



ROSKILDE FJORD – ISEFJORDEN

En analyse af miljøtilstand, næringsstofkoncentrationer og perspektiver for en forbedring af tilstanden ved en reduktion af næringsstofftilførsler

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 709

2026



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

ROSKILDE FJORD – ISEFJORDEN

En analyse af miljøtilstand, næringsstofkoncentrationer og perspektiver for en forbedring af tilstanden ved en reduktion af næringsstofftilførsler

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 709

2026

Stiig Markager

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 709
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Roskilde Fjord – Isefjorden
Undertitel:	En analyse af miljøtilstand, næringsstofkoncentrationer og perspektiver for en forbedring af tilstanden ved en reduktion af næringsstoffilførsler
Forfatter:	Stiig Markager
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	https://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Juni 2026
Redaktion afsluttet:	9. juni 2026
Faglig kommentering:	Signe Høgslund og Jesper Christensen
Kvalitetssikring, DCE:	Anja Skjoldborg Hansen
Sproglig kvalitetssikring:	xxx
Ekstern kommentering:	Kommentarerne findes her
Finansiel støtte:	Holbæk Kommune
Bedes citeret:	Markager, S. 2026. Roskilde Fjord – Isefjorden. En analyse af miljøtilstand, næringsstofkoncentrationer og perspektiver for en forbedring af tilstanden ved en reduktion af næringsstoffilførsler. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 39 s. - Videnskabelig rapport nr. 709
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Analysen viser at Isefjorden kan komme i god økologisk tilstand med de foreslåede reduktioner af kvælstoffilførslerne på henholdsvis 65 og 40 procent for inder og yderfjorden efter en tidsforsinkelse på et årti eller to. For Roskilde Fjord er det ikke muligt at beregne reduktioner i de menneskeskabte tilførsler, som vil bringe fjorden i god økologisk tilstand inden for mange årtier. En samtænkning med Arresøes behov for reduktion af fosfortilførslerne kan dog være en vej frem, som vil have en markant positiv effekt. Det vil kræve ophør af intensiv landbrugsdrift af hele Arresøes opland, og er derfor en løsning der bør overvejes.
Emneord:	Kvælstof, fosfor, god økologisk tilstand, vandrammedirektiv, tidsforsinkelse
Illustrationer:	Stiig Markager
Foto forside:	Stiig Markager
ISBN:	978-87-7648-076-9
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	39

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	7
1 Metode	8
1.1 Datagrundlag	8
1.2 Stationer	8
1.3 Fjordkomplekset	8
1.4 Databehandling	10
2 Resultater	12
2.1 Overblik og gradient mellem stationer	12
2.2 Udvikling over årene	13
2.3 Sammenhæng mellem koncentrationer og antal dage med begrænsning	20
2.4 Sammenhæng mellem tilførsler og koncentration - kvælstof	20
2.5 Sammenhæng mellem tilførsler og koncentration - fosfor	24
2.6 Sæsonvariationer	26
2.7 Perspektiver for opnåelse af god økologisk tilstand	30
2.8 Scenarier - opstilling af grænseværdier for total kvælstof koncentrationen	31
2.9 Scenarier - beregning af reduktion i tilførsler og tidsforsinkelse	33
2.10 Konklusioner	37
3 Referencer	38
Bilag A	39

Forord

Denne rapport indeholder en analyse af miljøtilstanden i Roskilde Fjord og Isefjorden vurderet ud fra koncentrationer af næringsstofferne kvælstof og fosfor. Analysen primære formål er at undersøge sammenhænge mellem de landbaserede tilførsler af næringsstoffer til fjorden og koncentrationer af fosfor og kvælstof i fjorden. Disse sammenhænge anvendes derefter til at vurdere den reduktion i tilførsler, som er nødvendig for at opnå god økologisk tilstand i forhold til vandrammedirektivet, og den tidsforsinkelse, som må forventes mellem en reduktion i tilførslerne og en forbedring af fjordens miljøtilstand. I vurderingen af miljøtilstanden inddrages også klorofylkoncentrationer, vækst af planteplankton og lyssvækkelse.

Analysen er bestilt af Holbæk Kommune som et led i deres arbejde med Kystvandrådet for Roskilde fjord – Isefjorden, og har til formål at understøtte arbejdet i kystvandrådet for opnåelse af god økologisk tilstand som defineret i EU's Vandrammedirektiv.

Sammenfatning

Rapporten analyserer data for fem stationer som repræsenterer en gradient af næringsstof-koncentrationer på op til en faktor 10 til 13 for uorganisk koncentrationer af kvælstof og fosfor. På den store gradient er andelen af biologisk aktivt kvælstof tilnærmelsesvis konstant på omkring 10 procent. Variation i klorofyl koncentration og lyssvækkelse er også lav.

Over tid, fra 1980'erne til 2024 (25) er tilførslerne af kvælstof og fosfor faldet markant, hvilket har resulteret i en markant stigning i antal dage med næringsstofbegrænsning for både fosfor og kvælstof og en mindre algevækst. Klorofyl koncentration og lyssvækkelse er dog ret uændrede, hvilket skyldes en stor pulje af organisk stof i hele fjordens økosystem inklusiv fjordbunden. Koncentrationer af kvælstof og fosfor er også faldet, men faldet er stort set ophørt.

Samlet er der positive elementer i udviklingen, især stigningen i antal dage med nærings-stofbegrænsning. De sidste 15 år (kvælstof) og 5 år (fosfor) har tilførslerne af næringsstoffer fra landbrugsaktiviteter dog været stigende, så den seneste dekade er den økologiske tilstand gradvist forværret.

På tværs af stationer og år er der fastlagt og kvantificeret gode sammenhænge mellem koncentrationer af total kvælstof og antal dage med kvælstofbegrænsning, henholdsvis total fosfor koncentrationer og antal dage med fosforsbegrænsning.

Ovenstående, sammen med tidligere analyser af kulstof:klorofyl forhold i danske fjord, har gjort det muligt at omregne en grænseværdi for klorofyl til en grænseværdi for total kvælstof for opfyldelse af vandrammedirektivets krav.

For både kvælstof og fosfor er der fastlagt sammenhænge mellem tilførsler og koncentrationer, samt tidsforsinkelsen for faldet i koncentrationer.

Konklusionen på analysen er at Isefjorden kan komme i god økologisk tilstand, med det krav til reduktioner af kvælstoftilførsler, som er foreslået i Vandområdeplanerne på 65 procent for Indre Isefjord og 40 procent for Isefjordens samlede opland. For Roskilde Fjord er der behov for yderligere reduktioner af tilførslerne af både kvælstof og fosfor end dem som er foreslået i Vandområdeplanerne. Her peger rapporten på potentialet i at reducere tilførslerne specifikt til Arresø, men henblik på at opnå en hurtig genetablering af undervandsvegetationen i søen. Det vil kunne opnås med ved ophør af landbrugsdrift i Arresøs opland.

Summary

The report analyzes data for five stations that represent a gradient of nutrient concentrations of up to a factor of 10 to 13 for inorganic concentrations of nitrogen and phosphorus. Across this large gradient, the proportion of biologically active nitrogen is approximately constant at around 10 percent. Variation in chlorophyll concentration and light attenuation is also low.

Over time, from the 1980s to 2024 (2025), the inputs of nitrogen and phosphorus have decreased significantly, resulting in a marked increase in the number of days with nutrient limitation for both phosphorus and nitrogen, and reduced algal growth. However, chlorophyll concentration and light attenuation have remained fairly unchanged, due to a large pool of organic matter in the ecosystem, including the sediments. Concentrations of total nitrogen and phosphorus have also declined, but this decrease has largely come to a halt.

Overall, there are positive elements in the development, particularly the increase in the number of days with nutrient limitation. However, over the past 15 years (for nitrogen) and 5 years (for phosphorus), inputs of nutrients from agricultural activities have been rising, and thus over the past decade the ecological status has gradually deteriorated.

Across stations and years, strong relationships have been established and quantified between concentrations of total nitrogen and the number of days with nitrogen limitation, as well as between total phosphorus concentrations and the number of days with phosphorus limitation.

The above, together with previous analyses of carbon-to-chlorophyll ratios in Danish fjords, has made it possible to convert a threshold value for chlorophyll into a threshold value for total nitrogen to meet the requirements of the Water Framework Directive.

For both nitrogen and phosphorus, relationships have been established between inputs and concentrations, as well as the time lag associated with decreases in concentrations after a decrease in loadings.

The conclusion of the analysis is that Isefjord can achieve good ecological status, given the proposed reductions in nitrogen inputs in the River Basin Management Plans: 65 percent for the Inner Isefjord and 40 percent for the entire Isefjord catchment are achieved. For Roskilde Fjord, further reductions in inputs of both nitrogen and phosphorus are needed beyond those proposed in the River Basin Management Plans. The report points to the potential of reducing inputs specifically to Lake Arresø, with the aim of achieving a rapid re-establishment of submerged vegetation in the lake. This could be achieved by ceasing agricultural activities in the Arresø catchment.

1 Metode

1.1 Datagrundlag

De data der er anvendt i rapporten, er NOVANA-data fra Danmarks database for marine data. Her findes data for vandkemi, og fysiske parametre som salt og temperatur. Alle data er kopieret fra database i januar 2026, og indeholder data til og med 2025.

Data for primærproduktion er også data fra den marine del af NOVANA-programmet. Her er data for fire stationer medtaget i form af årlig arealproduktion. Disse data er beregnet af Aarhus Universitet for Miljøstyrelsen/Styrelsen for grøn arealoplægning og vandmiljø.

Data for landbaserede tilførsler af kvælstof og fosfor er også indhentet fra NOVANA-programmets database. Her findes data fra 1990 til 2024. For årene før 1990 anvendes data for tilførsler opgjort af de tidligere amter. Data for 2025 er estimeret ud fra data for nedbør i 2025 indhentet fra DMI. Denne tilgang skyldes, at de endelige estimater for 2025-udledninger af næringsstoffer, først er færdigberegnet senere i 2026. For at udnytte de eksisterende data for tilstanden i fjordene i 2025, er der derfor anvendt et foreløbigt estimat for 2025-udledninger af næringsstoffer.

For metoder omkring indsamling af data henvises til NOVANA-programmets tekniske anvisninger (Kaas og Markager 1998 og efterfølgende opdateringer).

1.2 Stationer

I rapporten er data for fem stationer behandlet; Indre Roskilde Fjord, Ydre Roskilde Fjord, Indre Isefjord, Ydre Isefjord og Griben. Stationen ved Griben er medtaget som reference i forhold til stationerne i fjordene, idet den antages at være repræsentativ for det vand som Isefjord-Roskilde Fjord komplekset udveksler med Kattegat

1.3 Fjordkomplekset

Nøgletal for fjordenes fysiske forhold er beskrevet i rapporten Bohr et al. (2025).

Figur 1.1. Kort over Roskilde Fjord – Isefjords systemet med de fire positioner for prøvetagning.



Roskilde Fjord – Isefjord systemet består af de to fjorde, som hver har en indre og ydre del. Indre Roskilde Fjord står i forbindelse med Ydre Roskilde Fjord gennem en omkring 15 km lang smal rende. Eskilsø ligger som en prop mod syd i renden, og flere steder er der meget smalle passager. Denne geografi betyder, at vandudvekslingen mellem Indre Roskilde Fjord og resten af systemet er begrænset. Vandudvekslingen er kvantificeret ved DHI's modelsystem, og værdierne er angivet i tabel 2.1. Her ses, at værdien for Indre Roskilde Fjord er næsten 10 gange lavere end for de øvre dele af fjordkomplekset.

Vandudveksling er afgørende for koncentrationer af næringsstoffer, da det er udskiftningen af de indre områdes næringsrige vand med de ydre områder og i sidste ende Kattegats vand, med lavere koncentrationer, som transporterer næringsstofferne ud af fjorden.

I tillæg til vandudveksling, har placeringen af Roskilde by en betydning. Roskilde er den største by omkring fjordene, med et indbyggertal omkring 53.000 mennesker. Tidligere, op til slutningen af 1980'erne, blev spildevand ikke renset for næringsstoffer. Dette, sammen med den langsomme vandudveksling, kan forklare at Indre Roskilde Fjord har systemets højeste koncentrationer af næringsstoffer.

Ydre Roskilde Fjord modtager vand fra inderfjorden og fra Frederikssund og Frederiksværk samt Arresø og den bagvedliggende Hillerød Kommune. Roskilde Fjord er lidt usædvanlig i forhold til andre fjorde, i det den største ferskvandstilførsel ikke sker inderst i fjorden, men tæt ved udløbet gennem kanalen fra Arresø.

Ydre Roskilde Fjord er forbundet til Isefjorden gennem en rende som er omkring 1 km på det smalleste sted ved Kulhuse-Sølager. Umiddelbart ser forbindelsen bred ud, men store lavvandede områder betyder, at forbindelsen til Isefjorden er begrænset til en omkring 8 km lang smal rende. Der er derfor en begrænset vandudveksling til Isefjorden. Ifølge modelberegninger er den lidt større end for Isefjordens to dele, men denne modelberegning virker mindre sandsynligt, når man analyserer næringsstofkoncentrationerne.

Indre Isefjord står i forbindelse med Ydre Isefjord gennem to render øst og vest om Orø. Renden øst om Orø er meget smal og lavvandet, men renden vest om Orø er dyb med vanddybder op til 17 meter.

Teknisk set i vandområdeplanerne er Lammefjorden med opland en del af inderfjorden, selv om den ligger nord for Orø og den naturlige afgrænsning mellem inder og yderfjord. I denne analyse er der anvendt den faktisk fysiske afgrænsning, så næringsstofftilførslerne fra Lammefjorden og dens opland er ikke medtaget for inderfjorden, men som tilførsler til Ydre Isefjord. For Ydre Isefjord spiller afgrænsningen ingen rolle, da oplandet her det samlede opland til Isefjorden.

Ydre Isefjord består mest af en stor åben bredning med en bredde på omkring 13-14 km. Vanddybden er omkring 10 meter. Det betyder at der er en langt højere vindeksponering, og dermed bølgeaktivitet, end for de øvre områder af fjordkomplekset. Ydre Isefjord har en bred forbindelse til Kattegat. Det giver en god vandudskiftning og sammen med eksponering for vinden, medvirker det til, at de negative effekter af næringsstoffer er mindre her end for de øvre områder.

Fjordkomplekset står i forbindelse med Kattegat, som igen er forbindelsen mellem Østersøen og Skagerrak og Nordsøen-Atlantehavet. Vandet i Kattegat består i overfladen især af udstrømmende vand fra Østersøen, som på vejen gennem bælteerne modtager næringsstoffer fra dansk land. Der er også en indadgående bundstrøm med højere saltkoncentration, og dermed tungere vand.

Forbindelsen mellem fjordene og Kattegat er lavvandet med vanddybder på 1 til 4 meter, bortset fra en 7 meter dyb sejlrende mod øst. Det er derfor overfladevand fra Kattegat som udveksles med Roskilde Fjord/Isefjords komplekset. I analysen er medtaget data for overfladevandet fra en station ved Gniben ud for Sjællands Odde, som i nogen grad repræsenterer det vand som udveksles.

De fem stationer, som er behandlet i rapporten, repræsenterer en gradient i næringsstofkoncentrationer betinget af de forhold som er beskrevet ovenfor.

1.4 Databehandling

Vandkemiske data er behandlet som beskrevet i NOVANA-rapporten (Hansen og Høgslund, 2025, bilag 3).

I korthed så er alle observationer fra overfladen til 10 meter, eller til bunden, midlet over dybden og derefter for 10-dages perioden for hver station og år. Her ved fremkommer 36 data-punkter for hvert år, som repræsenterer gennemsnit for 36 10-dages perioder pr. år, og derfor giver et billede af årstidsvariationen.

