

Promilleafgiftsfonden for landbrug

Rapport **DRAFT**

Vandudskiftning og opholdstider i Odense Fjord

Dato:	20. december 2020
Forfatter(e):	Morten Holtegaard Nielsen
Udarbejdet for:	Landbrug & Fødevarer F.m.b.A., SEGES
Klientens rep.:	Flemming Gertz
Klientens projekt-nr.:	7849
Klientens projekt:	Kvælstofreduktionsmål for landbruget – marine miljømål
Version:	Udkast
Status:	Klientens ejendom

Marine Science & Consulting ApS
Peder Lykkes Vej 8, 4. th.
2300 København S

P: +45 5369 0888
E: info@msandc.dk
W: <http://www.msandc.dk>
CVR-nr: 39987082

1. Indledning

Denne rapport beskriver arbejdet med analyse af vandudskiftning og opholdstid i kystnære områder som beskrevet i leverandøraftale mellem SEGES og Marine Science & Consulting ApS, dateret d. 5. oktober 2020. Arbejdet er foretaget med udgangspunkt i Odense Fjord, men resultaterne er alment gældende for kystnære områder og fjorde som har en lignende karakter, og som opfylder de samme forudsætninger. Et kystnært område er her defineret som et topografisk afgrænset område, som på den ene side får tilført en betydelig mængde ferskvand i form af afstrømning fra land, og som på den anden side har en forbindelse til et hav, hvorigennem der sker en udveksling af fjord- og havvand.

Hvad angår miljøforholdene i et sådan system, er det væsentligt at vide dels hvor længe tilstrømmende vand opholder sig i systemet, dels hvor stor blandingen er. Dette er generelt komplicerede spørgsmål. Vandudskiftningen – eller vandføringerne ind og ud af systemet – er påvirket af en lang række størrelser og processer, herunder ferskvandstilførslen, områdets volumen og dybdeforhold, forbindelsen til havet, blandingen, som igen er betinget af primært vinden og eventuelt tidevandet, samt ind- eller udstrømninger, som skyldes vindinducerede vandstandsvariationer i havet og eventuelt tidevandet. Endvidere er vandudskiftningen afhængig af udstrækningen af det pågældende område.

Hvis det pågældende område opfylder visse forudsætninger, kan man på en relativ simpel måde finde svar på spørgsmålene. Hvis karakteristika for de vandmasser som udveksles mellem det kystnære område/fjorden og det tilstødende havområde, er kendte, kan vandudskiftningen beregnes vha. en simpel bevarelse af volumen og salt. Dette kaldes for Knudsens Teorem, udviklet og offentliggjort af den danske oceanograf Martin Knudsen i 1900. Hvis vandmasserne i dels det pågældende kystnære område, dels det tilstødende havområde hver især er tilnærmelsesvist fuldt opblandede, kan man antage at disse vandmasser udgør hhv. udstrømmende og indstrømmende vandmasser. Dette er illustreret i Figur 1 (se bilaget, som indeholder alle figurer som separate filer i PDF-format), som viser en principskitse af et kystnært område/en fjord med to dele, adskilt af tærskler eller indsnævring. (Den her skitserede metode kan naturligvis også benyttes for systemer bestående af en eller mere end to dele.) Dette svarer til forholdene i Odense Fjord, jævnfør Figur 2, hvor en lang række målinger af saltholdigheden og temperaturen viser, at området kan opdeles i to dele med hver især nogenlunde homogene vandmasser. Det forudsættes at de to dele af området kan betragtes i deres helhed, og at der indenfor hver del af området er ensformige forhold. Dermed må man se bort fra lokale variationer, f.eks. tæt på det eller de steder hvor ferskvand strømmer ud i fjorden. En passende definition af opholdstiden i en del af området under disse omstændigheder kunne være volumenet divideret med den samlede tilstrømning til den pågældende del.

