

Udgivet 02-12-2025

Forår klorofyl-peaks i Vadehavet

Rapport SEGES Innovation

Forfatter: Flemming Gertz, Fenjuan Hu, Line Kolding Thostrup, SEGES Innovation.

Citation: Gertz F, Hu F, Thostrup L K. 2025. Forår klorofyl-peaks i Vadehavet. Rapport fra SEGES Innovation.



Grådyb. Foto: Bent Medvind Sørensen

1	BAGGRUND OG OPDRAG.....	3
2	KONKLUSION.....	3
3	TIDLIGERE UNDERSØGELSER I VADEHAVET	4
3.1	STATISTISKE MODELLER I VP.....	4
3.2	MEKANISTISKE MODELLER I VP	4
3.3	MEKANISTISKE MODELLER – DELTARES	5
3.4	TRENDS I UDENLANDSKE BIDRAG	5
3.5	UNDERSØGELSER AF TIDSSERIER PÅ MÅLESTATION VED SYLT (SCHLESWIG-HOLSTEIN)	6
4	POTENTIEL NÆRINGSSTOFBEGRÆNSNING.....	14
5	STATISTISKE RELATIONER MELLEM TILFØRSEL AF NÆRINGSSTOFFER OG KOLORFYL	22
6	REFERENCER.....	25
	BILAG 1. MÅLTE VÆRDIER AF SALINITET OG FLUORENS	26
	BILAG 2. STATISKE SAMMENHÆNGE MELLEM NÆRINGSSTOFTILFØRSEL OG KOLORFYL	28
	BILAG 3. EKSEMPEL PÅ FORÅRSPEAK, KNUDEDYB 2019	47

1 BAGGRUND OG OPDRAG

Opgaven er udført for Kystvandrådet for Vadehavet med Københavns Universitet som projektleder. SEGES Innovation har udført delopgave C ud af i alt fire delopgaver. Opgave C havde fokus på at belyse forårets klorofyl-peaks i Vadehavet. Hvert år observeres størstedelen af årets klorofyl-peaks om foråret, typisk i marts-april. Disse peaks er afgørende for fastsættelse af den tilstand, som afgør om Vadehavet er i god økologisk tilstand. Dette skyldes, at tilstandsvurderingen beregnes ved brug af 90 %-fraktil for perioden marts til september. Anvendelsen af 90 %-fraktil metoden sker jf. interkalibrering med nabolandene i Vadehavsområdet i forbindelse med EU's Vandrammedirektiv. I de øvrige danske vandområder anvendes almindeligt gennemsnit for perioden maj til september. Det er således specifikt for Vadehavet, at forårs-peak af klorofyl giver anledning til udfordringer i forbindelse med statusbestemmelse og indsatskrav for næringsstoffer.

2 KONKLUSION

Vadehavet er et yderst dynamisk system, hvor flere faktorer spiller en betydelig rolle for økosystemet. I dette studie har der været særligt fokus på at forstå forårets høje niveauer af planktonalger- i det følgende kaldet klorofyl-peaks.

Studiet viser, at kvælstof ikke spiller nogen væsentlig rolle i forhold til at begrænse forårs-peak af klorofyl. Fosfor og silicium er begge potentielt begrænsende for væksten af klorofyl i foråret. Undersøgelsen peger desuden på en afhængighed af temperaturen; Jo koldere vandet er i foråret, desto højere klorofyl-peaks. Dette er også fundet i tyske studier i Listerdyb, lige syd for grænsen. Denne temperaturafhængighed tyder på, at klorofyl er påvirket af filtrering fra muslinger og zooplankton – såkaldt top-down-regulering- idet lav vandtemperatur i foråret hæmmer filtrering/græsning fra muslinger og zooplankton, hvorved lav temperatur i foråret fremmer høje klorofyl-peaks.

Kun i Knudedyb blev der fundet en sammenhæng mellem dansk fosfortilførsel i foråret fra oplandet til Knudedyb og klorofyl i foråret. Der blev ikke fundet andre statistisk signifikante relationer mellem dansk tilførsel og klorofyl, hvilket stemmer overens med tidligere statistiske undersøgelser fra Aarhus Universitet i forbindelse med Vandområdeplaner. Også her blev der kun fundet en sammenhæng for Knudedyb. Data viser desuden en tendens til hyppigere klorofyl-peaks i Knudedyb i foråret i sammenligning de tre øvrige dyb. Dette er dog ikke konsistent alle år. Undersøgelser af klorofyl i Knudedyb (tre målestationer) og området udenfor dybet (otte målestationer) fra 1990'erne, hvor der var flere målinger, viste svagt faldende værdier af klorofyl både forår og sommer ved stigende afstand til land. Dette indikerer en lokal næringsstofpåvirkning af danske bidrag, som kun vanskeligt kan påvises statistisk, fordi påvirkning fra udenlandske kilder og dynamikken i Vadehavet generelt overdøver signaler fra de danske kilder.

Den samlede konklusion er, at flere faktorer påvirker omfanget af forårs-peak i Vadehavet. Dette omfatter primært fosfor, silicium og temperatur. Disse fund stemmer overens med videnskabelige studier af tyske data i Listerdyb.

3 TIDLIGERE UNDERSØGELSER I VADEHAVET

De seneste undersøgelser af sammenhængen mellem tilførsel af næringsstoffer og tilstand i den danske del af Vadehavet er udført i forbindelse med det forberedende faglige arbejde til Vandområdeplan III. I den forbindelse blev der af DHI udviklet mekanistiske modeller for sammenhængen mellem tilstand (Klorofyl) og tilførsel (kvælstof og fosfor), og der blev udviklet statistiske modeller af Aarhus Universitet (AU). Det er to helt forskellige modeltilgange:

- **DHI's mekanistiske model** beskriver vandtransporter og de biokemiske processer meget detaljeret i tid og rum.
- **De statistiske modeller** baserer sig alene på at finde sammenhænge mellem fx næringsstofftilførsel og tilstand uden en egentlig forklaring - også kaldet "sortboks-modeller".

Begge modeltyper har fordele og ulemper.

3.1 Statistiske modeller i VP

Med de statistiske modeller fra AU undersøgte man sammenhænge mellem "load" dvs. enten fosfor eller kvælstof, og klorofyl. Dette for en defineret periode med tilførsel fra januar til september relateret til Klorofyl for maj-september. Dvs. man lavede samme beregning som på de øvrige danske vandområder, hvor det er aftalt med EU at anvende maj-september-gennemsnit. For Vadehavet er det aftalt med EU at anvende perioden marts-september.

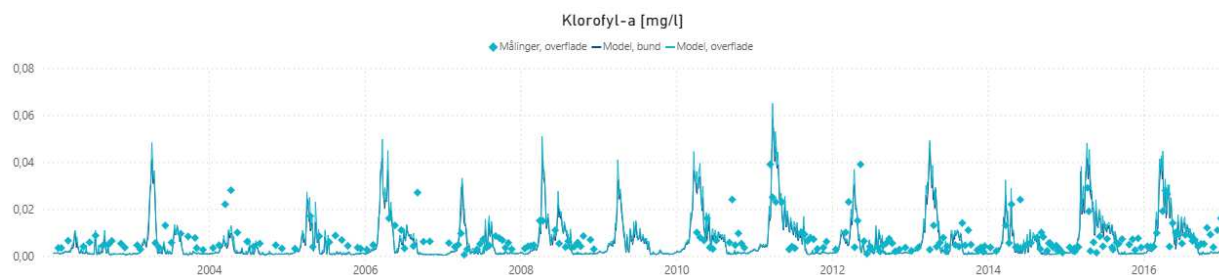
De statistiske beregninger for Vadehavet udført af AU undlader derfor at se på de høje klorofyl-peaks i foråret. Resultatet af AU's undersøgelser viste, at det kun var muligt at finde en statistisk sammenhæng for Knudedyb mellem "load" og klorofyl, og ikke de tre andre dyb.

Den beskrevne model for Knudedyb indeholder en række andre faktorer: Temperatur, indstråling og vandturbulens. Sammen med load er disse fire parametre relateret til klorofyl. Der findes en r^2 på 0,42 (fra 0 til 1, hvor 1 er bedst). Samtidig findes en sammenhæng i Listerdyb mellem temperatur, indstråling og vandturbulens relateret til klorofyl med r^2 på 0,54. Dvs. der findes en bedre sammenhæng uden brug af "load" for Listerdyb. Dette understreger, at det er uklart, hvor stor betydning "load" specifikt har for sammenhængen for Knudedyb (ref1). I en tysk opgørelse for en målestation i Listerdyb, tæt ved Sylt på den Tyske side af grænsen, er der fundet en sammenhæng mellem tilførsel fra de større (og fjerne) tyske floder og klorofyl (ref5), hvilket indikerer at det i høj grad er tilførslerne fra de store europæiske floder (Elben/Rhinen), som påvirker tilstanden på denne station i Listerdyb.

3.2 Mekanistiske modeller i VP

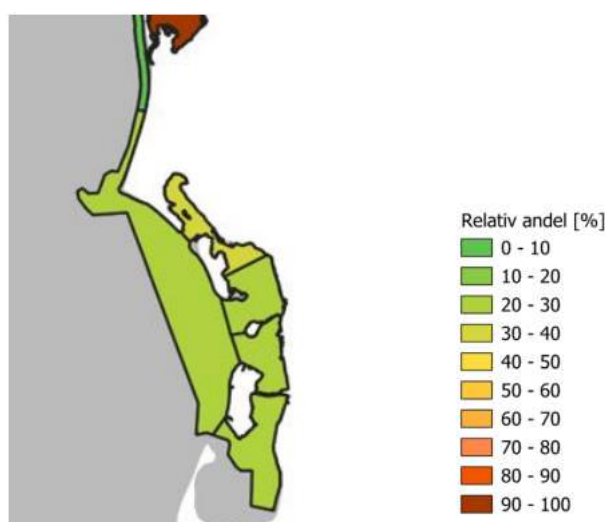
De mekanistiske modeller er, som ovenfor beskrevet, et helt andet modelsystem end de statistiske modeller. Til hvert punkt i Vadehavet - og i flere dybder - beregnes en lang række faktorer: salinitet, næringsstoffer, klorofyl osv. Modellen kalibreres op mod målte værdier de steder, hvor der findes målinger.

Nedenstående figur 1 illustrerer, hvorledes modellen beregner klorofyl på det sted i modellen, hvor der tages vandprøver/næringsstoffer/klorofyl mm. Det er således muligt direkte på den målte station i Knudedyb at sammenligne målte værdier med beregnede værdier. Det ses, at modellen (linje) overordnet beskriver de dynamikker, som ses i målingerne (punkter) – herunder bl.a. forårs-peaks. Der er måske en tendens til, at modellen underestimerer klorofyl om vinteren. I flere tilfælde er modellen i stand til at ramme de rigtige forårs-peaks og koncentrationer om sommeren.



Figur 1. Kilde DHI: <https://rbmp2021-2027.dhigroup.com/>.

Med DHI's model er det muligt at beregne, hvor stor andel de danske næringsstofftilførsler betyder for væksten af klorofyl sammenlignet med udenlandske bidrag. Det er tidligere rapporteret til Kystvanderådet. Heraf fremgår det, at danske kilder udgør 20-30 % for de tre sydligste dyb og området uden for dybene, mens andelen af dansk bidrag udgør 30-40 % for Grådyb (ref2).



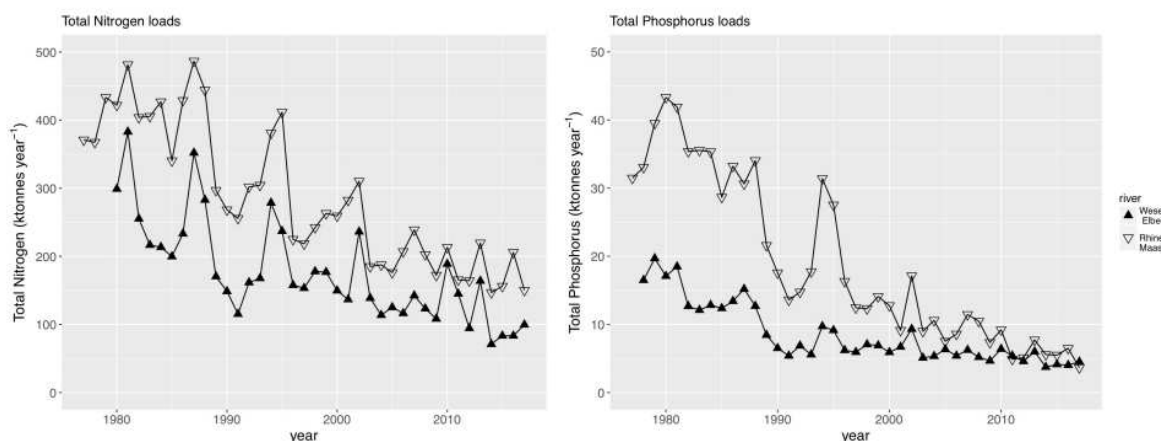
Figur 2. Andel af klorofyl-a koncentrationer, som næres af danske landbaserede næringsstofkilder (ref2).

3.3 Mekanistiske modeller – Deltares

Deltares er et institut i Holland, som også anvender mekanistiske modeller. De anvender et andet modelsystem end DHI og har for OSPAR beregnet spredningen af næringsstoffer i Nordsøen fra landbaserede kilder. De finder, at i den danske del af Vadehavet udgør danske kilder henholdsvis 25 % for fosfor og ca. 30 % for Kvælstof (ref3). Dette vurderes at ligge på omtrent samme niveau som DHI's resultater.

3.4 Trends i udenlandske bidrag

Tilførslen af næringsstoffer til Vadehavet (inklusive tyske og hollandske floder) er faldet siden 1980'erne med en rate på omkring 2,5 % pr. år for kvælstof og omkring 5 % pr. år for total fosfor, med højere reduktionsrate i begyndelsen af perioden.



Figur 3. Tilførsel af TN og TP fra hhv. floderne Elben og Rhinen (ref4).

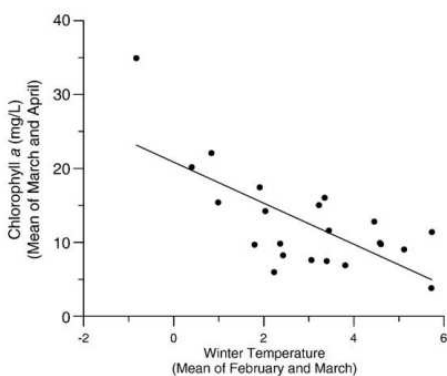
Om udviklingen de forskellige steder i Vadehavet (ref4):

Biomassen af planteplankton (målt som chlorofyl *a*) i Vadehavet er faldet siden 1980'erne og har nu nået et relativt lavt niveau. På tidevandsindløbsstationer med langtidsmonitorering korrelerer sommerens planteplanktonniveauer med tilførslen af total kvælstof (TN) og total fosfor (TP) fra floder, men stationer tættere på kysten opfører sig mere komplekst. Der ses regionale forskelle, med de højeste chlorofyl *a*-niveauer i den sydlige del af Vadehavet og de laveste niveauer i den nordlige del. Modeldata understøtter hypotesen om, at de højere eutrofieringsniveauer i den sydlige del af Vadehavet er forbundet med en mere intens ophobning af organisk materiale fra Nordsøen mod kysten.

3.5 Undersøgelser af tidsserier på målestation ved Sylt (Schleswig-Holstein)

De undersøgte data stammer fra en overvågningsstation i Listerdyb ved Sylt, umiddelbart overfor den danske station i Listerdyb (ca. 10 km). Lige som i den danske del af Vadehavet observeres der hvert år markante forårs-peaks af klorofyl.

I et studie fra 2008 (ref4) undersøgte man disse forårs-peaks og fandt en omvendt sammenhæng med temperaturen: Jo koldere forår, desto højere forårs-peak. Dette er forklaret i en senere artikel fra 2023 (ref6) som værende et mindre græsningstryk på algeplankton, når det er kolde vintre, fra både benthiske og pelagiske filtratorer/græssere (muslinger, zooplankton m.v.).



Figur 4. Sammenhæng mellem forårets biomasse af planteplankton (gennemsnit for marts–april) og vintertemperaturen (gennemsnit for februar–marts). Der blev anvendt månedlige gennemsnitsværdier. Bedste tilpasning: $r^2 = 0,4996$; $p = 0,0002$; $N = 22$. (ref5). (kommentar SEGES: enhed for klorofyl skal nok være $\mu\text{g/l}$ og ikke mg/l).

Generelt er sæsonvariationerne forklaret som følger (ref4):

Om vinteren er niveauet af planteplankton lavt og næringsstofniveauet højt. En forårsopblomstring af kiselalger udvikler sig omkring begyndelsen af april og når sit maksimum, når opløst silica er opbrugt. Forårets opblomstring af kiselalger efterfølges af en Phaeocystis-opblomstring i maj og juni, som når sit maksimum, når nitrat er opbrugt. Om sommeren er næringsstofferne lave, bortset fra fosfat, som begynder at stige igen fra maj og frem.

Forårsopblomstringen består af to faser: en silicium-begrænset kiselalgeopblomstring og en nitrat-begrænset Phaeocystis-opblomstring. Selvom fosfat falder til lave niveauer under forårsopblomstringen, er der tilsyneladende nok til rådighed til at muliggøre en efterfølgende Phaeocystis-opblomstring. Muligvis gør brugen af opløst organisk fosfor det muligt for Phaeocystis at konkurrere succesfuldt med andre ikke-silicificerende alger under de lave PO_4 -forhold (f.eks. van Boekel og Veldhuis, 1990). Men "luxury consumption" (en slags "madpakke" – SEGES kommentar) kan også spille en rolle. De observerede dynamikker afspejler den centrale rolle, som silicium har i kystnær eutrofiering, hvor silicium begrænser kiselalgeopblomstringen, men efterlader nok kvælstof til at muliggøre en efterfølgende ikke-kiselalge- (flagellat-) opblomstring.

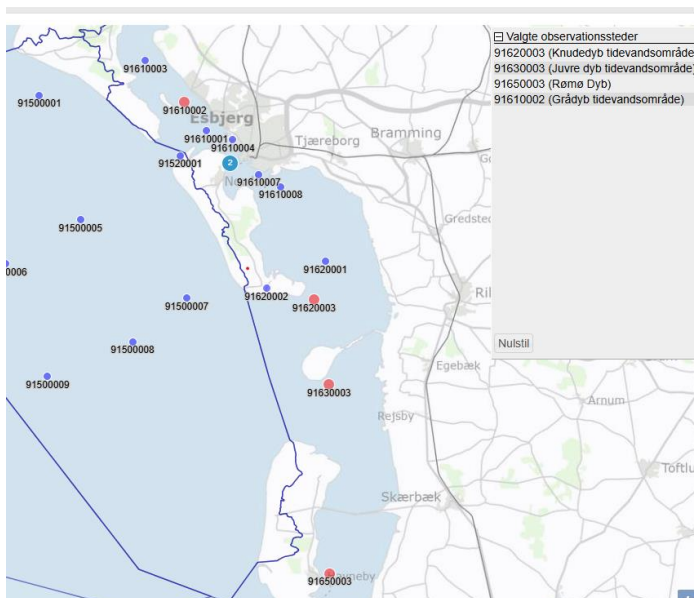
Hvorvidt der også i den danske del af Vadehavet sker en "todelt opblomstring" er uklart. Generelt er det danske overvågningsprogram ikke tilstrækkeligt til at afklare dette. Data tyder dog, som beskrevet ovenfor, på at fosfor i flere tilfælde har svært ved at begrænse væksten af forårs-peaks – trods lave koncentrationer - og at det i flere tilfælde formentlig er silicium og filtrering fra bl.a. muslinger/zooplankton, der begrænser niveauet af klorofyl i foråret. Se eksempel fra Knudedyb i bilag 3.

I en senere artikel i 2023 (ref7) beskrives, at planteplanktonet i foråret sandsynligvis primært er begrænset af silikat indtil 1998, mens fosforbegrænsning (opløseligt reaktivt fosfat) siden 1999 er blevet stadig mere vigtig.

Det er inden for rammerne af denne undersøgelse ikke muligt at afklare yderligere, hvilken betydning siliciumbegrænsning har relativt til fosforbegrænsning.

klorofyl-A 90 fraktilanalyse – de fire dyb

Første del af analysen bygger på vandkemidata fra fire hovedlokationer i den danske del af Vadehavet: Knudedyb, Juvre Dyb, Grådyb og Listerdyb (se figur 1).



Figur 5. Vandkemi data stationer af Grådyb, Knudedyb, Juvre Dyb, og Listerdyb.