For klorofyl er værdien beregnet ud fra de vandkemiske målinger og elektronisk målte data for fluorescens fra klorofyl. Data repræsenterer derfor et integreret mål for den gennemsnitlige klorofylkoncentration ned gennem vandsøjlen. Se også (Hansen og Høgslund, 2025, bilag 3).

2 Resultater

2.1 Overblik og gradient mellem stationer

De fem stationer er beskrevet i tabel 2.1 med årsmidler beregnet for de sidste 10 år, dvs. fra 2016 til 2025 inklusive. Data i tabellen beskriver dermed den aktuelle tilstand for de fem stationer.

Hovedparten af data for koncentrationer udviser en gradient over de fem stationer.

Tabel 2.1. Middelverdier for 0-10 meter for perioden 2016 til 2025 inklusive. TN er koncentrationen af total kvælstof. DIN er koncentrationen af uorganisk kvælstof (nitrit + nitrat + ammonium). DON i organisk bunden kvælstof beregnet som TN minus DIN. Kvælstof i fytoplankton er beregnet ud fra klorofylkoncentrationen og en antagelse om et C:Chl forhold på 50 og et C:N-forhold på 7. Den biologisk aktive N-fraction er summen af DIN og kvælstof i fytoplankton.

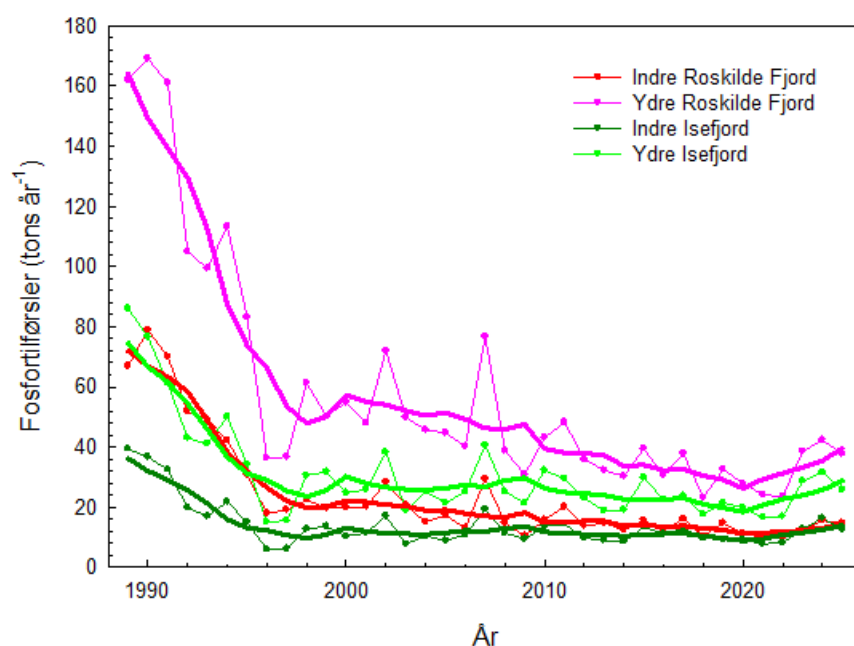
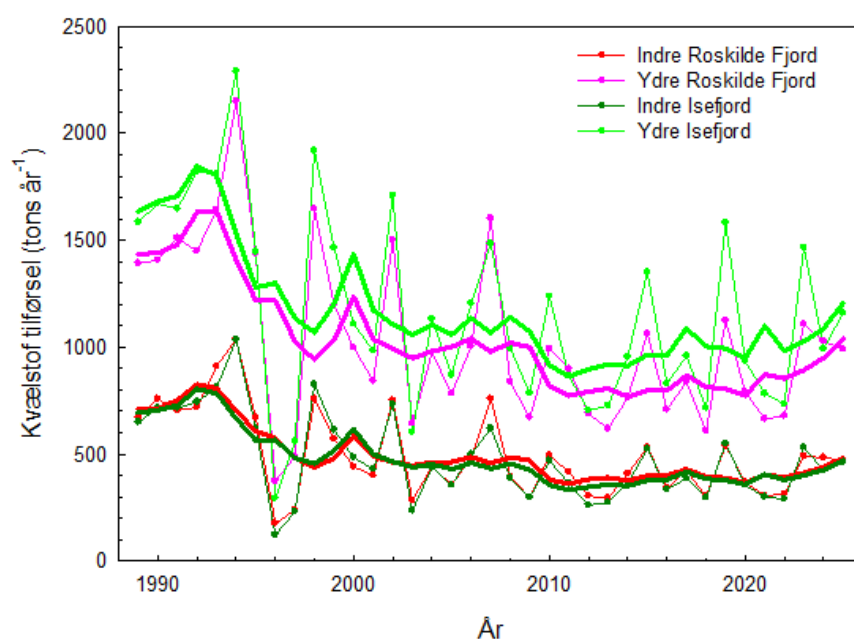
	Roskilde Inderfjord (station 60)	Roskilde Yderfjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Ise- Gniben fjord (station 1003)	(sta- tion 925)	Middel- værdi	Minimum	Maximum	Spænd/ Spænd minimum	= faktor
Kvælstof										
Total kvælstof (TN, μM)	61,2	37,3	31,8	22,5	15,6	33,7	15,6	61,2	45,5	2,9
Uorganisk kvælstof (DIN, μM)	16,19	7,35	6,12	2,58	1,52	6,85	1,5	16,2	14,7	9,6
Organisk bundet kvælstof (DON) (μM)	41,6	26,3	22,8	17,4	12,6	24,2	12,6	41,6	29,0	2,30
Kvælstof i fytoplankton (μM)	2,98	3,51	2,69	2,51	1,52	2,6	1,5	3,5	2,0	1,3
Total biologisk aktivt kvælstof (μM)	19,04	10,93	8,88	5,10	3,02	9,4	3,0	19,0	16,0	5,3
Andel i DIN	0,20	0,16	0,18	0,10	0,09	0,15	0,09	0,20	0,11	1,15
Andel i DON	0,75	0,74	0,73	0,78	0,81	0,76	0,73	0,81	0,08	0,11
Andel i fytoplankton	0,05	0,10	0,09	0,11	0,10	0,09	0,05	0,11	0,06	1,13
Biologisk aktiv N-fraction	0,25	0,26	0,27	0,22	0,19	0,24	0,19	0,27	0,08	0,42
Fosfor										
Total fosfor (TP, μM)	3,82	1,44	0,92	0,70	0,57	1,5	0,6	3,8	3,3	5,7
Uorganisk fosfor (DIP, μM)	2,79	0,69	0,34	0,20	0,23	0,85	0,20	2,8	2,6	13,0
Andel i DIP	0,64	0,44	0,33	0,25	0,36	0,40	0,25	0,64	0,39	1,6
Ratioer										
DIN:DIP	26	30	56	30	7	30	6,6	56	50	7,5
TN:TP	25	31	46	40	32	35	25	46	21	0,82
Biologiske data										
Klorofyl konc. (Chl., $\mu\text{g l}^{-1}$)	5,00	5,89	4,52	4,22	2,56	4,4	2,6	5,9	3,3	1,3
Lyssvækkelses koef. (m^{-1})	0,56	0,55	0,44	0,39	0,27	0,44	0,27	0,56	0,29	1,11
Primær produktion ($\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	631				415					
Fysiske forhold										
Temperatur	11,4	12,9	12,2	13,2	11,2	12,2	11,2	13,2	2,0	0,18
Salinitet	13,1	17,7	18,9	18,7	19,5	17,6	13,1	19,5	6,4	0,48
Vandudveksling (dag^{-1}) fra Christensen et al. (2024) med værdier fra DHI's model	0,31	2,2	1,6	1,1	-					
Opland (km^3)	450	730	450	646	-					

2.2 Udvikling over årene

I dette afsnit behandles udvikling over årene for en række variable.

Udvikling i tilførsler af kvælstof og fosfor

Figur 2.1. Udvikling i tilførsler af kvælstof og fosfor fra land for de fire områder. Symboler og tynde linjer er årlige tilførsler. 5 års glidende gennemsnit er vist som kraftige linjer. Værdier for de ydre dele af fjorden er summen af tilførsler til hele fjorden, dvs. inklusive tilførsler til de indre dele. Værdier for 2025 er estimeret ud fra nedbør og tidligere års tilførsler og behæftet med en større usikkerhed.



Kvælstoftilførslerne udvikler sig stort set parallelt for alle fire områder. Overordnet er der et fald fra 1992 og frem til 2012, hvorefter tilførslerne er stigende, især for Ydre Isefjord, hvor tilførslerne nu er som i år 2000. Den meget parallelle udvikling viser, at der er en fælles faktor, som bestemmer udviklingen for alle områder. I Trolle m.fl. (2025a,b) er det opgjort, at den diffuse tilførsel udgør henholdsvis 96 og 82 procent af de samlede tilførsler for henholdsvis Isefjorden og Roskilde Fjord, mens punktkilder kun udgør henholdsvis 4 og 18 procent. Kilderne for den diffuse tilførsel er landbrugsaktiviteter og en naturlig baggrund (Ministeriet for Grøn trepart 2025). I Trolle m.fl. 2025a,b er det vist, at de størst arealspecifikke tilførsler af kvælstof er sammenfaldende med områder med et højt husdyrtæthed, landbrugsaktivitet og lav retention.

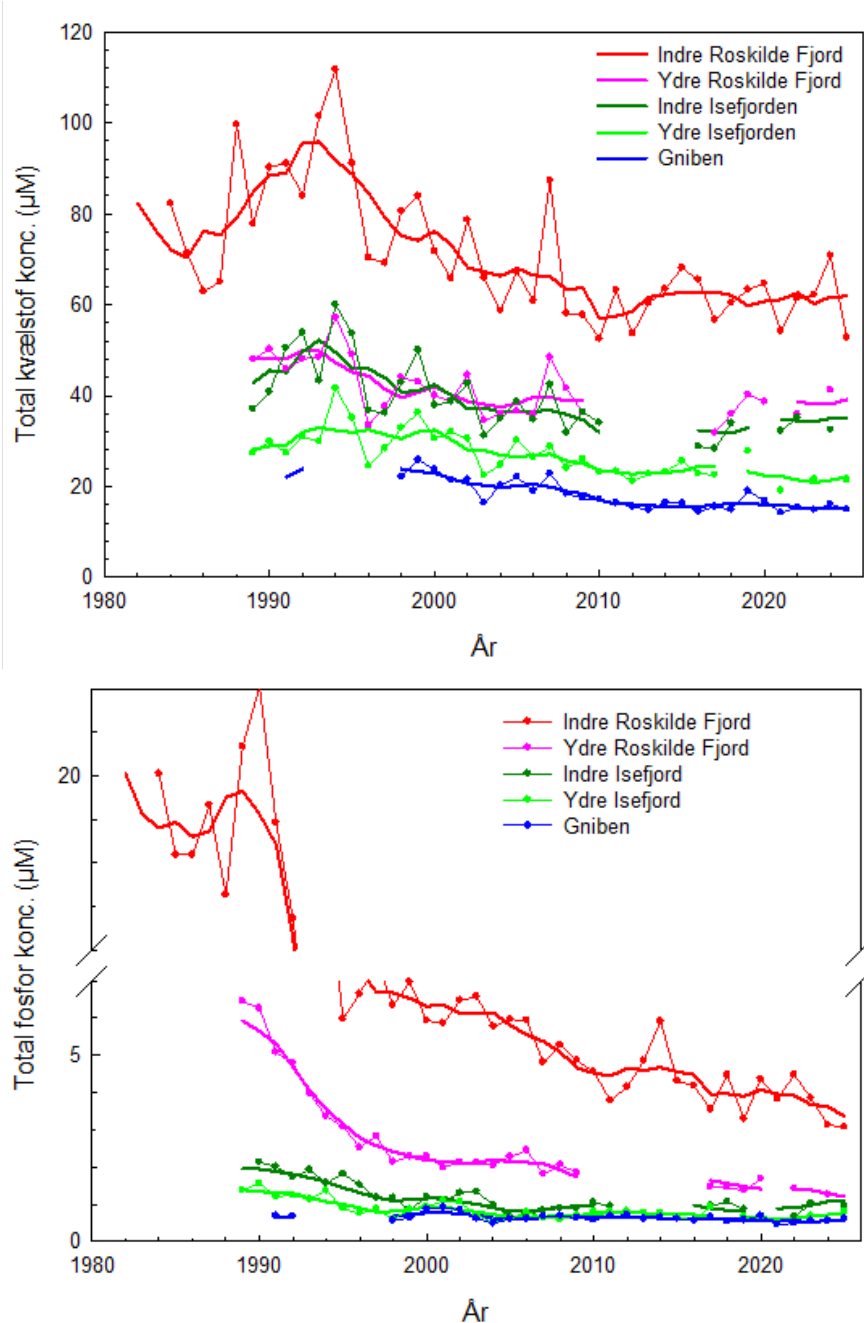
Fordelingen på kilder ligner den man ser på landsplan (Ministeriet for Grøn trepart 2025), dog med mere vægt på landbrugsaktiviteter for Isefjorden og mindre vægt på landbrugsaktiviteter for Roskilde Fjord. Vi ved fra tidligere undersøgelser, at der er en tæt sammenhæng mellem markoverskuddet af kvælstof og kvælstofafstrømning (Windolf m.fl. 2011). Det derfor med stor sikkerhed et stigende markoverskuddet af kvælstof, kombineret med variationen i nedbør, som er årsagen til de stigende tilførsler til fjordene siden 2012. Den samme effekt ses i øvrigt på landsplan. Mekanismen bag stigningen er en kombination af stigende nedbør og ændringer i landbrugspraksis, fx en mere anvendelse af majs som afgrøde og effekter af den ændrede regulering som følge af 'Fødevarer og Landbrugspakkens' fra 2016.

Tilførslerne af fosfor viser overordnet det samme mønster, men med nogle forskelle. For alle områder er der et kraftigt fald fra 1989 til 1996 pga. bedre rensning af spildevand. For Roskilde fjord, især den ydre del, forsætter dette fald frem til 2022. For Isefjorden er fosfortilførslerne konstante fra 1996 og frem til 2020. Ifølge Trolle m.fl. (2025a,b) er fordelingen på diffuse kilder og punktkilde 64 og 36 procent for Isefjorden. Dvs. at de diffuse kilder dominerer, mens det er omvendt for Roskilde Fjord, hvor fordelingen er 32 og 68 procent på diffuse kilder og punktkilder. Det fortsatte fald i tilførslerne for Roskilde Fjord kan dermed forklares med stadig bedre spildevandsrensning i en situation, hvor spildevand er den dominerende kilde. Fra omkring 2020 og fremefter er der en tydelig stigning i tilførslerne for alle fire områder, som, ligesom for kvælstof, må komme fra et stigende tab fra landbrugsaktiviteter i oplandet, da udledningerne fra spildevand er faldende. Landbrugsaktiviteter skal her forstås som kombinationen af fosfor der tilføres markerne og de hydrologiske ændringer i landskabet som landbruget gennemfører, fx dræning, rørlægning af vandløb, dybe grøfter og inddigning.