Metoden til beregning af vandudskiftningen og opholdstiden kan anvendes uden kendskab til de blandingsprocesser eller den dynamik eller de strømninger, som foregår i det pågældende kystnære område. Men det er vigtigt at man har troværdige observationer af de faktiske forhold i systemet til rådighed. Til gengæld vil de resultater som man får, være meget påvirkede af bl.a. blandingsprocesserne, drevet af primært vinden og eventuelt tidevandet. Dermed vil resultaterne være forbundet med en del variation, som udtrykker den naturlige variation i systemet. Afhængigt af systemets størrelse bør man betragte vandudskiftningen og opholdstiden i middel over en periode af en passende længde.

I denne rapport fokuserer vi på Odense Fjord og benytter måledata for 1999, hvor datadækningen var god. Resultaterne afspejler derfor de omstændigheder som var gældende i daværende periode. Da resultaterne omfatter en stor og naturlig variation i systemet, f.eks. i form af en stor ferskvandsafstrømning om vinteren og en lille afstrømning om sommeren, kan resultaterne fint bruges til at undersøge vandudskiftningen og opholdstiden i systemet i almindelighed.

Hvad angår den anvendte metode til undersøgelse af vandudskiftningen og opholdstiden, er det vigtigt at understrege dette: Det er ikke nødvendigt med kendskab til blandingsprocesserne i

systemet, men til gengæld bygger metoden på viden om de faktiske forhold, dvs. observationer. En alternativ metode til beregning af vandudskiftningen og opholdstiden i et givent system kunne være en rent teoretisk tilgang i form af en numerisk model. Modellens resultater ville derimod være meget afhængige af modellens beskrivelse og parametrisering af blandingsmekanismerne i systemet.

Uanset valget af metode vil enhver anvendelse af en model til beskrivelse af et fysisk system i naturen være forbundet med tilnærmelser og usikkerheder. Derfor bør enhver modeltilgang ledsages af en analyse af usikkerhederne og dermed oplysning om hvor troværdig modellen er. Nærværende rapport omfatter derfor en analyse af usikkerhederne på de beregnede vandføringer og opholdstider. Disse usikkerheder udtrykker bl.a. i hvor høj grad forudsætningerne om velblandede forhold i de to dele af Odense Fjord samt området uden for fjordens munding er opfyldte. En sådan usikkerhedsanalyse ses desværre sjældent.

2. Data

Beregningerne af vandudskiftningen og opholdstiderne i de to dele af Odense Fjord er næsten udelukkende baseret på målinger. Disse målinger er kort beskrevet i det følgende. Alle data som ligger til grund for beregningerne af vandudskiftningen og opholdstiderne, er fra 1999, hvor data-dækningen var god. I beregningerne indgår udelukkende månedsmiddelværdier. Alle månedsmidlede data, som indgår i beregningerne, er vist i Figur 3.

Data for ferskvandsafstrømningen fra land er givet som månedsmiddelværdier og er leveret af Aarhus Universitet, Nationalt Center for Energi og Miljø (forkortet DCE). Data omfatter både målte og beregnede værdier for de tre deloplande som udgør det samlede opland til Odense Fjord. Langt den største del af oplandet omfatter Odense Å, hvori afstrømningen er bestemt ved måling. Usikkerheden antages at være 5% af de givne månedsmiddelværdier, hvilket igen antages at svare til et konfidensinterval på 95%.

Data for saliniteterne (i praksis svarende til saltindholdet i promille) i og uden for Odense Fjord omfatter en lang række CTD-profiler målt på i alt seks stationer. Disse stationer er fordelt på to stationer i den indre del af fjorden, tre stationer i den ydre del af fjorden samt en station i Bælthavet uden for fjordens munding. Stationernes placering er angivet på kortet i Figur 2 med undtagelse af stationen i Bælthavet, som befinder sig mod nord udenfor kortet. På tre af stationerne var observationerne dog begrænset til godt den sidste halvdel af 1999. Vha. CTD-profilerne er middelværdierne af saliniteterne for hver måned beregnet. Endvidere er standardafvigelserne beregnet, som kan bruges til at bestemme usikkerhederne på de efterfølgende beregninger af vandudskiftningen og opholdstiderne.