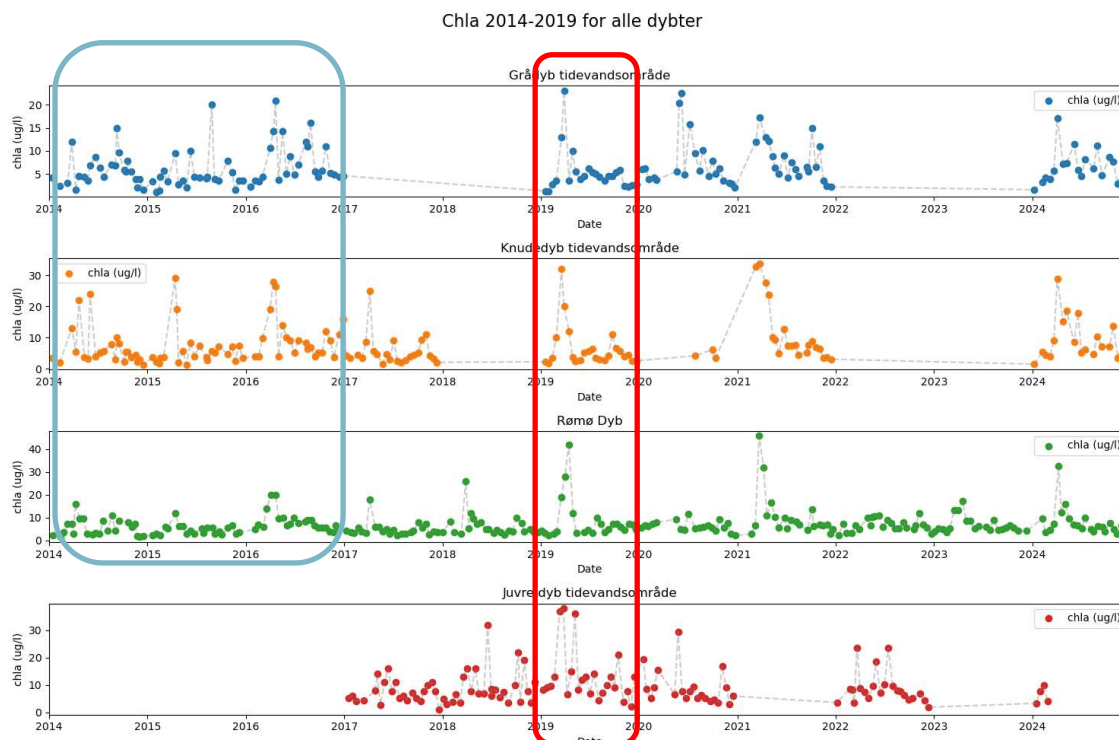
Analysen af klorofyl-a bygger på 90 % fraktil-metoden (P90), som anvendes i VP3 til vurdering af økologisk tilstand i Vadehavet. Resultaterne viser, at de højeste P90-værdier typisk skyldes forårs-peaks. En udfordring er, at dataperioderne for de fire hovedlokationer ikke er fuldt overlappende; kun 2019 har målinger fra alle lokationer (se figur 6).

Der er ud over Miljøstyrelsens P90-værdi beregnet følgende supplerende P90-værdier:

- (2) SEGES-beregning for VP3-perioden,
- (3) SEGES-beregning for perioden 2019–2024 (seneste 5 år),
- (4) P90-værdi for 2014–2024 (seneste 10 år),
- (5) P90-værdi for 2019 (fælles år for alle lokationer),
- (6) P90-værdi for 2014–2016 uden Juvre Dyb.

P90- værdien er størst for Knudedyb i alle de beregnede eksempler på nær nr5 for det ene år 2019 hvor der er målt på alle 4 stationer det samme år. Det er kun i 2019, at der er målt på alle fire stationer samme år (Tabel 1). Generelt er der målt med samme hyppighed for de 4 stationer, således målehyppigheden må udelukkes som en årsag til at P90 generelt er højere i Knudedyb.

En tolkning på ovenstående er, at der er en vis usikkerhed og år til år variation ved brug af P90 metoden, men det peger på, at der i Knudedyb reelt er flere klorofyl-peaks i foråret set over flere år.



Figur 6. Klorofyl-a data for 4 de fire stationer Grådyb, Knudedyb, Juvre Dyb, og Listerdyb.

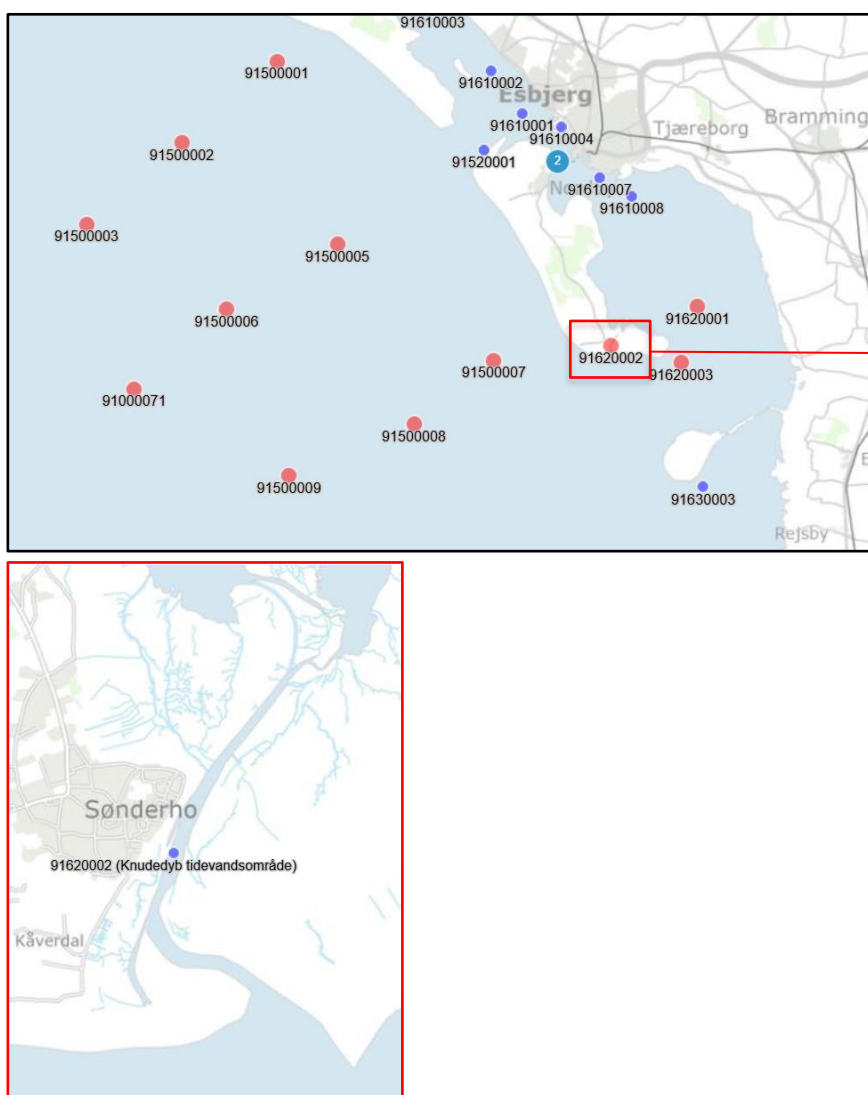
Tabel 1. Oversigt over beregnede P90-værdier for klorofyl-a i Vadehavet for forskellige perioder og metoder.

Række	Beregning	Grådyb	Knudedyb	Juvre Dyb	Listerdyb
1	90 %-fraktil klorofyl ($\mu\text{g/l}$) Marts-Sep. 2014-2019 Vandområdeplan VP3b	14,2	20	16	14
2	90 %-fraktil klorofyl ($\mu\text{g/l}$) Marts-Sep. 2014-2019 SEGES Innovation beregning	14,2	20	16	12,6
3	90 %-fraktil klorofyl ($\mu\text{g/l}$) Marts-Sep. 2019-2024 SEGES Innovation beregning	15,8	27,7	23,6	16,1
4	90 %-fraktil klorofyl ($\mu\text{g/l}$) Marts-Sep. 2014-2024 SEGES Innovation beregning	14,8	23,8	19,5	13,3
5	90 %-fraktil klorofyl ($\mu\text{g/l}$) Marts-Sep. 2019 SEGES Innovation beregning	12,1	16,8	36,7	25,3
6	90 %-fraktil klorofyl ($\mu\text{g/l}$) Marts-Sep. 2014-2016 SEGES Innovation beregning	14,2	21,7	-	11,7
7	EU Interkalibreret mål ($\mu\text{g/l}$)	7,5	7,5	7,5	7,5

Klorofyl-A fordeling i Knudedyb og Vesterhavet

Data i analysen stammer fra tre stationer i Knudedyb og ni stationer fra den åbne del af Vesterhavet/Nordsøen umiddelbart uden for Knudedyb og Grådyb. Station 91620002 er placeret i en kanal ved Sønderho. Stationernes måleperioder varierer, hvilket giver udfordringer for direkte sammenligning. Der er flest målinger først i perioden dvs. i 1990'erne (Se tabel 2).

Hydrografen i området er undersøgt ved at studere målinger af salinitet og temperatur gennem vandsøjlen (CTD-målinger). Målingerne viser, at vandmasserne stort set altid er fuldt opblandede både i Knudedyb og udenfor. Fluorecensmålinger (proxy for planktonalger) gennem vandsøjlen indikerer, at opblomstringen af alger sker i hele vandsøjlen på grund af den store opblanding (se bilag 1 for grafer).



Figur 7. Analyser stationer for klorofyl-a for Knudedyb og Vesterhavet.

Tabel 2. Oversigt over data fra de stationer der indgår analysen.

Stations no.	Station name	Date start	Date end	Analyse period
91500001	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-08-22	2006-10-18	A&B
91500002	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-08-22	1997-12-15	A
91500003	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-08-22	2006-10-18	A&B
91500005	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-09-20	1997-12-15	A
91500006	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-09-20	1997-12-15	A
91000071	Nordsøen	2014-08-15	2025-09-04	C
91500007	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-09-21	2025-10-13	A,B,C
91500008	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-09-21	1997-12-03	A
91500009	Blåvand-Landegrænse, åbne del	1989-09-21	2010-11-25	A,B
91620001	Knudedyb tidevandsområde	1989-09-25	2006-11-02	A,B
91620002	Knudedyb tidevandsområde	1991-10-30	2006-11-28	A,B
91620003	Knudedyb tidevandsområde	1989-09-25	2025-10-13	A,B,C

For hver tidsperiode (se tabel 2) er der beregnet:

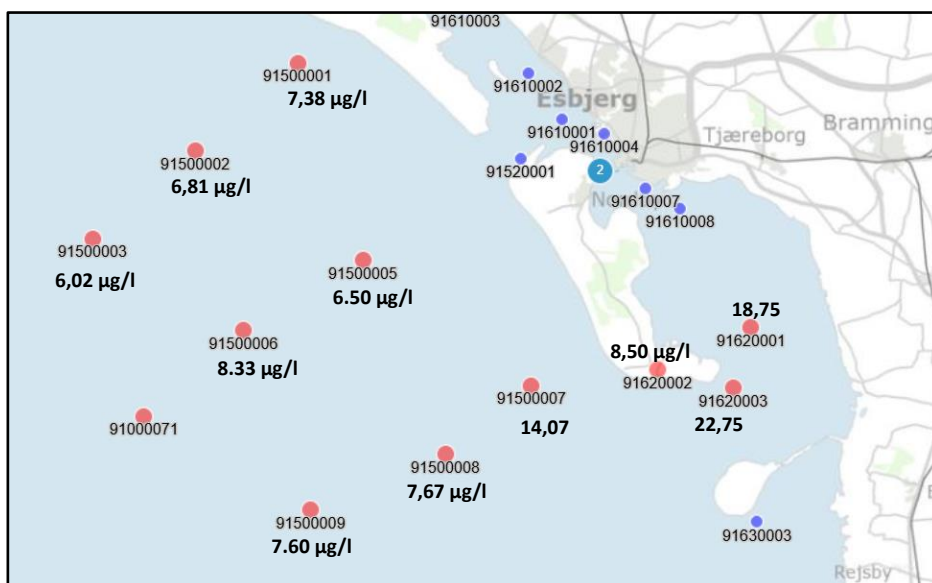
1. P90-værdi for klorofyl-a ($\mu\text{g/l}$)
2. Forårgennemsnit (marts-april)
3. Sommergennemsnit (juni-september)

I perioden A 1989-1997 er der væsentligt flere data for alle stationer. For denne periode kan der observeres en gradient af faldende klorofylværdier fra kysten mod havet, når man ser på gennemsnit. Fra station 91500001 (tættest på land) til station 91500002 og videre til station 91500003 (længere fra land) falder både forårs- og sommergennemsnit (tabel 3). Det samme er gældende fra station 91500005 til 91500006 og fra stationerne 91500007 (tættest på land) til 91500008 og til 91500009. Dog med en enkelt undtagelse fra station 91500005 til 91500006 i foråret (se figur 8).

En anden undtagelse er station 91600002 i kanal ved Sønderho, hvor forårs-peaken er markant mindre end i det omgivende vand.

Det samme billede ses i de to andre perioder (B og C), blot med færre stationer, men tendensen er den samme: De højeste koncentrationer findes tættest på land, og længere fra land falder koncentrationerne. Typisk er koncentrationen faldet 20-25 %, med udsving fra 10-30 %.

Det ses også, at P90-værdien er mere usikker at anvende som status for klorofylniveau.



Figur 8. Klorofylværdier for Periode A 1989-1997, Forår middel.

Tabel 3. Stationer omkring Knudedyb og Vesterhavet. Data ved Knudedyb er markeret med "Fed sort".

Stationer	Periode A 1989-1997			Periode B 1998-2006			Periode C 2006-2025		
	P90 (µg/l)	Forår_middel Pooled (µg/l)	Sommer_middel Pooled (µg/l)	P90 (µg/l)	Forår_middel Pooled (µg/l)	Sommer_middel Pooled (µg/l)	P90 (µg/l)	Forår_middel Pooled (µg/l)	Sommer_middel Pooled (µg/l)
91500001	18.0	7.38	10.11	17.0	11.35	6.35	-	-	-
91500002	23.6	6.81	9.43	-	-	-	-	-	-
91500003	15.0	6.06	8.50	12.0	9.34	4.90	-	-	-
91500005	18.0	6.50	8.78	-	-	-	-	-	-
91500006	18.3	8.33	8.33						
91500007	18.0	14.07	9.65	19.0	12.01	6.58	14.30	10.12	5.02
91500008	17.8	7.67	8.68	-	-	-	-	-	-
91500009	13.7	7.60	7.21	14.0	8.44	6.02	10.46	10.57	4.47
91620001	23.0	18.75	10.32	19.8	15.99	8.86	-	-	-
91620002	14.4	8.50	10.10	11.0	5.92	6.00	-	-	-
91620003	22.0	22.75	9.78	17.0	16.69	8.02	23.00	15.58	6.75
91000071	-	-	-	-	-	-	5.90	4.16	3.41

4 POTENTIEL NÆRINGSSTOFBEGRÆNSNING

For at vurdere, hvilke næringsstoffer der potentielt begrænser algevækst i Vadehavet, er koncentrationerne af DIN (kvælstof), DIP (fosfor) og Si (silicium) analyseret i forhold til kendte tærskelværdier:

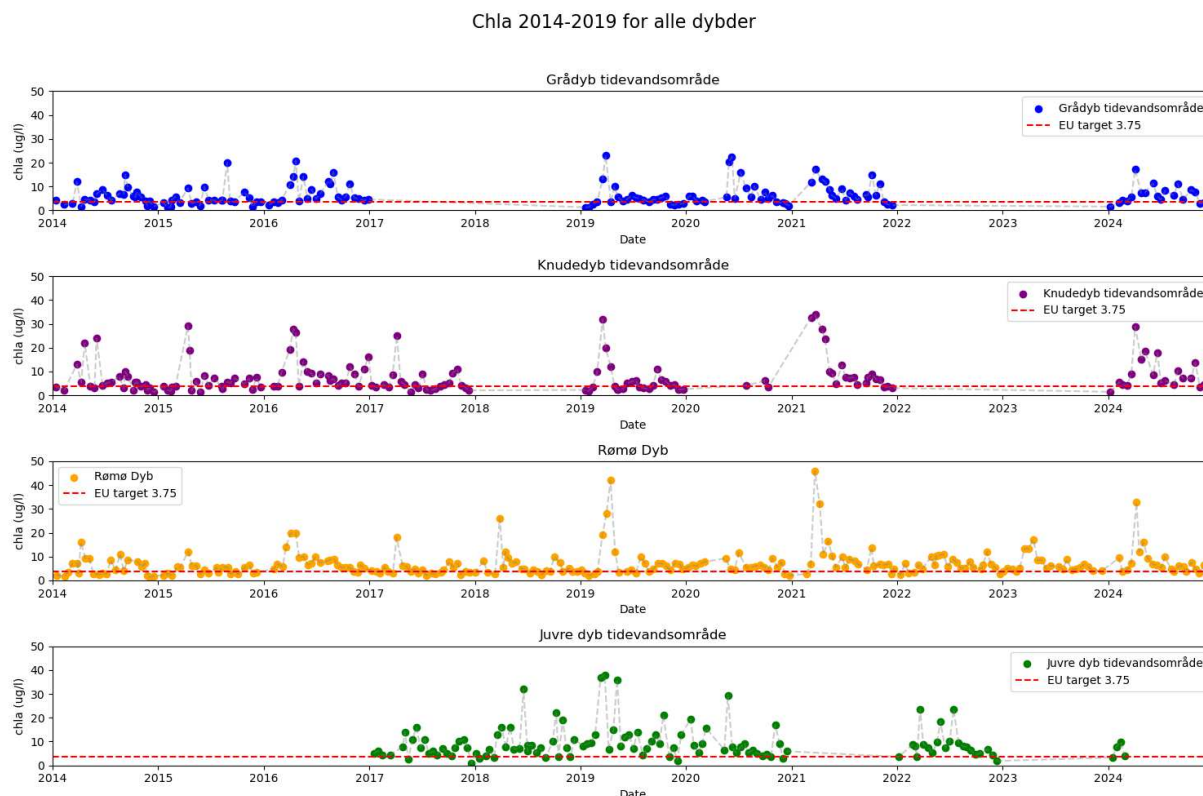
- DIN: 28 µg/l (grænse for N-begrænsning)
- DIP: 6,2 µg/l (grænse for P-begrænsning)
- Si: 112 µg/l (grænse for Si-begrænsning)

Grænsen på 112 µg/l er i den øvre ende, hvilket betyder, at analysen vil vise et optimistisk bud på, hvor meget Silicium begrænser væksten.

EU-målet er ved brug af P90-metoden er 7,5 µg/l, men i nedenstående analyse er værdien sat til 3,75 µg/l dvs. halvdelen af målet for P90. Dette skyldes, at man ikke kan sammenligne enkelte målinger med P90-metoden, og hvis der blev regnet med gennemsnit i stedet for P90-metode, ville mål-værdien være noget lavere end 7,5 µg/l. I Holland har man fundet, at 50 % af P90-værdien vil være rimelig at anvende ved gennemsnitmetode. Ikke publicerede data viser, at for den danske del af Vadehavet kan antages samme værdi – dvs. 50% af P90.

Analysen er opdelt i tre niveauer:

1. **Tidserier** – giver et overblik over generel næringsstofstatus.
2. Forårgennemsnit(marts-april) – relevant for opblomstring af pelagiske alger.
3. Sommergennemsnit (juni-september) – viser ændringer i begrænsningsmønstre efter forårsopblomstringen.



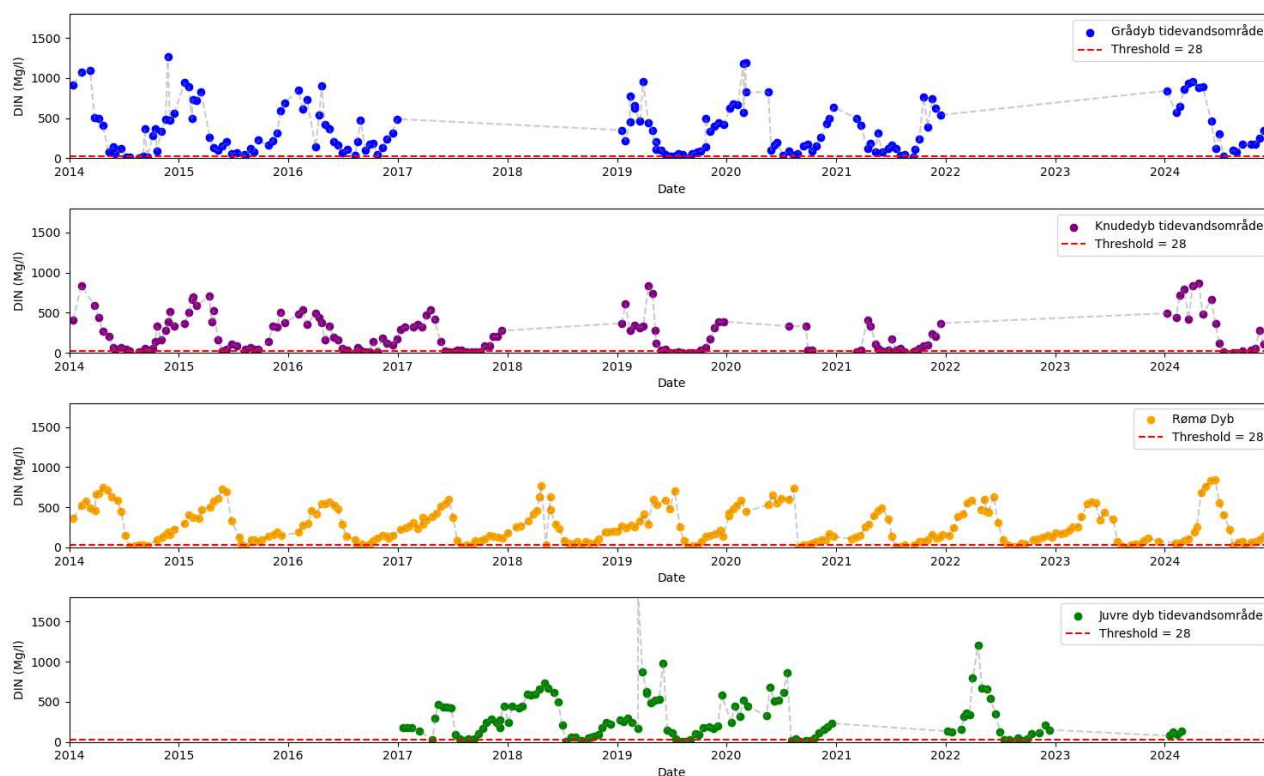
Figur 9. Tidsserie for klorofyl-a (Chl-a) i fire tidevandsområder (2014–2024).

