

Dansk Vandbygningstek-  
nisk Selskab:  
Danske vandløb  
1987

1987-4

## DANSKE VANDLØB

Seminar i Ebeltoft, 23. november 1987

DANSK HYDRAULISK  
INSTITUT  
BIBLIOTEKET



**DANSK VANDBYGNINGSTEKNISK SELSKAB**

DANISH SOCIETY OF HYDRAULIC ENGINEERING

v/ H. F. Burcharth, AUC, Sohngårdsholmsvej 57, 9000 Aalborg, Tlf. 08 - 142333





# DANSK VANDBYGNINGSTEKNISK SELSKAB

DANISH SOCIETY OF HYDRAULIC ENGINEERING

v/ H. F. Burcharth, AUC, Sohngårdsholmsvej 57, 9000 Aalborg. Tlf. 08 - 142333

10.02.1989

HG/ABA

Til: Deltagerne på Seminar "Danske Vandløb" den 23. november 1987.

Att.: Hans Schrøder

Hermed fremsender vi ovennævnte bog indeholdende indlæggene fra seminaret.

Med venlig hilsen

DANSK VANDBYGNINGSTEKNISK SELSKAB

  
Helge Gravesen

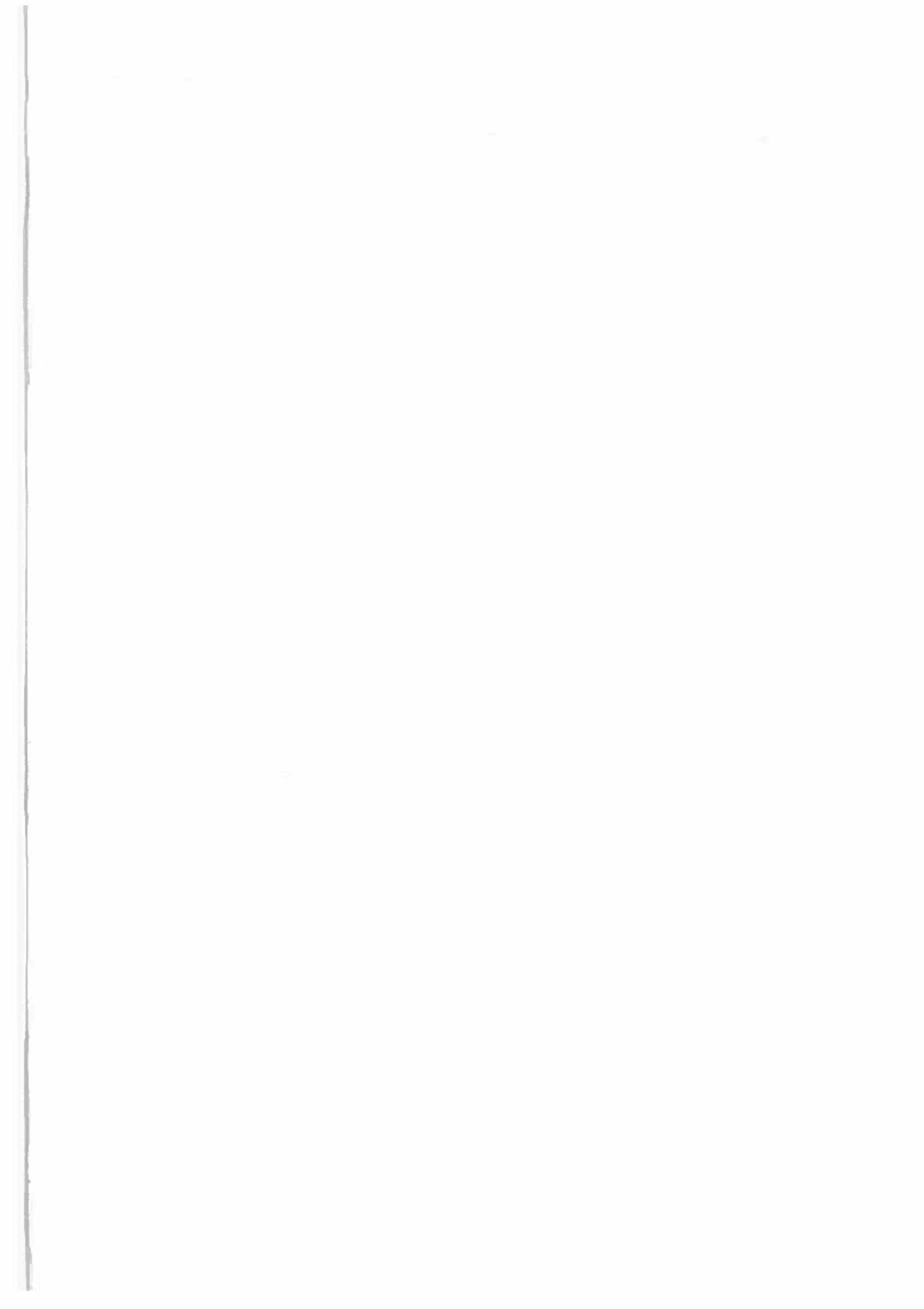
Arbejdsadresse:

Dansk Geoteknik as

Granskoven 6

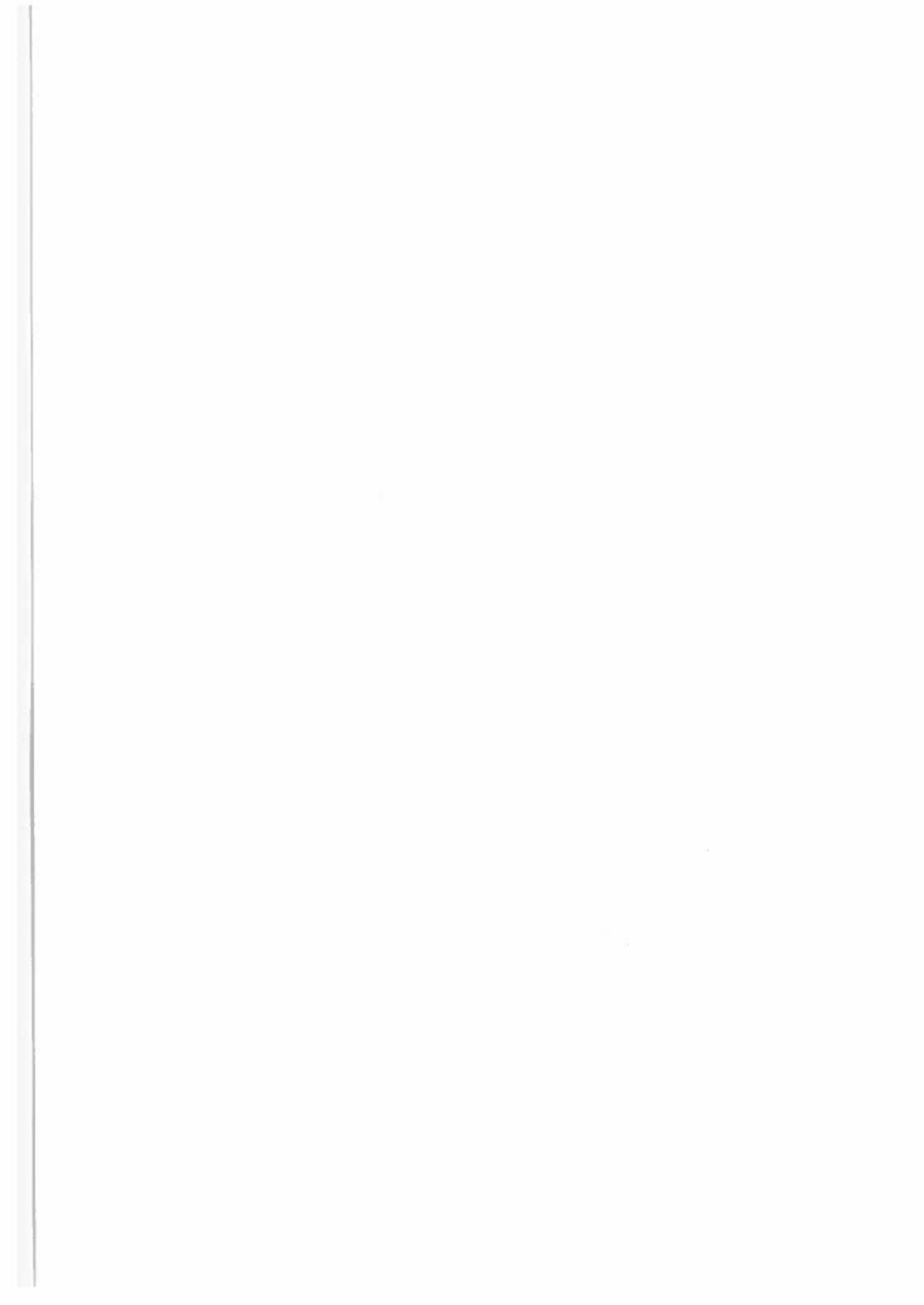
2600 Glostrup

Tlf. 02 45 99 99



# DANSKE VANDLØB

Seminar i Ebeltoft, 23. november 1987



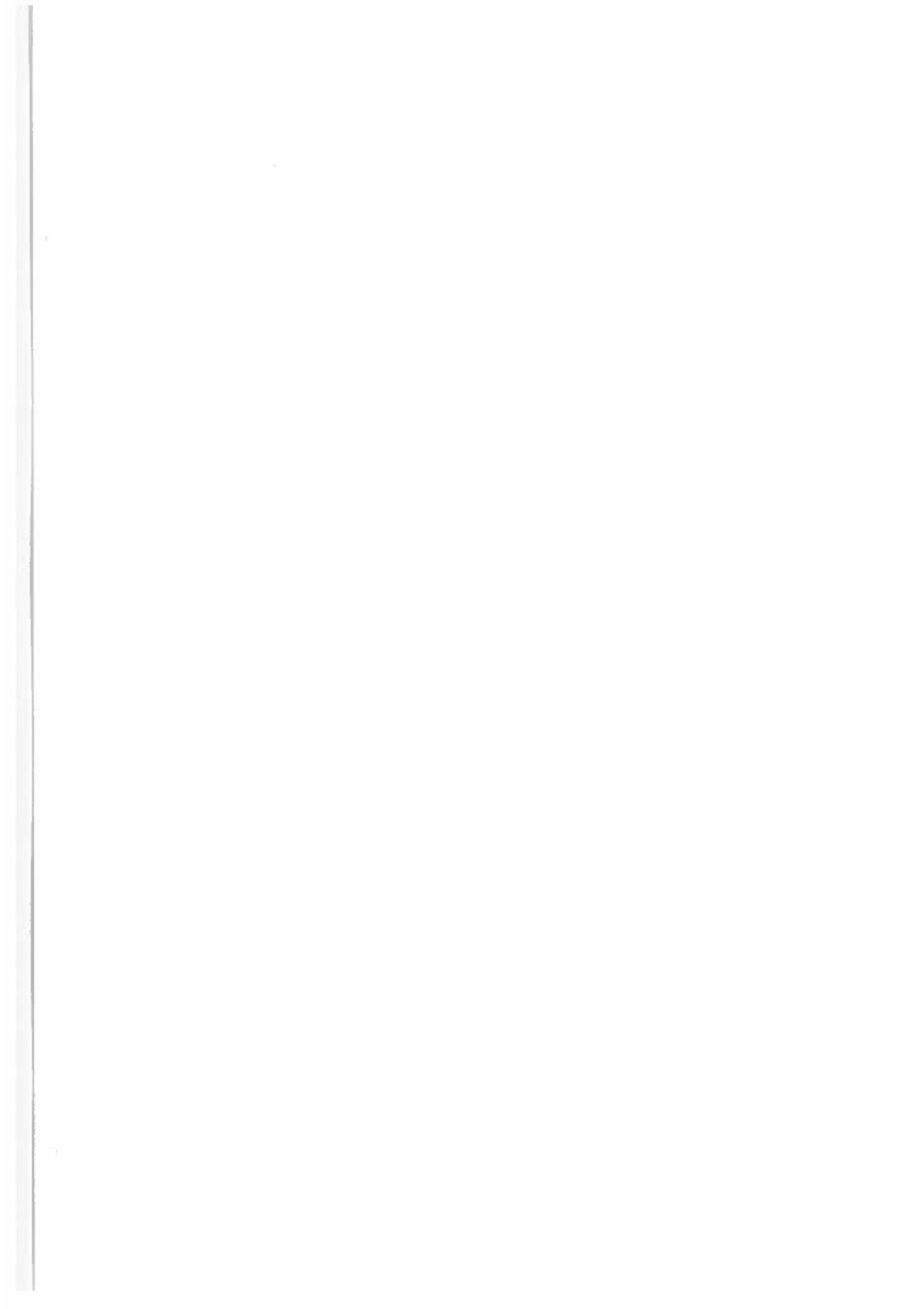
## Forord

Nærværende indlæg hidrører fra et seminar afholdt den 23. november 1987 af Dansk Vandbygningsteknisk Selskab om emnet:

### DANSKE VANDLØB

På selskabets vegne bringes hermed en tak til alle, der ved skriftlige bidrag eller deltagelse i diskussionen har medvirket til denne orientering om et vigtigt felt inden for vandbygningsteknikkens område.

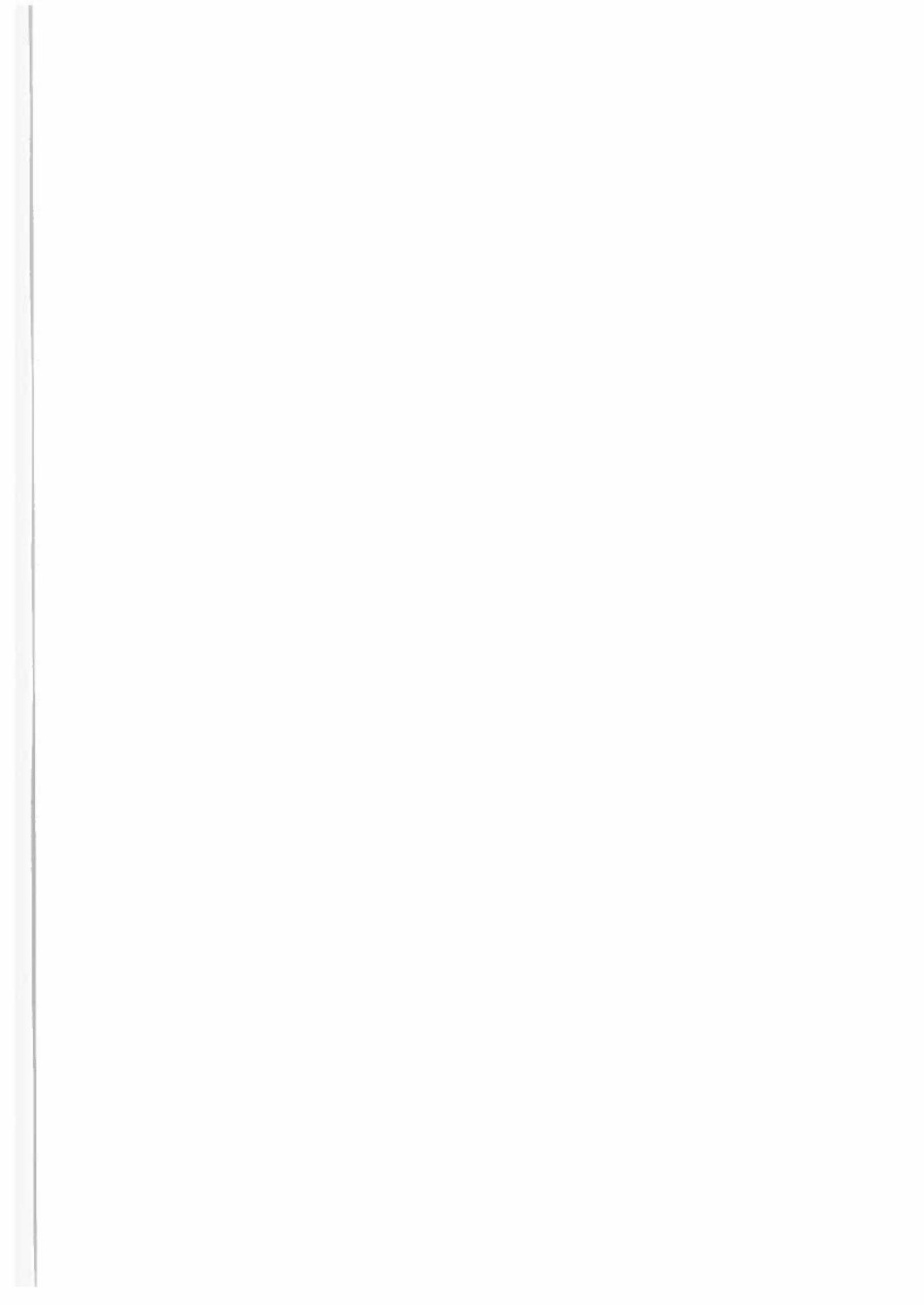
H.F. Burcharth  
formand





## INDHOLDSFORTEGNELSE

	side
Danske vandløb i historisk perspektiv Overingeniør, cand.polyt. Mogens Høst-Madsen Det Danske Hedeselskab	7
Grødens indflydelse på de hydrauliske forhold i vandløb Civilingeniør Lars Mikkelsen Inst. for Vand, Jord og Miljøteknik, AUC	23
Sedimenttransportens indflydelse på de hydrauliske forhold Civilingeniør, lic.techn. Kim Wium Olesen Dansk Hydraulisk Institut	41
Stoftransport og vandkvalitet Civilingeniør Torben Larsen Inst. for Vand, Jord og Miljøteknik, AUC	53
Matematisk modellering af danske vandløb (MIKE 11) Civilingeniør Karsten Havnø Dansk Hydraulisk Institut	71
Etablering af fiskepassager Ingeniør N. Lonnebjerg Ingeniørhøjskolen - Horsens Teknikum	79
Ingeniør-økologisk rådgivning vedr. Skjern Å og Ringkøbing Fjord Civilingeniør Hans Schrøder Dansk Hydraulisk Institut	91



## DANSKE VANDLØB I HISTORISK PERSPEKTIV

### 1. Vandløbsinteresser

Der har været og er stadig knyttet mange interesser til de danske vandløb.

Se fig. 1

#### 1.1 Drikkevand

I de første 5-6000 år, hvor Danmark har været beboet, har befolkningen nok fået en væsentlig del af sit drikkevand og øvrige husholdningsvand fra vandløbene. Takket være vort gode og regelmæssige grundvand og den tiltagende forurening af vandløbene har vandforsyningen de sidste 100-200 år været næsten 100% baseret på grundvand. Først i de senere år har man enkelte steder, såsom i København, p.g.a. ressourcernes knaphed været nødt til i en vis udstrækning at benytte overfladevand.

#### 1.2 Forsvar

Som et kuriosum kan nævnes, at når vikingeborgen Trelleborg ligger i kilen mellem Tude Å og Vårby Å, og Fyrkat ligger lige ved Onsild Å, skyldes det utvivlsomt, at man har villet drage nytte af åerne i forsvars øjemed.

#### 1.3 Møller - vandkraft

I hundreder af år har vandmøllerne spillet en overordentlig væsentlig rolle i landets kraftforsyning. Se fig. 2. Der har vel været ca. 3000 møller ved vandløbene. F. eks. findes en fortegnelse over ca. 100 vandmøller i det gamle Skanderborg amt.

De første møller er fra ca. år 1000. Antallet steg indtil omkring år 1600, hvorefter krige og sygdomme satte væksten i bero.

Sent i 1700-tallet sattes møllerne i hartkorn og pålagdes således en ekstraskat foruden landgilde. Til gengæld blev det et privilegium at være møller. Mølleren

tog med et bestemt mål 1/18 ud af hver sæk korn som betaling for malingen. Først i 1862 blev møllernæringen givet fri (ved lov af 1852).

Det kunne være fristende at omtale enkelte af de gamle møller:

Mølleåens 9 møller mellem Furesøen og Øresund stammer for en dels vedkommende fra den tidlige middelalder. Her har været kornmøller, krudtmøller, kobbermøller, stampe-møller, valkemøller, valsemølle til møntslagning, papirmølle, slibeværk, klædefabrik, knivfabrik.

Brede mølle havde en periode 600 ansatte, men på det tidspunkt var der foruden vandkraften også forskelligt hjælpemaskineri.

I virkeligheden samledes omkring Mølleåen et af vore første industrisamfund.

Jedsted Mølle ved Kongeåen omtales allerede i Kong Valdemar den 2.'s Jordebog 1231. Faldhøjden er kun ca. 1,7 m. Der er senere installeret 2 turbiner med i alt 77 KW og desuden en hjælpemotor. Der produceres ca. 200.000 KWT/år og fordelingsnettet er på 884 km. Der er senere etableret dambrug her.

Tangeværket, etableret 1918-21. Danmarks største vandkraftværk med et fald på 10 m fra Tange sø. Søen oversvømmede 1000 tdr. land, hvorved 22 gårde og 5 huse blev oversvømmet.

Værket har 3 turbiner og dynamoer, som tilsammen kan yde 3600 KW og 10-11 mill KWT/år, det er ca. 1% af ydelsen på det norske Rjukan værk.

Harteværket ved Kolding har landets største faldhøjde på 24 m. Produktionen er her 1,5 - 2 mill. KWT/år.

#### 1.4 Vanding

Princippet er at lægge en vandingskanal med mindre fald end vandløbet langs kanten af ådalen. Når vandspejlet er kommet op over terræn, kan det udledes over engene i vandingsrender, hvorved opnås både en vandings- og en gødningsvirkning. Selve processen er ret arbejdskrævende og er nu helt gået af mode, bl.a. fordi enghøet mistede

sin betydning ved anvendelse af bl.a. roer som vinterfoder.

Anlæg af store fælles vandingskanaler var en af Hedeselskabets første opgaver efter grundlæggelsen i 1866. Mest kendt er St. Skjern å kanal, der stadig fører vand, men hovedsageligt til dambrug.

Der tages stadig en del vand fra vandløbene til oppumpning i mekaniske vandingsanlæg.

### 1.5 Dræning

Vandløbenes primære opgave har naturligvis altid været at aflede regnvandet. Men fra 1847 har man fremmet denne naturlige afvanding ved at dræne marker til nedgravede rørledninger, der blev lagt med åben fuge, hvorigennem vandet kunne sive ind i rørene, de såkaldte drænledninger.

I visse tilfælde, hvor vandløbene lå for højt i forhold til de omliggende arealer, har man søgt dyrkningsmulighederne forbedret ved enten at sænke vandløbet ved en såkaldt regulering<sup>x)</sup> eller ved at løfte vandet op i vandløbet ved pumpe. Vindmotorer har i mange år givet mulighed for at løfte vandet, men i 1870'erne kom dampmaskinen ind som en mere stabil drivkraft. Senere blev den afløst af dieselmotorer og nu særlig efter 30'erne af el-motorer.