Dybdata for Odense Fjord er leveret af DCE, jævnfør Figur 2. I nærværende analyse antages Odense Fjord opdelt i en indre og en ydre del, adskilt af en linje gående omtrent fra nordvest mod sydøst krydsende Vigelsø. Baseret på de tilgængelige dybdata er volumenerne af den indre og den ydre del bestemt til hhv. ca. $5.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ og ca. $70.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De tilsvarende overfladearealer, som kan bruges til at bestemme usikkerhederne på beregningerne, er hhv. ca. $8.1 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ og ca. $31.2 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Disse tal svarer til middeldybder på hhv. ca. 0.66 m og 2.25 m. Usikkerhederne på volumenerne er primært forbundet med variationer i vandstanden. Disse usikkerheder kan derfor kvantificeres som produktet af overfladearealerne og en typisk vandstandsvariation på 0.1 m.

3. Metode

I et system som opfylder ovenstående forudsætninger, og som består af to dele, hvor den inderste del får tilført ferskvand fra et flodtilløb, og hvor den yderste del er forbundet til havet, jævnfør skitsen i Figur 1, kan man opstille disse ligninger (se f.eks. Fischer et al., 1979):

$$Q_F + Q_{I,2} = Q_{I,1}, \quad Q_{I,1} \cdot S_I = Q_{I,2} \cdot S_Y \text{ og}$$

$$Q_{I,1} + Q_{Y,2} = Q_{I,2} + Q_{Y,1}, \quad Q_{I,1} \cdot S_I + Q_{Y,2} \cdot S_B = Q_{I,2} \cdot S_Y + Q_{Y,1} \cdot S_Y.$$

Ligningerne udtrykker bevarelse af volumen og salt for de to dele af fjorden. Hvis ferskvandstilførslen samt saltholdighederne er kendte, kan de fire ligninger bruges til at bestemme ind- og udstrømningerne mellem dels de to dele af det kystnære område, dels det ydre område og havet. Ligningerne forudsætter ikke kendskab til hverken blandingsprocesserne, drevet af primært vinden og tidevandet, eller systemets dynamiske egenskaber. Til gengæld må det forudsættes at vandmasserne i de to dele af det kystnære system samt i havet er nogenlunde homogene. Dette medfører at en vandmasse som strømmer fra en del af systemet til en anden, er karakteriseret ved saltholdigheden på opstrøms side.

De fire ligninger kan relativt nemt løses for vandføringerne Q . Resultatet er dette:

$$Q_{I,1} = Q_F \cdot \frac{S_Y}{S_Y - S_I}, \quad Q_{I,2} = Q_F \cdot \frac{S_I}{S_Y - S_I},$$

$$Q_{Y,1} = Q_F \cdot \frac{S_B}{S_B - S_Y}, \quad \text{og } Q_{Y,2} = Q_F \cdot \frac{S_Y}{S_B - S_Y}.$$

En passende definition af opholdstiderne i de to dele af systemet kunne f.eks. være denne:

$$T_I = \frac{V_I}{Q_F + Q_{I,2}} \quad \text{og} \quad T_Y = \frac{V_Y}{Q_{I,1} + Q_{Y,2}},$$

hvor V er volumenerne af de to dele. Denne definition udtrykker den tid det tager for de tilstrømmende vandmængder at fylde det pågældende volumen. Hvis opholdstiden er kort, er vandudskiftningen i fjorden stor. Ved indsættelse af resultaterne ovenfor kan opholdstiderne skrives som

$$T_I = \frac{V_I}{Q_F} \frac{S_Y - S_I}{S_Y} \quad \text{og} \quad T_Y = \frac{V_Y}{Q_F} \frac{(S_Y - S_I)(S_B - S_Y)}{S_Y(S_B - S_I)}.$$

Denne beregning er afhængig af hvor systemets ydre grænse sættes. Eksempelvis viser skitsen i Figur 1 et længdesnit gennem en fjord med to tærskler eller indsnævring, som opdeler fjorden i en indre og en ydre del. Den beregnede opholdstid vil være meget afhængig af volumenet samt blandingsprocesserne i den pågældende del af fjorden.