Figur 9 viser Chl-a-koncentrationer for Grådyb, Knudedyb, Rømø Dyb (Listerdyb) og Juvre Dyb sammen med EU-målet efter hollandsk metode ($7,5/2 = 3,75 \mu\text{g/l}$).

Forårs-peaks er tydelige i alle områder, især i Knudedyb og Juvre Dyb

EU-målet overskrides mest i foråret, hvilket indikerer perioder med høj algebiomasse. Store variationer mellem år og lokaliteter; Juvre Dyb har flere høje peaks end Grådyb og Rømø Dyb.

DIN 2014-2024 for alle dybder

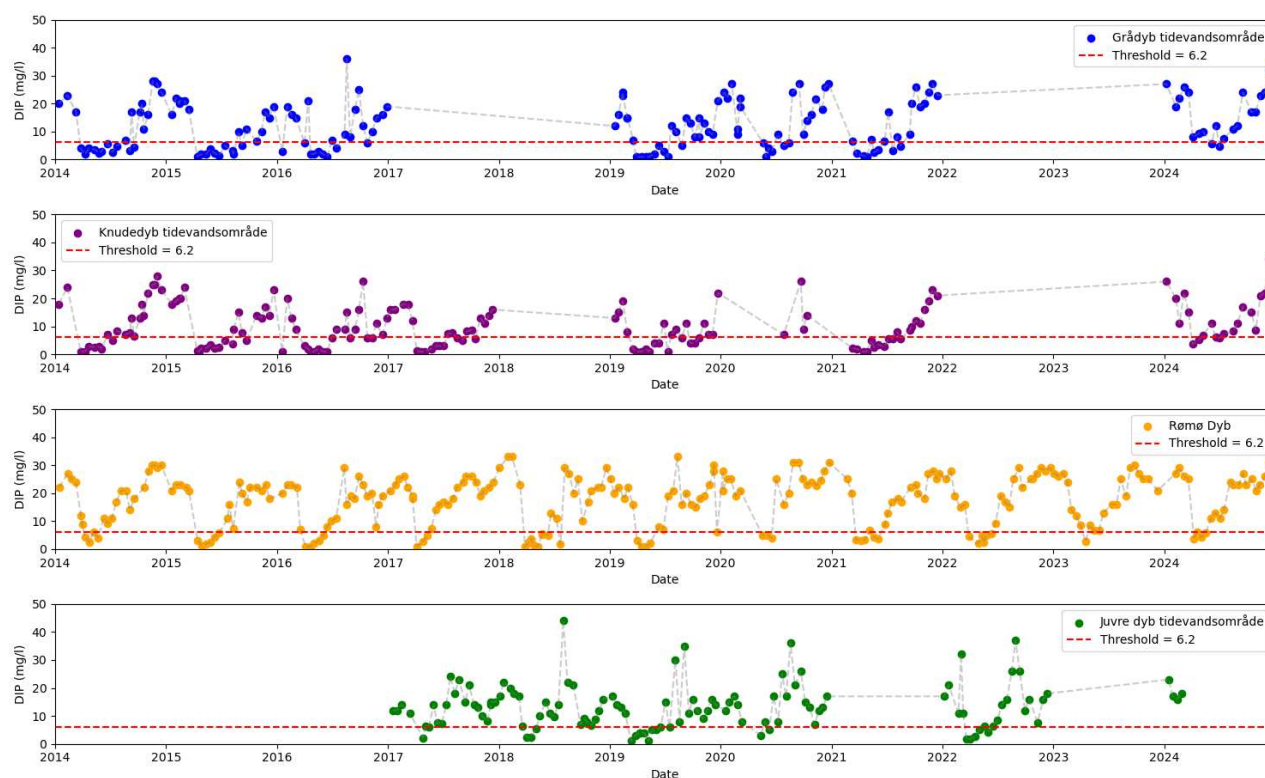


Figur 10. Tidsserie for DIN (opløst uorganisk kvælstof) i fire tidevandsområder (2014–2024).

Figur 10 viser DIN-koncentrationer (opløst uorganisk kvælstof) med tærskel for N-begrænsning ($28 \mu\text{g/l}$).

DIN ligger generelt langt over tærsklen, især i vinter og tidligt forår.

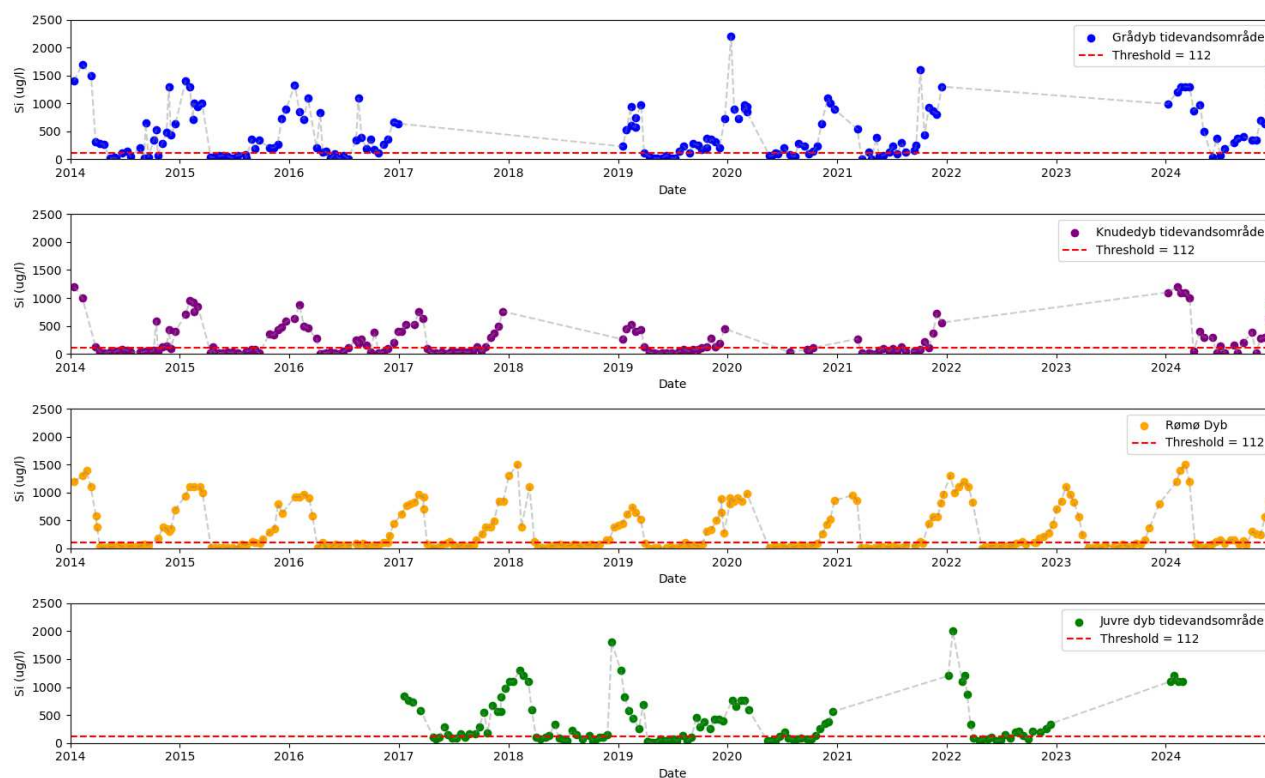
DIP 2014-2019 for alle dybder



Figur 11. Tidsserie for DIP (opløst uorganisk fosfor) i fire tidevandsområder (2014–2024).

Figur 11 viser DIP-koncentrationer (opløst uorganisk fosfor) med tærskel for P-begrænsning (6,2 µg/l). DIP ligger ofte tæt på eller under tærsklen i foråret, hvilket indikerer potentiel P-begrænsning. De seneste år ses tendens til stigning, hvilket må formodes at hænge sammen med nogle år med store afstrømninger i 2023 og 2024.

Silicium 2014-2019 for alle dybder

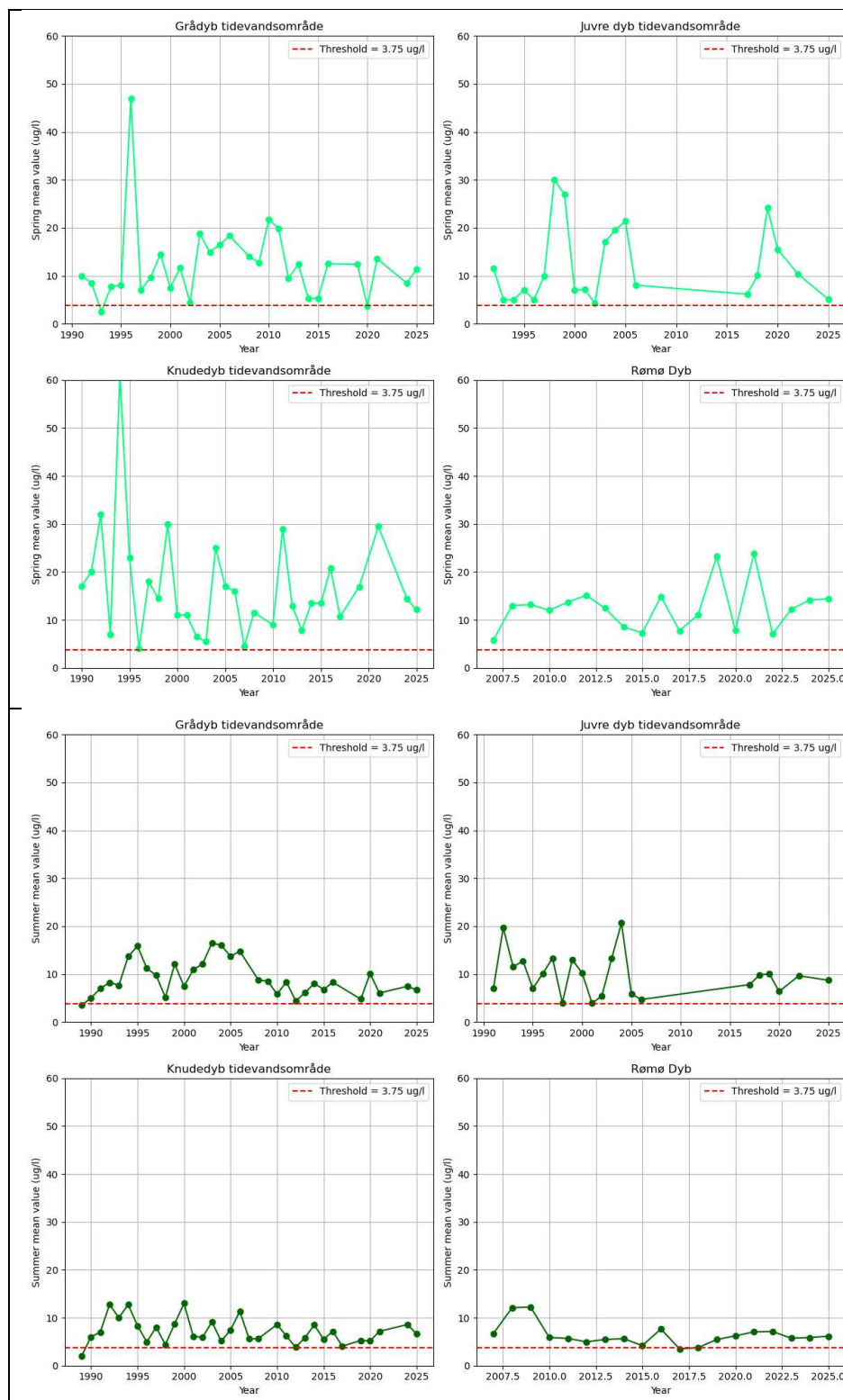


Figur 12: Tidsserie for Si (opløst silikat) i fire tidevandsområder (2014–2024).

Figur 12 viser Si-koncentrationer med tærskel for Si-begrænsning (112 µg/l).

Si er generelt højt i vinter og i det tidlige forår, men falder markant efter forårsopblomstring. Potentiel Si-begrænsning kan forekomme i sommeren, hvilket påvirker kiselalger. Juvre Dyb har de største udsving, mens Knudedyb ligger lavere i flere år.

Forårs- og sommergennemsnit for klorofyl og næringsstoffer 2014-2024

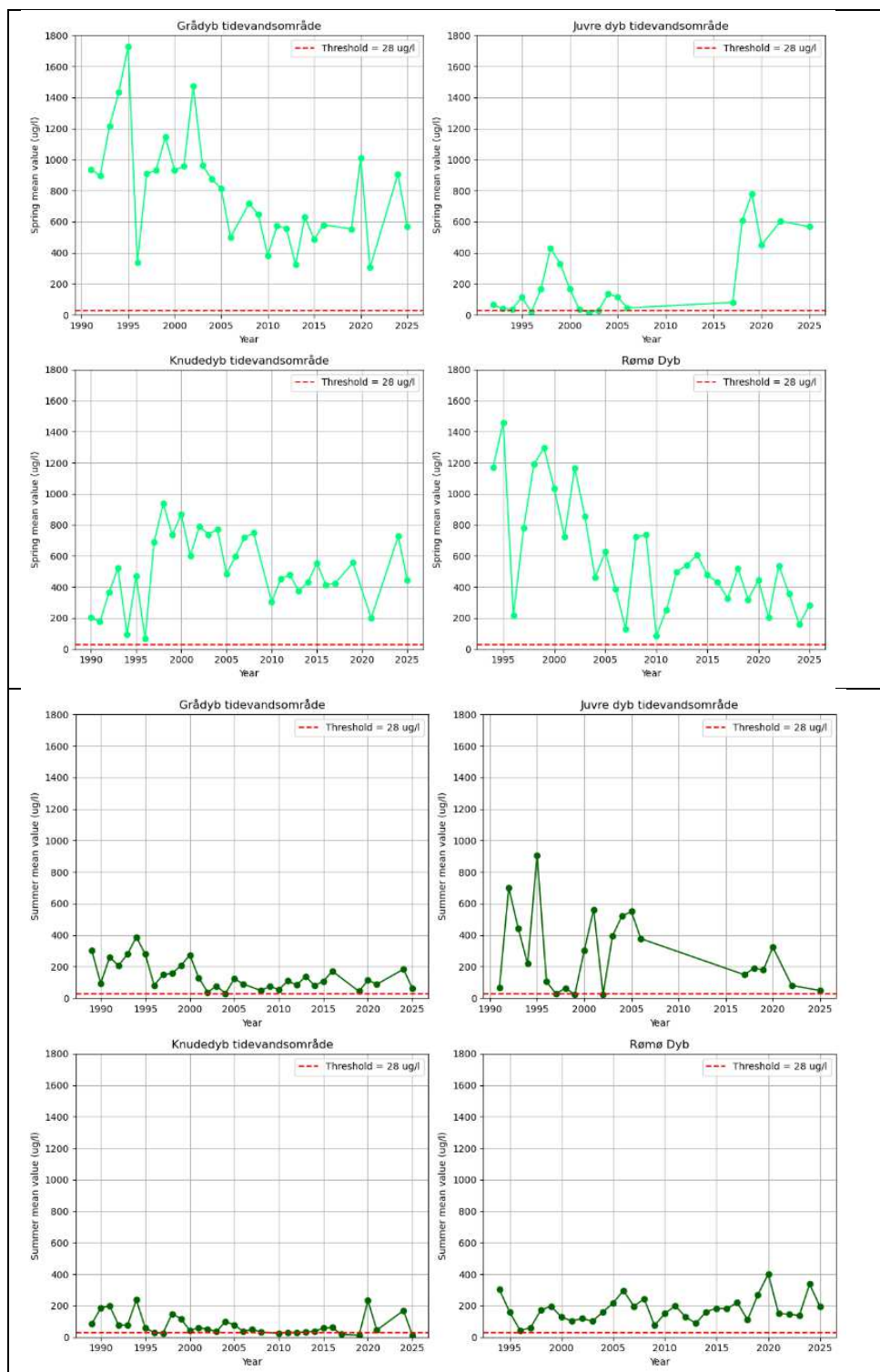


Forårs-gennemsnit af klorofyl er markant højere end sommergennemsnit i alle områder.

Et antaget EU-mål på 3,75 µg/l overskrides konsekvens i foråret.

Sommergennemsnit ligger tættere på antaget EU-mål end foråret. Værdierne ligger de senere år i alle fire dyb mellem 3,5 og 10 mg/l.

Figur 13. Forårs- og sommergennemsnit for klorofyl-a (Chl-a) i fire tidevandsområder.



DIN er generelt langt over tærsklen (28 µg/l) i forår for potentiel begrænsning. I Juvre Dyb er der enkelte år, hvor DIN potentielt er begrænsende.

Om sommeren er DIN på et niveau, hvor der hyppigere er begrænsning. Dette ses oftere i Knudedyb end i de andre dyb.

Tendens til fald over tid, men niveauet indikerer stadig ikke kvælstofbegrænsning det meste af tiden.

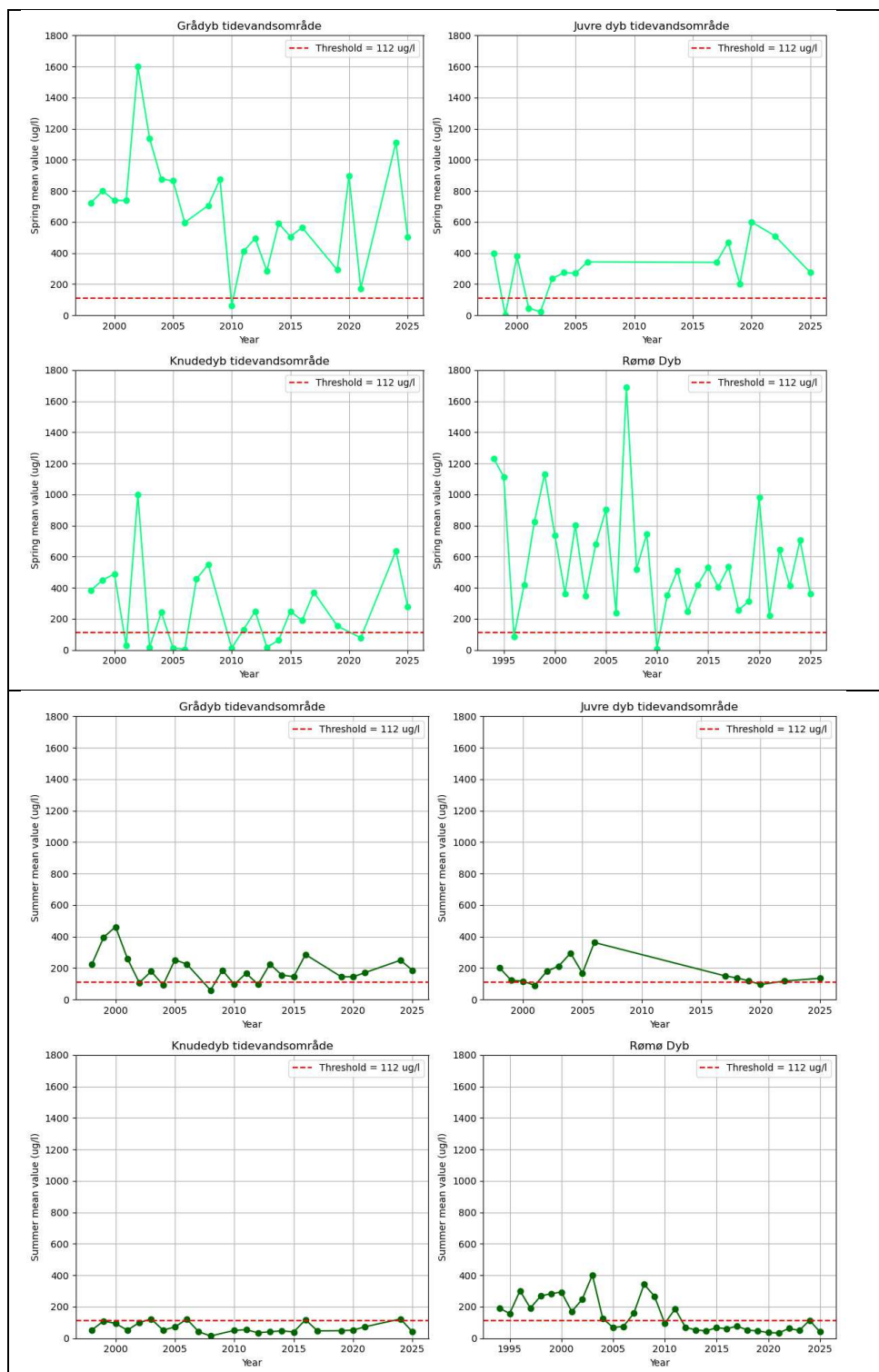
Figur 14. Forårs- og sommergennemsnit for DIN (kvælstof).



DIP ligger ofte omkring eller under tærsklen (6,2 µg/l), for potentiel begrænsning i foråret. Mest udpræget i Knudedyb.

Om sommeren er der generelt højere værdier, og der er færre år med potentiel begrænsning – igen er det Knudedyb, som har de laveste værdier.

Figur 15: Forårs- og sommergennemsnit for DIP (fosfor).



Si er højt i foråret, men falder markant i sommeren.

Potentiel Si-begrænsning i sommeren. Store variationer mellem lokaliteter.

Figur 16: Forårs- og sommergennemsnit for Si (silicium).

