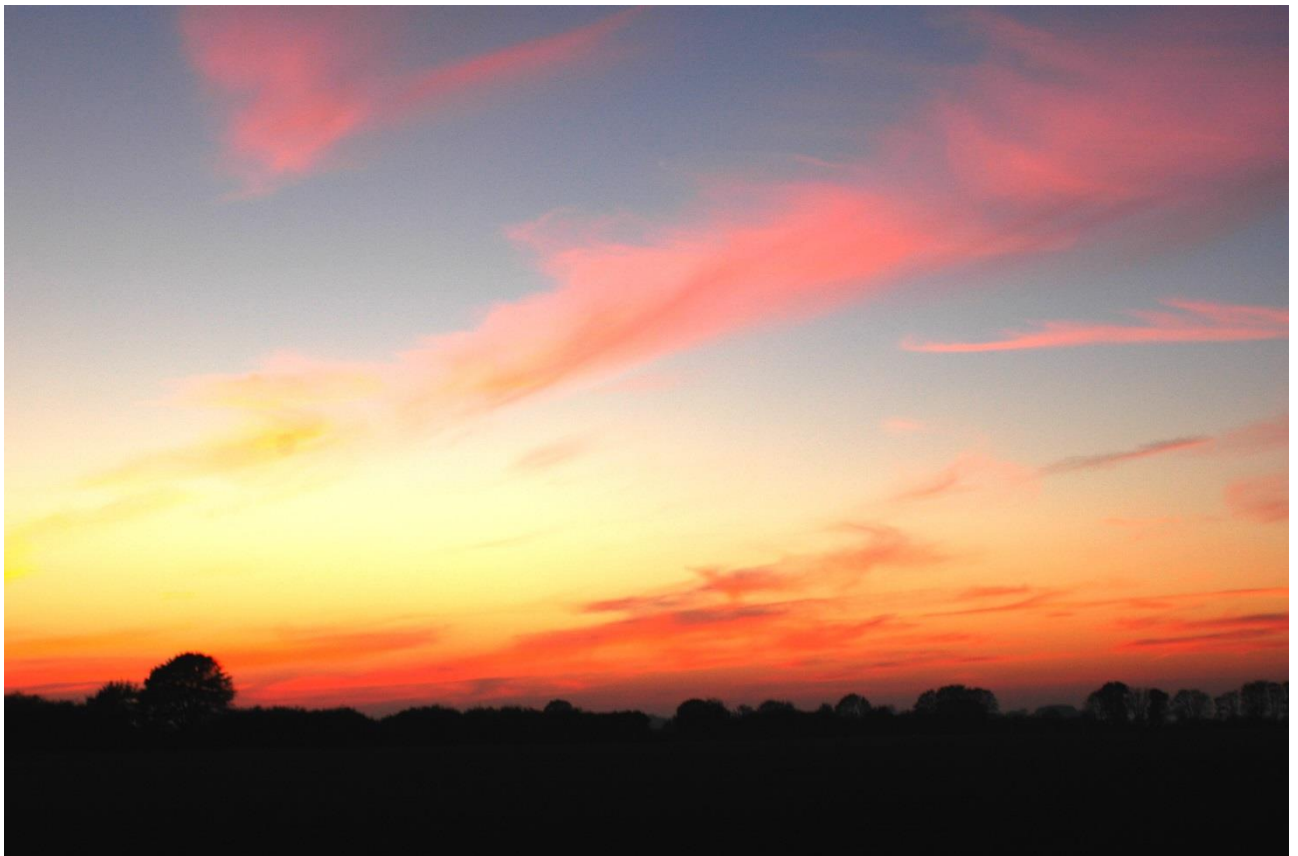


Itning af bundvand i Mariager Fjord

Estimering af N-fjernelse og P-immobilisering



Denne rapport er udarbejdet under DHI's ledelsessystem, som er certificeret af Bureau Veritas for overensstemmelse med ISO 9001 for kvalitetsledelse

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Itning af bundvand i Mariager Fjord

Estimering af N-fjernelse og P-immobilisering

Udarbejdet for

SEGES

Repræsenteret ved

Flemming Gertz, landskonsulent

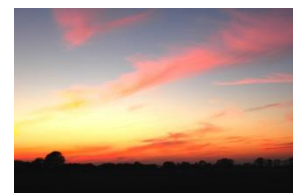


Foto: Sverre M. Mortensen

Projektleder	Erik Kock Rasmussen
Kvalitetsansvarlig	Ian Sehested Hansen
Projektnummer	11816773
Godkendelsesdato	3. november 2015
Revision	0
Klassifikation	Begrænset



INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Resumé	1
2	Baggrund	1
3	Mariager Fjord og Vanderammedirektivet	3
4	Forholdene i "Dybet" af Mariager fjord	4
5	Tilførslen af C, N og P til dybet	7
5.1	Tilførslen af C, N og P til "Dybet" beregnet ud fra H ₂ S produktionen	7
5.2	Mineraliseret N og P og modelberegnedede bruttotransporter	10
6	Potentiel N fjernelse ved iltning af bundlaget	13
7	Immobilisering af P ved iltning af bundlaget	15
8	Hvor meget ilt skal der tilføres bundlaget?	17
9	Datagrundlag	17
10	Referencer	18

FIGURER

Figur 2-1	Mariager fjord med angivelse af det dybe hul ud for Mariager. Fra (Århus & Nordjyllands Amter 2005).	2
Figur 2-2	Længdeprofil af Mariager Fjord med angivelse af typiske saliniteter. Fra (Christiansen C. 1997).	2
Figur 2-3	Tidslig udvikling af iltmætning over dybden på den dybe station 5503 Dybet fra 1994-1998. Saltvandsindbrud i 1995, vinter 1996-97 samt iltsvind i sommeren 1997. Fra (Århus & Nordjyllands Amter 1998).	2
Figur 4-1	Isopleth diagram af saliniteten i "Dybet" i Mariager Inderfjord 1994-1997. Fra (Århus & Nordjyllands Amter 1998).	4
Figur 4-2	Cirkulation i overfladen af Mariager inderfjord, samt tipning af springlag i en vestenvindssituation, (Århus & Nordjyllands Amter 1998).....	5
Figur 4-3	Iltprofil den 29.09.1997 efter længere tids vestenvind. Skillefladen trækkes opad mod læsiden af fjorden. (Notat Århus & Nordjyllands Amter 1997)	6
Figur 4-4	Mariager Inderfjord. Sedimenttyper samt placering af muslingebanker. Fra (Larsen B. 1999).	6
Figur 4-5	Transport af sediment inklusive organisk materiale til den dybe del af Mariager Fjord. Fnug: dødt planteplankton Pellets: resuspenderede rester af fækalie-piller fra muslingernes græsning af suspenderet materiale. Fra (Larsen B. 1999).	7
Figur 5-1	Mængden af sulfid under haloklinen "Dybet" Mariager inderfjord. Fra (Fossing 1999)	8
Figur 5-2	Vandets temperatur hhv. i dybderne 3 m, 12 m samt i 30 m ("Dybet"). Sedimenternes sulfidproduktion i hhv. 3 m, 12 m og 20 m ("30 m stationen (Dybet)"). Fra (Fossing 1999).	8

Figur 5-3	TN- og TP-indholdet i de nedre lag af Inderfjorden i Mariager Fjord, (Århus og Nordjyllands Amter 2001).	12
Figur 6-1	Denitrifikation i forskellige danske fjorde. Fra (Christensen Bondo <i>et al.</i> 2002).....	14
Figur 6-2	Øverst: Koncentrationer af NO ₃ samt denitrifikation i sedimentet af NO ₃ fra vandet (Dw) på 2 stationer i Randers Fjord. Nederst: samlede denitrifikation i sedimentet (Dw+Dn=D total) på samme stationer, samt flukse af NO ₃ og NH ₄ . Fra (Århus & Nordjyllands Amter 2005).....	14
Figur 7-1	C:P-org-forhold i forskellige overfladesedimenter (0-2 cm) i Østersøen. (o) sedimenter med iltet vand over sig. (□) sedimenter med mindre end 2 ml l ⁻¹ ilt i det overliggende vand. Fra (Jilbert <i>et al.</i> 2011).....	16

TABELLER

Tabel 3-1	Nuværende N-belastning til Mariager Fjord samt foreslåede N reduktioner i medfør af Vandrammedirektivet. Erichsen <i>et al.</i> 2015.	3
Tabel 5-1	Beregnet mængde organisk stof i form af C, N og P, der er mineraliseret i "Dybet" i 1998 og 1999 på grundlag af nettotilvæksten af H ₂ S i sommerperioderne af 1998 og 1999*. Produceret H ₂ S, hvis alt organisk C var mineraliseret ved sulfatånding.	10
Tabel 7-1	C:P _{-Ca+org} for overfladesedimenter (0-2 cm) i Mariager Fjord.	16

1 Resumé

SEGES har bedt DHI om en vurdering af, hvor meget kvælstof der kan fjernes ved denitrifikation, hvis bundvandet i Inderfjorden af Mariager Fjord iltes. Samtidig ønsker SEGES at få et bud på effekterne for frigivelse af fosfor.

Følgende konklusioner kan fremføres:

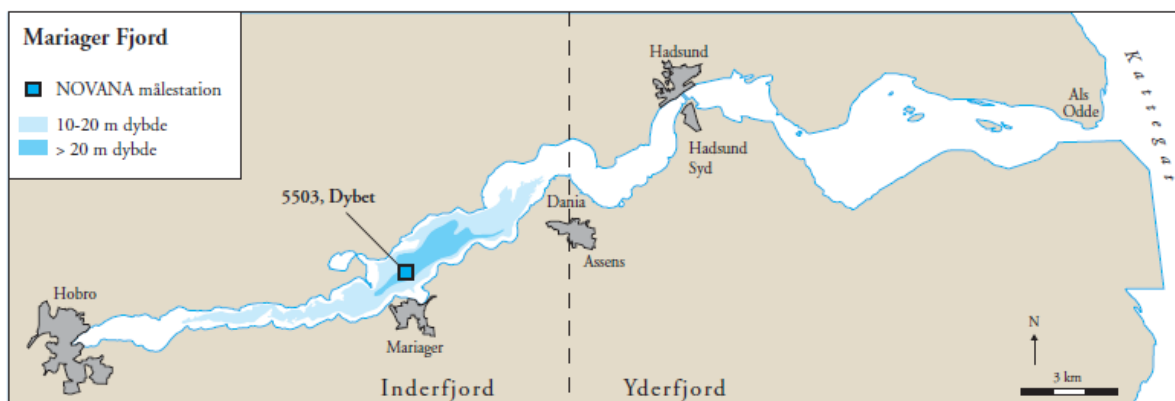
- Det estimeres, at der mineraliseres ca. 750 ton C, 110 ton N og 15 ton P pr. år i bundlaget af Inderfjorden ("Dybet").
- Iltning af bundlaget til et niveau, hvor der kan etablere sig en bundfauna på mindst 4 mg ilt l⁻¹, kræver ca. 2000 ton ilt pr. år. Fratrækkes den nuværende naturlige tilførsel af ilt over saltskillefladen samt ved saltvandsindbrud, kræves en årlig tilførsel på ca. 1500 ton ilt.
- Ved iltning forventes koncentrationen af nitrat i bundvandet at være højt nok til, at der i sedimentet vil kunne foregå en denitrifikation på størrelse med den, der er målt i Randers Fjord, 15-21 g N m⁻² år⁻¹.
- Der kan potentielt fjernes 84-117 ton N pr. år gennem denitrifikation ved iltning af bundvandet. Herfra skal fratrækkes en eksisterende denitrifikation over saltskillefladen samt ved saltvandsindbrud, således at der netto fjernes mellem 45-78 ton N pr. år mere med iltning end uden iltning af bundvandet.
- Iltning af bundvandet vil kunne opfylde mellem 16% og 27% af reduktionskravet for N på 192 ton N pr. år til Inderfjorden.
- Iltning af bundvandet vil kunne binde 16-17 ton P til oxideret jern som en engangs hændelse. Det er muligt at der årligt kan immobiliseres en ukendt mængde P i sedimentet, men vidensgrundlaget er ikke tilstrækkeligt til en kvantificering.