Ovenstående metode forudsætter stationære forhold, dvs. at ferskvandstilførslen, ind- og udstrømningen samt de tilhørende saltholdigheder ikke ændrer sig med tiden. I praksis vil observationer af de forskellige variable udtrykke de øjeblikkelige værdier af de forskellige variable, som for de flestes vedkommende vil variere meget i tiden. Dertil kommer at de fremherskende blandingsprocesser, i form af primært vind og eventuelt tidevand, vil have en stor indflydelse på blandingen i fjorden. Variationer i vind og/eller tidevand kan derfor medføre store tidslige ændringer i opholdstiden og vandudskiftningen.

Et mere retvisende billede af forholdene i en given fjord eller et kystnært område kan opnås ved at betragte middelværdier over et passende tidsrum, f.eks. en måned som anvendes i nærværende tilfælde. I almindelighed bør man dog ikke udelukkende benytte middelværdier til at undersøge et givent system. Øjeblikkelige værdier af de forskellige variable indeholder nemlig væsentlig information, som afslører meget om blandingsprocesserne og strømforholdene, og som kan gå tabt ved midling. Hvis middelværdierne beregnes over en given periode, bør man samtidigt estimere usikkerheden på de beregnede middelværdier.

4. Usikkerhedsanalyse

Den her anvendte tilgang til bestemmelse af vandudskiftningen og opholdstiderne i Odense Fjord bygger på nogle væsentlige forudsætninger. En forudsætning er at vandmasserne i de to dele af fjorden og i området udenfor fjordens munding hver for sig er homogene. CTD-profilerne vist i Figur 6 viser at dette i almindelighed en god tilnærmelse. Men da dette er en tilnærmelse, bør man undersøge dels hvor god tilnærmelsen faktisk er, dels hvilken indflydelse en afvigelse fra denne

tilnærmelse vil have på de beregnede værdier af vandudskiftningen og opholdstiderne i systemet. Endvidere er data for de andre variable som indgår i ovenstående udtryk, forbundet med usikkerheder. Derfor foretages der en analyse af usikkerheden på de beregnede værdier af vandudskiftningen og opholdstiderne. Hvis usikkerheden er lille i forhold til de beregnede værdier, må metoden og de opnåede resultater anses for værende troværdige.

Usikkerhederne på de størrelser, herunder også volumenerne, som indgår i udtrykkene for vandføringerne og opholdstiderne, udtrykkes ved disse symboler:

ω_F , σ_I , σ_Y , σ_B , ψ_I og ψ_Y

svarende til hhv. ferskvandstilførslen, saltholdighederne i den indre del, i den ydre del og i den nordlige del af Bælthavet nord for fjordens munding samt volumenerne af den indre og den ydre del. Disse usikkerheder antages at være indbyrdes ukorrelerede.

Usikkerhederne på ferskvandsafstrømningen og volumenerne er beskrevet i Afsnit 2.

Usikkerhederne på saliniteterne kan estimeres vha. de mange CTD-data, som er vist i Figur 6. Da det er middelværdien af saliniteten i et givent område, som indgår i beregningen af vandudskiftningen og opholdstiderne, skal usikkerheden på denne salinitet beregnes som standardvariationen af middelværdien. Denne bestemmes som standardvariationen af alle de pågældende målinger af saliniteten, som fremgår af Figur 3, divideret med kvadratroden af antallet af målinger. Med disse forudsætninger er usikkerhedsanalysen foretaget som beskrevet i Appendix. Resultaterne af usikkerhedsanalysen er plottet sammen med beregningerne af vandudskiftningen og opholdstiderne, beskrevet i Afsnit 5.

