ANALYSER AF VANDAFSTRØMNING OG NÆRINGSSTOFTILFØRSEL TIL VADEHAVET

Rapport til kystvandråd Vadehavet

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 368 2026

AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

ANALYSER AF VANDAFSTRØMNING OG NÆRINGSSTOFTILFØRSEL TIL VADEHAVET

Rapport til kystvandråd Vadehavet

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 368 2025

Hans Thodsen
Emil Muff
Henrik Tornbjerg

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 368
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Analyser af vandafstrømning og næringsstoftilførsel til Vadehavet
Undertitel:	Rapport til kystvandråd Vadehavet
Forfatter(e):	Hans Thodsen, Emil Muff, Henrik Tornbjerg
Institution(er):	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	januar 2026
Redaktion afsluttet:	januar 2026
Faglig kommentering:	Albert Rosenkrantz Conradsen (ikke kapitel 8) & Niels Bering Ovesen (kapitel 8)
Kvalitetssikring, DCE:	Signe Jung-Madsen
Ekstern kommentering:	Ingen kommentarer modtaget
Finansiel støtte:	Kystvandråd for Vadehavet (igennem Varde Kommune) har financierer projektet, med Københavns Universitet (KU) som projektejer. DCE/AU har indgået kontrakt med KU om levering af denne rapport.
Bedes citeret:	Thodsen. H., Muff. E. og Tornbjerg. H. 2026. Analyser af vandafstrømning og næringsstoftilførsel til Vadehavet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 53 s. - Teknisk rapport nr. 368
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten giver overblik over vand- og næringsstoftilførsler til Vadehavet og de fire tidevandsområder hver for sig. Der præsenteres også kildeopsplitninger og andele af hhv. uorganisk kvælstof og fosfor. Der er ligeledes en analyse af betydningen af fosfor-vandløbs-transporten via bundtransporteret sand.
Emneord:	Kystvandråd, Vadehavet, Vandafstrømning, Næringsstoftransport, Kildeopsplitning
Foto forside:	Hans Thodsen – Brøns å ved udløbet i vadehavet. November 2025.
ISBN:	978-87-7648-022-6
ISSN (elektronisk):	2244-999X
Sideantal:	53

Indhold

Forord **5**

Sammenfatning **6**

Summary **7**

1 Oplande til de fire tidevandsområder, målt areal og arealspecifikke næringsstoftab **8**
1.1 Oplandsarealer og målt opland 8
1.2 Tab at kvælstof fra målte oplande 9
1.3 Tab af fosfor fra målte oplande 11

2 Grådyb **12**
2.1 Målegrundlag 12
2.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel 12
2.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel 15
2.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel 18

3 Knudedyb **19**
3.1 Målegrundlag 19
3.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel 19
3.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel 22
3.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel 24

4 Juvredyb **26**
4.1 Målegrundlag 26
4.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel 26
4.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel 29
4.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel 32

5 Listerdyb **33**
5.1 Målegrundlag 33
5.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel 33
5.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel 36
5.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel 39

6 Hele Vadehavet **40**
6.1 Målegrundlag 40
6.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel 40
6.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel 43

7 Opsamling af tilførsler til de fire tidevandsområder **47**

8 Fosfor tilført vadehavet via bundtransporteret sand i vandløb **48**
8.1 Data 48
8.2 Sandtransport til havet 50

9 Referencer **53**

Forord

Nærværende rapport beskriver en række oplandsanalyser, der udføres af DCE, Aarhus Universitet for Kystvandråd for Vadehavet. Rapporten omfatter resultaterne, der beskriver næringsstofbidraget og ferskvandsafstrømningen til Vadehavet.

Rapporten beskriver analyserne udført for hele Vadehavet samlet, men også de fire individuelle tidevandsområder separat (Grådyb, Knudedyb, Juvredyb og Listerdyb).

Benyttede data består af en kombination af målte stoftransporter samt modellerede data dels til huludfyldelse og dels til beregning af vand og næringsstoftilførsler fra umålt opland (Thodsen et al., 2024 Analyser af de samlede tilførsler til Vadehavet og til hvert enkelt tidevandsområde er baserede på NOVANA-opgørelsen for perioden 1990 – 2023, som er rapporteret i Thodsen et al., (2024). Analyser der er baseret udelukkende på måledata anvender perioden 2020 - 2024. Estimatet af fosfortransporten til Vadehavet via bundtransporteret sand baserer sig delvist på data indsamlet i dette projekt.

Denne rapport er en del af projektet (Faktorer af betydning for tilførsler, opblanding og omsætning af N og P i Vadehavet) bestilt af Kystvandrådet for Vadehavet via Varde kommune. Projektdeltagerne er Københavns Universitet (KU) (projektejer), SEGES-innovation og Aarhus Universitet/DCE (AU/DCE). SEGES-innovation og Aarhus Universitet har indgået kontrakt med Københavns universitet. Denne rapport er AU/DCEs bidrag til projektet og inkludere ikke bidrag fra KU eller SEGES-innovation.

AU/DCE har indgået i en projektgruppe med KU og SEGES-Innovation. Der er afholdt et opsamlende møde med Varde kommune. Rapport indholdet har ikke været præsenteret for kystvandrådet inden færdiggørelsen af rapporten.

Sammenfatning

Vadehavet består af fire tidevandsområder: Grådyb, Knudedyb, Juvredyb og Listerdyb. Samlet dækker oplandet ca. 5.200 km², hvoraf hovedparten er målt opland. De store vestvendte å-systemer, Varde Å, Sneum Å, Kongeåen, Ribe Å, Brede Å og Videåen, kanaliserer den primære afstrømning til Vadehavet fra de større oplande. Juvredyb skiller sig ud med et væsentligt mindre opland og lavere afstrømning, hvilket naturligt giver mindre næringsstofbidrag herfra.

De årlige afstrømninger i perioden 1990-2023 varierer årene imellem, men den generelle tendens for hele Vadehavet viser en stigende afstrømning igennem tidsserien. Tilførslerne af total kvælstof (TN) og total fosfor (TP) afspejler i høj grad variationer i vandføring. Fra 1990–2023 ses en nedadgående udvikling i både årlig vandføringsvægtet TN- og -TP-koncentration for alle Dyb.

Den uorganiske kvælstofandel (primært nitrat) udgør den største regulerbare fraktion i oplandene. Da organisk kvælstof ikke umiddelbart kan reduceres gennem tiltag i oplandene, er det reduktionsbehovet for nitrat, der afgør, hvor store indsatser der kræves i de enkelte områder. For hele det målte opland til Vadehavet ligger den gennemsnitlige andel af uorganisk kvælstof fra 2020-2024 på 83 % med meget begrænset sæsonvariation. Dette spænder dybene imellem fra 75 % (Listerdyb) til 86 % (Knudedyb) uorganisk kvælstof. Orthofosfat er den direkte optagelige fosfortype til primærproduktion. Den gennemsnitlige andel af fosfortilførslen bestående af orthofosfat i perioden 2020-2024 ligger på 28 % for hele Vadehavet med begrænset sæsonvariation. Dette spænder dybene imellem fra 24 % (Grådyb) til 34 % (Knudedyb) orthofosfat.

For hele Vadehavet og alle dens tilhørende dyb, ses en månedlig variation i afstrømningen. For både 2020-2023 og 1990-2023 ses at afstrømningen er høj i vinterhalvåret og lav i sommerhalvåret. 2020-2023 viser 9 % højere gennemsnitlig afstrømning i forhold til 1990-2023. Tilførslerne af TN og TP er højest i vinterhalvåret, hvor vandføringen er størst. De vandføringsvægtede koncentrationer af kvælstof og fosfor viser samme mønster men dog med mindre fald i sommerhalvåret (i forhold til vinterhalvåret) – særligt for fosfor – end for vandafstrømningen.

Punktkildernes samlede bidrag til Vadehavet er beskedent sammenlignet med de diffuse kilder, men varierer mellem tidevandsområder. For hele Vadehavet udgør diffuse kilder 95 % af kvælstofudledningen, hvor rensningsanlæg er den primære bidragende punktkilde med 2,4 %. For fosfor er punktkildebidraget større. Diffuse kilder udgør her 83 %, hvor rensningsanlæg er den primære bidragende punktkilde med 7,7 % af den totale fosfortilførsel. I sommermånederne udgør punktkilder en væsentligt større procentdel af tilførslerne – særligt for fosfor.

Analysen af betydningen af fosfortilførslen via bundtransporteret sand, som ikke indgår i NOVANA-opgørelserne viser, at betydningen heraf er lille. Baseret på beregninger ud fra opgravede sandmængder fra sandfang i nærheden af NOVANA-målestationer ser transporten på disse lokaliteter ud til at være underestimerede med omkring 5 %. Underestimeringen af fosfortransporten til vadehavet er bl.a. på grund af tilstedeværelsen af sandfang i de nedre dele af mange af vandløbene mindre end 5 %.

Summary

The Wadden Sea consists of four tidal inlets: Grådyb, Knudedyb, Juvredyb, and Listerdyb. Together, their catchments cover approximately 5,200 km², of which the majority is monitored catchment area. The large westward-draining river systems, Varde Å, Sneum Å, Kongeåen, Ribe Å, Brede Å, and Vidå, applies the primary runoff to the Wadden Sea from the larger catchments. Juvredyb stands out with a substantially smaller catchment area and lower runoff, which naturally results in a smaller nutrient contribution from this tidal inlet.

Annual runoff during the period 1990–2023 varies between years, but the overall trend for the entire Wadden Sea shows increasing runoff over the time series. Inputs of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) largely reflect variations in water discharge. From 1990 to 2023, a downward trend is observed in both annual discharge-weighted TN and TP concentrations for all tidal inlets.

The inorganic nitrogen fraction (primarily nitrate) constitutes the largest regulatable nitrogen fraction within the catchments. As organic nitrogen cannot be readily reduced through catchment measures, the required reduction of nitrate determines the scale of mitigation efforts needed in the individual areas. For the entire monitored catchment of the Wadden Sea, the average share of inorganic nitrogen during 2020–2024 is 83%, with very limited seasonal variation. Across the tidal inlets, this share ranges from 75% (Listerdyb) to 86% (Knudedyb). Orthophosphate is the phosphorus form directly available for primary production. The average share of phosphorus inputs consisting of orthophosphate during the period 2020–2024 is 28% for the entire Wadden Sea, with limited seasonal variation. Across the tidal inlets, this ranges from 24% (Grådyb) to 34% (Knudedyb) orthophosphate.

For the entire Wadden Sea and all associated tidal inlets, a clear monthly variation in runoff is observed. For both 2020–2023 and 1990–2023, runoff is high during the winter period and low during the summer period. The period 2020–2023 shows a 9% higher than average runoff compared to 1990–2023. Inputs of TN and TP are highest in the winter period, when discharge is greatest. Discharge-weighted concentrations show the same pattern with highest concentration during the winter period, although with a smaller decline in summer (relative to winter)—particularly for phosphorus—than observed for runoff.

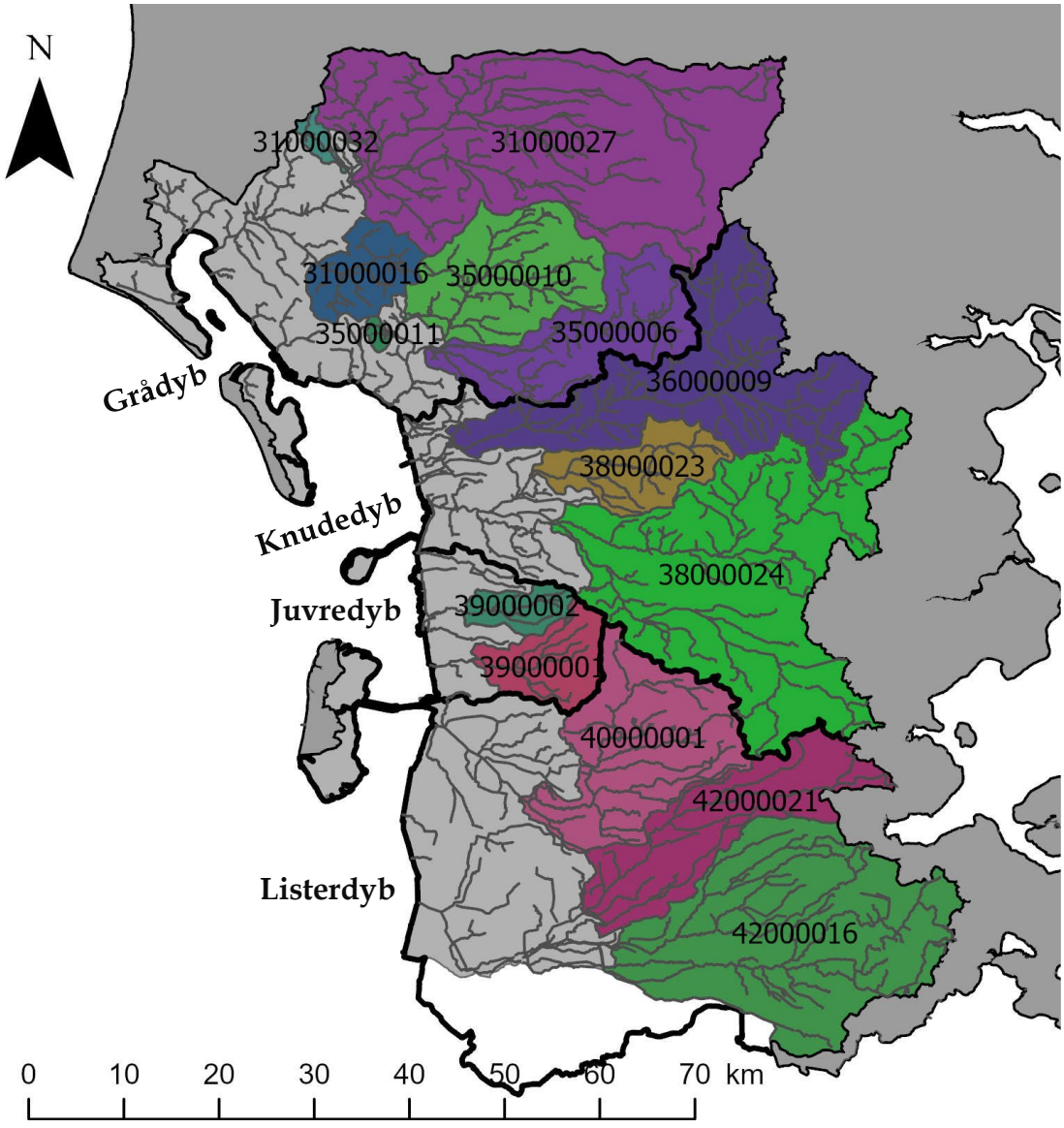
The total contribution from point sources to the Wadden Sea is modest compared to diffuse sources but varies among the tidal inlets. For the entire Wadden Sea, diffuse sources account for 95% of nitrogen emissions, with wastewater treatment plants being the primary point source, contributing 2.4%. For phosphorus, the contribution from point sources is larger: diffuse sources account for 83%, while wastewater treatment plants are the primary point source, contributing 7.7% of the total input. During the summer months, point sources make up a substantially larger proportion of the inputs—especially for phosphorus.

The analysis of the significance of phosphorus inputs via bedload-transported sand, which is not included in NOVANA assessments, shows that this contribution is small. Based on calculations using excavated sand volumes from sediment traps near NOVANA monitoring stations, transport at these locations appears to be underestimated by approximately 5%. The underestimation of transport to the Wadden Sea is, among other factors, due to the presence of sediment traps in the lower reaches of many watercourses and is estimated to be less than 5%.

1 Oplande til de fire tidevandsområder, målt areal og arealspecifikke næringsstoftab

1.1 Oplandsarealer og målt opland

Det danske vadehav består af fire tidevandsområder, fra nord; Grådyb, Knudedyb, Juvredyb og Listerdyb (Figur 1.1). De fire tidevandsområder har hver deres 4. ordens farvands nr. (Farvand 4-, FV4 nr.) Grådyb 1610, Knudedyb 1620, Juvredyb 1630 og Listerdyb 1651. En del af Listerdyb og dets opland er beliggende i Tyskland. Der løber større vandløb til alle tre af de fire tidevandsområder. Til Grådyb løber Varde å og Sneum å, til Knudedyb Kongeåen og Ribe å og til Listerdyb Brede å og Videåen. Til Juvredyb strømmer de to mindre vandløb Rejsby å og Brøns å. Det målte og umålte opland ses i Figur 1-1.



Figur 1.1. Kort over Vadehavet og de fire tidevandsområder. Lysegrå: Umålt opland (ikke afstrømningsområde til en målestation). Farver: Målt opland. Sorte linjer markerer Farvand 4 områdernes grænser. Numrene angiver oplandenes/vandløbsmålestationerne observationssted nr. (ODA nr.) som i ODA-databasen (https://odaforalle.au.dk/).

Oplandsarealer til de fire tidevandsområder og målte andele af oplandet ses i Tabel 1.1. Alle oplande, undtagen Juvredyb, har en målt andel over 60 %, som er gennemsnittet for hele Danmark. Målt opland er det areal, der er placeret opstrøms for en vandløbsmålestation, hvor transporten af vand og næringsstoffer måles. Umålt opland er arealer, der ikke er placeret opstrøms en vandløbsmålestation. Oplandet til Juvredyb ses at være 5-7 gange mindre end oplandene til de andre tidevandsområder, og vil dermed udtrykke betydeligt lavere afstrømningsværdier og tilførsel af næringsstoffer.

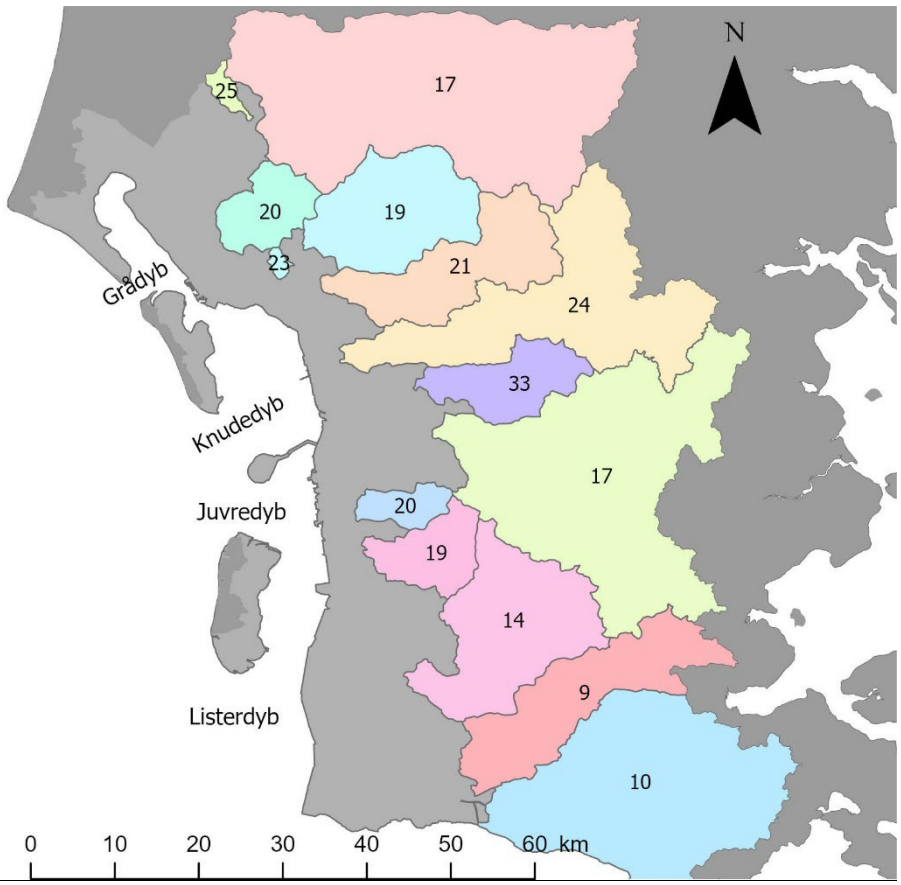
Tabel 1.1. Oplandsareal, målt areal, umålt areal og procentdel målt opland til de fire tidevandsområder i Vadehavet.