Det skal bemærkes, at datagrundlaget, hvorpå beregningerne er foretaget, er 10-15 år gammelt, Der foreligger ikke analyser af indsamlet data efter amternes ophør. Der tages derfor forbehold for, om der er sket ændringer i fjordens stofomsætning, der har bevirket, at det beregnede iltningbehov og kvælstoffjernelsen har ændret sig.

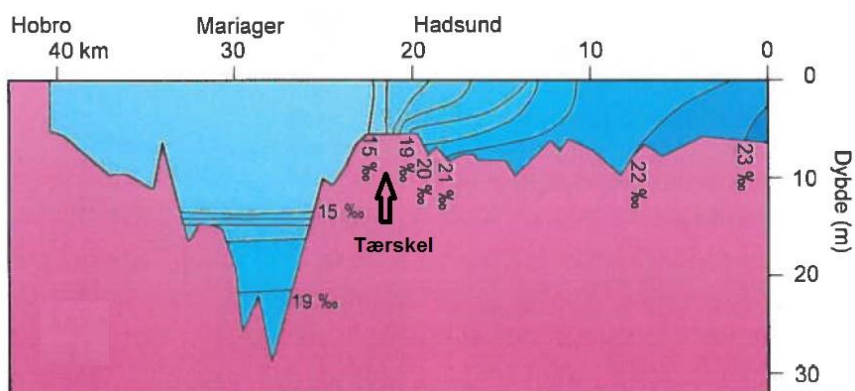
2 Baggrund

I forbindelse med udarbejdelse af anden runde af Vandrammedirektivet foreligger der fra Naturstyrelsen forslag til krav om reduktioner af kvælstofbelastningen i de danske kystvande. I den forbindelse har SEGES bedt DHI om at udarbejde et notat omkring effekterne ved iltning af bundvandet i den dybeste del af Mariager Fjord. Mere specifikt ønskes et estimat af, hvor meget kvælstof der potentielt kan fjernes, samt hvor meget fosfor der kan immobiliseres.

Mariager Fjord er en tærskelfjord, hvor tærsklen ca. midt i fjorden, lidt vest for Dania, adskiller den lavvandede ydre del fra den dybe indre del af fjorden. I den inderste del af fjorden er der efter tærsklen og ud fra Mariager by et 30 m dybt hul, som under 12,5 m kurven dækker ca. 5,6 km². Der forekommer indbrud af iltrigt, saltholdigt vand fra Kattegat hvert 2. og 4. år. Det tungere saltvand lægger sig i bunden af dette hul og skaber en lagdeling i ca. 12-15 m dybde, se Figur 2-1 og Figur 2-2. Bundvandet i dette hul bliver i løbet af nogle måneder iltfrit og der ophobes høje koncentrationer af sulfid, ammoniak og fosfat i bundvandet, se Figur 2-3.

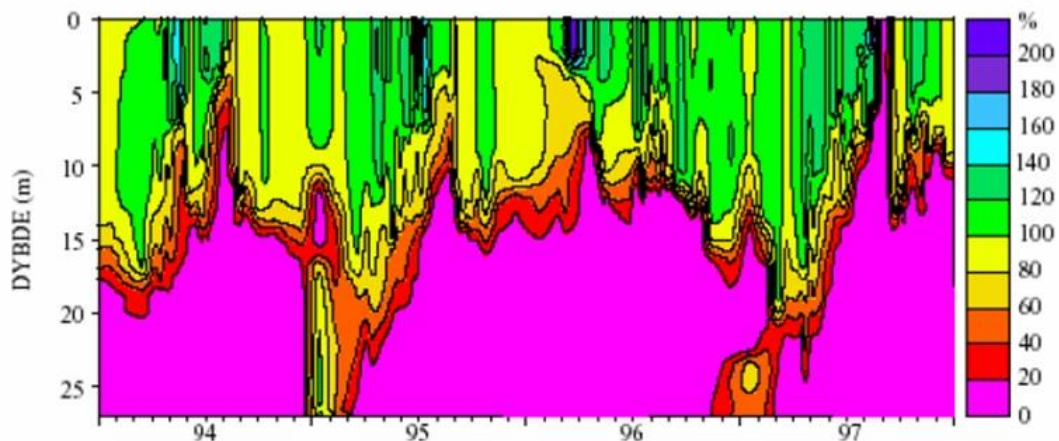


Figur 2-1 Mariager fjord med angivelse af det dybe hul ud for Mariager. Fra (Århus & Nordjyllands Amter 2005).



Figur 2-2 Længdeprofil af Mariager Fjord med angivelse af typiske saliniteter. Fra (Christiansen C. 1997).

Puljen af biotilgængeligt N og P i bundlaget opblandes med tiden med overfladelaget eller løftes op i det øvre lag næste gang, der forekommer et saltvandsindbrud. Mariager Fjord er stærkt eutrofieret med en meget høj primærproduktion på ca. $800 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$. Tanken om at reducere den lejlighedsvis tilførsel af biogent N og P fra bundlaget til overfladelaget ved iltning af bundlaget er opstået i forbindelse med de vedtagne målkrav om reduktion af N-belastningen til Inderfjorden.



Figur 2-3 Tidlig udvikling af iltmætning over dybden på den dybe station 5503 Dybet fra 1994-1998. Saltvandsindbrud i 1995, vinter 1996-97 samt iltvind i sommeren 1997. Fra (Århus & Nordjyllands Amter 1998).

Hvis bundvandet iltes, så sulfiden fjernes, kan der fjernes kvælstof ved at ammoniakken oxiderer til nitrat, som derefter kan denitrificeres til frit kvælstof i sedimentet. Parallelt hermed bindes noget fosfat til oxiderede jernforbindelser i det øverste lag (0-2 cm) af sedimentet. Potentialitet for fjernelse af kvælstof vil være afhængigt af, hvor meget organisk bundet kvælstof, der årligt tilføres bundvandet via sedimentation af dødt planteplankton og lejlighedsvis vindgenererede bundtransporter af organisk materiale fra bundarealerne over 12-15 m dybde.

Det skal understreges, at den foreslåede iltning af bundvandet ikke i sig selv kan forhindre fremtidige iltsvind af overfladevandet i fjorden. En iltning kan ved at reducere tilgængeligheden af N indirekte være et bidrag til at reducere muligheden for, at der opstår iltsvind i overfladevandet.

Estimer for N-fjernelsen, som præsenteres i denne rapport, er tidligere blevet præsenteret ved et foredrag af Erik K. Rasmussen (DHI) på temadagen "Mariager Fjord" den 7. maj 2015, afholdt af Mariager Fjord Kommune.

3 Mariager Fjord og Vanderammedirektivet

Den nuværende (år 2007-2011) årlige belastning af N til Mariager Fjord er på 888 ton N år⁻¹ fordelt med 480 ton N år⁻¹ til Inderfjorden og 408 ton N år⁻¹ til den yderste del af fjorden. I Vandområdeplanerne foreslås et reduktionskrav for belastningen af N på 513 ton N år⁻¹ for hele fjorden, hvoraf Inderfjorden skal reducere med 288 ton N år⁻¹, se Tabel 3-1.

Kravene til reduktionerne af N belastningerne er opdelt i et krav til den indre del og ydre del af fjorden, som skal opfyldes selvstændigt. Arealbelastningen fra oplandet til den indre del af fjorden er i dag 18 kg N ha⁻¹ år⁻¹ og skal reduceres til 7 kg N ha⁻¹ år⁻¹.

En stor del af N-belastningen til Mariager Fjord tilføres via markafstrømning og med grundvandet. Samtidig er mulighederne for at etablere vådområder, der kan opfangne og reducere N belastningen, begrænsede. Hertil skal føjes, at tiltag, der reducerer N-nedsivningen til grundvandet, først vil vise sig som en reduktion i belastningen til fjorden efter årtier. Dette er en af grundene til, at det overvejes at tage alternative virkemidler i brug for at fjerne N, herunder at ilte bundvandet i "Dybet" af Mariager Fjord.

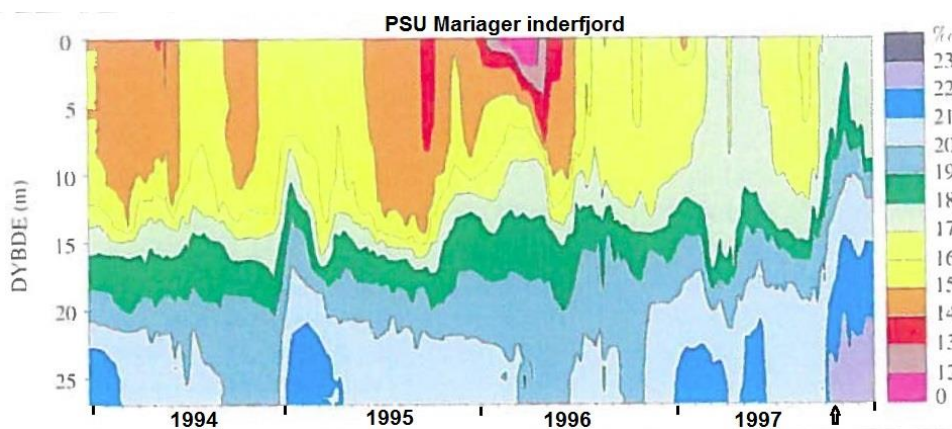
Tabel 3-1 Nuværende N-belastning til Mariager Fjord samt foreslåede N reduktioner i medfør af Vandrammedirektivet. Erichsen *et al.* 2015.