### 1.6 Afledning af spildevand

Det brugte vand har selvfølgelig altid på een eller anden måde fundet tilbage til vandløbene, men indtil for 100 år siden var mængderne ret ubetydelige. I de større byer gav spildevandet anledning til et ret stort svineri, når det løb af i rendestenene. Først koleraepidemien i København i 1853 gav anledning til, at man virkelig begyndte at gøre sig tanker om et egentligt kloaksystem. Det var vel nok overgangen fra det økologisk ganske gode natmandssystem til vandskylende toiletter, der lagde grunden til en meget alvorlig udvikling for vandløbene. Og det skete så sent, at jeg og mange andre kan huske at have set natmandssystemet i funktion.

Men her er vi midt i et af tidens store problemer: Hvor

x) Se fig. 3

meget er vi villige til at betale for opretholdelse af en rimelig kvalitet i vore vandløb og have - og hvad er en rimelig kvalitet?

Vi kan rense vandet til en hvilken som helst renhedsgrad, men det koster dyrt, og vi skal stadigvæk kunne anbringe restprodukterne forsvarligt.

### 1.7 Fiskeri

Naturligt fiskeri har altid fundet sted ved de større vandløb, bl.a. koncentreret i lakse- og ålegårder.

Specielle dambrug blev drevet allerede omkring de gamle klostre, men det tog et voldsomt opsving efter 40'erne, ikke mindst ved udnyttelsen af gamle nedlagte engvandingsanlæg. Fra 1950 - 78 steg produktionen fra 2 mill. kg til 17 mill. kg svarende til ca. 300 mill. kr. 97 % af produktionen eksporteres.

Ved undersøgelsen af vandløbene i et jysk amt i 70'erne viste det sig, at dambrugene forurenede lige så meget som det øvrige spildevand.

## 2. Konfliktmuligheder

Umiddelbart ser det ud til, at vandløbene kan tjene en masse lukrative, positive formål. Og skulle vandløbene give anledning til negative hændelser, oversvømmelse, dårlig afvanding, kan man bekæmpe disse med beskyttende diger eller ved vandløbsreguleringer til sænkning af vandstanden.

Alt skulle således være såre godt. Men det viser sig alligevel, at der i forbindelse med udnyttelsen af vandløbene kan opstå mange interessekonflikter:

Opstemninger til møller, dambrug eller vandingsanlæg giver anledning til dårlig afvanding ovenfor opstemningen. Dette kan kun klares ved at yde erstatning til de ramte.

En mølle eller et elværk, der har fået ret til udnyttelse af en å's vandføring, kan sætte sig imod, at vandet ovenfor benyttes til vanding, idet det formindsker deres udnyttelsesmuligheder. Således var der tidligere heftig strid mellem møller ved Gudenå og bønder ovenfor møllerne.

Hvis en gammel vandingsopstemning overgår til udnyttelse af et dambrug, bliver de ovenfor liggende lodsejere pludselig an-

svarlig for fiskedød i dambruget, hvis der sker et uheldigt udslip af giftigt ensilagevand eller møddingafløb.

Omvendt kan et dambrug forurene nedenfor liggende søer og vandløb alvorligt, jfr. Hald sø, Rørbæk sø.

Tilgrænsende lodsejere kan synes, at det er naturligt at bruge vandløbet til oppumpning af vandingsvand. Men der er netop mest brug for vandingsvand i den periode, hvor vandføringen er mindst, og derved kan alle former for fiskeri i vandløbet skades, ligesom muligheden for fortynding af spildevand formindskes.

Tilførsel af dræningsvand kan i visse områder give skadelige okkertilførsler til vandløbene.

Afledning af spildevand til vandløbene kan give anledning til forøget grødevækst og fiskedød.

Overgødning af marker kan give anledning til forøget tilførsel af næringssalte til skade for dyrelivet særligt i søerne.

Lystfiskerne i f.eks. Skjern å kan ikke lide, at erhvervsfiskerne i Ringkøbing Fjord sætter omfattende net op ved å-udmundingen og fanger laksen her, når den er på vej op i åen.

Kanofolket og speedbåde vil gerne nyde åernes og søernes herligheder, men dette sætter naturfredningsinteresser sig imod.

Lodsejerne vil gerne gennemføre reguleringsarbejder og pumpeanlæg efter behov, men dette kan støde på fiskeri- og naturfredningsinteresser.

### 3. Vandløbslovgivning

En styring af alle disse modstridende interesser har derfor været nødvendig, og der er opstået en særlig vandløbslovgivning, medens særlige vandløbsretter har forvaltet disse love og dømt de stridende parter imellem.

Vandløbsloven har udviklet sig gennem århundreder og har givet anledning til en betydelig retspraksis. De ældste skrevne regler findes i landskabslovene og handler fortrinsvis om det rindende vands benyttelse som kraftkilde og om fiskedamme. Man kan kun gisne om deres alder, idet disse benyttelsers anerken-

delse som et retsbeskyttet gode antageligt har forbindelse med munkeordenernes indvandring omkring år 1100.

Fra Christian den IV's tid kan man finde bestemmelser om vandløbs vedligeholdelse m.v., hvoraf de væsentligste findes i Recessen af 1643 og hænger sammen med den fiskale interesse i vandmøllernes trivsel. De gamle regler optoges i Danske Lov i 1683.

Forordning af 25/6 1790 indførte offentligt tilsyn med de større åer. Landboreformlovgivningen knæsatte princippet om, at der knytter sig så store interesser til vandløbene, at

- 1) de må vedligeholdes
- 2) det må være muligt at gennemtvinge forbedring af de bestående forhold
- 3) omkostningerne må fordeles mellem de grundejere, som har eller får gavn af vandløbene.

Det blev reglen, at projektbedømmelsen henlagdes til særlige uvildige organer.

Lov nr. 63 om vands afledning og benyttelse af 28/5 1880, der var grundig forberedt, blev ændret så meget af rigsdagen, at den ikke blev en forbedring.

Fra 1929-1949 arbejdedes med revision, og så kom lov nr. 214 af 11/4 1949, Vandløbsloven.

Efter lovens § 2 har afledning af vand fortrinsret for al anden benyttelse af vandløbene.

Der er i loven også bestemmelser vedr. afledning af spildevand, hvori bl.a. fastslås, at spildevandsanlæg skal udføres, vedligeholdes og benyttes således, at afledningen ikke skader vandløbets naturlige tilstand.

Med den hastigt accellererende forurening har det nok visse steder knebet med at overholde denne bestemmelse, men i øvrigt må det siges, at vandløbsloven af 1949 fungerede godt og gav anledning til et minimum af administration.

Af senere tilkommende ændringer til loven skal nævnes, at i 1963 overgik vedligeholdelsen af de offentlige vandløb fra bredejerne til amter og kommuner.



I 1973 skete der den afgørende ændring, at spildevandsbestemmelserne udgik af vandløbsloven og blev reguleret ved miljølovens kap. 4, og at kompetencen vedr. spildevand overgik fra vandløbsretterne til de kommunale råd.

I 1978 ophævedes vandløbslovens regler om indvinding af overfladevand, som samtidigt overførtes til vandforsyningsloven.

Endelig blev 1949-vandløbsloven afløst af en ny vandløbslov, lov nr. 302 af 9/6 1982, der i henhold til bekendtgørelse af 7/9 1983 blev sat i kraft den 1/11 1983.

Det kunne nok være formålstjenligt at se nøjere på de ændringer, der blev gennemført, da den gamle vandløbslov af 1949 blev afløst af den nye lov.

En afgørende ændring var, at kompetencen på det lokale og regionale plan til at træffe afgørelser i de tekniske sager om anlægsarbejder, reguleringer og vedligeholdelse af vandløb overgår fra landvæsensretterne til de kommunale råd. Herefter skal landvæsensretterne kun afgøre økonomiske sager om erstatning eller bidragsfordeling, som de kommunale råd ikke har kunnet forlige.

Afgørende er også, at hvor afledning af vandet hidtil har haft fortrinsret for al anden benyttelse af vandløbene, indføres i den nye lovs formålsparagraf, § 1:

"Ved denne lov tilstræbes at sikre, at vandløb kan benyttes til afledning af vand, navnlig overfladevand, spildevand og drænvand.

Stk. 2. Fastsættelse og gennemførelse af foranstaltninger efter loven skal ske under hensyntagen til de miljømæssige krav til vandløbskvaliteten, som fastsættes i h.t. anden lovgivning."

Hovedsigtet med denne nye bestemmelse i loven er, at det tilstræbes at sikre, at vandløbenes benyttelse sker under hensyntagen til den målsætning, der er fastlagt for det enkelte vandløb i recipientkvalitetsplanen efter miljøbeskyttelsesloven § 61 e.

Herudover bør vandindvindings-, frednings- og landbrugsplaner tages i betragtning ved administration af loven.

En nyskabelse er endvidere, at vandløbsmyndighederne får mulighed for evt. med tilskud at restaurere vandløb. (Forbedre mulighederne for et alsidigt dyre- og planteliv i vandløbene).

Der er indført bestemmelser om, at afskåret grøde normalt skal opsamles (§ 27, stk. 3).

Der skal inden 1993 udarbejdes nye regulativer for vandløbene, (§ 12). Heri angives målsætningen for de enkelte vandløb.

Der åbnes mulighed for, at vandløbene vedligeholdes efter vandføringsevne og ikke udelukkende efter visse fastsatte geometriske dimensioner.

Danmarks Naturfredningsforening og Danmarks sportsfiskerforbund gøres klageberettiget.

Endelig giver lovens § 3, stk. 4 miljøministeren tilladelse til i nærmere afgrænsede områder til imødegåelse af virkningerne af okkerudledning at fastsætte bestemmelser om regulering af dræningsrettighederne. Se nærmere lov af 30/4 1985, der trådte i kraft 1/7 1985 efter en 3-årig forsøgsperiode fra 1/7 1981 til 84. Der kan efter denne lov gives hel eller delvis støtte til rensningsforanstaltninger (f.eks. kalkfældning).

Som appelinstant for de kommunale myndigheders tekniske afgørelser fungerer Miljøstyrelsen.

Man kan ikke afslutte omtalen af vandløbslovene uden at nævne også grundforbedringslovene fra 1921, 1933, 1949 m.v. og landvindingsloven af 1940, der ved at give lån og tilskud til grundforbedrings- og landvindingsarbejder var årsag til en meget stor del af de arbejder, der gennemførtes i h.t. vandløbsloven.

Efterhånden er tilskuddene først til landvinding og senere til grundforbedring faldet væk, hvilket dels hænger sammen med en øget miljøinteresse og dels kan begrundes med, at hvor vi før importerede meget korn, så oplagres der nu korn, som det er vanskeligt at afsætte.

#### 4. Vandløbsretter

For at administrere lovene omkring rettighederne til vandløbene har man fra omkring 1750 kendt til landvæsenskommissioner. De var først kun rådgivende, men blev fra 1781 besluttende. De fungerer endnu omend med stærkt begrænsede beføjelser.

Samtidigt med vandløbsloven af 1949 kom også lov nr. 213 af 31/3 1949 om landvæsensretter.

Landvæsensnævn tog sig af private vandløb og sognevandløb.

Landvæsenskommissioner tog sig af amtsvandløb og var ankeinstans for nævnene.

Overlandvæsenskommissionerne var ankeinstans for landvæsenskommissionerne.

Retterne administrerede lovene ved at godkende projekter, for-

dele udgifterne, tildele rettigheder m.v., men de fungerede også som ret ved at afsige kendelser, dømme i stridigheder o.s.v.

Fra 1933 suppleredes med afvandingskommissioner, særlig indenfor grundforbedrings- og landvindingssager.

Det er mit indtryk efter deltagelse i utallige vandløbsretsmøder, at systemet fungerede godt og smidigt. F. eks. er det utroligt få indsigelser, der har været m.h.t. fordelingerne af anlægs- og driftsomkostninger imellem lodsejerne i selv meget store sager.

Blandt vandløbsretterne indtager den Dansk/Tyske Grænsevandløbskommission en særstilling. Den blev skabt i 1922 på grundlag af en Dansk/Tysk Traktat med det formål at ordne problemer vedr. grænsevandløbene.

Ca. 2/3 af grænsen udgøres af grænsevandløb. Der er i de 65 år foregået mange reguleringer af grænsevandløbene, og de har medført adskillige grænseflytninger, men det er gået fredeligt til. Det er en stor fordel, at en sådan grænsevandløbskommission har mandat til at afsige kendelser, idet man ellers i tilfælde af uenighed kun har 2 muligheder: enten at lade problemerne ligge uløste - eller at erklære krig! Problemerne har hidtil været løst så godt, at der aldrig har været behov for at nedsætte den overgrænsevandløbskommission, som traktaten hjemler mulighed for.

## 5. Tanker og fremtidsvisioner

Det er på sin vis naturligt, at de kommunale råd overtager vandløbsmyndigheden for koordinationen imellem alle interesserne vedr. vandløbene, og de skulle have gode muligheder derfor. Man kan her sammenligne med, at myndighederne på lignende vis fungerer som vejmyndighed. Man kan dog ikke nægte, at der kan opstå ubehagelige situationer, hvor de kommunale råd selv har væsentlige interesser i de sager, som de skal pådømme. I sådanne tilfælde var man måske bedre tjent med de helt uvildige landvæsenskommissioner ledet af en dommer. Efter de nye regler er mulighederne større for, at der i ordets dårlige betydning kan "gå politik" i vandløbssagerne.

Det er måske en gevinst, at appelinstansen her er landsomfattende, således at ensartede regler efterhånden kommer til at gælde.

Landvæsenskommissionsbehandlingen af sagerne medførte den fordel, at man her havde teknikere, jurister og lodsejere samlet ved behandlingen af sagerne, og eventuelle ændringsforslag fra lokal side, som kunne mindske ulemper og deraf affødte erstatninger, blev behandlet på stedet. Den nye lov medfører en teknisk behandling ved kommunerne og en økonomisk ved kommissionerne, og en smidig sagsbehandling og eventuelle rationelle ændringer af projektet bliver meget kompliceret at gennemføre. Også hvis en sag ankes, kan denne opdeling give anledning til komplikationer.

Man må gøre sig klart, at fastlæggelsen af kvalitetskravene til de enkelte vandløb ved gennemførelsen af recipientkvalitetsplanen kan få endog meget store økonomiske konsekvenser. Man kan tænke sig, at hvis det fastslås, at et vandløb skal være ørredvand, bliver konsekvensen så store rensningskrav, at en industrivirksomhed må lukke. Det er muligt, at det er den rigtige løsning, men det kan også være, at en mere afbalanceret fastlæggelse af kravene til recipienten var på sin plads.

I forbindelse med restaurering af vandløb fastslås det i lovens § 37, stk. 4, at enhver, der lider tab ved en restaurering, har krav på erstatning. Man må i den forbindelse anbe-

fale landbruget at være på vagt, idet en lempeligere vedligeholdelse samt indbygning af slyngninger i vandløbene meget vel kan give anledning til forringede afvandingsmuligheder på længere sigt.

Der foregår for tiden en diskussion om, hvorvidt myndighederne kan udvide bredden af beskyttelsesbræmmen langs vandløb, uden at det kaldes ekspropriation og udløser erstatning til ejerne. Nogle amter er allerede ved at udvide den generelt fra 1-2 m, og der har været tale om yderligere udvidelser. Det vil næppe være rigtigt at gøre dette uden erstatning, hvis det ikke netop er nødvendigt for vedligeholdelsen, men begrundes med ønsket om at forbedre miljøet.

Det er godt og rigtigt, at man nu overalt har fået øjnene op for, at det er vigtigt at gøre en stor indsats for at bevare et godt vandløbsmiljø. Blot kan man håbe på, at de nødvendige investeringer vil blive prioriteret således, at de vil ske dér, hvor man får størst udbytte af hver investeret krone, idet der også på dette felt er grænser for vor formåen. Man kan godt blive lidt nervøs, når man ser, hvor firkantet man i regeringens handlingsplan fastlægger kravene til reduktionen i vandløbenes indhold af skadelige stoffer. En større afbalancering m. hensyntagen til vandløbenes størrelse, deres recipient og deres mulige passage af søer m.v. ville have givet løfte om en bedre nyttevirkning.

Der foregår netop nu på folketingets foranledning et større projekteringsarbejde vedr. Skjern å, formentlig med det formål at forbedre miljøet i Ringkøbing Fjord og vedr. åen. Det kan synes rimeligt at gøre en indsats for at bevare Ringkøbing Fjords flora og fauna. Der kan jo også være nogle, der mener, at Skjern Å området bør udformes på en anden måde. Men i så fald var det nok rimeligst at starte med en undersøgelse af, hvad der havde forårsaget de uønskede påvirkninger på flora og fauna og derpå studeret, hvilke ændringer i hele nedbørsområdet, der vil give den største effekt.

Jeg kan derfor blive betænkelig, når jeg hører, at det politiske oplæg går ud på, at Skjern å's selvrensningsevne så vidt muligt skal føres tilbage til, hvad den var før reguleringen i 60'erne. Det er nok størrelsesordenen, hvis man antager, at

ca. 95 % af de næringssalte P og N, som tilføres Skjern Adalen ved Borris også videreføres til Ringkøbing Fjord. Jeg tvivler på, at retableringen af åens slyngninger vil forøge selvrensningen mere, end at ca. 90 % af næringssaltene stadig vil finde vej til fjorden, hvorefter miljøforbedringen formentlig vil være minimal. Muligvis vil ændringen af sluseregulativet ved Hvide Sande, som man nu forsøger sig frem med, eller forøgelse af rensning af byernes afløbsvand eller rensning af afløbet fra nogle brunkulslejer, eller ændring af forholdene ved oplandets dambrug give en væsentlig større effekt. Man må håbe, at en saglig prioritering her må gå frem for en usaglig politisering. Det vil i hvert fald blive spændende, hvis et projekt når frem til behandling efter den nye vandløbslov, hvor også lodsejernes mening vil komme frem, og hvor man kan håbe på en saglig debat til løsning af problemerne.

Jeg har søgt i det foregående at give et lille indtryk af de ofte meget store interessekonflikter, som udnyttelsen af vore vandløb har medført, og som man har søgt at løse gennem vandløbsloven og dens "barn" miljøloven. Spændingerne er ikke blevet mindre med tiden, men vi må håbe på, at problemerne kan klares på en måde, der tilgodeser såvel naturinteresserne som vor frie bondestands og vor industris rimelige livsbetingelser.

# Vandløbsinteresser

## Lukrative interesser:

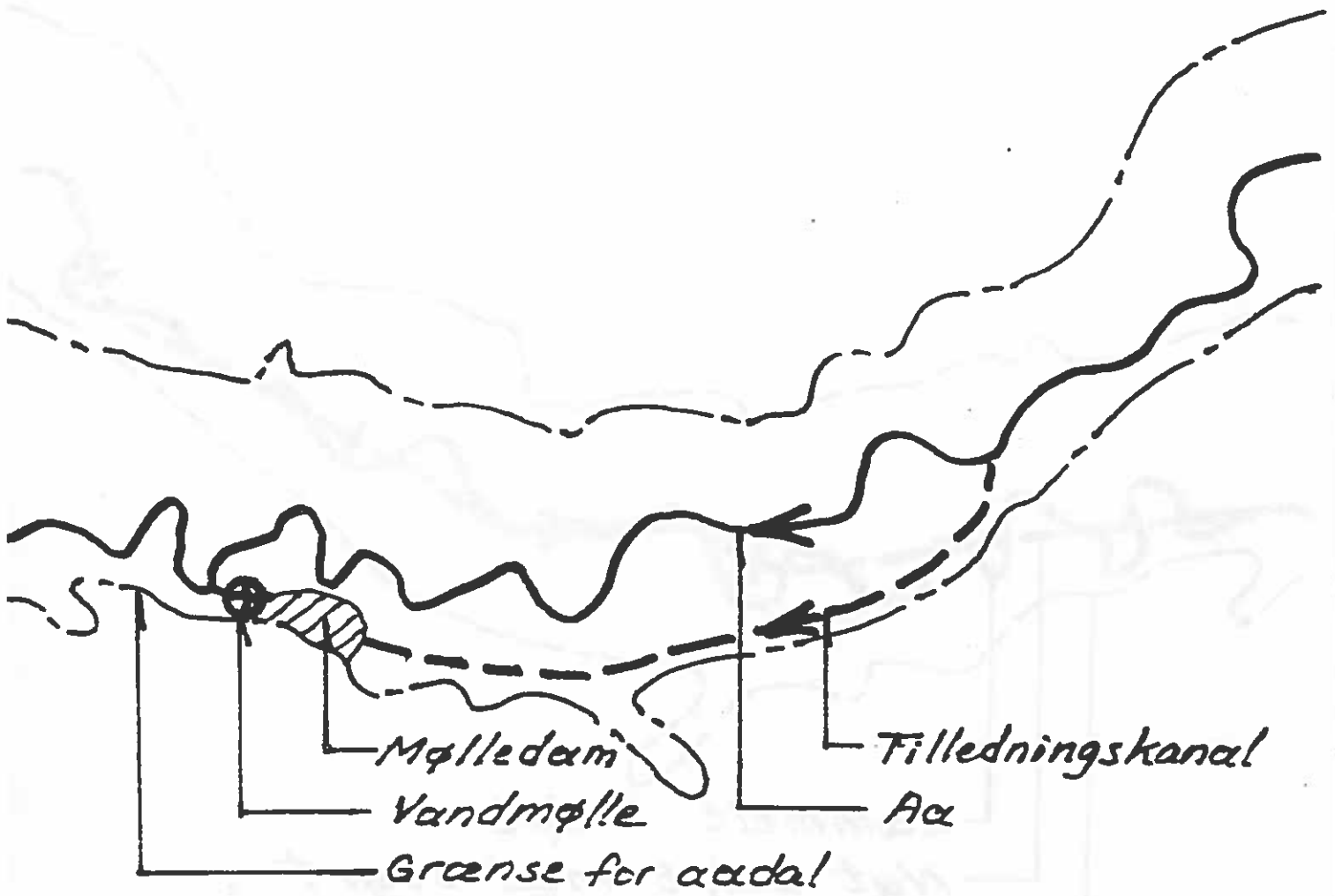
Drikkevand  
Forsvar  
Vandkraft-Møller  
Vanding  
Dræning  
Afløbning af spildevand  
Fiskeri  
Dyreliv  
Besejling  
Herligheder

## Defensive Interesser

Højt grundvandsspejl  
Oversvømmelser

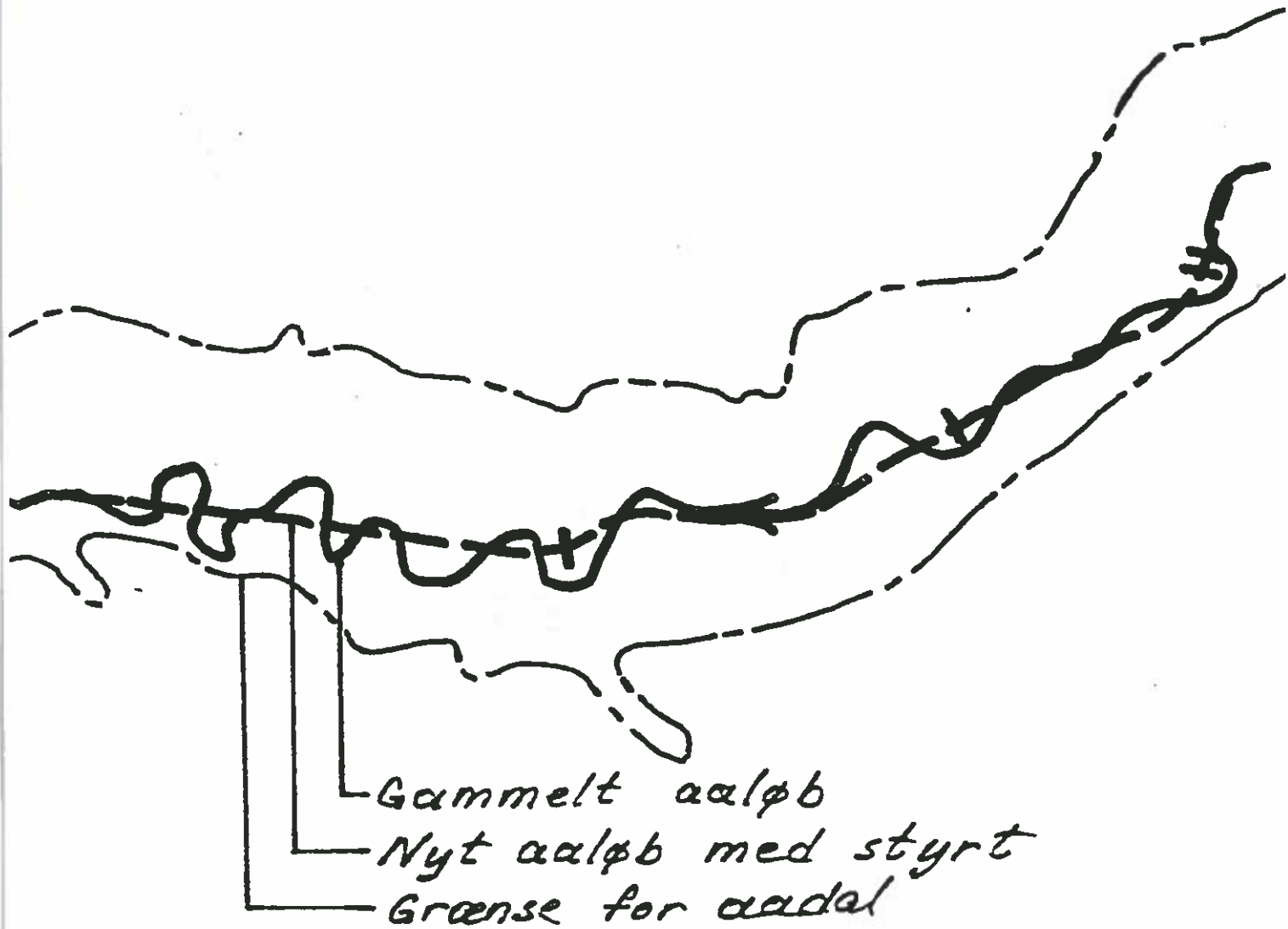
Figur 1





## Vandmølle med kanal

Figur 2.