Tidevandsområde	Oplandsareal	Målt areal	Umålt areal	Målt andel
	Km²	Km²	Km²	%
Grådyb	1844	1359	485	74
Knudedyb	1453	1221	233	84
Juvredyb	273	138	135	50
Listerdyb*	1624	1097	527	68
Samlet opland	5195	3815	1380	73

*Arealet af den tyske del af oplandet til Videåen er ikke inkluderet (Figur 1.1).

1.2 Tab at kvælstof fra målte oplande

For de mest kystnære målestationer i oplandet til Vadehavet er der beregnet et arealspecifikt total-kvælstof tab (inkl. Punktkilder) i kgN/ha (kg kvælstof pr. hektar opland) (Figur 1.2), på baggrund af månedlige stoftransporter beregnet i ODA databasen. Det arealspecifikke kvælstoftab er beregnet som en årsmiddel af de år i perioden 2020-2024, hvor der er målt på den pågældende målestation. Blandt de præsenterede stationer er det kun den mindste, der ikke har målinger fra alle år. Der ses lavere arealspecifikke kvælstoftab fra oplandene til Listerdyb (de tre sydligste) end de fleste andre oplande. Det højeste oplandsspecifikke kvælstoftab kommer fra oplandet til Hjortvad å med ca. 33 kgN/ha.



Figur 1.2. Middelårligt arealspecifikt total kvælstof tab (kg N/ha) fra de målestationer længst nedstrøms i oplandet til Vadehavet for perioden 2020-2024.

1.2.1 Indsatsbehov og reduktionsberegning for kvælstof

Indsatsbehovet for kvælstof er forskelligt mellem de Kystvandområder. Nogle har store indsatsbehov og kræver derfor en stor indsats for at nedbringe kvælstoftabet i dette farvands opland. Andre farvande har lave indsatsbehov og derfor mindre krav til indsatser i oplandet.

Indsatsbehovet for kystområderne er fastsat på baggrund af totale kvælstofmængder, der består af både organisk- og uorgansik bunde kvælstof. Da mængden af det organiske bundne kvælstof ikke umiddelbart kan reduceres i oplandet, må indsatsen rettes imod tabet af uorganisk kvælstof, primært nitrat. Det er testet af Larsen et al. (2021) at der ikke er en trend i koncentrationen af den organiske bundne del af total kvælstoftransporten i perioden 1990 – 2021, mens der er en tydelig trend i total-kvælstoftransporten og nitrattransporten (vandføringsvægtede koncentrationer) (Thodsen et al., 2025).

For at vide, hvor stor en andel af den uorganiske kvælstoftilførsel, der skal reduceres, kan indsatsbehovet beregnes som en procentdel af den eksisterende uorganiske kvælstofpulje.

Her ses et regneeksempel. *Dette eksempel er ikke funderet i virkelige data for et specifikt opland, og skal derfor kun ses som vejledende i forhold til indsatsberegningen:*

Antag, at et opland udleder i alt 100 tons kvælstof til et farvand, hvoraf 30 tons er organisk kvælstof og 70 tons er uorganisk kvælstof (nitrat). Hvis indsatsbehovet for farvandet er en samlet reduktion af kvælstof på 50 %, kan den nødvendige procentvise reduktion af den uorganiske kvælstofpulje beregnes som:

$$R_{\text{uorg}} = \frac{R_{\text{indsats}} \cdot N_{\text{total}}}{N_{\text{uorg}}}$$

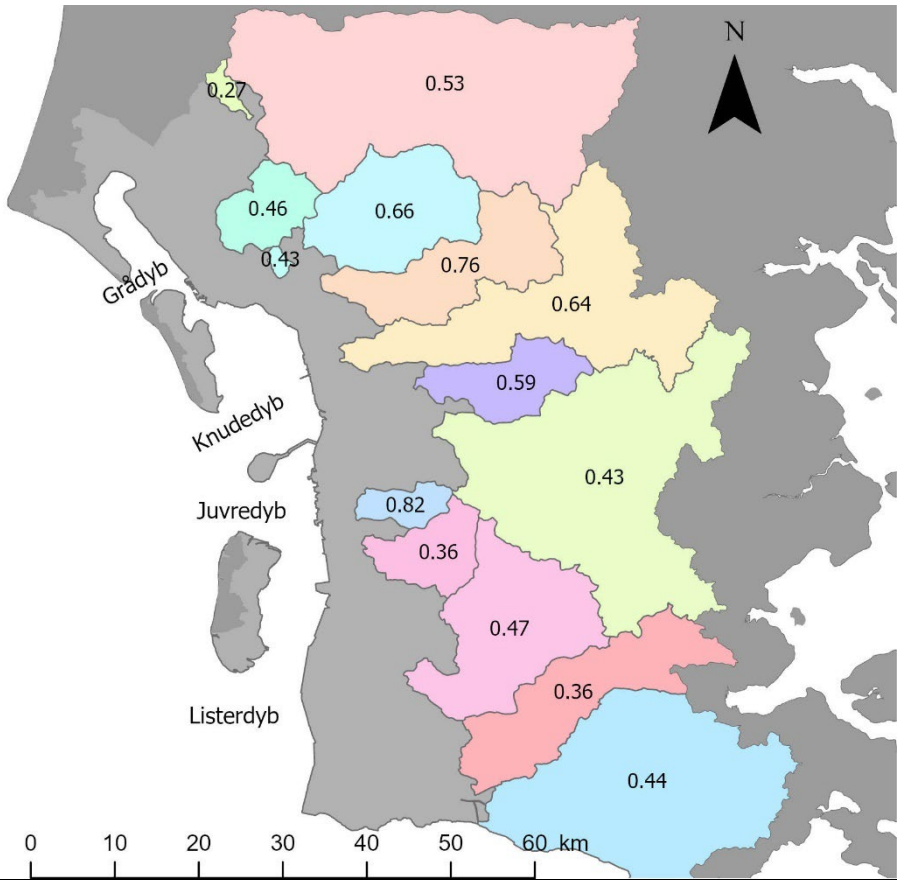
Indsætter vi tallene:

$$R_{\text{uorg}} = \frac{0.5 \cdot 100}{70} \approx 0{,}714 \approx 71{,}4\ \%$$

Det vil sige, at for at opnå en samlet reduktion på 50 % af total kvælstof skal omkring 71 % af den uorganiske kvælstofpulje reduceres, vis den organiske kvælstofmængde forbliver uændret.

1.3 Tab af fosfor fra målte oplande

For de mest kystnære målestationer i oplandet til Vadehavet er der beregnet et arealspecifikt total fosfortab (inkl. Punktkilder) i kg P/ha (kg fosfor pr. hektar opland) (Figur 1.3). Det arealspecifikke fosfortab er beregnet som en årsmiddel af de år i perioden 2020-2024, hvor der er målt på den pågældende målestation. Blandt de præsenterede stationer er det kun den mindste, der ikke har målinger fra alle år. Fosfortabet ser ikke ud til at variere meget imellem oplandene. De to små oplande til Frisvad møllebæk (0,27 kgP/ha) og Rejsby å (0,82 kgP/ha) ser ud til at have hhv. lavest og højest arealspecifikt fosfortab.



Figur 1.3. Middelårligt arealspecifikt total fosfortab (kg P/ha) fra målestationer længst nedstrøms i oplandet til Vadehavet for perioden 2020-2024.

2 Grådyb

2.1 Målegrundlag

I Thodsen m.fl. (2024) er der anvendt målte næringsstoftransporter fra seks målestationer (Figur 1-1). For disse målestationer er der beregnet månedlige stoftransporter, som kan tilgås i ODA-databasen (https://odaforalle.au.dk/)

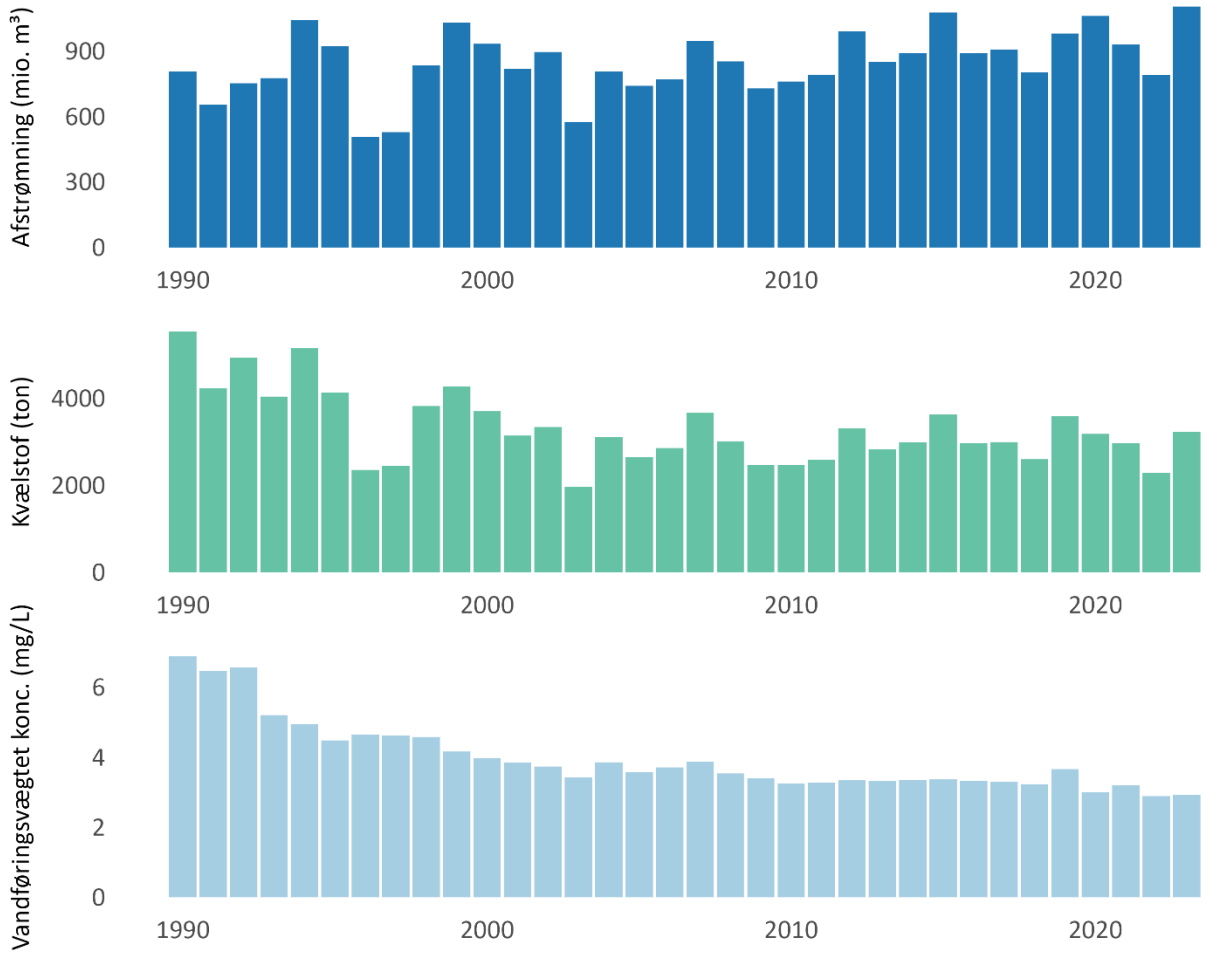
2.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Her præsenteres tidsseriedata for vandafstrømning (mio. m^3), tilførsler af hhv. kvælstof og fosfor (ton), samt den vandføringsvægtede koncentration (mg/L). Den vandføringsvægtede koncentration refererer her til koncentrationer, hvor mængden af det pågældende næringsstof divideres med den samtidige vandafstrømning. Der gives herved et billede af den effektive gennemsnitskoncentration af næringsstoffer, der eksporteres fra oplandet til fjorden. For hhv. kvælstof (Figur 2.1) og fosfor (Figur 2.2) fremvises tidsseriedata for perioden 1990-2023 indenfor det samlede opland til Grådyb. Samtidig præsenteres andelen af uorganisk kvælstof af den totale vandføringsvægtede kvælstofkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 2.1), samt andelen af ortho-fosfat ud af den totale vandføringsvægtede fosforkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 2.2).

2.2.1 Vandafstrømning

Den årlige afstrømmende vandmængde ses i Figur 2.1. Afstrømningen ser umiddelbart ud til at være stigende igennem perioden siden 1990

2.2.2 Kvælstof



Figur 2.1. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), kvælstofmængde (ton) og vandføringsvægtet kvælstofkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Grådyb.

For Grådyb ses et fald i kvælstoftilførslen igennem 1990'erne, hvorefter den gennemsnitlige tilførsel stabiliserer sig. Den vandføringsvægtede koncentration af kvælstof falder da også kraftigst i tidsseriens første ti år, men aftager fortsat moderat igennem resten af tidsserien (Figur 2.1).

2.2.3 Andel uorganisk kvælstof

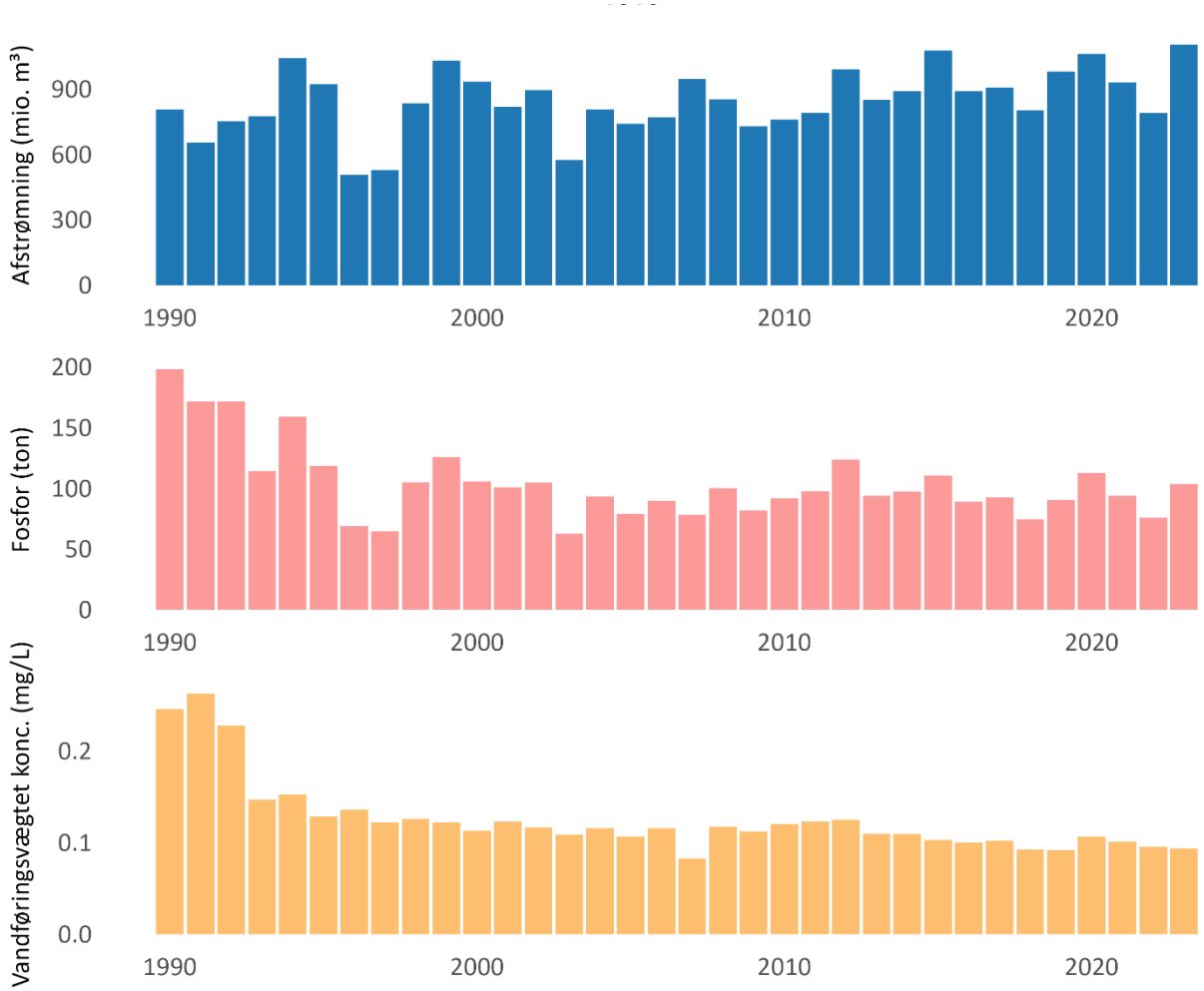
Da der ikke kan reduceres væsentligt i den organisk bundne del af kvælstoftilførslen, er det relevant at beregne andelen af uorganisk kvælstof, hvoraf nitrat (NO_3) udgør langt den største andel. I Tabel 2.1 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total kvælstof og uorganisk bundet kvælstof, samt andelen af den totale kvælstof udgjort af uorganisk kvælstof for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Grådyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 2.1. Koncentrationer (mg/l) af total-kvælstof (TN) og ikke organisk bundet kvælstof (uorg. N) samt %-andel som uorg. N udgør af TN, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Grådyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

Årstid	TN (mgN/l)	UorgN (mgN/l)	Andel UorgN (%)
DJF	3,4	2,8	85
MAM	3,1	2,7	86
JJA	2,8	2,4	85
SON	3,1	2,5	83
År	3,1	2,7	85

Det ses at uorganisk kvælstof (nitrat) udgør mere end 80 % af den målte transport til Grådyb med begrænset sæsonmæssig variation.

2.2.4 Fosfor



Figur 2.2. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), fosformængde (ton) og vandføringsvægtet fosforkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Grådyb.

For fosfor ses et markant fald i tilførslen til Grådyb og vandføringsvægtet koncentration fra 1990 til 1993, hvorefter denne finder et niveau omkring 0,1 mg/L for resten af tidsserien (Figur 2.2). Det markante fald i starten af perioden skyldes primært forbedret spildevandsrensning.