Udvikling i koncentrationer af total kvælstof og fosfor

Generelt har koncentrationerne af total kvælstof været aftagende siden et maksimum først i 1990'erne. For Indre Roskilde Fjord, hvor vi har data tilbage til 1982, kan vi se, at koncentrationen var stigende indtil 1994. Der er tendenser til det samme for de andre områder. Det stemmer med, at tilførslerne begynder at falde fra omkring 1992. For Indre Roskilde Fjord er der et hurtigt og markant fald frem til år 2000, hvorefter faldet aftager og følger de øvre områder. For Kattegat (Gniben) fortsætter faldet frem til 2025, selv om det aftager i hastighed. Det skyldes at især Sverige og Tyskland i perioden reducerer deres udledninger. Dette har også en positiv effekt ind i Ydre Isefjord. For Ydre Roskilde Fjord er koncentrationen stabil fra 2002 og frem, mens den er svagt stigende i Indre Isefjord fra 2010 og frem, i overensstemmelse med stigende tilførsler fra landbrugsaktiviteter i fjordens opland.

Figur 2.2. Udvikling i total koncentrationer af kvælstof og fosfor. Signaturer er som på Fig. 2.1. Bemærk at y-aksen er brudt fra 7 til 16 μM på grafen for fosfor.

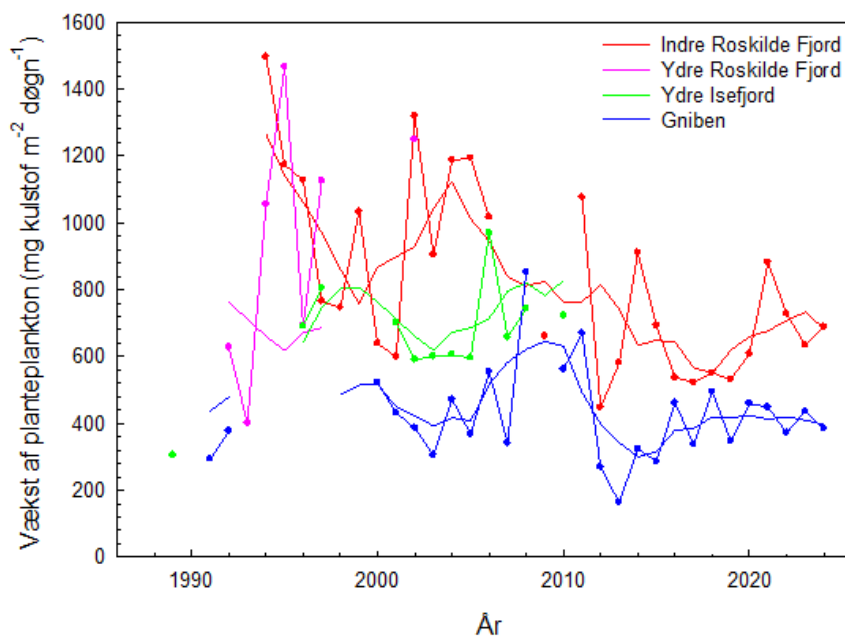


Fosforkoncentrationerne har generelt været faldende. For Indre Roskilde Fjord sker det fra et ekstremt niveau på omkring 19 μM i 1980'erne. Det har også påvirket koncentrationerne i Ydre Roskilde Fjord. For Isefjorden er der et fald frem til 2020, hvorefter koncentrationen stiger svagt. Denne stigning skyldes en højere fosfortilførsler fra oplandet. Koncentrationen i Kattegat falder fra år 2000 og frem. Dog er koncentrationen i 2024 og 2025 højere end de foregående år, hvilket kan hænge sammen med mere udbredt iltsvind i Østersøen, som frigiver fosfor fra bunden til vandsøjlen. Koncentrationen i Kattegat er dog stadig lavere end i fjordene.

Algevækst

Væksten af planteplankton er målt i Indre Roskilde Fjord og ved Gniben i hele perioden og i en periode i Ydre Isefjord.

Figur 2.3. Algevækst over årene. Algevæksten er ikke målt i Indre Isefjord og kun i nogle år for Ydre Roskilde Fjord og Ydre Isefjord. Signaturer er som på Fig. 2.1.



Algevæksten i Indre Roskilde Fjord er mere end halveret fra 1992 og frem til nu, hvor niveauet er omkring 650 mg C m⁻² d⁻¹. Det er planteplanktons produktion af organisk stof, som er drivende for de øvre negative effekter af næringsstoffer, som iltsvind og uklart vand. Det er derfor en vigtig positiv udvikling, når algevæksten falder.

For Griben stationen er der også en sket en reduktion af algevæksten, selvom der er udsving i perioder. Vi ved fra de andre stationer i de indre farvande at algevæksten i de åbne områder er aftaget over tid siden midt i 1990'erne. (Hansen og Høglund 2025).

Udvikling i koncentrationen af alger og vandets klarhed

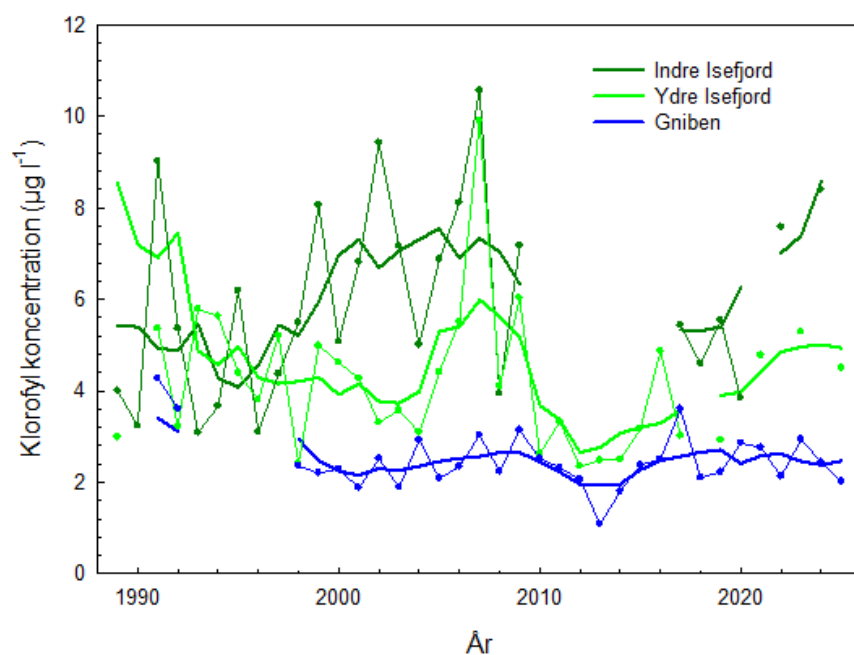
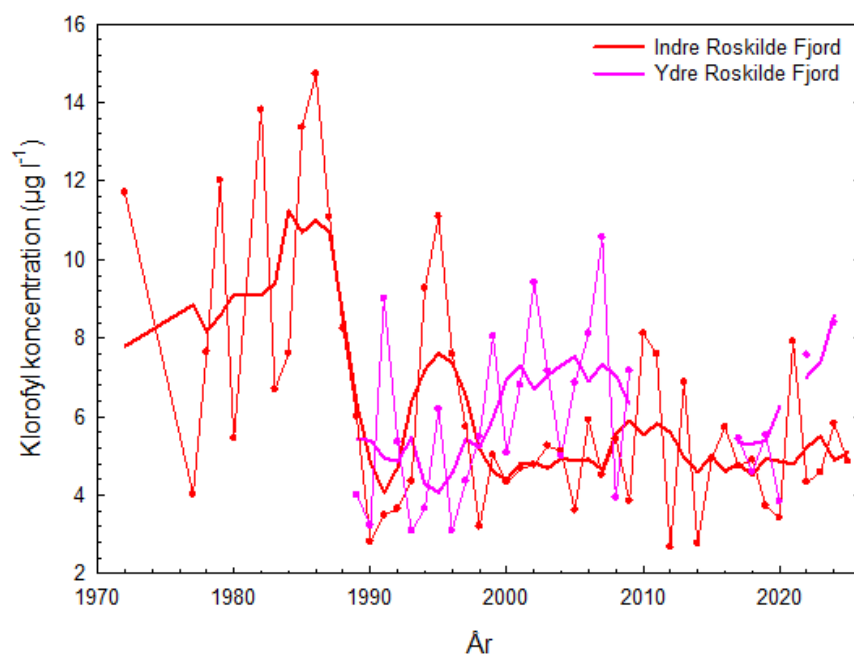
Udviklingen i koncentrationen af klorofyl og vandets klarhed er af særlig interesse, da det er de to variable som i praksis definerer, om vandrammedirektivets krav om god økologisk tilstand er opfyldt. Figur 2.4 viser deres udvikling.

Billedet for klorofyl er noget rodet, men overordnet er der en reduktion i koncentrationen frem til omkring 2010-15. I Indre Roskilde Fjord har vi data helt tilbage fra 1972 og en del data fra 1980'erne, hvor koncentrationen var meget høj, omkring 8 til 12 µg Chl l⁻¹. Den falder til ca. det halve, 4 til 6 µg Chl l⁻¹, fra slutningen af 1980'erne og frem. Noget lignende ses for Ydre Isefjord, mens der ikke er noget konsistent udvikling for Ydre Roskilde Fjord og Indre Isefjord. For Griben stationen ses også en reduktion fra 1992 til 2012-14, men på et lavere koncentrationsniveau. Et generelt mønster, som også ses i for næste alle danske områder, er en stigning fra ca. 2012 og frem. For nogle områder er den meget markant. F.eks. har Ydre Roskilde Fjord i 2024 og 2025 de højeste koncentrationer af klorofyl, som er målt i området nogensinde.

Årsagen til denne stigning er en kombination af stigende udledninger af næringsstoffer fra land og højere temperaturer. En anden betydende faktor for Isefjorden er det fiskeri med bundskrabende redskaber efter blåmuslinger som starter i 2005. Det betyder, at næringsstofferne fra fjordbunden bringes op i vandsøjlen og stimulerer algevæksten, samtidig med at græsningen fra blåmuslinger reduceres. En øget forekomst af iltsvind pga. stigende

temperatur kan også spille en rolle, da iltsvind betyder, at der frigives flere næringsstoffer fra fjord-bunden til vandet.

Figur 2.4. Udvikling i klorofylkoncentration. Signaturer er som på Fig. 2.1

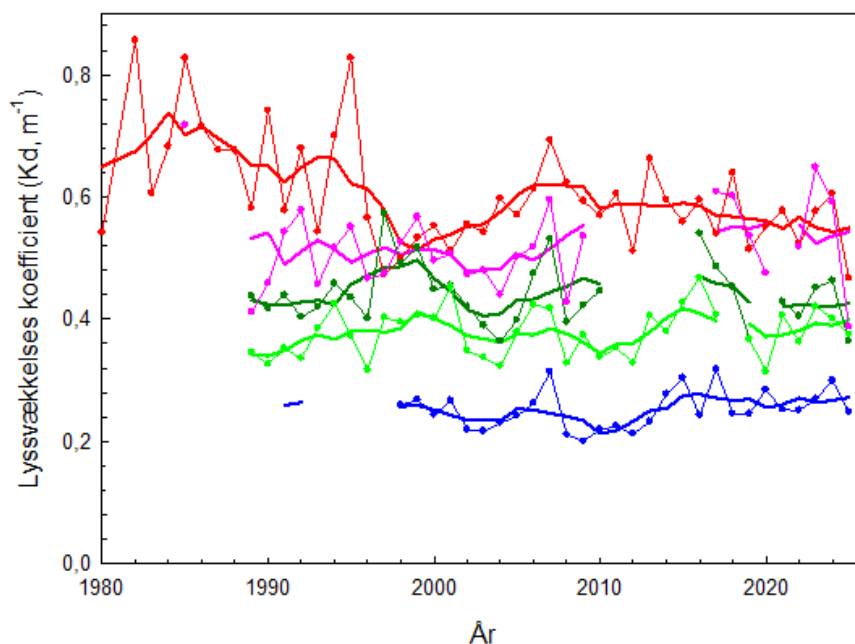


Vandets klarhed måles som en lyssvækkelseskoeficient, hvor en højere koeficient betyder mere uklart vand. Her gælder, at der ikke har været nogen udvikling over tid, undtagen for Indre Roskilde Fjord, hvor der har været en nedgang på 10 til 15 procent i starten af perioden. Det er bemærkelsesværdigt, og positivt, at lyssvækkelsen i 2025 er faldet markant for alle områder i forhold til 2024. Faldet skyldes, at afstrømningen fra land, og dermed tilførslerne af næringsstoffer fra det åbne land, var meget lav i 2025 fra februar til august. Dvs. netop i den perioder hvor det meste af algevæksten sker. Det viser det positive potentiale i at reducere tilførslerne af næringsstoffer.

Når der ikke er nogen positiv udvikling, skyldes det, at lyssvækkelse bestemmes af puljen organisk stof. Det er både opløste humusstoffer i vandet, og organiske partikler (mudder) der hvirvles op fra fjordbunden. Det organiske

stof stammer fra den akkumulerede algevækst over de sidste årtier, og det nedbrydes kun langsomt. Så selvom der er sket en reduktion i algevæksten (Fig. 2.3) er den ikke tilstrækkelig og har ikke været længe nok, til at det for alvor formindsker puljen af organisk stof i systemet.

Figur 2.5. Udvikling i lyssvækkelser. Signaturer er som på Fig. 2.1.