# Vandløbsregulering

Figur 3

INSTITUTTET FOR VAND, JORD OG MILJØTEKNIK

GRØDENS INDFLYDELSE PÅ  
DE HYDRAULISKE FORHOLD

af

Lars Mikkelsen

Februar 1988

Indhold:	side
1. Planterne i vandløbene.....	2
2. Grødens indflydelse på strøm, forskydningsspænding og energiforhold.....	3
3. Ændringer i vandløbets tværprofil.....	6
4. Grøde: Den variable ruhed.....	8
5. Grødens indflydelse på Manning-tallet.....	9
5.1 Forudsætninger og variation ved varierende vandføring.....	9
5.2 Danske vandløb: Eksempler.....	11
6. Q-H-kurver.....	12
7. Biomasse som indikator for hydraulisk modstand: Diskussion.....	14
8. Litteratur.....	16

### 1. Planterne i vandløbene

Vandløbene frembyder forskelligartede miljøer for fremvækst af vandplanter. Variationen af strømhastigheden er stor, og strækker sig fra stærk strøm, som kan transportere sten til praktisk taget stillestående områder med aflejring af sand eller organisk materiale.

I de fleste offentlige vandløb skæres grøden een eller flere gange om året, hvorved de forskellige arter får forskellige betingelser for frem- og genvækst: Bestemte arter af vandplanter dominerer. I uforstyrrede meandrerede vandløb vil variation i dybder og strømhastigheder ofte være stor. De forskellige arter af vandplanter har forskellige optimale betingelser, og i sådanne vandløb kan man derfor finde et bredt spektrum af arter og variation i planternes fordeling.

For vandplanterne som helhed kan man ikke relatere den hydrauliske modstand til een eller flere "planteparametre". Planter fra forskellige arter har forskellig form og morfologi og kan sidde tæt eller spredt. Det vigtigste er måske, at planternes densitet varierer forholdsvis meget, generelt mellem 0,3 og 0,9 g/cm<sup>3</sup>. Det er nemlig vægtfyldeunderskuddet, som holder planterne oppe i vandet og derved giver den hydrauliske modstand: Planterne har ingen stivhed.

Især i mindre vandløb vil planternes fordeling være af stor betydning for den hydrauliske modstand. Nogle arter danner grødeøer, hvor de enkelte plantedele sidder tæt sammen. Strømhastigheden ved siden af grødeøen vil øges og evt. gøre det for vanskeligt for planter at etablere sig. En meget almindelig plante af grødeø-typen er vandranunkel, fig. 1.

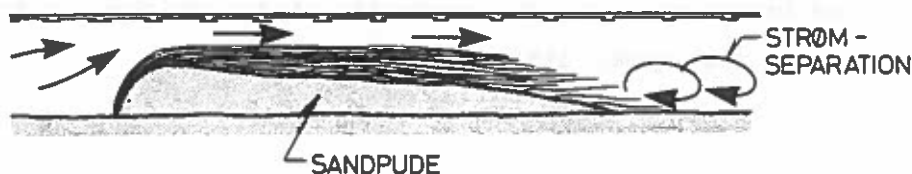


Fig. 1: Grødeø af vandranunkel

Andre arter kan etablere sig uden nogen tilsyneladende systematisk fordeling.

Den vigtigste art er enkelt pindsvineknop, fig. 2.



Fig. 2: Enkelt pindsvineknop (nederst i billedet)

Planten har op til ca. 1 cm brede båndblade i indtil 2-3 m's længde. Vægtfyldeunderskuddet er stort og planten kan derfor have stor betydning for den hydrauliske modstand.

I store vandløb med vanddybder på op til 1-2 m vil grøden udvikles sent p.g.a. den relativt ringere lysmængde; her findes evt. overvejende grøde ved bredderne. Hvis den generelle strømhastighed er større end ca. 0.60 m/sek. forekommer ikke planter i vandløb, (4).

## 2. Grødens indflydelse på strøm, forskydningsspænding og energiforhold

Grødeøer eller ansamlinger af planter kan have en tendens til at dannes "i ly af hinanden". I mindre vandløb kan man da undertiden observere "strømrender", hvor strømhastigheden evt. er øget i forhold til en situation uden grøde, fig. 3. Bag grødeøerne kan der da findes mere eller mindre "strømdøde" områder.

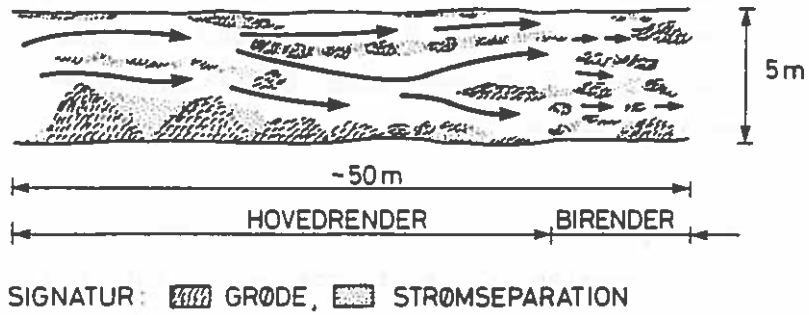


Fig. 3: Eksempel på strækning i vandløb med "strømrrender", Surbæk i Sønderjylland. Grundkort efter (11)

Begrebet "strømrrender" bør ikke bruges ukritisk, ofte er forholdene i vandløbet meget variable, se fig. 3 th.

I vandløb med hyppig grødeskæring og forekomst af pindsvineknop vil denne art kunne danne et tæt græslignende tæppe på bunden. Strømmens fordeling over vertikalen vil da ændres, fig. 4. Forsøg med pseudo-vandplanter (2) og (12) indikerer, at hastigheden kan regnes tilnærmelsesvis konstant i de nederste 2/3 af planteområdet. Ved oversiden af planterne er hastighedsgradienten stor; over vandplanterne er hastigheden muligvis logaritmisk fordelt (6).

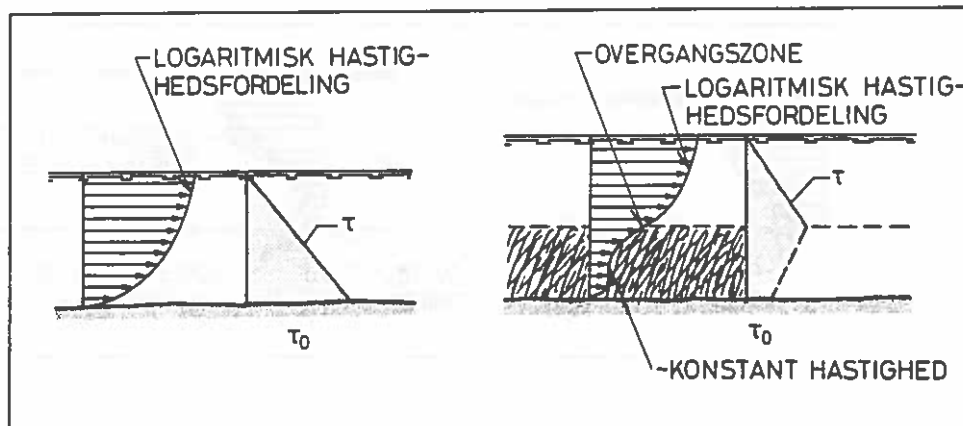


Fig. 4: Hastigheds- og forskydningsspændingsfordeling i vandløb uden grøde (tv) og med jævnt fordelt grøde (th). Det forudsættes, at grøden er forholdsvis tæt

Planternes tilstedeværelse betyder, at forskydningsspændingen ved bunden reduceres, idet planterne overfører vandrette kræfter til bunden. Transportkapaciteten vil da reduceres, og planteområdet er altså et potentielt sedimentationsområde.

I modsætning til, hvad man måske umiddelbart skulle tro, betyder planternes tilstedeværelse ikke et forøget energitab. For en stationær tilstand (konstant vandføring  $Q$ ) er det totale energitab pr. m længde af vandløbet konstant uafhængig af mængden af grøde. Derimod sker en omfordeling af energitab.

Imellem planterne svarer energitabet til et Carnot-tab, d.v.s. energitabet er proportionalt med hastighedens kvadrat. Da der totalt kun er en given mængde energi til rådighed, må hastigheden mellem planterne reduceres. Vanddybden må følgelig stige, hvis den samme vandmængde skal føres igennem vandløbet.

Det er selvsagt af både teoretisk og praktisk interesse at kunne beregne den vertikale hastighedsfordeling for en given mængde grøde. Man står her overfor den vanskelighed, at turbulensforholdene vil ændres i forhold til en situation uden grøde. Hastigheds- og turbulensforhold er nemlig uløseligt knyttet sammen. Fig. 5 illustrerer energiforhold i vandløb med og uden grøde.

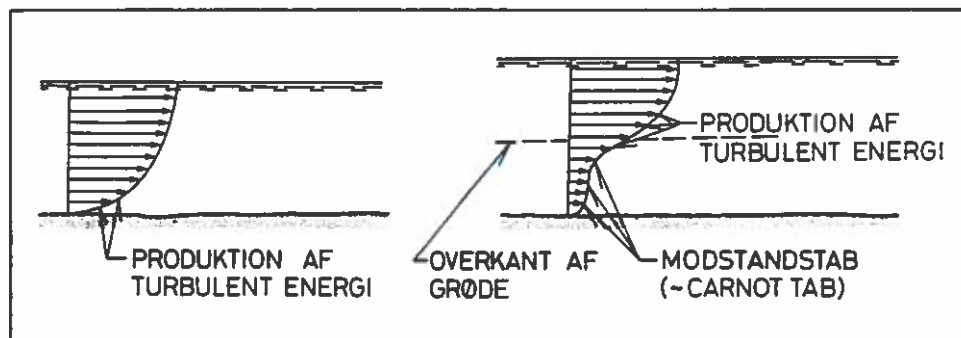


Fig. 5: Energiforhold i vandløb med (th) og uden grøde



### 3. Ændringer i vandløbets tværprofil

Grødens ændring af strømmens fordeling i vandløbet betyder et ændret erosions/sedimentationsmønster. Et eksempel på grødeøers betydning for tværprofilens ændring er vist på fig. 6.

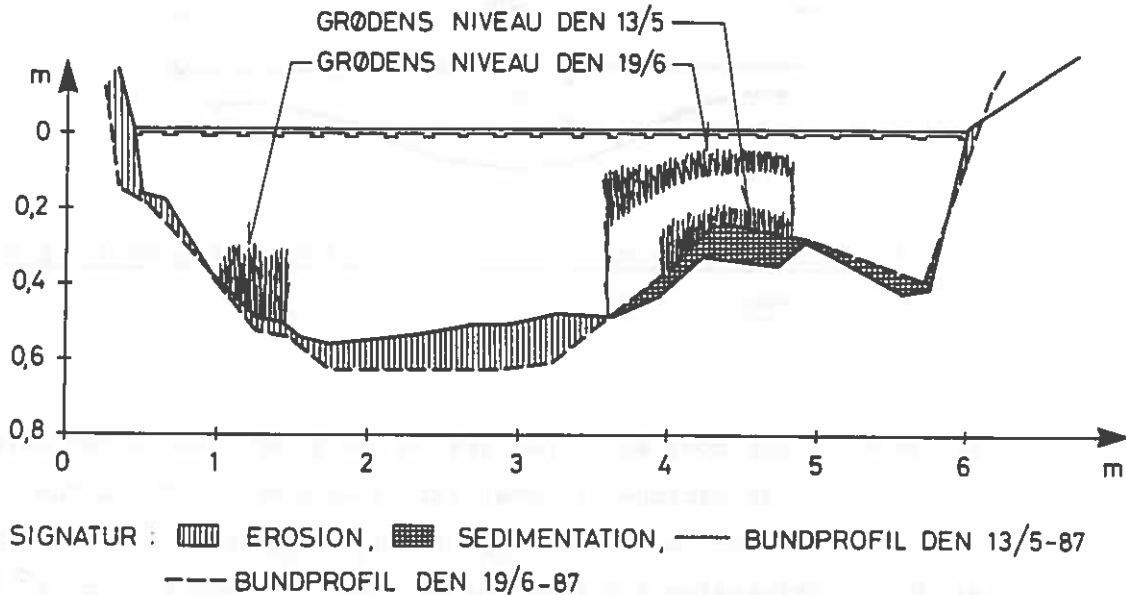


Fig. 6: Udvikling af et profil i Simested Å mellem 13/5 og 19/6 1987.  
(Simested Å:  $Q$  middel =  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ )

I midten af vandløbet (udenfor grødeøerne) øges strømhastigheden, bunden eroderes, og vanddybden stiger med indtil 20% i forhold til middelvandspejlet. I områder med grødeøer sker sedimentation. Også udenfor grødeområderne kan evt. foregå sedimentation, jfr. fig. 7.

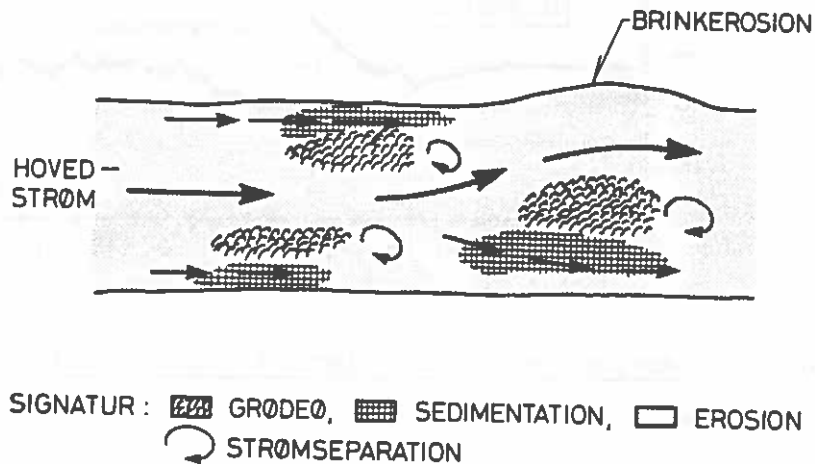


Fig. 7: Muligt erosions/sedimentationsmønster ved grødeøer (principielt)

Ændring af bundprofilets form kan betyde en ændring af den hydrauliske modstand. På fig. 8 er vist et idealiseret eksempel. Det oprindeligt trapezformede tværsnit (uden grøde) tænkes under grødens opvækst ændret til profilet med størst vanddybde i midten.

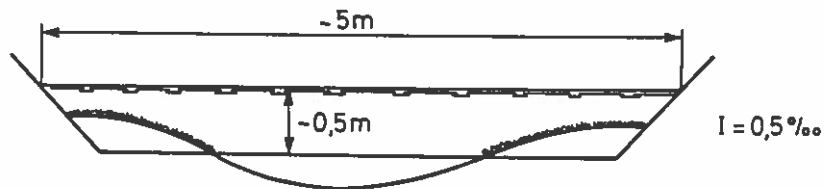


Fig. 8: Idealiseret tværsnitændring, som følge af grødens opvækst ved siderne

Den hydrauliske modstand - når grøden netop er slået - kan beregnes, idet man antager, at strømhastigheden kan relateres til den aktuelle vanddybde og de langsgående forskydningsspændinger negligeres, se (1). Man finder, at det uregelmæssige tværsnit har en vandføringsevne, som er ca. 10% større end det trapezformede.

Ovenstående er ikke eftervist ved målinger i praksis. På fig. 9 er vist et beregnet vandspejlsforløb for Gjern Å ved konstant vandføring  $Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , (4). Efter grødeskæringen sker en øgning af vandføringsevnen

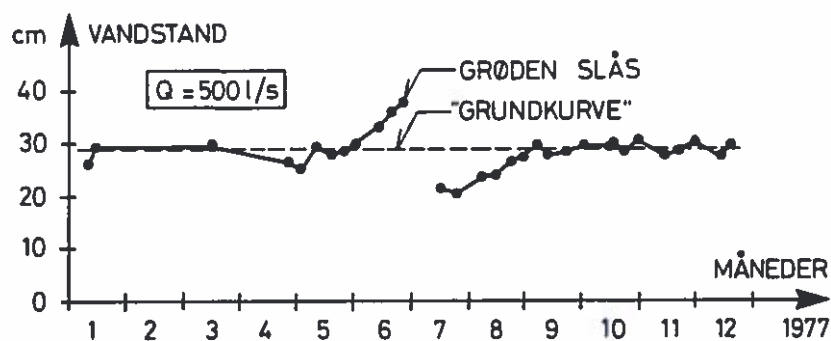


Fig. 9: Beregnet vandstand i Gjern Å ved konstant vandføring.  
 $Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . (4)

i forhold til det normale uden grøde (grundkurven). En mulig forklaring er tværsnitsændringer i vandløbet.

4. Grøde: Den variable ruhed

Når afstrømningen stiger, øges strømhastigheden. Grøden vil derfor lægge sig mere ned. En plante vil være påvirket af opdrift, tyngde, strømkræfter og reaktionskræfter, fig. 10.

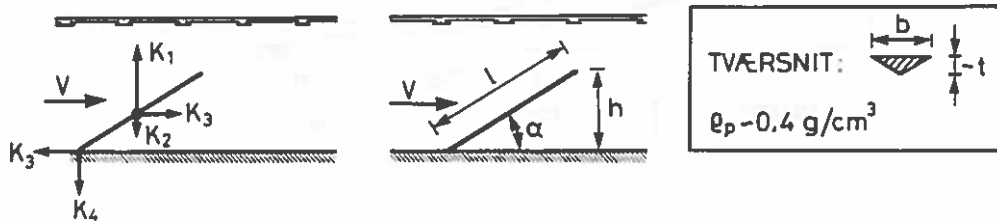


Fig. 10: Pindsvineknop i strøm

Er planten den båndbladede pindsvineknop, kan man vurdere plantens effektive (lodrette) højde  $h$  over vandløbsbunden som funktion af strømhastigheden. Jo mindre denne højde er, desto mindre vil den hydrauliske modstand være. Kaldes plantens største tykkelse  $t$ , dens bredde  $b$  og længde  $l$ , er opdriften reduceret for tyngden givet ved:

$$K_1 = \frac{1}{2} t b l (\rho - \rho_p) g$$

hvor  $\rho$  og  $\rho_p$  er massefylde for henholdsvis vand og plante. For større planter (pindsvineknop) er  $\rho_p \sim 0.4 \text{ g/cm}^3$ . Antages strømhastigheden  $v$  konstant er den nedadrettede komponent af strømkræften

$$K_2 = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 l b$$

hvor  $C_L$  er en strømtrykoefficient som vil afhænge af plantens vinkel  $\alpha$  med strømretningen. (3) angiver følgende udtryk

$$C_L = 1.1 \sin^2 \alpha \cos \alpha$$

For den vandrette strømtrykkomponent fås tilsvarende

$$K_3 = C_V \frac{1}{2} \rho v^2 l b \sim 1.1 \sin^3 \alpha \frac{1}{2} \rho v^2 l b \quad (3)$$

Opstilles projektions- og momentligninger, fås

$$h = \text{funktion}(v, t, l)$$

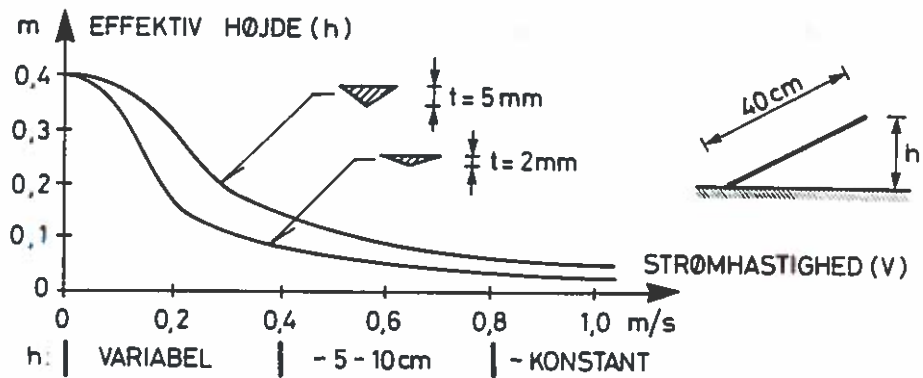


Fig. 11: Effektiv højde af pindsvineknop ved forskellige strøm-  
hastigheder

Denne funktion er vist på fig. 11 for en plantelængde  $l = 40 \text{ cm}$  og plantetykkelser  $t = 2 \text{ mm}$  og  $t = 5 \text{ mm}$ .

