KØBENHAVNS UNIVERSITET
INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB OG NATURFORVALTNING

Udveksling af partikulært bundet fosfor imellem Nordsøen og den danske del af Vadehavet

Teknisk notat, delemne b, for Kystvandråd Vadehavet,

Thorbjørn Joest Andersen, IGN, Københavns Universitet,

Januar 2026.

Indhold

1. OPDRAG 4

1. RESUME 4

2. BAGGRUND 5

3. MÅLEPOSITIONER 7

4. PARTIKULÆRT BUNDET FOSFOR, TOTAL P, OG SPMC 11

5. SAMMENHÆNG IMELLEM SPMC OG KLOROFYL A 15

6. ESTIMERING AF VANDUDVEKSLING I TIDEVANDSOMRÅDERNE 18

Salinitetsdata 19

Ferskvandstilførsel, Q_f 22

Koncentration af fosfor 23

Resultat af estimeringerne af nettoudveksling med Nordsøen 26

7. REFERENCER 31

BILAG A. TIDSSERIER AF OPLØST FOSFOR I NORDSØEN OG DE FIRE TIDSVANDSOMRÅDER 32

BILAG B. TOTAL P I NORDSØEN OG DE FIRE TIDEVANDSBASSINER 36

BILAG C. SAMMENLIGNING AF FOSFORDATA FOR STATIONER I NORDSØEN 40

BILAG D. ALTERNATIVE BEREGNINGER MED ANDEN S_0 42

1. Opdrag

Opgaven er udført for Kystvandrådet for Vadehavet og omhandler delemne B som er en af tre delopgaver. Delemne B handler om betydningen af vandudvekslingen og partikulært bundet fosfor for fosforinputtet til Vadehavet. De øvrige to delopgaver er udført af DCE (delemne A, "Analyser af vandafstrømning og næringsstoftilførsel til Vadehavet") og SEGES innovation (delemne C, Forår Klorofyl-peaks i Vadehavet").

Opgaven er søgt løst ved at sammenstille en række målinger udført i forbindelse med det nationale overvågningsprogram, NOVANA, samt tidligere målinger udført af Københavns Universitet i Knude Dyb og Lister Dyb i perioden 2007 – 2011. NOVANA moniteringsprogrammet er ganske omfattende og der måles en række parametre på faste stationer overalt i de danske farvande og danske vandløb. I dette notat er der især brugt lange tidsserier af salinitet og fosfor-koncentrationer i Vadehavet og den kystnære del af Nordsøen samt afstrømningsdata stillet til rådighed af DCE. Datamængden er betydelig og data kan kombineres på flere måder. Den kombination af data, som er foretaget i dette notat, kan forhåbentlig være en brik til at forstå vandudvekslingsdynamikken i dette høj-dynamiske tidevandsområde.

1. Resume

Hovedkonklusion der kan drages på baggrund af dette notat er, at netto-tilførslen af fosfor fra Nordsøen til de fire tidevandsområder i den danske del af Vadehavet er ganske betydelig. På baggrund af en box-model er det estimeret at det fluviale bidrag af total fosfor i gennemsnit ligger på i størrelsesordenen 13 – 29 % af den samlede tilførsel med højest andel i Grådybs og Juvre Dybs tidevandsområder (29 – 25 %) og lavest (13 – 21 %) i Knude Dybs og Lister Dybs tidevandsområder. Der er en vis usikkerhed på estimaterne, men en sensitivitetstest med beregninger på baggrund af salinitetsmålinger fra en anden station i Nordsøen giver omtrent samme resultat. Beregningerne bekræfter indirekte tidligere modelleringsbaserede undersøgelser som viste, at den andel af klorofyl a koncentrationerne i tidevandsområderne som skyldes næringsstoftilførsel fra landbaserede kilder udgør 20 – 40 %.

Analysen af sammenhængen imellem suspenderet materiale (SPMC) og partikulært og opløst fosfor viser, at det er en tydelig sammenhæng, men dog med betydelig variabilitet. Der er ingen tydelig forskel imellem målinger i Knude Dyb og Lister Dyb og sammenhængen imellem SPMC og total P er kun en smule bedre end sammenhængen imellem SPMC og opløst fosfor (DIP). Sammenligning af niveauerne af både total P og DIP i Nordsøen og de fire tidevandsområder viser desuden at der er tale om ganske små forskelle imellem stationerne. Det vidner om den betydelige vandudveksling, men det gør også, at det ikke er muligt at beregne et robust estimat af transporten på baggrund af målinger af strømhastigheder og SPMC, da gradienten i indholdet af fosfor er så lille at usikkerheden på estimatet langt vil overstige netto-transporten.

Analysen af sammenhængen imellem SPMC og klorofyl a viser, at der er en vis sammenhæng, men den er ikke stærk og der er ikke noget der umiddelbart indikerer at særligt høje målte værdier af klorofyl skyldes suspenderet materiale og dermed resuspension af bundmaterialet i tidevandsområderne.

2. Baggrund

Vadehavsområdet er karakteriseret ved en kompleks hydrodynamik, hvor tidevand, ferskvandstilførsel, morfologi og saltholdighedsgradienter tilsammen styrer udvekslingen af vand, suspenderede partikler og opløste stoffer. Særligt udvekslingen af næringsstoffer, herunder fosfor, er af stor betydning, da den udveksling har direkte indflydelse på den økologiske tilstand i vadehavsområdet.

I de fire danske tidevandsområder i Vadehavet; Grådybs, Knude Dybs, Juvre Dybs og lister Dybs tidevandsområder, er det vist, at fosfor er begrænsende eller med-begrænsende næringsstof for primærproduktionen (Gertz et al., 2025). Forståelsen af, hvordan fosfor transporteres, fortyndes, tilbageholdes og udveksles igennem tidevandsdybene, er derfor afgørende for vurdering af effekten af reduktionstiltag i oplandet.

Vandudvekslingen mellem tidevandsområderne og Nordsøen bestemmes af samspillet mellem ferskvandstilførsel fra oplandet og den tidevandsdrevne udveksling med Nordsøen. Ferskvandstilførslen, Qf, bidrager med ferskvand og opløste og suspenderede stoffer fra oplandet,

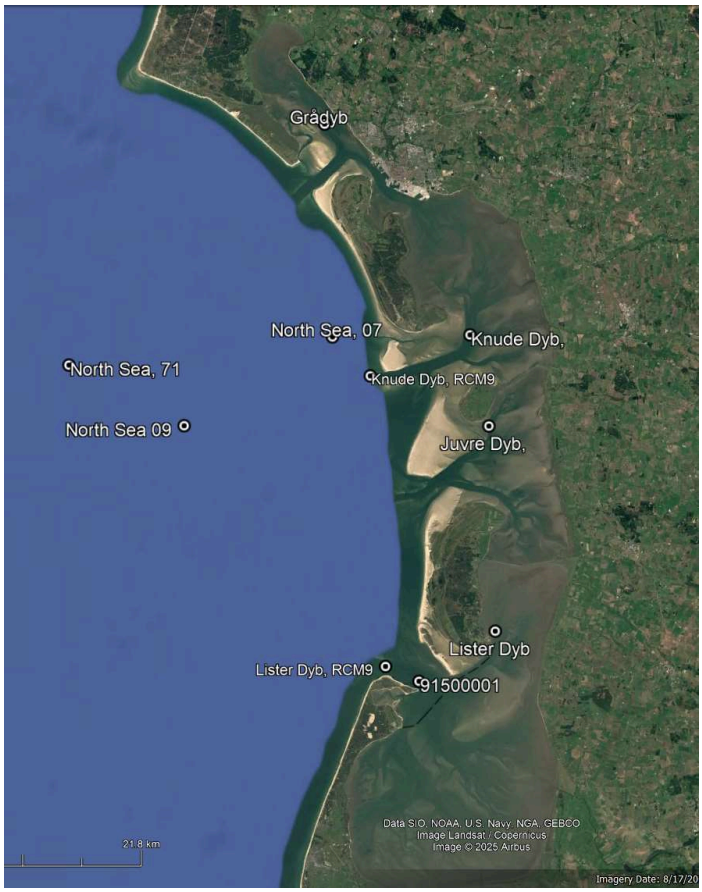
mens tidevandet medfører en periodisk ind- og udstrømning af havvand, der i gennemsnit kan beskrives ved en netto-udveksling, Q_e, som er det vandvolumen der reelt, i gennemsnit, udskiftes ved hver tidevandscyklus. Det udgør kun en mindre del af det samlede volumen, tidevandsprismet, som bevæger sig ing og ud i hver tidevandsperiode.
I velblandede tidevandsområder, hvor vertikal stratifikation er begrænset, kan den langsigtede middeludveksling ofte beskrives ved simple massebalancer. Under antagelse af stationære forhold (dvs. ingen netto-ophobning af salt over tid) kan salt anvendes som et konservativt sporstof til at kvantificere vandudvekslingen. Denne tilgang er særligt anvendelig i større systemer, hvor direkte målinger af udvekslingsstrømme er umulige at udføre.

Selvom saltbalance-baserede metoder er forenklede og bygger på en række antagelser, udgør de et robust og transparent værktøj til sammenlignende analyser mellem år og mellem forskellige tidevandsbassiner. Metoden er særligt velegnet i datarige systemer, hvor lange tidsserier af saltholdighed og afstrømning er tilgængelige – det danske vadehavsområde er heldigvis et eksempel på sådan et område.

Transporten af fosfor i tidevandsområderne er tæt koblet til vandudvekslingen. Ferskvandstilførslen medfører tilførsel af både opløst uorganisk fosfor (DIP) og partikulært fosfor, ofte i sammenhæng med suspenderet materiale. Samtidig bidrager Nordsøvand med fosfor fra kystzonen, fosfor der i et ukendt, men ikke ubetydeligt omfang, stammer fra store europæiske floder, særligt Elben (van Beusekom et al., 2019). Ved at kombinere beregninger af vandudveksling med målinger af fosforkoncentrationer kan der opstilles simple stofbalancer for fosfor. Disse balancer kan anvendes til at estimere netto-transporten af fosfor igennem tidevandsløbene og dermed vurdere den relative rolle som afstrømningen fra land spiller for næringsstofbelastningen i tidevandsområderne.

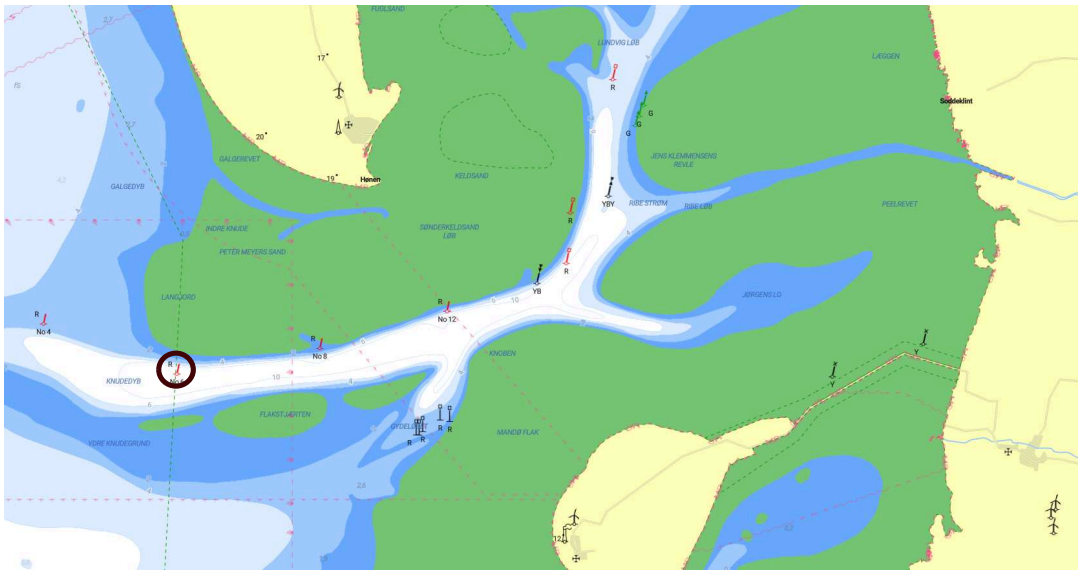
3. Målepositioner

I dette notat bruges der data målt fra flere positioner i Vadehavet og Nordsøen. Positionerne består både af to lokaliteter, Knude Dyb bøje 6 og Lister Dyb bøje 4, hvor der i perioden 2007 – 2011 er målt strømhastigheder og suspenderet materiale (SPMC) med selvregistrerende strømhastigheds-målere af typen Aanderaa RCM9 centralt i de to tidevandsdyb. Disse målinger er udført af undertegnede, Københavns Universitet (KU), i forbindelse med andre forskningsprojekter. Det øvrige data er indsamlet i forbindelse med NOVANA monitering på tre positioner i den kystnære del af Nordsøen samt en position i hver af de fire tidevandsområder. Positionerne er angivet i figur 3.1.



Figur 3.1. Målepositionerne for det data der er brugt i dette notat. Positionerne markeret RCM9 er navigationsbøjerne nummer 6 og 4 centralt placeret i henholdsvis Knude Dyb og Lister Dyb. De øvrige positioner er NOVANA-moniteringsstationer 91000071, 91500008 og 91500007 i Nordsøen samt 91610003 i Grådybs tidevandsområde; 91620003 i Knude Dybs tidevandsområde; 91630003 i juvre Dybs tidevandsområde og 91650001 og 91650003 i Lister Dybs tidevandsområde.

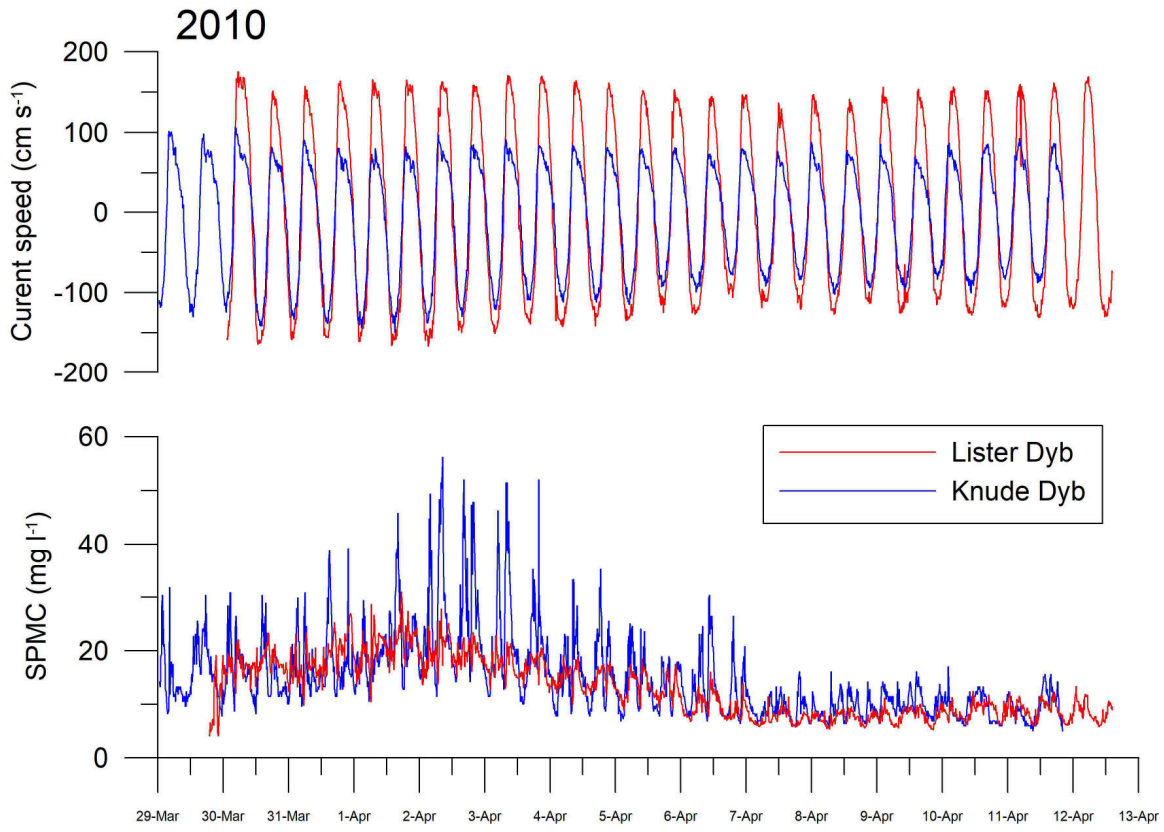
Målingerne med Aanderaa RCM9 strømhastighedsmålere er foretaget 5 m under vandoverfladen og består af målinger af bl.a. strømhastighed, strømhastighedsretning, salinitet og SPMC. De præcise positioner er angivet i figur 3.2 og 3.3 herunder og målingerne er, med tilladelse fra Farvandsvæsenet, udført med udstyr ophængt i navigationsbøjerne nummer 6 og 4 centralt placeret i henholdsvis Knude Dyb og Lister Dyb. De øvrige positioner er NOVANA-moniteringsstationer 91000071, 91500008 og 91500007 i Nordsøen samt 91610003 i Grådybs tidevandsområde; 91620003 i Knude Dybs tidevandsområde; 91630003 i Juvre Dybs tidevandsområde og 91650001 og 91650003 i Lister Dybs tidevandsområde.