2.2.5 Andel ortho-fosfat

Det er relevant at betragte andelen af ortho-fosfat af den totale fosfortilførsel da ortho-fosfat er direkte omsætteligt i primærproduktionen og herved indikerer risiko for eutrofiering i kystområdet. I Tabel 2.2 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total fosfor og ortho-fosfat, samt andelen af den totale fosfor udgjort af ortho-fosfat for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Grådyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 2.2. Koncentrationer (mg/l) af total-fosfor (TP) og ortho-fosfat (ortho-P) samt %-andel som ortho-P udgør af TP, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Grådyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

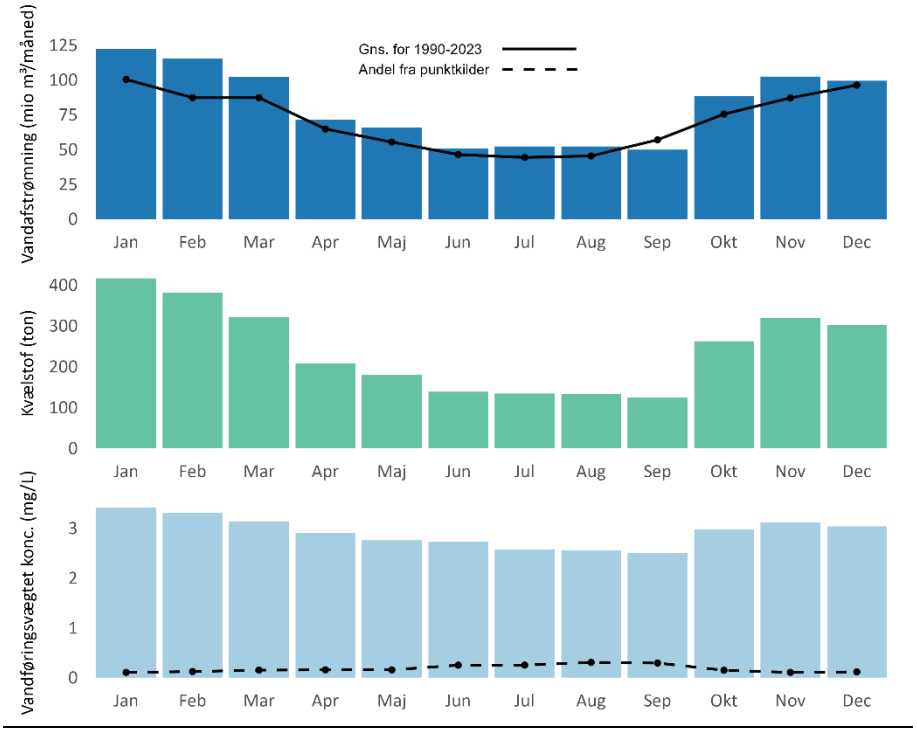
Årstid	TP (mgP/l)	Ortho-P (mgP/l)	Andel Ortho-P (%)
DJF	0,097	0,025	25
MAM	0,095	0,021	22
JJA	0,087	0,021	24
SON	0,11	0,026	23
År	0,098	0,023	24

Det ses at ortho-fosfat udgør ca. ¼ af fosforkoncentrationen i Grådyb med lav sæsonmæssig variation.

2.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Månedsfordelingen af vand- og næringsstoftilførslen til dybet kan have betydning for områdets økologiske tilstand, da tilførslen i algernes vækstperiode sandsynligvis influere algevæksten mere end tilførslen i andre perioder (DHI, 2024). Derfor er middel-månedstilførslerne og middelmåneds-vandføringsvægtede koncentrationer præsenteret i dette kapitel for hhv. kvælstof (Figur 2.3) og fosfor (Figur 2.4). Den fireårige periode 2020-2023 er anvendt, for at give en nutidig månedsfordeling. Beregningerne er baseret på NOVANA-opgørelsen for 1990-2023 (Thodsen m.fl. 2024). Det månedlige gennemsnit af vandafstrømningen for perioden 1990-2023 vises også til sammenligning. Desuden fremlægges det, hvilken andel af de samlede vandføringsvægtede koncentrationer, der stammer fra punktkilder (her regnvand, renseanlæg og dambrug).

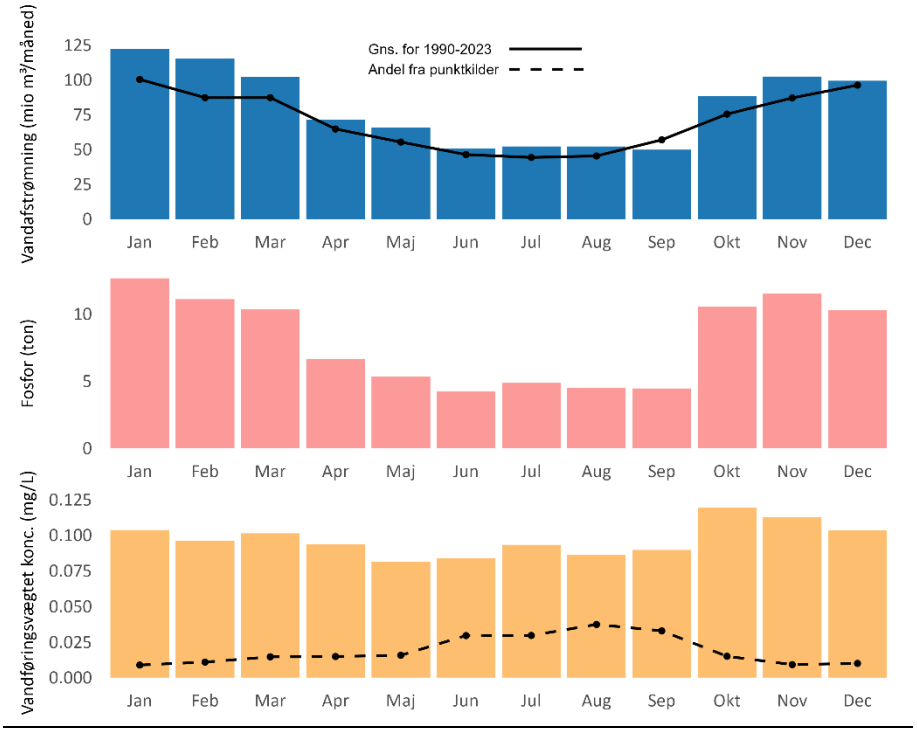
2.3.1 Kvælstof



Figur 2.3. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig kvælstofmængde (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af kvælstof pr. måned i perioden 2020-2023 for Grådyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

For oplandet over det gennemsnitlige år i analyseperioden 2020-2023, ses en høj vandafstrømning i efterår-vinter halvåret og en lav afstrømning i forår-sommer halvåret. Samme tendens ses i perioden 1990-2023. Dog med lavere gennemsnit særligt i januar, februar, november og en anelse højere gennemsnit i marts, juni, september, december i forhold til 2020-2023. Den gennemsnitlige vandafstrømning er herved 15 % højere i 2020-2023 end gennemsnittet fra 1990-2023. Kvælstoftilførslen følger et lignende mønster, dog med lidt større relativt fald i sommerhalvåret, hvilket afspejles i en lidt lavere vandføringsvægtede koncentration i sommerperioden. Punktkildernes betydning for den vandføringsvægtede koncentration er generelt lav. Indflydelsen heraf stiger dog marginalt i månederne juni til september (Figur 2.3).

2.3.2 Fosfor



Figur 2.4. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig fosformængde (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af fosfor pr. måned i perioden 2020-2023 for Grådyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Ligesom for kvælstof (Figur 2.3) ses en lav fosformængde i forår-sommer halvåret og en højere mængde i efterår-vinter halvåret, svarende til variationen i vandafstrømningen. Den vandføringsvægtede fosforkoncentration ses at være forholdsvis stabil igennem året, men med lidt laverer koncentration i sommerperioden. Punktkildernes bidrag til den vandføringsvægtede koncentration af fosfor er i de fleste måneder begrænset, men dog synligt større end for kvælstof specielt i sommerperioden hvor den i august udgør omkring 40 % (Figur 2.4).

2.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel

I dette afsnit præsenteres de kildeopdelte gennemsnitlige årlige tilførsler af hhv. kvælstof (Tabel 2.3) og fosfor (Tabel 2.4) over perioden 2020-2023 for Grådybs samlede opland. Lysegrå felter i tabellerne angiver punktkilder. Punktkilder defineres som direkte udledninger af næringsstoffer til miljøet fra eget udløb til vandløb, søer eller havet. Regnvandspunktkilder er regnbetingede udløb (RBU), dvs. punktvise udledninger fra befæstede arealer tilsluttet kloaknettet – fx overfladevand fra parkeringspladser og veje og opsamlet regnvand fra tage og gårdspladser. RBU opdeles i separatkloakeret RBU og overløb fra fælleskloakerede områder. Rensningsanlæg modtager og renser spildevand fra husholdninger og visse industrier, med henblik på at reducere udledningen af næringsstoffer. Det behandlede vand føres herefter af udløb til vandmiljøet. Dambrug (her ferskvand) betragtes som en punktkilde, fordi det har et diskret, afgrænset udledningspunkt (Frank-Gopolos, m.fl. 2024). Diffus tilførsel er en spredt, ikke-afgrænset kilde, hvor udledning af næringsstoffer til vandmiljøet ikke kan måles i et enkelt punkt. Dette omfatter typisk landbrugsarealer, skov, græsmarker og naturlige jordarealer, men også udledninger fra spredt bebyggelse.

2.4.1 Kvælstof

Tabel 2.3. Gennemsnitlige årlige kvælstofmængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Grådyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
54 (1,8 %)	106 (3,7 %)	67 (2,3 %)	2690 (92 %)	2920

Det diffuse bidrag af kvælstof er det klart største til Grådyb. Punktkildernes udledninger er relativt begrænsede (ca. 8 %), med rensningsanlæg som mest betydningsfulde kilde med ca. 3,7 % af hele oplandets opgjorte kvælstofbidrag (Tabel 2.3) og 47 % af den samlede punktkildeudledning.

2.4.2 Fosfor

Tabel 2.4. Gennemsnitlige årlige fosformængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Grådyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
8,4 (9 %)	9,3 (10 %)	5,4 (6 %)	73 (76 %)	96

Det diffuse bidrag af fosfor er det mest betydningsfulde for fjorden (76 %) – men ikke i lige så høj grad som for kvælstof (Tabel 2.3). Den relative betydning af punktkilderne er større for fosfor. Rensningsanlæg bidrager mest med 10 % af den totale mængde fosfor og er sammen med RBU (9 %) de mest betydende punktkildetyper (Tabel 2.4).

3 Knudedyb

3.1 Målegrundlag

I Thodsen m.fl. (2024) er der anvendt målte næringsstoftransporter fra tre målestationer (Figur 1-1). For disse målestationer er der beregnet månedlige stoftransporter, som kan tilgås i ODA-databasen (https://odaforalle.au.dk/)

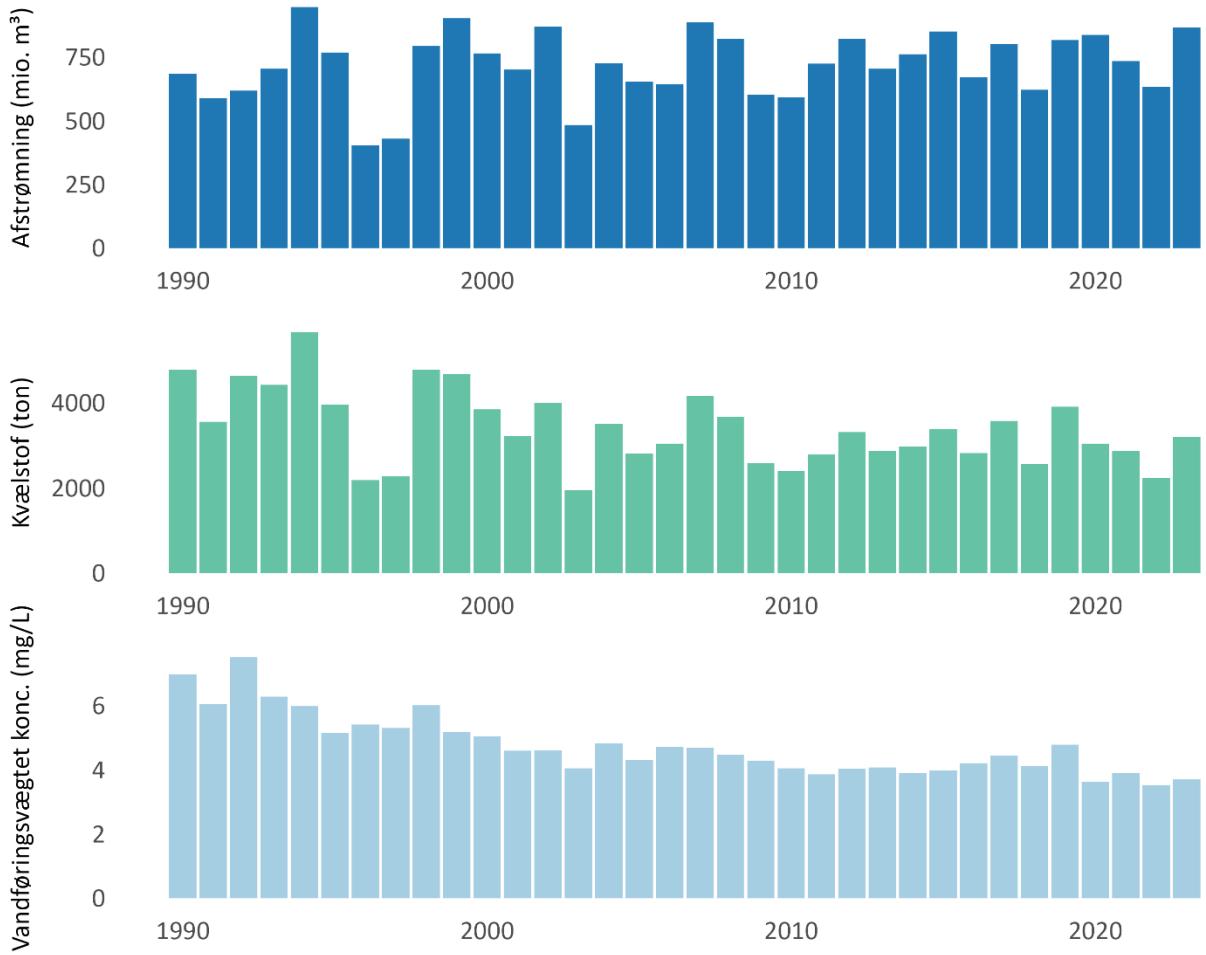
3.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Her præsenteres tidsseriedata for vandafstrømning (mio. m^3), tilførsler af hhv. kvælstof og fosfor (ton), samt den vandføringsvægtede koncentration (mg/L). Den vandføringsvægtede koncentration refererer her til koncentrationer, hvor mængden af det pågældende næringsstof divideres med den samtidige vandafstrømning. Der gives herved et billede af den effektive gennemsnitskoncentration af næringsstoffer, der eksporteres fra oplandet til Knudedyb. For hhv. kvælstof (Figur 3.1) og fosfor (Figur 3.2) fremvises tidsseriedata for perioden 1990-2023 indenfor det samlede opland til Knudedyb. Samtidig præsenteres andelen af uorganisk kvælstof af den totale vandføringsvægtede kvælstofkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 3.1), samt andelen af ortho-fosfat ud af den totale vandføringsvægtede fosforkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 3.2).

3.2.1 Vandafstrømning

Den årlige afstrømmende vandmængde ses i Figur 3.1. Afstrømningen ser umiddelbart ud til at være stigende igennem perioden siden 1990 og stabilisere sig fra 2010 og frem.

3.2.2 Kvælstof



Figur 3.1. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), kvælstofmængde (ton) og vandføringsvægtet kvælstofkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Knudedyb

For Knudedyb ses et fald i kvælstoftilførslen igennem 1990'erne. 2000'erne er præget af mere fluktuerende tilførsler, hvor årene fra 2010 og frem er mere jævne. Den vandføringsvægtede koncentration af kvælstof falder kraftigt i tidsseriens første 15 år, hvorefter koncentrationen stabliserer sig efterfulgt af et mindre fald i 2020'erne (Figur 3.1).

3.2.3 Andel uorganisk kvælstof

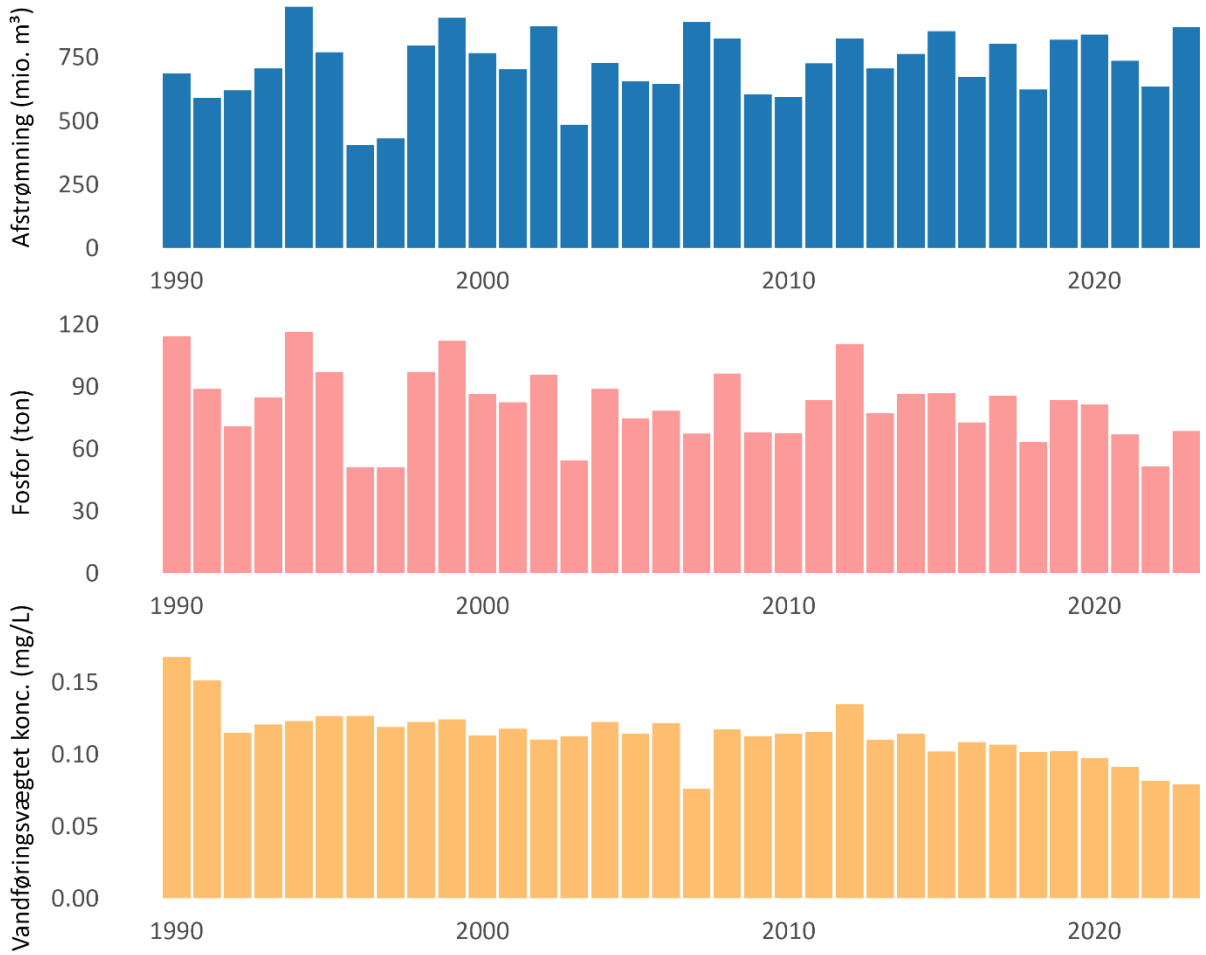
Da der ikke kan reduceres væsentligt i den organisk bundne del af kvælstoftilførslen, er det relevant at beregne andelen af uorganisk kvælstof, hvoraf nitrat (NO_3) udgør langt den største andel. I Tabel 3.1 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total kvælstof og uorganisk bundet kvælstof, samt andelen af den totale kvælstof udgjort af uorganisk kvælstof for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Knudedyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 3.1. Koncentrationer (mg/l) af total-kvælstof (TN) og ikke organisk bundet kvælstof (uorg. N) samt %-andel som uorg. N udgør af TN, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Knudedyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

Årstid	TN (mgN/l)	UorgN (mgN/l)	Andel UorgN (%)
DJF	3,8	3,3	87
MAM	3,3	2,9	87
JJA	2,8	2,3	82
SON	3,3	2,9	86
År	3,4	2,9	86

På tværs af året for i perioden 2020-2024 i Knudedyb er andelen af uorganisk kvælstof større end 85 % med mindre sæsonmæssig variation.