Det ses, at for strømhastigheder op til  $0.1\text{-}0.2 \text{ m/s}$  er plantens nedbøjning relativt ringe, mens den effektive plantehøjde for (teoretiske) strømhastigheder større end ca.  $0.6\text{-}0.8 \text{ m/s}$  er tilnærmelsesvis konstant (højde  $\sim 4\text{-}8 \text{ cm}$ ).

I tilfældet med pindsvineknop viser beregningen altså, at plantens effektive højde - og dermed dens hydrauliske modstand - varierer mest i intervallet  $0.15\text{-}0.5 \text{ m/s}$ . Det er netop dette interval, som har størst betydning i praksis.

Det skal her erindres, at den anvendte strømhastighed svarer til plantens niveau. Hvis planten er meget lang, vil ovennævnte forudsætning om konstant hastighedsfordeling over højden  $h$ , være en dårlig tilnærmelse.

## 5. Grødens indflydelse på Manningtallet

### 5.1 Forudsætninger og variation ved varierende vandføring.

Per tradition anvendes ofte Manningformlen til beskrivelse af vandstanden i vandløb.

$$Q = M \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot A \quad \text{hvor}$$

$Q$  er vandføringen

$M$  er Manningtallet ( $\text{m}^{1/3}/\text{sek.}$ )

$R$  er hydraulisk radius eller modstandsradius, se (1)

I er energiliniens gradient

A er tværsnitsarealet

De grundlæggende forudsætninger for anvendelse af Manningformlen er dels, at man har hydraulisk ru strømning, dels at dybde - ruhedsforholdet er indenfor visse grænser. Et Manning-tal mindre end ca. 30 kan ikke relateres til nogen ækvivalent ruhed. Hvis det beregnede Manningtal for et vandløb er mindre end denne værdi, kan man altså forvente, at Manningformlen er anvendt udenfor sit formelle anvendelsesområde.

Den grundlæggende idé ved anvendelse af Manningformlen er antagelsen om, at Manningtallet er konstant eller tilnærmelsesvis konstant for forskellige afstrømninger og "konstante" bundforhold (eksempelvis samme grødemængde). Planterne vil jo imidlertid lægge sig mere og mere ned jo mere afstrømningen stiger: Den hydrauliske modstand vil aftage med stigende afstrømning og strømhastighed (jfr. afsnit 4).

Et eksempel på, hvor galt det kan gå er vist på fig. 12. I det viste vandløb ændres vandføringen fra ca.  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  til  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  i løbet af 4 dage. Det beregnede Manningtal ændres tilsvarende fra ca. 3 til ca. 23 med en næsten konstant grødemængde.

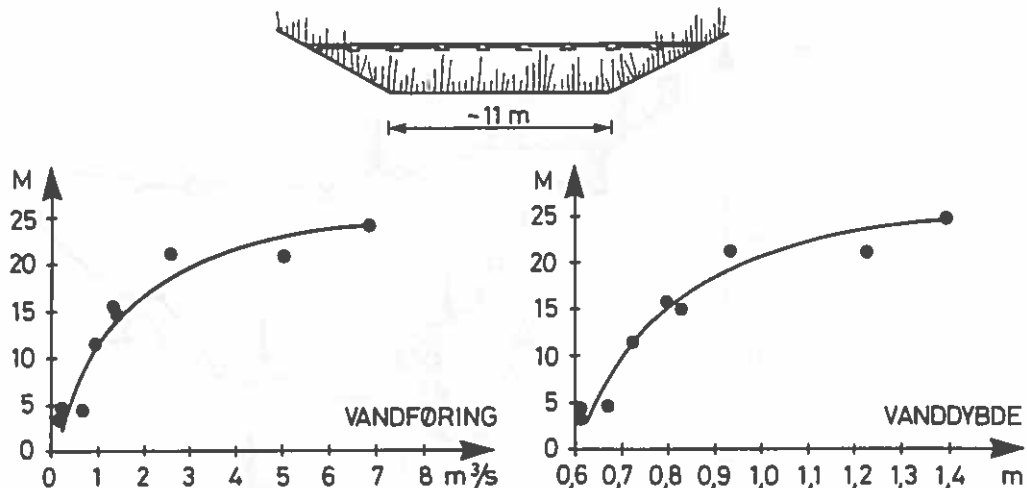


Fig. 12: Manningtallets variation i det engelske vandløb Bain i perioden 14/7 - 18/7 1973. Data efter (10)

Det må således frarådes at anvende Manningformlen i mindre vandløb med grøde. I store vandløb vil Manningtallets variation ved forskellige afstrømninger være mindre, fig. 13.

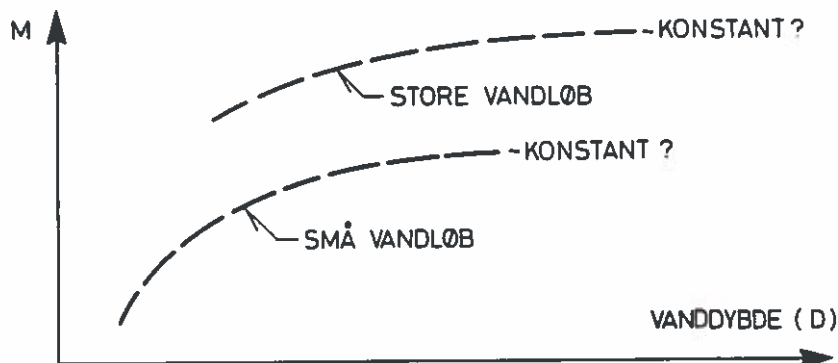


Fig. 13: Manningtallets principielle variation ved konstant grødemængde og varierende afstrømning.

### 5.2 Danske vandløb: eksempler

En faldende afstrømning og stigende grødemængde vil bevirke et faldende Manningtal. I Sjællandske vandløb er sommerafstrømningen ofte meget lille og grødens effekt kan ikke umiddelbart udledes fra Manningtallets variation.

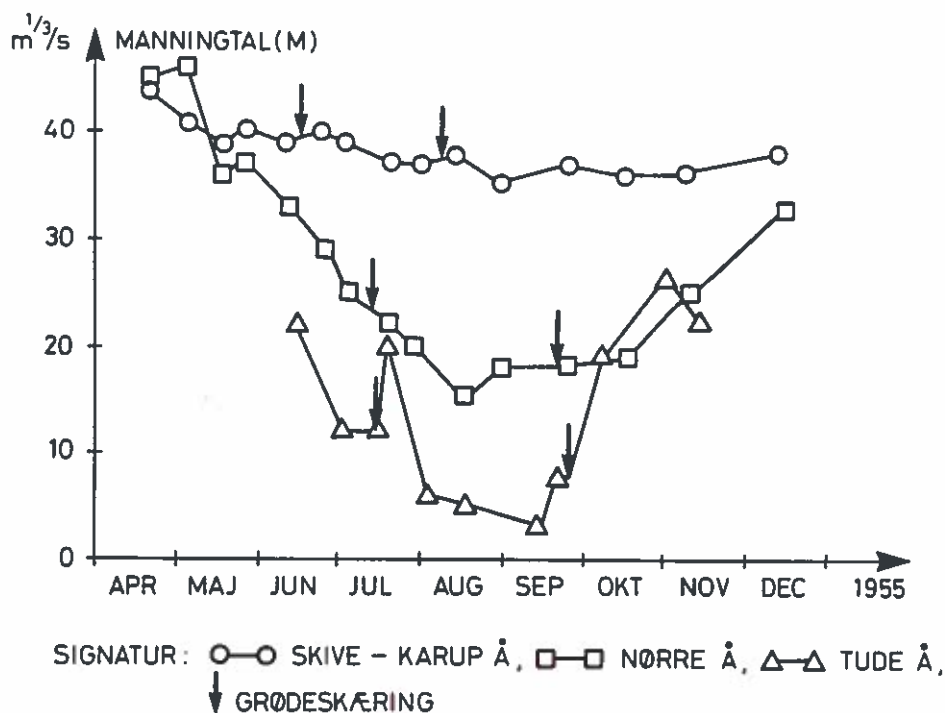


Fig. 14: Manningtallets variation i forskellige vandløb, efter (7).  
 (Nørreå:  $Q_{mid.}=2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , Skive-Karup Å:  $Q_{mid.}=6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  
 Tude Å:  $Q_{mid.}=0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ .)

I jydsk vandløb er afstrømningen generelt mere konstant. I større vandløb kan Manningtallets variation derfor tilnærmelsesvis afspejle grødens varierende hydrauliske modstand. Fig. 14 viser en ældre undersøgelse (7) af variationen gennem en grødesæson for 3 vandløb af forskellig størrelse og lokalitet. I Skive-Karup Å (mellem Nørkjærbro og Estvadsgårdsbro) er variationen i Manningtallet ringe, mellem 44 og 36. Grødskæring (ved bredderne) har neglignabel indflydelse på den hydrauliske modstand. I Nørre Å (nedstrøms Vejrumbro) ses den omtalte effekt af vandføringsændringer at slå igennem på Manningtallet (eks. i august måned). Grødskæring har ringe effekt på den hydrauliske modstand.

Skal man forsøge at sige noget generelt om grødens hydrauliske betydning for forskellige størrelser af vandløb, må det være, at for vandløb større end Skive-Karup Å vil grødens hydrauliske effekt sandsynligvis være ringe. Denne konklusion forudsætter dog, at faldet ikke er mindre end  $0.2-0.3^{\circ}/\infty$ .

#### 6. Q-H kurver

Vandløbsloven (8) åbner mulighed for, at de nye vandløbsregulativer kan indeholde bestemmelser om vedligeholdelse efter vandføringsevneprincippet. Ved vandføringsevne forstås her en sammenhæng mellem vandstand H og vandføring Q. En kurve i et Q-H diagram svarer da til vandføringsevnen ved bestemte bundforhold, eksempelvis den samme grødemængde. "Grundkurven" svarer til grødefrit vandløb. Vandføringsevnen ved forskellige grødemængder vil da svare til forskellige kurver over grundkurven, fig. 15.

Eftersom grøden medfører en variabel ruhed, vil de forskellige grødekurver ikke være modifikationer af grundkurven. Spørgsmålet er da, hvilken form grødekurverne har. Normalt har man nemlig kun eet punkt på grødekurven, fordi grøden hele tiden vokser.

På fig. 15 er vist grundkurven og en grødekurve for det (tidligere omtalte) engelske vandløb Bain. Indenfor perioden 14-18/7 1973 antages grøden altså (som før) konstant.

Med den viste dobbeltlogaritmiske afbildning er grundkurven med god tilnærmelse en ret linie (i dette tilfælde).

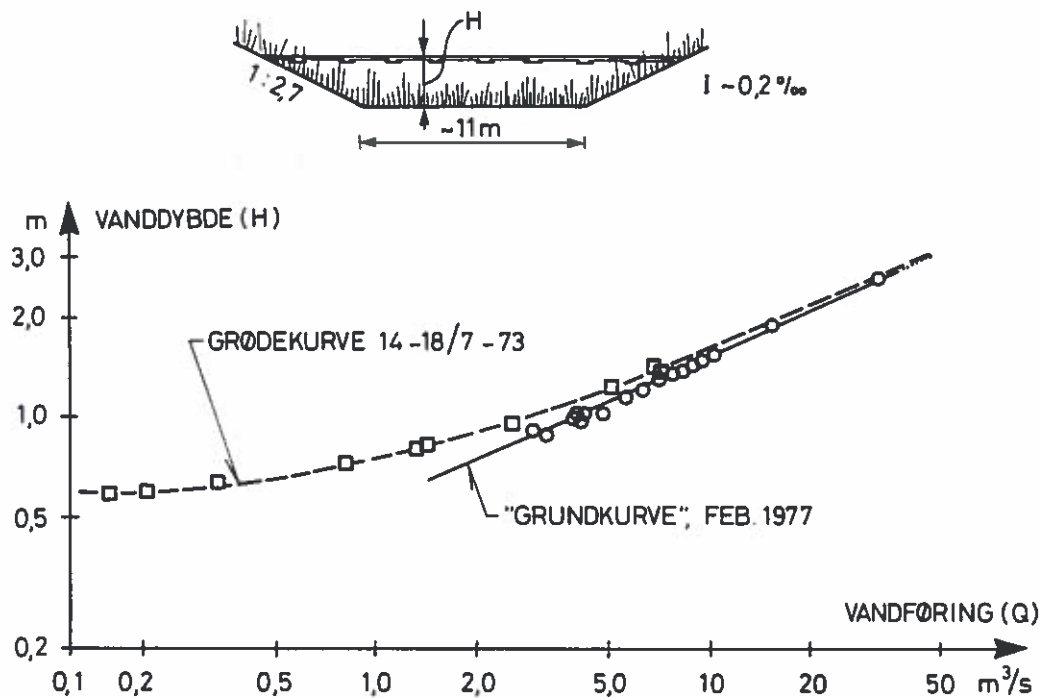


Fig. 15: Q-H kurver for vandløbet Bain: Data efter (10)

Grødekurven vil da være (svagt) opad hult, fordi grødens effekt ved små vandføringer er relativt størst. Grødekurven nærmer sig grundkurven ved store vandføringer svarende til, at grødens hydrauliske effekt reduceres eller forsvinder. Hvor ligger nu det punkt, hvor grødekurven møder grundkurven? - Dette punkt har selvsagt stor interesse, fordi man da vil have et forbedret grundlag for konstruktionen af grødekurven.

På fig. 15 er foreslået at placere "brændpunktet" svarende til en strømhastighed på 0.8 m/sek. Dette er ikke eftervist ved forsøg eller målinger, men alene baseret på de betragtninger, som er fremført i afsnit 4. Det ses af fig. 11, at den effektive plantehøjde ved strømhastigheder større end ca. 0.6 m/sek er af størrelsesordenen 5 cm. Det er antaget, at denne "ruhed" svarer til rille-banke-systemets ruhed.

Det skal understreges, at den pågældende strømhastighed evt. aldrig vil optræde i vandløbet. Dette gør imidlertid ikke noget, da punktet blot skal bruges til at konstruere grødekurverne.



Der er i princippet intet til hinder for, at man kan anvende en middelstrømhastighed (eller evt. en anden strømhastighed) som parameter i stedet for vandføringen. Dette vil evt. kunne reducere kontrolarbejdet i forbindelse med vandføringsbestemt vedligeholdelse.

#### 7. Biomasse som indikator for hydraulisk modstand: Diskussion

Kan man relatere den hydrauliske modstand til biomassen af grøden i et vandløb? Dette spørgsmål er søgt afklaret gennem flere undersøgelser, (5). Proceduren har været at høste grøden i repræsentative områder i vandløbet og tørre planterne ved 110°. For at kunne sammenligne den hydrauliske modstand ved forskellige biomasser (pr. arealenhed) af grøden, er omregnet via Q-H-kurver på en sådan måde, at sammenligningen foretages ved den samme vandføring. Vandstanden kan da tages som udtryk for den hydrauliske modstand.

Korrelationen mellem biomasse (pr. arealenhed) og vandstand er generelt dårlig, (især hvis man sammenligner flere år). Man kan pege på flere årsager til dette:

1. Planterne har forskellig densitet.

En plante med relativ stor densitet vil have en forholdsvis ringe rejsning i vandet og dermed en relativ lille hydraulisk modstand. Den giver derimod et relativt stort bidrag til biomassen.

2. Plantens placering.

Er planterne placeret "i ly af hinanden" (eksempelvis på en lang række i strømrretningen), vil dette bevirke en relativt mindre hydraulisk modstand end hvis planterne står spredt. Planternes placering i tværsnittet vil givetvis også have betydning.

3. Planternes form.

En "uregelmæssig" plante med sideblade (eksempelvis vandpest) vil give en større hydraulisk modstand end en "strømlinjet" plante (eksempelvis pindsvineknop). (Alt andet tænkt lige).

4. De morfologiske ændringer i vandløbet.

Tværsnitsændringer forårsaget af grødens opvækst kan i en vis (mindre) udstrækning kompensere for den øgede hydrauliske modstand fra grøden.

5. Usikkerheder på bestemmelsen.

Grøden er ofte meget uregelmæssigt placeret. Har man høstet på et mindre areal, vil biomassetallet måske ikke være repræsentativt for en større strækning.

Hvor meget punkt 1-3 kvantitativt betyder kan ikke umiddelbart beregnes. Forholdene er af en vis interesse i sammenhæng med en mere udbredt praksis med skånsom grødeskæring. Undersøgelser vedrørende disse forhold bør overvejende foretages i strømrender under kontrollerede forhold, fremfor i vandløb hvor resultater ofte er umulige at generalisere.

8. Litteratur

- (1) Englund, F.A., Bo Pedersen, F., 1978: *Hydraulik. Den Private Ingeniørfond, Danmarks tekniske Højskole.*
- (2) Gourlay, M.R., 1970: *Flow retardance in vegetated channels. Discussion. J. of the Irrigation and drainage div., ASCE, No. IR.3.*
- (3) Hoerner, S.F, 1965: *Fluid-Dynamic Drag. Hoerner Fluid Dynamics.*
- (4) Kern-Hansen, U. (red.), 1980: *Vedligeholdelse af vandløb. Miljøprojekter 30. Miljøstyrelsen.*
- (5) Kern-Hansen, U., 1984: *Undersøgelser vedrørende vedligeholdelse af vandløb 1979-82, Miljøstyrelsens Ferskvandslaboratorium.*
- (6) Kouwen, N. et al, 1969: *Flow retardance in vegetated channels. J. of the Irrigation and Drainage Div., ASCE, No. IR '2.*
- (7) Lyskede, J.M., 1958: *Grødevækstens indflydelse på vandløbenes hydrauliske ledningsevne. Det danske Hedeselskab (upubliceret).*
- (8) Miljøstyrelsen, 1985: *Cirkulære om vandløbsloven, 26. feb. 1985.*
- (9) Moeslund, B., 1986: *Undersøgelse af grødevæksten i Sønderjyske vandløb sommeren 1985. Sønderjyllands Amtskommune, Miljø- og vandløbsvæsenet.*
- (10) Powell, K.E.C., 1979: *Weed growth - a factor of Channel Roughness. In: Hydrometry (ed. R.W. Herschy) John Wiley & Sons.*
- (11) Sønderjyllands Amtskommune, 1984: *Grødeskæringsforsøg i Surbæk - 1982. Naturforvaltningsprojektet og miljøafdelingen.*
- (12) Temple, D.M., 1986: *Velocity distribution coefficients for grass-lined channels, J. of Hydr. Eng. Vol 112, No 3.*



# SEDIMENTTRANSPORTENS INDFLYDELSE PÅ DE HYDRAULISKE FORHOLD

Kim Wium Olesen  
DANSK HYDRAULISK INSTITUT  
Agern Alle 5, 2970 Hørsholm

## 1. Indledning

Alle vandløb har en større eller mindre materialetransport i form af partikulært organisk materiale, samt sediment eroderet i oplandet. Transporten foregår enten ved bunden eller opslæmmet i vandet (suspension). De fleste åer og floder løber i deres egne aflejringer, det vil sige at der er opstået en dynamisk ligevægt mellem erosion og sedimentation i ådalen. Indgreb i et vandløb kan forstyrre denne ligevægt, for eksempel, med alvorlige følger for åens kapacitet. Der kræves derfor et indgående kendskab til sedimenttransport forholdene ved planlægning af større ændringer i åløbet. I denne forbindelse spiller det ofte også en væsentlig rolle, at den hydrauliske modstand i vandløb i høj grad afhænger af sedimenttransporten.

Igennem de sidste 20-30 år er der internationalt sket en kraftig udvidelse af forståelsen af sedimenttransport processer i vandløb, og mange teoretiske modeller for kvantitative forudsigelser af, for eksempel, sedimenttransportens størrelse, er blevet udviklet. Med arbejdet af blandt andre F. Engelund og J. Fredsøe på Instituttet for Strømningsmekanik og Vandbygning på Danmarks tekniske Højskole har Danmark været på forkant af udviklingen. I de senere år er disse teoretiske modeller blevet integreret med matematiske (computer) modeller for beregningen af strømmingen i vandløb, således at det for eksempel nu er muligt at simulere

langtidsudviklingen af et vandløb som følge af et indgreb i vandløbet eller ændring i afstrømningsforholdene. Sådanne integrerede modeller er i flere lande allerede standardværktøj for ingeniører, som arbejder med vandløbshydraulik.

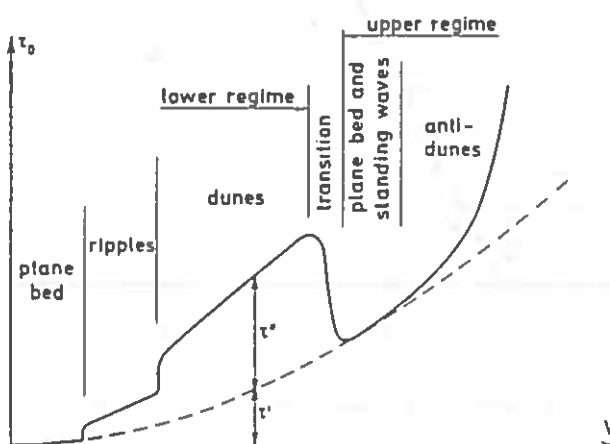
Modeller for beregning af variationen af den hydrauliske modstand og morfologiske flodmodeller er to typiske eksponenter for ovennævnte integrerede matematiske modeller. I det følgende vil disse to modeller blive præsenteret, og eksempler på deres anvendelighed vil blive vist.

## 2. Hydraulisk modstand

Forskellige former for sandbanker danner sig på bunden af materialeførende vandløb. Disse sandbanker giver et væsentlig bidrag til vandløbets hydrauliske modstand, dog specielt i større vandløb og floder, hvor vegetation ikke er så udbredt. I danske vandløb er det formodentlig af væsentlig betydning i for eksempel Skjern Å og Gudenåen.