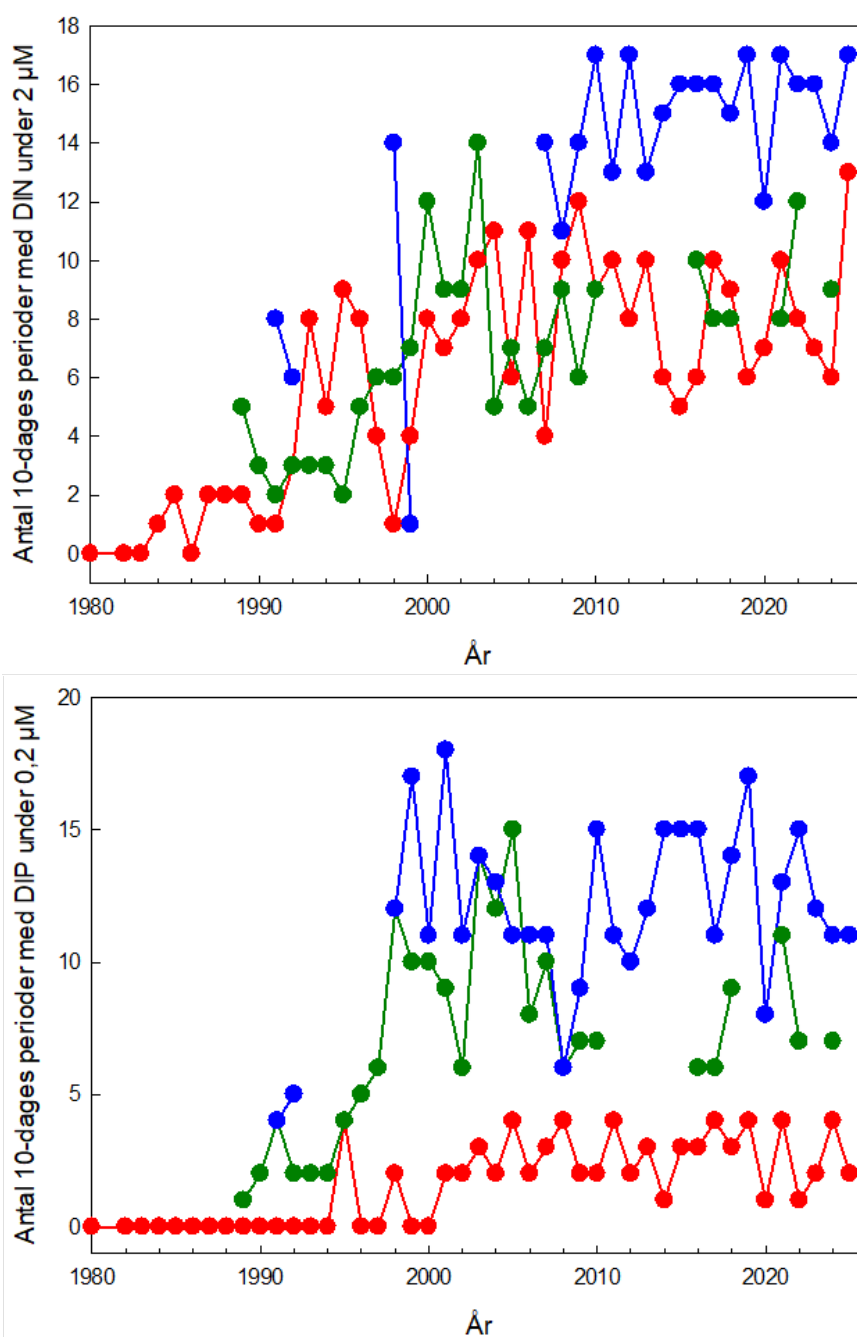


Antal dage med næringsstofbegrænsning

Den afgørende mekanisme for fjordens tilstand er en begrænsning af algevæksten. Næringsstofbegrænsning indtræffer, når koncentrationerne af uorganiske næringsstoffer falder under et vist niveau, som gradvist sænker algernes væksthastighed. For kvælstof er det summen af ammonium, nitrit og nitrat, som samlet kaldes DIN efter den engelske forkortelse for 'dissolved inorganic nitrogen'. For fosfor er det koncentrationen af fosfat, som forkortes DIP. Grænseværdierne kan diskuteres, men ofte anvendes $2 \mu\text{M}$ for DIN og $0,2 \mu\text{M}$ for DIP. Under disse niveauer vil væksten af planteplankton aftage. Forskellige arter har forskellige evne til at udnytte næringsstoffer, og nogle arter kan godt vokse ved lavere koncentrationer, men det vil så typisk være arter som også har en lavere vækstrate, og derfor bliver den samlede produktion af organisk stof stadig lavere. Der er også lavet beregning med grænseværdierne 1 og $0,5 \mu\text{M}$ for DIN og $0,1$ og $0,05 \mu\text{M}$ for DIP, Men mønsteret for udviklingen over tid er det samme som for $2/0,2 \mu\text{M}$, som er vist her.

Det er en vigtig pointe, at der i perioder har været en så stor pulje af næringsstoffer, at algevæksten aldrig har været næringsstofbegrænset. Det betyder, at lavere koncentrationer af næringsstoffer ikke har givet en lavere algevækst – der har bare været et mindre overskud af næringsstoffer. Det er derfor nyttigt at beregne det antal dage, hvor næringsstofkoncentrationerne er under det begrænsende niveau. Det er gjort på Fig. 2.6.

Figur 2.6. Antal 10-dages perioder med koncentrationer under $2 \mu\text{M}$ for DIN og $0,2 \mu\text{M}$ for DIP for tre områder. Data for de øvre to områder er ikke vist for overskueligheden. Farver på symboler er som på Fig. 2.1.



Figuren viser en stigende næringsstofbegrænsning over årene for både kvælstof og fosfor.

For kvælstof er der et stigende antal dage fra omkring nul i Indre Roskilde Fjord til et niveau omkring 90 efter år 2000. Samme mønster ses for de øvrige fjordområder. I Kattegat er koncentrationerne langt lavere, men også her har der været en stigning op til omkring 160 dage efter 2010.

For fosfor er udviklingen den samme, men på et lavere niveau. Tilbage i 1980'erne var der så stort overskud af fosfor, at koncentrationerne aldrig var begrænsende. Efter at udledningerne fra spildevand blev væsentligt reduceret, og puljerne i fjorden er fortyndet, så optræder der begrænsning på et niveau, som varierer mellem områderne, men som har været stabilt siden omkring år 2000.

Det er vigtigt at understrege, at der er et samspil mellem de to næringsstoffer. I takt med at fosfor i perioder bliver begrænsende, så aftager algevæksten, og algerne optager derfor mindre kvælstof. Derfor vil en stigende fosforbegrænsning lægge en dæmper på stigningen i antal dage med kvælstofbegrænsning, selvom total kvælstofkoncentrationerne fortsætter med at falde.

2.3 Sammenhæng mellem koncentrationer og antal dage med begrænsning

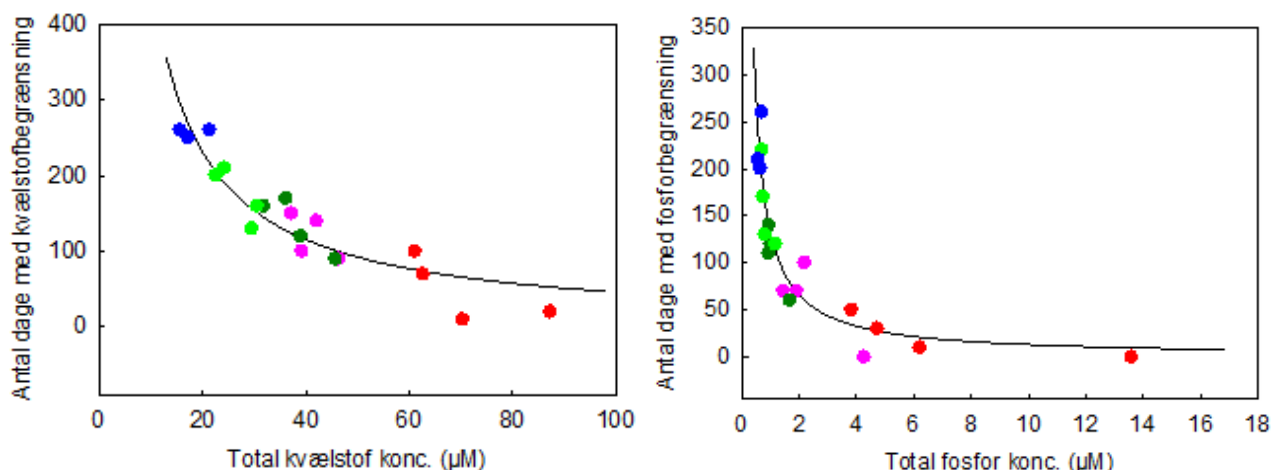
Ud fra data for de fem områder og fire octader (1989-1997, 1998-2006, 2007-2015 og 2016-2025) kan vi analysere sammenhængen mellem total koncentrationer af næringsstoffer og antal dage med begrænsning. Det giver 20 observationer. Det er tydeligt at antallet af dage med begrænsning stiger med faldende koncentration og at der er en fælles sammenhæng på tværs af stationer og tid.

De to sammenhænge er modelleret med en reciprok funktion:

Lig. 1: $N_{lim} = 1 / (0,00762 * TN)$

Lig. 2: $P_{lim} = 1 / (0,000216 * TP)$

Hvor TN = total kvælstof koncentration, N_{lim} = antal dage med $DIN \leq 2 \mu M$, TP = total fosfor koncentration og P_{lim} = antal dage med $DIP \leq 0,2 \mu M$. DIN = koncentrationen af uorganisk kvælstof og DIP = koncentrationen af uorganisk fosfor.

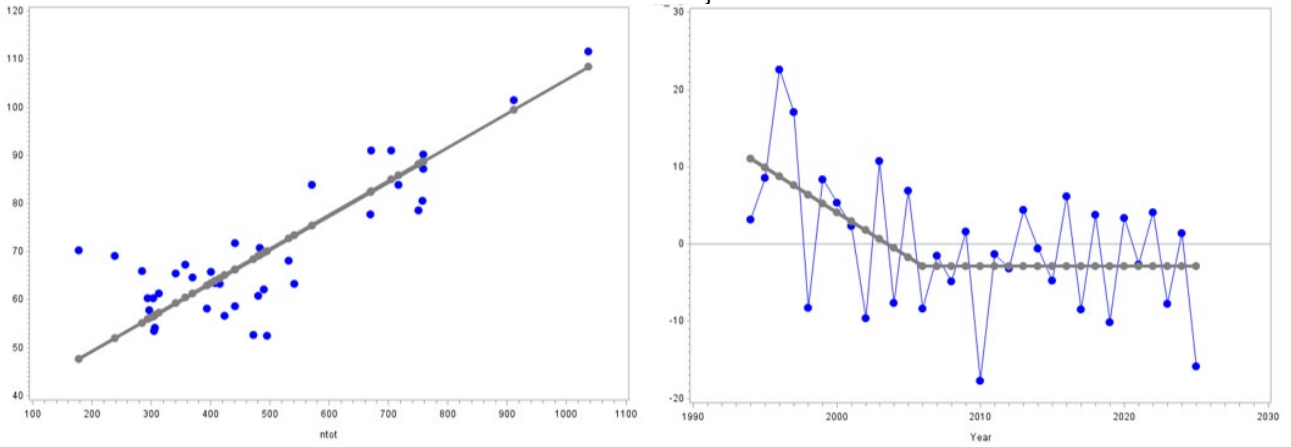


Figur 2.7. Sammenhænge mellem antal dage med begrænsning af planteplanktons vækst og koncentrationer henholdsvis total kvælstof og total fosfor. Hvert punkt repræsenterer en otte årsperiode for en station. Rød: Indre Roskilde Fjord. Lysegrøn: Ydre Roskilde Fjord. Mørkegrøn: Indre Isefjord. Lysegrøn: Ydre Isefjord. Blå: Griben – Kattegat. Linjerne er henholdsvis lig. 1 og 2. Data for denne figur er for enkelt dage mens data for Fig. 2.5 er 10-dages perioder, hvor gennemsnittet for DIN og DIP er under henholdsvis 2 og 0,2 μM . Det giver lidt højere værdier for denne figur, i det enkelt dage med begrænsning i en 10 dages perioder tælles med.

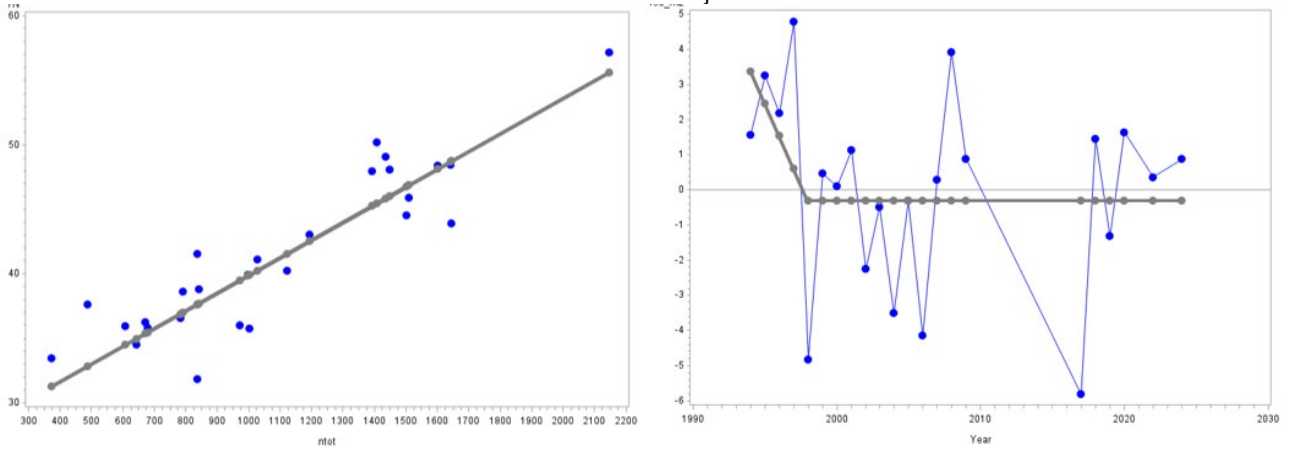
2.4 Sammenhæng mellem tilførsler og koncentration – kvælstof

Analysens central element er fastlæggelsen af sammenhængen mellem næringsstofftilførsler og total koncentrationer i vandet. Denne analyse er udført for hver af de fem stationer og for både kvælstof og fosfor. Tilførslerne er beregnet som summen af total N tilførsel pr. kalenderår og koncentrationer er beregnet som beskrevet for tabel 2.1. For hvert område er en lineær sammenhæng fastlagt ved en model II regression, som tager hensyn til usikkerhed på både den uafhængige (tilførsler) og den afhængige (koncentration) variable. Resultaterne er vist på fig. 2.8 og i tabel 2.2.