3.2.4 Fosfor



Figur 3.2. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), fosformængde (ton) og vandføringsvægtet fosforkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Knudedyb.

For Knudedyb sker der et markant fald i den vandføringsvægtede fosfor koncentration imellem 1991 og 1992, hvorefter udvikling er svag indtil omkring 2014 hvorefter der ses et fald (Figur 3.2).

3.2.5 Andel ortho-fosfat

Det er relevant at betragte andelen af ortho-fosfat af den totale fosfortilførsel da ortho-fosfat er direkte omsætteligt i primærproduktionen og herved indikere risiko for eutrofiering i kystområdet. I Tabel 3.2 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total fosfor og ortho-fosfat, samt andelen af den totale fosfor udgjort af ortho-fosfat for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Knudedyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 3.2. Koncentrationer (mg/l) af total-fosfor (TP) og ortho-fosfat (ortho-P) samt %-andel som ortho-P udgør af TP, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Knudedyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

Årstid	TP (mgP/l)	Ortho-P (mgP/l)	Andel Ortho-P (%)
DJF	0,090	0,030	33
MAM	0,087	0,026	30
JJA	0,091	0,035	38
SON	0,085	0,031	36
År	0,088	0,030	34

På tværs af året for i perioden 2020-2024 i Knudedyb er andelen af ortho-fosfat på mindre end 35 % med sæsonmæssig variation.

3.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel

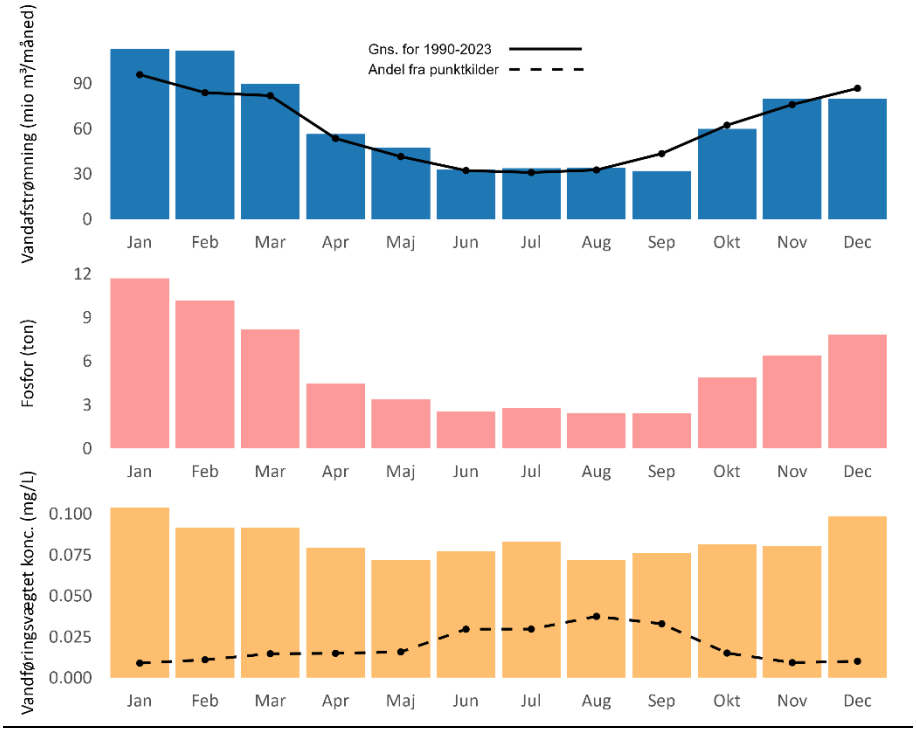
Månedsfordelingen af vand- og næringsstoftilførslen til dybet kan have betydning for kystvandområdets tilstand, da tilførslen i algernes vækstperiode sandsynligvis influere algevæksten mere end tilførslen i andre perioder (DHI, 2024). Derfor er middel-månedstilførslerne og middelmåneds-vandføringsvægtede koncentrationer præsenteret i dette kapitel for hhv. kvælstof (Figur 3.3) og fosfor (Figur 3.4). Den fireårige periode 2020-2023 er anvendt, for at give en nutidig månedsfordeling. Beregningerne er baseret på NOVANA-opgørelsen for 1990-2023 (Thodsen m.fl. 2024). Det månedlige gennemsnit af vandafstrømningen for perioden 1990-2023 vises også til sammenligning. Desuden fremlægges det, hvilken koncentration af de samlede vandføringsvægtede koncentrationer, der stammer fra punktkilder (her regnvand, renseanlæg og dambrug).

3.3.1 Kvælstof

Figur 3.3. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig mængde (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af kvælstof pr. måned i perioden 2020-2023 for Knudedyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

For oplandet over det gennemsnitlige år i analyseperioden 2020-2023, ses en høj vandafstrømning i efterår-vinter halvåret og en lav afstrømning i forår-sommer halvåret. Samme tendens ses i perioden 1990-2023, dog med lavere gennemsnit i særligt januar og februar og et højere gennemsnit i september og december i forhold til 2020-2023. Den gennemsnitlige vandafstrømning er herved 7 % højere i 2020-2023 end gennemsnittet fra 1990-2023. Kvælstoftilførslen følger denne månedsudvikling dog med lidt større relativt fald i sommerhalvåret, hvilket ses i en lavere vandføringsvægtede koncentration i sommerperioden. Punktkildernes betydning for den vandføringsvægtede koncentration er generelt lav. Indflydelsen heraf stiger dog marginalt i månederne juni til september (Figur 3.3).

3.3.2 Fosfor



Figur 3.4. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig fosformængde (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af fosfor pr. måned i perioden 2020-2023 for Knudedyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Den månedlige fosfortilførsel følger ligesom for kvælstof, vandafstrømningen med laveste tilførsler i sommermånederne. Den vandføringsvægtede fosforkoncentration er da også lavest i sommermånederne, omend kun lidt mindre end i vinterhalvåret. Punktkilderens andel af totaltilførslen er større for fosfor end for kvælstof i Knudedyb, hvor betydningen er ganske markant i sommermånederne. F.eks. udgør punktkilderne ca. 50 % af udledningerne af fosfor i august måned. I vinterhalvåret har punktkilderne kun en mindre indflydelse på koncentrationen (Figur 3.4).

3.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel

I dette afsnit præsenteres de kildeopdelte gennemsnitlige årlige tilførsler af hhv. kvælstof (Tabel 3.3) og fosfor (Tabel 3.4) over perioden 2020-2023 for Knudedybs samlede opland. Lysegrå felter i tabellerne angiver punktkilder. Punktkilder defineres som direkte udledninger af næringsstoffer til miljøet fra eget udløb til vandløb, søer eller havet. Regnvandspunktkilder er regnbetingede udløb (RBU), dvs. punktvise udledninger fra befæstede arealer tilsluttet kloaknettet – fx overfladevand fra parkeringspladser og veje og opsamlet regnvand fra tage og gårdspladser. RBU opdeles i separatkloakeret RBU og overløb fra fælleskloakerede områder. Rensningsanlæg modtager og renser spildevand fra husholdninger og visse industrier, med henblik på at reducere udledningen af næringsstoffer. Det behandlede vand føres herefter af udløb til vandmiljøet. Dambrug (her ferskvand) betragtes som en punktkilde, fordi det har et diskret, afgrænset udledningspunkt (Frank-Gopolos, m.fl. 2024). En diffus kilde er en spredt, ikke-afgrænset kilde, hvor udledning af næringsstoffer til vandmiljøet ikke kan måles i et enkelt punkt. Dette omfatter typisk landbrugsarealer, skov, græsmarker og naturlige jordarealer, men også udledninger fra spredt bebyggelse.

3.4.1 Kvælstof

Tabel 3.3. Gennemsnitlig årlige kvælstofmængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Knudedyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
18 (0,6 %)	42 (1,5 %)	53 (1,8 %)	2730 (96 %)	2840

For Knudedyb udgør den diffuse kvælstoftilførsel det dominerende ibidrag til den totale tilførsel (96 %). Herefter følger hhv. dambrug, rensningsanlæg og RBU, der alle bidrager med mindre end 2 % af den totale tilførsel (Tabel 3.3).

3.4.2 Fosfor

Tabel 3.4. Gennemsnitlig årlige fosformængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Knudedyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
2,5 (3,8 %)	6,0 (9 %)	3,0 (4,6 %)	55 (83 %)	67

Det diffuse fosforbidrag til Knudedyb er stadig det dominerende bidrag (83 %), men ikke i samme grad som for kvælstof (Tabel 3.3). Rensningsanlæg bidrager med 9 %, efterfulgt at dambrug (4,6 %) og RBU (3,8 %) (Tabel 3.4) af den totale fosfortilførsel.

4 Juvredyb

4.1 Målegrundlag

I Thodsen m.fl. (2024) er der anvendt målte næringsstoftransporter fra to målestationer (Figur 1-1). For disse målestationer er der beregnet månedlige stoftransporter, som kan tilgås i ODA-databasen (https://odaforalle.au.dk/)

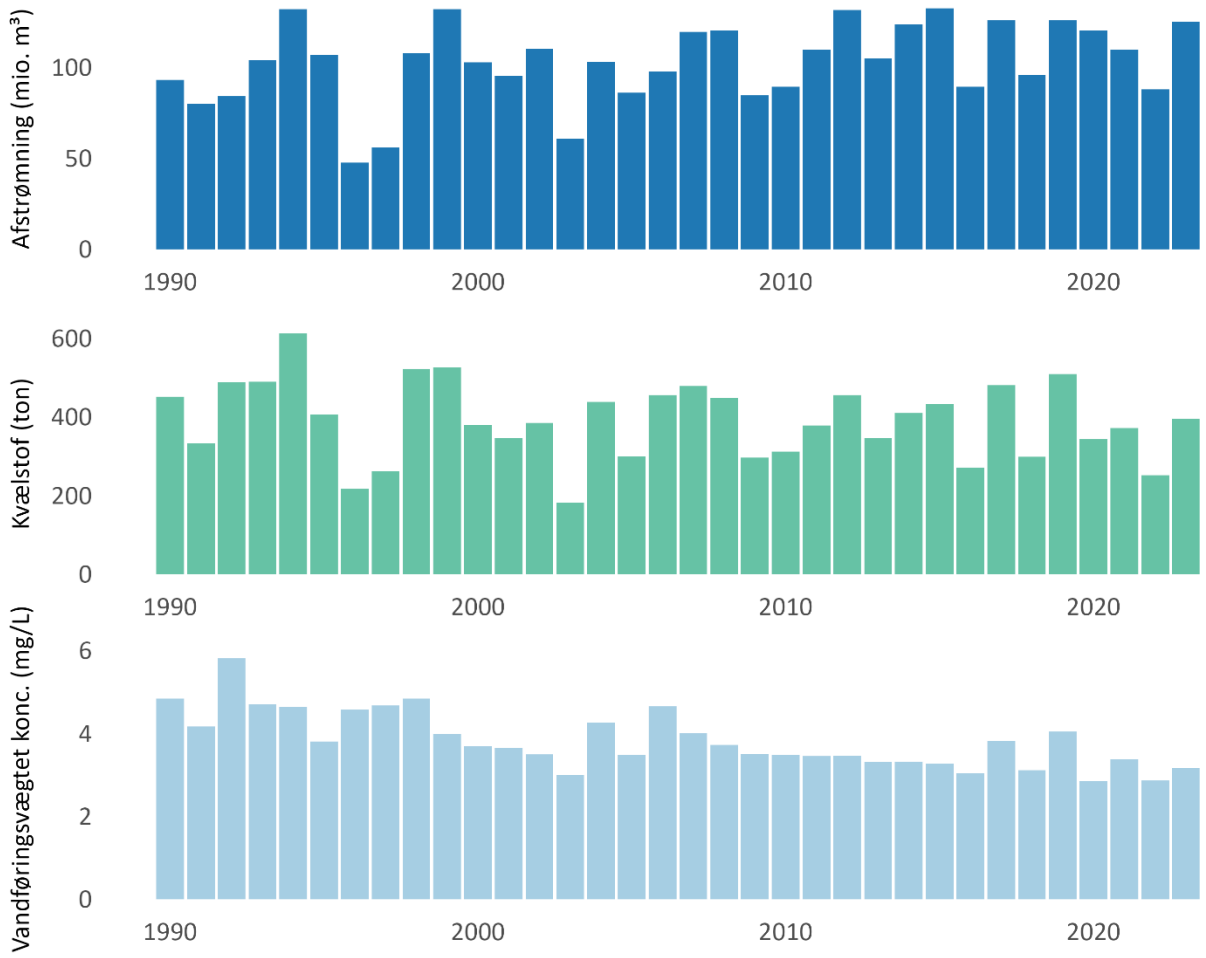
4.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Her præsenteres tidsseriedata for vandafstrømning (mio. m^3), tilførsler af hhv. kvælstof og fosfor (ton), samt den vandføringsvægtede koncentration (mg/L). Den vandføringsvægtede koncentration refererer her til koncentrationer, hvor mængden af det pågældende næringsstof divideres med den samtidige vandafstrømning. Der gives herved et billede af den effektive gennemsnitskoncentration af næringsstoffer, der eksporteres fra oplandet til Juvredyb. For hhv. kvælstof (Figur 4.1) og fosfor (Figur 4.2) fremvises tidsseriedata for perioden 1990-2023 indenfor det samlede opland til Juvredyb. Samtidig præsenteres andelen af uorganisk kvælstof af den totale vandføringsvægtede kvælstofkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 4.1) samt andelen af orthofosfat ud af den totale vandføringsvægtede fosforkoncentration fra 2020-2024 (Figur 4.2).

4.2.1 Vandafstrømning

Den årlige afstrømmende vandmængde ses i Figur 4.1. Afstrømningen ser umiddelbart ud til at have en stigende tendens igennem perioden siden 1990.

4.2.2 Kvælstof



Figur 4.1. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), kvælstofmængde (ton) og vandføringsvægtet kvælstofkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Juvredyb

Kvælstoftilførslen til Juvredyb fluktuerer, lige som vandafstrømningen meget gennem hele tidsserien. Dette er særligt påfaldende i 1990'erne, hvor både nogle af de højeste og laveste værdier optræder. Over hele tidsserien ses et forholdsvis jævnt fald i den vandføringsvægtede koncentration (Figur 4.1).

4.2.3 Andel uorganisk kvælstof

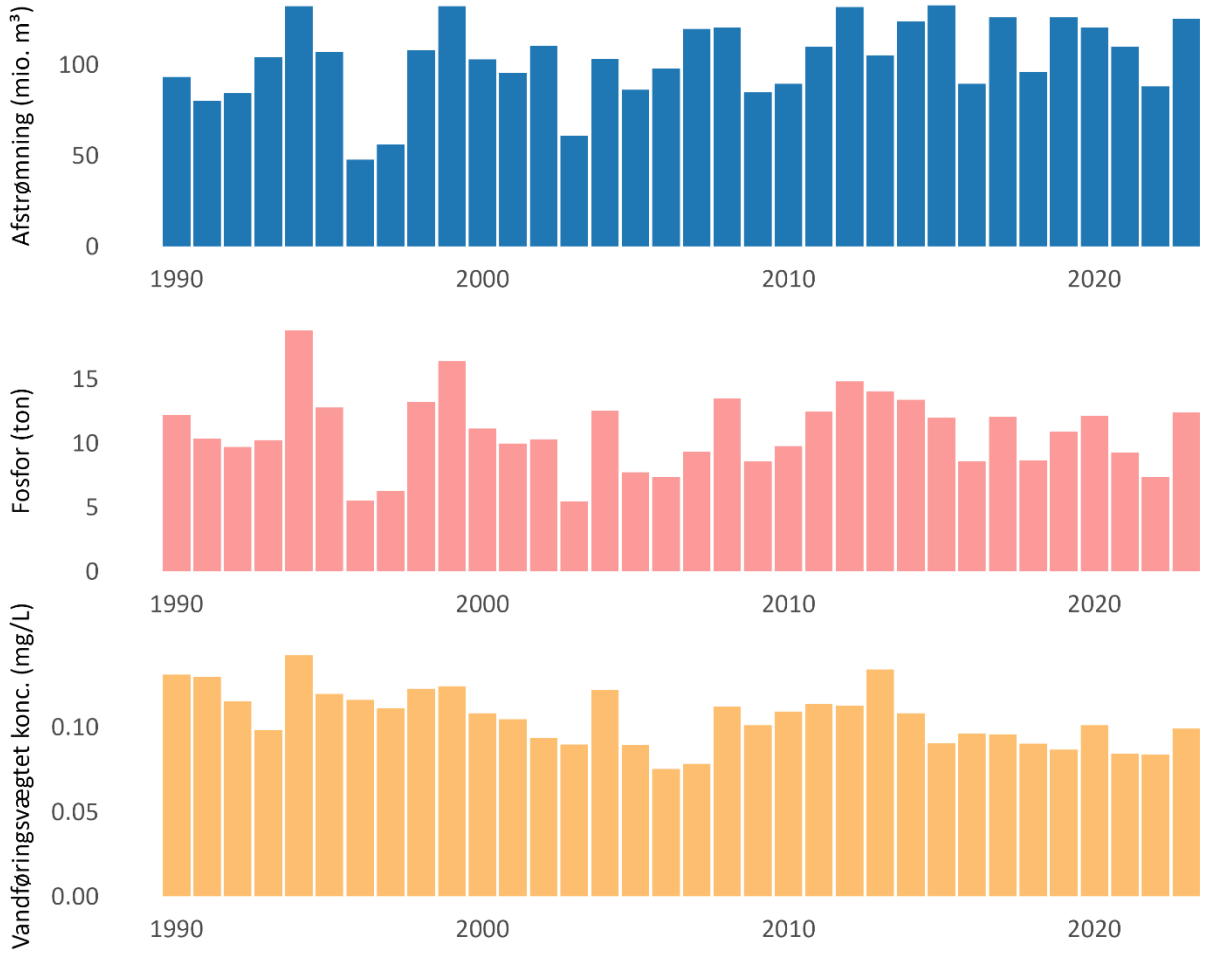
Da der ikke kan reduceres væsentligt i den organisk bundne del af kvælstoftilførslen, er det relevant at beregne andelen af uorganisk kvælstof, hvoraf nitrat (NO_3) udgør langt den største andel. I Tabel 4.1 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total kvælstof og uorganisk bundet kvælstof, samt andelen af den totale kvælstof udgjort af uorganisk kvælstof for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Juvredyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 4.1. Koncentrationer (mg/l) af total-kvælstof (TN) og ikke organisk bundet kvælstof (uorg. N) samt %-andel som uorg. N udgør af TN, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Juvredyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

Årstid	TN (mgN/l)	UorgN (mgN/l)	Andel UorgN (%)
DJF	4,1	3,4	82
MAM	3,7	3,0	81
JJA	3,2	2,5	77
SON	4,0	3,2	81
År	3,9	3,1	81

For Juvredyb ligger den gennemsnitlige årsandel af uorganisk kvælstof på ca. 80 % over perioden 2020-2024. Årstiden med laveste koncentrationer er i sommermånederne juni, juli og august (Tabel 4.1).