5 STATISTISKE RELATIONER MELLEM TILFØRSEL AF NÆRINGSSTOFFER OG KLOROFYL

Der er udført statistiske analyser for sammenhængen mellem tilførsel af kvælstof og fosfor og indholdet af klorofyl i Vadehavet. Dette er gjort for hver af NOVANA-stationerne i de fire dyb, relateret til deres eget opland. Data for klorofyl stammer fra NOVANA-overvågningen, og tilførsler af næringsstoffer pr. måned er leveret af Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience.

I analyserne har der været fokus på at finde sammenhænge til forårets klorofyl-peaks, men der er samtidig lavet analyser for at finde sammenhænge til klorofyl hen over sommeren.

Der blev opstillet en række hypoteser, som blev testet:

1. Klorofyl-peaks i foråret (februar-april) afhænger af totalfosfortilførsel i januar-februar
2. Klorofyl-peaks i foråret (februar-april) afhænger af totalfosfortilførsel i februar-april
3. Klorofyl i sommer (maj-september) afhænger af totalfosfortilførsel i maj-september
4. Klorofyl-peaks i foråret (februar-april) afhænger af totalkvælstoftilførsel i januar-februar
5. Klorofyl-peaks i foråret (februar-april) afhænger af totalkvælstoftilførsel i februar-april
6. Klorofyl i sommer (maj-september) afhænger af totalkvælstoftilførsel i maj-september
7. Klorofyl-peaks i foråret (februar-april) afhænger af orthofosfattilførsel i januar-februar
8. Klorofyl-peaks i foråret (februar-april) afhænger af orthofosfattilførsel i februar-april

AU har tidligere i forbindelse med Vandområdeplaner testet hypoteser for sammenhæng mellem sommer-klorofyl (maj-september) og tilførsel af kvælstof/fosfor for januar-september og fandt kun sammenhæng for Knudedyb. (ref1).

AU brugte begrebet "load" om tilførsel af fosfor og kvælstof, fordi man ikke kan skelne mellem, om det er fosfor eller kvælstof, der er den afgørende faktor i de statistiske modeller. Dette skyldes, at tilførsel af fosfor og kvælstof korrelerer. Dette er også fundet af SEGES Innovation med R^2 på mellem 0,34 og 0,8 for de fire oplande (se bilag 2).

Den overordnede idé med de udvalgte hypoteser var at teste, om en mere direkte tilførsel havde effekt, ud fra den betragtning, at opholdstiden i dybene er meget kort grundet kraftig tidevandspåvirkning. Indflydelsen fra andre kilder vil derved overdøve en dansk påvirkning tilbage i tiden.

For de fleste hypoteser blev der ikke fundet en statistisk sammenhæng. I nedenstående tabel er de relationer opsamlet, hvor R^2 er større end 0,15, dvs. hvor hypotesen havde mindst 15 % forklaringsgrad. Der blev fundet relationer med forklaringsgrad større end 15 % på 6 ud af 30 undersøgte statistiske sammenhænge. For alle relationer (se bilag 2).

Tabel 4. Relationer mellem tilførsel af kvælstof/fosfor og klorofyl i de fire dyb i Vadehavet. Udvalgt med forklaringsgrad større end 15 % (r^2 større end 0,15).

Område	Hypotese	R^2	Bemærkninger
Grådyb	P-load feb-apr til klorofyl feb-april	0,19	Negativ relation
Grådyb	N-load jan-feb til klorofyl feb-april	0,28	Negativ relation
Grådyb	N-load feb-april til klorofyl feb-april	0,25	Negativ relation
Knudedyb	P-load feb-apr til klorofyl feb-april	0,20	Positiv relation
Listerdyb	N-load jan-feb til klorofyl feb-april	0,26	Negativ relation
Listerdyb	Ortho-load jan-feb til klorofyl feb-april	0,17	Negativ relation

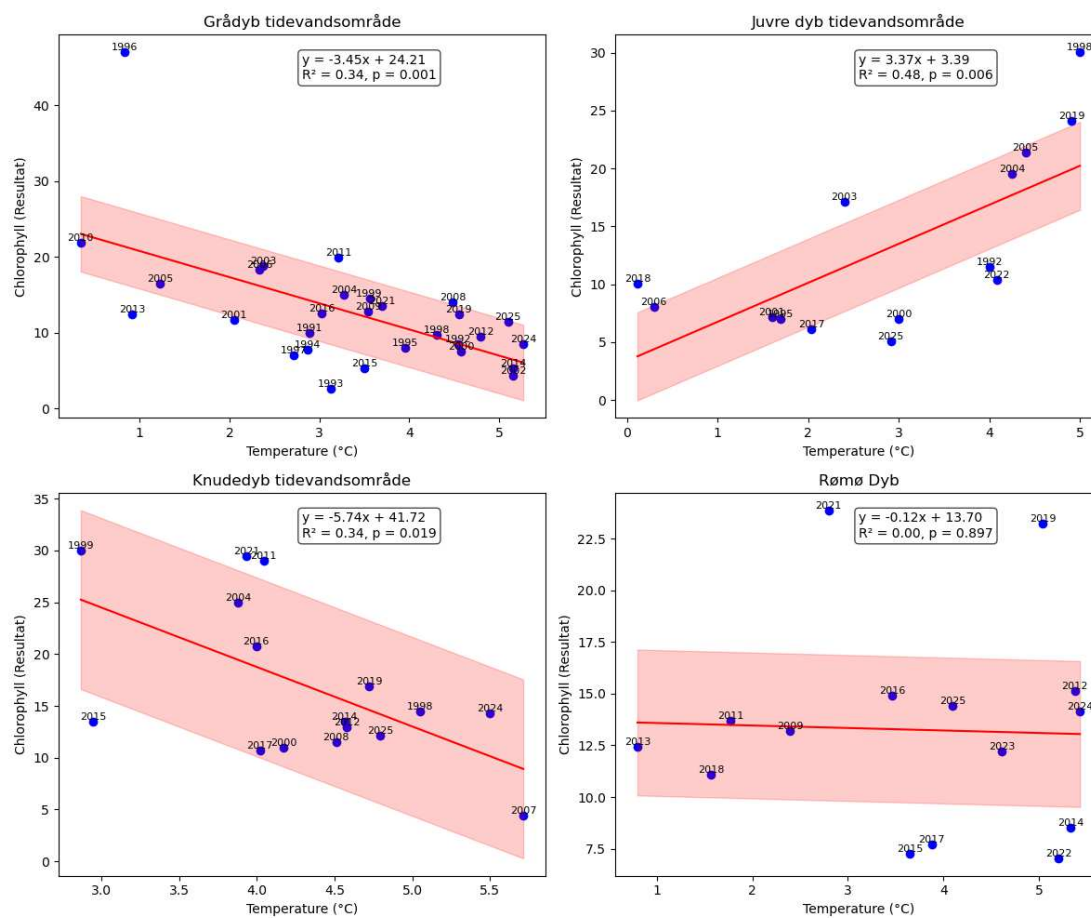
Vigtige observationer:

- De fleste sammenhænge (5 af 6) har negativ relation, dvs. jo mere load af N og P, desto mindre klorofyl. Disse sammenhænge giver ikke umiddelbart mening, da der er påvist utallige studier med en direkte link mellem tilførsel af næringsstoffer og eutrofiering - højere klorofyl.
- Der er kun fundet relationer til forårs-peak og ikke sommerniveauer af klorofyl. AU har testet for sammenhænge til sommer-klorofyl og kun fundet en relation for Knudedyb. Det er således ikke overraskende, at der ikke findes sammenhænge.

Det er bemærkelsesværdigt, at der overvejende er fundet negative relationer. En forklaringsgrad på helt op til 0,28 for kvælstoftilførsel januar-februar relateret til klorofyl i februar-april, er så stor, at en egentlig sammenhæng bør være plausibel, særligt når der findes flere negative relationer må det antages, at der ikke er tale om tilfældigheder.

En hypotetisk forklaring kunne være, at lavere afstrømning generelt hænger sammen med koldere vejr og mere østenvind med mindre nedbør. I de tyske studier (se tidligere afsnit) fandt man en sammenhæng mellem vandtemperatur og forårsklorofyl: Jo koldere vand, desto højere forårs-peaks. Forklaringen er, at koldere vand mindsker top-down-reguleringen af klorofylniveauet, dvs. i koldere vand er filtrering fra muslinger og zooplankton mindre, hvilket giver anledning til større vækst af planktonalger – altså større klorofyl-peaks.

Der blev for to af de fire dyb (Grådyb og Knudedyb) fundet en tilsvarende sammenhæng som i de tyske data i Listerdyb. Sammenhængende blev fundet med R^2 på 0,34 for begge dyb. Der blev fundet en modsat sammenhæng for Juvre Dyb (R^2 0,48) og ingen statistisk sammenhæng for Listerdyb (figur 17). Dette på trods af, at station i Listerdyb er placeret ca. 10 km fra den Tyske station, hvor denne sammenhæng blev fundet. Data er opsat, så der skal være minimum 1 observation i hver måned. Dette gav færre data for Juvre Dyb og Listerdyb. Derudover var datamængden varierende fra god til halvdårlig dækning. Generelt er der flere tyske datapunkter, og derfor bør man tillægge de tyske undersøgelser større vægt for Listerdyb.



Figur 17. Testede sammenhænge mellem vandtemperatur i februar-marts og klorofyl i marts-april for de fire dyb i Vadehavet.

6 REFERENCER

Ref1

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.

Ref2

Afrapportering - Kystvandrådet for Vadehavet, dec. 2023. Afsnit 6, Modeludvikling og scenarioanalyse, DHI

Ref3.

Theo Prins, Anouk Blauw, Lauriane Vilmin, Luuk van der Heijden, Sonia Heye, Lora Buckman, Deltares. Modelling of nutrient load scenarios and transboundary nutrient transport A model study for OSPAR regions II, III and IV. 2023.

Ref4.

van Beusekom JEE, Carstensen J, Dolch T, Grage A, Hofmeister R, Lenhart H, Kerimoglu O, Kolbe K, Pätsch J, Rick J, Rönn L and Ruiter H (2019) Wadden Sea Eutrophication: Long-Term Trends and Regional Differences. *Front. Mar. Sci.* 6:370. doi: 10.3389/fmars.2019.00370

Ref5.

Justus E.E. van Beusekom, Martina Loebl, Peter Martens. Distant riverine nutrient supply and local temperature drive the long-term phytoplankton development in a temperate coastal basin. 2008. *Journal of Sea Research*. doi:10.1016/j.seares.2008.06.005

Ref6.

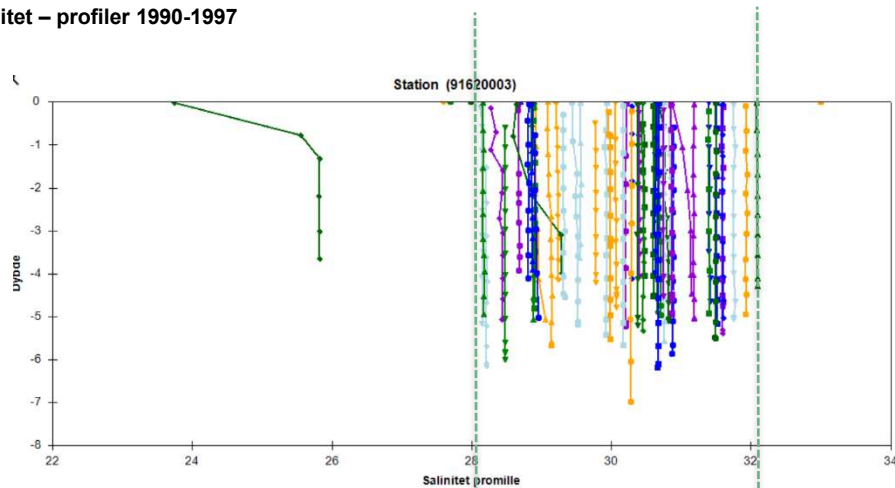
Christian Buschbaum, L. N. S. Shama, F. L. L. Amorim, S. Brand, C. M. A. Broquard, N. Camillini, et al. Climate change impacts on a sedimentary coast—a regional synthesis from genes to ecosystems *Marine Biodiversity* (2024). <https://doi.org/10.1007/s12526-024-01453-5>

Ref7.

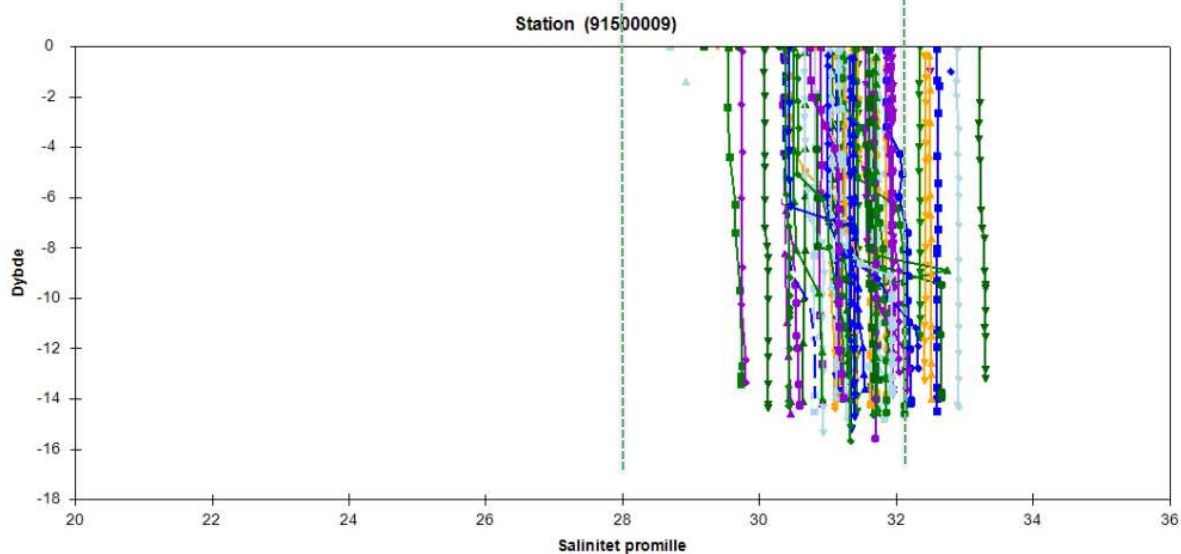
Johannes J. Rick, Mirco Scharfe, Tatyana Romanova , Justus E. E. van Beusekom, Ragnhild Asmus, Harald Asmus, Finn Mielck, Anja Kamp, Rainer Sieger⁵, Karen H. Wiltshire. An evaluation of long-term physical and hydrochemical measurements at the Sylt Roads Marine Observatory (1973–2019), Wadden Sea, North Sea. *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 1037–1057, 2023. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1037-2023>

Bilag 1. Målte værdier af salinitet og fluorens

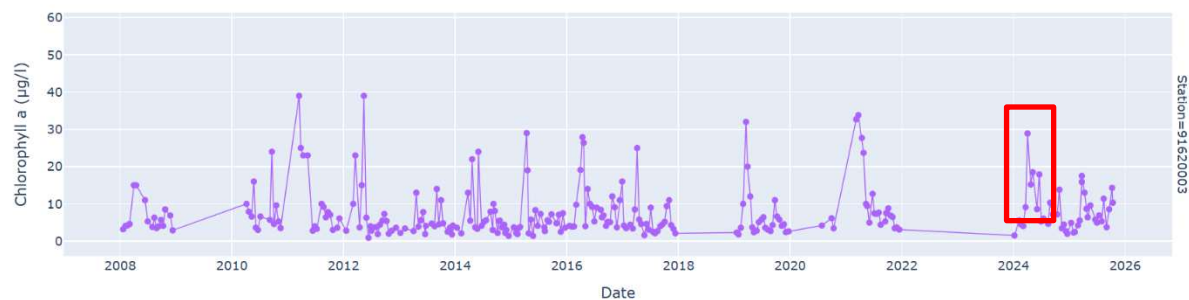
Knudedyb. Salinitet – profiler 1990-1997



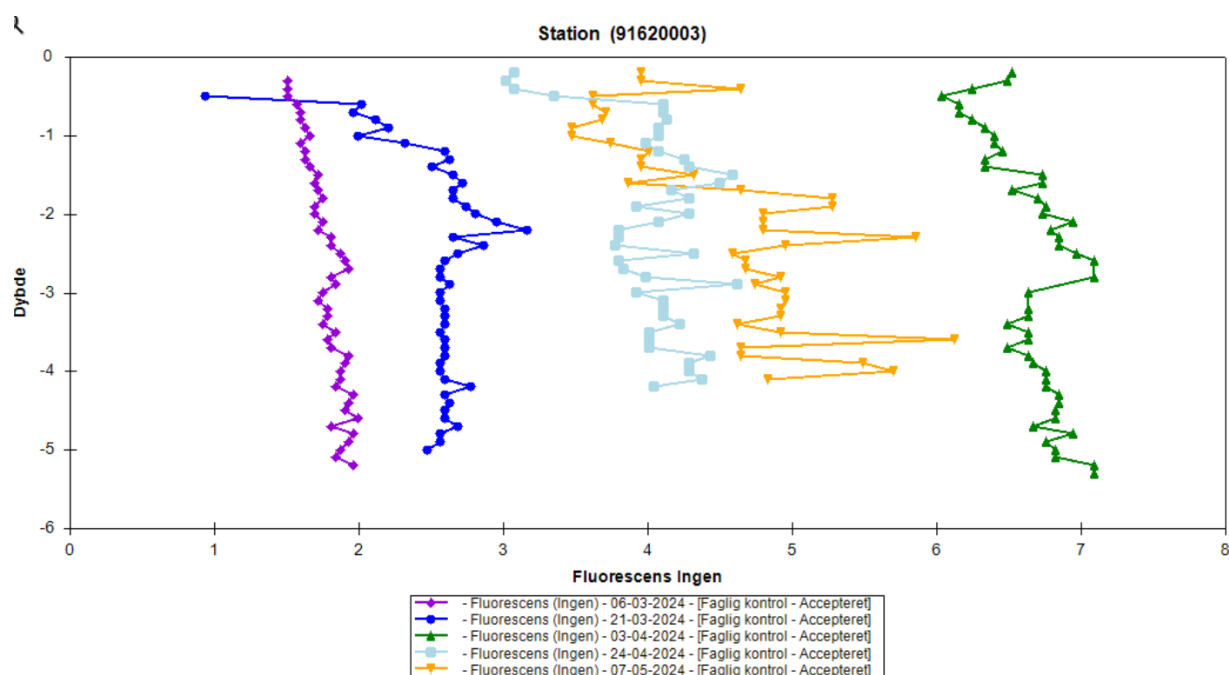
Station 91500009. Salinitet – profiler 1990-1997. Station længst fra Kysten – se figur 7.