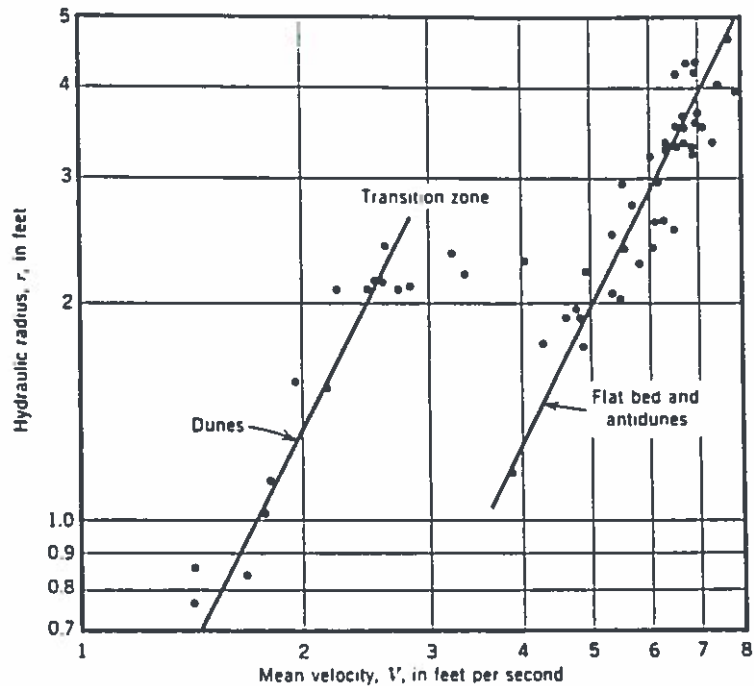
Ved små strømhastigheder og derfor lille sedimenttransport dannes små trekantformede uregelmæssige sandbanker (eng. "ripples"). Højden af disse ripples er typisk 5 til 10% af vanddybden og længden er af samme størrelsesorden som vanddybden. Ved større strømhastigheder vokser sandbankerne og bliver mere regelmæssige (eng. "dunes"). Denne type er også trekantformede. Højden af bankerne er nu op til 20-30% af vanddybden og længden 5 til 10 gange vanddybden. "Ripples" og "dunes" dannes, når sedimentet transporteres som bundtransport. Ved højere strømhastigheder bliver en stadig større mængde af sedimentet transporteret i suspension, og sandbankerne bliver vasket væk (eng. "plane bed"). Ved endnu højere hastigheder dannes sinus-formede banker (eng. "anti dunes"). "Plane bed" og "anti dunes" forekommer dog ikke under normale omstændigheder i danske vandløb.

På læsiden af de trekantformede sandbanker opstår separation i strømmingen. Denne separation giver anledning til et betydelig energitab. Dette forhold er belyst i Fig. 2.1, hvor bundforskydningsspændingen er vist som funktion af vandets strømhastighed. Den stiplede linie i figuren angiver, hvordan sammenhængen havde været uden sandbanker. Det fremgår, at sandbankerne giver anledning til op mod 50% af den totale hydrauliske modstand.



Figur 2.1 Sammenhæng mellem bundforskydningsspænding og strømhastighed i vandløb med sedimenttransport (efter /1/).

Variationen af den hydrauliske modstand kan have stor betydning for strømningsforholdene i et vandløb. Hvis man for eksempel har en QH-kurve for et vandløb, som er baseret på få målinger i vandløbet, medens bunden er dækket af "ripples", og forsøger at ekstrapolere denne kurve til høje vandføringer ved hjælp af Manning-formlen, kan man risikere at undervurdere de høje vandstande betydeligt, hvis der dannes "dunes" på bunden. Omvendt, hvis der sker en overgang mellem "dunes" og "plane bed", vil man observere et fald i vandstanden, når vandføringen vokser. Denne type diskontinueret QH-kurver er observeret i flere udenlandske floder, se Fig. 2.2.



Figur 2.2 Diskontinuert QH-kurve i Rio Grande (efter /2/).

Forholdet kompliceres yderligere af, at størrelsen af sandbankerne kun ændrer sig langsomt, således at bankerne ikke er i "ligevægt" med strømningforholdene. Dette indebærer, at der ingen entydig sammenhæng er mellem vandstand og vandføring, dvs. ingen veldefineret QH-kurve. Jo større sedimenttransport og jo mindre banker, desto hurtigere ændrer størrelsen af sandbankerne sig. Et vandløbs sedimenttransport kapacitet vokser meget kraftigt med strømhastigheden (typisk med  $V^5$ ). Heraf følger, at sandbankerne kun viser en lidt forsinket opvoksen, når vandføringen stiger, hvorimod det kan tage lang tid, før store sandbanker, dannet ved høje vandføringer, formindskes ved faldende vandføring. Dette forhold er formodentlig en af årsagerne til, at der ofte er meget stor spredning på QH-kurver ved små vandføringer.

J. Fredsøe, ISVA, har udviklet teoretiske modeller, som beskriver sammenhængen mellem sediment transporten og størrelsen af sandbankerne /3,4 og 5/. Disse modeller beskriver såvel størrelsen af sandbankerne under ligevægtsforhold samt overgangen til



"plane bed". Endvidere beskrives også den forsinkede adaptation af sandbankernes størrelse. På Dansk Hydraulisk Institut er denne model bygget sammen med instituttets en-dimensionale hydrodynamiske model SYSTEM 11 (MIKE 11), og er anvendt i studier for Missouri floden i USA til beregning af ændringen i den hydrauliske modstand som følge af ændringer af vandets temperatur (viskositet) /6/. Desuden er den integrerede model anvendt på Brahmaputra floden i Bangladesh.

Brahmaputra hører til blandt verdens største floder. I regntiden varierer bredden mellem 6 km og ca. 20 km, medens den i den tørre tid strømmer i 2 til 4 forgreninger (eng. braiding river). Vandføringen varierer fra ca. 5.000 m<sup>3</sup>/s i den tørre tid fra oktober til februar op til ca. 60.000 m<sup>3</sup>/s under monsunen. Sedimentets kornstørrelse er omkring 0,2 mm, så der er en kolossal stor sedimenttransport i regntiden, hvorimod der næsten ingen transport er i den tørre tid. Den hydrauliske modstand er i den tørre tid meget stor, hvilket skyldes, at store sandbanker (højere end vandets middeldybde nogle steder) fra monsunperioden stadig dækker bunden af floden. Sandbankerne er altså ikke i ligevægt med strømmingen. Under monsunen kan man endvidere iagttage, at vandføringen stiger, uden at vandstanden stiger (dvs. en horisontal QH-kurve). Dette skyldes, at sandbankerne vaskes væk ("plane bed") i hovedkanalerne. Manningtallet varierer mellem  $M=10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  og  $M=55 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

SYSTEM 11 blev sat op for en ca. 100 km lang strækning af Brahmaputra. Som randværdier blev vandstandsdata fra to målestationer anvendt. De beregnede vandføringer er vist i Fig. 2.3 og Fig. 2.4. Det fremgår, at vandføringsvariationen kan forudsiges betydeligt bedre, når man tager højde for variationen af sandbankernes størrelse.

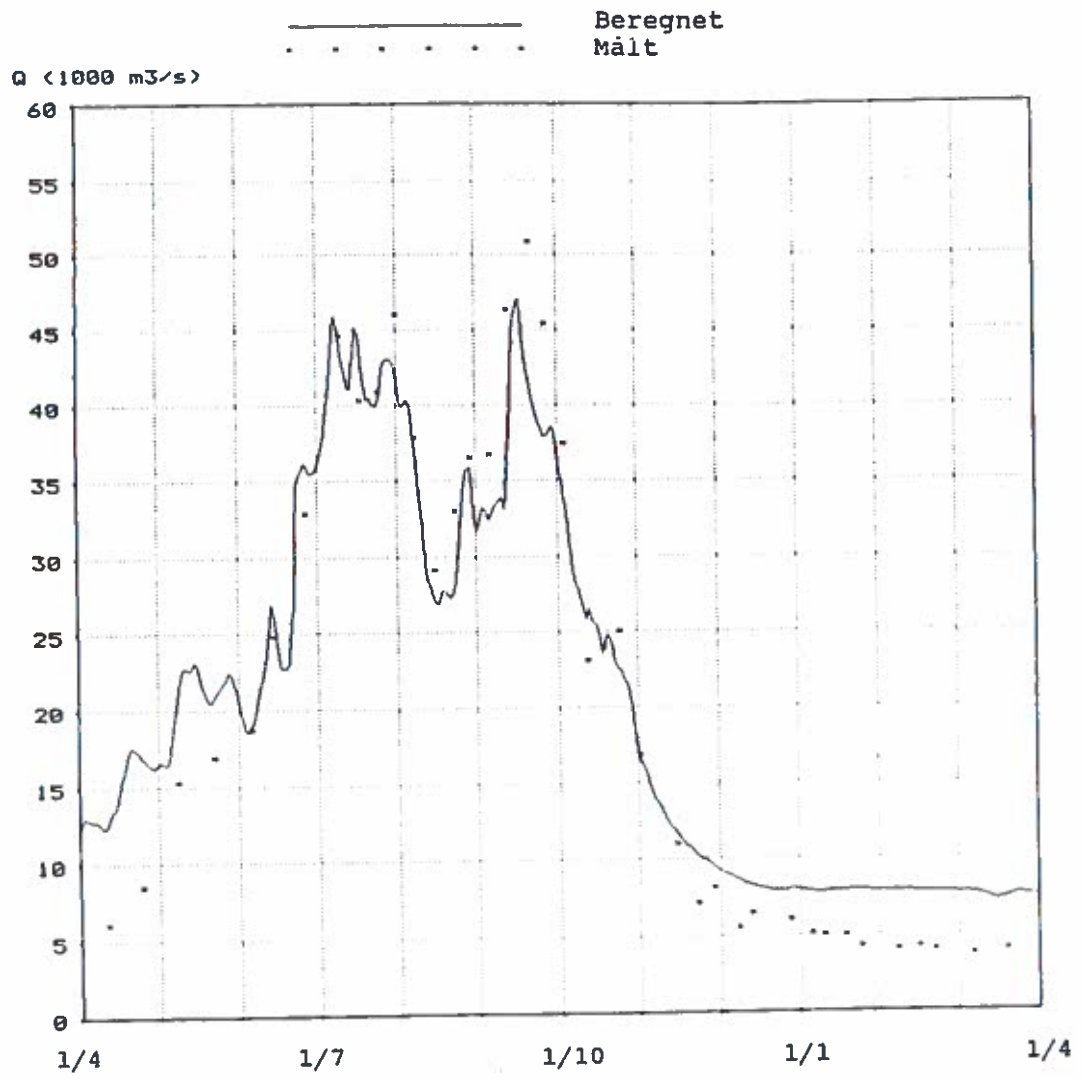


Fig. 2.3 Beregnet vandføring ved anvendelse af et konstant Manningtal.

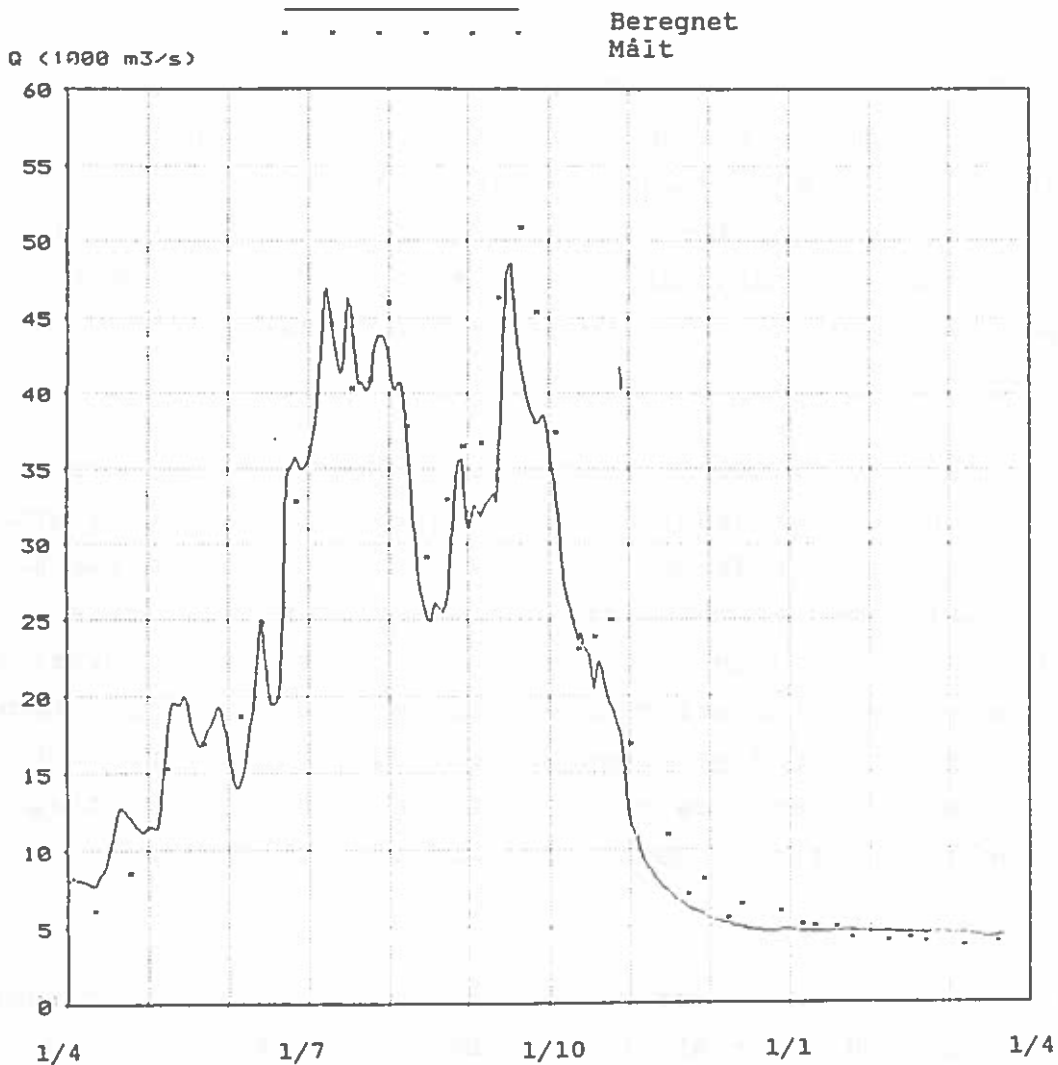


Fig. 2.4 Beregnet vandføring når der tages højde for variationen af sandbankernes størrelse.

Sandbankernes betydning for den hydrauliske modstand i Brahmaputra floden er meget udtalt, men også i danske vandløb er det ofte konstateret, at den hydrauliske modstand er betydelig højere, når vandstanden er lav. I nogle tilfælde skyldes det sikkert samme effekt som i Brahmaputra, men vegetationen har også stor indflydelse på den hydrauliske modstand, især i de mindre vandløb.

### 3. Morfologi

Flodmorfologi er læren om ændringer af floder og vandløbs fysiske udformning og er derfor et bredt begreb. Morfologiske ændringer kan for eksempel være generelle ændringer af vandløbets bundniveau som følge af ændringer af afstrømnings- eller sedimenttransportforholdene, lokale ændringer af tværsnit eller ændringer af flodens løb som følge af erosion af bredderne. Disse forskellige typer morfologiske processer kræver forskellige matematiske modelværktøjer.

Ændringer i et vandløbs bundniveau i form af erosion eller sedimentation skyldes gradienter i vandløbets sedimenttransportkapacitet, og kan forudsiges ved hjælp af en hydrodynamisk model i kombination med en model for sedimenttransporten. Beregning af ændringerne af bundniveauet sker i en tidsløkke. I hvert gennemløb beregnes først strømmingen med den hydrodynamiske model, herefter beregnes sedimenttransporten, og til sidst beregnes sedimentationen eller erosionen som forskellen i sedimenttransporten mellem tværsnittene. Denne type modeller findes både i en og to dimensioner.

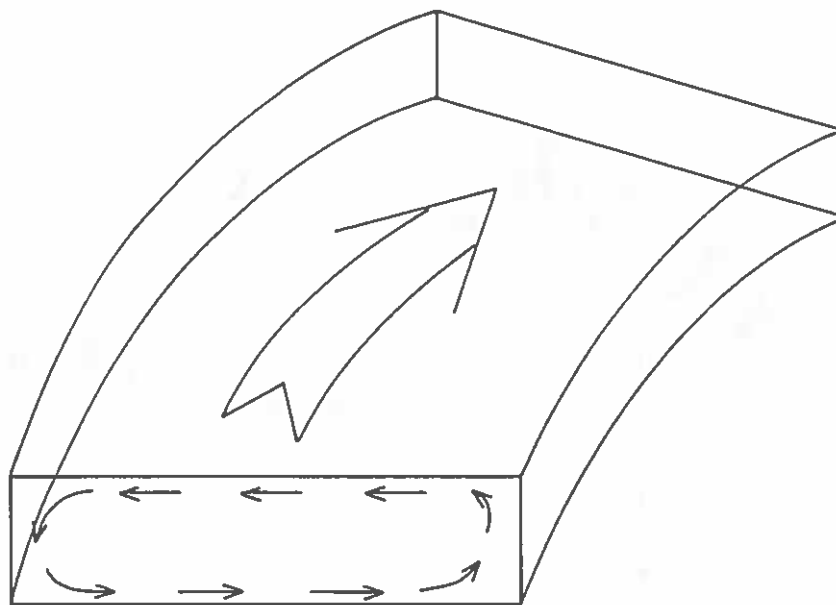
Den en-dimensionale morfologiske model anvendes til beregning af generelle ændringer af et vandløbs bundniveau og er i de senere år blevet standardværktøj inden for vandløbshydraulik. Typiske anvendelsesområder er beregning af erosion nedstrøms for dæmninger, eller sedimentation i et vandløb nedstrøms for et vandudtag (for eksempel til kunstvanding).

To-dimensionale morfologiske modeller er først blevet udviklet i de senere år, da man ikke tidligere havde de store og kraftige computere, som er påkrævet for denne type modeller.

Naturlige vandløb vil ofte udvikle slyngninger (mæandrere), hvilket gør det nødvendigt at anvende et kurvelineært koordinatsystem i en to-dimensional beskrivelse, idet slyngningerne ikke kan beskrives hensigtsmæssigt, matematisk i et traditionelt orto-

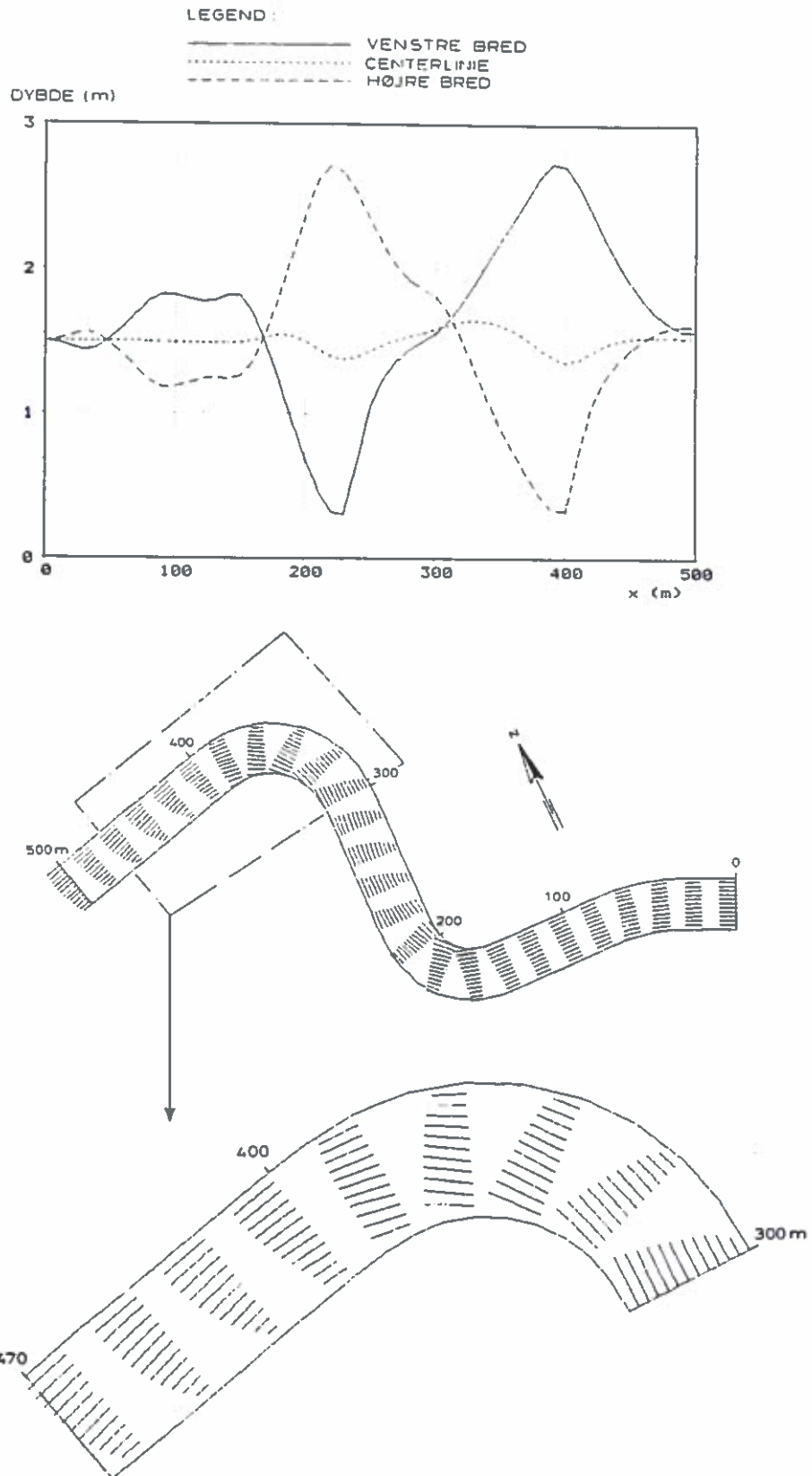
gonalt koordinatsystem.

Strømningsmønstreet er yderst kompliceret i et kurvet vandløb, idet centrifugalkraften vil inducere en spiral (helisk) strømning. Skønt spiralstrømmen normalt kun er nogle få procent af hovedstrømmen, har den alligevel stor indflydelse på fordelingen af sedimenttransporten og dermed vandløbets topografi. Spiralstrømningen er rettet mod den inderste bred ved bunden og udadrettet ved overfladen, se Fig. 3.1. Der bliver derved ført sediment ind mod den inderste bred indtil bundhældningen er tilstrækkelig stor til at tyngdekraften kan kompensere effekten af spiralstrømmen. Denne mekanisme giver anledning til den karakteristiske vanddybdefordeling, som findes i slyngede vandløb.



Figur 3.1 Spiral eller helisk strømning i et kurvet vandløb.