4.2.4 Fosfor



Figur 4.2. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), fosformængde (ton) og vandføringsvægtet fosforkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Juvredyb.

Ligesom for kvælstof (Figur 4.1) varierer fosfortilførslen også betydeligt igennem hele tidsserien (Figur 4.2) – særligt i slut 1990'erne, hvor tidsseriens højeste og laveste værdier optræder indenfor få år. Tilførslen synes generelt at følge afstrømningen tæt. Variationen synes at falde lidt fra 2010 og fremad, hvor afstrømningen også er mere stabil. Den vandføringsvægtede koncentration af fosfor er generelt nedadgående – dog med en periode med stigning i begyndelsen af 2010'erne, hvorefter koncentrationen falder igen.

4.2.5 Andel ortho-fosfat

Det er relevant at betragte andelen af ortho-fosfat af den totale fosfattilførsel da ortho-fosfat er direkte omsætteligt i primærproduktionen og herved indikerer risiko for eutrofiering i kystområdet. I Tabel 4.2 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total fosfor og ortho-fosfat, samt andelen af den totale fosfor udgjort af ortho-fosfat for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Juvredyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 4.2. Koncentrationer (mg/l) af total-fosfor (TP) og ortho-fosfat (ortho-P) samt %-andel som ortho-P udgør af TP, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Juvredyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

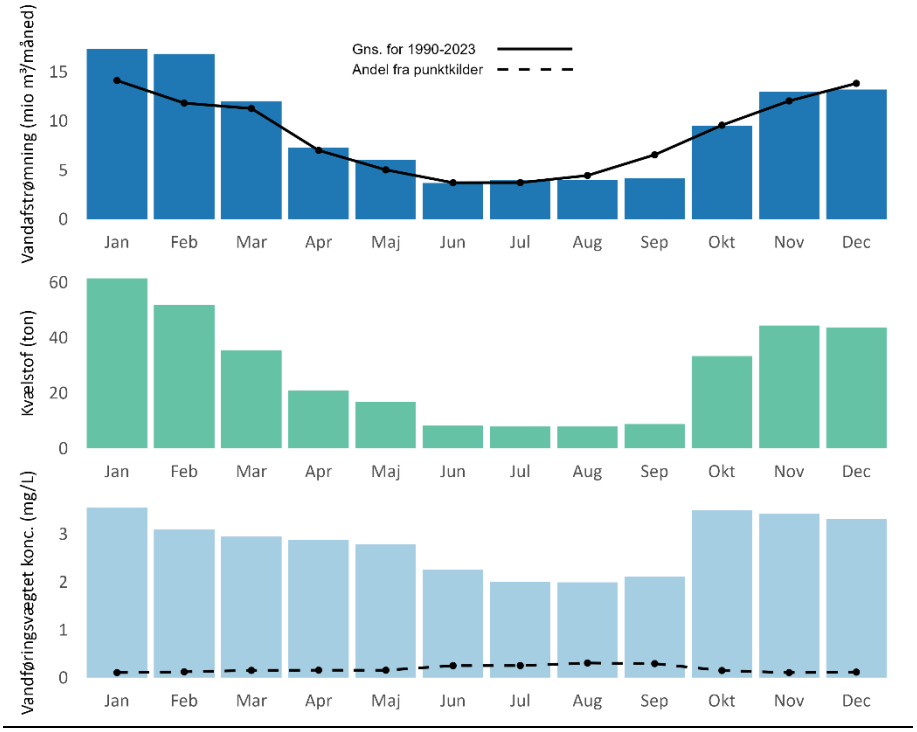
Årstid	TP (mgP/l)	Ortho-P (mgP/l)	Andel Ortho-P (%)
DJF	0,12	0,030	26
MAM	0,96	0,024	25
JJA	0,075	0,025	33
SON	0,098	0,026	27
År	0,10	0,027	27

Ca. ¼ af den årlige totalfosfor består af ortho-fosfot for Juvredyb. I sommermånederne (juni, juli og august) er andelen af ortho-fosfat højest (Tabel 4.2).

4.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Månedsfordelingen af vand- og næringsstoftilførslen til dybet kan have betydning for områdets tilstand, da tilførslen i algernes vækstperiode sandsynligvis influerer algevæksten mere end tilførslen i andre perioder (DHI, 2024). Derfor er middel-månedstilførslerne og middelmåneds-vandføringsvægtede koncentrationer præsenteret i dette kapitel for hhv. kvælstof (Figur 4.3) og fosfor (Figur 4.4). Den fireårige periode 2020-2023 er anvendt, for at give en nutidig månedsfordeling. Beregningerne er baseret på NOVANA-opgørelsen for 1990-2023 (Thodsen m.fl. 2024). Det månedlige gennemsnit af vandafstrømningen for perioden 1990-2023 vises også til sammenligning. Desuden fremlægges det, hvilken koncentration af de samlede vandføringsvægtede koncentrationer, der stammer fra punktkilder (her regnvand og renseanlæg).

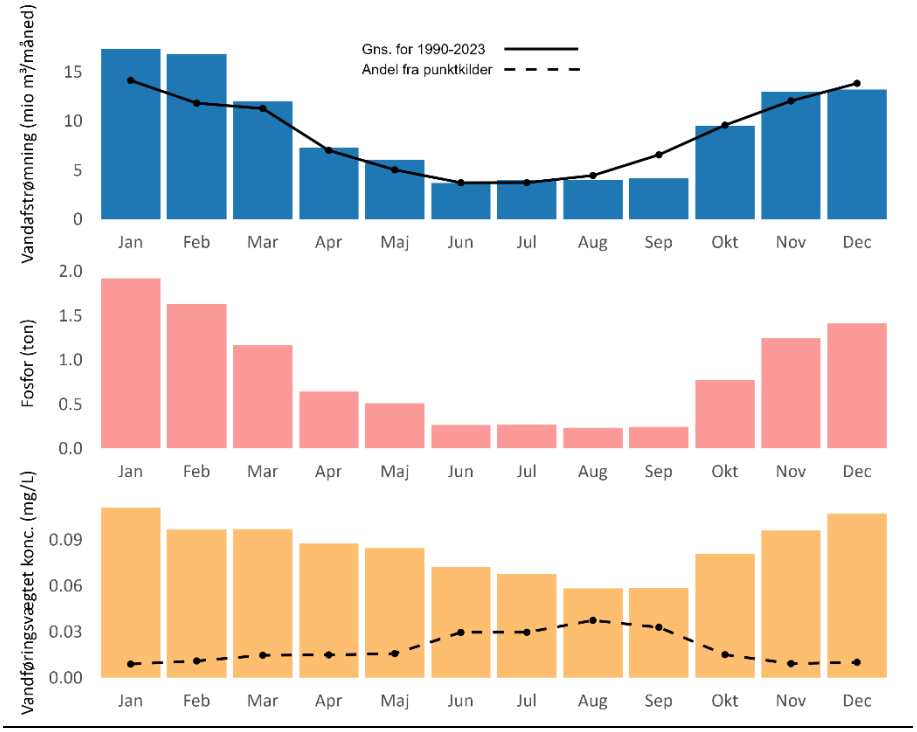
4.3.1 Kvælstof



Figur 4.3. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig mængde (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af kvælstof pr. måned i perioden 2020-2023 for Juvredyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Den månedlige tilførsel af kvælstof viser laveste værdier i sommerhalvåret og højeste tilførsler i vinterhalvåret – og følger dermed vandafstrømningen månederne igennem. Vandafstrømningen for 2020-2023 følger desuden gennemsnittet for 1990-2023 tæt, med enkelte undtagelser, fx har 2020-2023 væsentlig højere afstrømning i januar og februar, men betydeligt lavere i september. Den gennemsnitlige vandafstrømning er herved 8 % højere i 2020-2023 end gennemsnittet fra 1990-2023. Den vandføringsvægtede kvælstofkoncentration viser også laveste værdier i sommerperioden og højeste i vinterhalvåret. Punktkilderne er af marginal betydning året igennem, men har størst betydning i sommerhalvåret (Figur 4.3).

4.3.2 Fosfor



Figur 4.4. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig mængde (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af fosfor pr. måned i perioden 2020-2023 for Juvredyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Ligesom for kvælstof (Figur 4.3) er både vandafstrømningen og fosfortilførslen lavest i sommerhalvåret og højest i vinterhalvåret. Den vandføringsvægtede koncentration følger samme billede – med laveste værdier i august og september. I disse to måneder har punktkilderne også mest betydning (>50 %). Punktkilderne udgør en større andel af den vandføringsvægtede koncentration i sommermånederne, hvorimod betydningen er mere begrænset i vinterhalvåret, det skyldes primært at vandmængden og dermed fortyndingseffekten på punktkildebidraget er størst i vinterhalvåret (Figur 4.4).

4.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel

I dette afsnit præsenteres de kildeopdelte gennemsnitlige årlige tilførsler af hhv. kvælstof (Tabel 4.3) og fosfor (Tabel 4.4) over perioden 2020-2023 for Juvredybs samlede opland. Punktkilder defineres som direkte udledninger af næringsstoffer til miljøet fra eget udløb til vandløb, søer eller havet. Regnvandspunktkilder er regnbetingede udløb (RBU), dvs. punktvise udledninger fra befæstede arealer tilsluttet kloaknettet – fx overfladevand fra parkeringspladser og veje og opsamlet regnvand fra tage og gårdspladser. RBU opdeles i separatkloakeret RBU og overløb fra fælleskloakerede områder. Rensningsanlæg modtager og renser spildevand fra husholdninger og visse industrier, med henblik på at reducere udledningen af næringsstoffer. Det behandlede vand føres herefter af udløb til vandmiljøet (Frank-Gopolos, m.fl. 2024). En diffus kilde er en spredt, ikke-afgrænset kilde, hvor udledning af næringsstoffer til vandmiljøet ikke kan måles i et enkelt punkt. Dette omfatter typisk landbrugsarealer, skov, græsmarker og naturlige jordarealer men også udledninger fra spredt bebyggelse.

4.4.1 Kvælstof

Tabel 4.3. Gennemsnitlig årlige kvælstofmængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Juvredyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

RBU	Rensningsanlæg	Diffus tilførsel	Total tilførsel
1,1 (0,3 %)	2,8 (0,8 %)	336 (99 %)	340

Tilførslen af kvælstof til Juvredyb stammer næsten udelukkende fra diffuse kilder (99 %), hvor de to punktkilder RBU og rensningsanlæg er næsten uden betydning (>1 %) (Tabel 4.3).

4.4.2 Fosfor

Tabel 4.4. Gennemsnitlig årlige fosformængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Juvredyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

RBU	Rensningsanlæg	Diffus tilførsel	Total tilførsel
0,2 (1,6 %)	0,4 (4,1 %)	9,7 (94 %)	10,3

Fosfortilførslen til Juvredyb har primært oprindelse i de diffuse kilder (94 %). Renseanlæg (4,1 %) og RBU (1,6 %) udgør kun omkring 6 % af totaltilførslen (Tabel 4.4).

5 Listerdyb

5.1 Målegrundlag

I Thodsen m.fl. (2024) er der anvendt målte næringsstoftransporter fra tre målestationer (Figur 1-1). For disse målestationer er der beregnet månedlige stoftransporter, som kan tilgås i ODA-databasen (https://odaforalle.au.dk/)

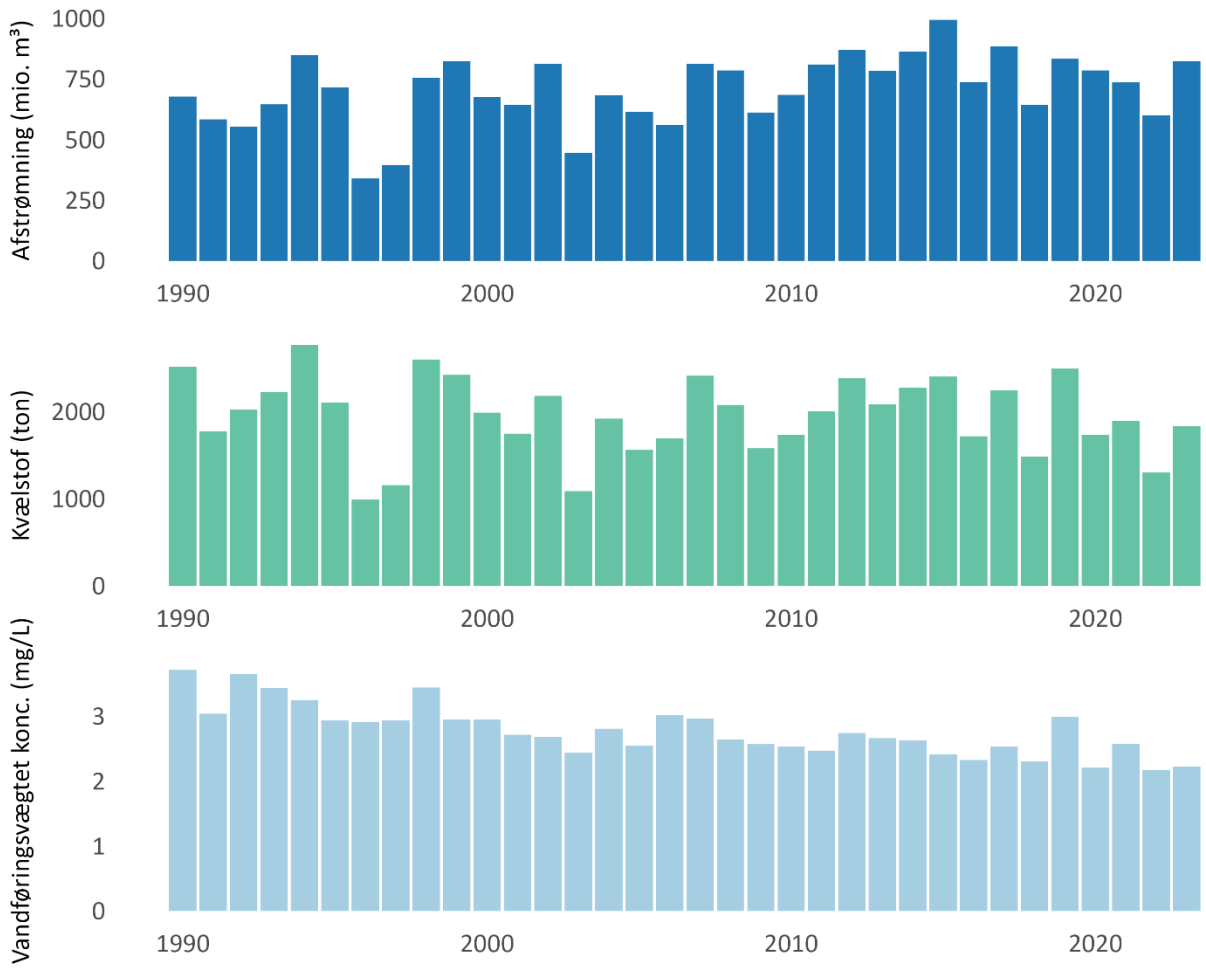
5.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Her præsenteres tidsseriedata for vandafstrømning (mio. m^3), tilførsler af hhv. kvælstof og fosfor (ton), samt den vandføringsvægtede koncentration (mg/L). Den vandføringsvægtede koncentration refererer her til koncentrationer, hvor mængden af det pågældende næringsstof divideres med den samtidige vandafstrømning. Der gives herved et billede af den effektive gennemsnitskoncentration af næringsstoffer, der eksporteres fra oplandet til Listerdyb. For hhv. kvælstof (Figur 5.1) og fosfor (Figur 5.2) fremvises tidsseriedata for perioden 1990-2023 indenfor det samlede opland til Listerdyb. Samtidig præsenteres andelen af uorganisk kvælstof af den totale vandføringsvægtede kvælstofkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 5.1), samt andelen af ortho-fosfat ud af den totale vandføringsvægtede fosforkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 5.2)

5.2.1 Vandafstrømning

Den årlige afstrømmende vandmængde ses i Figur 5.1. Afstrømningen har en umiddelbart stigende tendens igennem perioden siden 1990.

5.2.2 Kvælstof



Figur 5.1. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), kvælstofmængde (ton) og vandføringsvægtet kvælstofkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Listerdyb

Listerdyb viser varierende kvælstoftilførsler – mest markant i slut 1990'erne, hvor 1996-97 viser meget lave værdier, som følge af lave afstrømninger, men er omsluttet af år med meget høje tilførsler. Årstilførslerne følger generelt vandafstrømningerne. Den vandføringsvægtede kvælstofkoncentration er gradvist dalende tidsserien igennem (Figur 5.1).