Nuværende N-belastning for hele Mariager Fjord Ton N år ⁻¹	Nuværende N-belastning for Mariager Fjords indre del Ton N år ⁻¹	Belastningsreduktion for hele Mariager fjord Ton N år ⁻¹	Belastningsreduktion for Mariager Fjords indre del Ton N år ⁻¹
888	480	513	288

Fosforbelastningen til hele fjorden er over perioden år 2000-2004 opgjort til 25 ton år⁻¹ (Århus & Nordjyllands Amter 2005). Planlagt afledning af spildevand til Kattegat samt implementeret forbedret rensning forventes at reducere P-belastningen yderligere. De foreliggende reduktionskrav omfatter ikke krav til reduktion af P-belastningen.

4 Forholdene i "Dybet" af Mariager fjord

Den indre del af fjorden, der ligger vest for Dania, har et areal på 19,4 km² samt et volumen på 200 *10⁶ m³. Vandmassen i "Dybet" er permanent lagdelt med et bundlag af mere saltholdigt vand end overfladelaget. Skillefladen (haloklinen) ligger typisk i 12-15 m dybde, men kan ligge lidt højere eller dybere. Det er tidligere omtalt, at der med års mellemrum forekommer indbrud af saltere vand fra Kattegat. Saltvandsindbruddene sker typisk i vintermånederne under vestenvindsstorme, hvor der trænger en saltvandskile fra Kattegat ind langs bunden af yderfjorden, samtidigt med at der sker en udstrømning af mindre salt overfladevand fra fjorden til Kattegat. Under denne tolagsstrømning sker der en opblanding mellem de to lag, som medfører, at saliniteten i bundlaget i yderfjorden reduceres en smule indad mod inderfjorden. Hvis indtrængningen af saltkilen har en tilstrækkelig styrke, kan den trænge over tærsklen ved Dania og vil lægge sig i bunden af "Dybet". I (Århus & Nordjyllands Amter 1998) angives, at der kan forekomme saltvandsindbrud ved længerevarende hårde (11-14 m s⁻¹) vestlige vinde.



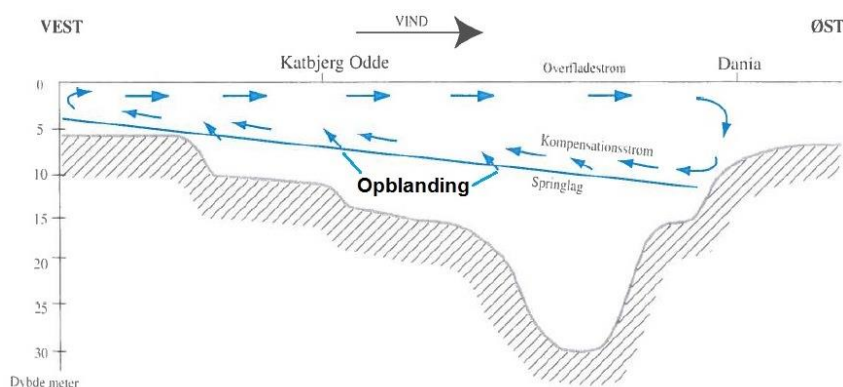
Figur 4-1 Isopleth diagram af saliniteten i "Dybet" i Mariager Inderfjord 1994-1997. Fra (Århus & Nordjyllands Amter 1998).

Ud fra monitoringsdata af salt, temperatur og iltprofiler i samme reference kan man se, at der har været større eller mindre saltindbrud i 1982, 1986, 1987, 1989, 1992, 1993, 1995, 1996, 1997, se Figur 2-3 og Figur 4-1.

I (Jensen *et al.* 2009) nævnes, at der har været indbrud af iltrigt vand til "Dybet" i 2001, 2004 og 2005. I perioden fra 1979 til 1997 forekom de store indbrud af saltvand i årene 1986, 1989 og 1997.

Mindre indbrud kan forekomme med lavere saliniteter end dem, som findes i bunden af "Dybet". I disse tilfælde indlejrer det indtrængende saltvand sig i et lag i "Dybet", der har samme salinitet som det indtrængende vand. (Zopfi *et al.* 2001) konstaterede, at der i deres intensive måleprogram i september 1996 forekom mindre indbrud, som blev opblandet med overfladelaget i løbet af et par dage.

Specielt kraftig vestenvind kan medføre en højere vandstand ved Dania samtidigt med, at der er en lavere vandstand ved Hobro. I overfladelaget medfører det en vestlig strøm i overfladen, som modsvares af en modsatrettet kompensationsstrøm i bunden af overfladelaget over springlaget, se Figur 4-2. I bundlaget vil det være omvendt; der vil være en svag strøm mod vest i overfladen af bundlaget samt en østlig kompensationsstrøm i bunden af bundlaget. Vandstandsforskellen mellem den vestlige del og den østlige del af Inderfjorden medfører en tipping af springlaget, således at det kommer til at ligge højere i den vestlige del og lavere i den østlige del af fjorden. Vandstandsforskellen mellem øst og vest forstærkes i det nederste lag med op til 100 gange i forhold til vandstandsforskellen i overfladen. Det betyder, at nogle få centimeters vandstands forskel i overfladen kan medføre en tipping af springlaget på op til 1-2 m.



Figur 4-2 Cirkulation i overfladen af Mariager inderfjord, samt tipping af springlag i en vestenvindssituation, (Århus & Nordjyllands Amter 1998).

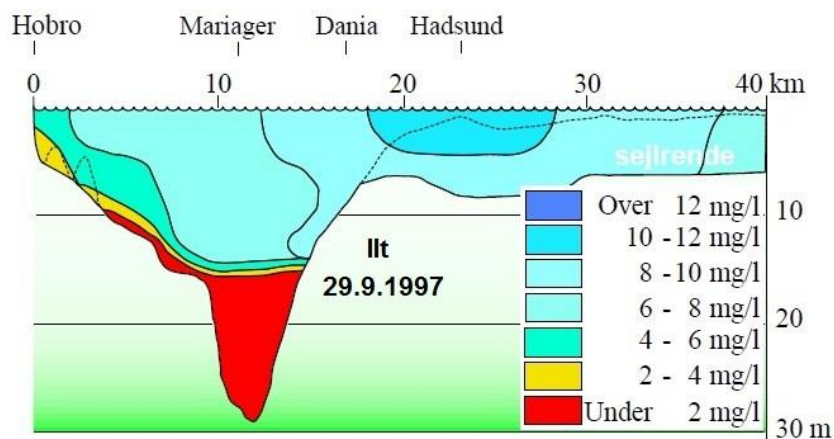
Når vinden aftager eller skifter retning, vil springlagstipningen ophøre, hvorved der skabes nogle kortvarige strømninger af vand i springlagets dybde, som kan være kraftige. Ud over strømningerne forekommer der interne bølger i springlaget, som brydes. I sådanne situationer kan overfladesediment blive resuspenderet og vil typisk blive ført ud på dybere vand som en bundtransport af suspenderet materiale. Sedimentfælder udhængt på en station midt i dybet vil kun i mindre grad opfange disse bundtransporter.

Et eksempel på en vestenvindsgenereret tipping af springlaget er illustreret ved et tværsnitsprofil af ilt i Inderfjorden den 29.09.1997 se Figur 4-3. Efter det totale iltsvind i vandsøjlen i august og starten af september 1997, se Figur 2-3, blæste det kraftigt fra 19.09.1997, hvilket bevirkede, at der skete en geniltning af overfladevandet samtidigt med, at iltfrit bundvand blev trukket op på det lavere vand ved Hobro. Umiddelbart efter den 29.09.1997 skete der et indbrud af iltigt saltvand til "Dybet", se Figur 4-1, iltten blev dog hurtigt opbrugt, så den ses ikke ved næste profilmåling af ilt, se Figur 2-3. Hvis springlagstipningen er så kraftig, at bundvandet kommer op til overfladen, er der tale om en "upwelling" eller "bundvending".

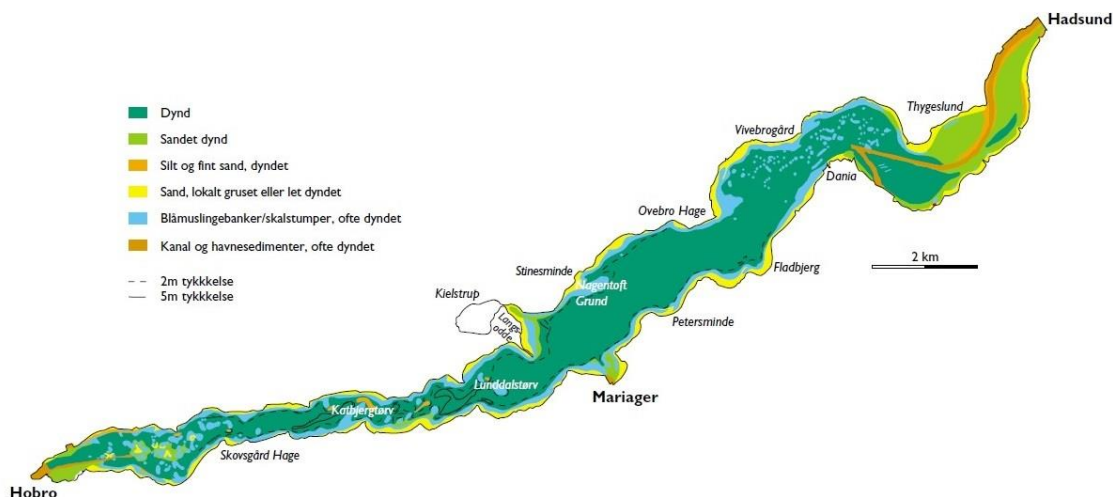
Figur 4-2 og Figur 4-3 illustrerer hvordan der kan ske en vindgenereret opblanding mellem overflade- og bundlaget, samt at springlaget ikke er stationært men kan tippe alt efter vindforholdene.

Inderfjorden har en stor naturlig bestand af blåmuslinger, som sidder på skråningerne ud til det dybere vand, se Figur 4-4. Potentielt kan den bestand filtrere hele vandsøjlen på ca. et døgn. Det kræver dog, at der er god vertikal omrøring. (Falleen *et al.* 2000) har ud fra muslingernes vækst anslået, at 20-25% af primærproduktionen på $800 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ filtreres af muslingerne. (Larsen B. 1999) angiver, at muslingerne filtrerer 25-50% af primærproduktionen, men dokumenterer dog ikke, hvorfra disse tal kommer, se Figur 4-5.

Sedimentationen af organisk materiale til "Dybet" er målt med sedimentfælder - dels i 1993 (Århus & Nordjyllands Amter 1997) og dels i 1998-99 (Olesen M. 2001). I den første undersøgelse estimeredes ca. 2% (ca. $16 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$) af primærproduktionen at sedimentere til "Dybet". I den senere undersøgelse estimeredes sedimentationen til "Dybet" at være ca. $50 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$, (svarende til 16% af primærproduktionen).