5. Resultater

Resultaterne af beregningerne af vandudskiftningen og opholdstiderne i de to dele af Odense Fjord er vist i Figur 4 og 5. Selvom beregningerne er gennemført med data for 1999, kan resultaterne bruges til at udtale sig om vandudskiftningen og opholdstiderne i almindelighed.

Indledningsvist fremgår det af Figur 3 at ferskvandstilførslen til Odense Fjord er forbundet med en stor årstidsvariation, med store vandføringer, typisk $20\text{--}30\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, i vinterhalvåret og små vandføringer, under $10\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, i sommerhalvåret. I den indre del af fjorden ses tilsvarende relativt lave saliniteter om vinteren og relativt høje saliniteter om sommeren, hvilket indikerer en relativ kort opholdstid. I den ydre del af fjorden ses en noget mindre årstidsvariation og en relativ høj salinitet, hvilket indikerer en relativ lang opholdstid og en stor vandudveksling med Bælthavet.

Resultaterne for den indre del af fjorden, vist i Figur 4, viser at der er en betydelig udveksling mellem den indre del og den ydre del, varierende mellem typisk knap 20 og godt $50\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Den tydelige årstidsvariation, som ses i ferskvandstilførslen, fremgår også af udstrømningen fra den indre del af fjorden. Derimod er indstrømningen til den indre del af fjorden i noget mindre grad præget af en årstidsvariation. Dette er et udtryk for en variation i både ferskvandstilførslen og blanding af vandmasserne, som i den lavvandede, indre del af fjorden er stærkt styret af vindforholdene. Ferskvandstilførslen samt udvekslingen med den ydre del af fjorden fører til en ret kort opholdstid, som varierer mellem ca. 1 dag i vintermånederne og 3-5 dage om sommeren.

Usikkerhederne på beregningerne, som fremgår af Figur 4, viser at vandføringerne mellem den indre og den ydre del er relativt nøjagtigt bestemte. Derimod er der en relativ stor usikkerhed forbundet med beregningen af opholdstiden, hvilket formentligt primært skyldes, at volumenet er lille. Til trods for denne usikkerhed viser beregningerne tydeligt at opholdstiden er ret kort.

Resultaterne for den ydre del af fjorden, vist i Figur 5, viser at der foregår en stor udveksling mellem den ydre del af fjorden og Bælthavet mod nord, som er forbundet med en kraftig årstidsvariation. I vintermånederne omfatter denne udveksling vandføringer på $150\text{--}200\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Dette indikerer, at der foregår en kraftig blanding i den ydre del af fjorden. Den kraftige udveksling medfører samtidigt en relativ kort opholdstid på en lille uges tid om vinteren. I sommerhalvåret er

udvekslingen betydeligt mindre, med vandføringer under $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Dette medfører opholdstider i den ydre del på op til 4-5 uger. Usikkerhederne på beregningerne for den ydre del af fjorden viser at resultaterne er ret pålidelige. Hvor der optræder relativt store usikkerheder på vandføringerne, f.eks. i oktober, skyldes det formentligt at antagelsen om velblandede forhold i de to dele af fjorden er mindre god.

6. Konklusion

I denne rapport har vi vist hvordan bevarelse af salt og volumen, populært kaldes Knudsens Teorem, kan bruges til at kvantificere vandudskiftningen og opholdstiden i et givent kystnært område/en fjord. En væsentlig forudsætning for metodens anvendelse er at man kender ferskvandstilførslen til det givne område samt saltholdighederne af de vandmasser, som bliver udvekslet mellem området og det tilstødende hav. I denne rapport er metoden anvendt på Odense Fjord, hvor et stort antal CTD-profiler har vist at vandmasserne i dels fjordens to dele, dels i havet udenfor fjordens munding med god tilnærmelse kan anses for velblandede hver især.