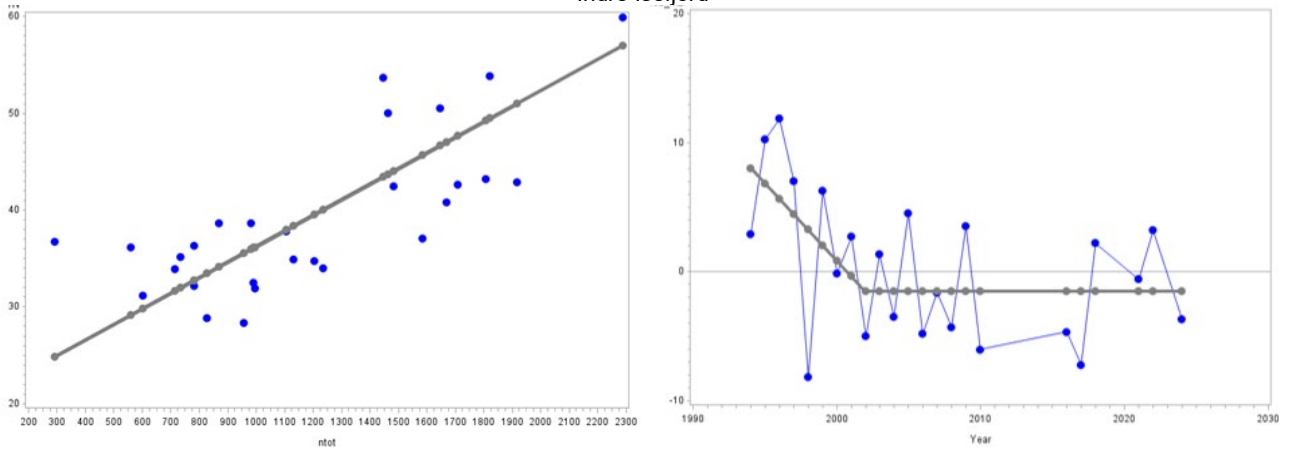
Indre Roskilde Fjord

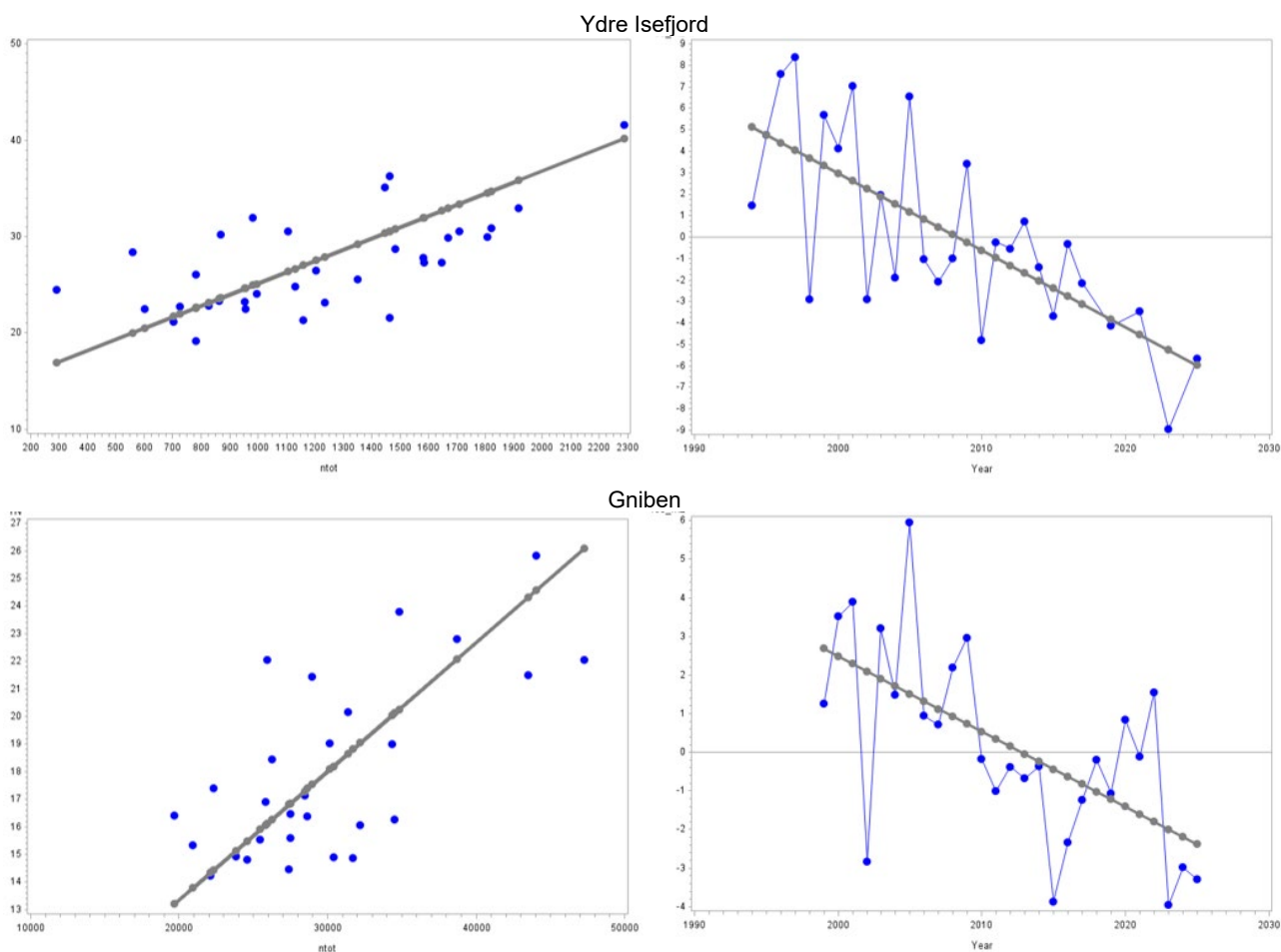


Ydre Roskilde Fjord



Indre Isefjord





Figur 2.8. Venstre side: Sammenhæng mellem tilførsler af kvælstof (tons/år) og total kvælstof koncentration for stationen. Højre side: Ændringen i residualer over år, med tilhørende trinvis funktion eller konstant lineært aftagende funktion

Næste led i analysen er at se på afvigelserne fra linjen (residualer), og hvordan de har udviklet sig over tid. Her er det anvendt to tilgange. Dels en lineær regression mod år for alle data-punkter og en to-trins-funktion, hvor residualerne aftager lineært med år i en periode frem til et knæpunkt, hvorefter de er på et konstant niveau. Resultaterne er vist på Fig. 2.8. For Ydre Isefjord og Griben kunne der ikke identificeres et knæpunkt, og der er derfor kun vist en lineært aftagende funktion for alle år.

Tabel 2.2. Analyse af sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og kvælstof koncentration.

	Roskilde In- derfjord (station 60)	Roskilde Yderfjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Griben (sta- tion 925)
Intercept (TN-konc. ved nul tilførsel, μM)	35,1	26,1	21,7	13,5	4,0
Hældning (ændring i TN-konc. pr. tons ændring i tilførsel, $\mu\text{M}/\text{tons}$)	0,071	0,014	0,035	0,012	0,000467
Relativ ændring (%/%)	0,49	0,35	0,43	0,50	0,78
Lineær analyse af residualer over år					
Ændring i residualer pr. år ($\mu\text{M}/\text{år}$)	-0,40	-0,04	-0,22	-0,36	-0,19
Ændring i residualer pr. år (% af TN-konc. /år)	-0,59	-0,11	-0,59	-1,33	-1,08
Trinvis ændring i residualer pr. år.					
Ændring i residualer pr. år før knæpunkt ($\mu\text{M}/\text{år}$)	-1,16	-0,92	-1,06		
Relativ ændring (%/%)	-1,70	-2,28	-2,78		
Knæpunkt (år)	2006	1998	2002		

Fortolkning

Værdierne for intercept (den forudsagte TN-konc. ved nul tilførsler) er mest af teoretisk interesse (Tabel 2.2). Dels vil der altid være en tilførsel af kvælstof til fjorden og så er det en værdi som fremkommer ved interpolation ud over datagrundlaget.

De absolutte værdier for hældning varierer mellem områderne, afhængig af tilførslernes absolutte størrelse. De er derfor svære at sammenligne og vurdere, men det er de værdier, som skal bruges nedenfor i scenarier (afsnit 3).

De relative værdier (procent ændring i konc. pr. procent ændring i tilførsel) er ret ens, og varierer fra 0,35 til 0,78 %/%. Det er dog ikke retvisende at sammenligne værdierne fra Gniben med dem for fjordene, da TN-konc. ved Gniben er påvirket af andre landes tilførsler, især svenske og tyske tilførsler, som er faldet parallelt med de danske tilførsler over årene. I analysen er kun de danske tilførsler medregnet, og den relative ændring i TN-konc. pr. ændring i tilførsler bliver derfor kunstigt høj, da der burde være divideret med et større tal – lig de samlede tilførsler fra alle lande til Kattegat. Dette forhold kan også påvirke værdien for Ydre Isefjord. Det er derfor mere rigtigt at konkludere, at TN-konc. i fjordene kan forventes at ændre sig omkring 0,42 % pr. % ændring i tilførslerne. Når værdien er lavere end 1, skyldes det at der er en pulje af kvælstof i fjordbunden, som påvirker koncentrationen i vandet, og gør at koncentrationen ikke falder proportionelt med tilførslen. Den effekt er kvantificeret i analysen af residualer.

Ændringen i residualerne over tid afspejler det tab af kvælstof der er i systemet over tid efter en reduktion af tilførslerne, indtil der indstiller sig en ny ligevægt mellem tilførslerne fra land og fjordens forskellige puljer af kvælstof. Med en lineær analyse ligger tabet mellem 0,19 og 0,40 $\mu\text{M}/\text{år}$ og i procenter fra 0,11 til 1,33 procent af TN-konc. pr. år. For to af stationerne, Ydre Isefjord og Gniben, er der en vedvarende reduktion over hele perioden, og der kan ikke identificeres et knæpunkt. Her er faldet i TN-konc. omkring 1,2 procent pr. år over hele perioden. Det er positivt for miljøet, men de høje værdier kan skyldes det forhold, som er nævnt ovenfor, at andre landes reduktion i tilførslerne af kvælstof, bidrager til faldet.

For de tre indre stationer er der tydeligvis et højere fald i starten, og den trinvis analyse er derfor mere retvisende.

Denne analyse viser et fald fra 1994 til mellem 1998 og 2006, dvs. over 4 til 12 år, hvorefter der igen ser ud til at være ligevægt mellem tilførsler og koncentration i fjorden. I den periode hvor koncentrationen falder, er det gennemsnitlige fald på 1,05 μM pr. år, eller 2,3%/år. Det ser dermed ud til at der sker et relativt kraftigt fald i en periode på nogle få år, hvorefter der igen er ligevægt.

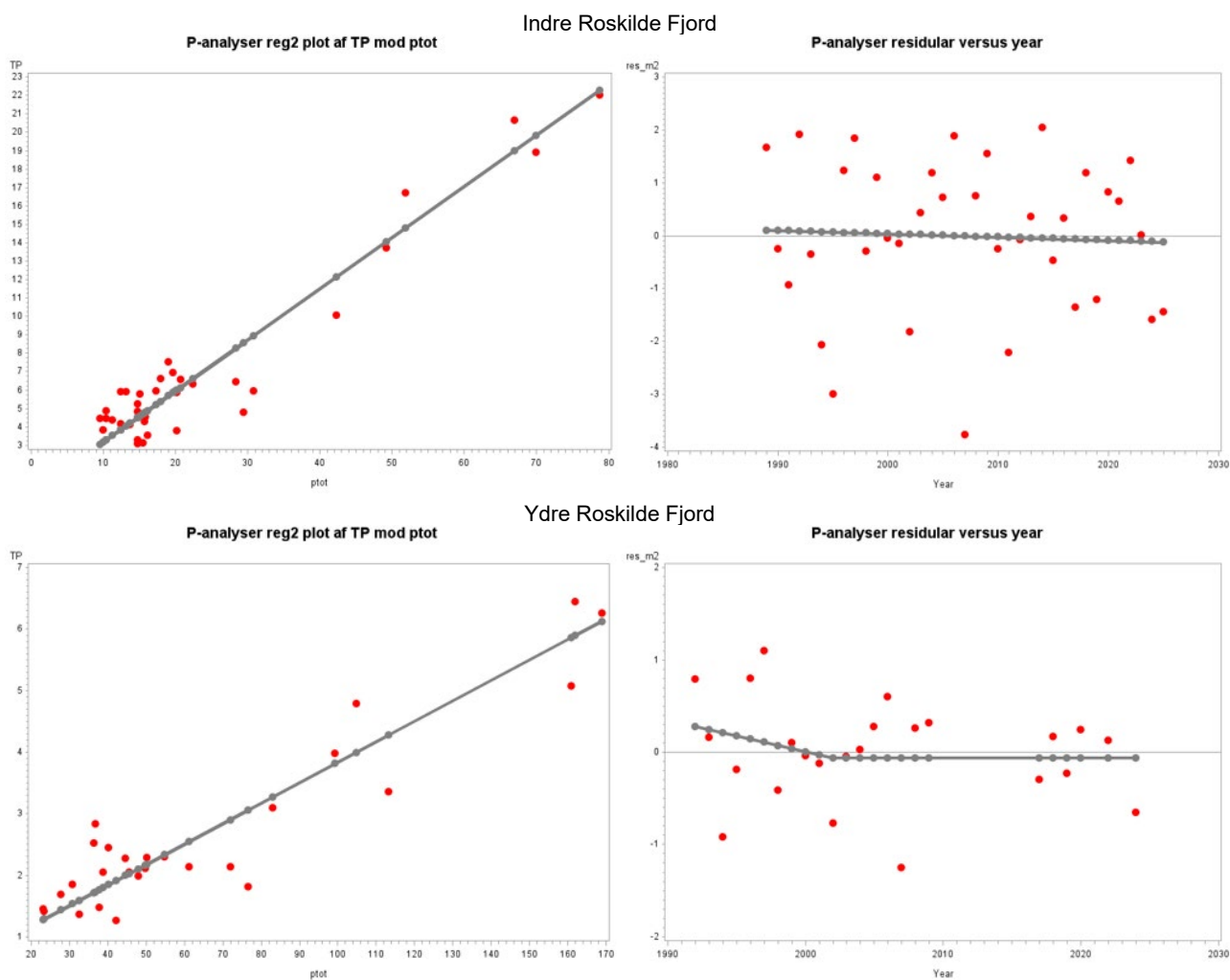
Det er vigtigt at være opmærksom på, at der er en betydelig variation fra år til år, som tilslører mønsteret. Vi ved at kvælstof er bundet i forskellige typer af organiske stoffer, både i vandet og især i fjordbunden. Det vil være logisk at antage, at nogle type stoffer omsættes hurtigt, mens andre har en lang nedbrydningstid. Samtidig vil opløste stoffer og suspenderede partikler være udsat for fortynding, når der sker en vandudveksling mellem fjorden og Kattegat, mens de kvælstofforbindelser der er bundet i sedimentet, ikke transporteres ud af fjorden. Her er det kun denitrifikation og permanent begravelse som fjerner kvælstof fra den biologisk aktive pulje i fjorden.

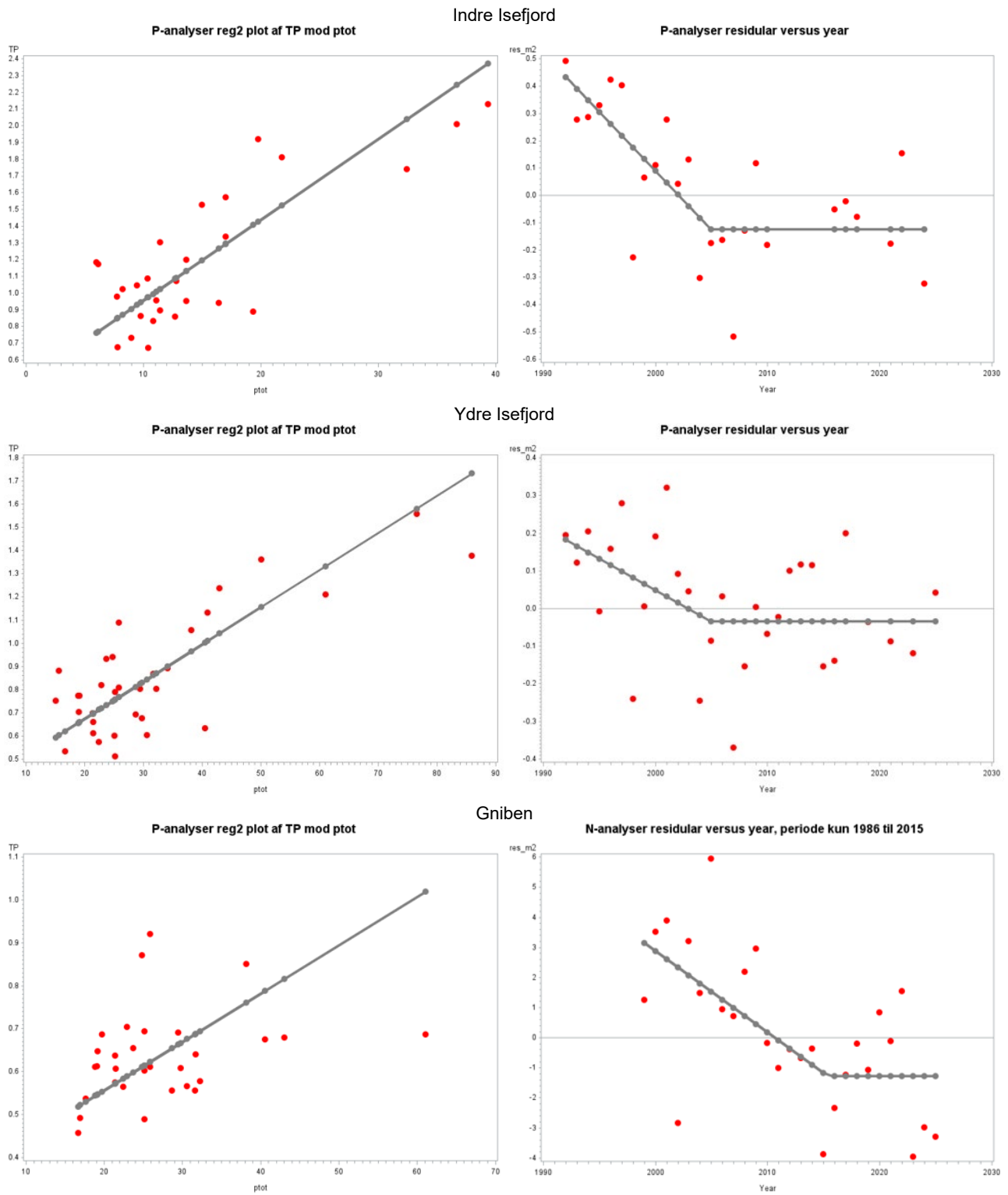
Ovenstående betyder, at der må forventes at ske et yderligere fald i kvælstofpuljen over en længere tidsskala - årtier, men at dette langsommere fald ikke er målbart for den periode vi har data for.