Figur 3.2. RCM9-måleposition for bl.a. strømhastighed og SPMC, centralt placeret i Knude Dyb.

Figur 3.3. RCM9-måleposition for bl.a. strømhastighed og SPMC, centralt placeret i Lister Dyb.

Figur 3.4. Bøje 4 i den yderste del af Lister Dyb på en meget rolig dag, vinteren 2008/9. I gummibåden ses en Aanderaa RCM9 strømhastighedsmåler, fastgjort til bøjen i en kraftig kæde. Målingerne foretages hver 10. min i en dybde af 5 m under vandoverfladen. Data er i dette notat brugt til at belyse sammenhænge imellem koncentrationen af suspenderet materiale og fosfor og klorofyl målt på NOVANA stationer.

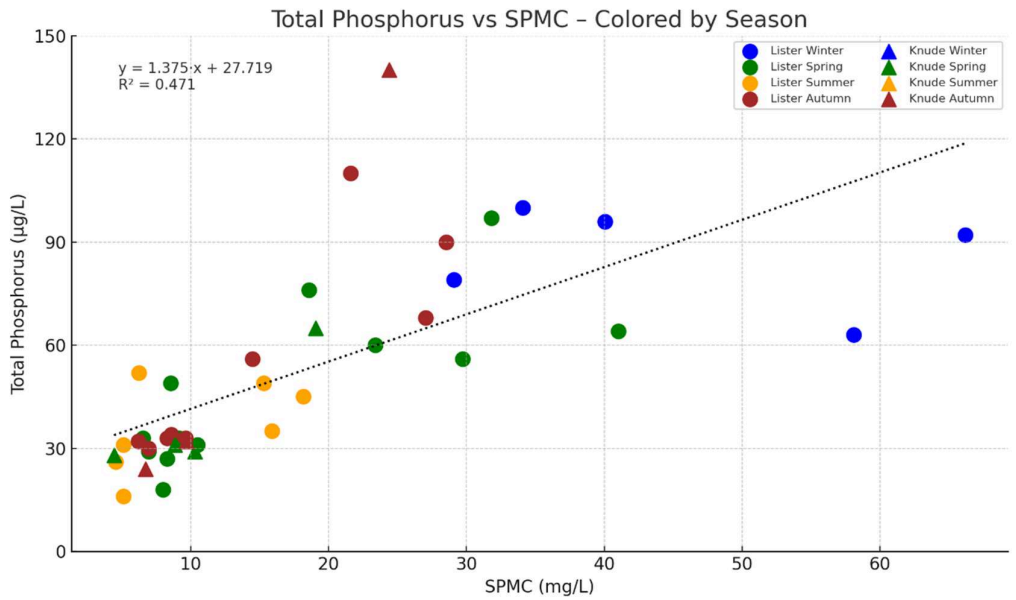


Figur 3.5. Et eksempel på samtidige målinger af strømhastigheder og suspenderet sedimentkoncentration i Knude Dyb og Lister Dyb i foråret 2010. Den suspenderede sedimentkoncentration er fundet ved kalibrering af de OBS-sensorer, som strømhastighedsmålerne er udstyret med.

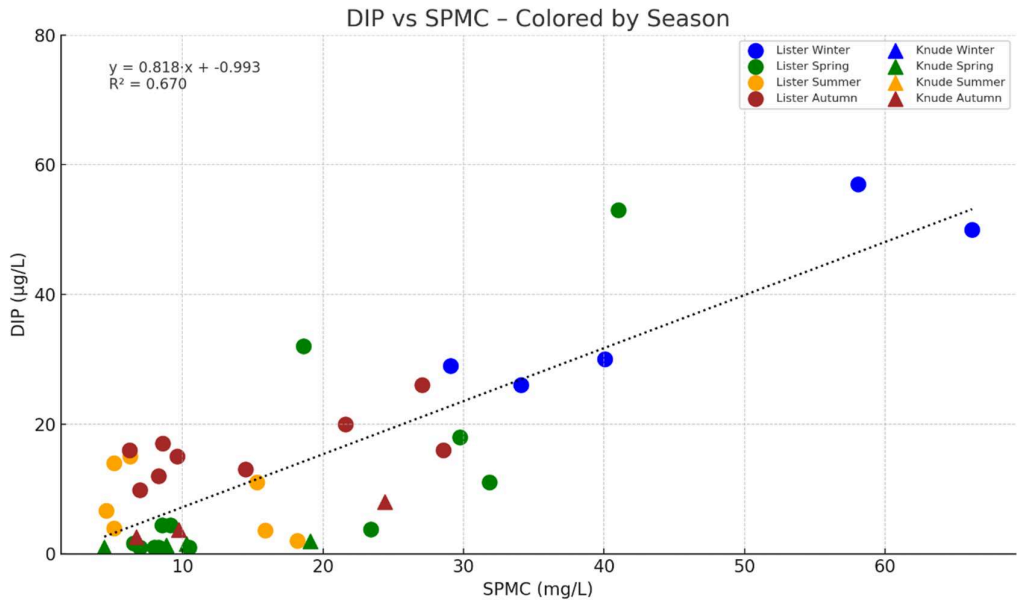
4. Partikulært bundet fosfor, Total P, og suspenderet materiale

Der er kun sjældent målt indhold af suspenderet materiale (SPMC) på NOVANA stationerne, men i dette notat er målinger af total P på NOVANA stationerne i Knude dybs og Lister Dybs tidevandsområde sammenholdt med målinger af SPMC foretaget med Aanderaa RCM9 strømhastighedsmålere placeret centralt i Lister Dyb og Knude Dyb igennem flere perioder i årene 2007 – 2011. Ved at kombinere data fra disse observationer med fosfor-målingerne fra NOVANA-programmet kan sammenhængen imellem SPMC og indholdet af fosfor analyseres. Der forventes en sammenhæng, særligt med total P, da partikulært bundet fosfor oftest vil dominere (bl.a. Thodsen et al., 2025; van Beusekom et al., 2017). Det samlede dataset er plottet i figur 4.1 (total P) og 4.2 (DIP). Data er opdelt i sæsoner (winter = dec, jan, feb; spring = marts, april, maj; summer = juni. juli, aug.; autumn = sep, okt, nov.) Der er tale om tydelige sammenhænge, men overraskende nok bedst sammenhæng imellem SPMC og DIP ($r^2 = 0.67$).

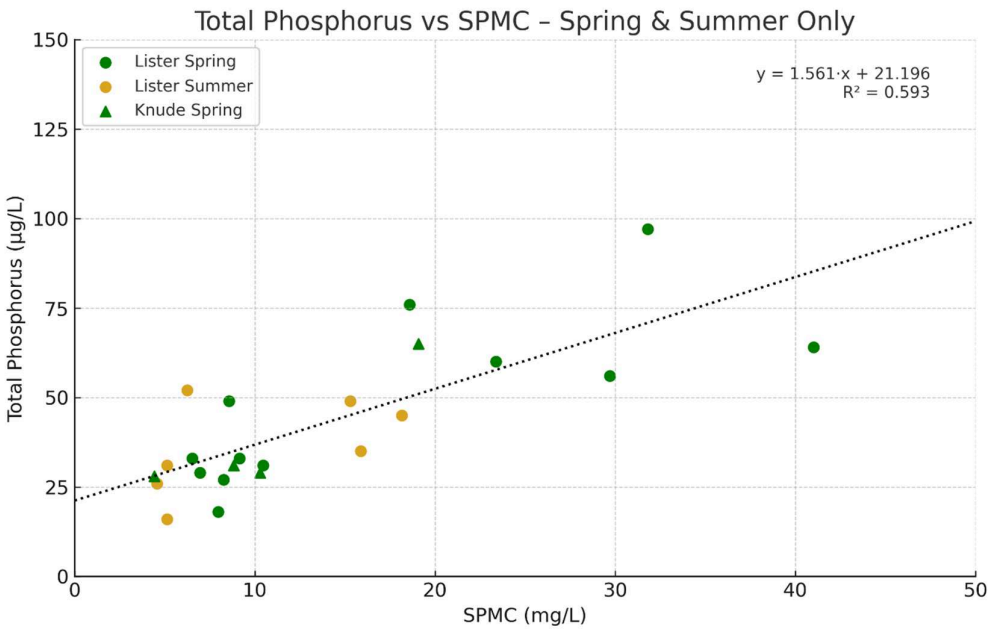
Data for forårs- og sommermånederne alene er vist i figur 4.3 og 4.4. Her ses der størst sammenhæng for Total P ($r^2 = 0.59$) og lidt mindre for DIP ($r^2 = 0.43$). For DIP er der en del målinger der viser højt SPMC, men lavt DIP. Det skyldes formentlig forbrug af DIP i vandsøjlen.



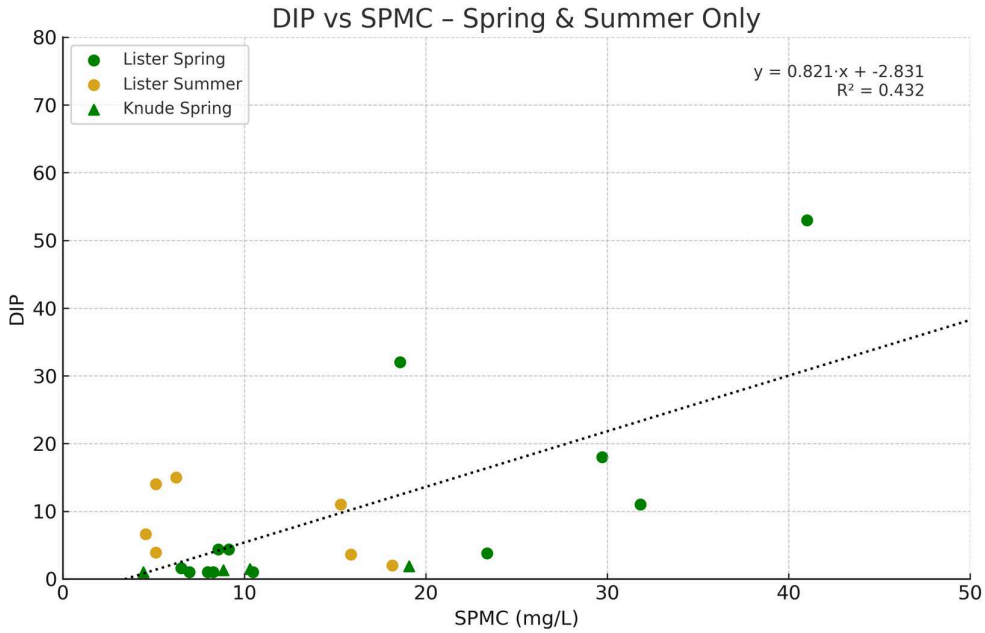
Figur 4.1. Scatterplot af Total P og suspenderet materiale koncentration (SPMC) for Knude Dyb (trekanter) og Lister Dyb (cirkler).



Figur 4.2. Scatterplot af opløst fosfor (DIP) og suspenderet materiale koncentration (SPMC) for Knude Dyb (trekanter) og Lister Dyb (cirkler).



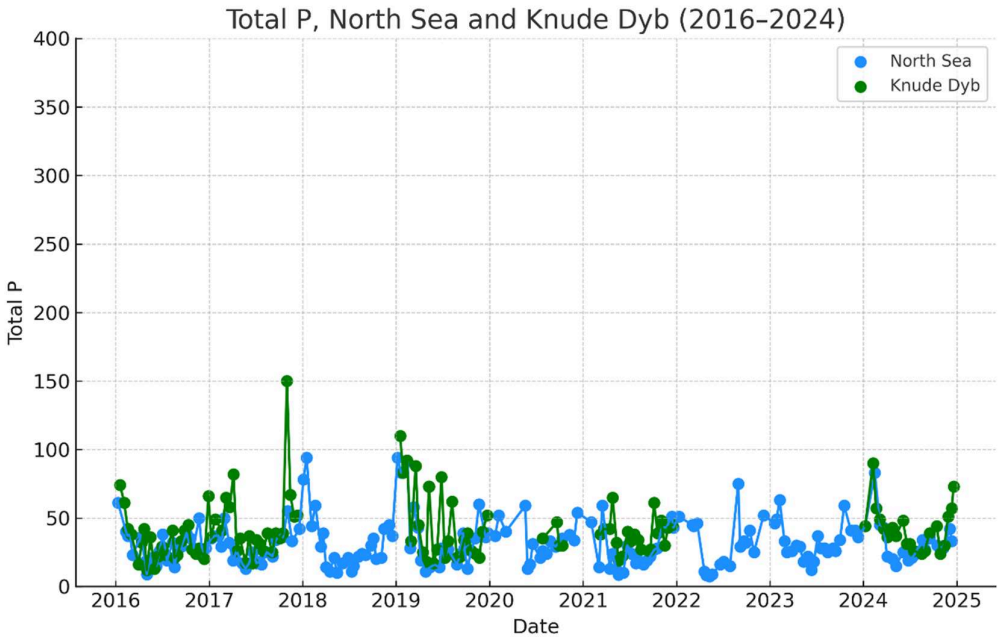
Figur 4.3 Scatterplot af Total P og suspenderet materiale koncentration (SPMC) for Knude Dyb (trekanter) og Lister Dyb (cirkler) for forårs (grøn) og sommermånederne (gul).



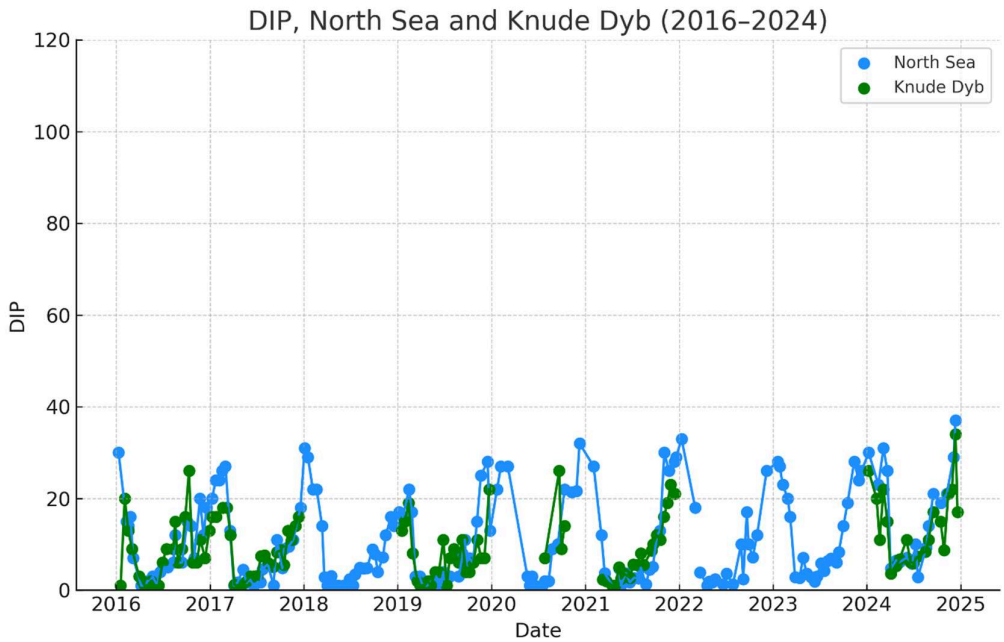
Figur 4.4 Scatterplot af opløst fosfor, DIP, og suspenderet materiale koncentration (SPMC) for Knude Dyb (trekanter) og Lister Dyb (cirkler) for forårs (grøn) og sommermånederne (gul).