5.2.3 Andel uorganisk kvælstof

Da der ikke kan reduceres væsentligt i den organisk bundne del af kvælstoftilførslen, er det relevant at beregne andelen af uorganisk kvælstof, hvoraf nitrat (NO_3) udgør langt den største andel. I Tabel 5.1 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total kvælstof og uorganisk bundet kvælstof, samt andelen af den totale kvælstof udgjort af uorganisk kvælstof for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Listerdyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

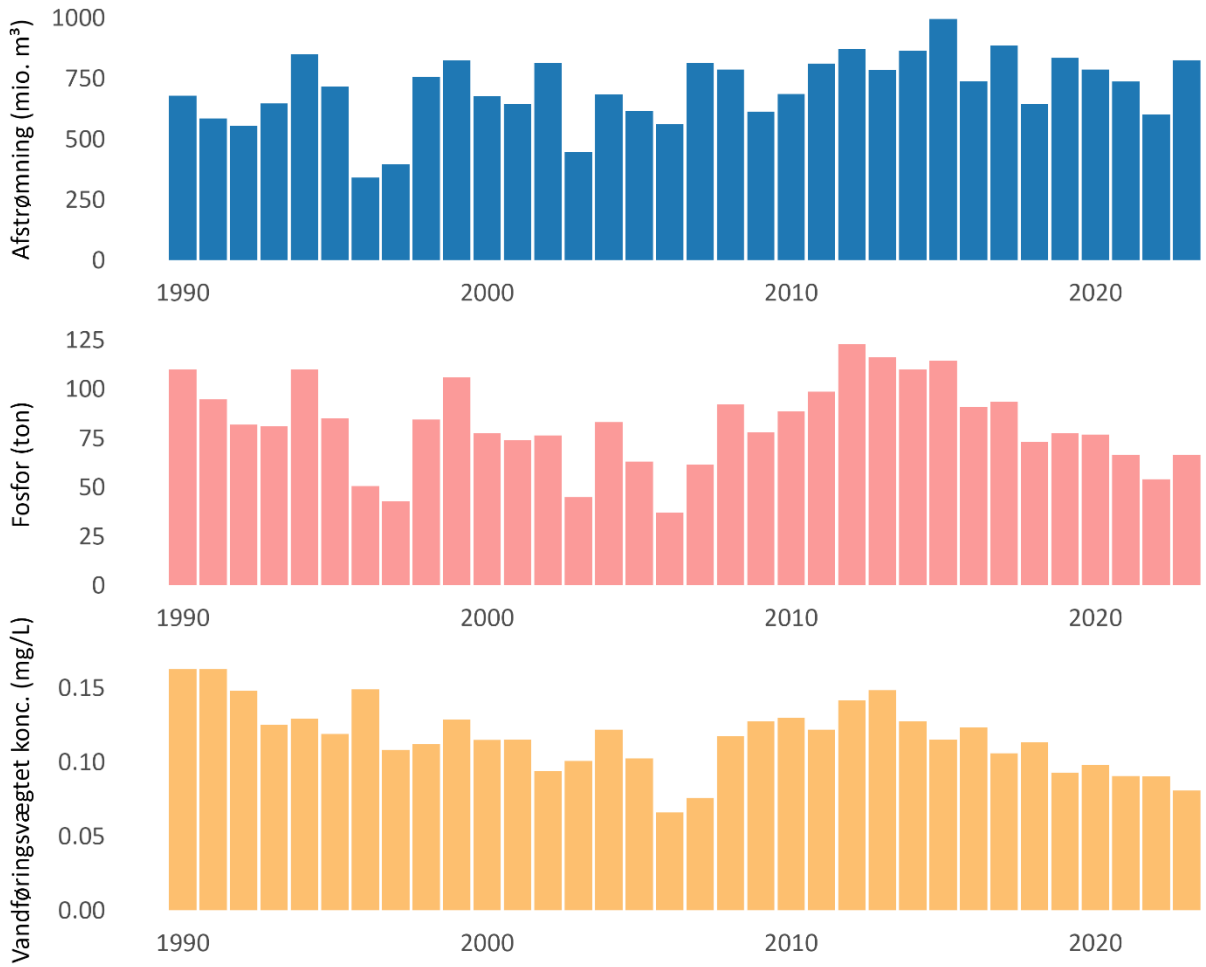
Tabel 5.1. Koncentrationer (mg/l) af total-kvælstof (TN) og ikke organisk bundet kvælstof (uorg. N) samt %-andel som uorg. N udgør af TN, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Listerdyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

Årstid	TN (mgN/l)	UorgN (mgN/l)	Andel UorgN (%)
DJF	2,7	2,1	77
MAM	2,1	1,6	76
JJA	1,6	1,1	67
SON	2,3	1,7	75
År	2,3	1,8	75

Uorganisk kvælstof udgør på årlig basis ca. ¾ af den totale kvælstoftilførsel. Sommermånederne viser det laveste gennemsnit af uorganisk kvælstof (67 %) (Tabel 5.1).

5.2.4 Fosfor

For Listerdybs opland er der opgjort et fald i den vandføringsvægtede fosfor koncentration i begyndelsen af 1990erne, hvorefter perioden frem til omkring 2014 viser en del variation men ikke noget reel udvikling. For de seneste ca. 10 år ser der ud til at være opgjort et fald i den vandføringsvægtede fosforkoncentration (Figur 5.2).



Figur 5.2. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), fosformængde (ton) og vandføringsvægtet fosforkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Listerdyb

5.2.5 Andel ortho-fosfat

Det er relevant at betragte ortho-fosfat andel af den totale fosfortilførsel da ortho-fosfat er direkte omsætteligt i primærproduktionen og herved medfører en risiko for eutrofiering i kystområdet. I Tabel 5.2 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total fosfor og ortho-fosfat, samt andelen af den totale fosfor udgjort af ortho-fosfat for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Listerdyb for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 5.2. Koncentrationer (mg/l) af total-fosfor (TP) og ortho-fosfat (ortho-P) samt %-andel som ortho-P udgør af TP, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Listerdyb. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

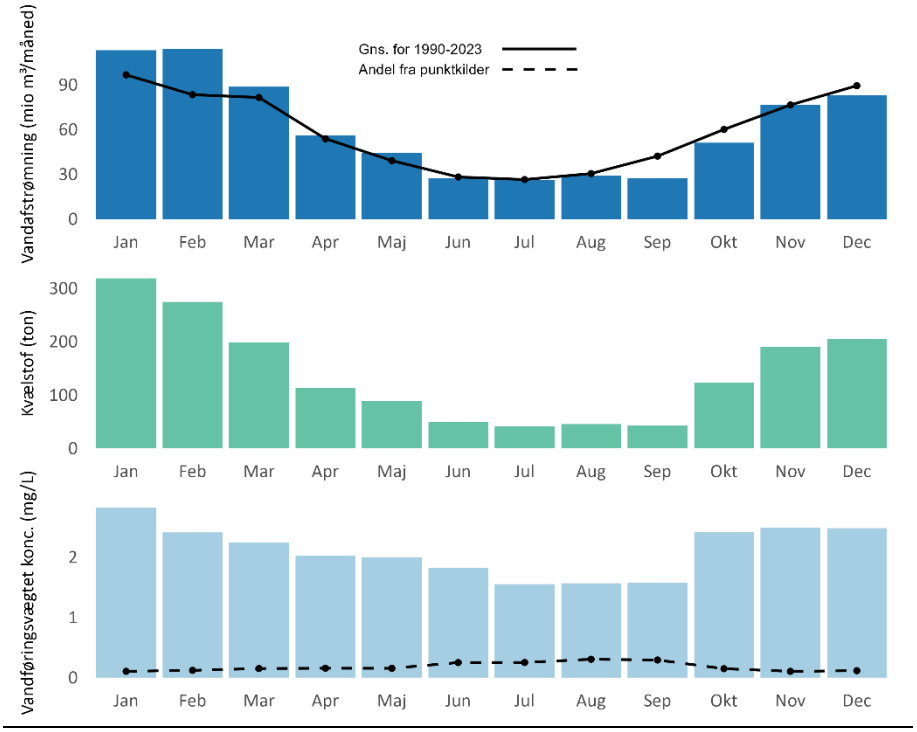
Årstid	TP (mgP/l)	Ortho-P (mgP/l)	Andel Ortho-P (%)
DJF	0,094	0,026	27
MAM	0,097	0,022	23
JJA	0,071	0,023	33
SON	0,086	0,025	30
År	0,090	0,024	27

I Listerdyb udgør orthofosfat godt en ¼ af den totale fosforpulje. I sommerperioden (juni, juli og august) er andelen af orthofosfat højest (Tabel 5.2).

5.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Månedsfordelingen af vand- og næringsstoftilførslen til dybet kan have betydning for områdets tilstand, da tilførslen i algernes vækstperiode sandsynligvis influere algevæksten mere end tilførslen i andre perioder (DHI, 2024). Derfor er middel-månedstilførslerne og middelmåneds-vandføringsvægtede koncentrationer præsenteret i dette kapitel for hhv. kvælstof (Figur 5.3) og fosfor (Figur 2.4). Den fireårige periode 2020-2023 er anvendt, for at give en nutidig månedsfordeling. Beregningerne er baseret på NOVANA-opgørelsen for 1990-2023 (Thodsen m.fl. 2024). Det månedlige gennemsnit af vandafstrømningen for perioden 1990-2023 vises også til sammenligning. Desuden fremlægges det, hvilken koncentration af de samlede vandføringsvægtede koncentrationer, der stammer fra punktkilder (her regnvand, renseanlæg, industri, og dambrug).

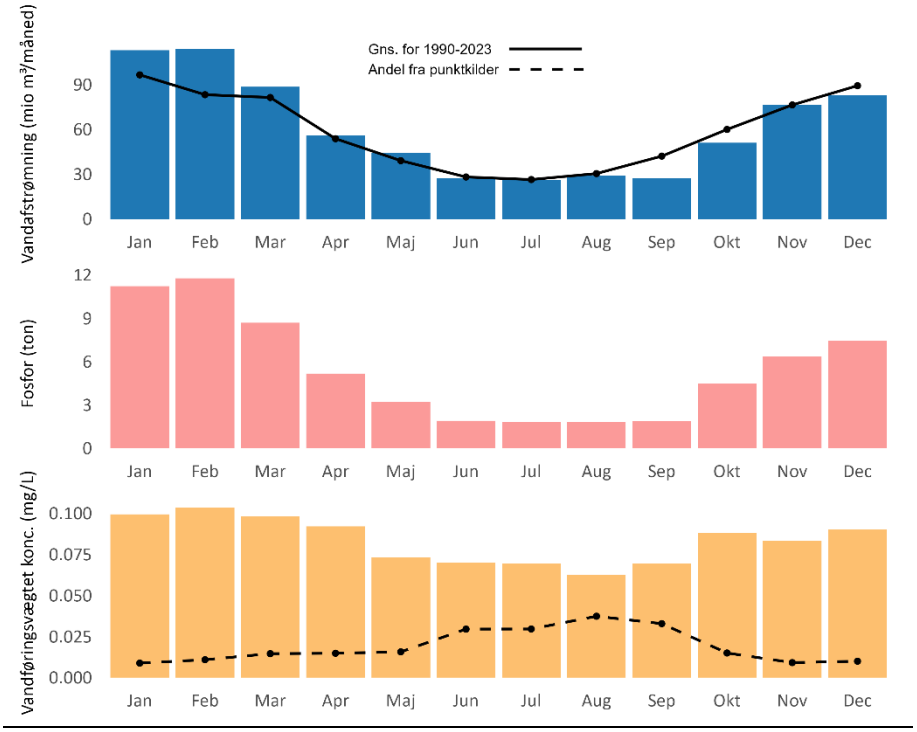
5.3.1 Kvælstof



Figur 5.3. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig mængde kvælstof (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af kvælstof pr. måned i perioden 2020-2023 for Listerdyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Den månedlige vandafstrømning er højest i vinterhalvåret og lavest om sommeren. Dette følger gennemsnittet for 1990-2023. 2020-2023 udviser dog højere månedsværdier i årets tre første måneder, men lavere særligt i september og oktober. Den gennemsnitlige vandafstrømning er 4 % højere i 2020-2023 end gennemsnittet fra 1990-2023. Tilførslen viser samme mønster som afstrømningen med laveste værdier i sommerhalvåret. Dette ses også i den vandføringsvægtede kvælstofkoncentration. Punktkilderne er generelt af mindre betydning for koncentrationen, men har størst indflydelse på koncentrationen i sommerhalvåret (Figur 5.3).

5.3.2 Fosfor



Figur 5.4. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), gennemsnitlig mængde fosfor (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af fosfor pr. måned i perioden 2020-2023 for Listerdyb. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Fosfortilførslen følger generelt de samme tendenser som kvælstof (Figur 5.3). Tilførslen følger omtrentligt afstrømningen med laveste værdier i sommerhalvåret. Det samme gælder koncentrationsværdierne mellem månederne. Punktkilderne ses at have stor indflydelse i sommerperioden hvor de udgør mere end 50 % af den samlede fosfortilførsel for nogle måneder (Figur 5.4).

5.4 Kildeopsplittet næringsstoftilførsel

I dette afsnit præsenteres de kildeopdelte gennemsnitlige årlige tilførsler af hhv. kvælstof (Tabel 5.3) og fosfor (Tabel 5.4) over perioden 2020-2023 for Listerdybs samlede opland. Lysegrå felter i tabellerne angiver punktkilder. Punktkilder defineres som direkte udledninger af næringsstoffer til miljøet fra eget udløb til vandløb, søer eller havet. En industriel punktkilde er en virksomhed eller et anlæg, der har en særskilt udledning af processpildevand og/eller industrielt overfladevand direkte til oplandets vandmiljø. Regnvandspunktkilder er regnbetingede udløb (RBU), dvs. punktvise udledninger fra befæstede arealer tilsluttet kloaknettet – fx overfladevand fra parkeringspladser og veje og opsamlet regnvand fra tage og gårdspladser. RBU opdeles i separatkloakeret RBU og overløb fra fælleskloakerede områder. Rensningsanlæg modtager og renser spildevand fra husholdninger og visse industrier, med henblik på at reducere udledningen af næringsstoffer. Det behandlede vand føres herefter af udløb til vandmiljøet. Dambrug (her ferskvand) betragtes som en punktkilde, fordi det har et diskret, afgrænset udledningspunkt (Frank-Gopolos, m.fl. 2024). En diffus kilde er en spredt, ikke-afgrænset kilde, hvor udledning af næringsstoffer til vandmiljøet ikke kan måles i et enkelt punkt. Dette omfatter typisk landbrugsarealer, skov, græsmarker og naturlige jordarealer men også udledninger fra spredt bebyggelse.

5.4.1 Kvælstof

Tabel 5.3. Gennemsnitlig årlige kvælstofmængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Listerdyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

Industri	RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
0,318 (~ 0 %)	11 (0,7 %)	37 (2,2 %)	3,8 (0,2 %)	1640 (97 %)	1690

Den diffuse tilførsel af kvælstof til Listerdyb udgør den dominerende andel af totaltilførslen. Af punktkilderne er rensningsanlæg den mest betydningsfulde med 2,2 % af totaltilførslen (Tabel 5.3).

5.4.2 Fosfor

Tabel 5.4. Gennemsnitlig årlige fosformængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Listerdyb fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

Industri	RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
0,036 (~ 0 %)	1,6 (2,4 %)	2,7 (4,2 %)	0,3 (0,5 %)	61 (93 %)	66

For fosfor er det også den diffuse tilførsel, der er klart dominerende. Punktkildebidraget er dog større, hvor de største kilder til den samlede fosfortilførsel er rensningsanlæg (4,2 %) og regnbetingede udløb (2,4 %) (Tabel 5.4).

6 Hele Vadehavet

6.1 Målegrundlag

I Thodsen m.fl. (2024) er der anvendt målte næringsstoftransporter fra 14 målestationer for hele Vadehavet (Figur 1-1). For disse målestationer er der beregnet månedlige stoftransporter, som kan tilgås i ODA-databasen (https://odaforalle.au.dk/)

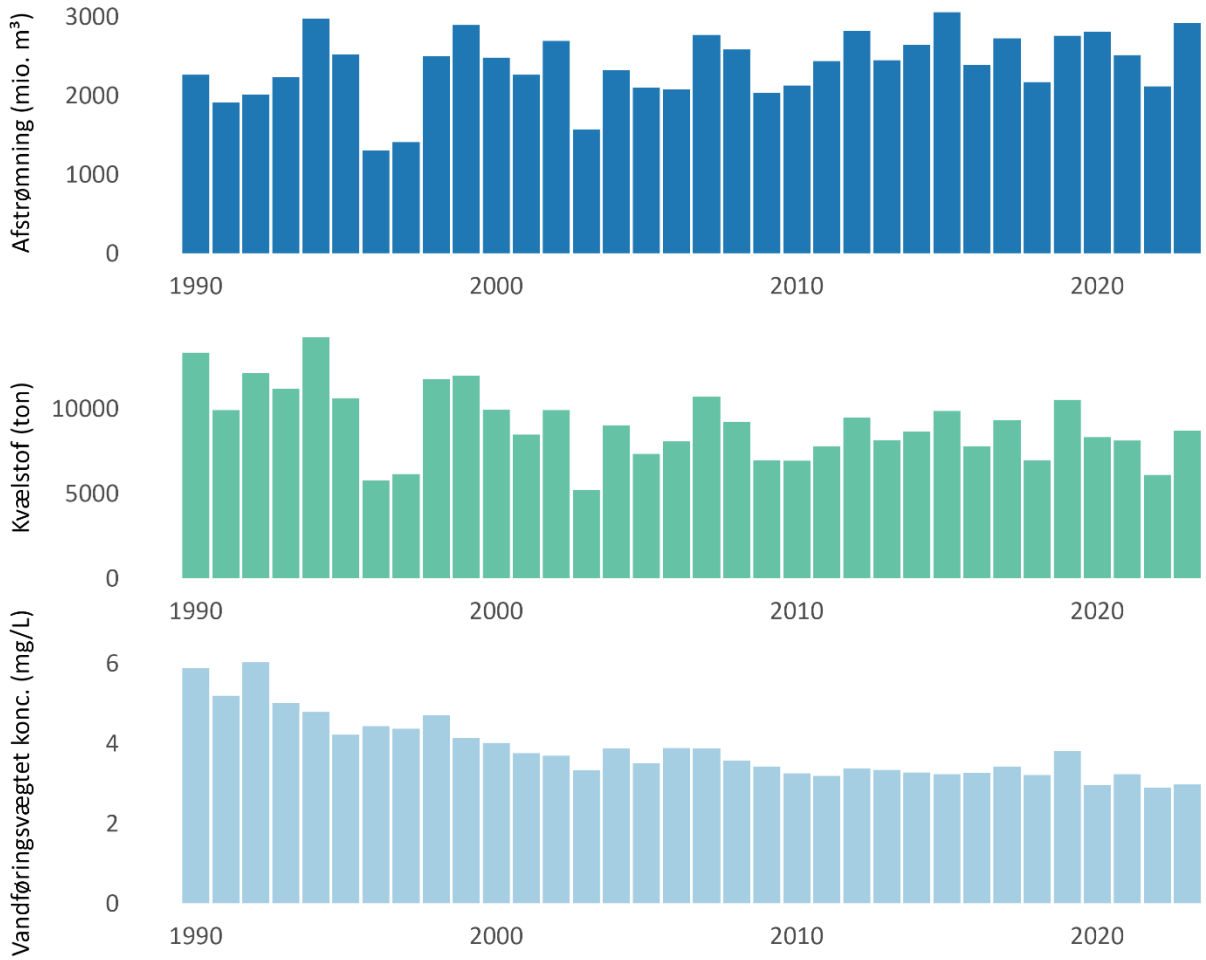
6.2 Vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Her præsenteres tidsseriedata for vandafstrømning (mio. m^3), tilførsler af hhv. kvælstof og fosfor (ton), samt den vandføringsvægtede koncentration (mg/L). Den vandføringsvægtede koncentration refererer her til koncentrationer, hvor mængden af det pågældende næringsstof divideres med den samtidige vandafstrømning. Der gives herved et billede af den effektive gennemsnitskoncentration af næringsstoffer, der eksporteres fra oplandet til Vadehavet. For hhv. kvælstof (Figur 6.1) og fosfor (Figur 6.2) fremvises tidsseriedata for perioden 1990-2023 indenfor det samlede opland til Vadehavet. Samtidig præsenteres andelen af uorganisk kvælstof af den totale vandføringsvægtede kvælstofskoncentration fra 2020-2024 (Tabel 6.1) samt andelen af ortho-fosfat ud af den totale vandføringsvægtede fosforkoncentration fra 2020-2024 (Tabel 6.2).

6.2.1 Vandafstrømning

Den årlige afstrømmende vandmængde ses i Figur 6.1. Afstrømningen ser umiddelbart stigende ud igennem perioden siden 1990 og er i seneste NOVANA rapport beregnet til at stige 36 % over perioden 1990 – 2024 (Thodsen et al., 2025).

6.2.2 Kvælstof



Figur 6.1. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), kvælstofmængde (ton) og vandføringsvægtet kvælstofkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Vadehavet.

For det samlede Vadehav ses 1990'erne at have de højeste kvælstoftilførsler i dataserien – med undtagelse af de meget lave tilførsler i '96 og '97, hvor afstrømningen også var ualmindelig lav. Kvælstoftilførslerne synes generelt at have en nedadgående udvikling igennem tidsserien. Den samme nedadgående udvikling kan ses i den vandføringsvægtede koncentration (Figur 6.1). I NOVANA rapporten, Thodsen et al., (2024), er faldet imellem 1990 og 2023 beregnet til 45 %, for diffuse kilder 36 %.