Knudedyb klorofyl målinger

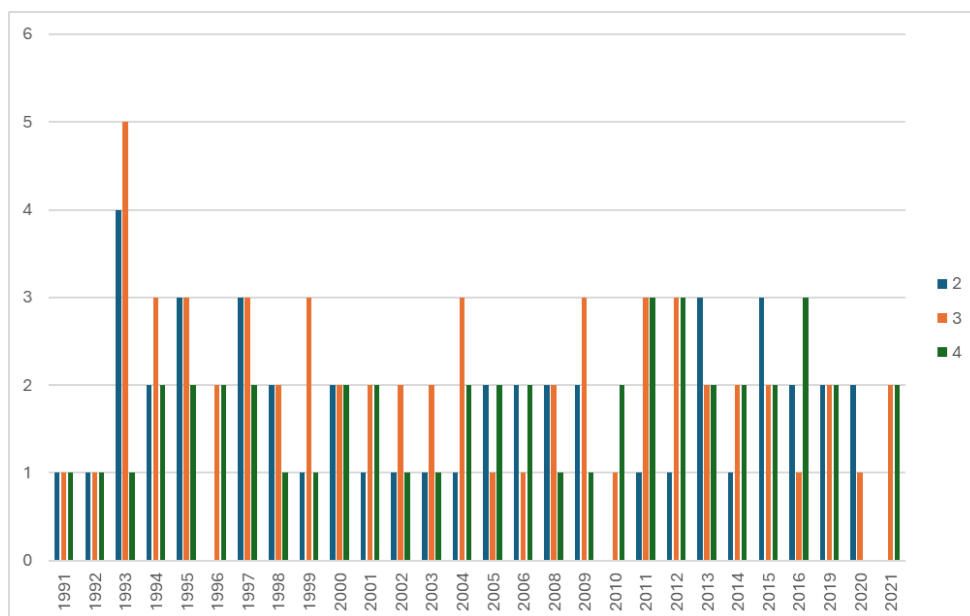


Knudedyb Fluorescens målinger forårs-peak 2024

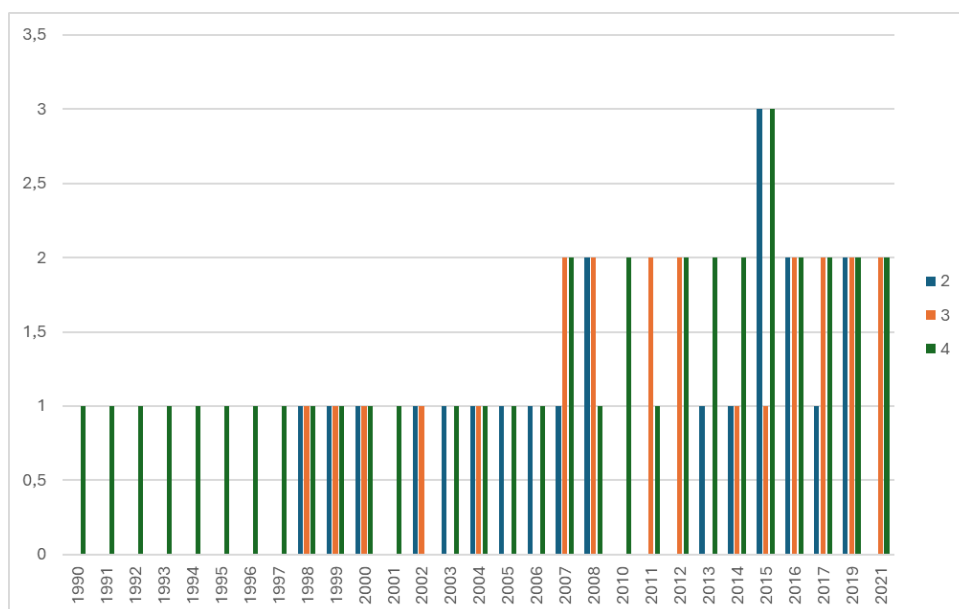


Bilag 2. statiske sammenhænge mellem næringsstofftilførsel og klorofyl

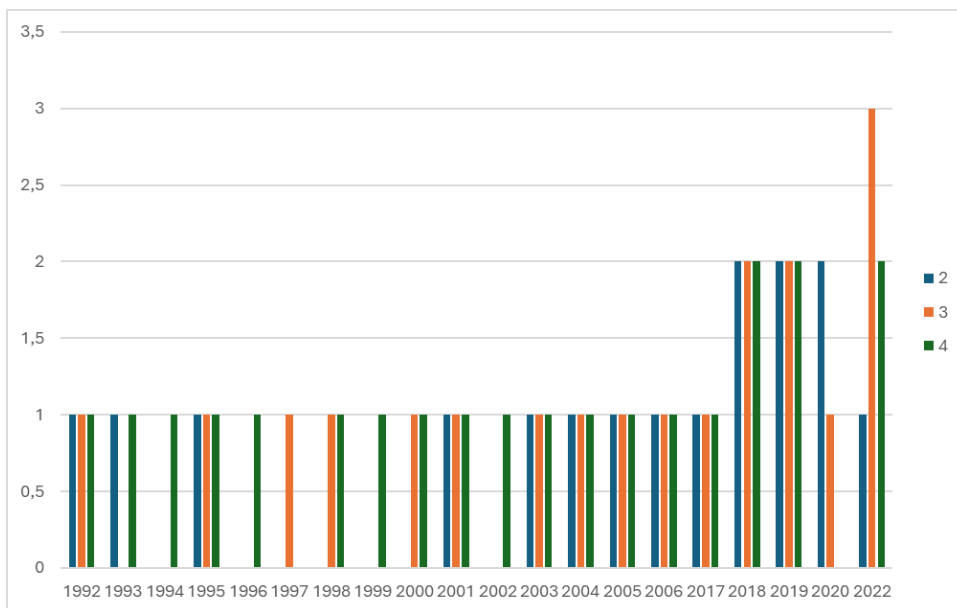
Antal målinger pr. måned pr. år



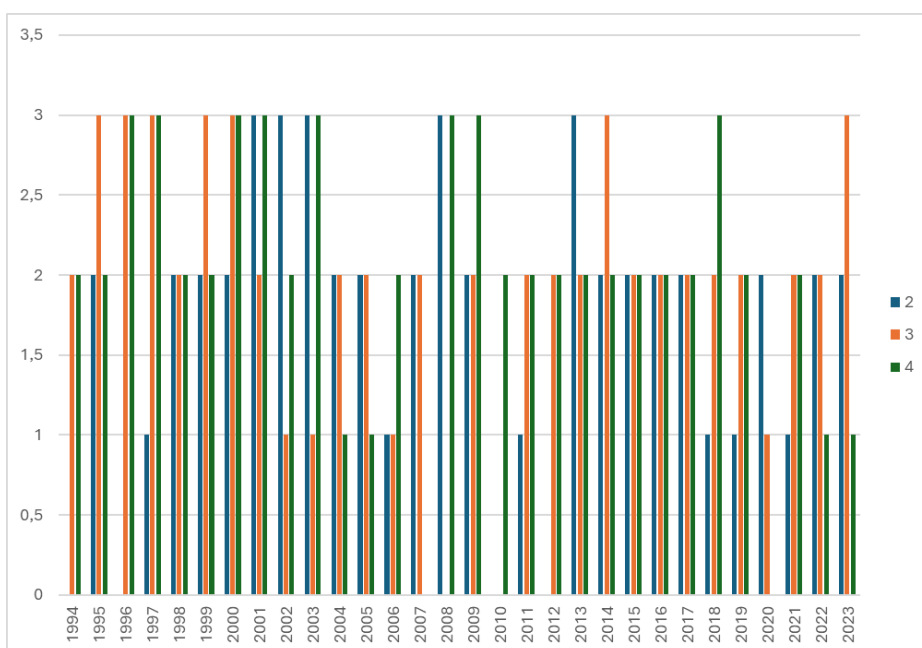
Figur 1. Antal klorofylprøvetagninger pr. måned pr. år fra februar til april for målestation 91610002 i Grådyb.



Figur 2. Antal klorofylprøvetagninger pr. måned pr. år fra februar til april for målestation 91620003 i Knudedyb.

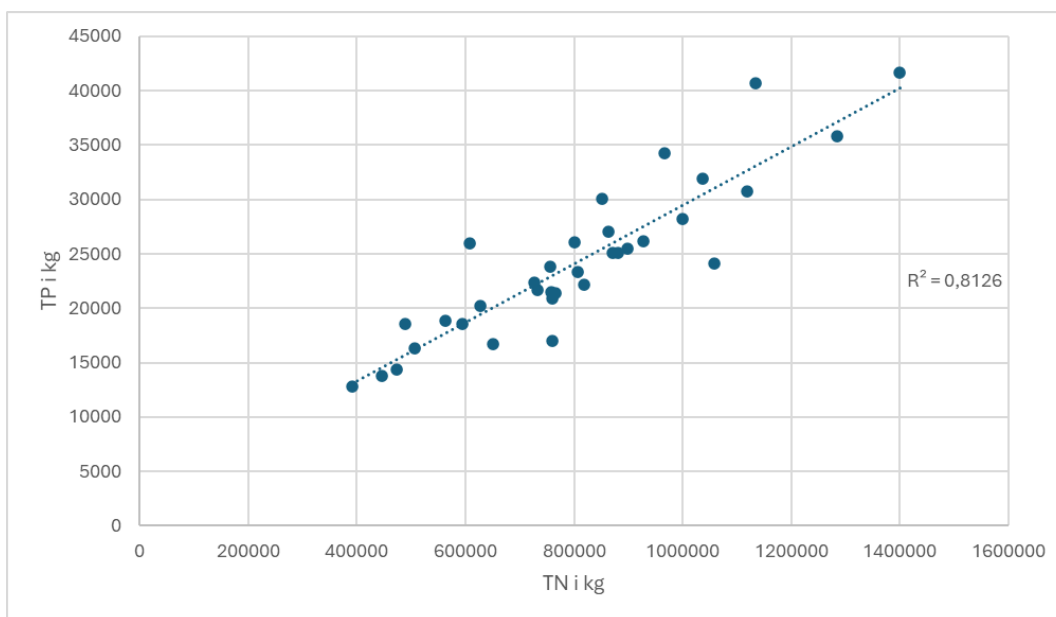


Figur 3. Antal klorofylprøvetagninger pr. måned pr. år fra februar til april for målestation 91630003 i Juvre Dyb.

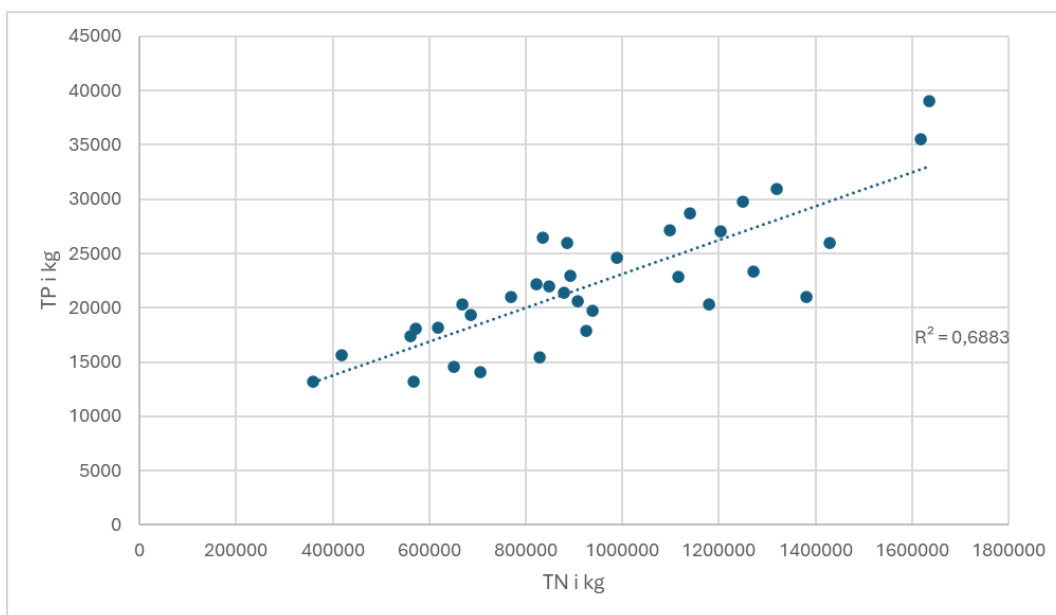


Figur 4. Antal klorofylprøvetagninger pr. måned pr. år fra februar til april for målestation 91650003 i Listerdyb.

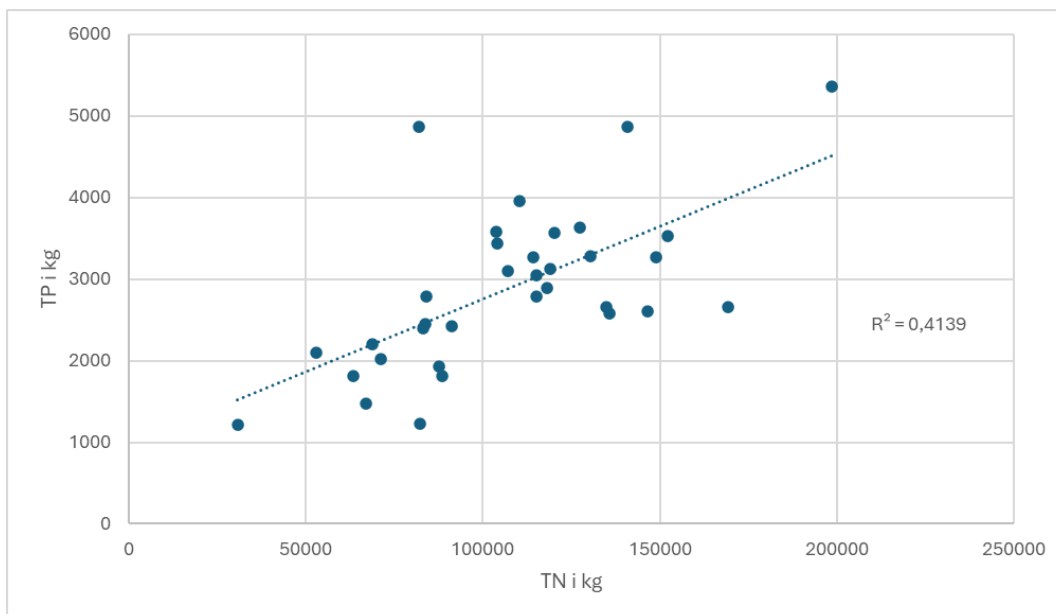
Korrelation fosfor/kvælstof 1:1 jan-feb



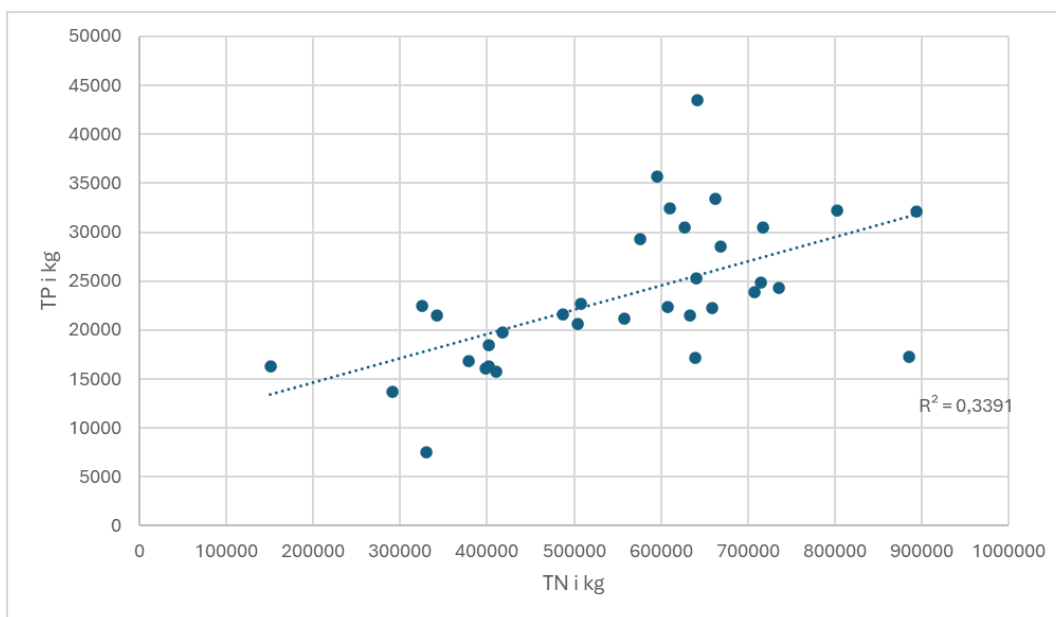
Figur 5. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem TN og TP i kg for Farvand4-oplandet 1610 til Grådyb.



Figur 6. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem TN og TP i kg for Farvand4-oplandet 1620 til Knudedyb.



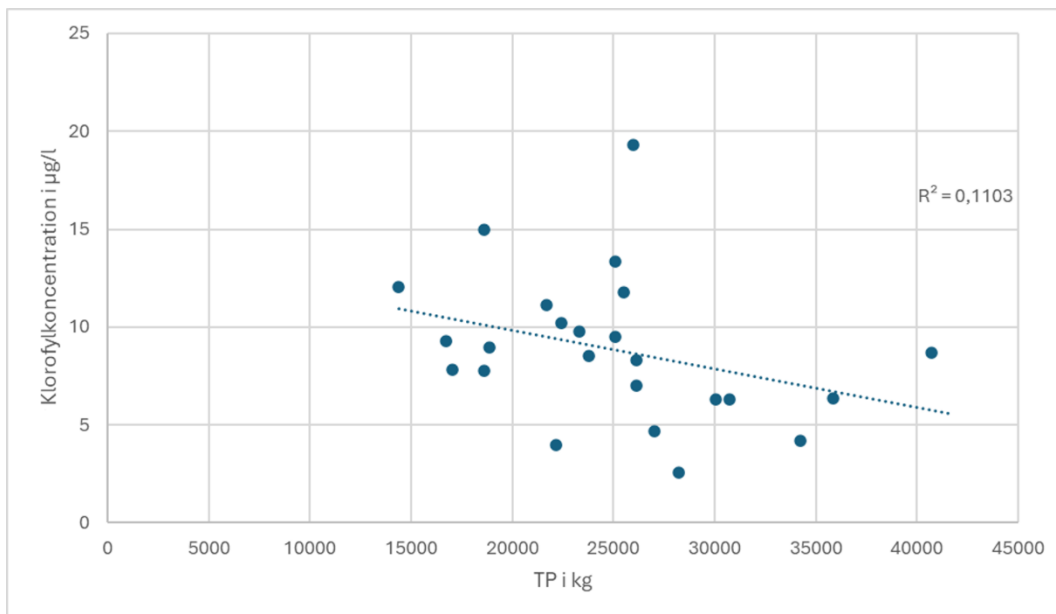
Figur 7. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem TN og TP i kg for Farvand4-oplandet 1630 til Juvre Dyb.



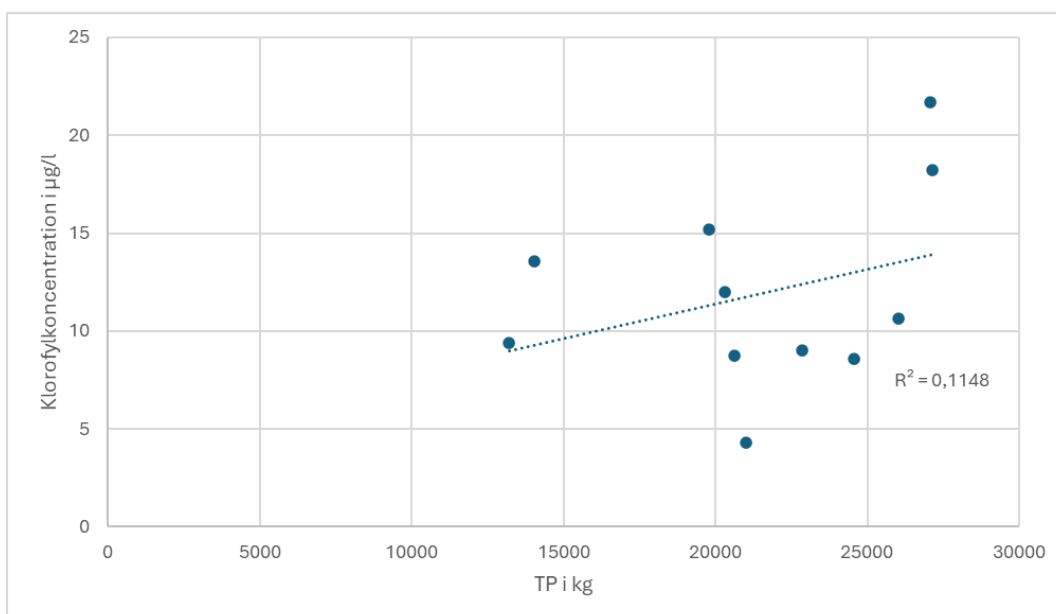
Figur 8. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem TN og TP i kg for Farvand4-oplandet 1651 til Listerdyb.

FOSFOR

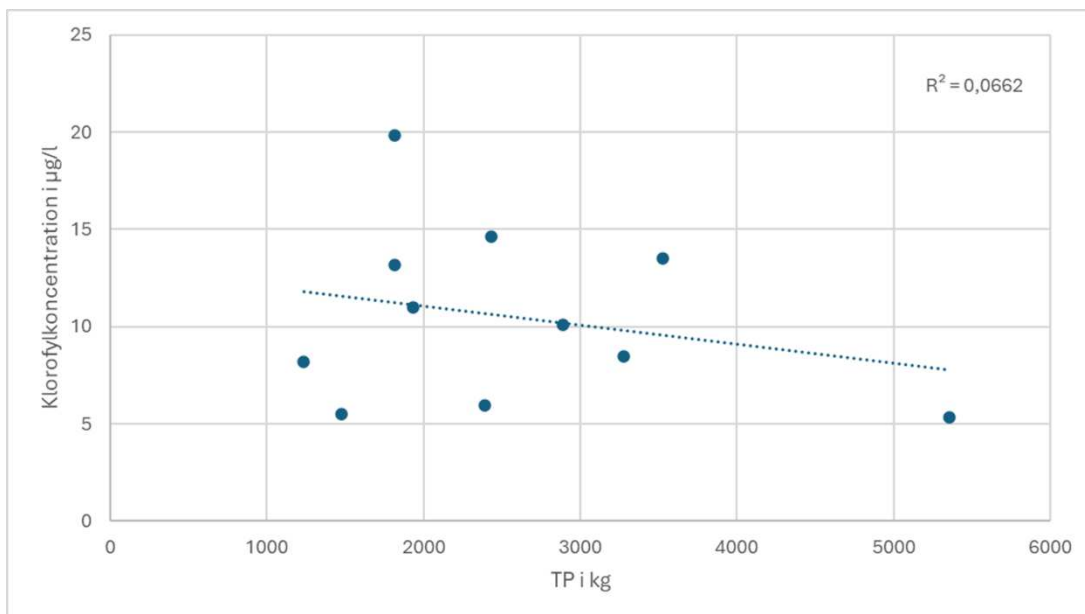
Vinter p-load (jan-feb) til forårs klorofyl (feb-apr) – efterårsload er præcis samme tendens, og der er derfor ikke lavet grafer for den periode.



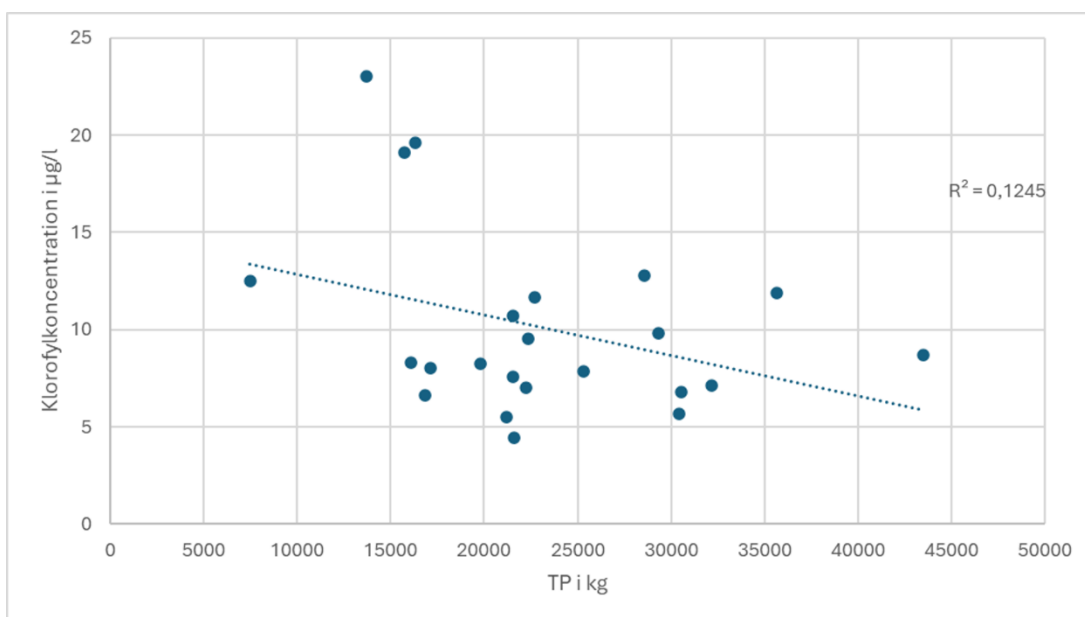
Figur 9. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1610 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91610002 i Grådyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1991-1995, 1997-2006, 2008-2009, 2011-2016 og 2019.