I forbindelse med Skjern Å projektet har Dansk Hydraulisk Institut anvendt en sådan to-dimensional morfologisk model til beregning af de forventede strøm- og bundforhold i de reetablerede slyngninger. I Fig. 3.2 er et eksempel på en modelberegning vist. Beregningen er udført med en stor vandføring og vanddybde, idet morfologiske forandringer først og fremmest sker, når strømhas-



Figur 3.2 Beregnet bundtopografi og strømfordeling i slyngning i Skjern Å.

tighederne er store. Den karakteristiske vanddybde fordeling fremgår af Fig. 3.2. Figuren viser også, at der er en signifikant faseforskydelse mellem åens krumning og strømhastighedsfordeling. Denne faseforskydning bevirker, at slyngninger ikke vokser på tværs af ådalen, men udbreder sig gennem ådalen i strømretningen. Ved mindre vandføringer og dybder er denne faseforskydning mindre udpræget, og de lavvandede områder i indersiden af slyngningerne vil være tørlagt.

Modelberegninger af denne type viser således, hvor man eventuelt bør anbringe beskyttelse af bredderne, og hvor dybt denne beskyttelse bør gå. For nyligt er en model udviklet, som udover strøm- og dybdefordeling også kan forudsige, hvordan kornstørrelsesfordelingen af bundsedimentet vil være /7/. Denne model vil blandt andet kunne være til stor nytte i forbindelse med vurdering og optimering af fisks ynglemuligheder i de mange regulerede vandløb i Danmark, hvor slyngningerne vil blive reetableret i de kommende år.

#### 4. Referencer

- /1/ Engelund, F. og Hansen, E., "A monograph on sediment transport in alluvial streams", Teknisk Forlag, København, 1967.
- /2/ Vanoni, V., "Sedimentation Engineering", ASCE-Manual, New York, 1975.
- /3/ Fredsøe, J., "Unsteady flow in straight alluvial streams: Modification of individual dunes", J. Fluid Mechanics, Vol. 91, 1979.
- /4/ Fredsøe, J., "Dimensions of stationary dunes. Part 1. Low sediment transport rate", Prog. Rep. 49, ISVA, DTH, 1979.

- /5/ Fredsøe, J., "Shape and dimensions of stationary dunes in rivers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 108, No. Hy 8, 1982.
- /6/ Dansk Hydraulisk Institut, "SYSTEM 11 Short Description".
- /7/ Olesen, K.W., "Bed Topography in Shallow River Bends", Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, 1987.

880725/KWO/in  
1006/C3



Vandbygningsteknisk Selskab  
Seminar om Danske Vandløb  
Ebeltoft den 23. november 1987

**STOFTRANSPORT OG VANDKVALITET**

af

Torben Larsen  
Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik  
Aalborg Universitetcenter

Marts 1988

## INDHOLDSFORTEGNELSE

	side
Introduktion .....	2
Skravad bæk undersøgelsen .....	2
Formålet med anvendelse af numeriske vandløbsmodeller .....	5
Massebalance-kernen i vandkvalitetsmodeller .....	6
Numeriske løsninger .....	8
Numeriske fejl .....	9
Kobling af processer .....	11
Eksempel på anvendelse af en hydraulisk model koblet med en stofmodel .....	13
Afslutning .....	16
Referencer .....	16

## Introduktion

Dette indlæg omhandler en beskrivelse af et udsnit af de problemer, vi har arbejdet med inden for emnet stoftransport og vandkvalitet. Vi har inden for vandbygningsområdet i instituttet en langsigtet målsætning om, at give emnet "numeriske strømningsmodeller" en høj prioritet. Dette gælder såvel undervisning som forskning. Inden for det forskningsmæssige skal det nævnes, at der p.t. kører to licentiatstudier om henholdsvis numeriske modeller for stoftransport og vandføring i vandløb (Kristian Vestergaard) og numeriske turbulensmodeller (Ole Pedersen) samt et erhvervsforskerprojekt om modellering af virkningen af overløbsbygværker (Morten Steen Sørensen, Nellemann A/S rådgivende ingeniører)

Man vil derfor i det efterfølgende ikke tage emnet op ud fra en generel synsvinkel, men i stedet præsentere nogle aktuelle problemfelter.

## Skravad bæk undersøgelsen

Denne undersøgelses målsætning var at studere virkningen af overløbsbygværker fra fælleskloakerede områder på vandløb. Undersøgelsen er detaljeret beskrevet i ref. (1).

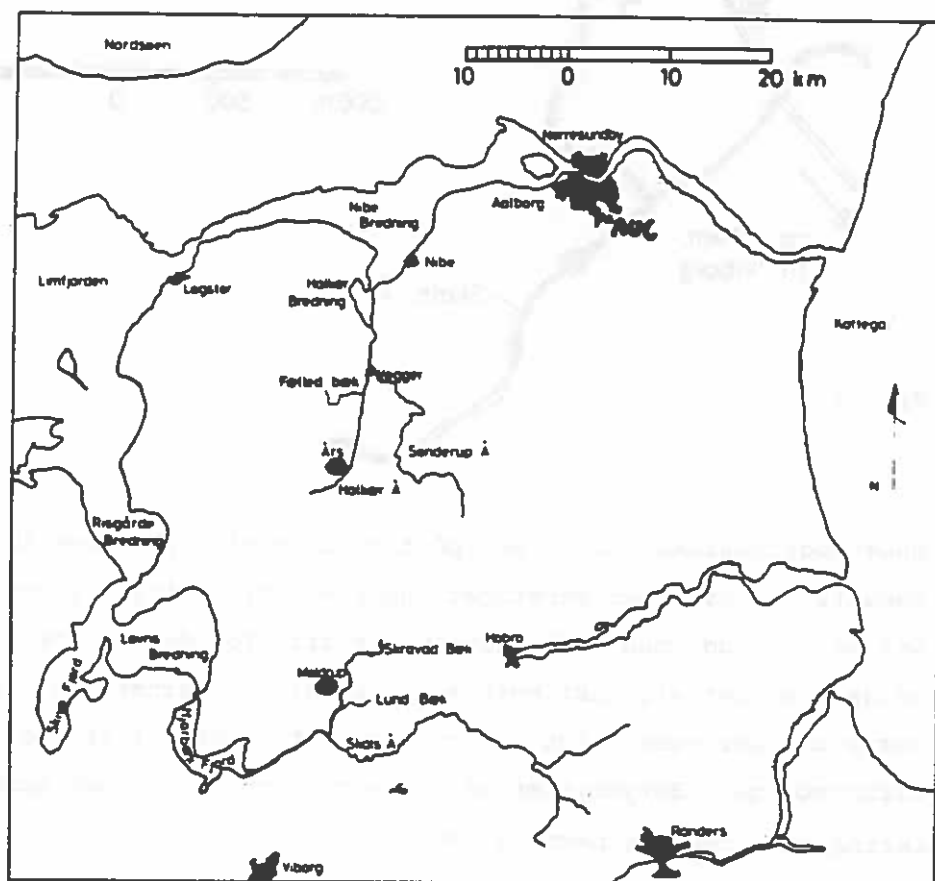


Fig. 1

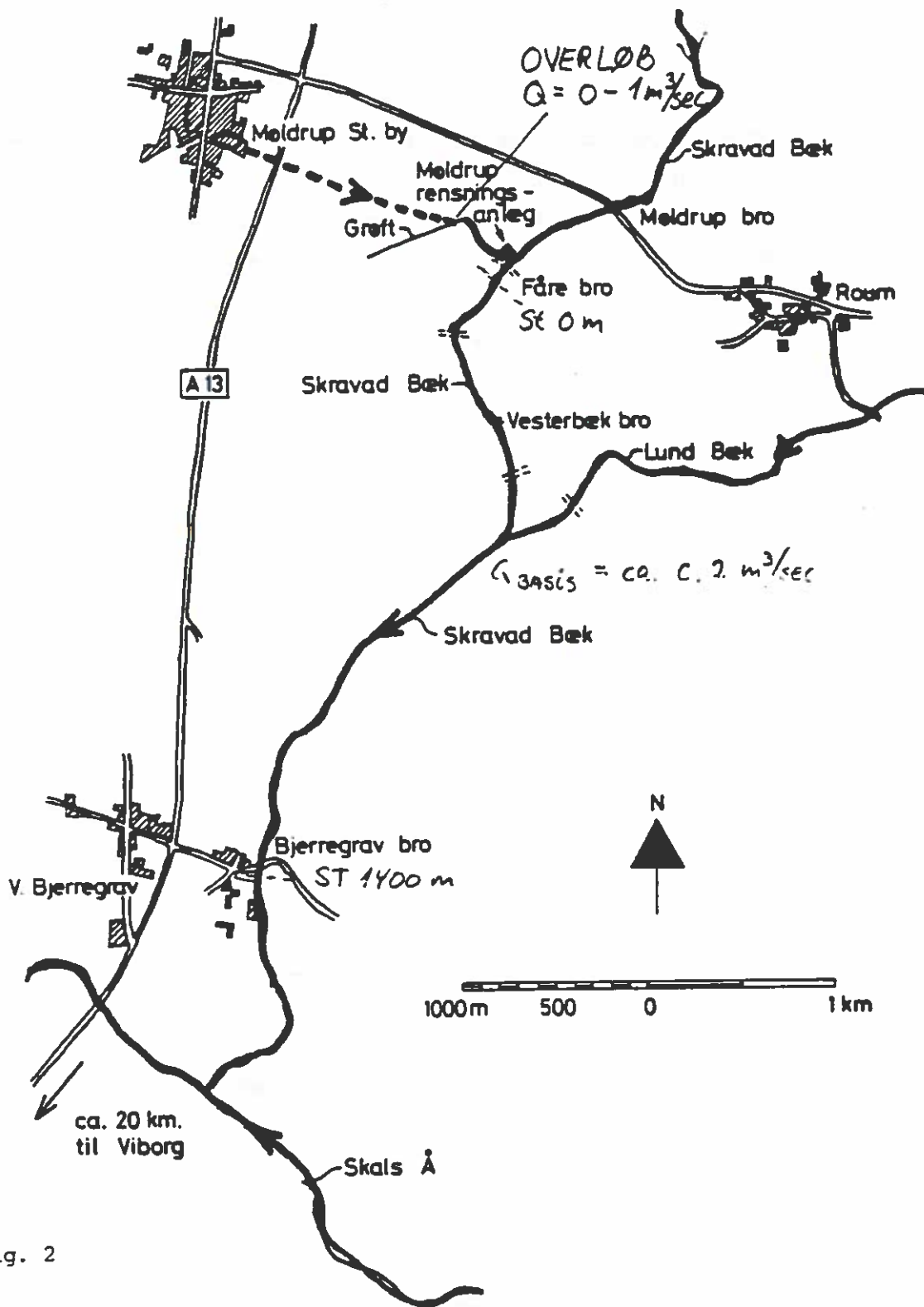


Fig. 2

Undersøgelseslokaliteten ses på fig. 1 og på fig. 2 ses det interessante resultat af målinger foretaget under en aflastning fra overløbsbygværket. Der er to ting, man skal lægge mærke til. For det første, vandføringsbølgen bevæger sig hurtigere end stofbølgen. Dernæst, at stofkoncentrationerne udviser væsentligt større gradienter (både i tid og sted) end vandføringsbølgen. Betydningen af disse to forhold for den numeriske modellering skal omtales nærmere senere.

Fig. 3 viser en "syntetisk" aflastning, idet man på Møldrup renselanlæg havde en opmagasineringsmulighed i et ubenyttet bassin på ca. 400 m<sup>3</sup>. Fra dette bassin udledte man ca. 400 m<sup>3</sup> vand til bækken i løbet af ca. 30 min. Vandet i bassinet var tilsat det flouroserende sporstof Rodamin B, således at stofkoncentrationen kunne måles. Figuren viser målte værdier af vandføring og stofkoncentration, samt beregnede værdier fra en numerisk model, hvor vandføringsmodel og stofmodel var koblet sammen. Dette blev udført i 1979-80 og var det første alvorlige forsøg på numerisk modellering af vandløb på AUC.

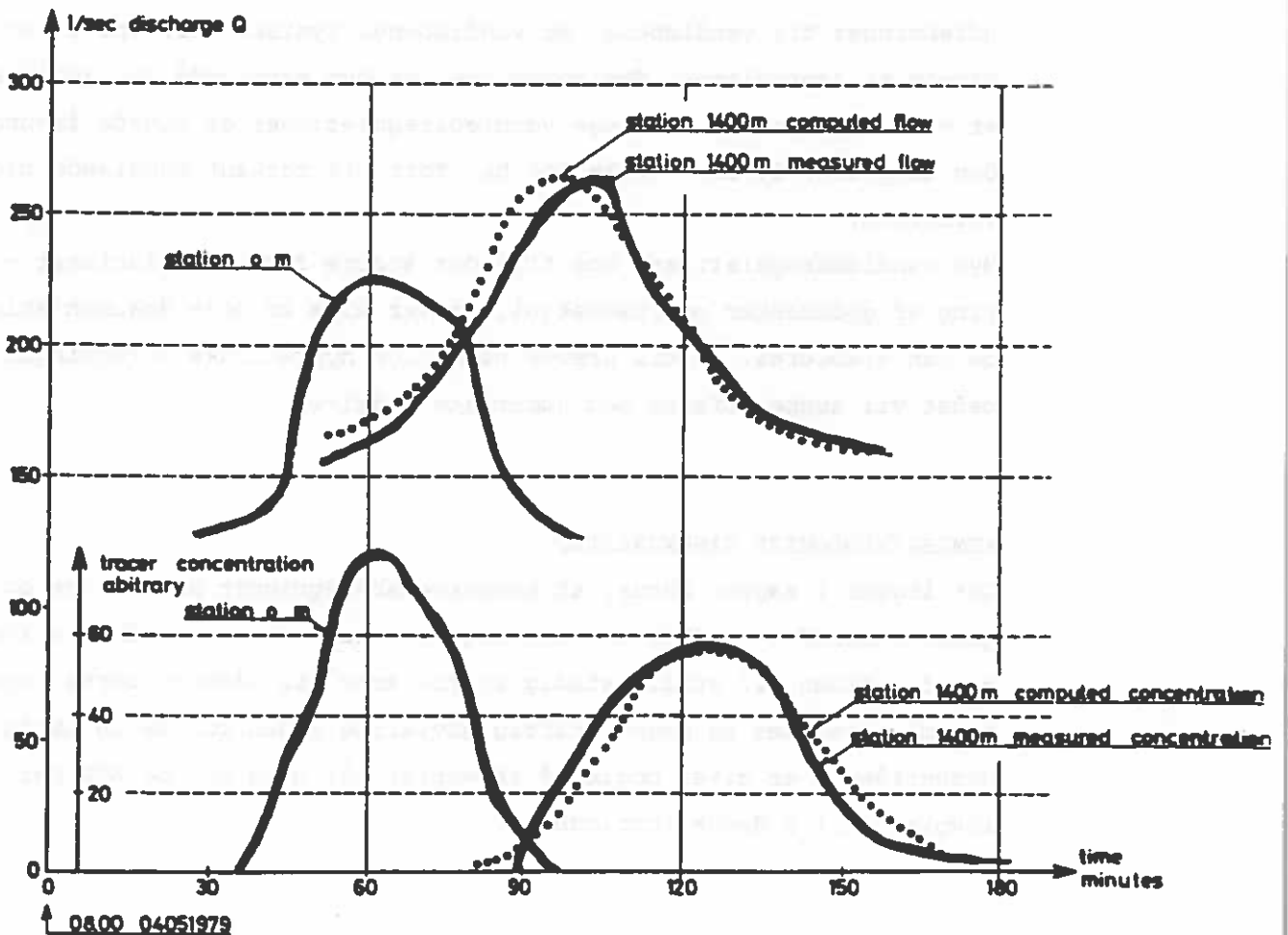


Fig. 3

### Formålet med anvendelse af numeriske vandløbsmodeller

Baggrunden for at beskæftige sig med numeriske vandløbsmodeller er den stærkt øgede interesse for at forbedre forholdene i vore vandløb. Dette er bl.a. kommet til udtryk i den nye vandløbslov af 1983, som sagt i korthed lægger op til at de miljømæssige forhold skal tilgodeses i langt højere grad end tidligere. Dette indebærer, at man nu må foretage komplekse konsekvensvurderinger hver gang indgreb af den ene eller anden art er under overvejelse. Til sådanne konsekvensvurderinger vil numeriske vandkvalitetsmodeller være et vigtigt værktøj.

#### FYSISK VANDKVALITET

Efter at man i de sidste årtier har fået fjernet de direkte spildevandsudledninger til vandløbene, er vandløbenes fysiske tilstand et af de vigtigste miljøproblemer. Nøgleproblemet er den manglende variabilitet, som er en konsekvens af de mange vandløbsreguleringer de sidste århundreder. Den manglende fysiske variation har ført til markant manglende biologisk variation.

Nye vandløbsregulativer, som tillader større fysiske variationer - etablering af gydebanker og fiskeskjul, kræver alle en nøje dokumentation inden de kan etableres. Hertil kræves nøjagtige hydrauliske beregninger, som bedst vil kunne udføres med numeriske modeller.

#### KEMISK/BIOLOGISK VANDKVALITET

Det ligger i sagens natur, at konsekvensberegninger af kemiske og biologiske forhold i vandløb er behæftet med større eller mindre usikkerhed, men fremtiden vil stille stadig større krav til sådanne beregninger, og der må forventes en meget kraftig udvikling inden for dette område. Nedenstående er givet nogle få eksempler på, hvad man på AUC har været involveret i i denne forbindelse.

Modeltype	Effekt	Årsag
Ilt	Fiskedød	Overløbsbygværker Overfladestrømning
Næringssalt N og P	Eutrofiering af hav og søer	Udledning af byspildevand, udsivning fra landbruget
E.colibakterier	Badevandsforurening ved åudløb	Overløbsbygværker m.v.
Ilt/temperatur/ ørred	Nedsat vækst af ørredpopulation	Organisk stof og nedsat beskygning

Tabel 1

#### Massebalance-kernen i vandkvalitetsmodeller

En vandkvalitetsmodel er en matematisk beskrivelse af et sæt koblede massebalancer for en række stoffer, som er nødvendige for at beskrive de aktuelle sammenhænge.

Hvis man f.eks. ønsker at opstille en simpel iltmodel for et vandløb, skal man gøre rede for følgende massebalancer (som også kaldes tilstandsvariable)

1. Opløst ilt
2. Opløst organisk stof
3. Sedimenteret/adsorberet organisk stof på bund.

Hertil kommer de "fysiske massebalancer" for

4. Impuls (impulsligningen)
5. Volumen (kontinuitetsligningen)

Ovennævnte 3 massebalancer er sammenkoblede, idet stof fra hver af disse kan overføres til de øvrige.

Matematisk set formuleres disse massebalancer, som den såkaldte transport/diffusionsligning for hver tilstandsvariabel:

$$\frac{\partial A c_i}{\partial t} + \frac{\partial Q c_i}{\partial x} = K \frac{\partial^2 A c_i}{\partial x^2} + \text{Proces}_i(c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n)$$

$$i = 1, \dots, n$$

hvor

- A vandløbets tværsnitsareal
- Q vandføringen
- K disoersionskoefficienten
- $c_i$  koncentrationen af den i-ende tilstandsvariabel

De fire led i ligningen repræsenterer:

1. Ændring af "delboksens" koncentration
2. Den konvektive transport
3. Den diffusive transport
4. Kilde/dræn af stof fra de øvrige massebalancer.

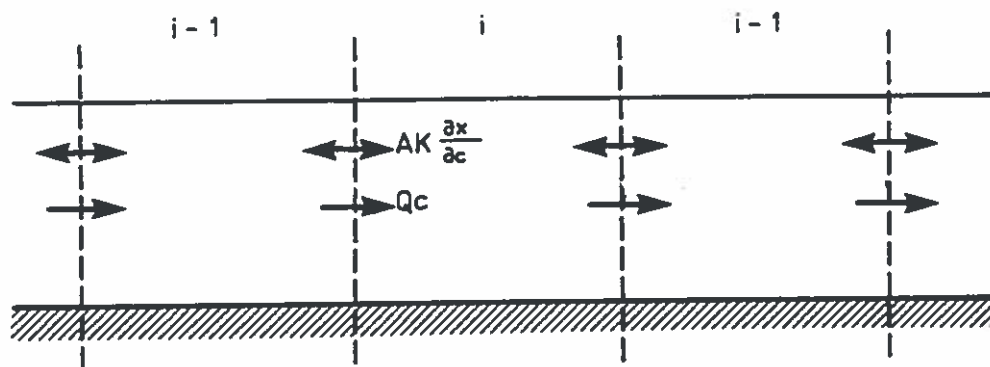


Fig. 4: Massebalancer for "delboks"

Det er karakteristisk for vandløb, at de største ændringer i koncentrationerne, som observeres, ofte skyldes den fysiske transport og spredning. Det er derfor særligt nødvendigt at sikre, at netop disse forhold bliver modelleret korrekt i den numeriske model. Især er den konvektive transport vigtig at få beskrevet korrekt.



Numeriske løsninger

De før nævnte koblede differentiaalligninger kan kun løses numerisk med anvendelse af edb. For at illustrere de grundlæggende problemstillinger, vil vi her forsimplere beskrivelsen til kun at omfatte beregningen af koncentrationen af et enkelt konservativt stof i en stationær strømning. Ligningen herfor er følgende:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Denne ligning skal nu omskrives til en differensligning. Et simpelt eksempel herpå er følgende:

$$\frac{c_j^{n+1} - c_j^n}{\Delta t} + U_j \frac{c_{j+1}^n - c_{j-1}^n}{\Delta x} = K_j \frac{c_{j+1}^n - 2c_j^n + c_{j-1}^n}{\Delta x^2}$$

Betydningen af de indgående indeks fremgår af følgende figur, som er et såkaldt x-t-diagram.

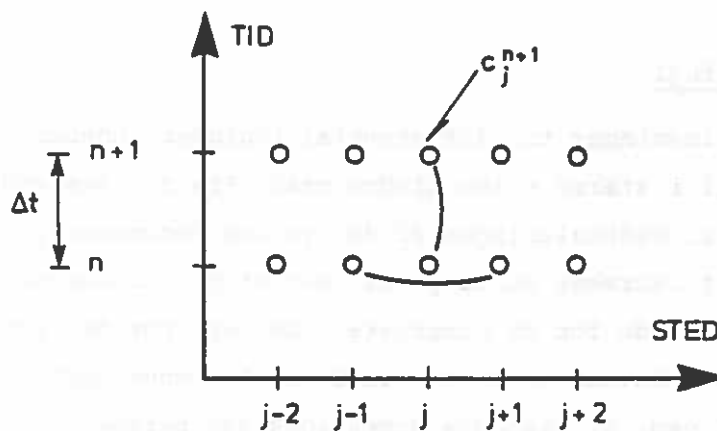


Fig. 5

Den her angivne metode er en såkaldt eksplisit metode, hvor den ukendte koncentration på det nye tidsskridt kan beregnes direkte ud fra kendte værdier.

