. Dette vil styrke miljøvurderinger og sikre sammenlignelig regulering på tværs af danske kystområder samt harmonisere med international praksis. Indledende analyser indikerer, at det samlede reduktionsbehov ikke ændres markant, men fordeles mere jævnt mellem vandområderne.