Resultaterne for Odense Fjord, som bygger på observationer fra 1999, viser at både opholdstiderne og vandføringerne er forbundet med store variationer. I den indre del af fjorden er opholdstiden generelt ret kort og af få dages varighed, mens opholdstiden i den ydre del af fjorden varierer mellem ca. 1 og 5 uger. Der er generelt en betydelig årstidsvariation med korte opholdstider og en stor vandudveksling om vinteren samt lange opholdstider og lille vandudveksling om sommeren. Disse forhold skyldes variationer i bl.a. ferskvandsafstrømningen og blandingen af vandmasserne pga. vinden. Beregningerne viser også at usikkerhederne på resultaterne er relativt små. Dette viser at forudsætningerne for anvendelse af metoden generelt er opfyldte.

Den pågældende metode er alment anvendelig for kystnære områder og fjorde som har en lignende karakter, og som opfylder de samme forudsætninger. Hvis man ønsker at undersøge et givent system, er det dog vigtigt at man med udgangspunkt i målinger først finder ud af, hvilke forhold og processer der råder i systemet. Hvis betingelserne for anvendelse af Knudsens Teorem er opfyldt, kan man i givet fald benytte den pågældende metode til at beskrive systemet. Hvis ikke, er det muligt at man på anden vis er i stand til at beskrive og kvantificere vandudskiftningen og opholdstiden i systemet.

I denne rapport har vi også vist hvordan en beregning af usikkerhederne på resultaterne kan foretages. Enhver modeltilgang bør ledsages af en tilsvarende usikkerhedsanalyse. Hvis ikke, er det umuligt at bedømme om en given model og de tilhørende resultater er troværdige.

Referencer

Fischer, H. B., E. J. List, R. C. Y. Koh, J. Imberger, N. H. Brooks (1979) Mixing in coastal and inland waters. Academic Press, London, 499 pp.

Muste, M., L. Kyutae, J.-L. Bertrand-Krajewski (2012) Standardized uncertainty analysis for hydrometry: a review of relevant approaches and implementation examples. Hydrological Sciences Journal, vol. 57 (4), pp. 643-667.

UNESCO (1981) International oceanographic tables, Vol. 3. UNESCO Technical Papers in Marine Science, 39. UNESCO, Paris.

Appendix. Beregning af usikkerheder

Da de variable (ferskvandstilførsel og saliniteter) som indgår i beregningerne af vandføringer og opholdstider i den indre og den ydre del af Odense Fjord, er forbundet med usikkerheder, er de beregnede vandføringer og opholdstider ligeledes forbundet med usikkerheder. For at bestemme disse usikkerheder på vandføringerne og opholdstiderne benyttes metoden beskrevet i "Guide to expression of uncertainty in measurement", refereret i Muste et al. (2012). Generelt kan metoden

beskrives på følgende måde. Givet er funktionen f til beregning af størrelsen Y udfra de N uafhængige variable $X_1, X_2, \dots, X_N$, dvs.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N).$$

Værdierne, $x_1, x_2, \dots, x_N$, af de uafhængige variable er forbundet med usikkerhederne $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$. Den kombinerede usikkerhed, u_c , på den beregnede værdi, y , af Y bestemmes vha. en rækkeudvikling, hvor højere ordens led negligeres. Hvis usikkerheden på de uafhængige variable er indbyrdes ukorrelerede, kan den samlede usikkerhed bestemmes vha.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i).$$

Endeligt kan resultatet af beregningen inklusive et passende konfidensinterval udtrykkes som

$$Y = y \pm k u_c(y).$$

Hvis værdierne $x_1, x_2, \dots, x_N$, er bestemt udfra et stort antal målinger, og hvis disse er tilnærmelsesvist normalfordelte, kan usikkerhederne $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_N)$ beregnes som standardafvigelse på middelværdierne. Hvis k ('coverage factor') endvidere sættes til 2, vil ovenstående omfatte et konfidensinterval på 95%. Der henvises til Muste et al. (2012) for en mere grundig gennemgang.