2.5 Sammenhæng mellem tilførsler og koncentration – fosfor

Analyser for sammenhængen mellem tilførsler og total fosforkoncentration er udført på samme måde som for kvælstof og mønstret er også det samme.

For alle fem stationer kan der bregnes en lineær sammenhæng mellem tilførsler og koncentration. Den er dog mere usikker end for kvælstof. Det skyldes at fosforfrigivelsen fra sedimentet til vandsøjlen påvirkes kraftigt iltforholdene, som varierer meget fra år til år. For de fire fjordstation er der tendens til en negativ sammenhæng mellem residualer og iltkoncentrationen målt lidt over bunden. Dvs. at en lav iltkoncentration giver en høj fosforkoncentration.





Figur 2.9. Venstre side: Sammenhæng mellem tilførsler af fosfor (ptot, tons/år) og total kvælstof koncentration for stationen. Højre side: Ændringen i residualer over år, med tilhørende trinvis funktion eller konstant lineært aftagende funktion over tid.

Indre Roskilde Fjord afviger fra de andre stationer på flere måder. Både intercept og hældning er betydeligt højere end for de andre områder. Samtidig er faldet i residualer over tid næsten fraværende. Disse forhold kan forklares med at der udledes store mængder fosfor til et relativt lille og lukket bassin, og at der er en arv fra tidligere tiders udledninger, som ikke er fortyndet ud af systemet pga. den langsomme vandudskiftning.

I Ydre Roskilde Fjord er ændringen i residualer over tid 3 gange højere end for inderfjorden, mens den i Indre Isefjord er 13 gange højere. I Kattegat er ændringen positiv, dvs. der er en stigende koncentration i forhold til ændringer i udledninger fra land. Det skyldes at der i de senere årtier har været en stigende frigivelse af fosfor fra bunden i Østersøen pga. mere iltsvind. Det betyder at de indre farvande de senere år har modtaget vand med højere fosfor-koncentrationer. Det kan samtidig forklare at ændringen i Ydre Isefjord over tid er lav sammenlignet med Indre Isefjord, idet vandet her påvirkes modsat fra de to naboområder.

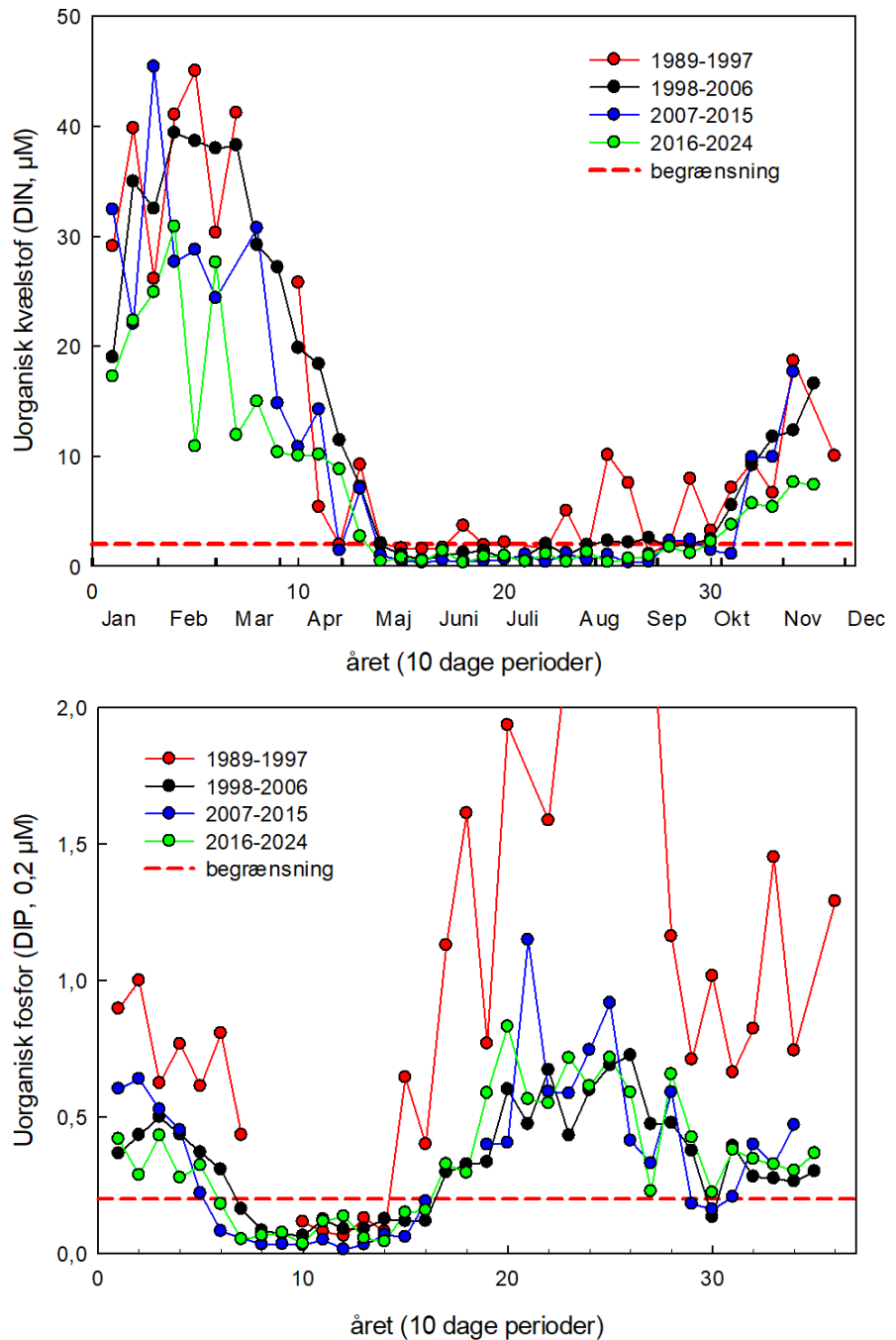
Tabel 2.3. Analyse af sammenhæng mellem fosfortilførsler og fosforkoncentration.

	Roskilde Inder- fjord (station 60)	Roskilde Yder- fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Griben (station 925)
Intercept (TP-konc. ved nul tilførsel, μM)	7,00	2,68	1,19	0,86	0,64
Hældning (ændring i TP-konc. pr. tons ændring i tilførsel, $\mu\text{M}/\text{tons}$)	0,278	0,033	0,048	0,016	0,000204
Relativ ændring (%/%)	0,94	0,81	0,60	0,59	0,40
Lineær analyse af residualer over år					
Ændring i residualer pr. år ($\mu\text{M}/\text{år}$)	-0,0061	-0,0076	-0,0156	-0,0017	0,0055
Ændring i residualer pr. år (% af TP-konc. /år)	-0,09	-0,28	-1,31	-0,20	0,87
Trinvis ændring i residualer pr. år.					
Ændring i residualer pr. år før knæpunkt ($\mu\text{M}/\text{år}$)		-0,034	-0,043	-0,017	-0,0054
Relativ ændring (%/%)		-1,26	-3,61	-1,94	-0,84
Knæpunkt (år)		2002	2005	2005	2024

2.6 Sæsonvariationer

Et afgørende element i vurderingen af den potentielle næringsstofbegrænsning er sæsonvariationen for DIN og DIP. Den har et fast mønster, hvor begge næringsstoffer har høje koncentrationer om vinteren. Når algernes vækst starter i februar, optages næringsstofferne af algerne og koncentrationerne falder til lave niveauer hen over sommeren inden de stiger igen om efteråret. Der er dog vigtige forskelle mellem fosfor (DIP) og kvælstof (DIN). Figur 2.10 viser sæsonforløbet for Indre Isefjord.

Figur 2.10. Koncentrationer af uorganiske næringsstoffer over året for Indre Isefjord for fire 8-års perioder. Den røde stiplede linjer er en koncentration på 2 μM (kvælstof) og 0,2 μM (fosfor), som er den koncentration, der giver en begrænsning af planteplanktons vækst.



Figuren viser, at tidspunktet for fosforbegrænsning har rykket sig 20 dage frem, fra dag 75 og til dag 55, mellem perioderne, som en konsekvens af faldet i fosforkoncentration. Dvs. at fosforbegrænsning optræder tidligere og tidligere. Samtidig er perioden blevet længere, så sluttidspunkter er rykket fra dag 145 til dag 165. Længden af perioden er således forøget fra 60 til mellem 110 og 140 dage.

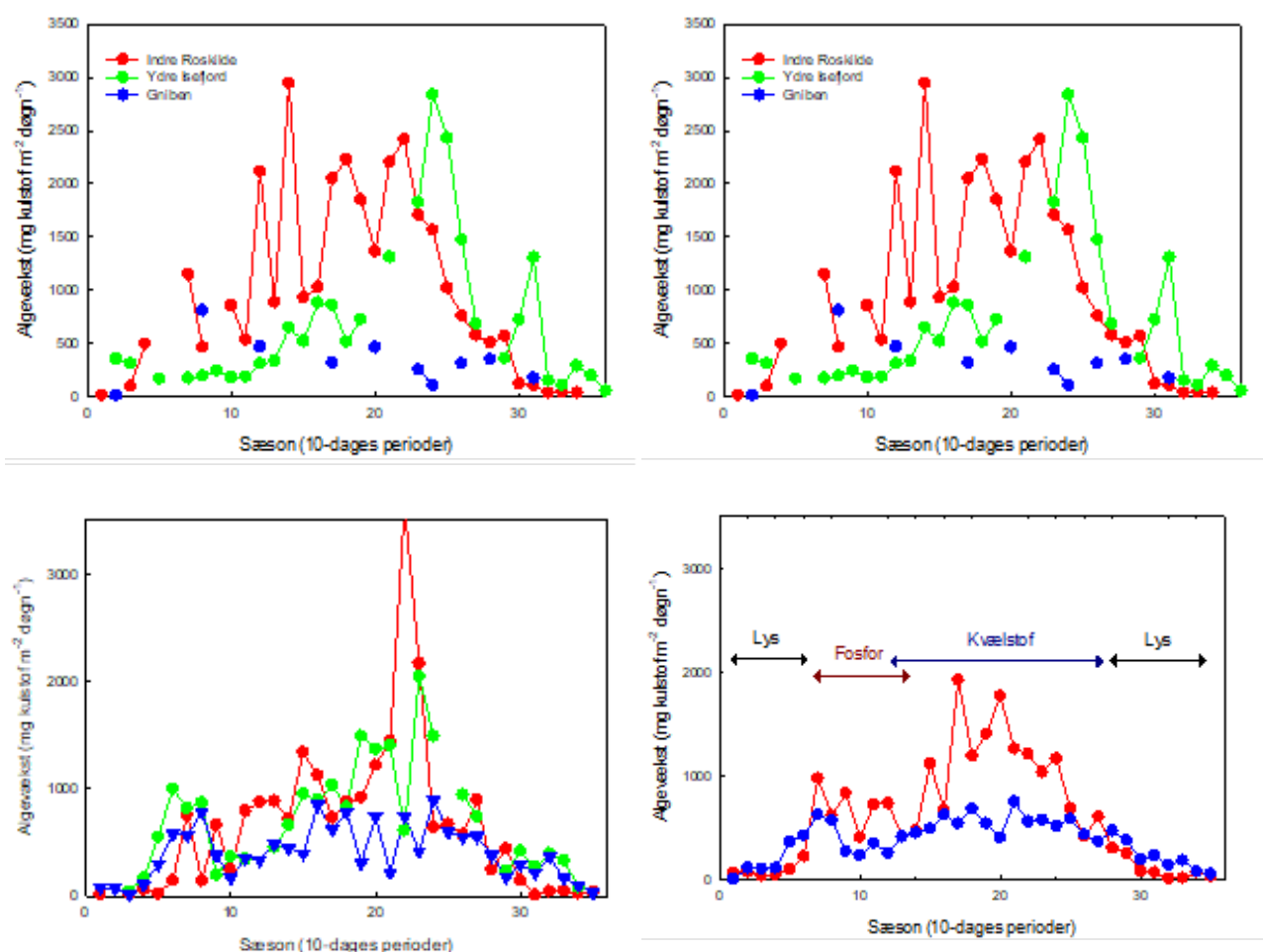
Afslutningen på perioden med fosforbegrænsning sker fordi fosfor begynder at frigives fra sedimentet, når det øverste lag af sedimentet bliver iltfrit. Det er altså ikke når der er iltsvind i vandfasen, men længe før. Mekanismen er, at der altid er iltfrit et stykke nede i sedimentet, hvor der frigives fosfor til porevandet, som diffunderer opad, men at dette fosfor igen bindes til jern inden det når sedimentoverfalden og frigives til vandfasen. Der er så at sige 'låg' på sedimentet. Dette virker så længe det er en iltet zone øverst i sedimentet.

Når den forsvinder, og det gør den hen på sommeren, så vil fosfor lække ud af sedimentet og op i vandfasen

Perioden med kvælstofbegrænsning starter 60 til 80 dage efter fosforbegrænsningen er startet i Indre Isefjord. I de andre områder (ikke vist) er det tidligere, 30 til 50 dage efter fosforbegrænsningen er startet. I Indre Isefjord varer kvælstofbegrænsningen 160 til 170 dage i de sidste 19 år. Der er også en vis frigivelse af uorganisk kvælstof fra sedimentet, når det bliver iltfrit, men den er langt mindre end for uorganisk fosfor.

Sæsonfordeling af algevæksten

En analyse af sæsonfordeling af algevæksten kan anvendes til at vurdere effekten af ændringer i perioden med henholdsvis kvælstof og fosfor begrænsning for den årlige produktion. Figur 2.11 viser sæsonfordelingen for fire octader.



Figur 2.11. Sæsonfordeling af algevækst fordelt på fire octader (1989-1997 – venstre øverst, 1998-2006 – højre øverst, 2007-2015 – venstre nederst og 2016-2024 – højre nederst) og stationer. Huller i fordelingen skyldes manglende data. For den sidste periode er der kun målinger for Indre Roskilde Fjord og Griben. Pile på figuren for den sidste periode angiver den potentielt begrænsende faktor for planteplanktons vækst i Indre Roskilde Fjord. For Griben stationen i Kattegat er det kvælstof som begrænser væksten fra februar til november.

For de to første perioder viser data for Indre Roskilde Fjord (røde symboler) at algevæksten er fordelt næste som en sinuskurve over året. Det betyder at algevæksten ikke på noget tids-punkt for alvor er begrænset af næringsstoffer. Det er kun lyset som regulerer produktionen af organisk stof. Fra 2007-2015 og 2016 til 2024, er væksten hæmmet i en periode fra omkring 90 til dage 140 (april til slut maj).

For Gniben stationen er algevæksten tydeligt næringsstofbegrænset i alle fire perioder. Alge-væksten starter omkring dag 50 (slutning af februar) og når en top omkring dag 70-80 (slutning af marts), hvorefter den falder til et niveau som holdes hen til efteråret. Sådant et forløb er typisk for tempererede områder, hvor de næringsstoffer der er hobet op gennem vinteren forbruges i løbet af et par uger, hvorefter væksten er næringsstofbegrænset resten af sommeren.