Den overordnede konklusion er, at sammenhængen imellem SPMC og både TotalP og DIP er tydelig og der er ikke indikation på at den er signifikant forskellig for målestationerne i de to dyb, Knude Dyb og Lister Dyb. Der er dog kun få målinger i Knude Dyb, særligt i forårs- og sommermånederne.

Det var oprindeligt tanken at denne sammenhæng skulle bruges til at kvantificere den partikulært bundne transport af fosfor i de to løb, men det er tydeligt, at der trods den signifikante sammenhæng imellem SPMC og total P og DIP er betydelige variationer, særligt i forårs- og sommermånederne. Sammenligning af indholdet af total P og DIP på stationer i Nordsøen og de fire tidevandsområder viser desuden, at der er tale om små forskelle i koncentrationerne (figur 4.5 og 4.6 viser et eksempel for Knude dyb). De nogenlunde ens koncentrationer gør, at det ikke er muligt at give et rimeligt robust estimat af hverken transportmængden eller retningen da der vil være tale om ganske små forskelle i koncentrationerne imellem flod og ebbe – og disse forskelle vil det ikke være muligt at opløse pga. den ret store variabilitet i sammenhængen imellem SPMC og total P og DIP. I stedet er der valgt en alternativ tilgang til opgaven, hvor udvekslingen er estimeret på baggrund af salinitetsmålinger og antagelse om en steady-state situation (se afsnit 6).



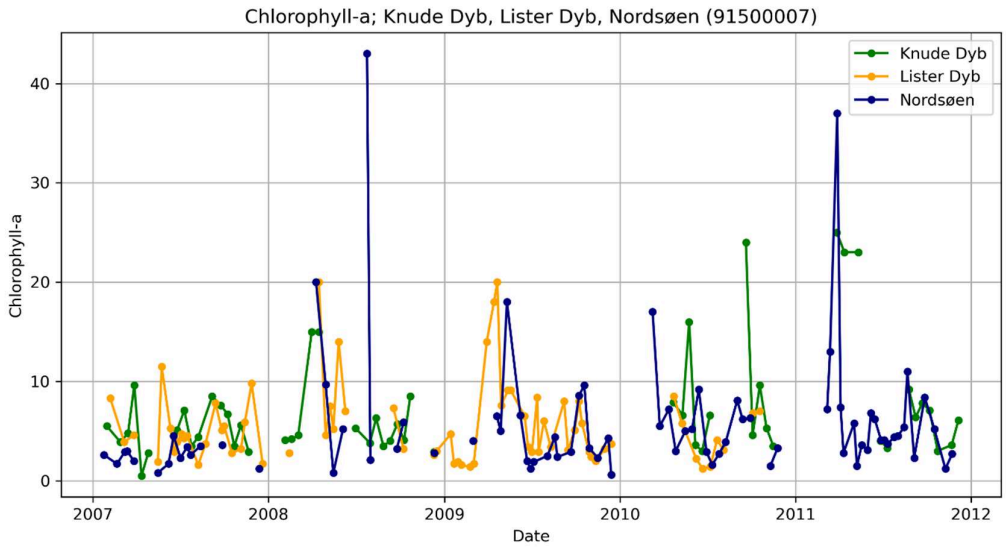
Figur 4.5 Tidsserie af målinger af partikulært bundet fosfor, Total P, i Nordsøen og i Knude Dybs tidevandsområde. Der ses meget tydelig samvariation og der ikke systematisk forskel på indholdet af partikulært bundet fosfor på de to stationer



Figur 4.6. Tidsserie af målinger af DIP i Nordsøen og i Knude Dybs tidevandsområde. Der ses meget tydelig samvariation og der ikke systematisk forskel på indholdet af opløst fosfor på de to stationer.

5. Sammenhæng imellem SPMC og klorofyl a

Chl a data for knude Dyb, Lister Dyb og Nordsøen (station 91500007) i perioden 2007 – 2010 (hvor der er målinger af SPMC) er vist i figur 5.1. Der er er desværre flere huller i data om vinteren, men der ses betydelig variation, både imellem stationerne og over tid.

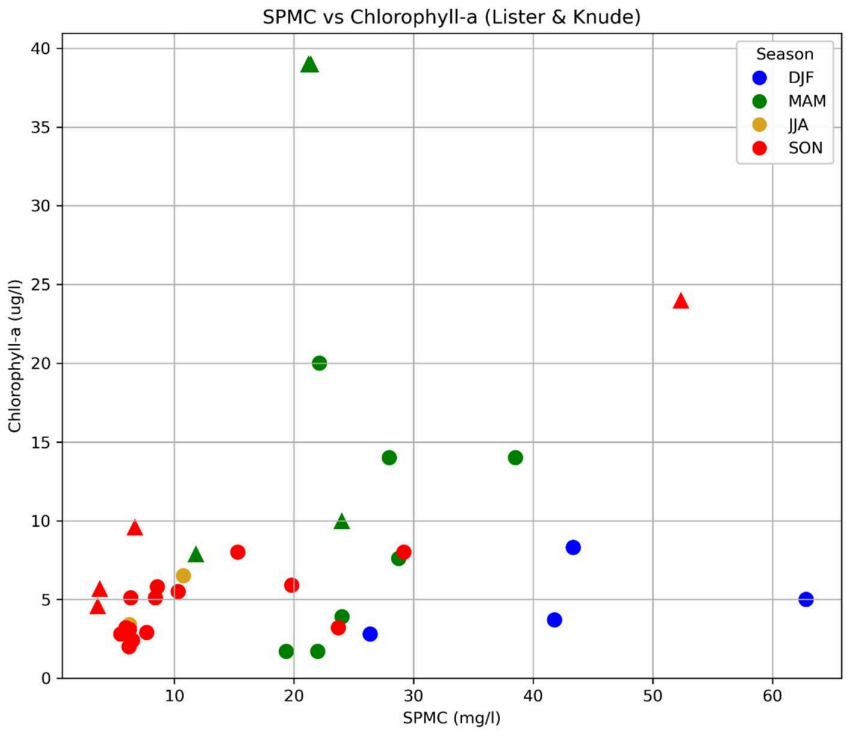


Figur 5.1 Klorofyl a målt i Nordsøen (position 91500007) og Knude Dybs og Lister Dybs tidevandsområde.

Det har været overvejet om særligt høje Chl a værdier målt i vandsøjlen i tidevandsområderne i et eller andet omfang kan skyldes lokal resuspension af overfladesediment fra tidevandsflader og løb. I så fald vil man forvente en tydelig korrelation imellem SPMC og Chla, og det nok særligt i sommerhalvåret og i situationer med forhøjet SPMC. Det er i dette notat undersøgt ved parvist at plotte SPMC målt med RCM9 strømhastighedsmålere på positionerne i Knude Dyb og Lister Dyb med samtidige målinger af chl a på station 91620003 i Knude Dyb og station 91650001 der er placeret centralt i Lister Dyb, tæt ved positionen for RCM9-målingerne. Data er indsamlet i perioden februar 2007 – marts 2011 i Lister Dyb og februar 2009 – marts 2011 i Knude Dyb.

Resultatet ses herunder i figur 5.2. Der er kun en svag korrelation imellem SPMC og chl a for begge stationer (r^2 = 0.21 for Knude Dyb og r^2 = 0.10 for Lister Dyb). For Knude Dyb er der en enkelt særligt høj værdi af chl a, men den er observeret ved moderat SPMC, ikke høj.

Det er vigtigt at holde sig for øje, at observationerne af SPMC og chl a i Knude Dyb ikke er foretaget på samme sted i tidevandsområdet, men data indikerer alligevel, at der ikke er nogen stærk korrelation imellem SPMC og chl a og der er derfor ikke nogen indikation af at særligt høje chl a værdier skyldes lokal resuspension.



Figur 5.2 Sammenhæng imellem koncentrationen af suspenderet materiale (SPMC) og chl a for Knude Dyb (trekanter) og Lister Dyb (cirkler) i perioden 2007 - 2010. Blå = vinter (dec,jan,feb), grøn = forår (marts,april,maj), gul = sommer (juni,juli,august), rød = efterår (sep,okt,nov).

6. Estimering af vandudveksling i tidevandsområderne

Som et alternativ til numerisk modellering kan netto-vandudvekslingen og netto-udvekslingen af opløste næringsstoffer i et tidevandsområde estimeres ved hjælp af målt salinitet i tidevandsområdet og det tilgrænsende hav samt tilførslen af ferskvand til tidevandsområdet (f.eks. Qu et al., 2022). Kendes koncentrationen af næringsstoffer i ferskvandstilførslen og i havet er det ligeledes muligt at estimere, hvilken andel ferskvandstilførslen udgør af den samlede nettotilførsel af næringsstoffer. Beregningen udnytter det faktum. at salinitet er en konservativ parameter, dvs. at der ikke tilføjes eller mistes salinitet til det samlede betragtede system. Princippet for estimeringen er, at der antages stationær tilstand (steady-state) og ved den mest enkle estimering antages ligeledes velopblandede forhold i vandsøjlen. Er begge dele opfyldt kan udvekslingen beregnes vhj. saltbalancen:

1) $Q_e \cdot S_0 = (Q_e + Q_f) \cdot S_e$

hvor:

- Q_e = netto vandudveksling med havet [m³/s]
- Q_f = ferskvandstilførsel [m³/s]
- S_0 = saltholdighed i havet
- S_e = gennemsnitlig saltholdighed i tidevandsområdet.

Q_f kendes på baggrund af kontinuerte målinger af vandføring (Thodsen et al., 2025) og saltholdigheden er målt i NOVANA-programmet på faste stationer i Nordsøen, Grådyb, Knude Dyb, Juvre Dyb og Lister Dyb.

Netto-udvekslingen af vand igennem tidevandsdybet kan findes ved omskrivning af ligning 1):

2) $Q_e = Q_f \cdot S_e / (S_0 - S_e)$

Ferskvandsbidragets andel af den samlede nettotilførsel af vand og næringsstoffer kan ligeledes findes ved omskrivning af ligning 1):

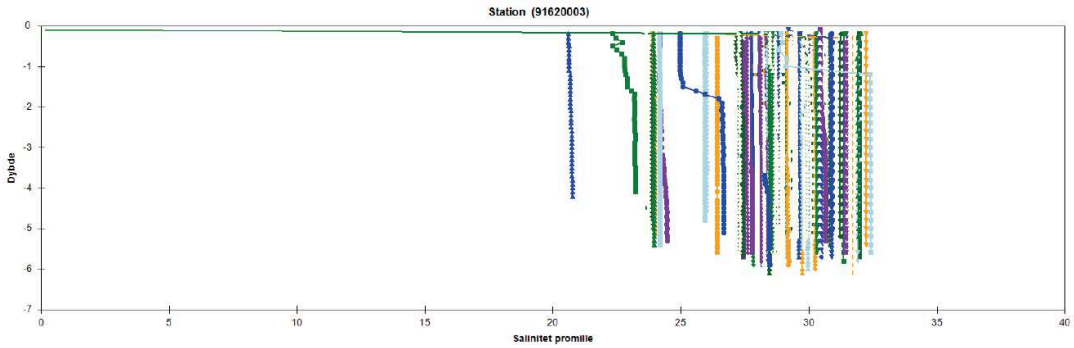
3) $Q_f / Q_e = (S_0 - S_e) / S_e$

Den sidste relation udtrykker, hvor stor en andel af den samlede vandudveksling der udgøres af ferskvandstilførsel. Et lavt forhold indikerer, at udvekslingen domineres af marint vand.
Hvis koncentrationen af næringsstoffer kendes i tidevandsområdet og det tilstødende hav så kan det relative forhold imellem tilførsel fra land og fra hav ligeledes beregnes ved at multiplicere koncentrationerne med Q_f og Qe .

Antagelsen om stationære forhold gør, at det er nødvendigt at se på middeltilstanden over længere tid for at den antagelse er opfyldt. Hvor længe afhænger af flere faktorer, bl.a. størrelse af tidevandsområdet og variabiliteten i ferskvandstilførslen. I dette notat er det antaget, at der er nogenlunde stationære forhold når data evalueres over flere uger og måneder og der er for hvert bassin beregnet et gennemsnitligt udvekslingsfold for hver vinter (månederne december, januar, februar), hvor der er tilstrækkeligt data tilgængeligt. Forholdet er beregnet for vintermånederne da de vil kendetegne situationen umiddelbart inden vækstsæsonen for fytoplankton starter i det tidlige forår. Vinteren er ligeledes den årstid, hvor der er størst sandsynlighed for at antagelsen om stationære forhold er opfyldt (konstant høj tilførsel af ferskvand).
Vandudvekslingen beregnes ved at matche sammenhørende målinger af S_0 og S_e. Som S_e er der brugt data fra NOVANA målepositionerne i hvert tidevandsområde. For saltholdigheden i Nordsøen, S_0, er der valgt gennemsnittet af vintermålinger (dec- feb) for perioden 2010 – 2024 for NOVANA positionen 91500007. Gennemsnitssaliniteten for vintermånederne er beregnet til 29.95 PSU for denne station. For at teste følsomheden for valget af stationen for S0 målingerne er der ligeledes foretaget beregninger med S0 salinitet sat til NOVANA-positionen 91000071; her er gennemsnitssaliniteten i vintermånederne 31.46 PSU.

Salinitetsdata

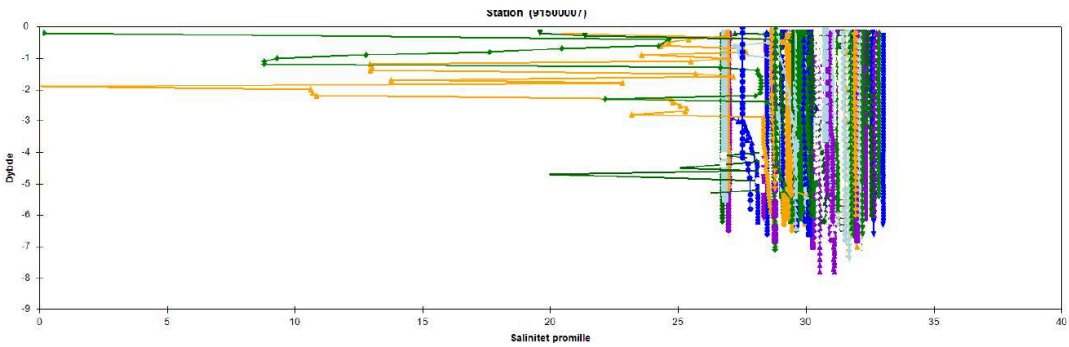
Antagelsen om velopblandede forhold kan undersøges ved at plotte salinitetsprofiler for måle-stationerne og på nær enkelte situationer er der tale om velopblandede forhold. Et eksempel er givet i figur 6.1 herunder, hvor salinitets-profilerne for Knude Dyb i perioden 2018-2024 er plottet



Figur 6.1 Salinitet på station 91620003 i Knude Dyb i perioden 2018 – 2024.

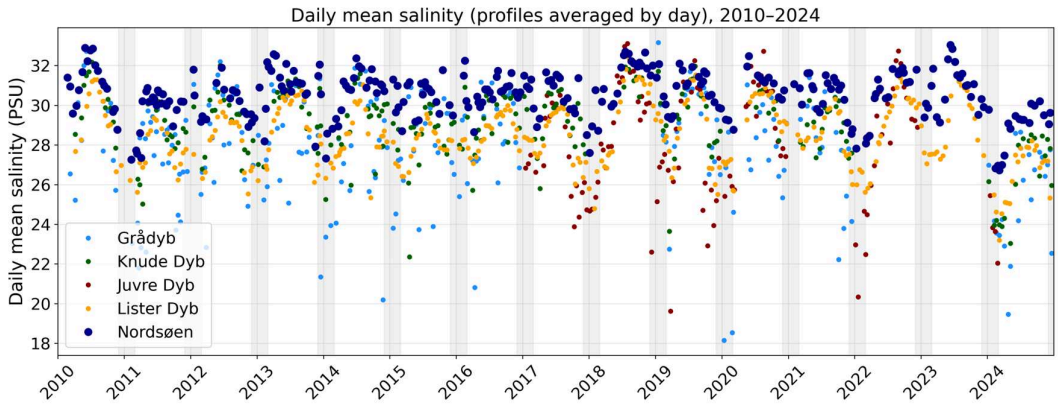
På nær enkelte undtagelser er der tale om velopblandede forhold.