Figur 4-3 Iltprofil den 29.09.1997 efter længere tids vestenvind. Skillefladen trækkes opad mod læsiden af fjorden. (Notat Århus & Nordjyllands Amter 1997)



Figur 4-4 Mariager Inderfjord. Sedimenttyper samt placering af muslingebanker. Fra (Larsen B. 1999).

Man må blot konstatere, at en meget betydelig del af primærproduktionen græsses af blåmuslinger (20-25%) samt, at kun en mindre del (16%) af primærproduktionen sedimenterer til "Dybet" som dødt organisk materiale fra de frie vandmasser.

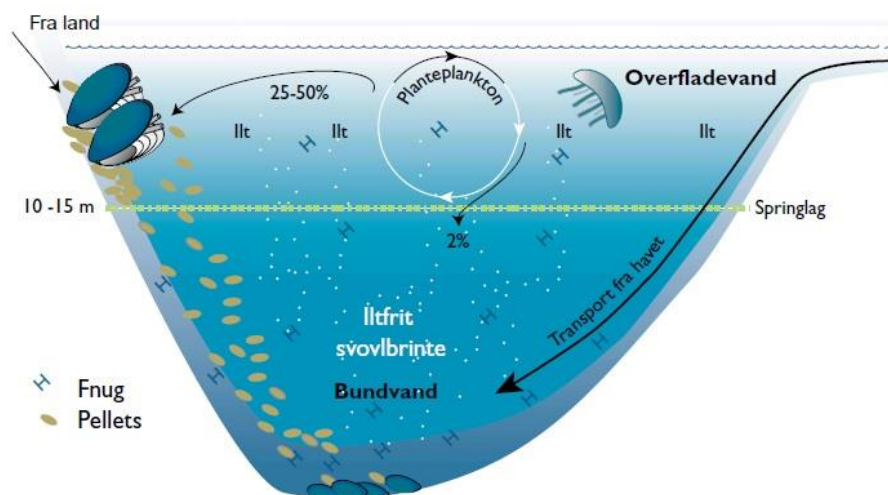
Ud fra en sedimentkerne udtaget i 1991 på 22 m vand i "Dybet" samt en Pb²¹⁰ datering er det anslået, at der netto akkumuleres ca. 300 g tørstof m⁻² år⁻¹, hvilket med et glødetab på 40% ca. svarer til, at der netto akkumuleres ca. 50 g C m⁻² år⁻¹ på den pågældende lokalitet.

Forudsættes stationen på 22 m at være repræsentativ for hele sedimentfladen i "Dybet", må man konstatere, at den mængde organisk materiale, som fra de frie vandmasser sedimenterer til "Dybet", svarer til en mængde, som netto akkumuleres i sedimentet.

Der må således være en betydelig mængde af organisk C, N og P, der tilføres "Dybet" på anden vis end ved sedimentation fra de frie vandmasser, ellers vil der ikke kunne ophobes en anselig koncentration af H₂S, NH₄ og PO₄ i "Dybet".

Det er nærliggende at antage, at en ikke uanselig mængde organisk materiale stammer fra områder med muslingebanker, samt at det sandsynligvis tilføres "Dybet" via en bundtransport. Bølger kan resuspendere muslingernes fækaler fra 0 til maksimum 5 m; i dybereliggende områder skal resuspensionen ske ved strømninger genereret fra f.eks. springlagstipninger samt strømme genereret af vinden, se Figur 4-2 samt Figur 4-5.

Der er ikke foretaget nogen direkte måling eller egentlig kvantificering af denne transport.



Figur 4-5 Transport af sediment inklusive organisk materiale til den dybe del af Mariager Fjord. Fug: dødt planteplankton Pellets: resuspenderede rester af fækalie-piller fra muslingernes græsning af suspenderet materiale. Fra (Larsen B. 1999).

Spørgsmålet om, hvor meget C, N og P der tilføres "Dybet", er relevant i sammenhæng med en fjernelse af specielt N fra Inderfjorden ved iltning af bundvandet. Det er nødvendigt at vide, hvor meget C der tilføres bundvandet for at kunne give et estimat af, hvor meget ilt der løbende skal tilføres for at opnå den ønskede effekt. Det er ligeledes nødvendigt at kende de mængder af N og P, der tilføres bundvandet for at få et estimat af, hvor meget N der kan fjernes ved den koblede nitrifikation-denitrifikation, samt for P's vedkommende for at få en idé om potentialet for en P-immobilisering.

Tilbage står, at man må beregne eller estimere denne tilførsel af organisk materiale på en indirekte måde.

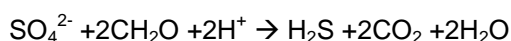
5 Tilførslen af C, N og P til dybet

I det følgende foretages et estimat af tilførslen af C, N og P til dybet med baggrund i dels en undersøgelse af H₂S produktionen i inderfjordens bundvand (Fossing & Christensen 1998; Fossing 1999), samt dels ud fra nogle massebetragtninger over N i Mariager Fjord (Århus & Nordjyllands Amter 1998; Århus & Nordjyllands Amter 2001).

5.1 Tilførslen af C, N og P til "Dybet" beregnet ud fra H₂S produktionen

På grund af de iltfrie forhold vil den bakterielle nedbrydning af organisk materiale gå fra at bruge ilt at bruge sulfat som elektronacceptor, dvs. der sker et skift fra iltånding til sulfatånding. I tilfælde af, at sulfatet i havvandet udtømmes, foregår nedbrydningen ved forgæring, der producerer metan.

Ved sulfatåndingen mineraliseres organisk C med sulfat, hvorved der produceres H₂S og CO₂, (Fossing *et al.* 2002):

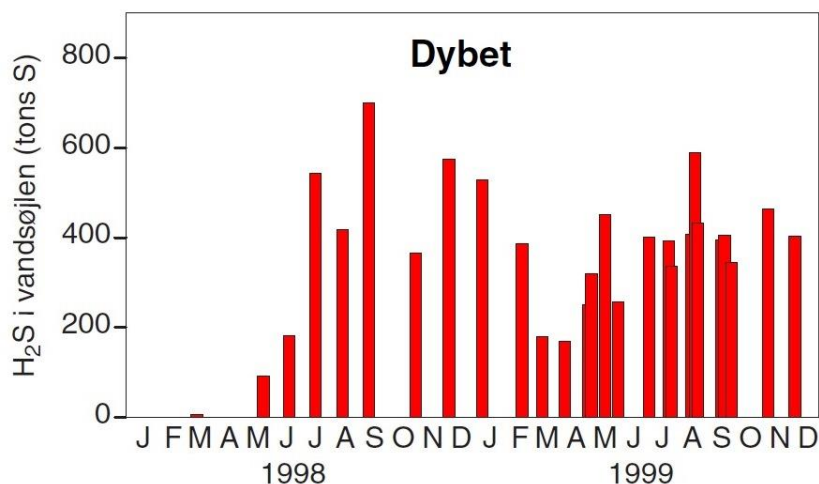


Efter det markante iltvind på det lave vand i inderfjorden i eftersommeren 1997 blev der igangsat en undersøgelse af, om iltvindet stammede fra "Dybet", eller om det blev genereret på

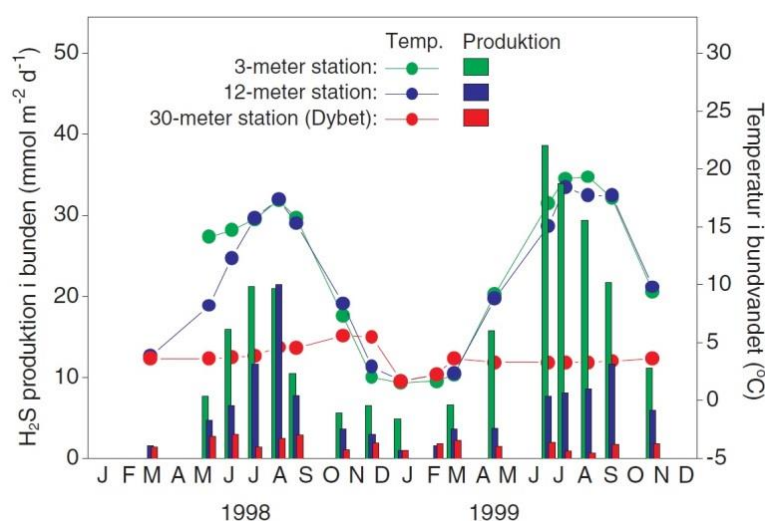
det lave vand via en høj respiration samt udslip af H_2S fra sedimentet over springlaget. Undersøgelsen viste, at iltsvindet på lavt vand blev skabt af en høj respiration i sediment og i vandet på lavt vand kombineret med høje temperaturer og vindstille. Iltsvindet på lavt vand havde således ikke nogen direkte forbindelse med produktionen af H_2S i "Dybet". Man kan ikke direkte redde Mariager Fjord fra at blive iltfri i overfladevandet ved at ilte bundvandet. Konklusionen var, at en kraftig reduktion af næringsstofbelastningen var og er en forudsætning for at få forbedret vandmiljøet og for at reducere hyppigheden af iltsvind over springlaget.

Tanken om at fjerne N fra systemet ved at ilte bundvandet er af nyere dato og skal ses som en af flere måder til at nå et fastlagt reduktionsmål for kvælstof til en pris, der er kosteffektiv. At der samtidigt på grund af de iltede forhold i bunden kan etablere sig en bundfauna, kan blot betragtes som en ekstra fordel.

Produktionen af H_2S i "Dybet" er i (Fossing & Christensen 1998; Fossing 1999) bestemt for 1998 og 1999 ved dels at følge stigningen af H_2S koncentrationen i bundvandet samt ved at måle produktionen af H_2S i sedimentet på 20 m dybde, se Figur 5-1 og Figur 5-2.



Figur 5-1 Mængden af sulfid under haloklinen "Dybet" Mariager inderfjord. Fra (Fossing 1999)



Figur 5-2 Vandets temperatur hhv. i dybderne 3 m, 12 m samt i 30 m ("Dybet"). Sedimenternes sulfidproduktion i hhv. 3 m, 12 m og 20 m ("30 m stationen (Dybet)"). Fra (Fossing 1999).

I 1998 blev der ikke opbygget nogen pulje af H_2S i bundvandet før end i maj. Efter det kraftige iltsvind i august og september 1997 forekom der i oktober 1997 en indstrømning af ilttrigt

bundvand efterfulgt af endnu en indstrømning i januar 1998. Sammenlagt nulstillede de to indstrømninger af iltrigt vand mængden af H_2S i bundvandet.