Algevæksten i Ydre Isefjord ligger et sted imellem de to andre stationer.

En forudsætning for god økologisk tilstand i fjordene er at algevæksten nedbringes til et niveau tæt på det som findes for Gniben. Hvor man ser på den sidste periode (2016 - 2024), og antager at det kan ske for Indre Roskilde fjord mellem dag 80 og 140 ved at gøre fjorden fosforbegrænset, og fra dag 140 til 280 ved at gøre algevæksten kvælstofbegrænset, så kan man beregne den relative effekt som forskellen mellem de to kurver. For dag 80 til 140 er forskellen 19, 8 g kulstof m^{-2} og for dag 140 til 280 er forskellen 74 g kulstof m^{-2} .

Ud fra denne betragtning, aflastes fjorden for næsten fire gange mere organisk bundet kulstof, ved at gøre algevæksten kvælstofbegrænset end, hvis den gøres fosforbegrænset. Det undervurderer dog effekten af at forlænge perioden med kvælstofbegrænsning, som beskrevet nedenfor.

Perspektiver for henholdsvis fosfor og kvælstofbegrænsning.

Tiden med potentiel kvælstofbegrænsning kan forlænges ved at reduceres kvælstofkoncentrationen. Det kan perioden for fosfor også, men effekten på algevæksten for fosfor er ringe, da en længere periode med fosforbegrænsning vil overlappe med perioden med kvælstof-begrænsning.

Et andet forhold som gør, at fosforbegrænsning ikke har så stor effekt på algevæksten, er at algerne kan optage og oplagre fosfor til mange celledelinger. Et sådant 'luksusoptag' betyder, at algevæksten først begrænses efter en længere periode med DIP-koncentrationer under det begrænsende niveau. Forskellen til kvælstof skyldes, at forholdet mellem kulstof og kvælstof er mellem 6 og 7 på molbasis i algeceller (Redfield's ratio), mens C:P forholdet er 116. Dvs. at for hver 6 kulstofatomer algen indbrygger skal cellen bruge et kvælstofatom, mens cellen kan vokse med 116 kulstofatomer for hvert fosforatom den skal bruge.

Når næringsstofftilførslerne reduceres ned til et niveau, som vil give god økologisk tilstand, må man forvente at fosforbegrænsningen starter omkring 1. marts eller lige derefter og fortsætter indtil midt i maj eller 1. juni. Ligeledes må man forvente at kvælstofbegrænsningen starter omkring 15 marts og fortsætter helt til slutningen af november. Det er vurderet ud fra mønsteret for hvornår begrænsningen starter og slutter for alle fem stationer og over hele perioden. Man kan derfor ikke opnå en tilstrækkelig reduktion af algevæksten ved kun eller primært at reducere fosfortilførslerne. Det er nødvendigt også at reducere kvælstoftilførslerne, og når man gør det, vil

perioden med kvælstofbegrænsning starte tidligere og dermed væsentligt reducere effekten af lavere fosfortilførsler, idet perioden, hvor det kun er fosforbegrænsning, vil blive meget kort.

Man kan dog ikke skille de to næringsstoffers effekt helt ad. I laboratorieforsøg er det typisk kun et stof, som er begrænsende ad gangen, men ude i fjorden kan der godt være en simultan begrænsning, så begge stoffer påvirker væksten lidt mere end hvis kun et stof er begrænsende. Det skyldes, at i fjorden varierer koncentrationer og lys konstant, og algernes vækst er ofte ude af ligevægt med optaget. Det taler for en reduktion af fosforkoncentrationen har en mindre positiv effekt på miljøtilstanden via en reduktion af algevæksten om foråret.

Fosfor har også stor betydning for forekomsten af opportunistiske makroalger (fedtemøg og lignende). Man bør derfor reducere begge næringsstoffer, men holde størst fokus på kvælstof.

2.7 Perspektiver for opnåelse af god økologisk tilstand

Det overordnede formål med denne rapport er at kvantificere et forløb frem mod god økologisk tilstand (GØT). I forhold til EU's vandrammedirektiv er GØT defineret som værdier for klorofyl og lyssvækkelse under de værdier, som er fastlagt som grænseværdierne mellem god og moderat tilstand. De konkrete værdier for de fire områder er angivet i Timmermann et al. 2021. I tillæg er der estimeret værdier for koncentrationer af næringsstoffer – såkaldte understøttende kvalitetselementer i Vandrammedirektivets terminologi - i Christensen et al. 2024. I en lidt bredere forstand er en god tilstand for borgernes oplevelse at fjorden, at vandet er klart og at der igen er bundlevende fisk. Det forudsætter at ålegræs igen er vidt udbredt, at bunddyrene vender tilbage, og at der dermed er føde for bundlevende fisk.

Man kan opstille en sekvens af milepæle fra den nuværende tilstand og hen imod både op-fyldelse af GØT i formel forstand og en oplevelse for borgerne omkring fjorden:

1. Tilførsler af kvælstof og fosfor til fjorden nedbringes til det nødvendige niveau.
2. Koncentrationer af total kvælstof og total fosfor i fjorden er nedbragt til det nødvendige niveau.
3. Koncentrationer af uorganiske næringsstoffer – de former som planteplankton kan optage og som bestemmer væksten – er nedbragt til et niveau, som i det mest af vækstsæsonen er begrænsende for planteplanktons vækst.
4. Væksten af primært planteplankton, men også opportunistiske makroalger (fedte-møg) og bentiske mikroalger, er nedbragt til et niveau, hvor der ikke dannes mere organisk stof i fjorden end der kan nedbrydes uden negative effekter på økosystemet.
5. Den samlede pulje af organisk stof, både som slam i sedimentet og i vandet – opløst organisk stof, er nedbragt til et niveau, hvor vandet igen er klart nok til at ålegræs kan forekomme og iltsvind i sedimentet ikke kommer tæt på sedimentoverfladen.
6. Ålegræsset breder sig, og dækker igen størstedelen af bunden på dybder mellem 1-2 meter og ud til 6 til 8 meter.
7. Bestanden af bunddyr genetableres.
8. Bestanden af bundlevende fisk genetableres.

I denne analyse kan vi beregne relevante niveauer for punkt 1 og 2. Punkt 1 forudsætter handlinger på land, f.eks. udtagning af landbrugsjord, ændringer i landbrugspraksis og reduktion fra punktkilder. For de ændringer på land der skal ske i landskabet, er der en forsinkelse, fra man gør noget på jordoverfladen og til der kommer færre næringsstoffer ud i fjorden. Denne forsinkelse er fra få år til måske 10 til 20 år.

Derefter er forsinkelsen i fjorden (punkt 2), som er fokus for denne analyse.

Når punkt 3 og 4 indtræder, er der en forsinkelse pga. punkt 5, før økosystemet virkelig begynder at genetablere sig. Hvor lang denne tidsforsinkelse vil vare, er svært at vurdere, men der er nok tale om minimum et årti eller to. Dette er vurderet ud fra at, vi ikke ser forbedringer for lyssvækkelsen på tværs af vores fjorde, på trods af en nedgang i algevæksten. Dvs. samme billede som for Roskilde fjord-Isefjorden. Den samlede tid, fra man gennemfører ændringer på land til økosystemet i fjorden har gendannet sig, er derfor betydelig. Den består af en forsinkelse i landskabet, en forsinkelse pga. næringsstofpuljer i fjorden, en forsinkelse før puljen af organisk stof er omsat og til sidst en forsinkelse før populationer af ålegræs, bunddyr og fisk er reetableret.

Det er dog vigtigt at understrege, at der vil være forbedringer i fjorden, så snart tilførslerne af næringsstoffer til fjorden falder. Det tager bare tid før den fulde effekt indtræder.

2.8 Scenarier – opstilling af grænseværdier for total kvælstof koncentrationen

I rapporten Christensen et al. fra 2024 er der beregnet grænseværdier for næringsstoffer for god/moderat tilstand-overgangen. Disse estimater er baseret på modelberegninger med DHI's mekanistiske modelsystem. Værdierne er givet i tabel 3.1.

Tabel 3.4. Grænseværdier for god/moderat tilstand fordelt på fem stationer fra Christensen et al. 2024. Enhed: μM . Stationsnumre refererer til de oprindelige navne for stationerne i det nationale overvågningsprogram NOVANA.

	Indre Roskilde Fjord (station 60)	Ydre Roskilde Fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (sta- tion 1003)	Gniben (station 925)
TN	35,9	24,9	24,7	19,2	13,9
TP	0,58	1,06	1,00	0,84	0,84
Vinter DIN	28,6	15,9	16,5	10,0	5,50
Vinter DIP	0,58	0,48	0,48	0,48	0,61

De biologiske kriterier for opfyldelse af EU's vandrammedirektiv er baseret på koncentrationen af klorofyl i et vandområde og udbredelsen af undervandsplanter. I praksis ålegræs for de to fjorde. Udbredelsen af ålegræs er derefter omregnet til et krav for vandets klarhed. I tabel 5 er angivet grænseværdierne for klorofyl.

I afsnit 2.1 så vi, at andelen af kvælstof i plantelankton udgør en ret konstant fraktion af den total kvælstofkoncentration, omkring 10 procent på tværs af de fire stationer. Kun Indre Roskilde Fjord var afvigende, med en værdi på 5 procent, idet mere af kvælstoffet fandtes som uorganisk kvælstof. Den afvigende lavere værdi for Indre Roskilde Fjord skyldes, at dette, det meste næringsrige af de fem områder, har så høje koncentrationer af næringsstoffer,

at planteplankton i perioder ikke kan opbruge det (væksten er lysbegrænset). Vi kan derfor antage, at en værdi på 10 procent for kvælstof bundet i planteplankton, er det som gælder for et velfungerende økosystem i en dansk fjord, og der som vil gælde når vi er i nærheden af god økologisk tilstand..

Hvis man desuden antager, at Redfield's ratio gælder, så kan man beregne den mængde kulstof, som er bundet i planteplankton ud fra koncentrationen af total kvælstof. Redfield's ratio siger, at forholdet mellem kulstof:kvælstof:fosfor i alger er 106:16:1 på molbasis. Det betyder at der er 6,6 kulstofatomer i en alge for hvert kvælstofatom.

I 2016 publicerede Jacobsen og Markager en analyse af sammenhængen mellem klorofyl og kulstofindhold i planteplankton for danske havområder, og hvordan denne sammenhæng er afhængig af TN-koncentrationen og årstiden. Ved at anvende disse sammenhænge, kan vi beregne kulstof:chlorofyl forholdet i planteplankton for hver måned ved en given TN-koncentration. Beregningerne er vist i bilag A.

Samlet betyder det, at TN-koncentrationen kan beregnes som:

$$\text{TN } (\mu\text{M}) = \text{Chl konc } (\mu\text{g/l}) * \text{C:Chl (g/g)} / 12(\text{molvægt for kulstof}) / \text{N_fraktion for Chl (=0,1)} * \text{C/N indhold (6,63, mol/mol)}$$

Denne ligning er brugt i tabel 3.2 for omregning af grænseværdier for klorofyl til grænseværdier for TN-koncentrationen.

Tabel 3.5. Grænseværdier for reference og de to højeste tilstandsklasser for klorofyl koncentrationer fra Timmermann et al 2021. Disse værdier er omregnet til grænseværdier for TN-koncentrationer som vist i Bilag A. Enheder: $\mu\text{g Chl/liter}$ og μM . TN.

	Indre Roskilde Fjord (station 60)	Ydre Roskilde Fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Gniben (station 925)
Klorofyl grænseværdier, reference	2,7	1,8	1,6	1,2	0,7
Klorofyl grænseværdier, høj/god	3,3	2,2	1,9	1,4	0,9
Klorofyl grænseværdier, god/moderat	4,3	2,9	2,5	1,8	1,2
TN reference	18,0	13,7	12,8	10,9	7,4
TN H/G	22,0	16,8	15,2	12,7	9,5
TN G/M	28,7	22,1	20,0	16,3	12,7

En tredje tilgang til estimering af en grænseværdi baseret på TN-koncentrationen er at anvende relationen mellem TN-konc. og antal dage med begrænsning (afsnit 2.3). Da vi ikke har en grænseværdi for ønsket antal dage med begrænsning, så må vi gå den modsatte vej, og beregne antal dage med begrænsning ud fra en TN-koncentration.

I tabel 3.3 er der en sammenstilling af TN-koncentrationer og antal dage med begrænsning af planteplanktons vækst.

Tabel 3.6. Værdier for total kvælstofkoncentrationer. Enhed: μM .

	Indre Roskilde Fjord (station 60)	Ydre Roskilde Fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Gniben (station 925)
Status for TN-konc.	61,2	37,3	31,8	22,5	15,6
Værdier fra rapport om støtteparametre (Christensen et al. 2024.)	35,9	24,9	24,7	19,2	13,9
Omregnet fra gældende værdier for grænseværdier for klorofyl (tabel 3.2), som beskrevet ovenfor.	28,7	22,1	20,0	16,3	12,7
Antal dage med kvælstofbegrænsning ud fra fig. 2.7. ved en TN-konc. der giver målopfyldelse (linjen ovenfor).	160	210	230	280	320
Antal dage med kvælstofbegrænsning i dag.	100	150	160	200	260

Som det ses, er værdierne beregnet ud fra grænseværdier for klorofyl lidt lavere end i rapporten om støtteparametre.

Omregnes værdierne baseret på klorofylgrænseværdier til antal med kvælstofbegrænsning fås en gradient mellem stationerne. Sammenligner man med antal dage for den aktuelle tilstand ses, at perioden stiger med 60 til 80 dage, dvs. fra to til næsten tre måneder. Det betyder en markant reduktion i algevæksten og dermed mængden af organisk stof som tilføres fjordbunden.

For station Gniben viser beregningen af det estimerede antal dage en værdi på 320. Det må anses for urealistisk, da planteplanktons vækst primært er lysbegrænset i omkring 3 måneder om året. Denne diskrepans kan skyldes, at estimatet for antal dage med begrænsning er usikkert ved meget lave TN-værdier, hvor sammenhængen er meget stejl (Fig. 2.6)

2.9 Scenarier – beregning af reduktion i tilførsler og tidsforsinkelse

Ud fra de ovenstående resultater kan man beregne effekterne af reduktioner i kvælstoftilførsler på TN-koncentrationen og en tidsforsinkelse for opnåelse af værdier som er i overensstemmelse med god økologisk tilstand.

Tabel 3.7. Scenarie baseret på VP3-værdier for reduktion af kvælstoftilførsler

	Indre Roskilde Fjord (station 60)	Ydre Roskilde Fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Gniben (station 925)
Nuværende kvælstoftilførsel	405	896	398	1049	27644
Foreslået reduktion, VP3, procent	37	45	65	40	36
Foreslået reduktion, VP3 (tons N år ⁻¹)	150	403	259	420	9819
Estimeret effekt på TN-konc. (μM)	11	6	9	5	5
Resterende behov for reduktion af TN-konc. (μM)	22	10	3	1	-2
Beregnet antal år der går, før denne reduktion opnås, beregnet ud fra en lineær sammenhæng (Tabel 2.2)	55	222	12	4	-8
Beregnet antal år der går, før denne reduktion opnås, beregnet ud fra en totrinsmodels (Tabel 2.2).	19	10	3	4	-8

Resultaterne i tabel 3.4 viser, at TN-koncentrationen i Roskilde Fjord ikke vil falde tilstrækkeligt med den indsats som er foreslået i VP3. De foreslåede reduktioner vil dog betyde, at puljen af kvælstof kan forventes at falde over tid, efterhånden som en ny ligevægt indstiller sig. Her er tidsperspektivet fra 10 til 222 år. I et optimistisk scenarie, hvor man anvender den trinvis model, sker der et hurtigt fald i starten, som så ophører efter nogle år. Med en mere forsigtig tilgang, hvor man anvender den lineære model for reduktion over tid, er faldet langsommere, og estimatet for reduktion til grænseværdien er flere hundrede år.