Som primært input til parameteren S_0, som er saliniteten i det omgivende hav, er der valgt den målte salinitet på Nordsø-stationen 91500007 som er lokaliseret ca. 5 km vest for Fanø. Det er den station, hvorfra der er størst tidslig dækning. Profilerne for perioden 2018 – 2024 er vist i figur 6.2 herunder. Der er enkelte salinitetsprofiler, hvor der tydeligvis har været problemer med måleudstyret (CTD), men bortset fra dem, så er der tale om vertikale profiler og dermed velopblandede forhold langt de fleste dage.

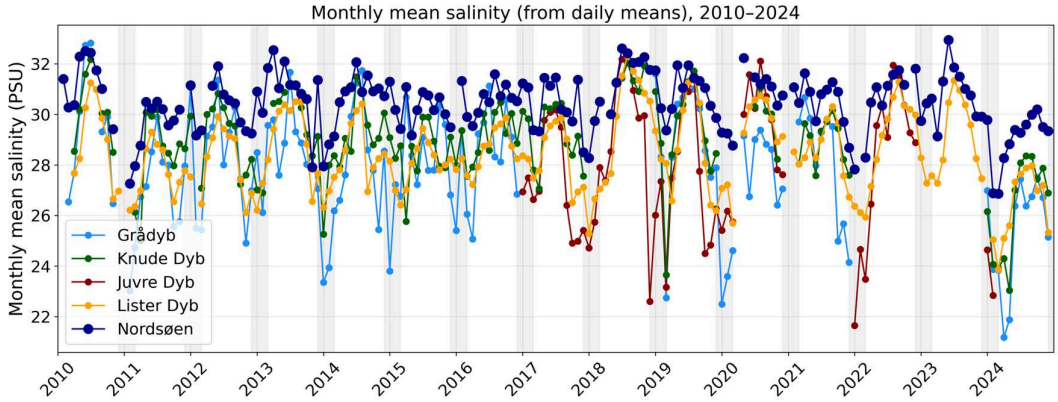


Figur 6.2. Salinitet på station 91500007 i den kystnære del af Nordsøen, omtrent 5 km fra Fanø. Når der måles langs strømningsvejen for tidevandsbevægelsen er stationen placeret ca 18 km fra NOVANA positionen i Knude Dyb.

Det samlede salinitetsdata, S_e, fra de fire tidevandsområder samt Nordsøstationen er vist i figur 6.3 (middelsalinitet for profilet for hver dag der er målt) og figur 6.4 (månedsmiddel for hver måned, hvor der er målinger).



Figur 6.3. Middelsalinitet for dage med målinger i Grådyb, Knude Dyb, Juvre Dyb, Lister Dyb og Nordsøen (NOVANA station 91500007)

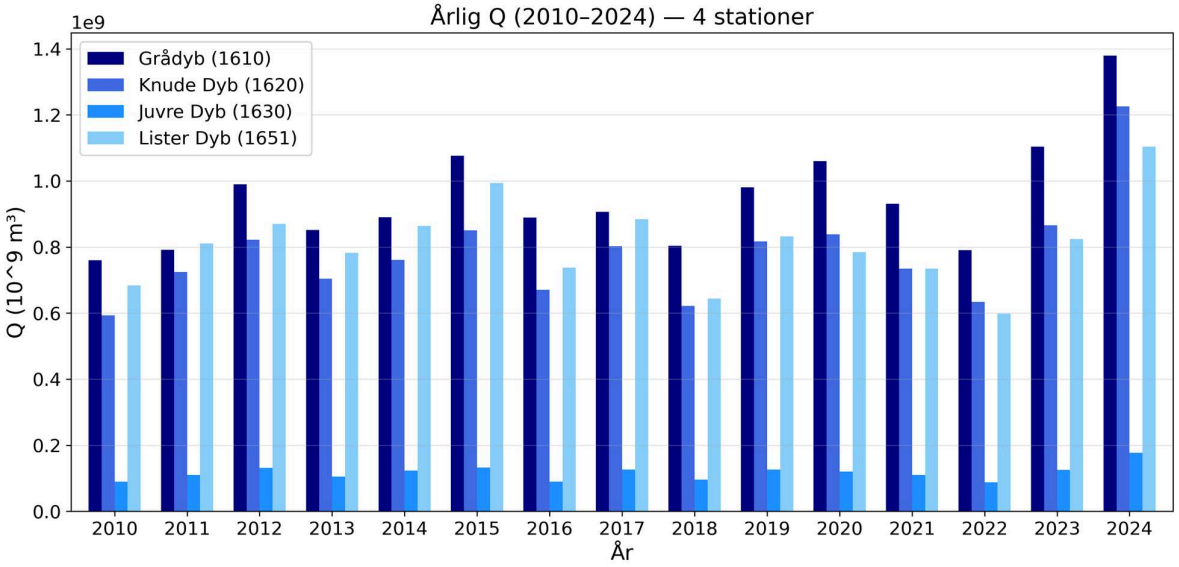


Figur 6.4. Månedlig middelsalinitet i Grådyb, Knude Dyb, Juvre Dyb, Lister Dyb og Nordsøen (NOVANA station 91500007).

Det ses at saliniteten i Nordsøen, S_0, som ventet stort set hele tiden er lidt højere end på de øvrige stationer og det er i øvrigt også den station, sammen med stationen ved Havneby i Lister Dybs tidevandsområde, hvor der er bedst dækning over tidsperioden. På stationen i Grådyb (Hjerting Løb) er der særligt om vinteren væsentligt lavere salinitet end i Nordsøen og antagelsen om stationære forhold er formentlig ikke opfyldt hele tiden for det tidevandsområde pga. stor ferskvandstilførsel fra Varde Å og målestationens placering i. I Juvre Dyb, hvor der kun er observationer siden 2017, observeres der også generelt lav salinitet om vinteren. Det er overraskende i betragtning af den ret beskedne ferskvands-tilførsel som er beregnet for det tidevandsområde, se herunder.

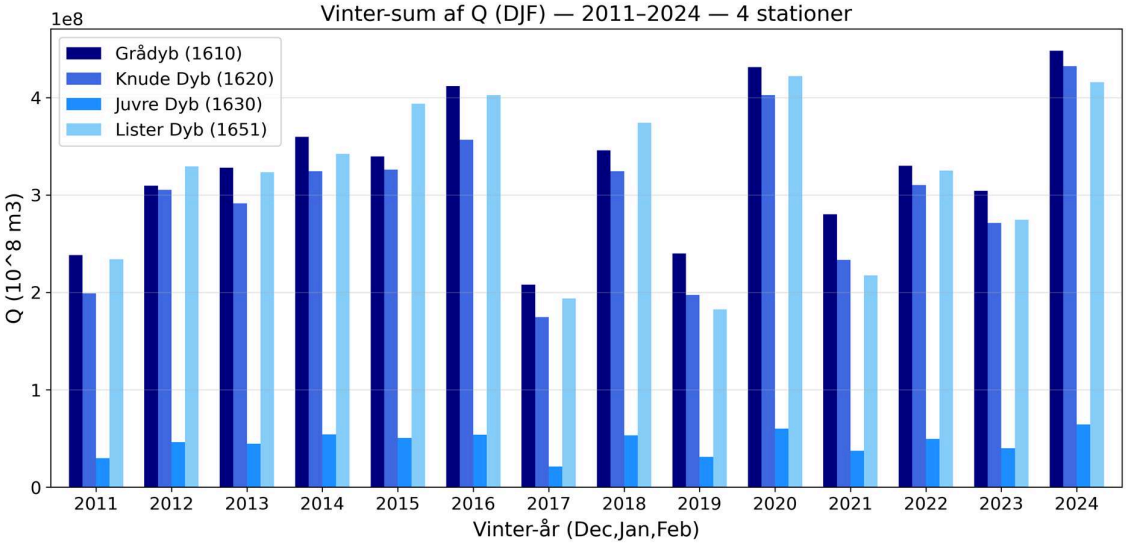
Ferskvandstilførsel, Q_f

Ferskvandstilførslen, Q_f, til de fire tidevandsområder kan findes i Thodsen et al., (2025) og den årlige sum er vist i figur 6.5 herunder. Ferskvandsafstrømningen indgår ved beregning af både tilførslen af fosfor fra land og nettotilførslen fra Nordsøen. Det ses at Juvre Dybs tidevandsområde modtager væsentligt mindre ferskvand end de øvrige dyb. Grådyb, Knude Dyb og Lister Dybs tidevandsområde modtager ferskvand af samme størrelsesorden.



Figur 6.5. Sum af årlig vandføring til hver af de fire tidevandsområder i perioden 2010 – 2024. Data fra Thodsen et al., (2025).

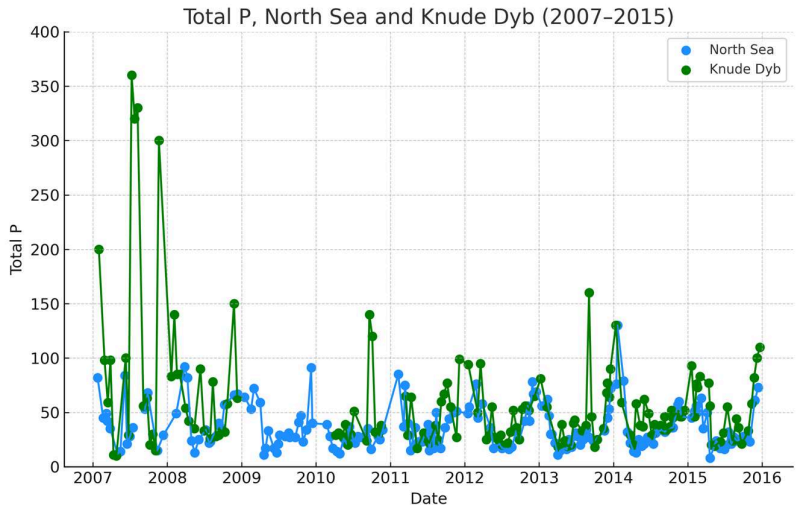
Til beregning af vandudvekslingen i vintermånederne (dec, jan, feb) benyttes summen af vinternedbøren, den er vist i figur 6.6.



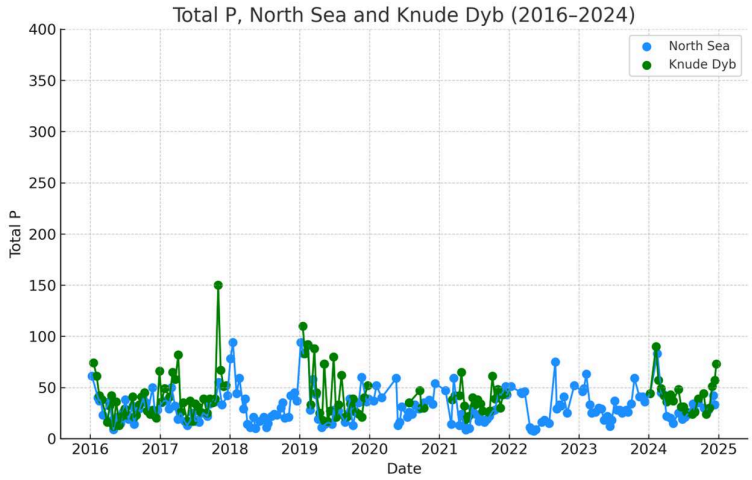
Figur 6.6. Summen af vinternedbøren (dec, jan, feb) til de fire nedbørsområder i perioden 2011 – 2024. Data fra Thodsen et al., 2025.

Koncentration af fosfor

Koncentrationen af total fosfor i det vand der udveksles med Nordsøen, TP_ns, er i de efterfølgende beregninger antaget at svare til den koncentration der er målt på Nordsø-stationen 91500007. Tidsserien for den station samt stationen i Knude Dyb er vist i figur 6.7 og 6.8 herunder. I 2007 og 2008 blev der målt høje værdier i Knude Dyb, men herefter følges de to observationsserier nogenlunde ad, dog med generelt lidt højere værdier i Knude Dyb. Tilsvarende plot for de øvrige tidevandsområder er vist i bilag A.



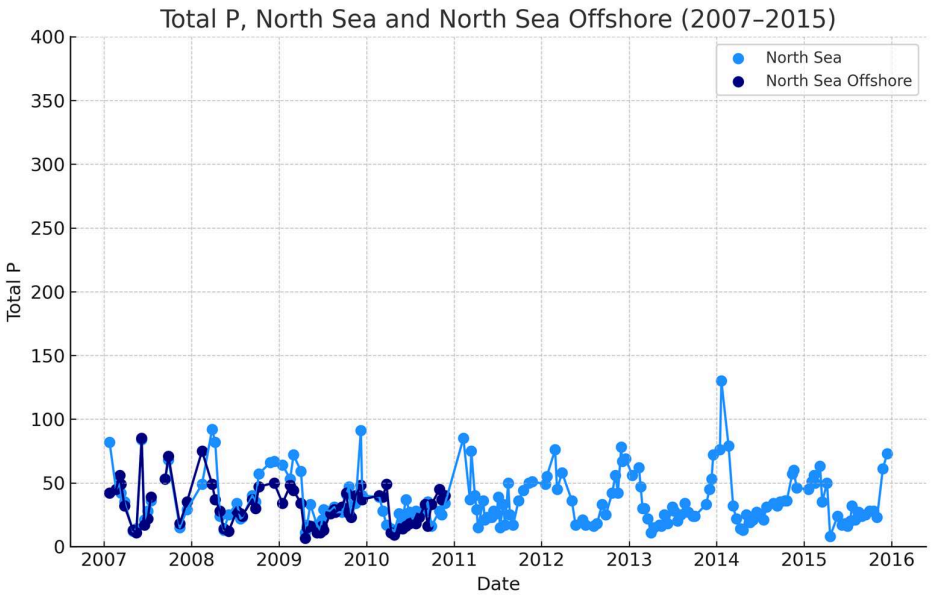
Figur 6.7. Koncentrationen af total fosfor (Total P) i Knude Dybs tidevandsområde (NOVANA station 91620003) og Nordsøen (station 91500007). I 2008 og 2009 blev der målt meget høje værdier i Knude Dyb, men herefter er koncentrationen faldet markant og ligger generelt kun lidt højere end på Nordsø-stationen.



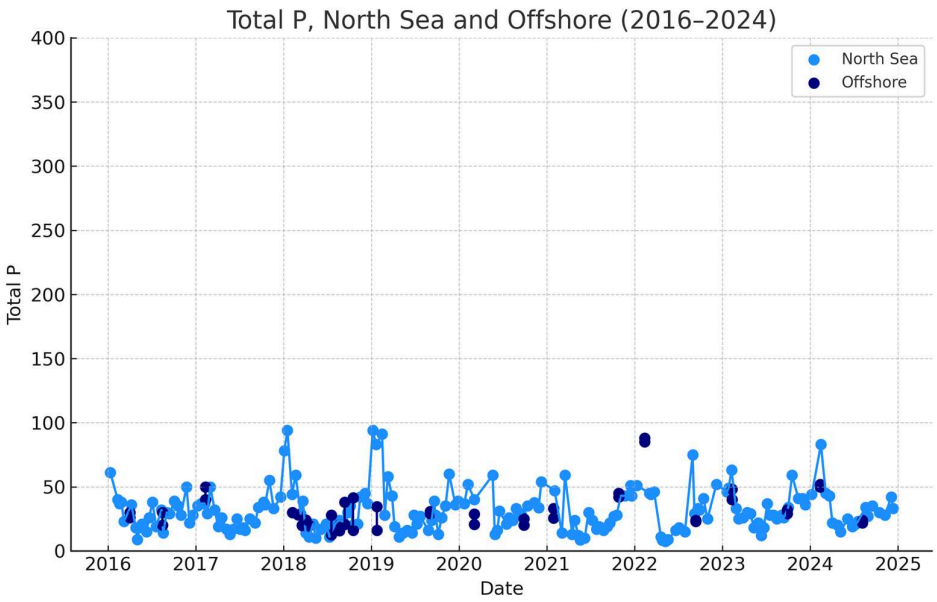
Figur 6.8. Koncentrationen af total fosfor (Total P) i Knude Dybs tidevandsområde (NOVANA station 91620003) og Nordsøen (station 91500007) i perioden 2016 – 2025. Koncentrationen i Knude Dybs tidevandsområde er generelt kun en smule højere end i Nordsøen i denne periode.