Figur 10. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1620 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1998-2000, 2004, 2007, 2008, 2014-2017 og 2019.

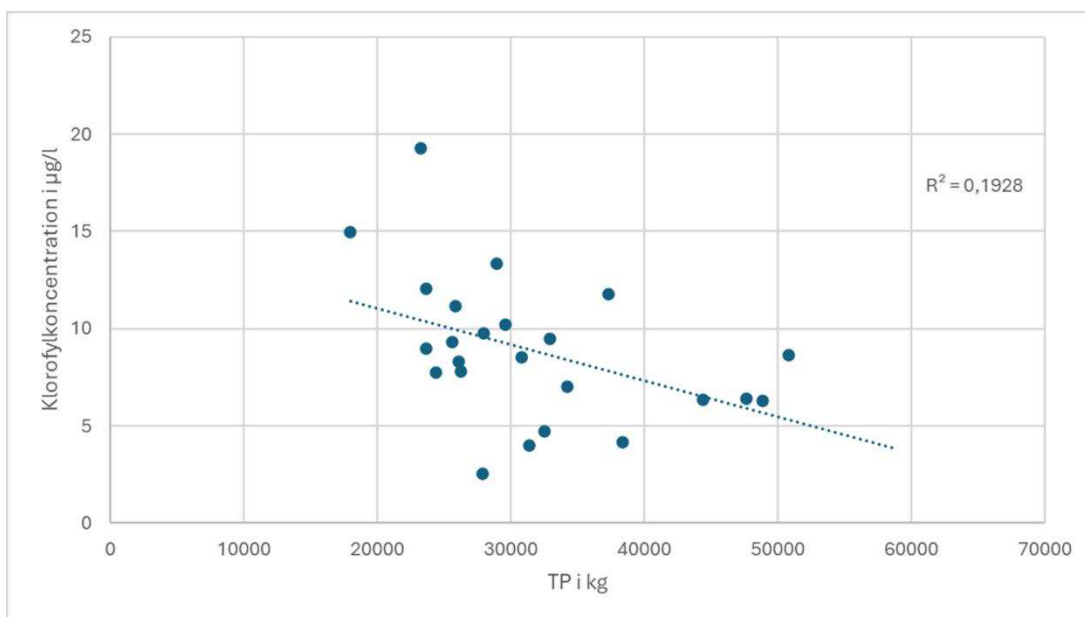


Figur 11. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1630 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91630003 i Juvre Dyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1992, 1995, 2001, 2003-2006, 2017-2019 og 2022.

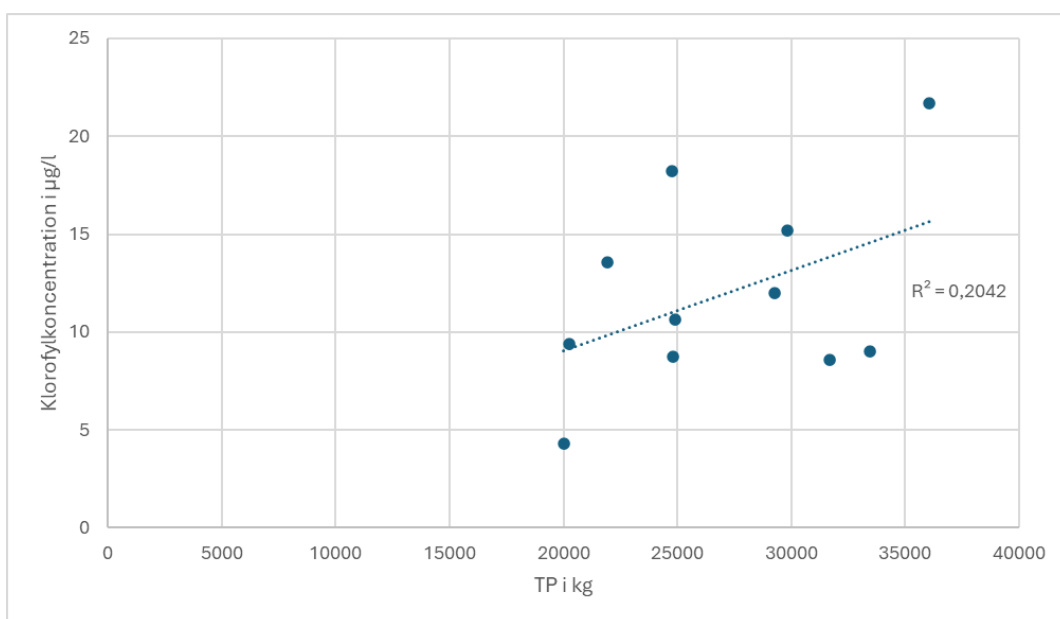


Figur 12. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1651 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1995, 1997-2006, 2009, 2011, 2013-2019 og 2021-2023.

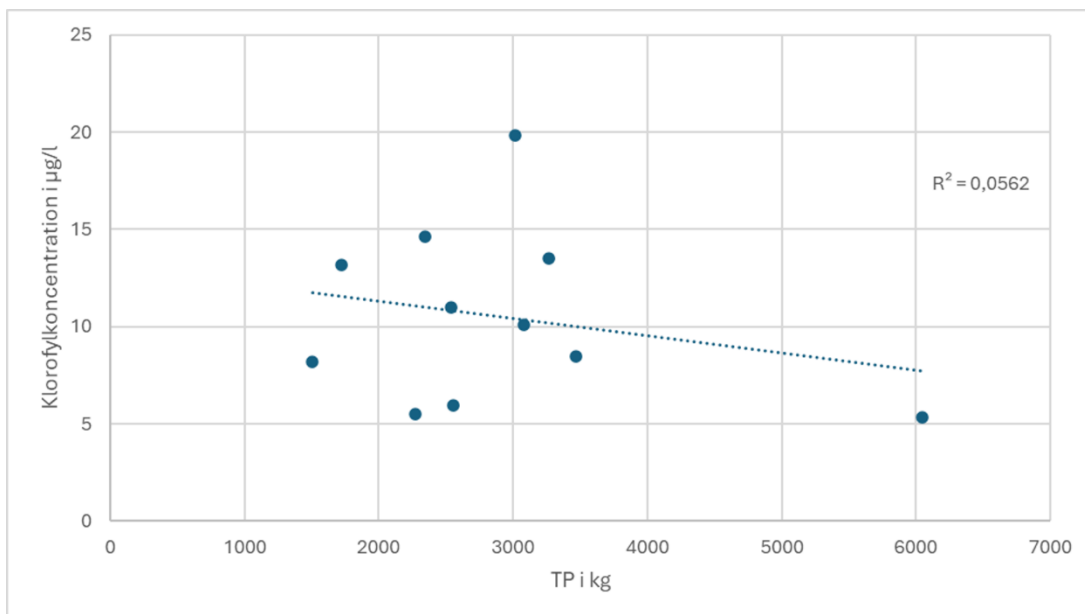
1:1 fosfor feb-apr:



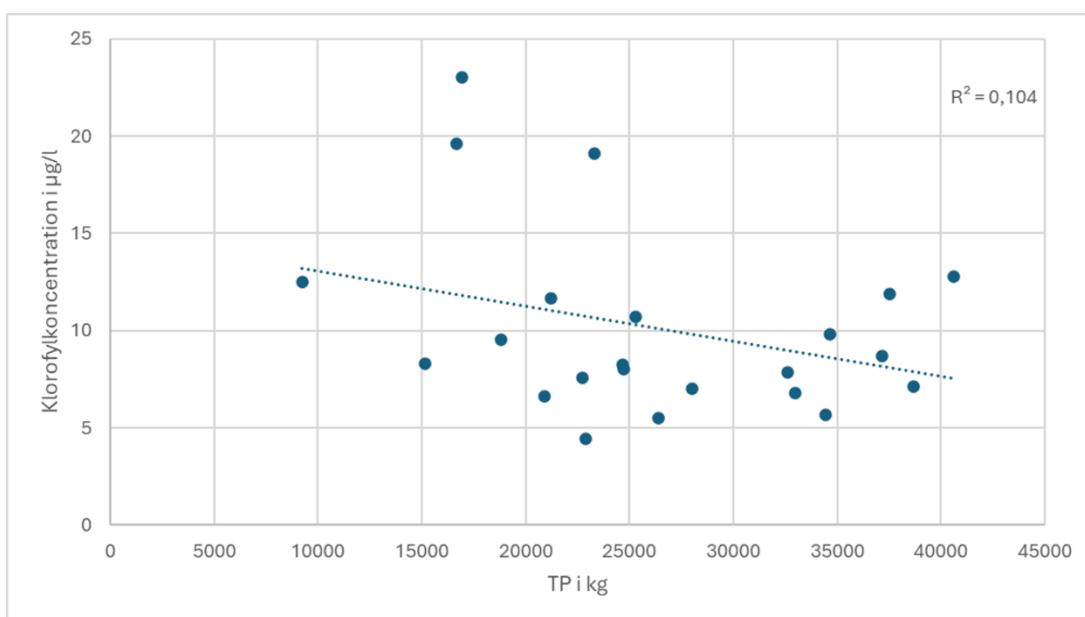
Figur 13. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra februar-april for Farvand4-oplandet 1610 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91610002 i Grådyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1991-1995, 1997-2006, 2008-2009, 2011-2016 og 2019.



Figur 14. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra februar-april for Farvand4-oplandet 1620 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1998-2000, 2004, 2007, 2008, 2014-2017 og 2019.

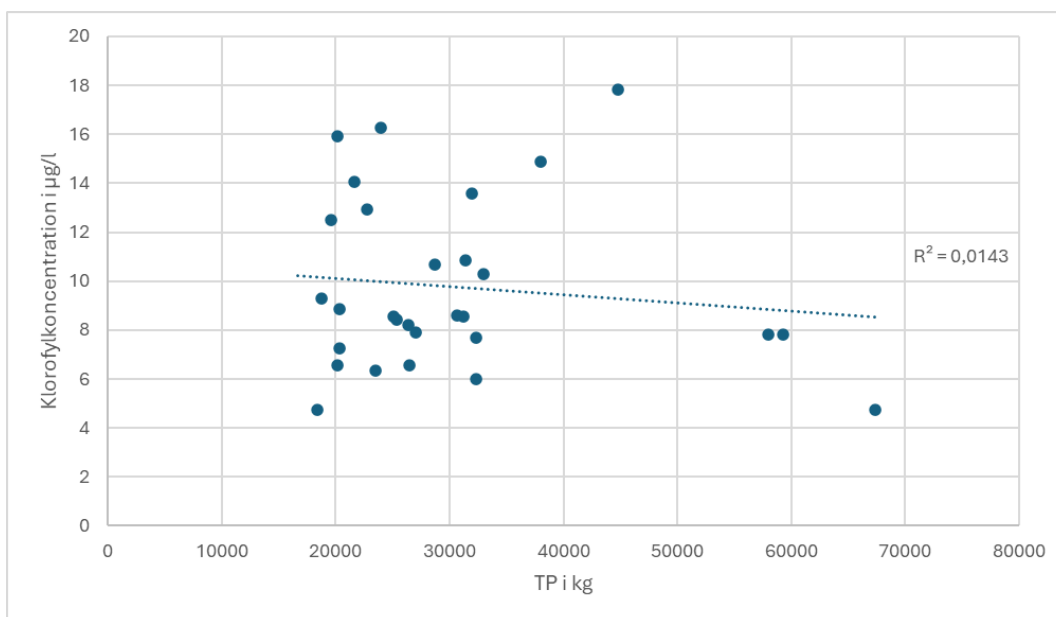


Figur 15. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra februar-april for Farvand4-oilandet 1630 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91630003 i Juvre Dyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1992, 1995, 2001, 2003-2006, 2017-2019 og 2022.

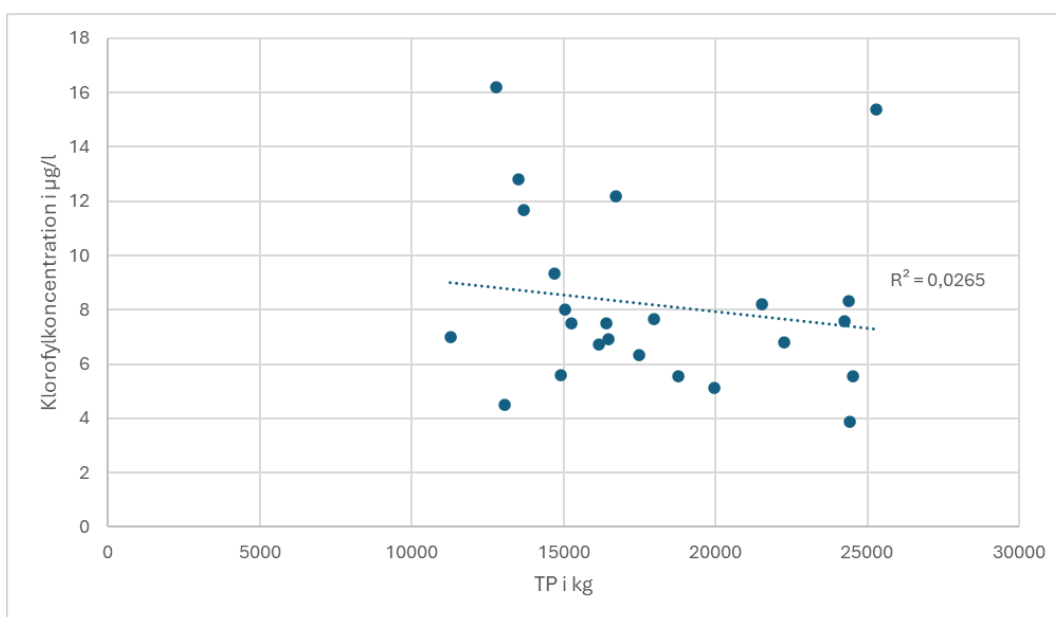


Figur 16. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra februar-april for Farvand4-oilandet 1651 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1995, 1997-2006, 2009, 2011, 2013-2019 og 2021-2023.

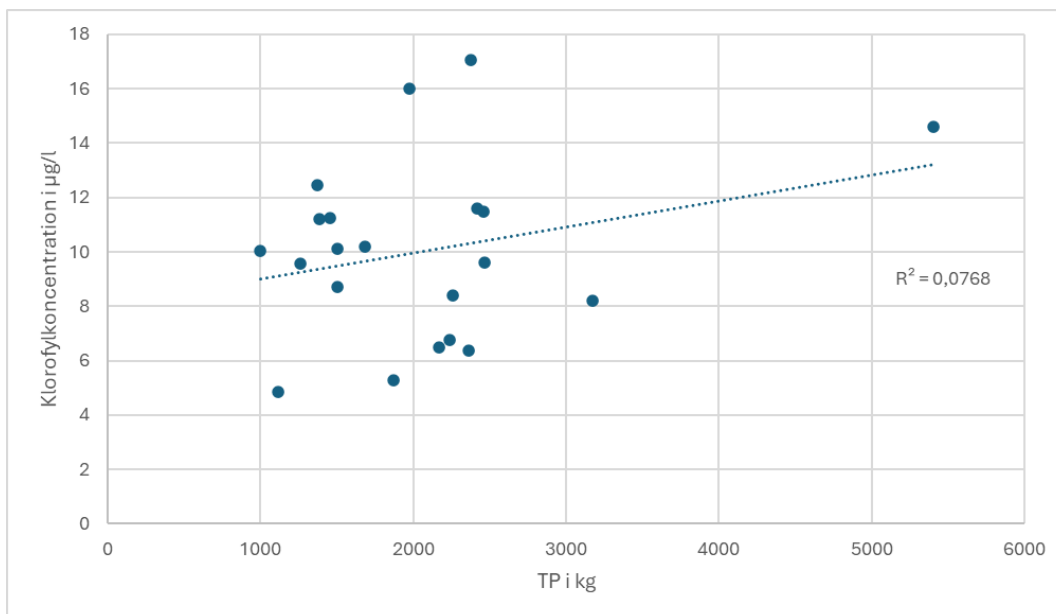
1:1 fosfor maj-sep:



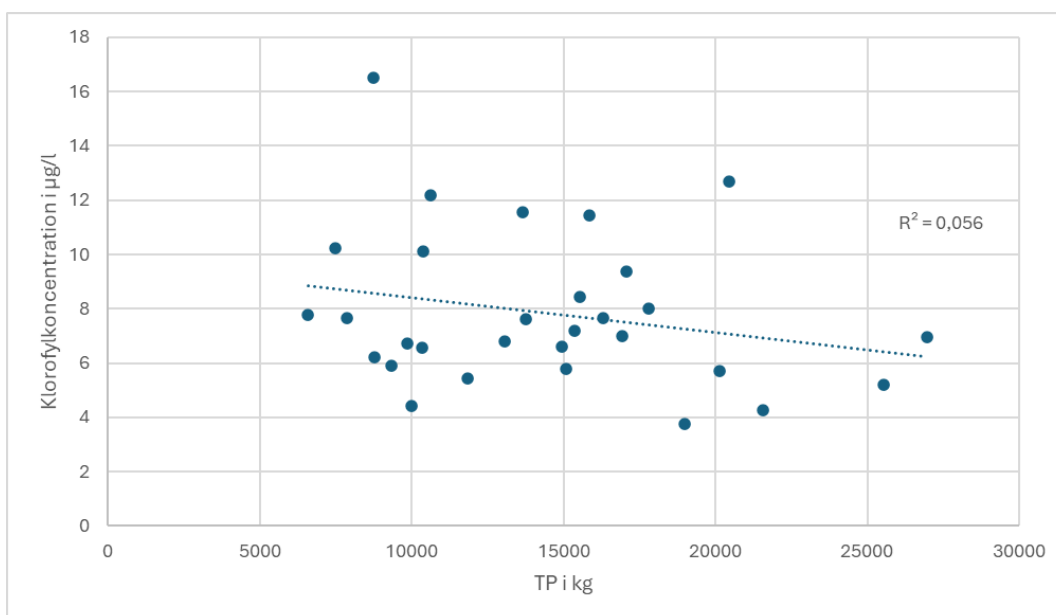
Figur 17. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra maj-september for Farvand4-oplandet 1610 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91610002 i Grådyb.



Figur 18. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra maj-september for Farvand4-oplandet 1620 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1990, 1992-1994, 1997-2006, 2010-2017, 2019 og 2021.



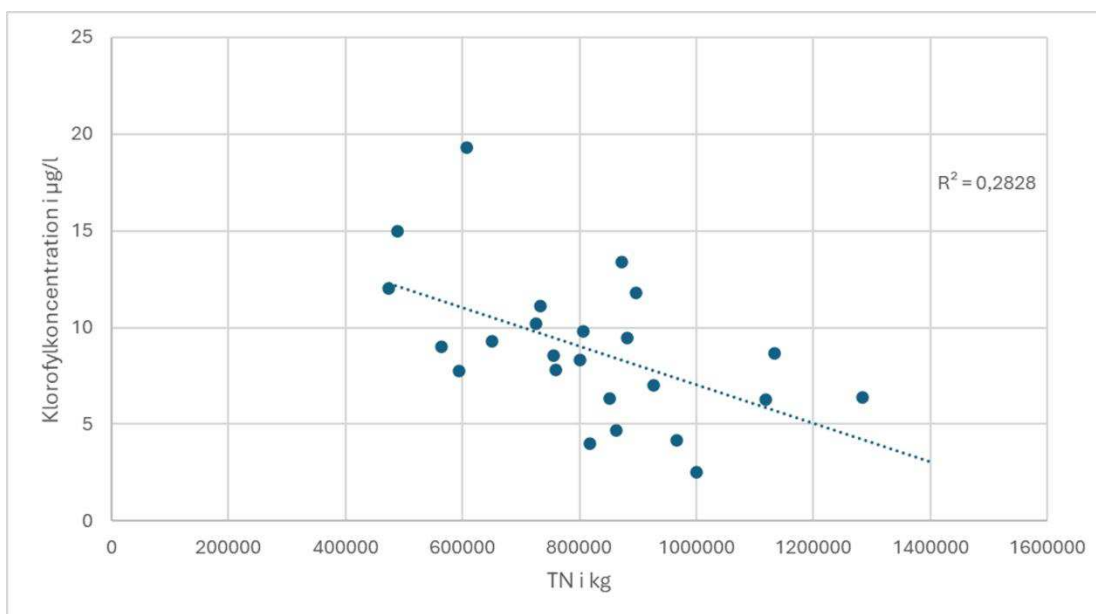
Figur 19. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra maj-september for Farvand4-oplandet 1630 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91630003 i Juvre Dyb. Obs. der er ikke klorofylldata fra 2007-2016, 2021 og 2023.