For Isefjorden er de foreslåede reduktioner tæt på at give målopfyldelse for TN-konc., og den manglende reduktion må forventes at indtræde i løbet af ret få år.

For Griben stationer er der en mindre overopfyldelse. Her de den estimerede reduktion i VP3 beregnet som reduktionen for hele Danmark. Da meget af denne reduktion ligger i jyske fjorde, f.eks. Limfjorden, vil effekten ved Griben være mindre end gennemsnittet for hele Danmark. Da fokus for denne rapport er Roskilde Fjord/Isefjord systemet, vil dette ikke blive behandlet yderligere. Det er dog positivt, at ambitionerne i VP3 ser ud til at give målopfyldelse i Kattegat.

Den tidsforsinkelse som er beregnet her er også med i modelgrundlaget for VP3, hvor den er en del af det som er benævnt 'systemeffekter'.

Tabel 3.8. Scenarie ved 50 procent reduktion af kvælstoftilførsler til fjorden eller en tilførsel der netop giver målopfyldelse for Griben.

	Indre Roskilde Fjord (station 60)	Ydre Roskilde Fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Griben (station 925)
Nuværende kvælstoftilførsel	405	896	398	1049	27644
Foreslået reduktion i tilførsler, procent	50	50	50	50	23
Foreslået reduktion (tons N år ⁻¹)	202	448	199	524	6358
Estimeret effekt på TN-konc. (µM)	14	6	7	6	3
Resterendebehov for reduktion af TN-konc. (µM)	18	9	5	0	0
Beregnet antal år der går, før denne reduktion opnås, beregnet ud fra en lineær sammenhæng (Tabel 2.2)	45	208	21	0	0
Beregnet antal år der går, før denne reduktion opnås, beregnet ud fra en totrinsmodel (Tabel 2.2).	16	10	4	0	0

Resultaterne viser at Roskilde Fjord stadig ikke når målsætningen. Tabellen viser også, at en reduktion på kun 50 procent for Indre Isefjord ikke giver målopfyldelse før om ca to årtier (lineært henfald). Omvendt er det netop målopfyldelse for Ydre Isefjord. Dette scenarie viser derfor at de foreslåede reduktioner i VP3, med en 65 procent reduktion for Indre Isefjord og en lidt mindre reduktion for Ydre Isefjord er den rigtige vej at gå.

Endelig er der lavet et scenarie (tabel 3.6) med en 80 procent reduktion af kvælstoftilførslerne, svarende omtrent til en tilstand med en baggrundstilførsel som den var omkring år 1900. Dette er ikke realistisk, men scenariet er lavet for at give et perspektiv på den udfordring der er, for at bringe området i god tilstand.

Scenariet viser, at der vil gå nogle årtier, og måske længere for Ydre Roskilde Fjord, før TN-koncentrationen når målsætningen.

Tabel 3.9. Scenarie ved 80 procent reduktion af kvælstoftilførsler til fjorden eller en tilførsel der netop giver målopfyldelse for Ydre Isefjord og Gniben.

	Indre Ros- kilde Fjord (station 60)	Ydre Roskilde Fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Gniben (sta- tion 925)
Nuværende kvælstoftilførsel	405	896	398	1049	27644
Foreslået reduktion i tilførsler, procent	80	80	80	50	23
Foreslået reduktion (tons N år ⁻¹)	324	717	318	524	6358
Estimeret effekt på TN-konc. (µM)	23	10	11	6	3
Resterendebehov for reduktion af TN-konc. (µM)	10	5	1	0	0
Beregnet antal år der går, før denne reduktion opnås, beregnet ud fra en lineær sammenhæng (Tabel 2.2)	24	123	3	0	0
Beregnet antal år der går, før denne reduktion opnås, beregnet ud fra en totrinsmodel (Tabel 2.2).	8	6	1	0	0

Tabel 3.6 giver et ret pessimistisk billede af udsigterne til målopfyldelse. Der er dog nogle forhold, som gør at det kan lykkes inden for nogle årtier, også med mere realistisk reduktion for kvælstof.

Fosfor og Arresø

Fosforudledningerne har også en negativ effekt på fjordens tilstand. Som beskrevet ovenfor er fosfor begrænsende for algevæksten i en kort periode i marts. Det urealistisk af komme i mål med god økologisk tilstand ved at fokusere på fosfortilførslerne, men det kan give et bidrag. Heldigvis er der en lang række tiltag på land, som både reducerer kvælstof og fosforudledninger; skovrejsning, dyrkningsfrie bræmmer lands vandløb, og naturlig hydrologi i ådale. Typisk vil disse tiltag også bidrage med bedre biodiversitet og rekreative oplevelser. Man bør derfor se indsatserne i sammenhæng, så man reducerer både kvælstof og fosforudledninger og høster fordele på land.

For fosfor gælder det at spildevand (rensingsanlæg og overløb) udgør 2/3-dele af tilførslerne til Roskilde Fjord. Det er derfor vigtigt at nedbringe fosfortilførslerne fosfor fra spildevand.

Arresø og dens opland udgør en stor del af oplandet til Ydre Roskilde Fjord. Da Arresø også er opfattet af vandrammedirektivet, er der krav om en reduktion af primært fosfortilførslerne, da det er ferskvand, hvor fosfor er den begrænsende næringsstof i det meste af vækstperioden. Kravet er en reduktion på ca. 3 tons fosfor. Det er en betydelig del af fosfortilførslen til Ydre Isefjord, og må forventes at give et bidrag hen imod en bedre tilstand i den del af fjorden.

Et mål for Arresø er en genetablering af tidligere tiders undervandsvegetation. Søen er meget lavvandet, så der kan potentielt vokse undervandsplanter i hele søen. Sådan en vegetation vil optage en betydelig del af det kvælstof der tilføres fjorden i dag gennem Arresø, og meget kvælstoffet vil tabes ved denitrifikation i sådan en undervandsvegetation, hvor der er daglige skift mellem iltede og iltfrie forhold i mikrofilmen på undervandsplanternes blade. En indsats for at opnå god økologisk tilstand i Arresø vil derfor potentielt give et betydeligt bidrag både for kvælstof og fosfor, og hjælpe på fjordens tilstand. Man bør derfor overveje at lægge den maksimale indsats i oplandet til Arresø

med henblik på at en reduktion af både fosfor og kvælstof til søen. Det vil indebære at man ophører med intensiv landbrugsdrift i oplandet til Arresø, med henblik på at få en hurtig målopfyldelse for søen, og dermed en hjælp til målopfyldelse i fjorden. En strategi, som måske på sigt kan vise sig at være den billigste samlet set. En reduktion af næringsstofkoncentrationerne i Ydre Roskilde Fjord vil også have en positiv effekt på Ydre Isefjord.

Et fokus på indsatser i Arresøs opland vil følge det generelle princip i VP3 om 'kædetilførsler' og at man bør fokusere på reduktioner i inderst/øverst i kæden af sammenhængende vandsystemer. I denne sammenhæng kan Arresø opfattes som det øverst vandområde i en kæde som omfatter Arresø - Ydre Roskilde Fjord - Ydre Isefjord og Kattegat.

Hjælp udefra

Det er tydeligt fra analysen i denne rapport, at koncentrationerne i Ydre Isefjord er reduceret over tid pga. af lavere koncentrationer i Kattegat, som skyldes den samlede indsats fra Sverige, Tyskland og Danmark de sidste årtier. Det må forventes at fortsætte, da alle landende skal opfylde målene i vandrammedirektivet. En reduktion i kvælstofkoncentrationerne i Kattegat vil betyde et større tab af kvælstof ved vandudveksling mellem Ydre Isefjord og Kattegat. Dette må forventes at forplante sig indad til især Indre Isefjord. Det vil give et positivt bidrag til opfyldelse af Vandrammedirektivets mål om god økologisk tilstand, og kan accelerere processen henimod målopfyldelse.

Regimeskift

Som nævnt overfor er der en række trin henimod genetablering af god økologisk tilstand. Her vil især genetableringen af ålegræs og en forbedring af sedimentets iltforhold kunne starte en positiv spiral i fjordens tilstand - et såkaldt 'regimeskift'.

Mekanismen for ålegræs er, at ålegræsset optager næringsstoffer om foråret og binder dem i planten gennem hele vækstsæsonen. Når næringsstofferne ikke er til rådighed for planteplankton, bliver vandet klarere, og ålegræsset kan brede sig yderligere, og fjorden kan potentielt komme ind i en proces, hvor den økologiske tilstand hurtigt forbedres.

En lignende mekanisme gælder for iltforholdene i sedimentet. Som nævnt overfor, tilbageholdes både fosfor og kvælstof i fjordbunden, når den øverste zone i sedimentet er iltet. En nedsættelse af den samlede algevækst i fjorden vil derfor betyde en mindre tilførsel af organisk stof til sedimentet. Det kan potentielt betyde, at sedimentoverfladen over gradvist større områder af fjorden forbliver iltet igennem hele sommeren. Noget som vil reducere den interne frigivelse af næringsstoffer betydeligt. Det vil give mindre algevækst og dermed starte en positiv spiral, hvor der frigives mindre næring fra bunden og algevæksten falder yderligere.

Begge mekanismer betyder, at der antagelig er en økonomisk gevinst ved at gennemføre hurtige og omfattende reduktioner i kvælstoftilførslen. I et optimistisk scenarie, vil de to ovenstående mekanismer betyde, at dele af fjorden, antagelig i starten Ydre Isefjord, vil skifte tilstand inden for få år, og komme ind i en selvforstærkende positiv spiral, som så vil forplante sig til resten af fjorden. I den situation kan man håbe, at det samlede behov for reduktioner i kvælstoftilførsler til hele fjordsystemet bliver mindre. En hurtig indsats vil

derfor være billigere over tid end en tilgang, hvor man satser på den mindst mulige reduktioner, som så giver en langsom forbedring af tilstanden og udsætter det tidspunkt, hvor er regimeskift indtræder.

2.10 Konklusioner

1. Det vigtigste for at opnå god økologisk tilstand er at få reduceret kvælstoftilførslerne. Jo hurtigere det sker, jo hurtigere kan man forvente at der indtræder en selvforstærkende effekt, hvor fjordens økosystem kan reetablere sig selv.
2. Der må forventes en tidsforsinkelse på en del årtier inden god økologisk tilstand er opnået. I Isefjorden udgør de interne puljer af næringsstoffer i fjorden kun en mindre del af denne forsinkelse, men andre elementer, som forsinkelsen på land og genetablering af ålegræs og dyrebestand vil betyde mere. I Roskilde Fjord, og især i den indre del, udgør de interne puljer af næringsstoffer en betydelig del af forsinkelsen. Her bør der derfor være fokus på den størst mulige reduktion af især kvælstof men også fosfor.
3. Tilstanden i Arresø, og Arresøs potentiale for at fjerne kvælstof og tilbageholde fosfor, bør have stor opmærksomhed. Et maksimal indsats for at reducere tilførslerne af fosfor til Arresø gennem ophør af intensiv landbrugsdrift i søens opland, vil antagelig være en vigtig og økonomisk effektiv indsats for at forbedre fjordenes tilstand.

3 Referencer

Christensen, J.P.A., Timmermann, K., Erichsen, A. & Larsen, T.C. (2024). Tilvejebringelse af hydromorfologiske og fysisk-kemiske kvalitetselementer for danske kystvande. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 40 s. - Videnskabelig

Erichsen A (DHI), Møhlenberg F. (DHI), Timmermann K (AU), Christensen JPA (AU), Göke C (AU) (2019). Gennemgang af grundlaget for afgrænsning, karakterisering og typeinddeling af kystvande i vandområdeplanerne.

Hansen J.W. & Høgslund S. (red.) (2025). Marine områder 2024. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 182 s. Videnskabelig rapport fra DCE nr. 684.

Jacobsen, H.H. & S. Markager (2016). Annual dynamics of carbon to chlorophyll ratio in temperate coastal waters. *Limnology and Oceanography*, **61**, 1853-1866, doi: 10.1002/lno.10338

Kaas, H. & S. Markager, Eds. (1998). Technical guidelines for marine monitoring. *National Environmental Research Institute, Denmark*.
<https://dce.au.dk/udgivelser/tidligere-udgivelser/udgivelser-fra-dmu/faglige-rapporter>.

Udkast til Vandområdeplaner 2021-2027 (2025). Ministeriet for grøn trepart • Vester Voldgade 123 • 1552 København K. mgtp@mgtp.dk

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>

Trolle, D. & Nielsen, A. (red.) (2025a). Oplandsanalyse for Isefjorden. Kystvandråd notat, 18. november, 38 sider.

Trolle, D. & Nielsen, A. (red.) (2025b). Oplandsanalyse for Roskilde Fjord. Kystvandråd notat, 18. november, 37 sider.

Windolf, J, G. Blicher-Mathiesen & S. E. Larsen (2012). Markbalancer og den diffuse kvælstofafstrømning. DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 46 s.

Bilag A

Beregning af kulstof: klorofylforholdet for de fem områder at udført efter de formler som er opstillet i Jacobsen og Markager (2015).

Beregning af C:chl ratio efter Jacobsen og Markager 2016

Vinter C:Chl ($\mu\text{g C} / \mu\text{g Chl}$)	15				
Forskydning af maksimumsværdi i forhold til 1. juli	0,35				
	Roskilde In- derfjord (station 60)	Roskilde Yder- fjord (station 65)	Indre Isefjord (station 1006)	Ydre Isefjord (station 1003)	Gniben (sta- tion 925)
TN (μM)	28,8	22,0	20,0	16,2	12,7
Z	15,1				
C	793,1				
Z+ C/TN	42,6	51,1	54,7	64,0	77,5
Månedsværdier ($\mu\text{g Chl}/\mu\text{g kulstof}$)					
1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
2	18,7	19,5	19,8	20,6	21,8
3	27,1	29,6	30,6	33,2	37,1
4	38,0	42,6	44,5	49,5	56,8
5	48,4	55,0	57,9	65,1	75,7
6	55,5	63,6	67,1	75,9	88,7
7	57,5	66,0	69,6	78,9	92,4
8	53,9	61,6	64,9	73,4	85,7
9	45,5	51,6	54,1	60,8	70,4
10	34,6	38,6	40,2	44,5	50,7
11	24,2	26,1	26,9	28,9	31,8
12	17,1	17,5	17,7	18,1	18,8
C:Chl ratio for maj-sep. (periode for beregning af klorofyl indikator i Vandrammedirektivet.	52,2	59,6	62,7	70,8	82,6

ROSKILDE FJORD – ISEFJORDEN

En analyse af miljøtilstand, næringsstofkoncentrationer og perspektiver for en forbedring af tilstanden ved en reduktion af næringsstoffertilførsler

Analysen viser at Isefjorden kan komme i god økologisk tilstand med de foreslåede reduktioner af kvælstoffertilførslerne på henholdsvis 65 og 40 procent for inder og yderfjorden efter en tidsforsinkelse på et årti eller to. For Roskilde Fjord er det ikke muligt at beregne reduktioner i de menneskeskabte tilførsler, som vil bringe fjorden i god økologisk tilstand inden for mange årtier. En samtænkning med Arresøs behov for reduktion af fosfortilførslerne kan dog være en vej frem, som vil have en markant positiv effekt. Det vil kræve ophør af intensiv landbrugsdrift af hele Arresøs opland, og er derfor en løsning der bør overvejes.