I praksis anvendes dog stort set altid implicitte metoder, hvor man i hver differensligning medtager flere ubekendte på det nye tidsskridt, som det ses på fig. 6.

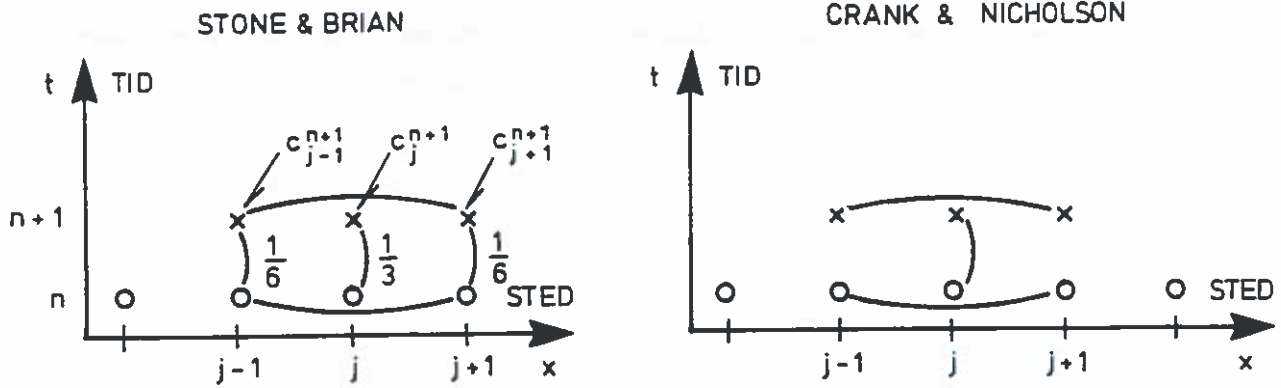


Fig. 6

Disse metoder indebærer, at der for hvert tidsskridt må løses et antal ligninger med et antal ubekendte, som svarer til antallet af delstrækninger i vandløbet.

Numeriske fejl

Numeriske løsninger til differentiallyigninger indebærer altid, at der opstår fejl i større eller mindre grad. Fra fysiske modelforsøg er det velkendt, at nedskaleringen af de fysiske fænomener giver anledning til fejl, som tilstræbes holdt på så lavt et niveau som muligt. Dette gælder helt tilsvarende for de numeriske modeller. For de fysiske modeller gælder, at modellovene skal være tilfredsstillende opfyldt, hvilket kommer til udtryk ved, at bestemte dimensionsløse parametre, f.eks. Reynolds tal og Froudes tal, skal opfylde forskellige betingelser. Tilsvarende kan man for de numeriske modeller opstille dimensionsløse tal, som karakteriserer den pågældende numeriske model. Man skal her begrænse sig til kun at omtale to tal:

$$C_{kon} = \frac{U}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)} \quad \text{det konvektive Courant tal}$$

$$C_{dis} = \frac{K}{\left(\frac{\Delta x^2}{\Delta t}\right)} \quad \text{det dispersive Courant tal}$$

Man kan nu vise, at stabilitet og numeriske fejl ofte kan bestemmes som funktion af disse to parametre. Man kan fx for det simple differensskema, figur 5, vise, at den "numeriske dispersion",  $K_N$  dvs. den fejl, som giver sig udtryk ved, at dispersion bliver anderledes end svarende til den indsatte værdi for dispersionskoefficienten  $K$ , kan bestemmes til

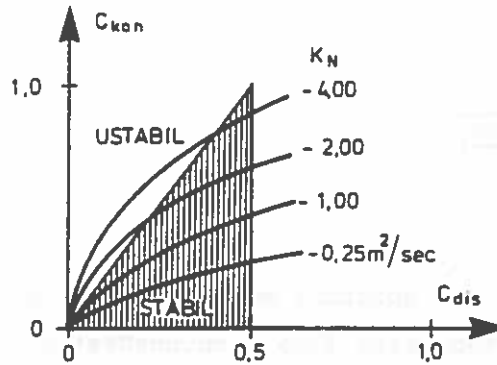


Fig. 7. Numerisk dispersion når  $a = 0,5 \text{ m/s}$  og  $K = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Problemstillingen omkring de numeriske fejl kan illustreres ved følgende figurer i  $x-t$ -planen.

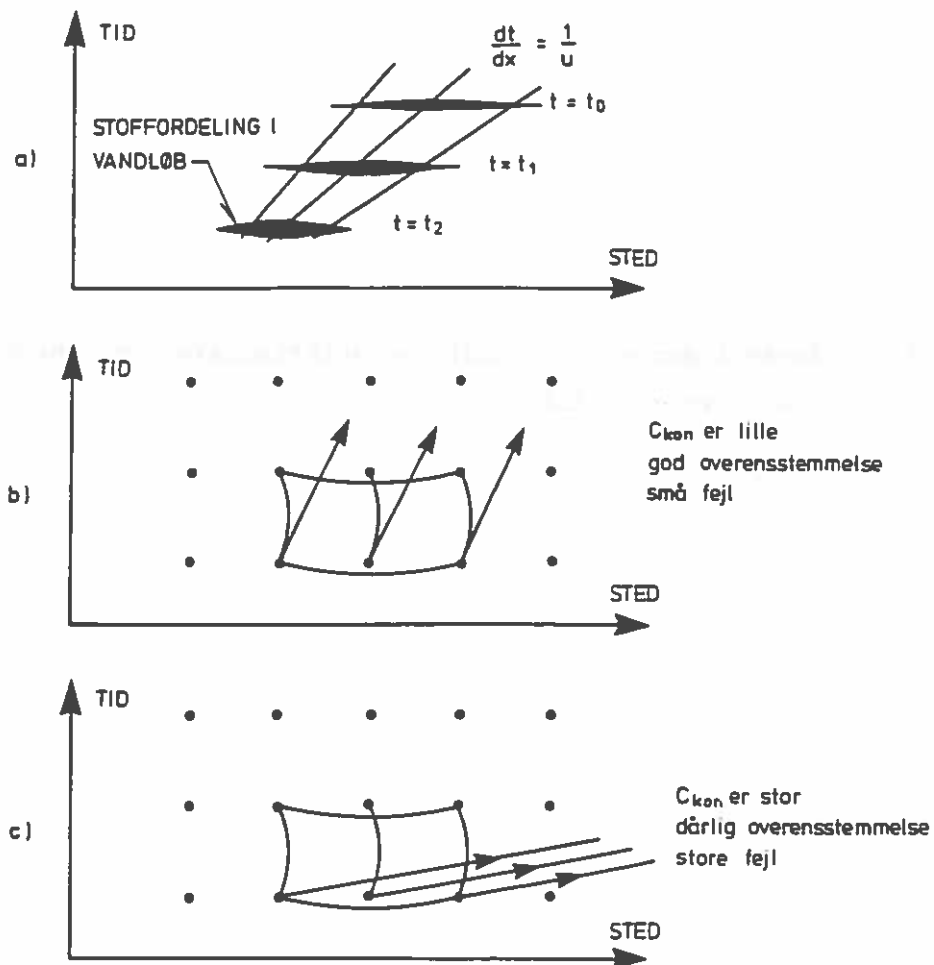


Fig. 8: a) fysisk beskrivelse      b) numerisk model med lille Couranttal  
c) numerisk model med stort Couranttal.

### Kobling af processer

Vi har i det foregående set, at kvaliteten af en numerisk model, d.v.s. den evne til at holde de numeriske fejl, så små som muligt, er stærkt afhængig af valg af  $\Delta X$  og  $\Delta t$  og at denne "kvalitet" bl.a. kan udtrykkes ved Courantallet

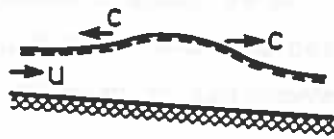
$$C_{\text{kon}} = \frac{u}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)}$$

Dette Couranttal kan opfattes som forholdet mellem den fysiske transport-hastighed og en teoretisk forplantnings-hastighed i beregningsnettet.

Det spændende ved kobling af hydraulik, stoftransport, vandkvalitet og evt. sedimenttransport er, at man herved skal forsøge at modellere processer (herunder også de hydrauliske), som har vidt forskellig transport-hastighed.

På omstående figur er vist nogle karakteristiske hastigheder for de fænomener, som foregår i vore vandløb.

1. DYNAMIC WAVE CELERITY



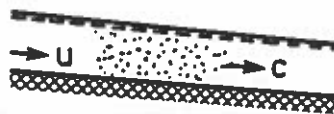
$$c = \pm \sqrt{g \cdot h} - 3 \text{ m/sec}$$

2. KINEMATIC WAVE CELERITY



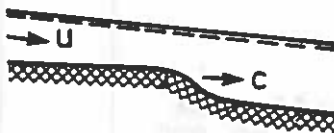
$$c = \frac{dQ}{dA} = 1.5 \cdot u - 0.5 \text{ m/sec}$$

3. POLLUTION PLUG CELERITY



$$c = u - 0.3 \text{ m/sec}$$

4. SAND WAVE CELERITY



$$c = 1 \text{ m/day}$$

5. MEANDER WAVE CELERITY



$$c = 1 \text{ m/year}$$

Fig. 9.

Konsekvensen af disse uens transporthastigheder er derfor, at de forskellige processer vil blive beregnet i den numeriske model med stærkt forskellig numerisk fejl. Kunsten består herefter i, at man ved passende kompromisser skaber en koblet beregningsmodel, hvor de numeriske fejl ligger på et acceptabelt lavt niveau for alle de indgående massebalancer.

Eksempel på anvendelse af en hydraulisk model koblet med en stofmodel

Til afslutning skal man vise et simpelt eksempel, hvor man ved anvendelse af en numerisk model kan beregne fortyndinger af f.eks. spildevand udledt fra et overløbsbygværk til et vandløb.

På figuren er vist hydrografen for sidetilløbet og det er forudsat, at iltkoncentrationen er nul i det udledte vand. Man ønsker nu at bestemme iltkoncentrationen i vandløbet i blandingen af spildevand og vandløbets vand.

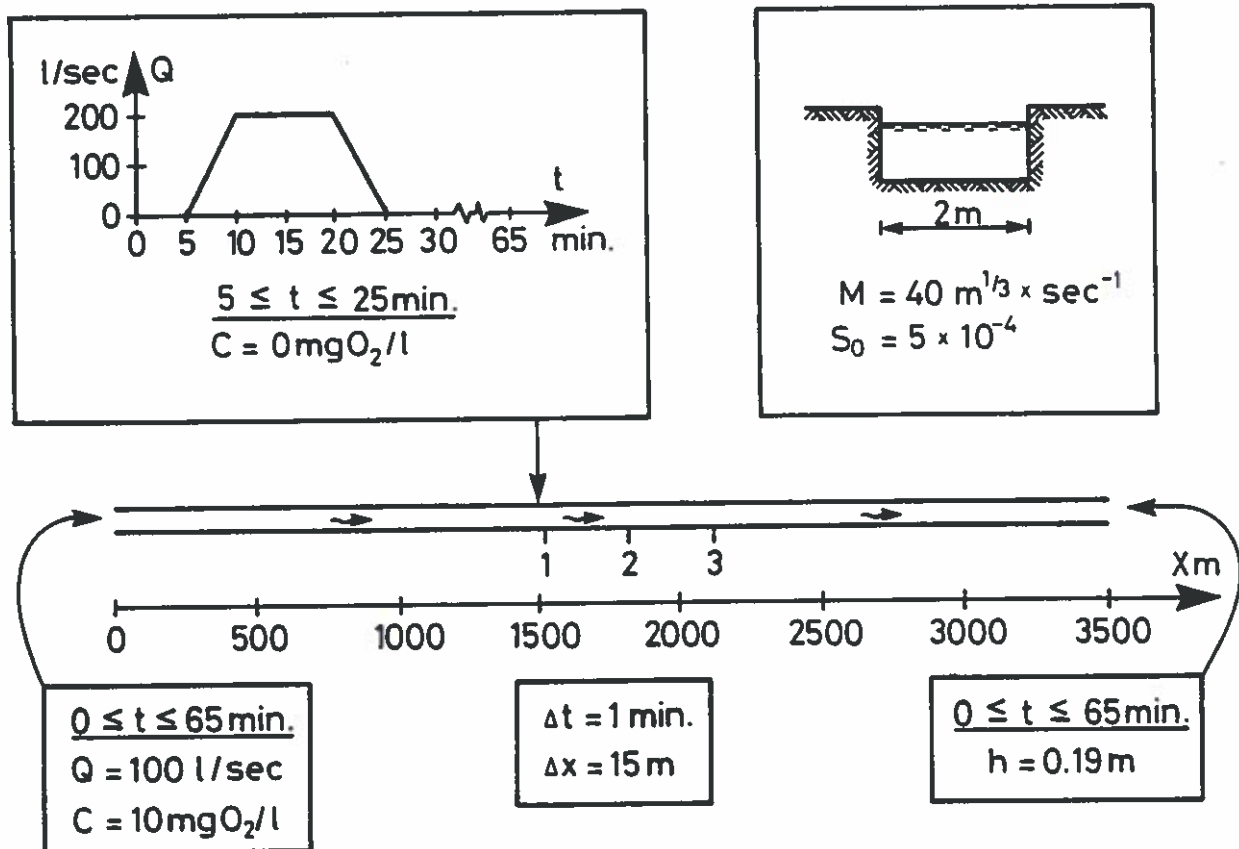


Fig. nr. 10.

Hvis man først antog, at udledningen ikke greb ind i strømhastighederne i vandløbet, kunne man simpelt beregne flow og koncentration i vandløbet ud fra en "steady state" betragtning. Denne er skematisk vist på fig. 11.

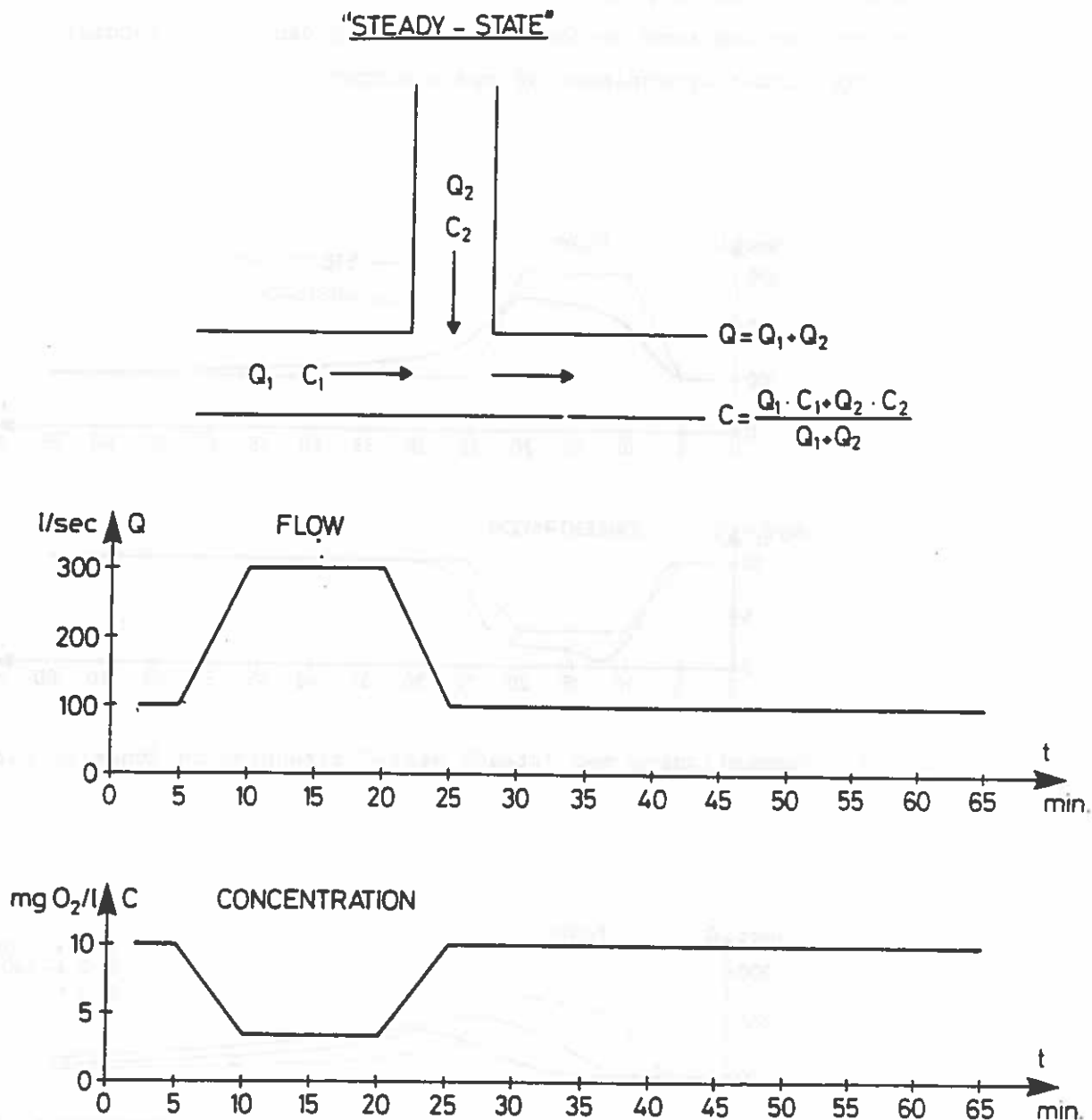


Fig. 11. "Steady state" beregning.

Hvis man nu i stedet anvender en korrekt hydraulisk model (fuld dynamisk bølge) koblet med en stofmodel, opstår der et mere nuanceret billede.

Dette fremgår af fig. 12 og 13, hvor man ser situationen umiddelbart nedstrøms for sidetilløbet. Man ser her, at flowet bliver mindre end, hvad den simple antagelse gav og hvad mere interessant er, at iltkoncentrationen viser sig at blive væsentligt lavere ved den korrekte beregning.

Årsagen hertil er primært, at udledningen er så stor at der skabes en opstuvning opstrøms herfor, som reducerer vandløbets vandføring til tværsnittet under opbygningen af opstuvningen.

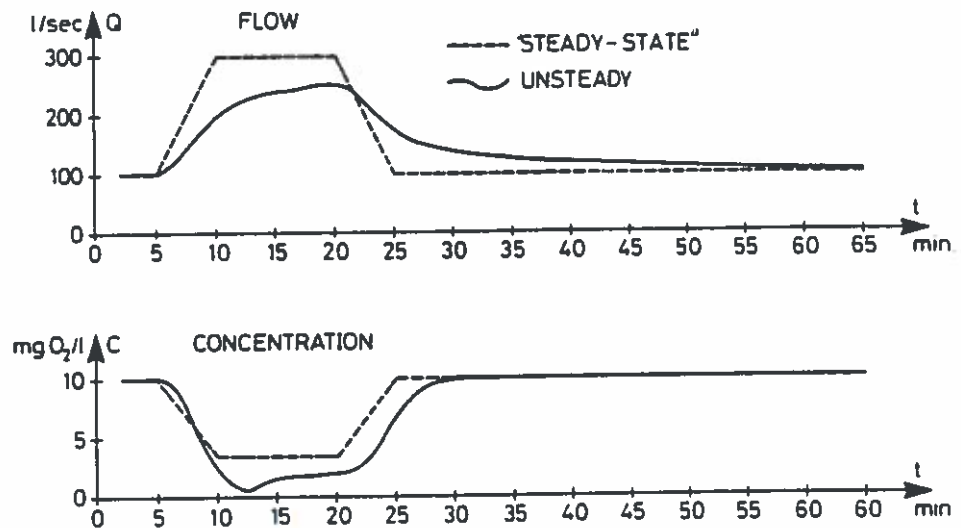


Fig. 12. Sammenligning med "steady state" beregning og dynamisk beregning.

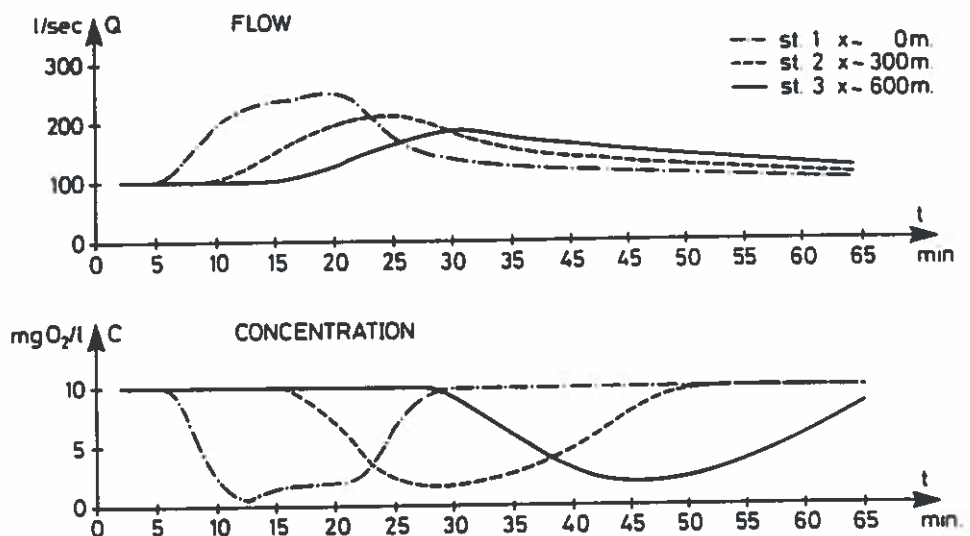


Fig. 13. Tidsplot af flow og iltkoncentrationer nedstrøms overløbsbygværk.



### Afslutning

Dette indlæg skal, som omtalt i indledningen, ikke betragtes som en tilbundsående omtale af numeriske modeller for stoftransport og vandkvalitet for vandløb. Men det er håbet, at man har fået et indtryk af de problemfelter, som er aktuelle i forbindelse med numeriske modeller for stoftransport og vandkvalitet.

### Referencer:

- (1) Miljøstyrelsen, (1981): "Vandløbs reaktion på regnvandsafledning fra fælleskloakerede byområder". Miljøprojekt nr. 36 udført af Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik, Aalborg Universitetscenter.
- (2) Vestergaard, K., Larsen, Torben (1987): "Storm Sewer Dilution in Smaller Stream".



MIKRO-DATAMAT BASERET  
INTEGRERET  
VANDLØBSMODEL

Agern Allé 5  
DK-2970 Hørsholm  
Denmark  
Telephone: +45 2 86 80 33  
National 02 86 80 33  
Telex: 37 402 dhicph dk  
Telecopier: +45 2 86 79 51



## MIKRO-DATAMAT BASERET INTEGRERET VANDLØBSMODEL

### 1. INDLEDNING

Den øgede interesse omkring miljøet i de danske vandløb har givet sig udslag i den nye vandløbslov ved, at miljøinteresser omkring vandløbene nu sidestilles med interesserne omkring løbenes afvandede egenskaber.