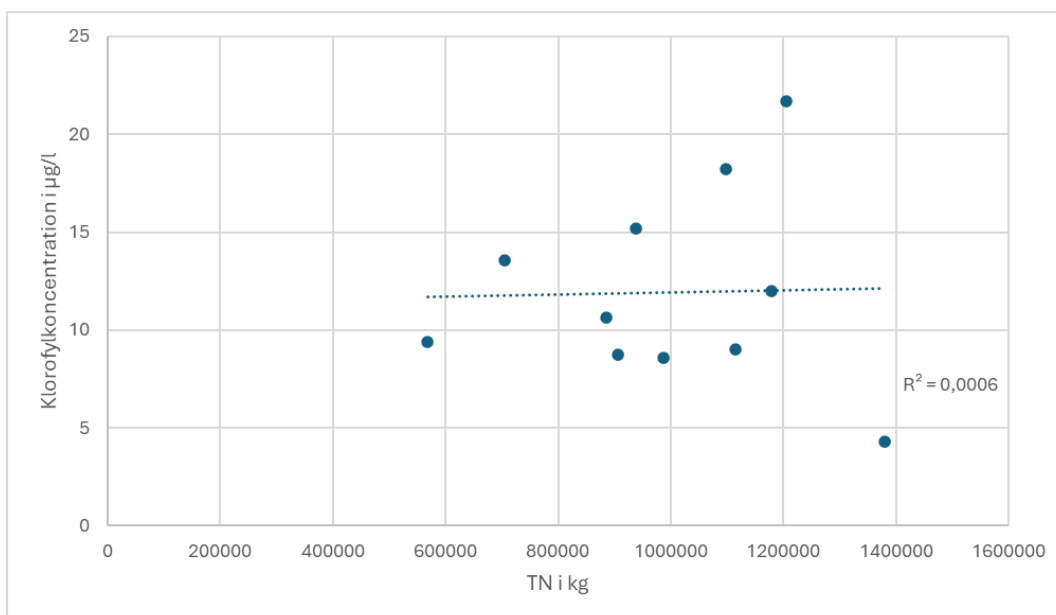
Figur 20. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-fosfor load i kg fra maj-september for Farvand4-oplandet 1651 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. der er ikke klorofylldata før 1994.

KVÆLSTOF

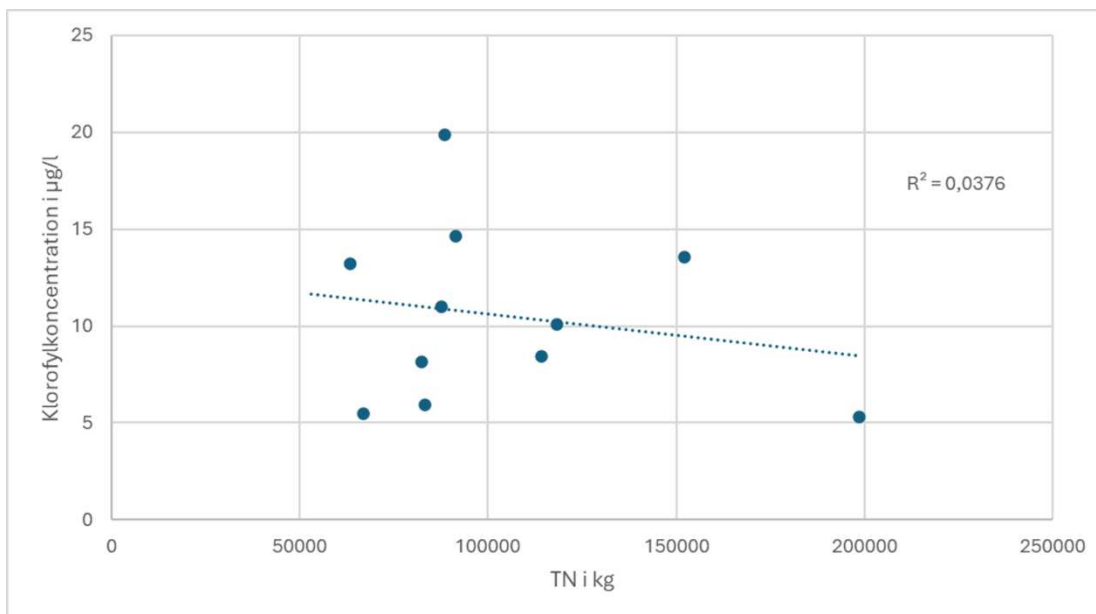
Vinter N-load (jan-feb) til forårs klorofyl (feb-apr):



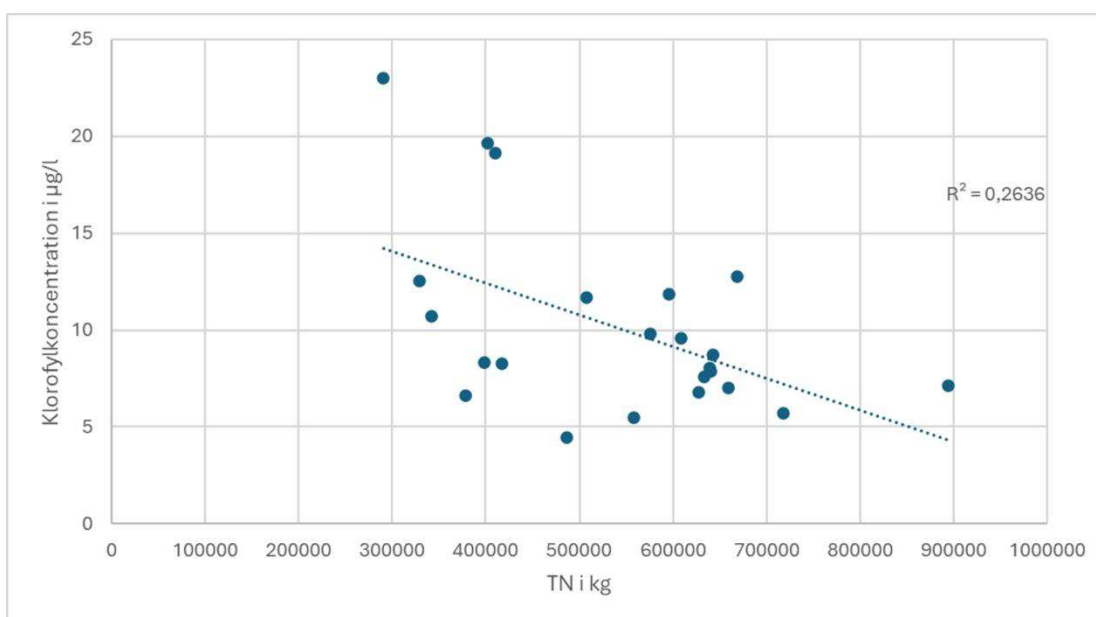
Figur 21. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1610 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91610002 i Grådyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1991-1995, 1997-2006, 2008-2009, 2011-2016 og 2019.



Figur 22. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1620 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1998-2000, 2004, 2007, 2008, 2014-2017 og 2019.

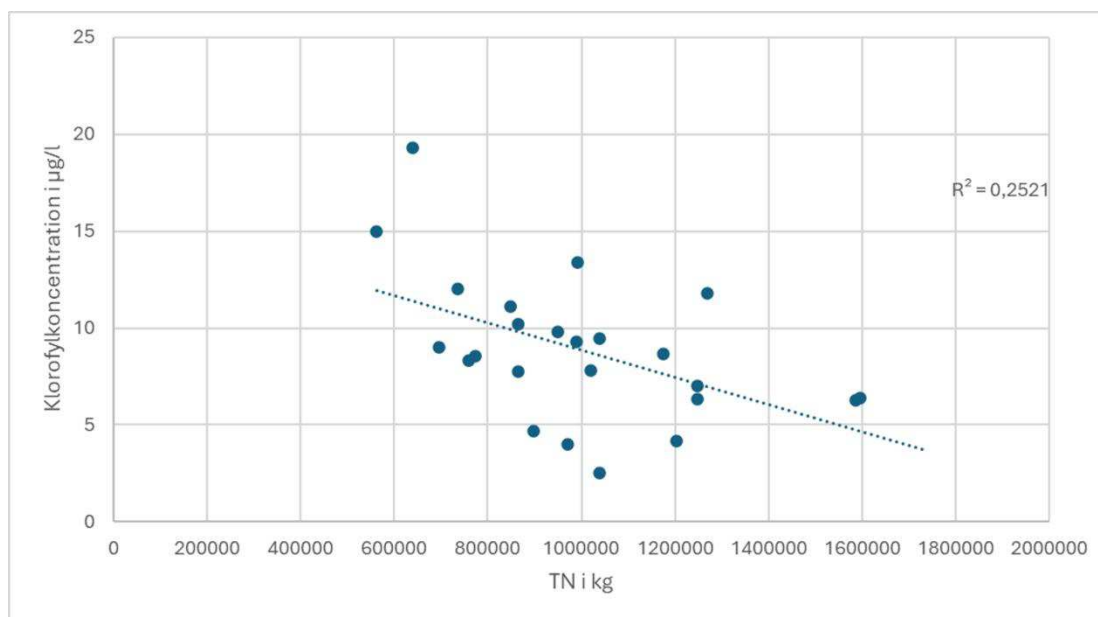


Figur 23. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1630 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91630003 i Juvre Dyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1992, 1995, 2001, 2003-2006, 2017-2019 og 2022.

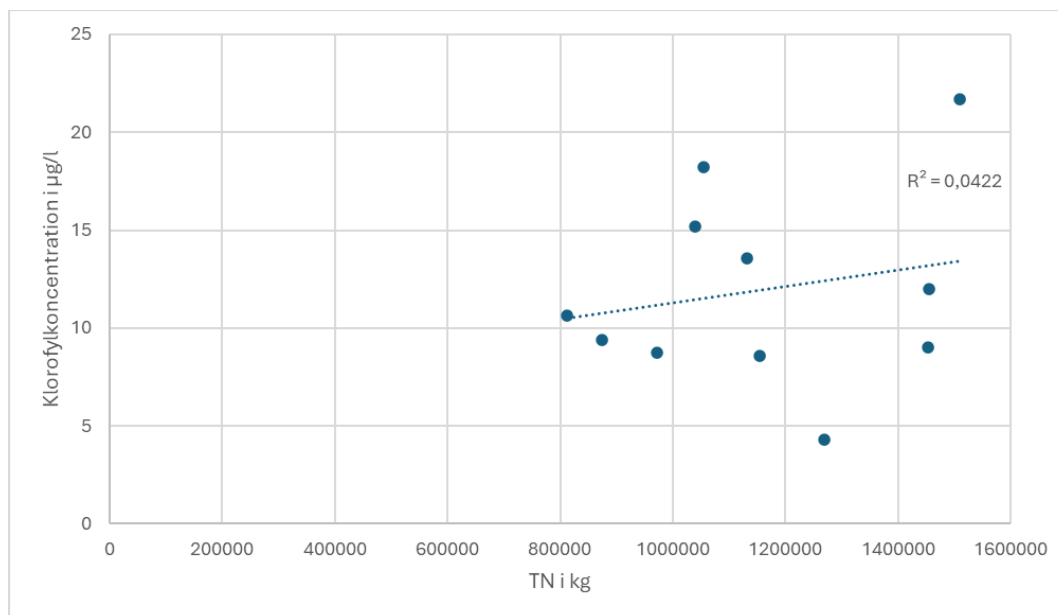


Figur 24. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra januar-februar for Farvand4-oplandet 1651 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1995, 1997-2006, 2009, 2011, 2013-2019 og 2021-2023.

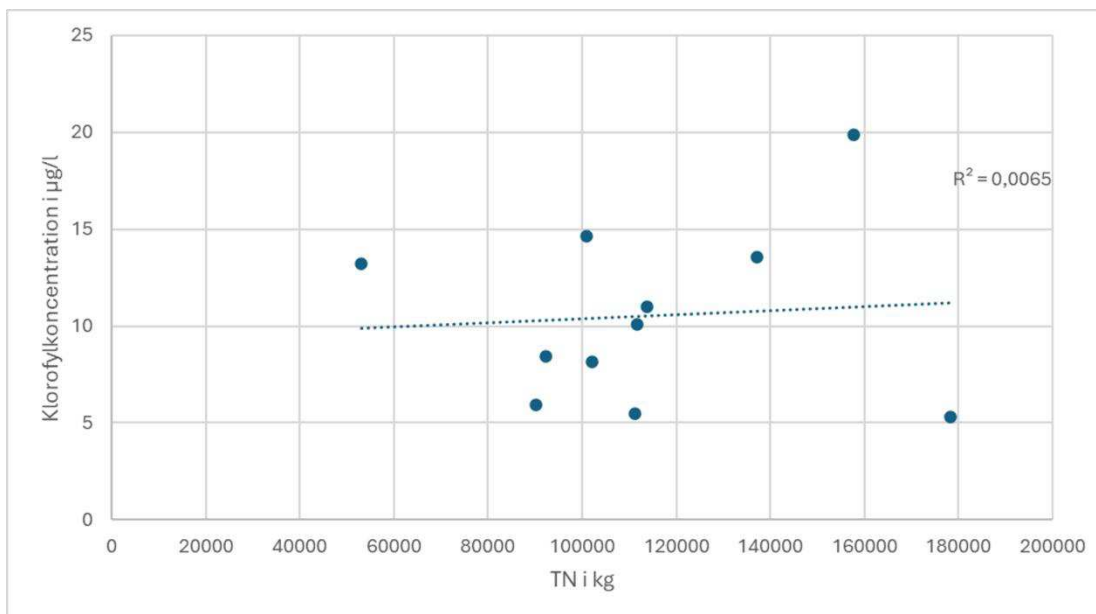
1:1 feb-april N-load til klorofyl:



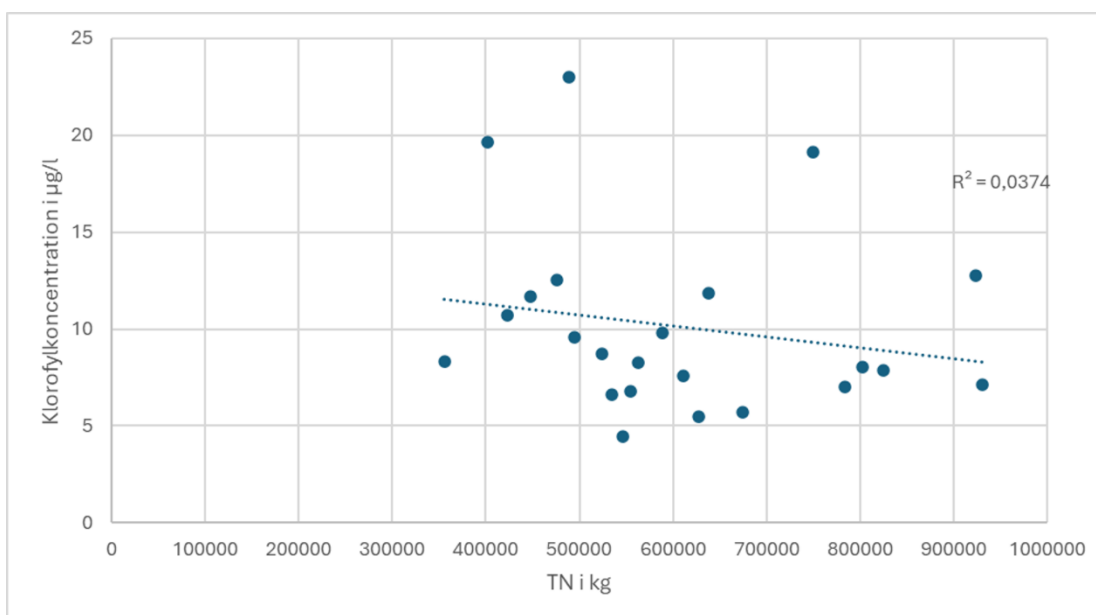
Figur 25. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra februar-april for Farvand4-oplandet 1610 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91610002 i Grådyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1991-1995, 1997-2006, 2008-2009, 2011-2016 og 2019.



Figur 26. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra februar-april for Farvand4-oplandet 1620 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1998-2000, 2004, 2007, 2008, 2014-2017 og 2019.

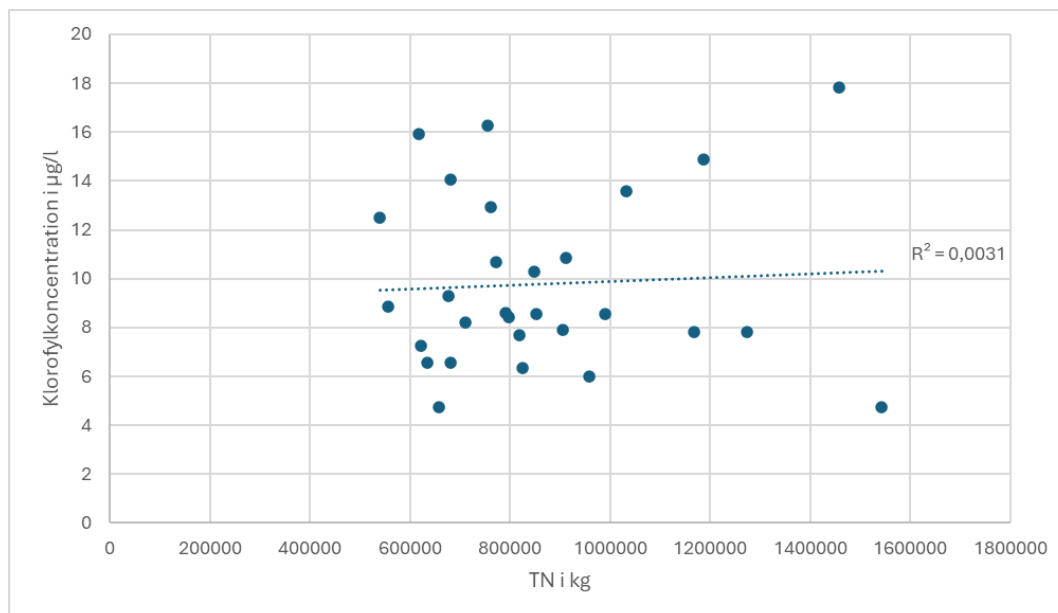


Figur 27. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra februar-april for Farvand4-oplandet 1630 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91630003 i Juvre Dyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1992, 1995, 2001, 2003-2006, 2017-2019 og 2022.

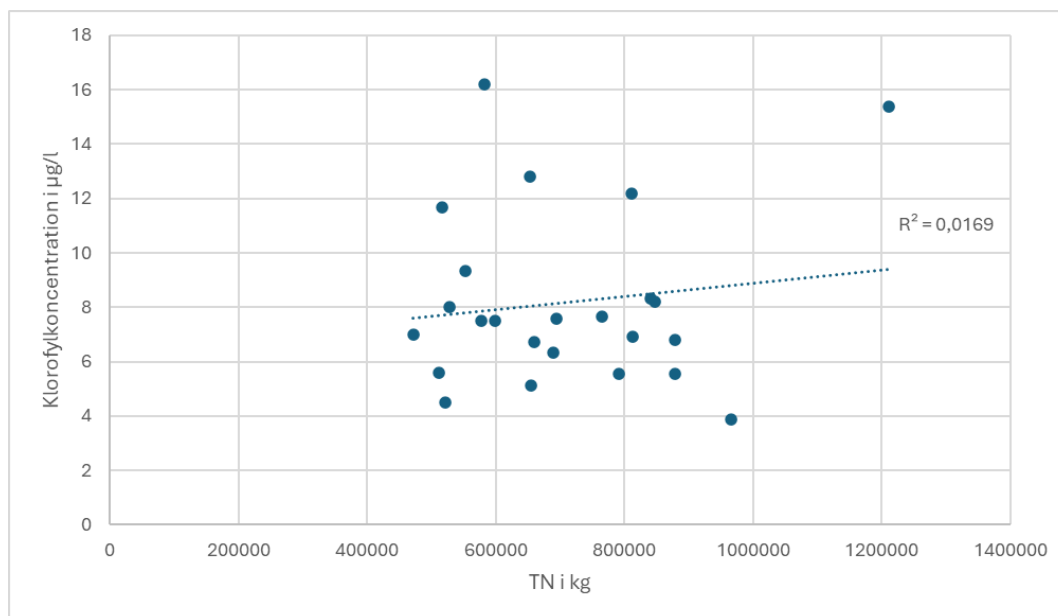


Figur 28. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra februar-april for Farvand4-oplandet 1651 og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1995, 1997-2006, 2009, 2011, 2013-2019 og 2021-2023.