6.2.3 Andel uorganisk kvælstof

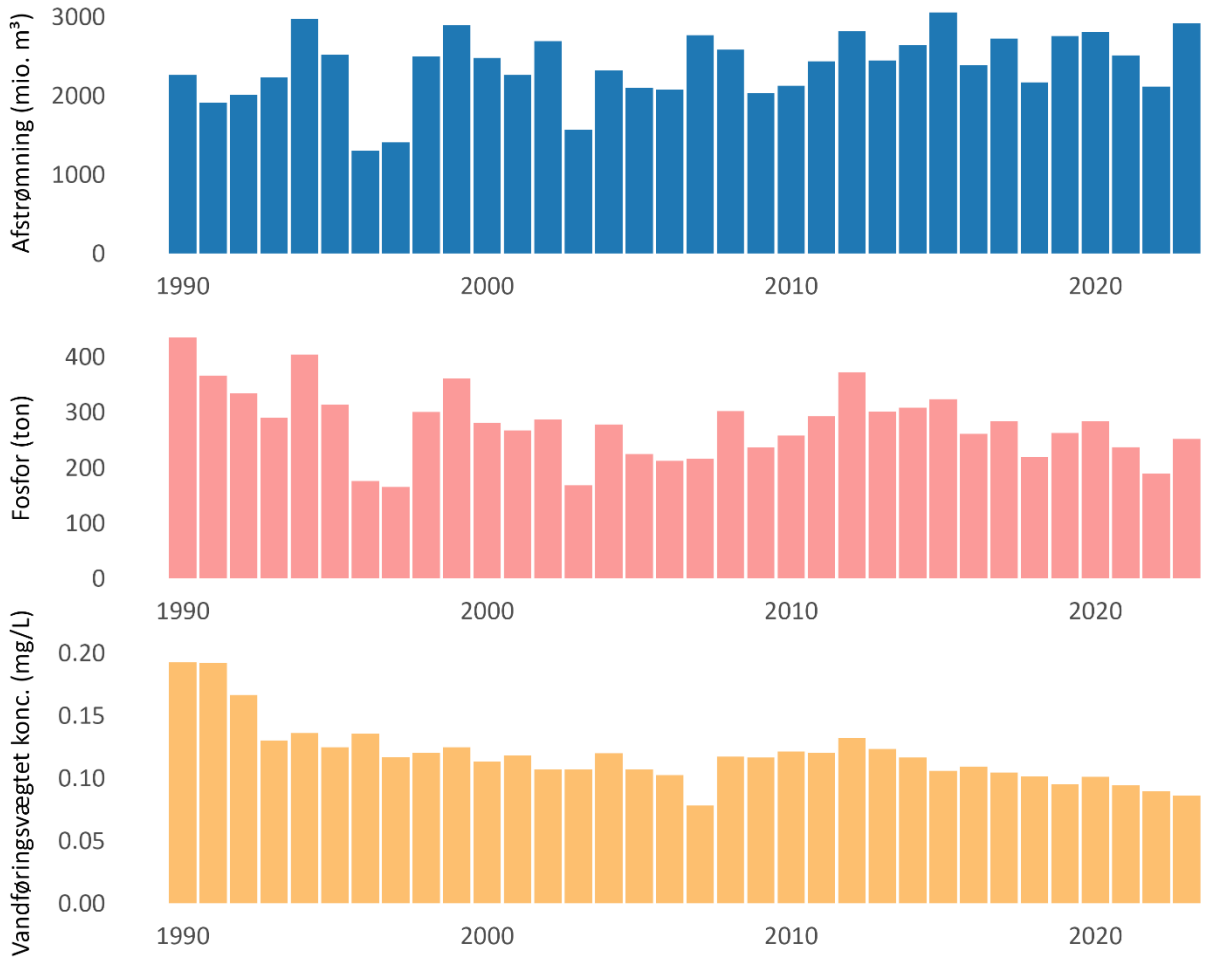
Da der ikke kan reduceres væsentligt i den organisk bundne del af kvælstoftilførslen, er det relevant at beregne andelen af uorganisk kvælstof, hvoraf nitrat (NO_3) udgør langt den største andel. I Tabel 6.1 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total kvælstof og uorganisk bundet kvælstof, samt andelen af den totale kvælstof udgjort af uorganisk kvælstof for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til hele Vadehavet for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 6.1. Koncentrationer (mg/l) af total-kvælstof (TN) og ikke organisk bundet kvælstof (uorg. N) samt %-andel som uorg. N udgør af TN, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Vadehavet. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

Årstid	TN (mgN/l)	UorgN (mgN/l)	Andel UorgN (%)
DJF	3,3	2,8	84
MAM	3,0	2,5	85
JJA	2,6	2,1	82
SON	3,0	2,5	83
År	3,1	2,6	83

Den årlige andel af totalkvælstoftilførslen, der er udgjort af uorganisk kvælstof er 83 %. På tværs af sæsonerne varierer denne andel kun 3 % point (Tabel 6.1).

6.2.4 Fosfor



Figur 6.2. Årlig vandafstrømning (mio. m^3), fosformængde (ton) og vandføringsvægtet fosforkoncentration (mg/L) i perioden 1990-2023 for Vadehavet.

Den årlige fosfortilførsel (Figur 6.2) har de højeste værdier i begyndelsen af tidsserien -dog med meget lave værdier i '96 og '97 ligesom for kvælstof (Figur 6.1). I modsætning til kvælstof, ses der en periode med forøgelse af fosfortilførslen i midt 2010'erne, som i 2020'erne dog falder igen. Den vandføringsvægtede koncentration har de højeste værdier i 1990 og 1991, hvor tilførslen var høj og afstrømningen moderat. Faldet i første del af 1990erne tilskrives forbedret spildevandsrensning. Herefter forekommer en forholdsvis stabil fosforkoncentrationen indtil omkring 2013 - 2014 hvorefter

fosforkoncentrationen igen ses at falde (Figur 6.2). I NOVANA rapporten, Thodsen et al., (2024), er faldet imellem 1990 og 2023 beregnet til 52 %.

6.2.5 Andel ortho-fosfat

Det er relevant at betragte andelen af ortho-fosfat af den totale fosfortilførsel da ortho-fosfat er direkte omsætteligt i primærproduktionen og herved indikere risiko for eutrofiering i kystområdet. I Tabel 6.2 ses den gennemsnitlige vandføringsvægtede koncentration af total fosfor og ortho-fosfat, samt andelen af den totale fosfor udgjort af ortho-fosfat for det samlede målte opland (samlet opland til vandløbsmålestationerne) til Vadehavet for perioden 2020-2024 og opdelt på årstider i samme periode.

Tabel 6.2. Koncentrationer (mg/l) af total-fosfor (TP) og ortho-fosfat (ortho-P) samt %-andel som ortho-P udgør af TP, dels for hele perioden 2020-2024 og dels for hver årstid for Vadehavet. DJF = december, januar, februar; MAM = marts, april, maj; JJA = juni, juli august; SON = september, oktober, november.

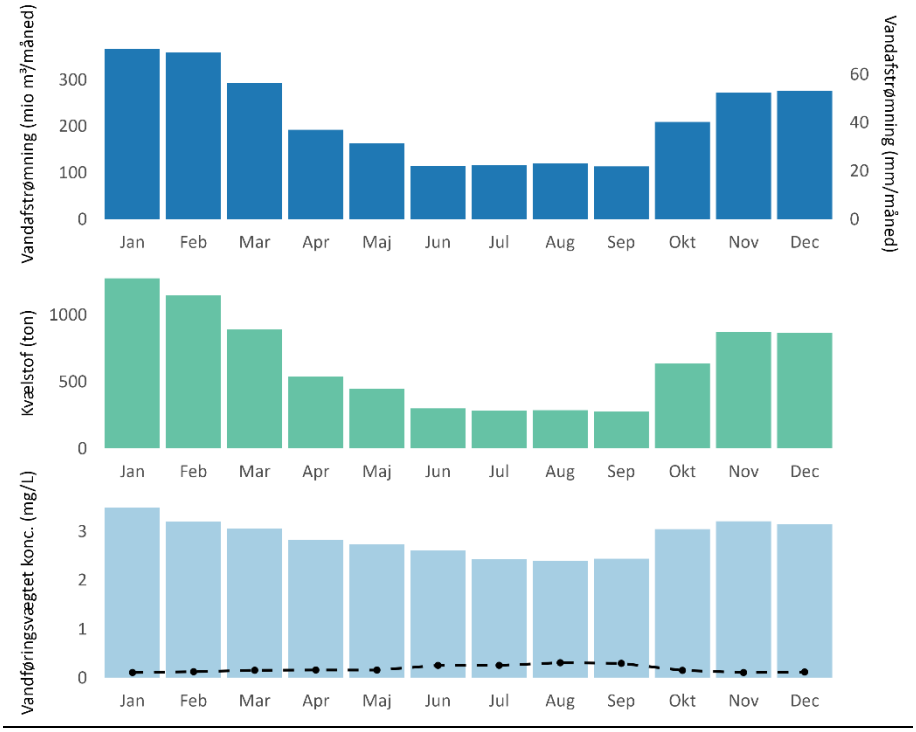
Årstid	TP (mgP/l)	Ortho-P (mgP/l)	Andel Ortho-P (%)
DJF	0,095	0,027	28
MAM	0,093	0,023	25
JJA	0,085	0,026	31
SON	0,098	0,027	28
År	0,094	0,026	28

I vadehavet består den totale fosfortilførsel af lidt over ¼ orthofosfat. Sæsonvariationen her er meget begrænset, men med laveste værdier i foråret og højeste om sommeren (Tabel 6.2).

6.3 Månedlig vandafstrømning og næringsstoftilførsel

Månedsfordelingen af vand- og næringsstoftilførslen til Vadehavet kan have betydning for områdets tilstand, da tilførslen i algernes vækstperiode sandsynligvis influere algevæksten mere end tilførslen i andre perioder (DHI, 2024). Derfor er middel-månedstilførslerne og middelmåneds-vandføringsvægtede koncentrationer præsenteret i dette kapitel for hhv. kvælstof (Figur 6.3) og fosfor (Figur 6.4). Den fireårige periode 2020-2023 er anvendt, for at give en nutidig månedsfordeling. Beregningerne er baseret på NOVANA-opgørelsen for 1990-2023 (Thodsen m.fl. 2024). Det månedlige gennemsnit af vandafstrømningen for perioden 1990-2023 vises også til sammenligning. Desuden fremlægges det, hvilken koncentration af de samlede vandføringsvægtede koncentrationer, der stammer fra punktkilder (her regnvand, renseanlæg, industri og dambrug).

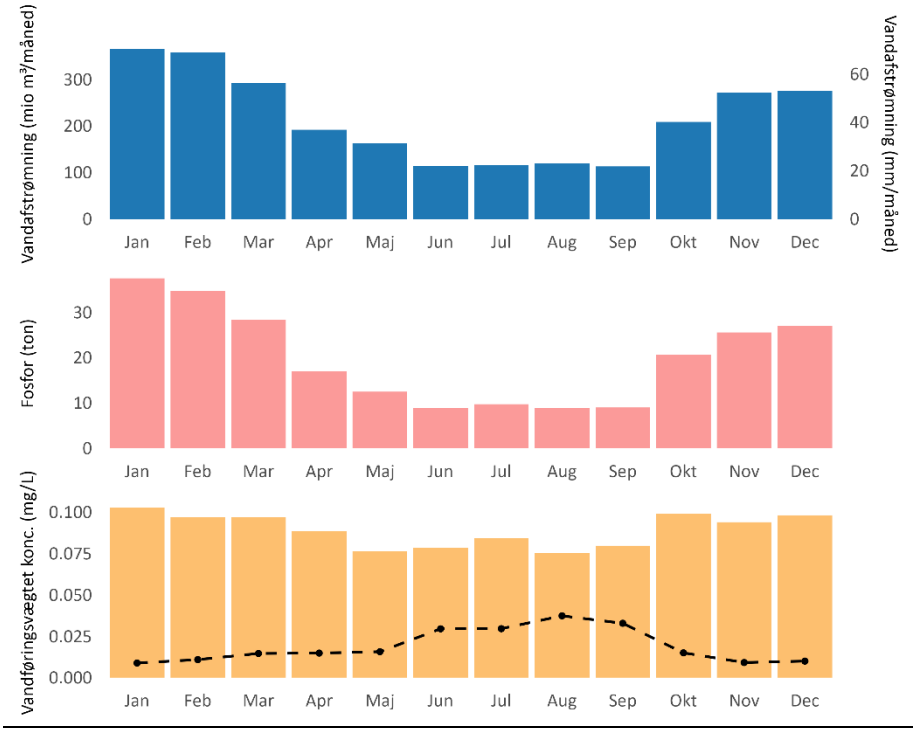
6.3.1 Kvælstof



Figur 6.3. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd) (mm/mnd), gennemsnitlig mængde (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af kvælstof pr. måned i perioden 2020-2023 for Vadehavet. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Den gennemsnitlige månedsudvikling fra 2020-2023 viser højeste vandafstrømninger i vinterhalvåret og laveste om sommeren. Den gennemsnitlige udvikling for 1990-2023 viser samme tendens, men har lavere værdier særligt i januar og februar og højere afstrømninger særligt i september. Den gennemsnitlige vandafstrømning er 9 % højere i 2020-2023 end gennemsnittet fra 1990-2023. Den månedlige kvælstofudledning følger samme mønster som afstrømningen med laveste værdier om sommeren og højeste værdier om vinteren. Det samme gælder den vandføringsvægtede koncentration af kvælstof. Punktkilderne bidrager ganske lidt på tværs af månederne, men mest i sommerperioden (Figur 6.3).

6.3.2 Fosfor



Figur 6.4. Gennemsnitlig vandafstrømning (mio. m^3/mnd), (mm/mnd) gennemsnitlig mængde fosfor (ton) og vandføringsvægtet koncentration (mg/L) af fosfor pr. måned i perioden 2020-2023 for Vadehavet. Den fuldt optrukne linje viser den gennemsnitlige vandafstrømning i perioden 1990-2023. Den stiplede linje viser andelen af den vandføringsvægtede koncentration, der stammer fra punktkilder.

Den månedlige tilførsel af fosfor over perioden 2020-2023 følger ligesom kvælstof (Figur 6.3) vandafstrømningen tæt. De laveste værdier ses om sommeren og de højeste om vinteren. Det samme gør sig gældende for koncentrationen, dog uden det samme dramatiske dyk i sommerperioden. Punktkilderne har ikke stor betydning om vinteren, men i sommerperioden udgør punktkilderne op til 50 % af den månedlige koncentration (Figur 6.4).

Kildeopsplittet næringsstoftilførsel

I dette afsnit præsenteres de kildeopdelte gennemsnitlige årlige tilførsler af hhv. kvælstof (Tabel 6.3) og fosfor (Tabel 6.4) over perioden 2020-2023 for Vadehavets samlede opland. Lysegrå felter i tabellerne angiver punktkilder. Punktkilder defineres som direkte udledninger af næringsstoffer til vandmiljøet fra eget udløb til vandløb, søer eller havet. En industriel punktkilde er en virksomhed eller et anlæg, der har en særskilt udledning af processpildevand og/eller industrielt overfladevand direkte til oplandets vandmiljø. Regnvandspunktkilder er regnbetingede udløb (RBU), dvs. punktvise udledninger fra befæstede arealer tilsluttet kloaknettet – fx overfladevand fra parkeringspladser og veje og opsamlet regnvand fra tage og gårdspladser. RBU opdeles i separatkloakeret RBU og overløb fra fælleskloakerede områder. Rensningsanlæg modtager og renser spildevand fra husholdninger og visse industrier, med henblik på at reducere udledningen af næringsstoffer. Det behandlede vand føres herefter af udløb til vandmiljøet. Dambrug (her ferskvand) betragtes som en punktkilde, fordi det har et diskret, afgrænset udledningspunkt (Frank-Gopolos, m.fl. 2024). En diffus kilde er en spredt, ikke-afgrænset kilde, hvor udledning af næringsstoffer til vandmiljøet ikke kan måles i et enkelt punkt. Dette omfatter typisk landbrugsarealer, skov, græsmarker og naturlige jordarealer men også udledninger fra spredt bebyggelse.

6.3.3 Kvælstof

Tabel 6.3. Gennemsnitlig årlige kvælstofmængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Vadehavet fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

Industri	RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
0,318 (~ 0 %)	84 (1,1 %)	188 (2,4 %)	124 (1,6 %)	7390 (95 %)	7780

I Vadehavet er den primære del af totaltilførslen af kvælstof fra diffuse kilder (95 %). Herefter følger rensningsanlæg (2,4 %) og dambrug (1,6 %). RBU udgør kun omkring 1 % og industriel tilførsel er næsten ikke til stede (Figur 6.3).

6.3.4 Fosfor

Tabel 6.4. Gennemsnitlig årlige fosformængder i ton, procenter af totalmængden angivet i parentes og kildetyper for perioden 2020-2023 udledt til Vadehavet fra det samlede opland. RBU = Regn Betingede Udløb.

Industri	RBU	Rensningsanlæg	Dambrug	Diffus tilførsel	Total tilførsel
0,036 (~ 0 %)	13 (5,3 %)	19 (7,7 %)	8,8 (3,7 %)	200 (83 %)	240

Den totale tilførsel af fosfor til Vadehavet stammer primært fra diffuse kilder (83 %). Rensningsanlæg har dog en ikke ubetydelig andel af tilførslen med 7,7 %. Herefter følger RBU (5,3 %) og dambrug (3,7 %). Industriens tilførsel er næsten uden betydning (Tabel 6.4).

7 Opsamling af tilførsler til de fire tidevands-områder

I dette kapitel præsenteres et overblik over resultaterne i kapitel 2 – 6 plus nogle få ekstra beregninger i en samlet tabel (Tabel 7.1). Data er for NOVANA opgørelserne for perioden 2020-2023 (Thodsen et al., 2024), undtagen procentdelene af uorganisk-N og orto-P, som er beregnet direkte på stoftransporter beregnet ud fra målinger for det målte opland for perioden 2020-2024.

Tabel 7.1. Oversigt over vandafstrømning og næringsstoftilførsler, kildeopsplitning og andel af ikke-organisk næringsstof procentandele fra oplandene til vadehavet og de fire tidevandsområder (For kort se Figur 1.1).

Tidevandsområde	Grådyb	Knudedyb	Juvredyb	Listerdyb	Vadehavet
Vandafstrømning					
mm/år	527	529	405	453	498
mio.m^3/år	971	768	111	735	2580
Kvælstoftilførsel					
Total N tonN/år	2920	2840	340	1690	7780
Diffus N tonN/år	2690	2730	336	1640	7390
Diffus kgN/ha	15	19	12	10	14
%-diffuse kilder	92	96	99	97	95
%-punktkilder	8	4	1	3	5
Koncentration mg N/l	3,0	3,7	3,1	2,3	3,0
% uorganisk N	85	86	81	75	83
Fosfortilførsel					
Total tonP/år	96	67	10	66	240
Diffus tonP/år	73	55	9,7	61	200
Diffus kgP/ha	0,40	0,38	0,36	0,38	0,39
%-diffuse kilder	76	83	94	93	83
%-punktkilder	24	17	6	7	17
Koncentration mg P/l	0,099	0,087	0,093	0,090	0,093
%-ortoP	24	34	27	27	28

8 Fosfor tilført vadehavet via bundtransporteret sand i vandløb

Opgørelsen af den målte fosfortransport i NOVANA-programmet er baseret på prøvetagning i vandløbene. Prøverne indsamles generelt ved at fylde en prøveflaske med vand fra den øvre del af vandsøjlen. Da større partikler, fx sand, ikke er fuldt opblandede i vandsøjlen og generelt sjældent findes i den øvre del af vandsøjlen i større vandløb, men har højest koncentration ved bunden, medtages transporten af disse og den mængde fosfor, der er adsorberet hertil, ikke i opgørelsen. Bartholdy m.fl. (1991), angiver at bundtransporten (ca. 18.000 ton) udgør 56 % af totaltransporten af partikulært materiale fra Ribe ås opland opstrøms Ribe. Derfor er den fosformængde, som er adsorberet til bundsedimentet, ikke medtaget i opgørelsen af tilførslen til fx vadehavet. Der er en, set i forhold til andre danske vandløb, betydelig sandtransport i de alluviale, (vandløb der løber i fluvialt (vandløbs) aflejrede sedimenter) vestvendte danske vandløb, der primært gennemløber hedeslette. Det gælder således de større vandløb, der løber til Vadehavet.