Først bestemmes usikkerhederne på vandudvekslingerne dels mellem den indre del og den ydre del, dels mellem den ydre del og Bælthavet mod nord. For vandføringen fra den indre del til den ydre del kan usikkerheden beregnes vha. dette:

$$\omega_{I,1}^2 = \left\{ \frac{S_Y}{S_Y - S_I} \right\}^2 \cdot \omega_F^2 + \left\{ \frac{Q_F}{(S_Y - S_I)^2} \right\}^2 \cdot \{S_Y^2 \sigma_I^2 + S_I^2 \sigma_Y^2\},$$

hvor symbolerne for usikkerhederne på de forskellige variable er som anført i Afsnit 4. Usikkerheden på vandføringen fra den ydre del til den indre del er fuldstændig magen til. For vandføringen fra ydre del til Bælthavet mod nord kan usikkerheden beregnes vha. dette:

$$\omega_{Y,1}^2 = \left\{ \frac{S_B}{S_B - S_Y} \right\}^2 \cdot \omega_F^2 + \left\{ \frac{Q_F}{(S_B - S_Y)^2} \right\}^2 \cdot \{S_B^2 \sigma_Y^2 + S_Y^2 \sigma_B^2\}.$$

For vandføringen fra Bælthavet mod nord til den ydre del findes præcis det samme. Usikkerhederne på vandføringerne er funktioner af ferskvandsafstrømningen og saltholdighederne samt usikkerhederne på disse. Usikkerhederne på vandføringerne varierer derfor med tiden og er udregnet vha. de til enhver tid gældende værdier og indtegnet i Figur 4 og 5.

Dernæst bestemmes usikkerhederne på opholdstiderne i den indre og den ydre del. For den indre del findes dette (efter et par omskrivninger og lidt reducering):

$$\tau_I^2 = \left\{ \frac{S_Y - S_I}{S_Y} \right\}^2 \left\{ \frac{V_I^2}{Q_F^4} \omega_F^2 + \frac{1}{Q_F^2} \psi_I^2 \right\} + \left\{ \frac{V_I}{Q_F} \frac{1}{S_Y} \right\}^2 \left\{ \sigma_I^2 + \frac{S_I^2}{S_Y^2} \sigma_Y^2 \right\}$$

For den ydre del findes dette (efter en del omskrivninger og reducering!):

$$\begin{aligned} \tau_Y^2 = & \left\{ \frac{(S_Y - S_I)(S_B - S_Y)}{S_Y(S_B - S_I)} \right\}^2 \left\{ \frac{V_Y^2}{Q_F^4} \omega_F^2 + \frac{1}{Q_F^2} \psi_Y^2 \right\} + \dots \\ & + \left\{ \frac{V_Y}{Q_F} \cdot \frac{1}{(S_Y(S_B - S_I))^2} \right\}^2 \left\{ \{S_Y(S_B - S_Y)^2\}^2 \sigma_I^2 + \{(S_B - S_I)(-S_Y^2 + S_I S_B)\}^2 \sigma_Y^2 + \{S_Y(S_Y - S_I)^2\}^2 \sigma_B^2 \right\}. \end{aligned}$$

Som for vandføringerne gælder det at usikkerhederne på opholdstiderne varierer med tiden. Usikkerhederne er udregnet vha. de til enhver tid gældende værdier og er indtegnet i Figur 4 og 5.

Bilag. Figurer

Alle figurer er vedlagt som separate dokumenter i PDF-format. De tilhørende figurtekster er som følger.