Til belysning af, om de målte fosforkoncentrationer på den kystnære station i Nordsøen er repræsentative for det vand der udveksles med tidevands-bassinerne er data fra den station ligeledes plottet i figur 6.9 og 6.10 sammen med data fra station 91500009 som ligger ca 18 km vest for Fanø (perioden 2007 – 2011) og station 91000071 som er placeret ca 28 km fra Fanø (perioden 2016 –

2024). Det ses, at særligt data fra stationen længst fra land er målt meget sporadisk, men det overordnede billede er, at koncentrationen af total fosfor på de tre stationer svarer nogenlunde til hinanden og der er ikke nogen tydelige systematiske forskelle. Det indikerer, at den kystnære station er et rimeligt valg til beregning af nettoimporten af total fosfor fra Nordsøen.



Figur 6.9. Indholdet af Total P målt på stationerne 91500007 (North Sea, ca 5 km fra Fanø) og 91500009 (North Sea offshore, ca 18 km fra Fanø) i perioden 2007 - 2016. Målingerne ophørte på offshore stationen i 2010.

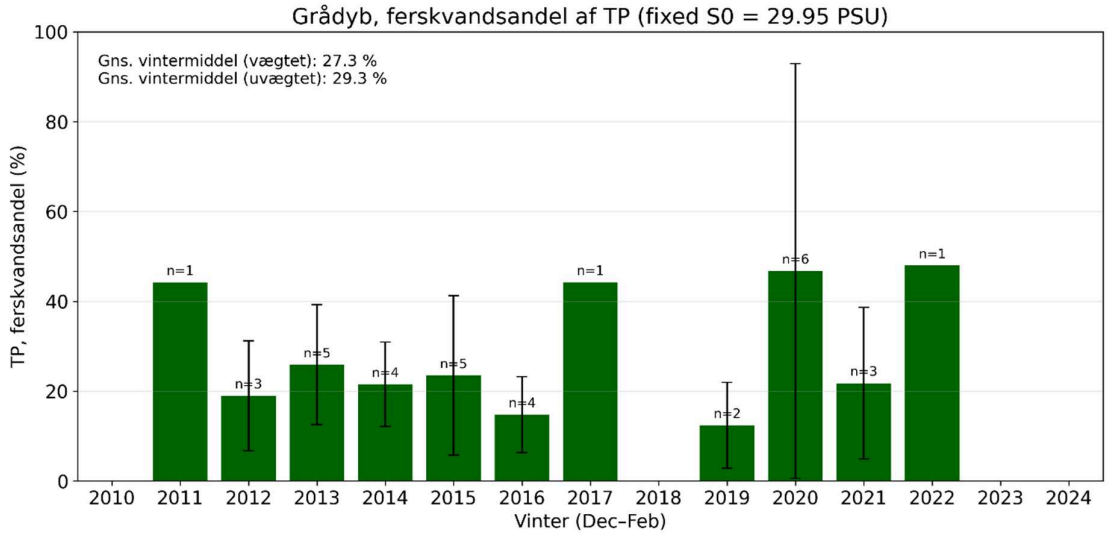


Figur 6.10 Indholdet af Total P målt på stationerne 91500007 (North Sea, ca 5 km fra Fanø) og 91000007 (North Sea offshore, ca 28 km fra Fanø)) i perioden 2016 - 2025. Målingerne begyndte på denne offshore station i 2016, men er meget sporadiske.

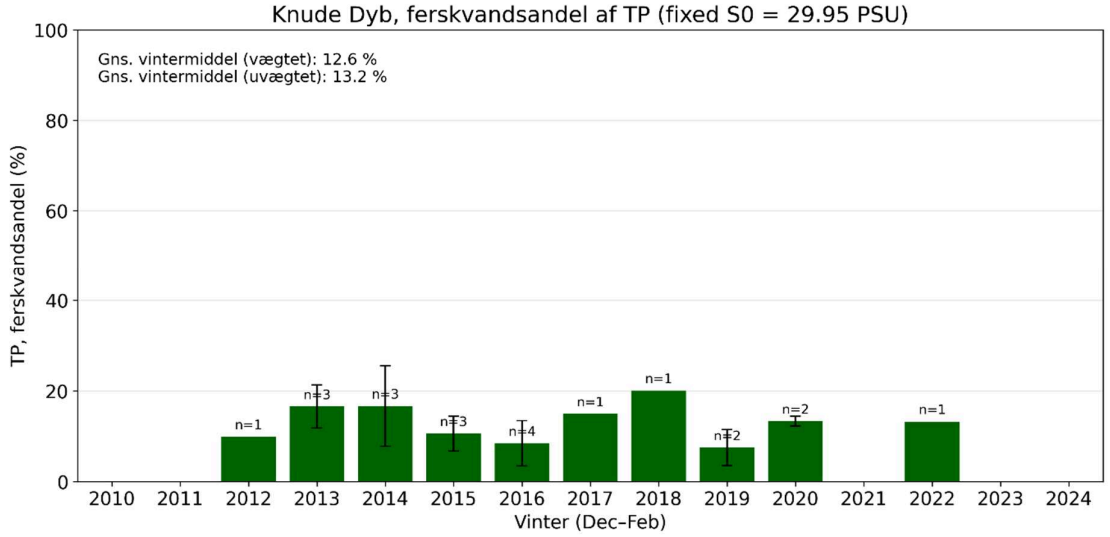
Resultat af estimeringerne af nettoudveksling med Nordsøen

Den fluviale andel af nettotilførslen af total fosfor, Total P, for hvert år til hvert tidevandsområde er angivet i figur 6.11, 6.12; 6.13; og 6.14. I alle beregningerne er der er taget udgangspunkt i en S_0 svarende til den målte salinitet på station 91500007.

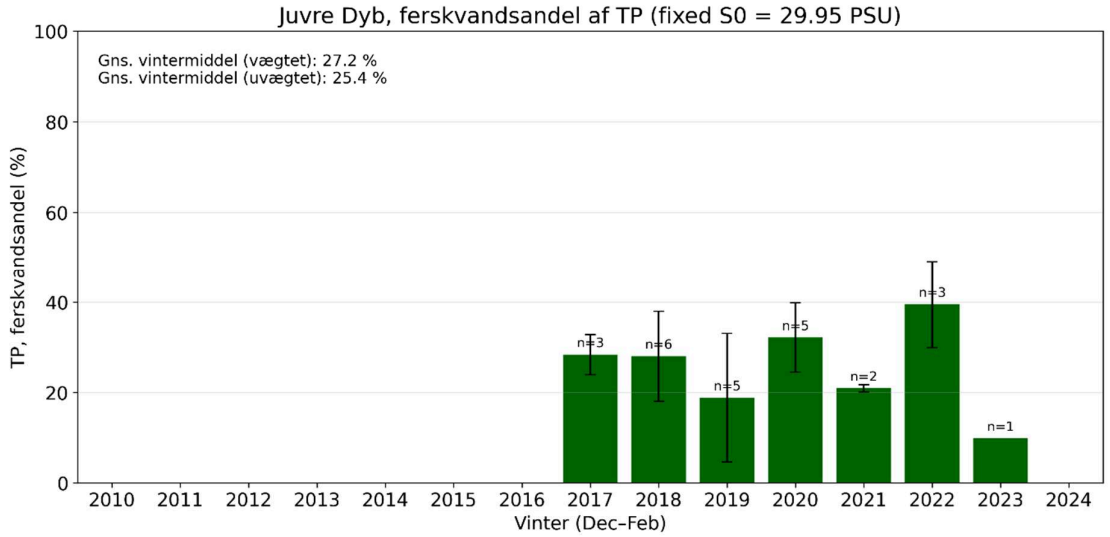
For Grådyb, Knude Dyb og Lister Dyb er der brugbare data siden henholdsvis 2011, 2012 og 2011 medens der kun er tilstrækkeligt data for Juvre Dyb siden 2017. Resultaterne for Grådyb er medtaget her for fuldstændighedens skyld, men er næppe troværdige da grundforudsætningerne for beregningerne - stationære forhold og velopblandet vandsøjle - næppe er opfyldt hele tiden, især ikke om vinteren. For de øvrige tre tidevandsområder vurderes det, at forholdene er opfyldt langt det meste af tiden og de resultater vurderes derfor til at være troværdige. Der er en del variation fra år til år – den variation skyldes enten variation i afstrømning og/eller variation i forholdet S_0/Se for observations-parrene de enkelte år.



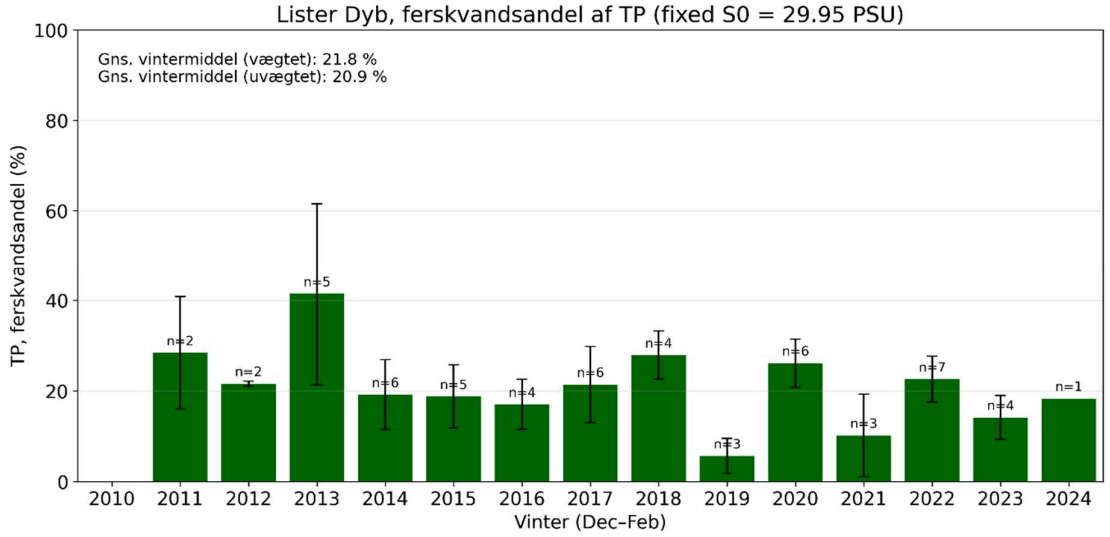
Figur 6.11. Estimeret fluvial andel af den samlede tilførsel af total P til Grådybs tidevandsområde. n angiver antallet af brugbare parvise observationer af saliniteterne S0 og Se for hver vintersæson.



Figur 6.12. Estimeret fluvial andel af den samlede tilførsel af total P til Knude Dybs tidevandsområde. n angiver antallet af brugbare parvise observationer af saliniteterne S0 og Se for hver vintersæson.



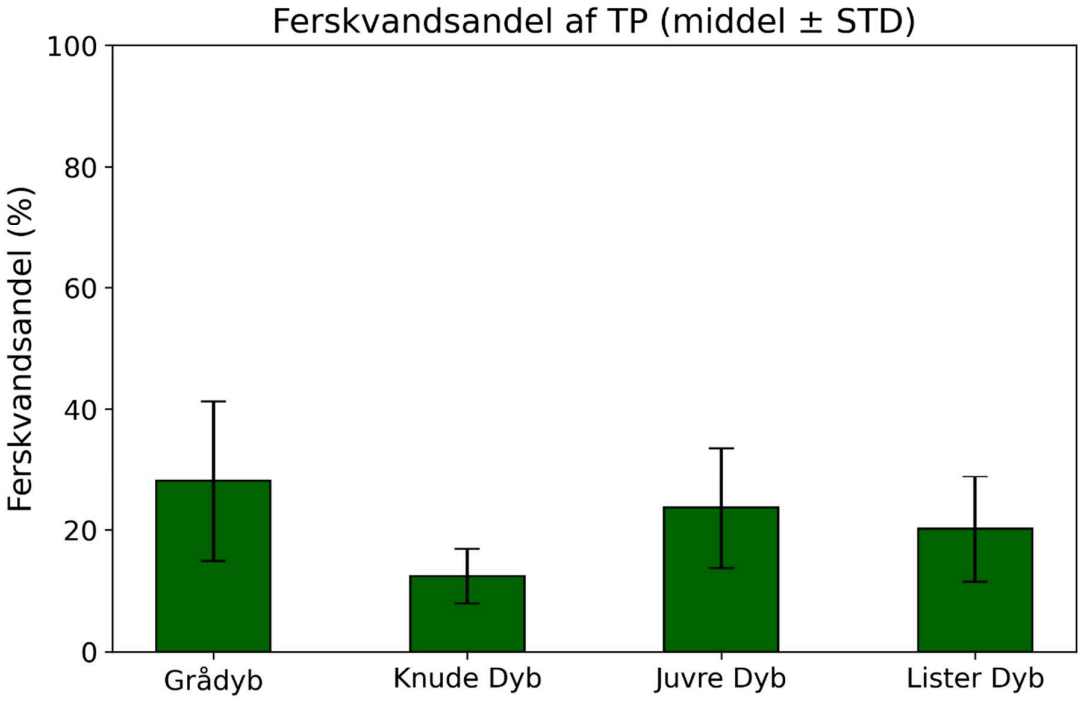
Figur 6.13 Estimeret fluvial andel af den samlede tilførsel af total P til Juvre Dybs tidevandsområde. n angiver antallet af brugbare parvise observationer af saliniteterne S0 og Se for hver vintersæson.



Figur 6.14. Estimeret fluvial andel af den samlede tilførsel af total P til Lister Dybs tidevandsområde. n angiver antallet af brugbare parvise observationer af saliniteterne S0 og Se for hver vintersæson.

Gennemsnittet for hvert tidevandsbassin er vist i figur 6.15. Igen er det vigtigt at holde sig for øje, at resultatet for Grådybs tidevandsområde næppe er helt troværdigt. Den beregnede højere andel af fluvialt i bidrag af total P i Grådybs tidevandsområde matcher dog det resultat som er fundet ved 3D modellering af Erichsen et al. (2023). For Juvre Dyb beregnes der ligeledes et højt forhold; det

skyldes den ret lave salinitet som ofte bliver målt på NOVANA-stationen i Juvre Dybs tidevandsområde. For Knude Dybs tidevandsområde er der tale om en ret lav fluvial andel på 13 ± 4 %. Der er ret stor variation i det beregnede forhold imellem vintrene i de enkelte tidevandsområder og der er kun signifikant forskel på ferskvandsandelen i Knude Dyb i forhold til Grådyb og Juvre Dyb; der er ikke signifikant forskel på ferskvandsandelen af total P imellem de øvrige tidevandsområder.



Figur 6.15. Den gennemsnitlige estimerede fluviale andel af tilførslen af total P til hvert af de fire tidevandsområder. Forudsætningerne for estimeringen er næppe fuldt opfyldte for Grådybs tidevandsområde og resultatet for det tidevandsområde skal derfor opfattes som indikativ. Den estimerede andel for Juvre Dybs tidevandsområde er overraskende høj, taget den relativt lave ferskvandstilførsel i betragtning. Resultatet skyldes relativt lave målte saltholdigheder i det tidevandsområde.

Det er lidt overraskende at det fluviale bidrag til Knude Dybs tidevandsområde estimeres til at være så lavt. Det kunne i princippet skyldes den kortere afstand imellem målepositionerne for saltholdighederne i Nordsøen ved station 91500007 og saltholdigheden i Knude Dybs tidevands-område, men beregninger, hvor der i stedet er brugt salinitetsmålinger fra station 91000071, som

ligger knap 30 km ude i Nordsøen, viser samme mønster, om end med lidt højere ferskvandsbidrag af total P for alle fire tidevandsområder (bilag D). På baggrund af beregningerne med denne boksmodel kan det således konkluderes at ferskvandsbidragets andel af den samlede tilførsel af total P til Knude Dybs tidevandsområde er lavere end i Grådybs og Juvre Dybs tidevandsområder og lavere end, men ikke signifikant forskellig fra, andelen i Lister Dybs tidevandsområde.

7. Referencer

Erichsen et al., 2023. Afrapportering – Kystvandrådet for Vadehavet, dec 2023. Afsnit 6, Modeludvikling of scenarioanalyse. DHI.

Gertz, F., Hu, F., Thostrup, L.K., 2025. Forår klorofyl-peaks i Vadehavet. Teknisk notat fra SEGES Innovation.