Produktionen af H_2S i sedimentet på udtaget på 20 m dybde under springlaget ligger betragteligt under tilsvarende produktioner over springlaget på hhv. 3 m og 12 m. Ganges sulfidproduktionen på 20 m dybde op til hele bundlagets areal, kan sedimentet kun forklare under 8% af bundlagets sulfidproduktion. Sedimentet på 20 m dybde synes valgt, fordi det her er muligt at udtage en sedimentkerne med tilpas megen konsistens til, at det er muligt at foretage målinger af H_2S produktionen. Sedimentkerner udtaget i 1999 og 2003 på 29 m vand havde massefylde tæt på 1, så der er snarere tale om flydende mudder end egentlig sediment (Århus & Nordjyllands Amter 2004). Man kan derfor stille spørgsmål ved, om stationen på 20 m er repræsentativ for de dybereliggende sedimenter i bundlaget. Den mulighed foreligger, at en stor del af H_2S produktionen i "Dybet" sker i de dybereliggende, meget organisk berigede og flydende sedimenter.

I (Fossing & Christensen 1999) angives den årlige produktion i bundlaget til at være 680 ton sulfid. Denne produktion må være nettotilvæksten af sulfid i bundlaget, idet nettotilvæksten af H_2S fra april til september netto er 680 ton S. Bruttoproduktionen af H_2S over året er større, idet der skal tillægges et bidrag af sulfid, som er forsvundet ved oxidering af H_2S i kemoklinen. Kemoklinen er et vandlag på typisk 1-3 m, som ligger omkring saltspringlaget, hvor der sker en opblanding mellem overflade- og bundvand. For at kunne vurdere størrelsen af mineraliseringen af organisk stof er der behov for at estimere en potentiel bruttoproduktion af sulfid ved mineralisering af organisk C i "Dybet" ud fra de estimerede masser af sulfid i bundlaget.

En granskning af iltprofilerne i vinter og forår 1998 viser, at iltkoncentrationen i bunden var 4-5 $mg\ l^{-1}$ den 5.02. faldende til ca. 1 $mg\ l^{-1}$ og 0,5 $mg\ l^{-1}$ hhv. den 19.02. og 5.03., hvorefter iltkoncentrationen steg til ca. 2 $mg\ l^{-1}$ den 19.03. Fra den 2.04 og året ud er der ikke registreret ilt i bundvandet, hvorefter der sker en opbygning af sulfid i bundvandet til et niveau, hvor produktionen af sulfid modsvarer af en oxidering af sulfid i kemoklinen. Ud fra Figur 5-1 sker der en stigning af sulfid i bundvandet fra april til juli på 540 ton, hvorefter der sker et fald i august efterfulgt af en stigning i september til 680 ton.

I efteråret falder mængden af sulfid på grund af en større sulfidoxidation i kemoklinen, der skyldes en forøget vertikal opblanding i overfladelaget, når vandet nedkøles. Hertil skal lægges en øget vertikal opblanding pga. flere dybe lavtrykspassager i vinterhalvåret.

I det følgende er der gjort følgende forudsætninger for at estimere en produktion af først sulfid og derefter af mineraliseret organisk C i bundlaget:

- Bruttoproduktionen af H_2S ved sulfatånding over 6 måneder svarer til forøgelsen af H_2S i bundlaget fra april til og med september 1998.
- Sulfatåndingen sker ved mineraliseringen af organisk stof med et mol SO_4 til 2 mol C.
- Den årlige mineralisering af organisk stof i 1998 med ilt, SO_4 ånding og evt. metan produktion svarer til to gange mineraliseringen af organisk stof ved sulfatånding over 6 måneder fra april til og med september 1998.
- Den årlige mineralisering af organisk stof i 1999 beregnes ud fra stigningen af H_2S i bundvandet som følge af sulfatånding over 5 måneder fra april-august.
- Da temperaturen er konstant 4-5 °C hele året, antages mineralisering at være konstant over året.

Imod sidste antagelse taler, at planternes produktion af organisk stof sker i sommerperioden, men hvis transporten af organisk materiale overvejende sker som bundtransporter efter resuspensionshændelser, vil transporten modsat være størst om vinteren, hvor antallet af dybe lavtrykspassager er størst.

Tabel 5-1 Beregnet mængde organisk stof i form af C, N og P, der er mineraliseret i "Dybet" i 1998 og 1999 på grundlag af nettotilvæksten af H₂S i sommerperioderne af 1998 og 1999*. Produceret H₂S, hvis alt organisk C var mineraliseret ved sulfatånding.

Kilde	Ton S* SO ₄ →H ₂ S	Ton C	Ton N	Ton P	g C m ⁻²	g N m ⁻²	g P m ⁻²
Mineraliseret 1998	1360	1020	145	20,1	232	33	4,6
Mineraliseret 1999	1000	750	107	14,9	170	24	3,4
Netto-deposition Sediment pr. år		220	31	1,8	50	7	0,4
Tilførsel pr. år							
1998-	1360-	1240-	176-	21,9-	282-	51-	5,0-
1999	1000	970	138	16,1	220	31	3,8

* Udenfor sommerperioden antages en mineralisering som svarer til sommer sulfatrespirationen =H₂S produktionen. Om vinteren falder H₂S mængden. Elektronacceptor kan imidlertid være O₂, Fe⁺⁺⁺, Mn⁺⁺, NO₃.

Ud fra stigningerne af sulfid i "Dybet" i sommerperioderne er det estimeret, at der blev mineraliseret organisk stof i 1998 og 1999 svarende til en sulfatånding på hhv. 1360 og 1000 ton S, se Tabel 5-1. Omsat til kulstof svarer det til, at der mineraliseres hhv. 1020 og 750 ton C i 1998 og 1999. (Olesen 2001) målte et C:N forhold tæt på 7 i fældematerialet på 15 m dybde. Anvendes dette forhold på den mineraliserede mængde C, medfører det, at der er mineraliseret hhv. 145 og 107 ton N i "Dybet" i 1998 og 1999. C:P forholdet for det organiske materiale, som tilføres "Dybet", er ikke målt, men antager man, at der sker en procentvis samme forøgelse af C:P forholdet, som er sket for C:N forholdet i forhold til "Redfield" forhold for C:N:P i alger, ender man på et C:P forhold på 50,5. Anvendes dette forhold på den mineraliserede mængde C, fås, at der frigives ca. 22,1 og 14,9 ton P i hhv. 1998 og 1999. Den totale mængde af organisk stof, der tilføres "Dybet", skal inkludere en netto-deposition af C, N og P i sedimentet. I (Århus & Nordjyllands Amter 1998) er der ud fra en sedimentprofil beregnet en netto-deposition på 50 g C m⁻² år⁻¹, 7 g N m⁻² år⁻¹ og 0,4 g P m⁻² år⁻¹, hvilket giver en netto-deposition i "Dybet" hhv. 220 ton C, 31 ton N og 1,8 ton P, når der regnes med et bundareal på 4,4 km⁻² under 15 m kurven.

De samlede mængder af C, N og P, der tilføres "Dybet" under 15 m kurven, er for 1998 og 1999 hhv. 1240 og 970 ton C, 176 og 138 ton N samt 21,9 og 16,1 ton P.

5.2 Mineraliseret N og P og modelberegne bruttotransporter

Århus og Nordjyllands Amter har i perioden 1990 til år 2000 brugt en 3-boks model til at beregne transporten af N og P internt i fjorden, samt til at beregne eksporten fra fjorden til Kattegat. I modellen bestod Inderfjorden af 2 bokse repræsenterende overfladelaget samt bundlaget. Boksene har konstante volumener baseret på, at skillefladen ligger i 12,5 m dybde. Dette vil i praksis sige, at den nederste boks indeholder saltspringlaget, der oftest ligger i 15 m dybde, samt kemoklinen. Saltspringlaget og den tilhørende kemoklin kan bevæge sig op og ned i vandsøjlen alt efter vejrforhold og saltvandindbrud; dette tages der ikke hensyn til i modellen.

Transporten mellem boksene beregnes som en bruttotransport af N eller P fra øvre lag til nedre lag og en bruttotransport fra nedre lag til øvre lag. Massetransporterne er beregnet på grundlag af vandudveksling mellem øvre og nedre lag (bokse) ganget med koncentrationerne i vandet. Vandudvekslingerne er beregnet ud fra tilførsel af ferskvand samt ændringer i lages salinitet. Denne måde at regne N- og P-transporter på tager ikke højde for en tilførsel af organisk

materiale via en evt. bundtransport af organisk stof. I modelberegningerne er denne manglende tilførsel af N og P indsat som et ekstra bidrag til bundlaget. Samtidig er der beregnet et tab af N og P fra netto-deposition til sedimentet, denitrifikation samt andre ukendte forhold. En mere detaljeret beskrivelse af, hvordan disse ekstra bidrag og tab er beregnet, er ikke at finde i rapporterne (Århus & Nordjyllands Amter 1998, 2001, 2003 og 2004). Det væsentlige er imidlertid, at for at massebalancen mellem bundlag og overfladelag skal gå op, skal der netto tilføres en mængde N og P, som der ikke kan gøres rede for ud fra de udvekslede vandvoluminer mellem lagene ganget med de målte koncentrationer af TN og TP. Modellens styrke er, at den er simpel og bygger i vid udstrækning på målinger. Svagheden er så, at den ikke evner at opløse alle aspekter af N- og P-omsætningen og -transporten.

Den beregnede mineralisering af N og P kan bedst sammenlignes med bruttotransporten fra nedre til øvre lag. Der vil dog være nogle forhold, som skal tages i betragtning, når der foretages en sammenligning mellem disse to størrelser.

Bruttotransporten fra øvre til nedre lag vil indeholde en del organisk bundet N og P, som kan mineraliseres i bundlaget. Hertil skal lægges, at der sammen med det vand, som udveksles mellem overflade- og bundlaget, transporteres NO_3 , NH_4 , PO_4 og noget O_2 fra overfladen til bundlaget. Det tilførte NO_3 kan enten blive ført tilbage til overfladelaget eller blive denitrificeret i kemoklinen (Jensen *et al.* 2009). Tilførslen af ilt til bundlaget betyder, at nogle arealer af bundlagets sediment bliver oxideret, så det midlertidigt kan binde mineraliseret PO_4 til oxideret Fe. Dvs., at der kan opbygges en pulje af specielt P, som kan frigives i et senere "masseregnskabsår". De fald, der ses i massen af PO_4 i bundlaget om vinteren viser, at dette fænomen er en årligt tilbagevendende begivenhed, se Figur 5-3. Efter 1997-iltsvindet skete der en ophobning af N og P i bundvandet i form af en forøget koncentration af TN og TP. I 1999 stabiliserer mængden af N og P sig, og der foregår en overgang til "normalt" niveau fra før 1997 over de næste to år, se Figur 5-3.