I dette kapitel gøres der et forsøg på at estimere mængden af sand transporteret til vadehavets fire tidevandsområder og den medfølgende fosformængde samt vigtigheden af at inkludere disse i beregningen af tilførslen til havet.

8.1 Data

8.1.1 Fosforkoncentration i vandløbssand

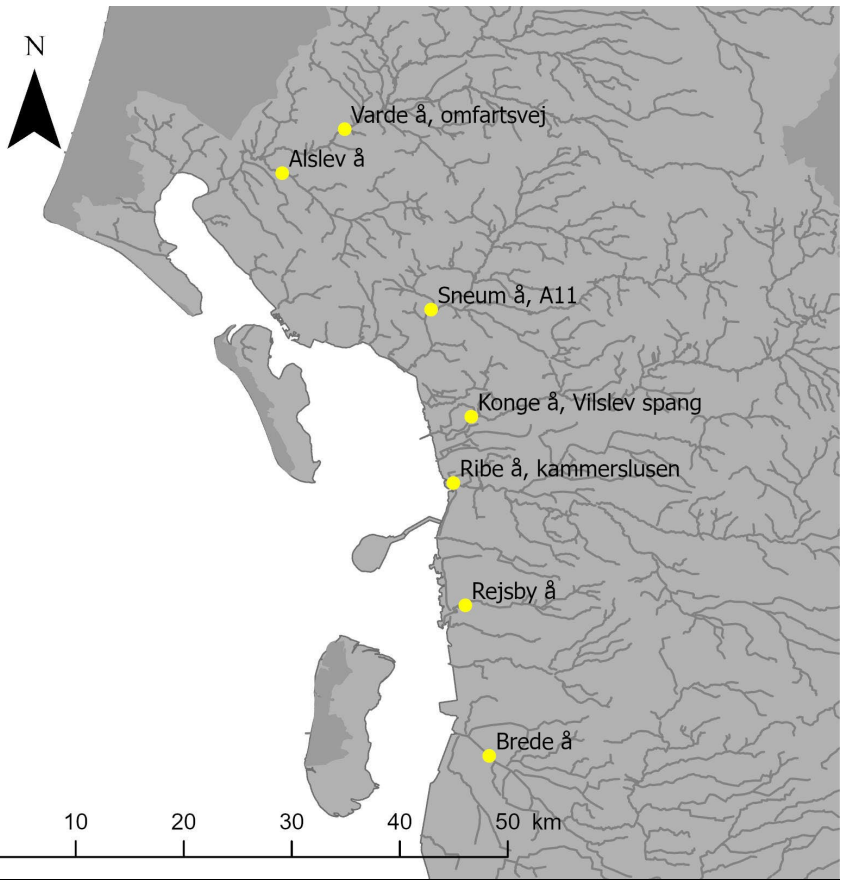
Den adsorberede fosformængde til sand transporteret igennem danske vandløb er analyseret i Andersen og Nilson (2023), som fandt en koncentration på 221 mg P/kg sand. Koncentrationen varierer ikke meget imellem fx forskellige danske georegioner (landskabstyper), derfor anvendes 221 mg P/kg i denne rapport.

Den transporterede mængde fosfor, der er adsorberet til bundtransporteret sand, beregnes ved at gange den transporterede mængde sand med fosforkoncentrationen. Et ton sand svarer således til 1000 kg sand × 221 mg P/kg = 0,221 kg fosfor.

8.1.2 Analyser af kornstørrelser af bundtransporteret sand

Der er i dette projekt indsamlet sandprøver fra bunden af vandløbene, der løber til vadehavet (Figur 8.1). Det lykkedes ikke at indsamle bundtransporteret sand fra Brøns å og Vidåen.

Prøvetagningen er foretaget med en "van Veen Grab" (Udlånt af GEUS v. Verner Ernstsen) ved vejbroer over vandløbene (Van Veen grab, four variants/sizes | Royal Eijkelkamp). Der er indsamlet imellem 256 g og 458 g sand pr. indsamlingssted. Sandprøverne er vådsigtede i et 1-phi interval, -1 til 4 phi svarende til 2 mm til 0,063 mm. Middelkornstørrelsen er beregnet efter Folk & Ward metoden (Folk & Ward, 1957) igennem Gradistat_v8.0 software (http://www.kpal.co.uk/gradistat.html).



Figur 8.1. Steder med prøveindsamling af sand fra vandløbsbund.

Middelkornstørrelserne (og andre kornstørrelses analyseparametre der angiver sorteringsgraden af sedimentet, skævheden af kornstørrelsesfordelingen og kurtosis "toppetheden/spidsheden" af kornstørrelsesfordelingen) for de 6 af de 7 åer ses i Tabel 8.1. Den udtagne prøve fra Kongeåen, ved Vilslev spang (ODA# 36000009) havde en afvigende middelkornstørrelse på 0,74 mm, hvilket er meget grovere end i de øvrige vandløb. På prøvetagningstidspunktet var der stærk turbulens på lokaliteten, og det var kun muligt at udtage prøven i en mindre del af profilet, hvor det ser ud til, at kun forholdsvis groft sand har kunnet aflejres. Det vurderes, at den grove kornstørrelse i prøven ikke er repræsentativ for sandtransporten i Kongeåen.

Tabel 8.1. Kornstørrelsesanalyse parametre for bundsediment prøver indsamlet november 2025. Analyse udført på 1 phi sigtesøjle. Parametre beregnet efter Folk & Ward metode med Gradistat_v8. Lokaliteter ses i Figur 8.1.

Folk & Ward		Varde å	Alslev å	Sneum å	Ribe å	Rejsby å	Brede å
Middelkornstørrelse	mm	0,38	0,30	0,45	0,46	0,37	0,40
Sorteringsgrad		1,7	1,3	1,6	1,6	1,5	1,7
Skævhed		0,39	0,03	-0,12	-0,14	0,29	0,35
Kurtosis		1,06	2,75	0,84	0,88	0,91	1,07

Middelkornstørrelserne ses at ligge i et forholdsvist smalt interval, og kun Alslev å har en lidt mindre middelkornstørrelse end de øvrige vandløb. Alslev å gennemløber et bakkeølandskab (glaciale aflejringer fra forrige istid), hvilket kan forklare de finere sandfraktioner end i de øvrige vandløb, som gennemløber smeltevandssletter. Middelkornstørrelserne ligger generelt inden for et forventet interval. De forholdsvis sammenlignelige kornstørrelser tyder på, at de transporterede sandmængder ikke vil variere betydeligt imellem vandløbene grundet kornstørrelsen af det transporterede sand. Men transporten vil potentielt kunne være relativt større i Alslev å, hvor der er en

mindre kornstørrelse end i fx Sneum- eller Ribe å, og hvor de fundne kornstørrelser ser ud til at være større.

8.1.3 Målt transporteret mængde sand og associeret fosfor

På en række af de store vandløb, der løber til vadehavet, er der anlagt sandfang. Her kan den gennemsnitlige årlige sandtransport sættes lig med den opgravede mængde under forudsætning af, at sandfanget har en effektivitet tæt på 100 %.

For flere af vandløbene findes der opgørelser af de opgravede mængder sand (fx Andersen & Nilson, 2023). Det er således muligt at beregne den sandtransportassocierede fosfortransport til disse sandfang. Disse transporter kan sammenlignes med total-fosfortransporterne for nærliggende vandløbsmålestationer, som overvåges igennem NOVANA-programmet (Tabel 8.2). For NOVANA-data anvendes den gennemsnitlige årlige fosfortransport for perioden 2020-2023. 2024 anvendes ikke, da vandafstrømningen her var rekordhøj og ikke repræsentativ for en længere periode. De anvendte NOVANA-målestationer er for Varde å, #31000027, Kongeåen #36000009, Hjortvad å, #38000023 og Ribe å #38000024.

Tabel 8.2. Transport af sand og fosfor til sandfang og andel af fosfortransport via bundtransporteret sand. Kilder: [1]Flemming Sørensen, Varde kommune (Pers. kom.), [2]Andersen & Nilson (2023) og Ole Pedersen, Esbjerg Kommune (Pers. Kom.).

Sandfang i vandløb	Sand fra sandfang (Ton/år)	P-koncentration (Kg P/ton sand)	Bundtransport P (Kg P/år)	P-transport NOVANA (kg P/år)	% bundtransport af total
Varde å v. Sig	10.500[1]	0,221	2300	36.000	6
Konge å. v. Gredstedbro	5500[2]	0,221	1200	26.000	4
Hjortvad å v. Ribe	1200[2]	0,221	270	6400	4
Ribe å, v. Seem	7000[2]	0,221	1500	28.000	5

Det ses, at fosfortransporten via bundtransporteret sand er opgjort til at udgøre en forholdsvis lav procentdel af total-transporten, fra 4 til 6 %. Der er således ikke noget, der tyder på, at totalfosfortransporten underestimeres meget betydeligt ved ikke at inkludere fosfortransporten via bundtransporteret sand. Biasen ser ud til at være i størrelsesordenen 4-6%. Dette er ved en effektivitet af sandfangene på 100 % (fanger alt sand). Det er tvivlsomt, om det er tilfældet ved alle sandfang, hvorfor fosfortransporten via bundtransporteret sand reelt kan være højere i nogle af vandløbene. Det vurderes dog, at effektiviteten af sandfanget på Hjortvad å, det mindste af de fire vandløb, er tæt på 100 %. Da den bundtransporterede fosfortransport her ikke er højere end for de øvrige vandløb, synes det rimeligt at antage, at den bundtransporterede fosfortransport udgør omkring 4-6 % af totalfosfortransporten.

8.2 Sandtransport til havet

Som nævnt herover er der for mange af vandløbene, der strømmer til Vadehavet, sandfang, der reducerer sandtransporten igennem vandløbssystemerne. Sandfangene nedsætter dog ikke vandløbenes transportkapacitet (den mængde sediment/sand vandløbet kan transportere), så der er stor risiko for, at vandløbet kan erodere i bund og sider nedstrøms sandfang. Derfor kan man ikke antage, at fosfortilførslen til Vadehavet reduceres med den samme mængde, som fjernes ved sandfang. Vandløbene har desuden alle et meget lille fald på den nedre del, hvor de løber igennem flade marsk arealer. Det lave fald nedsætter transportkapaciteten og vil naturligt føre til aflejring af sediment og tilhørende fosfor på de nedre strækninger af vandløbene. De yderste strækninger tættest på Vadehavet har dog meget varierende

faldforhold på grund af den store variation i tidevandet, som varierer 1,5 – 2 m over en tidevandsperiode, hvilket bør forøge transportkapaciteten på disse strækninger. På baggrund af overstående beregninger og betragtninger vurderes det at bundtransporteret fosfor vil forøge totalfosfortransporten mindre end de 4-6% der beregnes på baggrund af transport til sandfang (Tabel 8.2). Et mere sandsynligt interval er 1-4 %, idet en del af det sedimentbunde fosfor forventeligt aflejres på de flade arealer på vej mod havet. Idet der kan/vil forgå erosion af vandløbsbund og sider nedstrøms sandfang vurderes fosfortransporten efter disse at nærme sig de 4-6 % igen over en længere strækning nedstrøms søer og sandfang men det vurderes at de 4-6 % ikke vil kunne opnås når strækningen imellem sø/sandfang og havet er forholdsvis kort, som det er tilfældet for en række vandløb med udløb i vadehavet.

Alle vandløb, på nær Varde å, gennemløber sluser ved udmundingen i Vadehavet, som forhindrer, at der transporteres vand og sediment ind i vandløbene fra Vadehavet.

8.2.1 Grådyb

Varde Å og Sneum Å

Der er ikke sandfang eller søer på de nedre dele af vandløbene. Derfor vurderes det, at fosfortransporten via bundtransporteret sand forøger den opgjorte fosfortransport 1-4 %.

8.2.2 Knudedyb

Kongeåen og Ribe å

Der er et sandfang på Kongeåen (Andersen og Nilson, 2023), som sandsynligvis er med til at nedsætte transporten til havet, lige som der jævnligt graves sand op af åen kort før udløbet i Knudedybs tidevandsområde (Pers.Komm. Ole Pedersen Esbjerg kommune). Det vurderes derfor, at fosfortilførslen underestimeres mindre end de 1-4 %, som vurderes for andre vandløb.

Der er sandfang på Ribe å (Andersen og Nilson, 2023) et stykke opstrøms for Ribe. Opstrøms opstemningen af åen i Ribe findes et større vådområde eller indlandsdelta, som også vil tilbageholde det meste af den tilførte sandmængde. Det vurderes, at Sandtransporten igennem opstemningerne i Ribe er beskeden, og at tilførslen til Knudedybs tidevandsområde derfor er reduceret. Det vurderes derfor, at fosfortilførslen underestimeres mindre end de 1-4 %, som vurderes for andre vandløb.

8.2.3 Juvredyb

Rejsby å og Brøns å

I Rejsby å findes der ikke sandfang på den nedre del af åen der vil kunne reducere sand- og fosfortransporten til vadehavet (der findes et på den midterste del, Pers. Kom. Niklas Bangsbo, Tønder kommune). Derfor vurderes det, at fosfortransporten via bundtransporteret sand forøger den opgjorte fosfortransport 1-4 %.

Ved Brøns å var der ikke sandbund de to steder (Ved slusen og ved hovedvej A11) prøvetagning blev forsøgt, men det vurderes, at der forgår

sandtransport i vandløbet. I Brøns å findes der ikke sandfang på den nedre del af åen som vil kunne reducere sand- og fosfortransporten til vadehavet (findes et på den midterste del, Pers. Kom. Niklas Bangsbo, Tønder kommune). Derfor vurderes det, at fosfortransporten via bundtransporteret sand forøger den opgjorte fosfortransport 1-4 %.

8.2.4 Listerdyb

Brede å og Vidåen

I Brede å findes der et sandfang på den nedre del af åen (Pers. Kom. Niklas Bangsbo, Tønder kommune), der vil kunne reducere sand- og fosfortransporten til vadehavet. Det vurderes derfor at fosfortilførslen underestimeres mindre end de 1-4 %, som vurderes for vandløb uden sandfang eller søer.

I Vidå-systemet gennemløber åen på det nedre stykke flere sø-lignende strækninger syd for Tønder og Rudbøl sø. Disse strækninger vil fungere som sandfang. Fra den tyske del af oplandet pumpes hovedparten af vandet til Rudbøl sø. Det må formodes, at der ikke passerer sand igennem pumpestationen. På den sidste stækning fra Rudbøl sø til udløbet, løber åen som en inddiget kanal hvor der ikke vil være mulighed for megen erosion. Tønder kommune vurderer, at det er en rimelig antagelse, at der kun er meget beskeden sandvanding i åen nedstrøms Rudbøl sø (Pers. Kom. Jørgen Nicolaisen). I dette projekt er det endvidere forsøgt at indsamle sand fra bunden af åen ved Højer og ved Nørremølle bro, begge steder uden at kunne finde sandbund. Det virker således rimeligt at antage, at tilførslen af fosfor via sandtransport til Listerdyb fra Vidåen er meget beskeden.

8.2.5 Samlet vurdering

For vandløbene der løber til Grådyb og Juvredyb er sand- og derved fosfortransporten via sandtransport, kun i mindre omfang begrænset af sandfang og sø-lignende strækninger på vandløbene. Derfor vurderes det, at fosfortransporten via bundtransporteret sand vil forøge den hidtil opgjorte fosfortransport med 1-4 %.

Der findes sandfang og sø-lignende strækninger på de nedre dele af de store vandløb, der løber til Knudedyb og Listerdyb. Disse reducerer sandtransporten til vadehavet og derved fosfortilførslen til et lavere niveau end for Grådyb og Juvre dyb. Det vurderes derfor at fosfortilførslen underestimeres mindre end de 1-4 % som vurderes tilførslerne til Grådyb og Juvredyb.

9 Referencer

Andersen, H.E. & Nilsson, I-E.F. 2023. Fosforeffekt af vandløbsvirkemidler. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 108 s. - Teknisk rapport nr. 272

Bartholdy J., Hasholt B., Pejrup M. 1991. Sediment transport in the drainage area of Ribe Å. Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography, 91 (1), pp. 10. DOI: 10.1080/00167223.1991.10649302

DHI, 2024. Second opinion fase III: Styrket modelgrundlag - Styrket modelgrundlag, scenarier og fortolkninger Arbejdspakke 4. Teknisk Rapport. https://mst.dk/media/n0tj31a5/bilag-11-styrket-modelgrundlag-scenarier-og-fortolkninger.pdf

Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sediment. Petrol., 27: 3-26

Frank-Gopolos, T., Christensen, A. E., Skovmark, B. 2024. Styrelen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø, (SGAV) - Punktkilder 2023, Novana – punktkilder 978-87-7038-686-9.pdf

Larsen, S.E., Tornbjerg, H., Thodsen, H., Kronvang, B. & Blicher-Mathiesen, G. 2021. Analyse af organisk kvælstof koncentrationer i vandløb i to perioder med henblik på at udvikle en korrektionsformel for perioden 2009-2014. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 115 s. – Fagligt notat nr. 2021|29 https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2021/N2021_29.pdf

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Larsen, S.E., Conradsen, A.R., Muff, E. & Blicher-Mathiesen, G. 2024. Vand- & Stoftransport 2023. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 71 s. - Videnskabelig rapport nr. 629. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige_rapporter_600-699/SR629.pdf

Thodsen H., Erfurt J., Tornbjerg H., Larsen SE., Rosenkrantz Conradsen A. 2024. Beskrivelse af stoftransportberegning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Fagligt notat nr. 77 2024. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2024/N2024_77.pdf

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Larsen, S.E., Conradsen, A.R., Muff, E. Blicher-Mathiesen, G., Ovesen, N.B., Troldborg, L. 2025. Vand- og Næringsstoftransport 2024. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 102 s. - Videnskabelig rapport nr. 681

ANALYSER AF VANDAFSTRØMNING OG NÆRINGSSTOFTILFØRSEL TIL VADEHAVET

Rapport til kystvandråd Vadehavet

Rapporten giver overblik over vand- og næringsstoftilførsler til Vadehavet og de fire tidevandsområder hver for sig. Der præsenteres også kildeopsplitninger og andele af hhv. uorganisk kvælstof og fosfor. Der er ligeledes en analyse af betydningen af fosfor-vandløbs-transporten via bundtransporteret sand.

ISBN: 978-87-7648-022-6
ISSN: 2244-999X