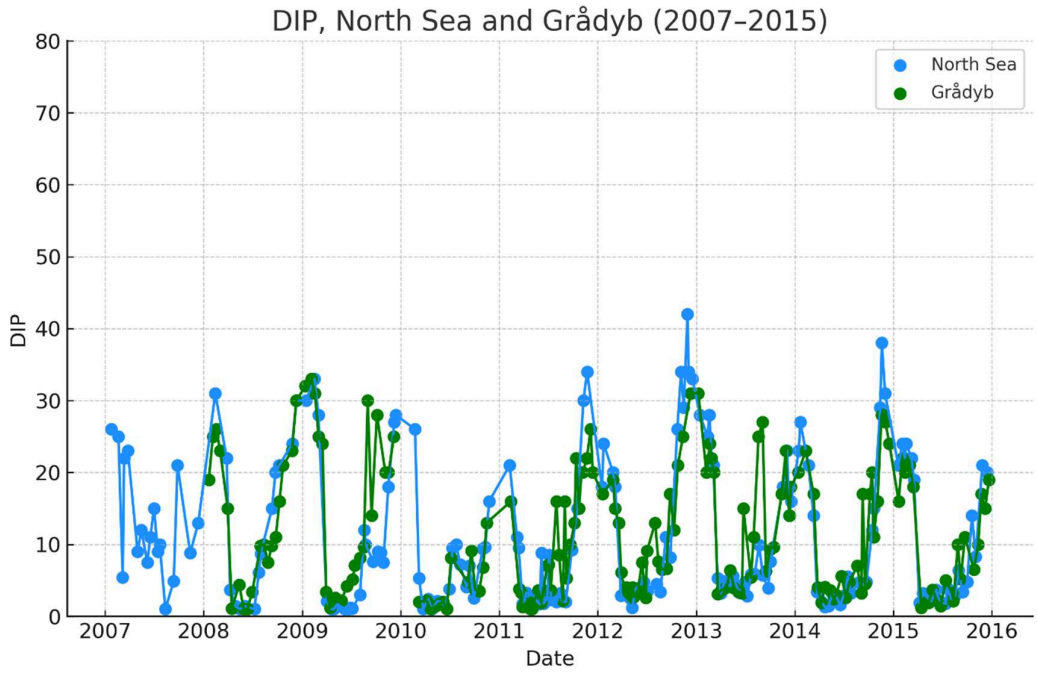
Thodsen, H, Muff, E. og Tornbjerg, H., 2025. Analyse af vandafstrømning og næringsstoftilførsel til Vadehavet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi.

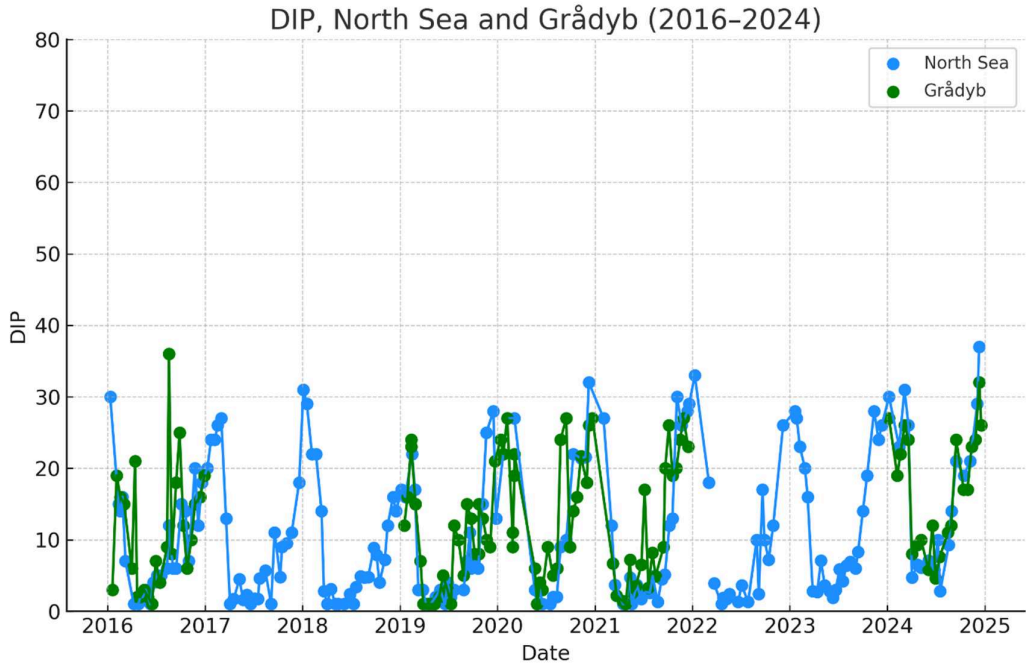
van Beusekom, J.E.E., Bot, P., Carstensen, J., Grage, A., Kolbe, K., Lenhart, H.J., Pätsch, J., Petenati, T. and Rick, J., 2017. Wadden Sea Quality Status Report.

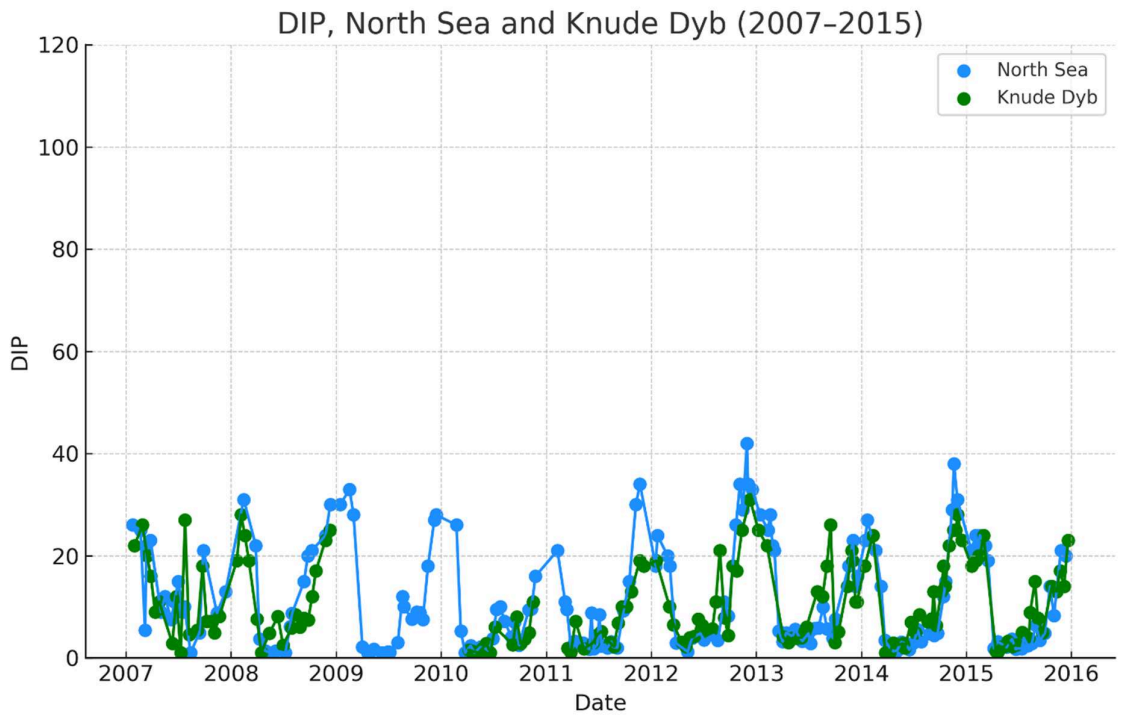
Van Beusekom, J.E., Carstensen, J., Dolch, T., Grage, A., Hofmeister, R., Lenhart, H., Kerimoglu, O., Kolbe, K., Pätsch, J., Rick, J. and Rönn, L., 2019. Wadden Sea Eutrophication: long-term trends and regional differences. Frontiers in marine science, 6, p.370.

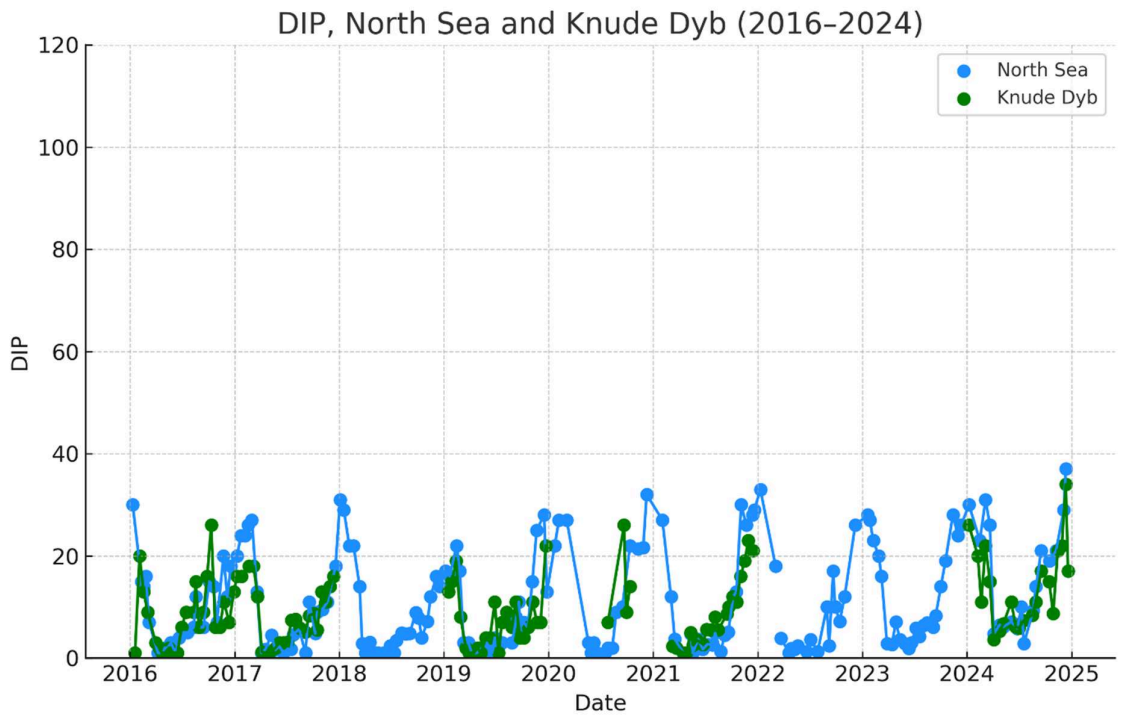
Qu, L., Hetland, R.D. and Schlichting, D., 2022. Mixing pathways in simple box models. Journal of Physical Oceanography, 52(11), pp.2761-2772.

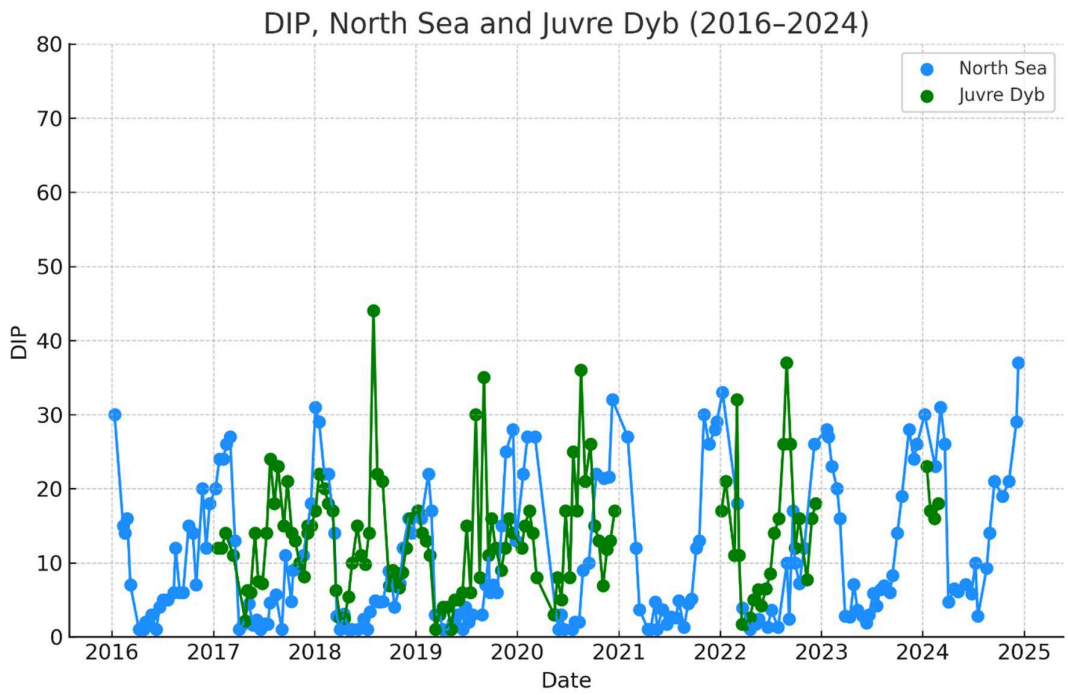
Bilag a. Tidsserier af opløst fosfor i Nordsøen og de fire tidsvandsområder

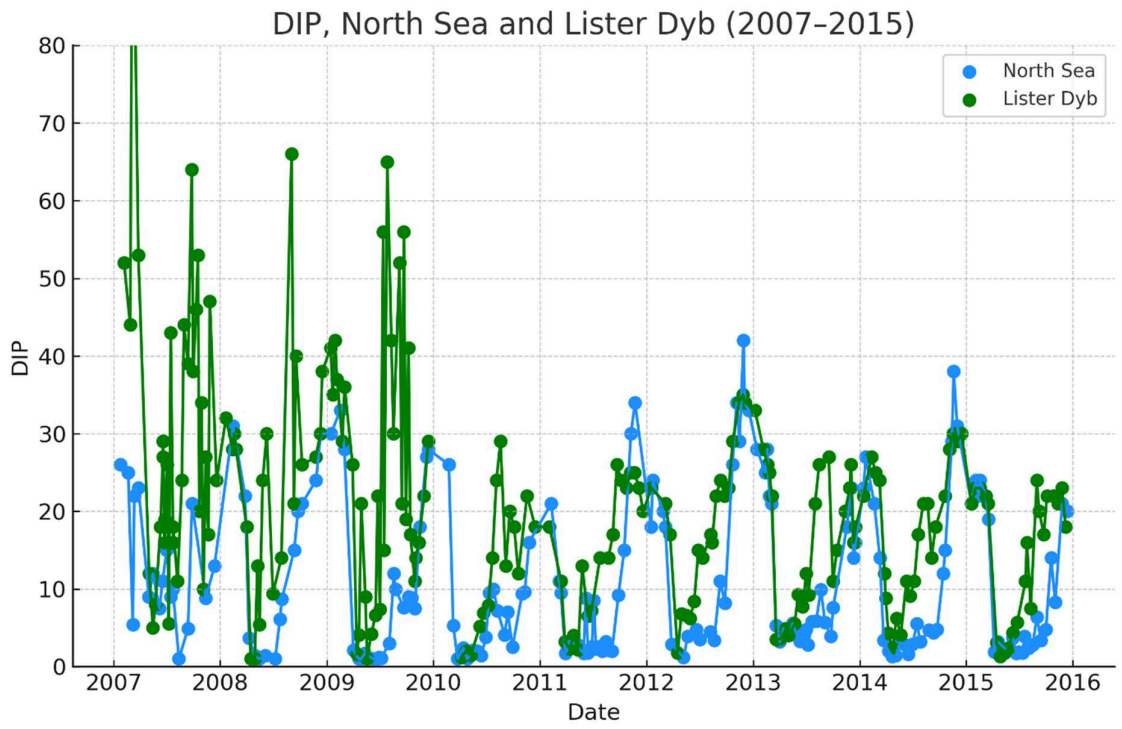


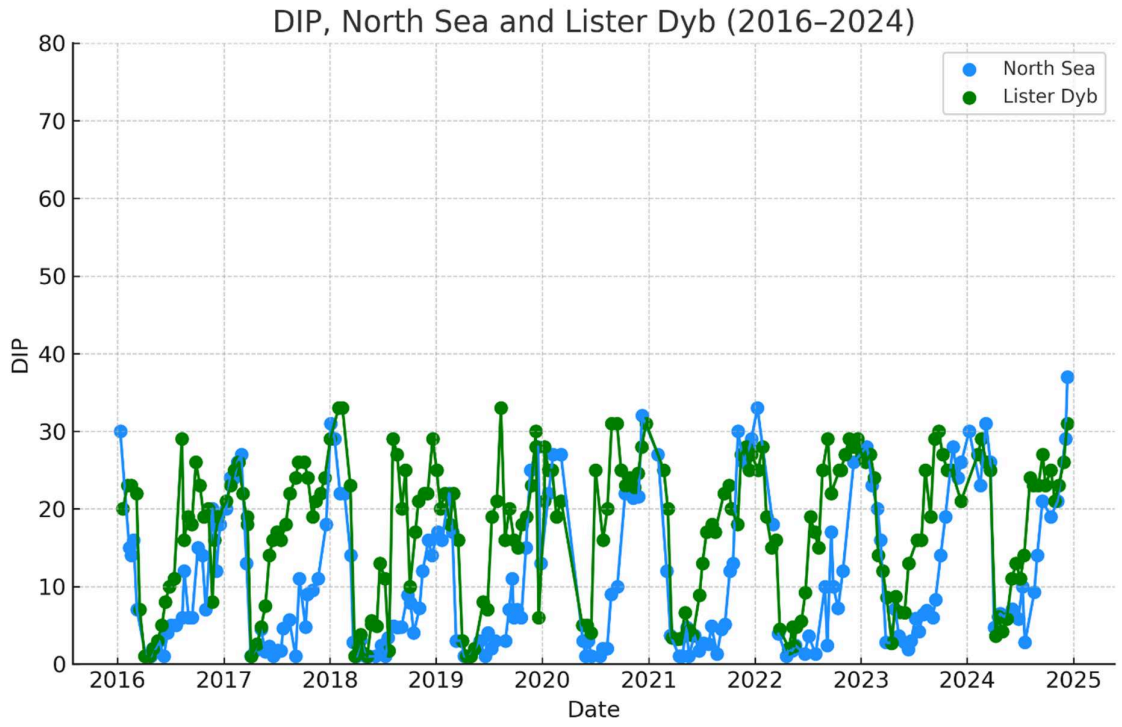



DIP, North Sea and Knude Dyb (2007–2015)
North Sea
Knude Dyb
DIP
Date
0
20
40
60
80
100
120
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016