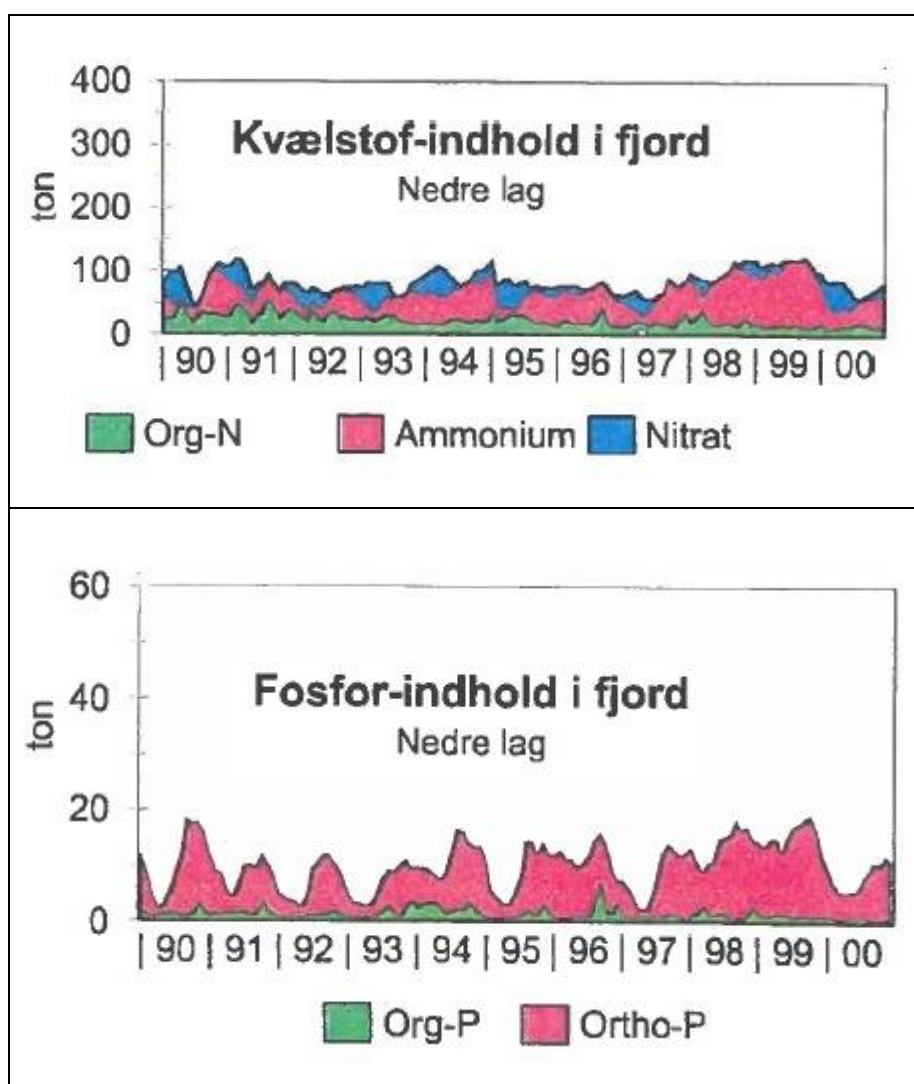
Det væsentlige er, at forøgelsen i koncentrationerne sker i 1998. Dvs., at tilførslen af mineraliserbart organisk stof sandsynligvis allerede er ved at nå et "normalt" niveau i 1999.

Det vil være en fordel at kunne sammenhænge de beregnede mineraliseringer af N og P med de tilsvarende bruttotransporter fra bundlaget til overfladelaget.

Set ud fra overstående overvejelser skal den beregnede mineralisering af N nok ligge i underkanten af bruttotransporten fra bundlaget til overfladelaget. Dels fordi noget af det N, som nedblandes fra overfladelaget i form af NO_3 og NH_4 , transporteres tilbage igen til overfladelaget, og dels fordi det er uklart, om denitrifikationen i kemoklinen er inkluderet i beregningen af den nedblandede mængde N.

Fosfor kan midlertidigt ophobes i sedimentet for at blive frigivet på et senere tidspunkt. Sammenholdes mineraliseringen med bruttotransporten af P, kan denne være større eller mindre, alt efter om der frigives tidligere mineraliseret P fra sedimentet eller optages P til sedimentet det pågældende år.

Der foreligger ikke beregnede bruttotransporter for N mellem nedre lag og øvre lag for årene 1998-1999. Ser man på N transporten for nedre lag i perioden 1990-1996, er der en bruttotransport fra det nedre lag på 138 tons pr. år samt en bruttotransport fra det øvre lag til det nedre lag på 88 tons, (Århus & Nordjyllands Amt 1998). Modellens bruttotransport fra nedre til øvre lag varierede i perioden 1990-96 fra 47 til 247 ton pr. år. De beregnede mineraliseringer af N i 1998 og 1999 ligger fint inden for den beregnede variation af den gennemsnitlige bruttotransport på 138 ton N pr. år. Mineraliseringen af N er størst i 1998, hvilket kan være en følgevirkning af iltsvindet i sensommeren 1997. Året 1999 ligger derfor antagelig tættest på et "normalår".



Figur 5-3 TN- og TP-indholdet i de nedre lag af Inderfjorden i Mariager Fjord, (Århus og Nordjyllands Amt 2001).

Massebalancemodellen for fosfor er i forhold til det, som er rapporteret for perioden 1990-97, (Århus & Nordjyllands Amt 1998) blevet revideret, hvorfor en sammenligning med data fra denne rapport skal tages med forbehold. Nyere data blev præsenteret i (Århus & Nordjyllands Amt 2001), hvor man beregnede en **nettoeksport** på 21 og 9 ton P fra det nedre til det øvre lag i hhv. 1998 og 1999. Fra samme rapport er nettotransporten i perioden fra 1990-1996 estimeret til 6 ton P pr. år fra nedre lag til øvre lag. Beregningerne af bruttotransporten af P fra nedre lag til øvre lag er ikke oplyst. Bruttotransporten fra nedre lag til øvre lag skal imidlertid være højere end de angivne nettotransporter. Det betyder, at bruttotransporten i 1998 fra nedre til øvre lag er højere end den beregnede mineralisering, hvilket skyldes en frigivelse af ophobet P i nedre lag. Forskellen mellem mineraliseret P og nettotransporten af P til øvre lag i 1999 er ca. 5-6 ton P. Det virker ikke helt urimeligt, hvorfor mineraliseringen i året 1999 derfor antages at ligge tættest på et "Normalår".

Det skal bemærkes, at før revideringen af P massemodellen var bruttotransporten fra bundlaget til overfladelaget anslået til 14 ton P pr. år over perioden 1990-96. Dette tal skal dog tages med forbehold.

6 Potentiel N fjernelse ved iltning af bundlaget

I det foregående kapitel er det sandsynliggjort, at der mineraliseres ca. 100-110 ton N pr. år til NH_4 i bundlaget af Inderfjorden. Hertil skal lægges ca. 11 ton N pr. år, primært som NO_3 , der tilføres via saltvandsindbrud. I alt bliver tilførslen 111-121 ton N pr. år.

Det er denne tilførte mængde N pr. år, som potentielt kan blive reduceret ved iltning af bundvandet. Forudsætningen er, at bundlaget bibeholdes, og der ikke sker en mekanisk opblanding af vandmassen. Måden at ilte bundvandet på vil derfor være at udlægge én eller flere diffusorer i "Dybet", som via slanger er forbundet med beholdere på land fyldt med flydende ilt. Det flydende ilt overgår til gasform, inden det forlader diffusorerne, hvorefter bobler med ilt stiger opad i vandsøjlen. Boblerne behøver en ca. 10 m vandsøjle, før iltten er fuldt optaget i vandet. I forbindelse med udledningen af de iltfyldte bobler vil der opstå en cirkulær vandstrøm i bundvandet, som vil føre det iltrige vand rundt i bundlaget.

Iltten vil blive brugt til først at oxidere H_2S til SO_4 , derefter nitrificeres NH_4 til NO_3 , og endelig bruges iltten til at nedbryde organisk materiale, som tilføres bundlaget.

NO_3 kan denitrificeres i sedimentet til N_2 hvorved det udgår af fjordens N kredsløb. Denitrifikationen er en anaerob proces, som ved iltning derfor kun kan foregå i sedimentet.

Man skelner mellem NO_3 , som fra vandet transporteres ned i sedimentet og denitrificeres (Dw) og organisk-N i sedimentet, som denitrificeres (Dn). Først mineraliseres det organiske N til NH_4 for derefter at blive nitrificeret til NO_3 i de øverste mm af sedimentet, hvor der er ilt i sedimentet. Den dannede NO_3 kan derefter blive denitrificeret i sedimentet til N_2 .

Hvor meget NO_3 kan der denitrificeres i sedimentet? I 1992-1997 blev der foretaget en række målinger af denitrifikationen i forskellige danske fjordsystemer netop for at belyse dette spørgsmål. Resultatet er kort opgjort i Figur 6-1. I stort set samtlige af de præsenterede danske fjorde, på nær Randers Fjord, bliver NO_3 koncentrationen tæt på 0 kort efter forårsopblomstringen i marts eller april. Det betyder, at denitrifikationen i vinterhalvåret, hvor der er NO_3 i vandet, vil blive medieret af Dw+Dn. I sommerhalvåret vil denitrifikationen i disse fjorde næsten udelukkende bestå af Dn.

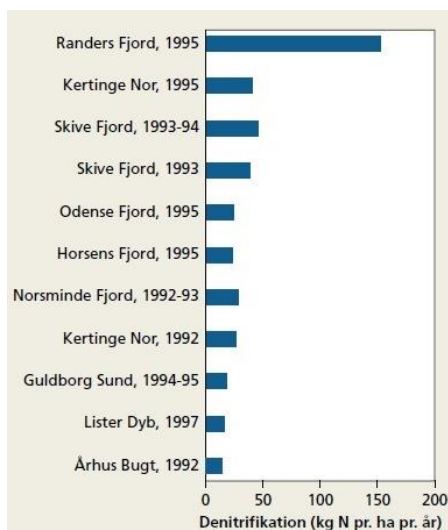
Randers Fjord er en undtagelse herfra, den er smal, lang, lavvandet og modtager vand fra Gudenåen, som til stadighed forsyner fjorden med NO_3 -beriget vand. Det betyder, at denitrifikationen har optimale betingelser. Vandet over sedimentet er iltrigt, samtidigt med at koncentrationen af NO_3 er høj det meste af året.