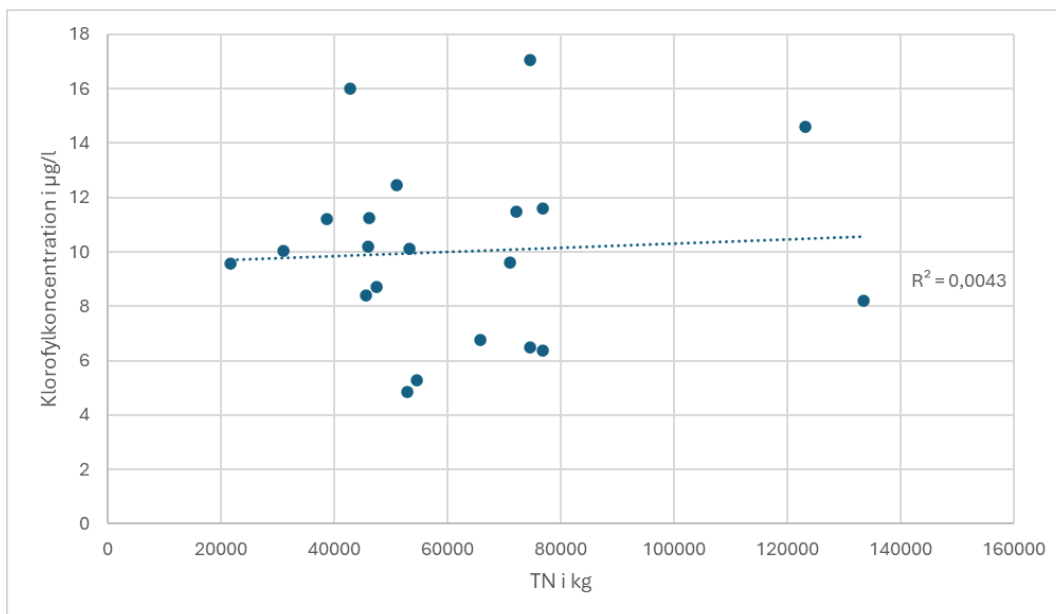
1:1 sommer maj-sep TN-load og kloro:



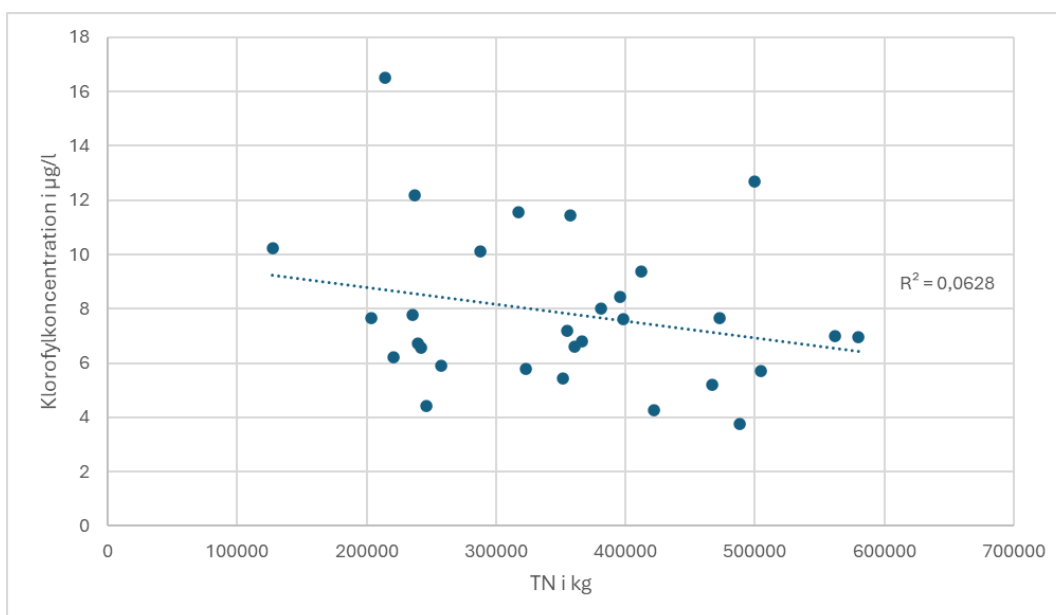
Figur 29. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra maj-september for Farvand4-området 1610 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91610002 i Grådyb.



Figur 30. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra maj-september for Farvand4-området 1620 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1990, 1992-1994, 1997-2006, 2010-2017, 2019 og 2021.

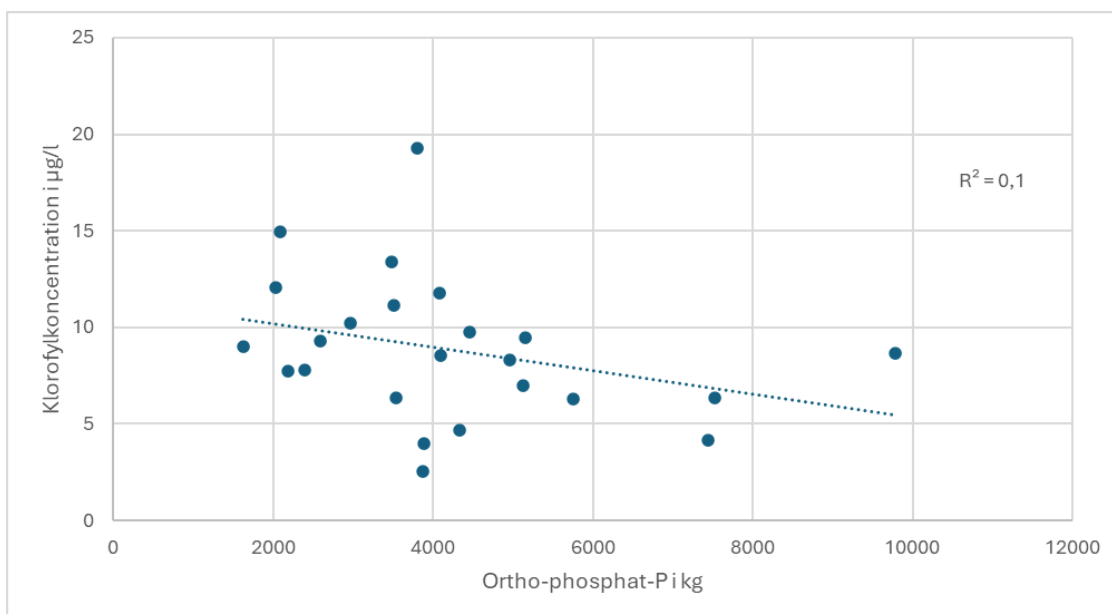


Figur 31. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra maj-september for Farvand4-området 1630 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91630003 i Juvre Dyb. Obs. der er ikke klorofyl-data fra 2007-2016.

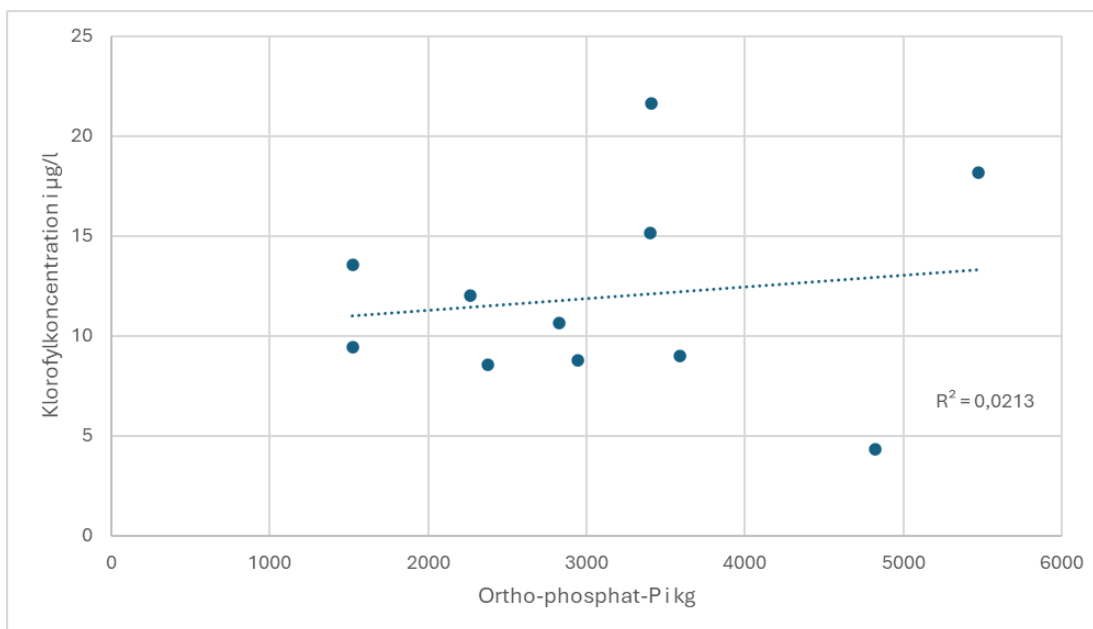


Figur 32. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem total-kvælstof load i kg fra maj-september for Farvand4-området 1651 og klorofylkoncentration i µg/l fra maj-september for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. der er ikke klorofyl-data før 1994.

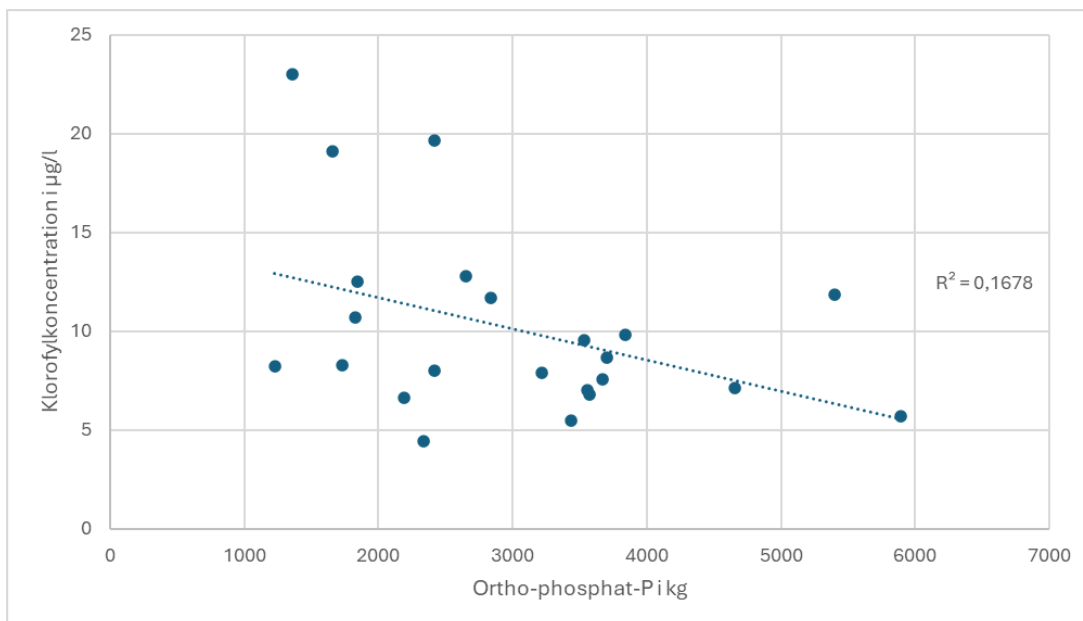
Ortho-load jan-feb til klorofyl feb-apr:



Figur 33. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem Ortho-phosphat-P load i kg fra januar-februar for oplandet (stationerne 31000027, 31000032, 35000006, 35000010 og 35000011) og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91610002 i Grådyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1991-1995, 1997-2006, 2008-2009, 2011-2016 og 2019.

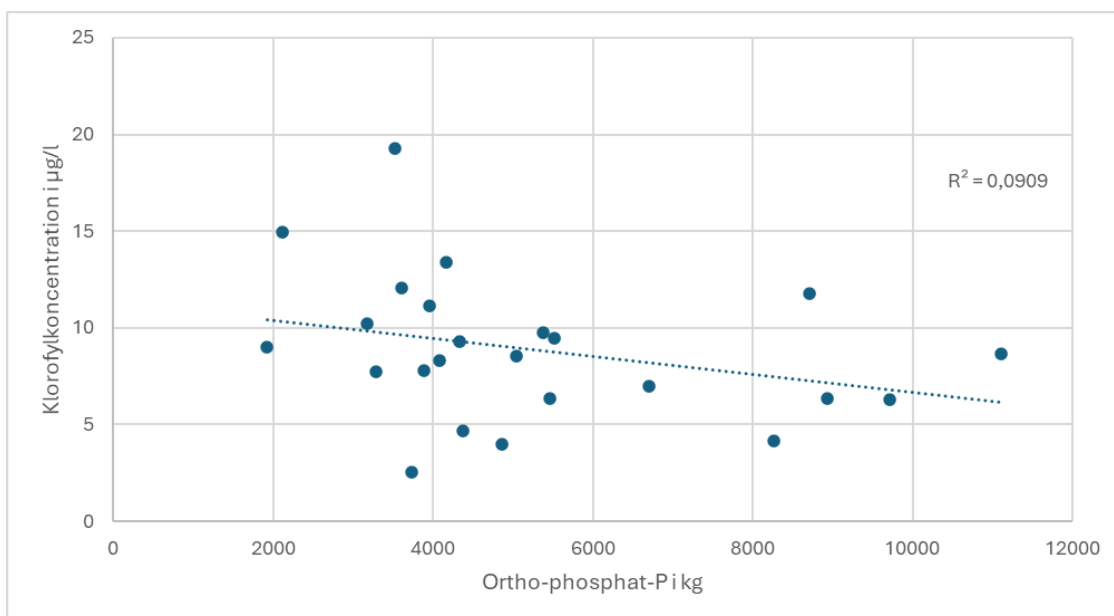


Figur 34. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem Ortho-phosphat-P load i kg fra januar-februar for oplandet (stationerne 38000023 og 38000024) og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1998-2000, 2004, 2007, 2008, 2014-2017 og 2019.

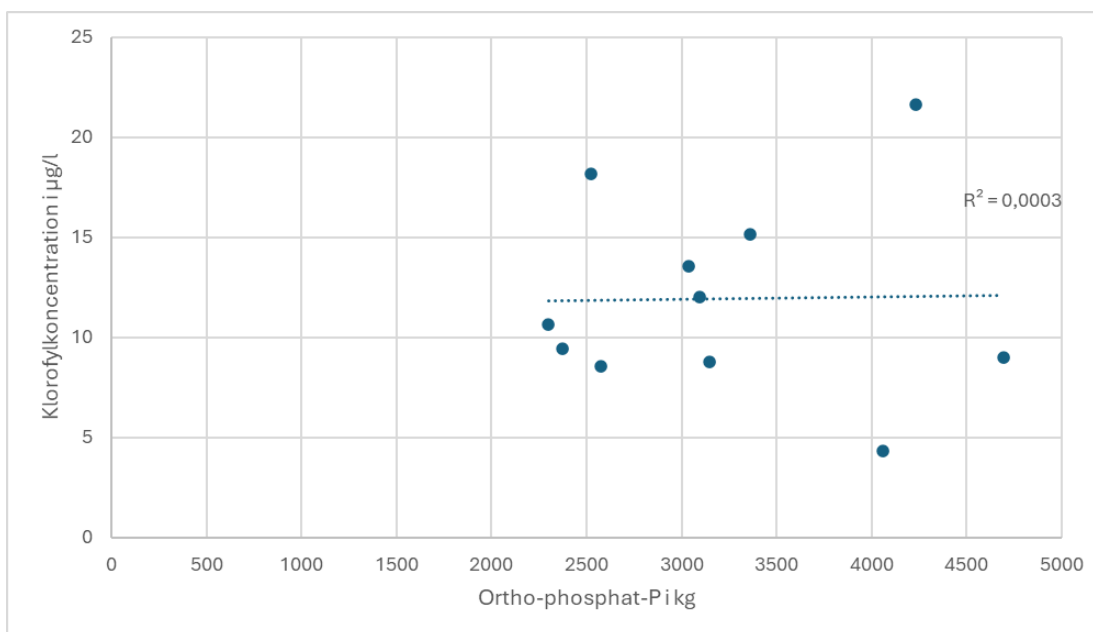


Figur 35. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem Ortho-phosphat-P load i kg fra januar-februar for oplandet (stationerne 40000001, 42000016 og 42000021) og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1995, 1997-2006, 2009, 2011, 2013-2019 og 2021-2023.

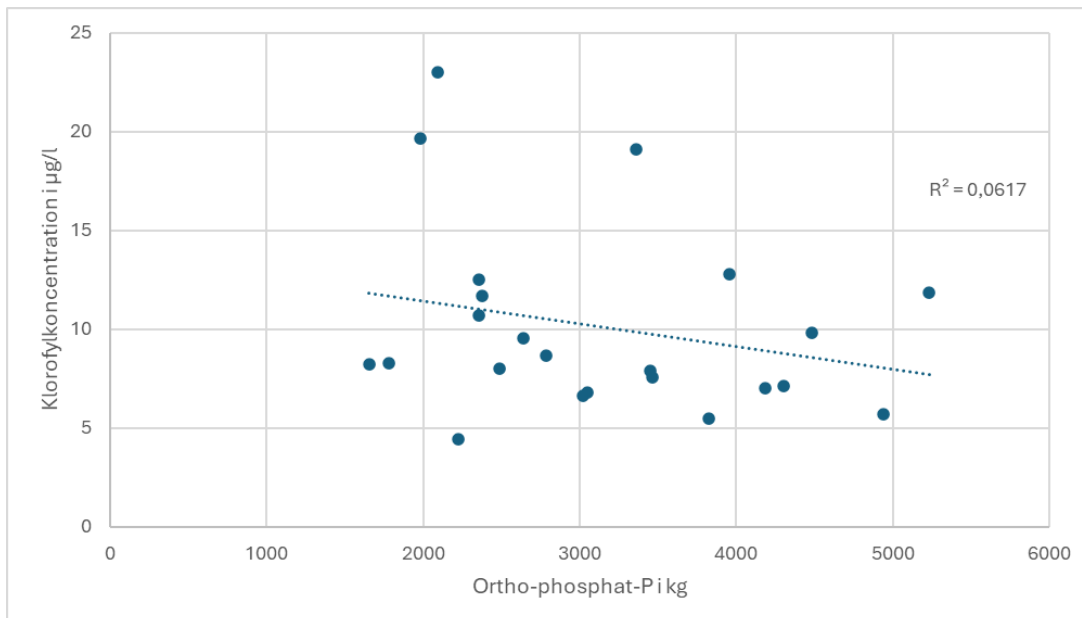
1:1 Ortho-load til klorofyl feb-apr:



Figur 36. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem Ortho-phosphat-P load i kg fra februar-april for oplandet (stationerne 31000027, 31000032, 35000006, 35000010 og 35000011) og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91610002 i Grådyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1991-1995, 1997-2006, 2008-2009, 2011-2016 og 2019.

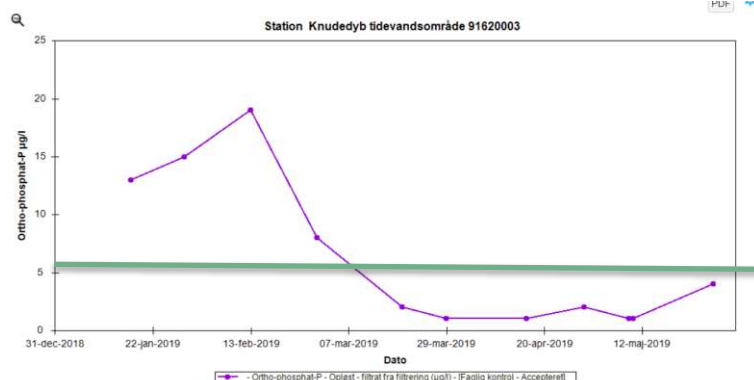


Figur 37. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem Ortho-phosphat-P load i kg fra februar-april for oplandet (stationerne 38000023 og 38000024) og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91620003 i Knudedyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1998-2000, 2004, 2007, 2008, 2014-2017 og 2019.

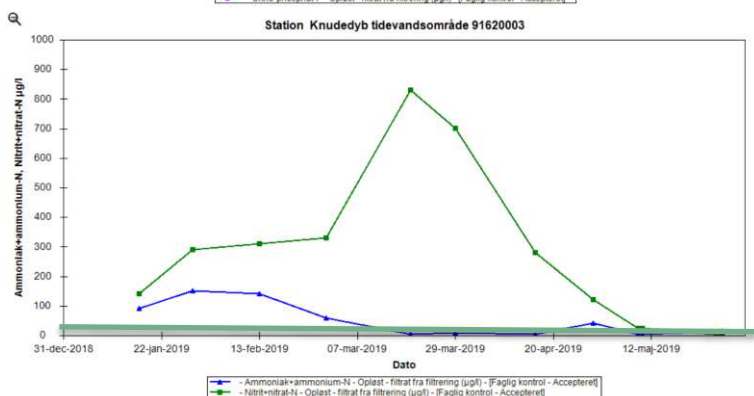


Figur 38. Lineær korrelation med tilhørende R^2 værdi mellem Ortho-phosphat-P load i kg fra februar-april for oplandet (stationerne 40000001, 42000016 og 42000021) og klorofylkoncentration i µg/l fra februar-april for målestation 91650003 i Listerdyb. Obs. grundet datamangel er korrelationen kun baseret på årene 1995, 1997-2006, 2009, 2011, 2013-2019 og 2021-2023.

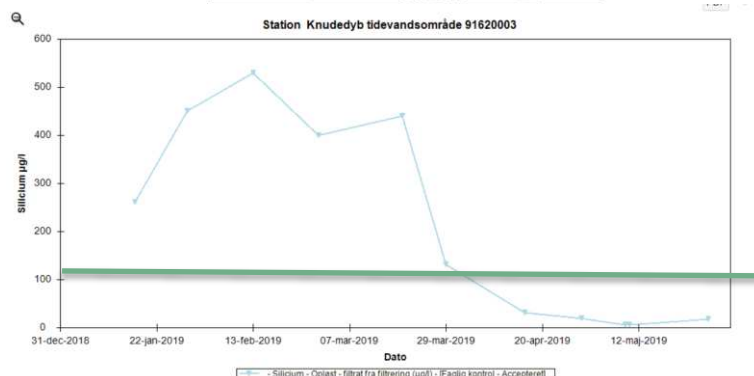
Bilag 3. eksempel på forårspeak, Knudedyb 2019



Uorganisk opløst fosfor
Potentiel begrænsning
6 $\mu\text{g/l}$



Uorganisk opløst kvælstof
Potentiel begrænsning
28 $\mu\text{g/l}$



Silicium
Potentiel begrænsning
120 $\mu\text{g/l}$