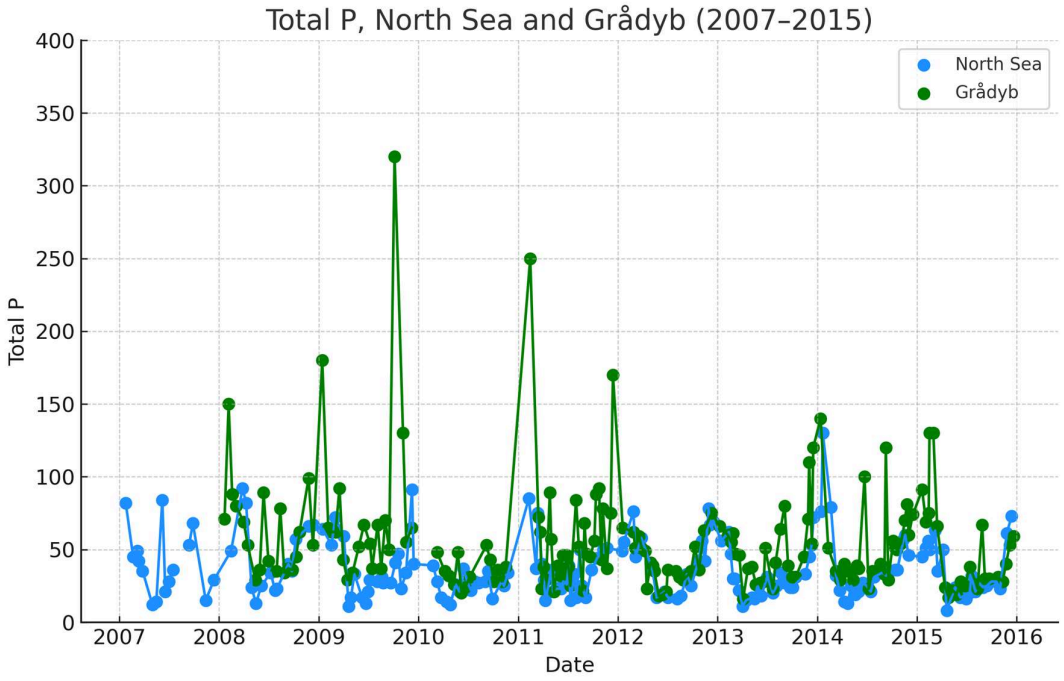

DIP, North Sea and Knude Dyb (2016–2024)
North Sea
Knude Dyb
DIP
Date
0
20
40
60
80
100
120
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

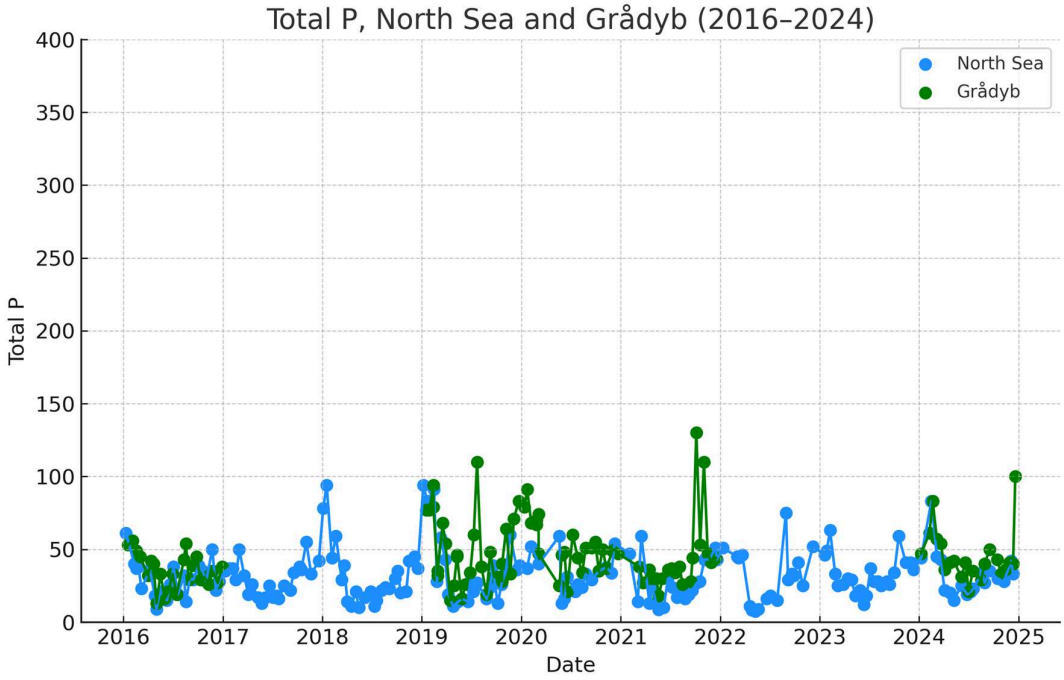

DIP, North Sea and Juvre Dyb (2016–2024)
North Sea
Juvre Dyb
DIP
Date
0
10
20
30
40
50
60
70
80
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

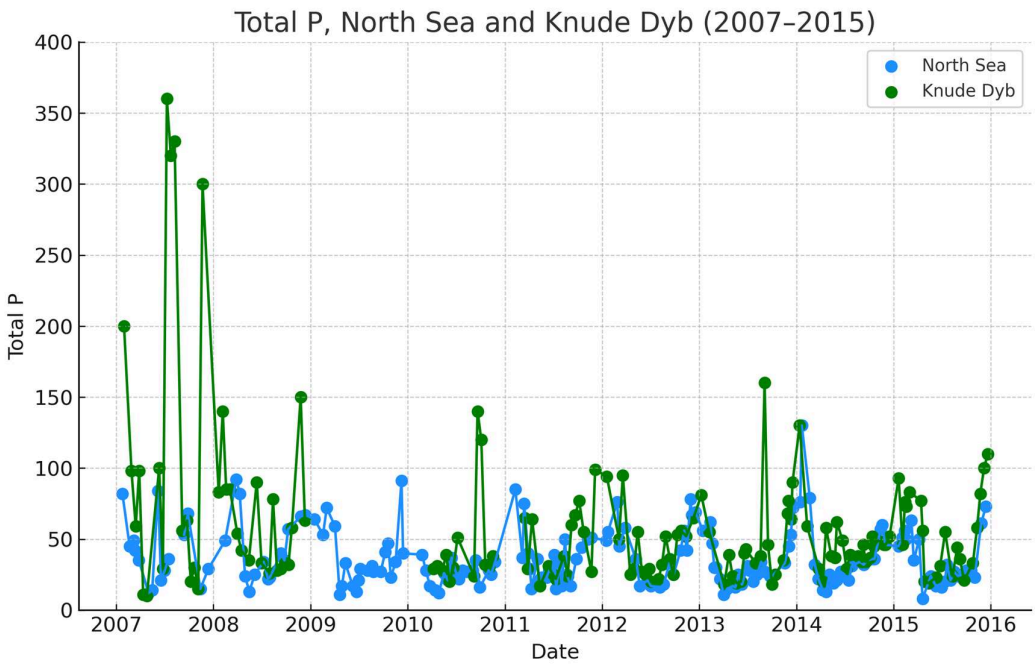

DIP, North Sea and Lister Dyb (2007–2015)
North Sea
Lister Dyb
DIP
Date
0
10
20
30
40
50
60
70
80
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016

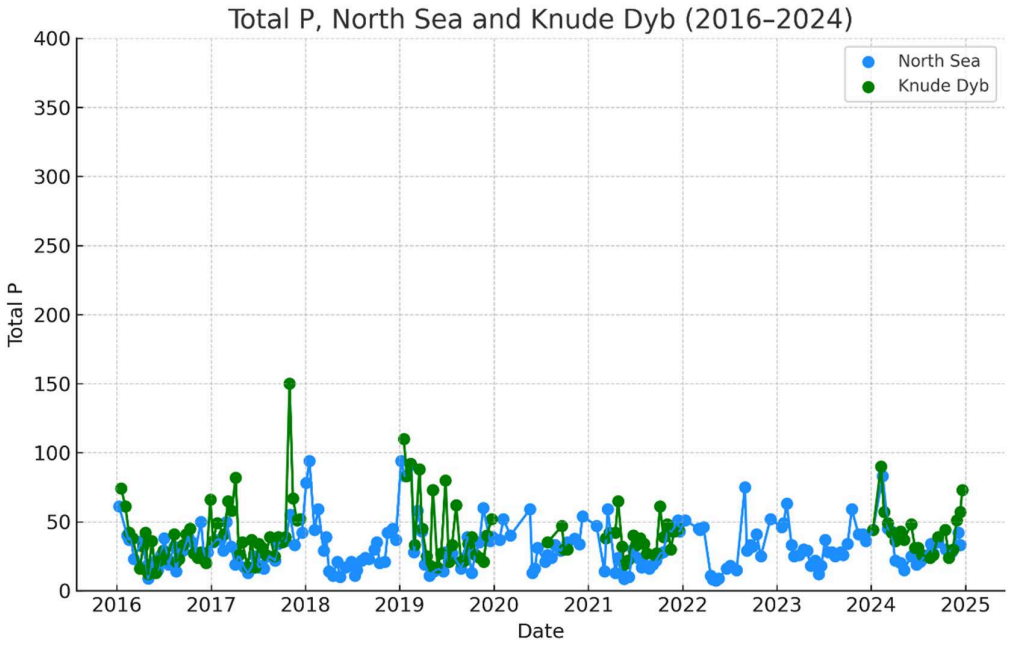

DIP, North Sea and Lister Dyb (2016–2024)
North Sea
Lister Dyb
DIP
Date
0
10
20
30
40
50
60
70
80
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

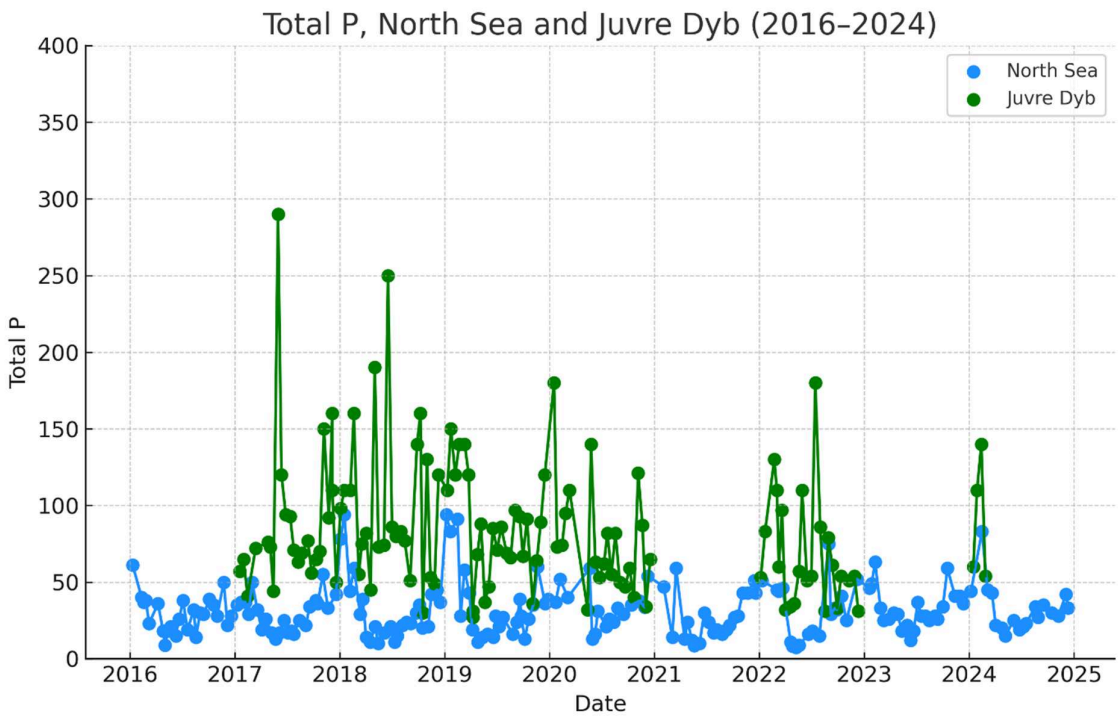
Bilag b. Total P i Nordsøen og de fire tidevandsbassiner