Figur 1. Langsgående skitse gennem en fjord/kystnært område bestående af to dele adskilt af tærskler eller indsnævring. Det antages at vandmasserne i de to dele af det kystnære område samt i havet udenfor hver især er homogene med saliniteterne angivet ved symbolerne S. Ferskvandstilførslen samt ind- og udstrømningerne gennem de to indsnævring er angivet med symbolerne Q. Endeligt viser skitsen de primære blandingsmekanismer, dvs. vind og eventuelt tidevand, som kan optræde i forskellige grader gennem systemet. Skitsen svarer til forholdene i Odense Fjord, men den kan anvendes på andre områder med tilsvarende betingelser.

Figur 2. Kort over Odense Fjord. Gråtonerne viser dybderne med et interval på 1 m. I nærværende analyse af vandudskiftning og opholdstider er Odense Fjord opdelt i en indre og en ydre del, adskilt af en linje gående omtrent fra nordvest mod sydøst krydsende Vigelsø. De sorte prikker viser målestationerne i det nationale overvågningsprogram, hvorfra data til beregningerne er hentet via Miljøministeriets Overfladevandsdatabase (ODA). Udenfor kortet nord for Odense Fjords munding befinder sig en målestation, hvorfra data også er hentet.

Figur 3. Data for 1999 for Odense Fjord angivet som månedsmiddelværdier. Nederst, ferskvandsafstrømningen fra oplandet (nederst). Næstnederst, saliniteten i den indre del af fjorden, udregnet som månedsmiddelværdien af alle tilgængelige CTD-data (tyk linje) plus og minus en standardafvigelse (tynde linjer). Næstøverst, saliniteten i den ydre del af fjorden, udregnet som månedsmiddelværdien af alle tilgængelige CTD-data (tyk linje) plus og minus en standardafvigelse (tynde linjer). Øverst, saliniteten i Bælthavet nord for fjordens udmunding, udregnet som månedsmiddelværdien af alle tilgængelige CTD-data (tyk linje) plus og minus en standardafvigelse (tynde linjer).

Figur 4. Resultater af beregningerne af vandudskiftningen og opholdstiden i den indre del af Odense Fjord for 1999. Øverst, udstrømningen fra den indre del til den ydre del af fjorden (tyk linje) plus og minus 2 gange den beregnede usikkerhed (tynde linjer). I midten, indstrømningen fra den ydre del til den indre del af fjorden (tyk linje) plus og minus 2 gange den beregnede usikkerhed (tynde linjer). Nederst, opholdstiden (tyk linje) plus og minus 2 gange den beregnede usikkerhed (tynde linjer). Intervallerne mellem de angivne usikkerheder svarer til et konfidensinterval på 95%.

Figur 5. Resultater af beregningerne af vandudskiftningen og opholdstiden i den ydre del af Odense Fjord for 1999. Øverst, udstrømningen fra den ydre del af fjorden til Bælthavet mod nord (tyk linje) plus og minus 2 gange den beregnede usikkerhed (tynde linjer). I midten, indstrømningen fra Bælthavet mod nord til den ydre del af fjorden (tyk linje) plus og minus 2 gange den beregnede usikkerhed (tynde linjer). Nederst, opholdstiden (tyk linje) plus og minus 2 gange den beregnede usikkerhed (tynde linjer). Intervallerne mellem de angivne usikkerheder svarer til et konfidensinterval på 95%.

Figur 6. Side 1, oversigt over hvornår der er foretaget målinger af CTD-profiler på de seks stationer i og uden for Odense Fjord for 1999. Stationsnumrene er de betegnelser som er anvendt i Overfladevandsdatabase. Side 2-53, alle CTD-profiler plottet enkeltvist og opdelt efter de perioder af kort varighed som svarer til de lodrette røde linjer på side 1. CTD-profilerne er vist i form af dels densiteten som funktion af dybden, dels sammenhørende værdier af salinitet og temperatur. Densiteten er beregnet ud fra saliniteten og temperaturen, jævnfør UNESCO (1981).