I snit fjernes der $15 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$, men det dækker over, at der på en station tættest på Gudenåens udløb er en højere denitrifikation end på en station ved munden af Randers Fjord. I Figur 6-2 er øverst afbildet koncentrationerne af NO_3 sammen med Dw på midterste og yderste station i Randers Fjord. Figurerne viser, at selv på den yderste station ved Udbyhuse er der en betragtelig Dw+Dn på ca. $15 \text{ g m}^{-2} \text{ år}^{-1}$, selvom NO_3 -koncentrationen bliver lav i sommerhalvåret. I (Århus & Nordjyllands Amter 2005) blev der i snit i 2004 beregnet en denitrifikation på $21 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ for hele Randers Fjord. En forudsætning for at opnå så høj en denitrifikation er, at iltkoncentrationen er tilstrækkeligt høj i vandet, så en bundfauna af orme kan etablere sig, der kan ventilere sedimentet med vand.

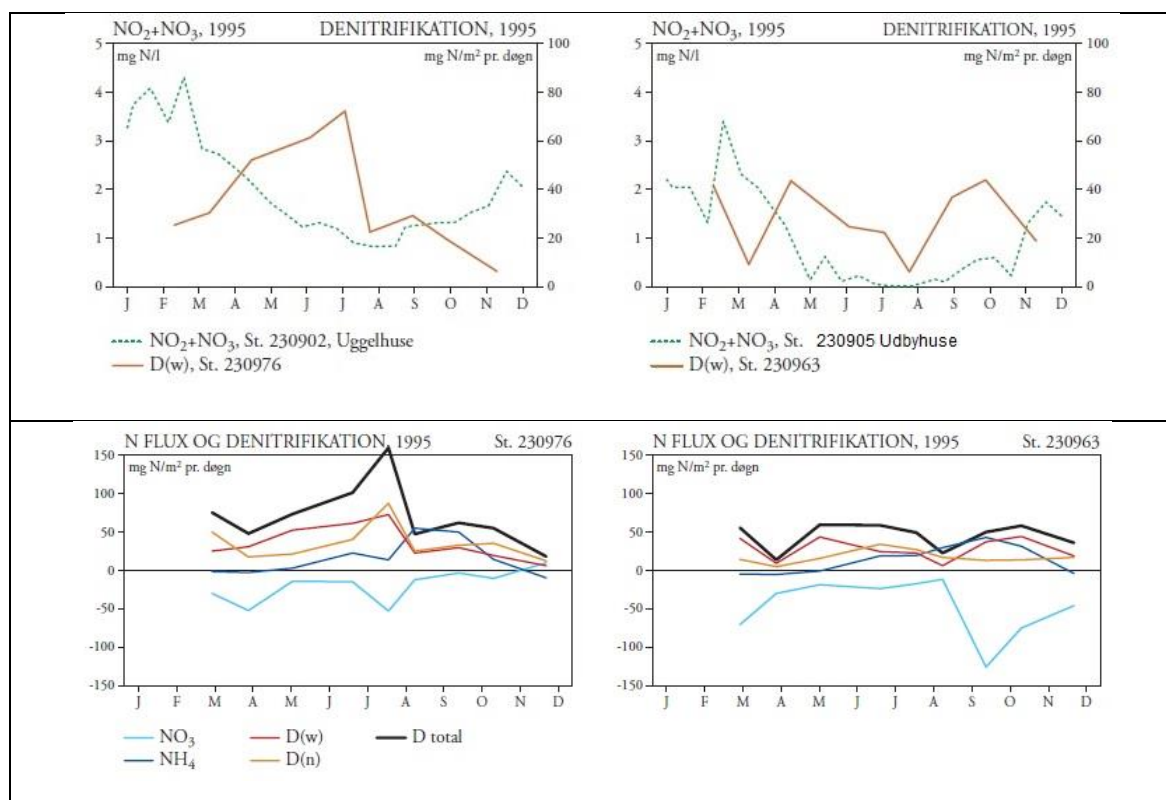
Hvis der skal opnås samme denitrifikationsrater i Mariager Fjord, betyder det, at der ved iltningen af bundvandet i Inderfjorden skal kunne opnås en iltkoncentration på mindst $4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$. Lavere iltkoncentrationer vil hæmme eller forhindre etableringen af en bundfauna.

Mængden af TN i bundlaget af Mariager Inderfjord er i snit opgjort til ca. 80 tons N, hvilket svarer til en gennemsnitlig koncentration på ca. $1700 \text{ } \mu\text{g N l}^{-1}$ under antagelse af, at der er ca. $47 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ under 12,5 m kurven. Selv hvis denne mængde halveres, vil der stadig være et koncentrationsniveau, der er højt nok til at kunne bære en denitrifikation på omkring $15 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$.

Hvis man regner med, at bundlagets areal under 12,5 m kurven er ca. 5,6 km², vil en der ved en denitrifikation på 15 og 21 g N m⁻² år⁻¹ kunne fjernes hhv. 84 og 117 tons N pr. år.



Figur 6-1 Denitrifikation i forskellige danske fjorde. Fra (Christensen Bondo *et al.* 2002)



Figur 6-2 Øverst: Koncentrationer af NO₃ samt denitrifikation i sedimentet af NO₃ fra vandet (D_w) på 2 stationer i Randers Fjord. Nederst: samlede denitrifikation i sedimentet (D_w+D_n=D total) på samme stationer, samt flukse af NO₃ og NH₄. Fra (Århus & Nordjyllands Amter 2005).

Netto N-fjernelsen i forhold til situationen uden iltning af bundvandet vil være lidt mindre, idet man skal fratække den eksisterende N-fjernelse ved denitrifikation. Hvis der i snit tilføres 11 ton N pr. år ved saltindbrud i vinterhalvåret, vil dette N primært befinde sig som NO_3 , der vil blive denitrificeret. (Jensen *et. al.* 2009) har målt, at der i den nuværende situation sker en denitrifikation i kemoklinen svarende til mellem $5,6 - 26,6 \text{ mg N m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$.

Hvis man anvender $14 \text{ mg N m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$, fjernes der i kemoklinen uden iltning ca. 28 tons N pr. år.

Sammenlagt betyder det, at der ved iltning af bundvandet **netto** kan fjernes **45 - 78 ton N pr. år**, hvilket udgør 16 - 27% af den målsatte reduktion af belastningen til Inderfjorden.

7 Immobilisering af P ved iltning af bundlaget.

Iltning af bundvandet kan oxidere Fe i sedimentets øverste cm fra ferro- til ferri-jern ($\text{Fe}^{++} \rightarrow \text{Fe}^{+++}$). Ferri-jern binder PO_4 og kan dermed immobilisere P fra at blive brugt af planteplankton. Hvis ferri-jern reduceres til ferro-jern, frigives PO_4 igen. I ferskvandssedimenter vil ferro-jern stadig have en bindingsevne for PO_4 , der dog er mindre end ferri-jerns PO_4 bindingsevne. I marine sedimenter har ferro-jern ingen PO_4 bindingsevne, da Fe vil blive bundet til sulfider. Det er en af to hovedårsager til, at P primært er begrænsende for primærproduktionen i ferskvandssystemer, og N primært er begrænsende i marine systemer.

Den anden årsag til denne forskel er væksten af N fikserende cyanobakterier (blågrønner) ved saliniteter under 6-8 PSU. Opstår der en situation med P-overskud og N-begrænsning i systemer med $\text{PSU} < 6-8$, kan der forekomme en opblomstring af N-fikserende cyanobakterier, som helt eller delvist kan kompensere for den manglende N ved N-fiksering.

Det sidste punkt er interessant for Østersøen, hvor saliniteten øst for Bornholm er mindre end 8 PSU i overfladen. Det er her og ud for Gotland, man årligt ser en opblomstring af cyanobakterier.

Saliniteten i danske farvande og i Mariager Fjord betinger, at der ikke er registreret opblomstringer af N-fikserende cyanobakterier. Undersøgelser af plankton i Mariager Fjord viser, at denne altovervejende er domineret af kiselalgen *Skeletonema costatum*.

En fremtidig potentiel P-begrænsning af planteplankton vil derfor forekomme lige efter forårsopblomstringen, men varer typisk kort tid (få uger), hvorefter N potentielt vil blive begrænsende for produktionen af planteplankton resten af sommeren.

En immobilisering af planktons P-tilførsel vil således primært udvide vinduet med P-begrænsning i foråret-forsommeren.

En oxidering af overfladesedimentet vil anslået kunne binde 3 g P m^{-2} , hvilket for et bundareal på $5,6 \text{ km}^2$ giver 16-17 ton P. Denne binding af P vil kun ske én gang, og det er således ikke en årlig rate!

I forbindelse med temadagen "Mariager Fjord" den 7. maj 2015 afholdt af Mariager Fjord Kommune holdt professor Anders Stigebrandt et foredrag om det igangværende forsøg med beluftning af Byfjorden ved nedbrydning af saltspringlaget. En sådan fremgangsmåde må frarådes for Mariager Fjords vedkommende, idet forsøget blandt andet har til formål efterprøve mulighederne for at kunne reducere P-frigivelsen fra de dybereliggende itfrie sedimenter i Østersøen. Man skal se resultaterne af forsøget i Byfjorden i sammenhæng med, at der optræder N-fikserende cyanobakterier i Østersøen, og at N nok er begrænsende, men at P i dette vandområde er mere styrende for planktonproduktionen end i de indre danske farvande.

Anders Stigebrandt samt andre svenske forskere har i årevis argumenteret for, at de mere eller mindre permanente iltfrie salte bundlag i Østersøens bassiner (Bornholm, Gotland, Gdansk &

Landsort) frigav mere P og med større hastighed fra sedimentets organiske P-pulje end tidligere antaget (Stigebrandt *et al.* 2014).

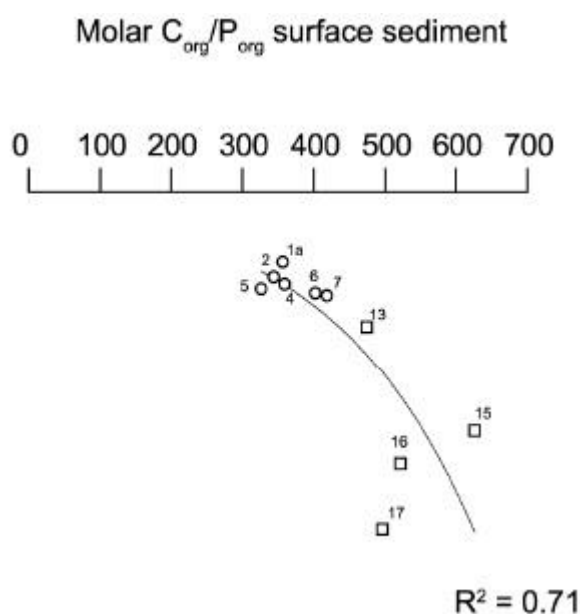
I den forbindelse har (Jilbert *et al.* 2011) undersøgt, hvordan C:P-forholdet er i sedimenter udsat for forskellige iltfrie forhold. Deres resultater peger på, at den organiske P-pulje i de sedimenter, som er udsat for længerevarende iltkoncentrationer under 2 ml l^{-1} , hurtigere frigiver deres organiske P-pulje end sedimenter med overliggende iltet vand.