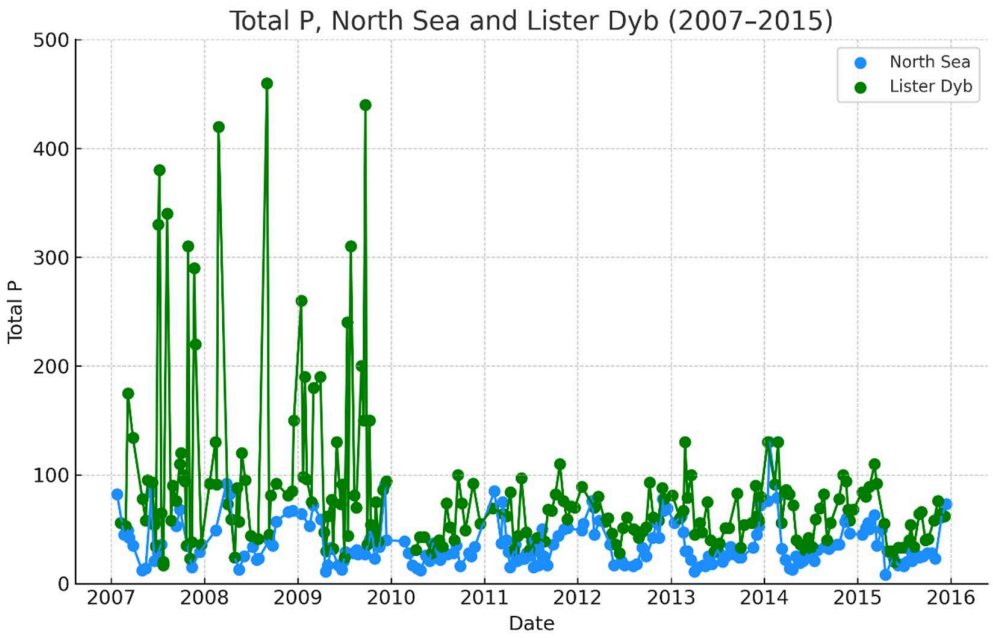


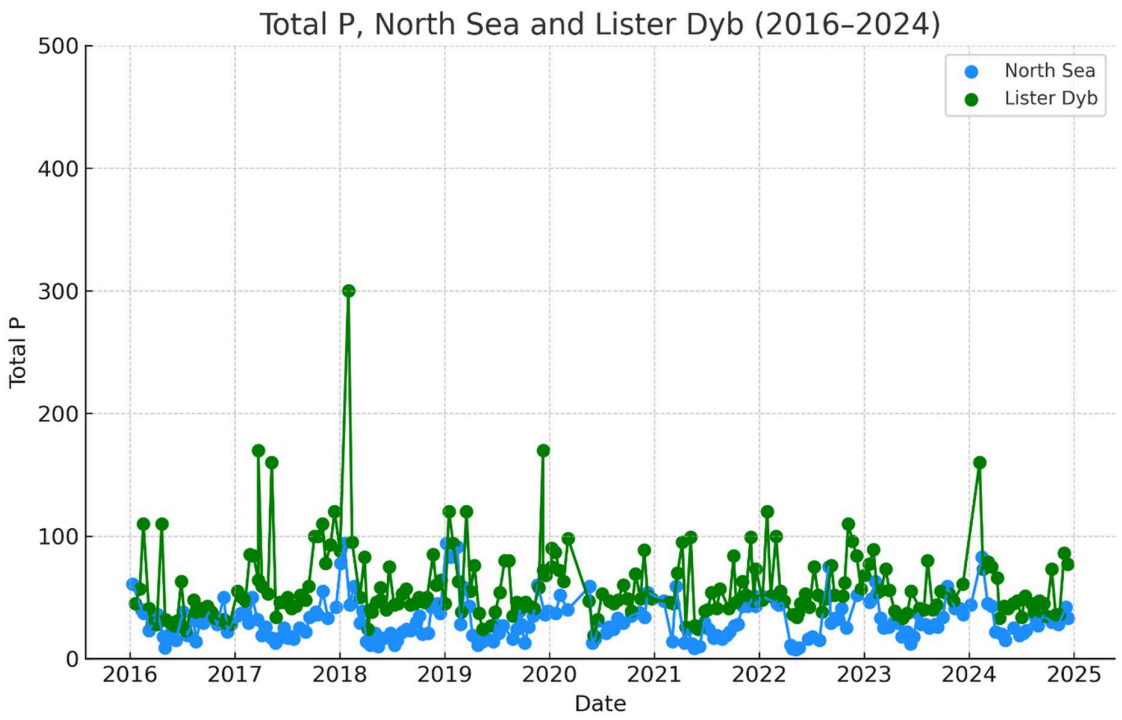



Total P, North Sea and Knude Dyb (2007–2015)
North Sea
Knude Dyb
Total P
Date
0
50
100
150
200
250
300
350
400
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016

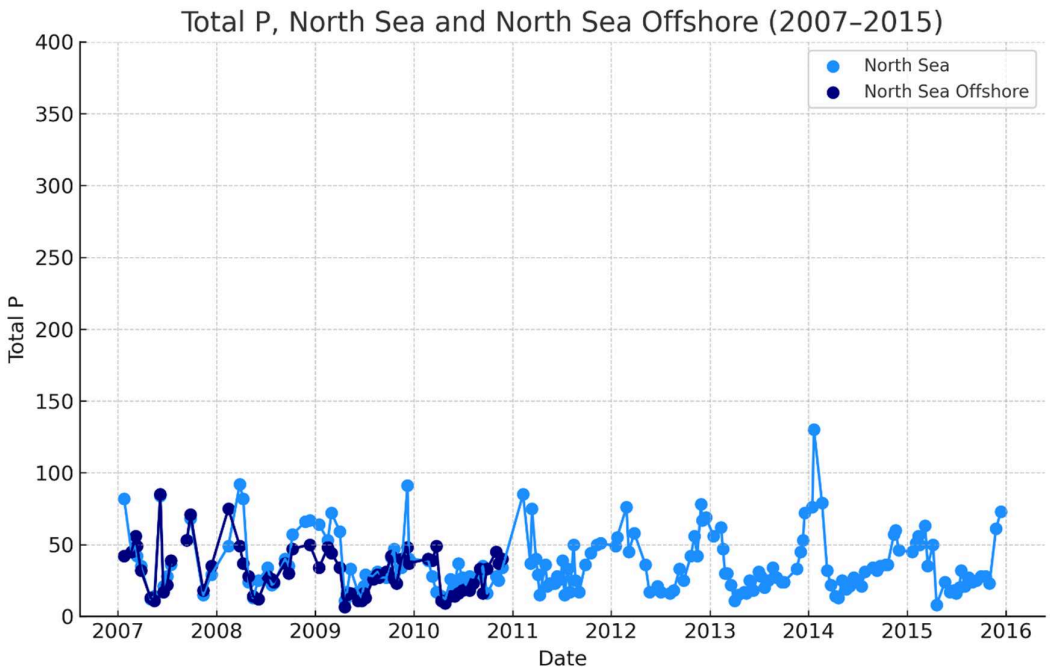

Total P, North Sea and Knude Dyb (2016–2024)
North Sea
Knude Dyb
Total P
Date
0
50
100
150
200
250
300
350
400
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

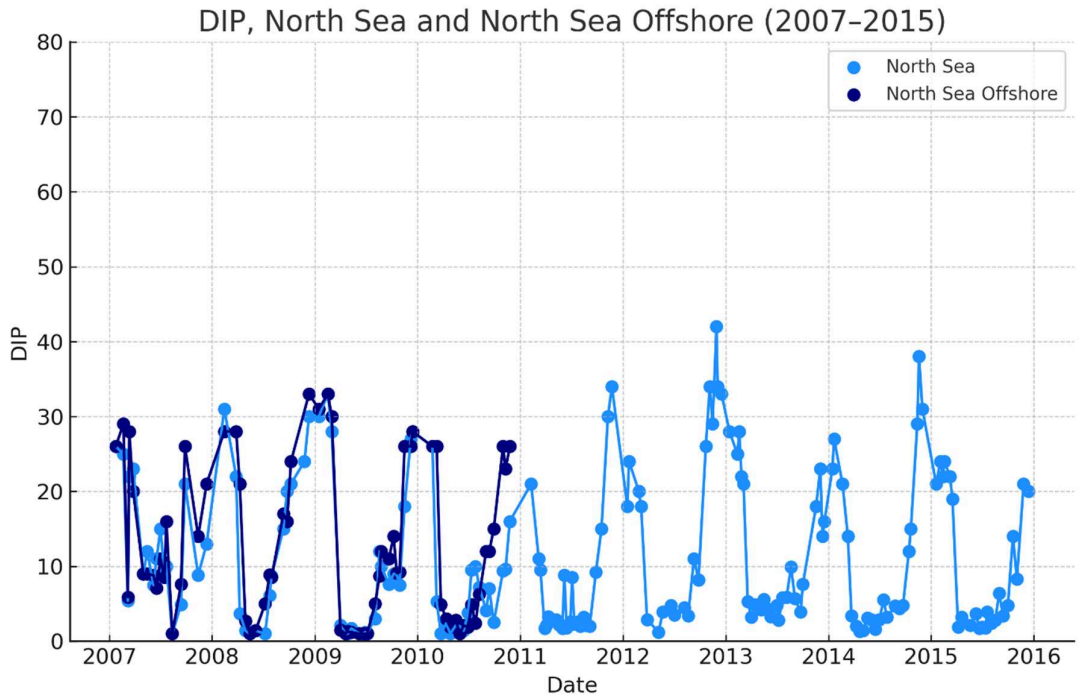

Total P, North Sea and Juvre Dyb (2016–2024)
North Sea
Juvre Dyb
Total P
Date
0
50
100
150
200
250
300
350
400
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025


Total P, North Sea and Lister Dyb (2007–2015)
North Sea
Lister Dyb
Total P
Date
0
100
200
300
400
500
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016

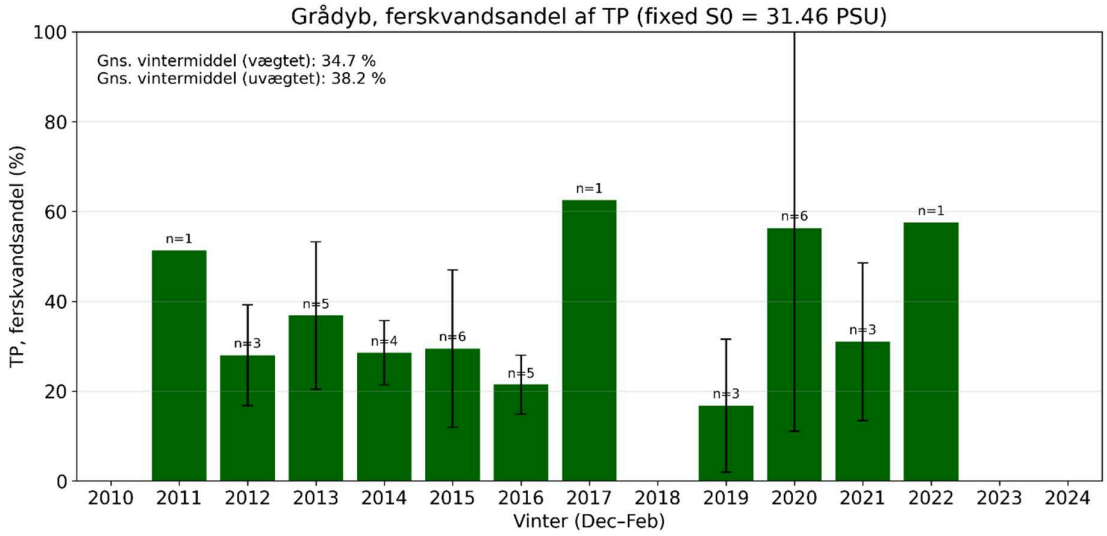

Total P, North Sea and Lister Dyb (2016–2024)
North Sea
Lister Dyb
Total P
Date
0
100
200
300
400
500
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

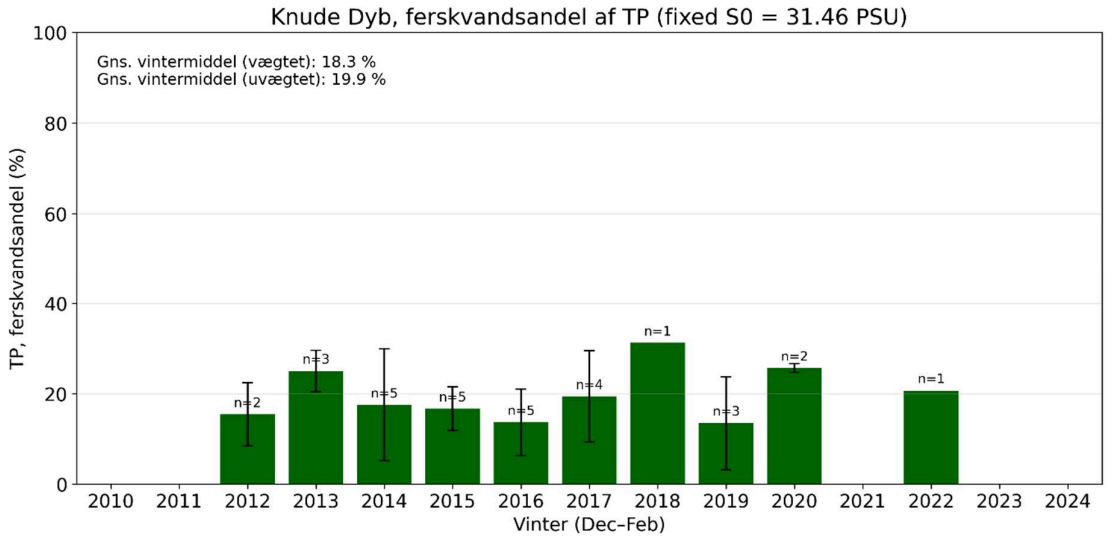
Bilag c. Sammenligning af fosfordata for stationer i Nordsøen

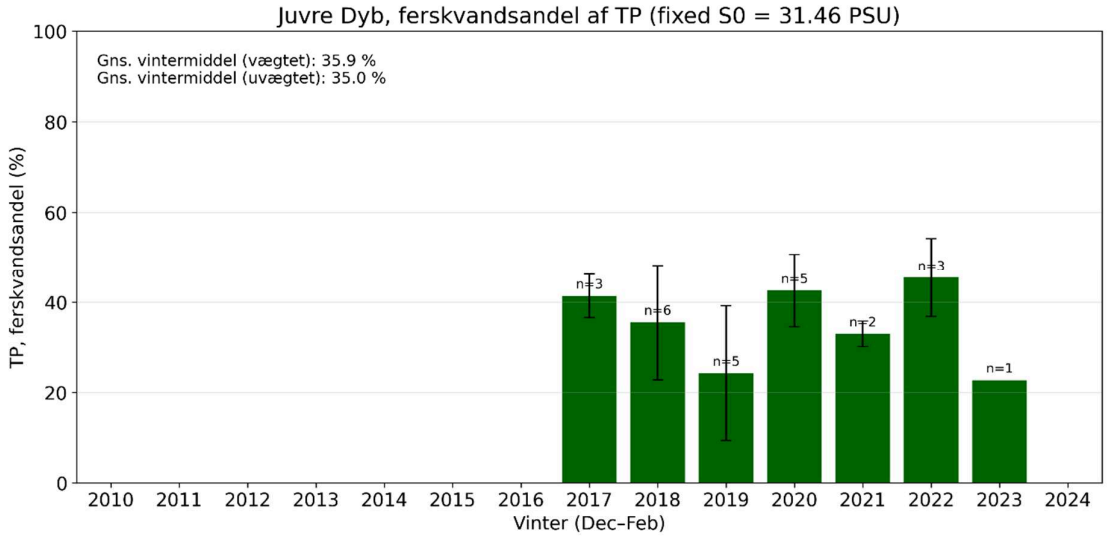


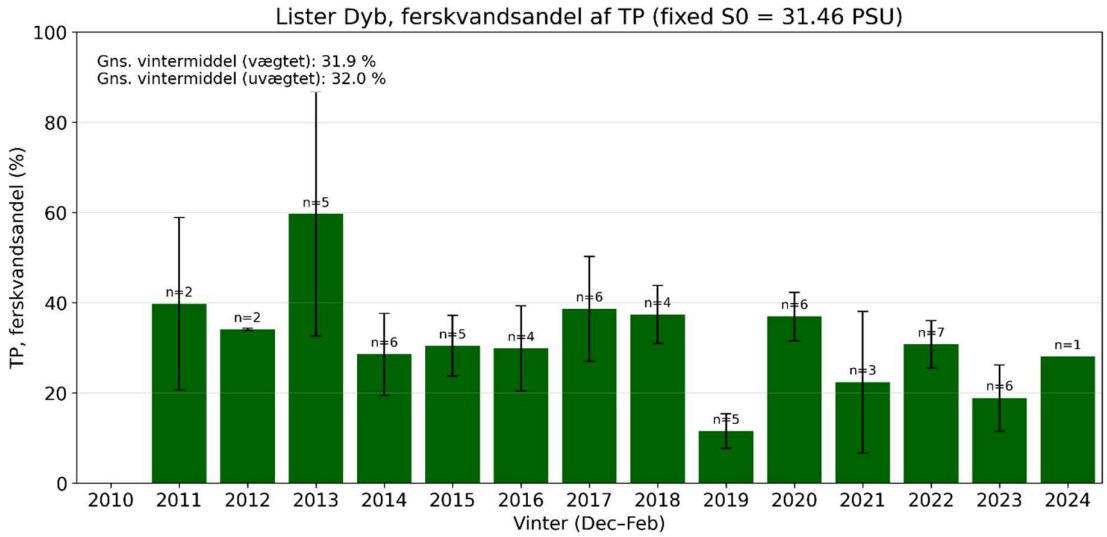


Bilag D. Alternative beregninger af ferskvandsbidragets andel af tilførslen af total P med station 91000071 som S_0






Juvre Dyb, ferskvandsandel af TP (fixed S0 = 31.46 PSU)
Gns. vintermiddel (vægtet): 35.9 %
Gns. vintermiddel (uvægtet): 35.0 %
TP, ferskvandsandel (%)
Vinter (Dec–Feb)
n=3
n=6
n=5
n=5
n=2
n=3
n=1


Lister Dyb, ferskvandsandel af TP (fixed S0 = 31.46 PSU)
Gns. vintermiddel (vægtet): 31.9 %
Gns. vintermiddel (uvægtet): 32.0 %
TP, ferskvandsandel (%)
Vinter (Dec–Feb)
n=2
n=2
n=5
n=6
n=5
n=4
n=6
n=4
n=5
n=6
n=3
n=7
n=6
n=1