Udtømningen af P i sedimenter med længerevarende meget lave iltkoncentrationer i vandet kan ses ved, at C:P-forholdet i de øverste 2 cm er højt i sediment, højere end i sedimenter, som er udsat for iltede forhold.

I Mariager Fjord er der udtaget 3 sedimentkerner fra "Dybet" (i 1991 22m, i 1999 29 m, og i 2003 29 m), hvor der ud over glødetab, tørstof og TP er målt jernbundet P (Fe-P). Hertil er der målt 2 sedimentkerner udtaget på 3 m hhv. i 1999 og 2003. Det er ikke muligt at beregne C:P forholdet ud på de udtagne prøver, idet der ikke er målt hvor meget kalsium (Ca) bundet P der er i sedimenterne. Organisk P plus Ca bundet P, ($P_{\text{-Ca+org}}$), er beregnet som differencen mellem TP og Fe-P, samtidigt er der regnet med et glødetab:C forhold på 2.4. C: $P_{\text{-Ca+org}}$ -forholdene for alle 5 sedimentkerner er beregnet for de øverste 2 cm, se Tabel 7-1.

Tabel 7-1 C: $P_{\text{-Ca+org}}$ for overfladesedimenter (0-2 cm) i Mariager Fjord.

År \ Dybde	C: $P_{\text{-Ca+org}}$ mol forhold 22 m ("Dybet")	C: $P_{\text{-Ca+org}}$ mol forhold 29 m ("Dybet")	C: $P_{\text{-Ca+org}}$ mol forhold 3 m (overfladelaget)
1991	542		
1999		495	201
2003		412	208



Figur 7-1 C:P-org-forhold i forskellige overfladesedimenter (0-2 cm) i Østersøen. (o) sedimenter med iltet vand over sig. (□) sedimenter med mindre end 2 ml l^{-1} ilt i det overliggende vand. Fra (Jilbert *et al.* 2011)

Det fremgår af Tabel 7-1, at $C:P_{Ca+org}$ -forholdet i overfladesedimenterne fra "Dybet" er lidt over det dobbelte af $C:P_{Ca+org}$ -forholdet i sedimenterne fra 3 m dybde. Det tyder på, at en større del af den organiske P-fraktion er blevet frigivet til vandet på dybt vand med iltfrie forhold end på lavt vand med iltede forhold. "Redfield"-forholdet mellem C og P er 106:1 på molbasis.

I Figur 7-1 er afbildet en række kulstof:organisk-P forhold ($C:P_{org}$) for overfladesedimenter (0-2 cm) i Østersøen. Cirkler (o) repræsenterer sedimenter med overliggende iltet vand, og firkanter (□) repræsenterer sedimenter med overliggende vand med mindre end 2 ml l^{-1} ilt.

I forhold til sedimenterne i Østersøen ligger "Dybet's" sedimenter lige på grænsen til at udvise samme forhold $C:P_{Ca+org}$ som $C:P_{org}$ forholdene fra de iltfrie sedimenter i Østersøen. Man må formode, at de også frigiver en forholdsmæssigt større del af det organisk bundne P til vandet end sedimenter fra samme dybde, men hvor vandet er iltet.

Det foreliggende videnskæssige grundlag gør, at det ikke er muligt at sætte tal og masser på, hvor meget en iltning af bundvandet vil reducere P frigivelsen fra den organiske P-pulje. Blot må man konstatere, at der muligvis er en årlig positiv effekt (mindskning) på P-frigivelsen ved iltning af "Dybet".

8 Hvor meget ilt skal der tilføres bundlaget?

Det er i et tidligere kapitel estimeret, at der pr. år mineraliseres organisk materiale ved sulfatånding svarende til en sulfidproduktion på ca. 1000 ton S pr. år, se Tabel 5-1. Skal denne mængde sulfid oxideres til SO_4 , skal der anvendes 2 mol O_2 til et mol H_2S , hvilket medfører, at der til bundvandet skal tilføres 2000 tons O_2 pr. år. Ligesom med denitrifikationen skal der modregnes den mængde O_2 , som tilføres bundlaget via opblanding og saltvandsindbrud. I løbet af perioden 1990-96 tilførtes der i snit $18 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ vand pr. år via saltindbrud. Antages det, at dette vand indeholder $8 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$, giver dette en tilførsel på 145 ton O_2 pr. år. Hertil skal lægges en mængde O_2 , som transporteres ned i bundvandet via nedblanding over haloklinen. Der findes ikke nogen ordentlige estimater af denne nedblanding over året, kun punktvis målinger som ikke er koblet til metrologiske forhold. (Fossing & Christensen 1999) målte iltforbruget i kemoklinen ved nedblanding af ilt til oxidation af H_2S til mellem 0,3 og $15 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$. Det højeste iltforbrug blev målt i december 1998. (Zopfi *et al.* 2001) angiver en estimeret nedadrettet fluks af ilt i kemoklinen på $16 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$. I det følgende anvendes en iltfluks på $5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$, som er målt af (Fossing & Christensen 1999) i august 1998. Dette giver en tilførsel af ilt over skillefladen på 327 tons ilt pr. år. Fratrækkes $145+327$ ton O_2 pr. år, vil der være behov for at tilføre ca. 1528 ton ilt pr. år til "Dybet".

De 1528 ton O_2 pr. år skal betragtes som et første overslag. Som det fremgår af ovenstående, er estimeret af mængderne af nedblandet ilt fra overfladelaget usikkert og i den lave ende.

Ved opstart af iltningen skal der bruges lidt mere ilt, idet den ophobede mængde H_2S i "Dybet" skal iltes væk, ligesom der skal tilføres ca. 190 ton O_2 til dybet for at nå op på en iltkoncentration på $4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$.

9 Datagrundlag

I forbindelse med udarbejdelse af notatet er der brugt tilgængelige rapporter og data, som for de flestes vedkommende refererer til målinger og undersøgelser udført i perioden fra 1991 til 2004. Der skal således tages forbehold over for, om der er sket ændringer i stofomsætningen i Mariager Fjord i løbet af de sidste 10-15 år. Ændringer, som medfører, at de beregnede behov for iltning af bundvandet samt den opnåede fjernelse af specielt N har ændret sig.

10 Referencer

- Christensen Bondo, T. Dalsgaard, H. Fossing, S. Rysgaard & N. Sloth. 2002. Stofomsætning i havbunden, TEMA-rapport fra DMU, 42/2002. ISSN (trykt): 0909-8704 ISSN (elektronisk): 1399-4999, ISBN: 87-7772-667-7
- Christiansen C. 1997. Iltsvind i Mariager Fjord – hvorfor kom det i 1997?. *Geologist Nyt*, no. 6. s 12-14 (1997)
- Erichsen A., H. Kaas, K. Timmermann, S. Markager, J. Christensen, C. Murray 2015. Metode til bestemmelse af målbelastning. Aarhus Universitet (DCE) & DHI. Rapport til Naturstyrelsen 2015.
- Fallesen G., F. Andersen, B. Larsen 2000. Life, death and revival of the hypertrophic Mariager Fjord, Denmark. *Journal of Marine Systems* 25 (2000) p 313-321. Olesen Michael 2001. Sedimentation in Mariager Fjord, Denmark: The impact of sinking velocity on system productivity. *OPHELIA* 55 (1) side 1-26, 2001.
- Fossing Henrik, P.B. Christensen 1999. Produktion og forekomst af svovlbrente I Mariager Fjord 1998. Faglig rapport fra DMU nr. 270. ISBN 87-7772-455-0, ISSN: 0905-815X
- Fossing Henrik 1999. Sedimentprocesser og næringsstofudveksling i Mariager Fjord 1999. Notat. Samarbejdsprojekt mellem Nordjyllands og Århus Amter samt Danmarks Miljøundersøgelser.
- Fossing Henrik 2001. Betydningen af iltforbruget i fjordbunden og vandsøjlen for iltsvind i bundvandet på Mariager Fjords lavvandede områder. Notat til Nordjyllands og Århus Amter af Danmarks Miljøundersøgelser, marts 2001.
- Fossing H., P. Berg, B. Thamdrup, S. Rysgaard, H. M. Sørensen, K. Nielsen. Ilt- og Næringsstofflux-model for Århus Bugt og Mariager Fjord. Faglig Rapport fra DMU nr. 416, 2002. ISBN: 87-7772-698-7, ISSN: 0905-815x, ISSN: 1600-0048.
- Jensen Marlene M., J. Petersen, T. Dalsgaard, B. Thamdrup. 2009. Pathways, rates, and regulation of N₂ production in the chemocline of an anoxic basin, Mariager Fjord, Denmark. *Marine Chemistry* 113 side 102-113, 2009.
- Jilbert T., C.P. Slomp, B. G. Gustavsson, W. Boer 2011. Beyond the Fe-P-redox connection: preferential regeneration of phosphorus from organic matter as key control on Baltic Sea nutrient cycles. *Biogeosciences* 8, 1699-1720, 2011.
- Larsen Birger 1999. Sedimenterne på bunden af inderfjorden. I "Temanummer Mariager Fjord en fjorddals historie". *GEOLOGI nyt fra GEUS* nr. 4 december 1999, s 14-15.
- Olesen Michael 2001. Sedimentation in Mariager fjord, Denmark: The impact of sinking velocity on system productivity. *OPHELIA* 55 (1) side 1-26, 2001.
- Stigebrandt A., L. Rahm, L. Viktorsson, M. Ödalen, P.O.J. Hall, B. Liljebladh. A new phosphorus paradigm for the Baltic Proper. *Ambio* 2014, 43 P 634-643.
- Zopfi Jakob, T. G. Fredelman, B.B. Jørgensen, A. Teske, B. Thamdrup. 2001. Influence of water column dynamics on sulfide oxidation and other major biogeochemical processes in the chemocline of Mariager fjord (Denmark). *Marine Chemistry* 74 side 29-51, 2001.
- Århus og Nordjyllands Amter, Notat oktober 1997. Notat Iltsvind i Mariager Fjord 1997 Status.
- Århus Amt og Nordjyllands Amt, 1998. Mariager Fjord. Udvikling og status 1997.

Århus & Nordjyllands Amter 2001. Vestlige Kattegat og tilstødende fjorde 2000. Århus og Nordjyllands Amter. ISBN: 87-7775-413-1.

Århus & Nordjyllands Amter 2004. Vestlige Kattegat og tilstødende fjorde 2003. Århus og Nordjyllands Amter.

Århus & Nordjyllands Amter 2005. Vestlige Kattegat og tilstødende fjorde 2004. Århus og Nordjyllands Amter. ISBN: 87-7906-336-5.