I visse situationer står de to sæt interesser i modsætningsforhold, f.eks. kan en miljømæssig restaurering af et vandløb medføre en formindskelse af vandføringsevnen.

I takt med problemstillingens voksende kompleksitet, er der opstået behov for mere avancerede analyseværktøjer i planlægningen. I denne forbindelse kan der forudses et stigende behov for beregningsmodeller, der kan anvendes til analyse af ikke-stationære hydrauliske og vandkvalitetsmæssige forhold.

Dansk Hydraulisk Institut (DHI), og Vandkvalitets Institut (VKI) har begge i en årrække udviklet og anvendt beregningsmodeller indenfor ovennævnte områder. I de seneste år er i stigende omfang benyttet mikrodatamater, og der er ydet stor indsats for at gøre programmerne brugervenlige og let forståelige så de også kan anvendes af brugere uden forudgående indsigt i det teoretiske grundlag og løsningsmetoder.

Samtidig har Edb-samordningsudvalget for areal-, naturressource og miljødata taget initiativ til udarbejdelse af en standardisering af vandløbsregulativdata og specifikation for et decentralt edb-system til registrering af disse data. En arbejdsgruppe med dette kommissorium barslede i maj 1986 med et oplæg til "Kravspecifikation for System for Vandløbs-Regulativdata-Register" (SVARR).

Desuden udvikles der på et system til lagring, udtræk og behandling af data vedrørende spildevandsudløb, vandløb og søer, kaldet SERR-systemet.



Dermed er alle nødvendige forudsætninger til stede for at udvikle en integreret vandløbsmodel beregnet på danske forhold. En sådan udvikling blev igangsat i efteråret 1987 med støtte fra Teknologi Styrelsen og en række danske amter.

## 2. EKSISTERENDE MODELSYSTEMER

### 2.1 MIKE 11

DHI har i mange år arbejdet med udvikling og anvendelse af matematiske modelsystemer indenfor hydraulik og vandkvalitet. Modellerne er blevet udviklet til et stadigt mere generelt og brugervenligt stade, således at det ikke længere kun er modeludviklere, men også brugere uden forudgående erfaring der kan anvende modellerne.

Samtidig har de senere års eksponentielle udvikling indenfor mikrocomputer området gjort det muligt at anvende disse til stadig mere komplicerede og tunge beregningsopgaver. En række af modelsystemerne har dermed kunnet overføres til mikro-computer, og de har kunnet spredes til en bred kreds af brugere i de tekniske forvaltninger og rådgivende firmaer.

En af de modelsystemer, der er blevet overført er flod- og kanal modellen: System 11, som anvendes til hydrauliske, sedimentologiske, transport-dispersion og vandkvalitets beregninger. Den hydrauliske del blev udviklet til mikro i 1986 og 1987 og er kaldt MIKE 11 (basis modul).

Udviklings filosofien har været en fuldstændig generalisering af model komplekset omgivet med et interaktivt menu-system, database- og grafiske faciliteter.

MIKE 11 kan beregne ikke-stationære strømhændelser i vandløbs netværker af vilkårligt udseende, ligesom der ikke vil være nogen begrænsning på den strømningstilstand der kan simuleres (strømmende, strygende etc). Beregningerne kan baseres på fuldt dynamiske eller reducerede bevægelsesligninger:



$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

MAGASINERINGSBEREGNING

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAI_f = gAI_o$$

KINEMATISK BØLGE APPROKSIMATION

DIFFUSIV BØLGE APPROKSIMATION

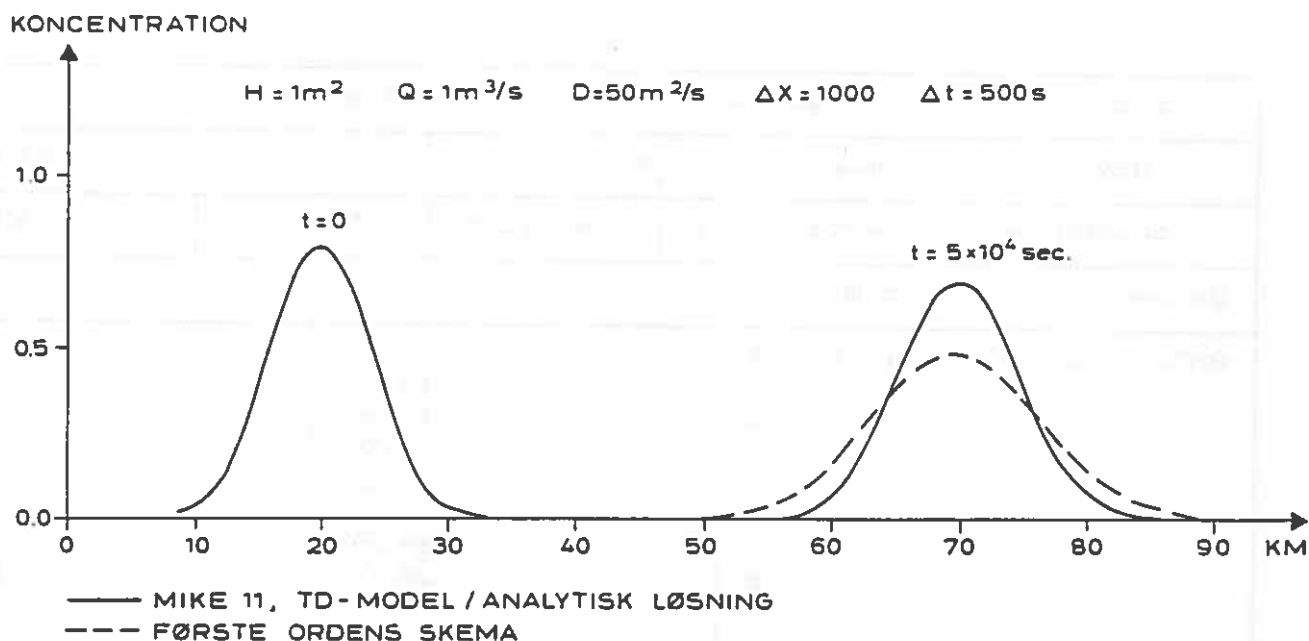
GENERELLE SAINT VENANT LIGNINGER-DYNAMISK BØLGE APPROKSIMATION

Både strømmingen i selve vandløbet og strømmingen over terræn ved eventuelle oversvømmelser kan tages i regning. Bygværker og andre strømregulerings foranstaltninger kan medtages ligesom pumpning, nedbør og fordampning.

Modelresultater er vandstands-, vandførings- og hastigheds variationer overalt i det simulerede område, og præsentationen kan være i tabelform eller grafisk i form af længdeprofiler eller hydrografer.

2.2 Transport-dispersions og vandkvalitets model

Transport-dispersionsmodellen baseres på den eksisterende System 11 TD model, der har været anvendt bl.a. til Limfjords undersøgelserne. Beregnings skemaet er videreudviklet, så det er bedre i stand til at beskrive skarpe fronter f.eks. i nærheden af en udledning. Samtidig er beregnings nøjagtigheden blevet forbedret. Efterfølgende testeksemplet viser en præcis overensstemmelse mellem koncentrationsfordelingen i modellen og i den analytiske løsning for et Gaus-formet udslip. Til sammenligning er resultatet fra et skema af første ordens nøjagtighed vist.



Modellen er kompatibel med den hydrauliske model og kan ligesom denne beskrive ikke-stationære fænomener.

Vandkvalitetsmodellen arbejder parallelt med TD-modellen og beregninger omsætningen af kritiske parametre for vandkvaliteten såsom ilt, kvælstof, fosfor og makrofytbiomasse. Der tages hensyn til spildevandsbelastningen, genluftning, produktion og respiration i vandløbet, og omsætningen i bundlaget medtages separat.

Modellen er kompatibel med den hydrauliske model og kan ligesom denne beskrive ikke-stationære fænomener.

### 3. ANVENDELSE AF VANDLØBSMODELLEN

I de senere år har der været adskillige tiltag indenfor anvendelsen af edb indenfor vandløbssektoren på områderne datakontrol, lagring, udtræk, behandling og præsentation.

Den integrerede vandløbsmodel vil være en komplementær udbygning til de eksisterende og planlagte systemer. Database opbygningen er meget brugervenlig og åbner mulighed for indlæsning af data fra eksterne lagre.

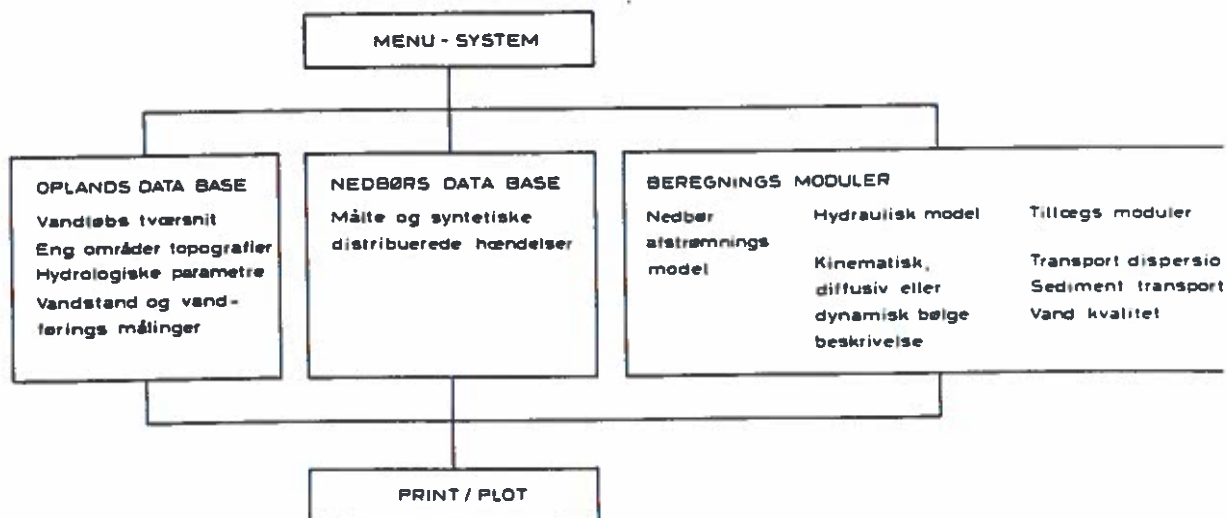


A.6.2 VANDLØBS TVÆRSNIT - Rådata									
Navn	Km-punkt	3	4	X-koor	5	Y-koor	6	7	Retning
SKJERN AA	49.600	1		410.200		500.000	1		270
Datum : 2.12 m		X (m)			Z (m)				
Antal x-z talsæt : 8		1		0.00					10.00
		2		14.00					9.70
		3		15.50					8.10
		4		17.00					7.70
		5		18.20					7.70
		6		24.00					8.00
		7		24.90					9.70
		8		35.00					10.00

<Esc> afslut+opdater, <'K'S'> opdater, <'Q'> afslut UDEN opdatering, <'I'> ve

Den integrerede vandløbsmodel vil være færdigudviklet i midten af 1988, og vil indeholde en vifte af beregningsmodeller, der kan assistere vandløbsingeniøren i det daglige arbejde.

Eksempler på de mange anvendelses muligheder kunne være:





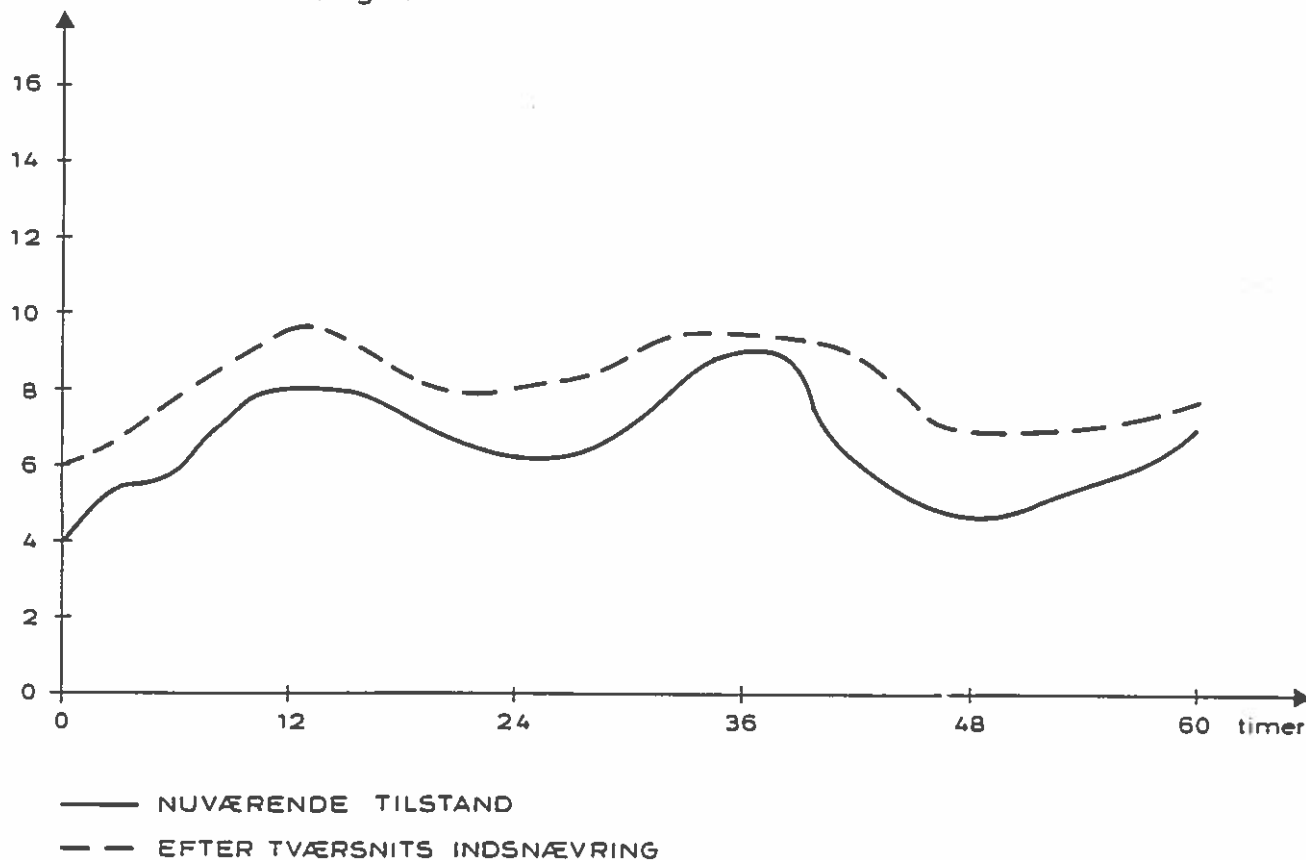


### Vandløbsrestaurering.

I forbindelse med vandløbsrestaurering og -vedligeholdelse er der et modsætningsforhold mellem, at vandløbet effektivt skal kunne afvande uden at der opstår oversvømmelser, og at vandløbet skal være et godt hjemsted for dyr og planter, f.eks. med et slynget forløb, gemmesteder for fisk osv.

Både risikoen for oversvømmelse og vandkvalitet/iltforhold kan beskrives med vandløbsmodellen, der således vil være et nyttigt instrument i forbindelse med restaureringsstudier. Ligeledes vil grødeskæring kunne planlægges og konsekvensen af forskellige grødeskæringsstrategier kunne beregnes. Det hydrauliske modul i vandløbsmodellen anvendes idag til det omfattende studie i forbindelse med omlægningen af Skjern A.

ILTKONCENTRATION (mg/l)





### Overvågning.

Overvågning af tilstanden i vandløb vil i de kommende år kunne ske med anvendelse af automatiske målestationer. Ved hjælp af vandløbsmodellen vil man kunne regne sig frem til en supplering af disse målinger, således at der opnås et fuldstændigt billede af hele vandløbssystemets tilstand på ethvert tidspunkt. Dette gøres ved at lade modellen beregne tilstanden på lokaliteter, hvor der ikke er målt (under bedst mulig hensyntagen til de målte værdier) samt beregne ikke-målte parametre (f.eks. vandføring, iltforhold etc.) En speciel anvendelse i denne forbindelse vil være muligheden for at opspore forurenings kilder langs vandløbene ved at regne baglæns udfra målerregistreringer og/eller udtagne prøver.

1008/chcr65  
1987-11-16  
KaH/SL/lkn

Indlæg vedrørende

Etablering af

fiskepassager

N. Lonnebjerg

Ingeniørhøjskolen - Hosens Teknikum

Chr. M. Østergaards Vej 4 - 8700 Horsens

## FORHINDRINGER FOR FISKENES FRI PASSAGE

Muligheden for at kunne foretage vandringer på langs ad vandløbssystemet er af betydning for såvel de egentlige vandrefisk som for de fisk, der tilbringer hele deres liv i ferskvand. To årsager til vandringerne er de vigtigste: Fiskene skal finde føde, og fiskene skal gyde.

Hvor der i et vandløbssystem forekommer forhindringer, der ikke kan passeres af de til systemet naturligt hørende fiskearter, kan det derfor være ønskeligt at bygge et fiskepas.

Forhindringerne kan være naturbetingede eller menneskeskabte.

De naturbetingede forhindringer forekommer næsten kun i klippe- og bjergområder og fremtræder som styrt - ofte med betragtelig højde - eller som strygpartier, hvor vandets hastighed er meget stor.

De menneskeskabte forhindringer er hyppigst stemmeværker, der etablerer en opstuvning, hvorved overvandet kommer til at ligge så meget højere end undervandet, at dets relative beliggenhedsenergi kan udnyttes ved anlæg af kraftværker, møllerier, engvandingsanlæg eller dambrug. Vandets passage gennem anlægget og de hertil hørende frisluser gør det almindeligvis umuligt for opgående fisk at passere forhindringen, og nedadgående fisk vil ofte omkomme i stort tal under passagen eller under forsøg på passage af anlægget. Det sidste er navnlig tilfældet ved kraftværksanlæg, hvor fiskene enten kan blive kvalt eller slidt op i forsøget på at slippe gennem et risteparti eller kan blive slået ihjel ved passagen gennem turbinerne.

### FISKEPAS OG KRAV TIL DISSE

Fiskepas anvendes i det følgende som en betegnelse for bygværker og anlæg, der har til formål at skabe en passagemulighed ved en vandløbsspærring, der ellers er helt eller delvis impassabel for fiskene i vandløbet.

Mange fiskearter er i stand til at springe ud af vandet, og denne evne kan udnyttes i en fiskepaskonstruktion. Det må dog

betænkes, at vel er laks og store havørreder i stand til at forcere højder på godt 1 meter alene ved hjælp af springkraften, men mindre laksefisk og vore øvrige fiskearter besidder hverken samme springevne eller -lyst, og for alle fiskearter gælder det, at de foretrækker at svømme, hvor det er muligt, frem for at skulle springe ud af det naturlige element. Det er dog klart bevist, at typer af pas, hvor fisken skal springe eller skal forcere en overfladenær stråle, kan fungere tilfredsstillende, når der alene stilles krav om passagemuligheder for laks og ørred og visse andre springende fiskearter.

Til hver pastype må stilles nogle specielle krav, men herudover er der en række generelle krav, som den projekterende må være opmærksom på:

Indgangen til passet skal være således placeret, at den er let for fisken at finde. Hvis et fiskepas i et fiskerigt vandløb viser sig at være uvirksomt, er årsagen næsten altid at passets udmunding i undervandet ikke kan lokaliseres af fiskene.

Vandføringen gennem passet skal være størst muligt, og vandet skal forlade passet på en sådan måde, at den opgående fisk fornemmer strømmen så tidligt som muligt og let lokkes til at benytte passet. Der må ikke dannes cirkulerende strømninger eller døde partier i umiddelbar nærhed af udløbet.

Passet skal udformes således, at vandhastigheden i det er lavere end den hastighed, hvormed opgangsfiskene kan svømme, og eventuelle styrt må have en sådan udformning og højde, at fiskene kan passere disse ved springning eventuelt kombineret med svømning.

Passet skal eventuelt forsynes med hvilebassiner.

Passets proportioner, placering og konstruktion må afstemmes, så det i videst muligt omfang er virksomt ved varierende vandstand og vandføring i vandløbet.

Passets størrelse, udformning og fald må afpasses, så den til

rådighed værende (ofte meget begrænsende) vandføring i størst muligt omfang ledes gennem passet.

Ved kraftværker - og eventuelt også ved visse andre anlæg - kan ledeanordninger nedstrøms være nødvendige for at sikre, at den opgående fisk finder passets indgang, og ledeanordninger opstrøms skal sikre, at et rimeligt antal ungfisk og nedfalds fisk kan passere uskadt nedefter.

Passet skal kunne fungere uden for hyppig manuel justering.

Passets udformning og/eller afskærmning skal sikre, at muligheden for aflejringer i eller tilstopninger af passet reduceres mest muligt. Der skal være mulighed for at kunne rense passet.

Passet skal sikres mod opdrift, og dets fundering, spunsning og eventuelle filterkonstruktion skal yde fornøden sikkerhed mod hydrauliske grundbrud.

Såfremt passet indbygges i et eksisterende bygværk må det ikke svække dets stabilitet, og den reduktion i vandføringssevne, en indbygning af et pas kan forårsage, skal om nødvendigt kunne kompenseres på anden måde.

Passets styrke og holdbarhed skal stå mål med de forekommende statiske, dynamiske, vejrligsbetingede og korroderende påvirkninger.

Det bør tilstræbes, at passet falder naturlig ind i terrænet og i den øvrige konstruktion.

Passet skal være økonomisk i anlæg og i drift.

De fleste af de nævnte krav er uomgængelige, medens enkelte kan accepteres opfyldt i mindre grad. Der findes dog næppe et fiskepas, der - uanset at alle nævnte krav opfyldes - kan passeres af samtlige fiskearter i vore vandløbssystemer. For flere af vore hjemlige fiskearter gælder, at vi endnu ikke

har tilstrækkelig viden om deres evne til at forcere fiskepassene.

### FISKEPASTYPER

Fiskepas bygges i Danmark hyppigst som :

fiskepas af bassintypen eller  
fiskepas udført efter modstrømsprincippet.

#### Bassinpas

Denne type fiskepas er opbygget af et antal bassiner eller kamre, der er bygget sammen i serie, således at den dannede bassinrække etablerer en forbindelse mellem under- og overvandet. Hvert bassin ligger lidt højere end det nedstrøms liggende nabobassin, og vandet strømmer fra bassin til bassin enten gennem en overløbsåbning, der er udsparet i bassinernes nedstrømsvæg eller gennem dykkede åbninger i samme væg. Bassinpas kan også forsynes med både overløb og dykkede åbninger. Ofte anvendes betegnelsen "kammertrapper" på bassinpas, hvor de enkelte bassiner er udformet med lodrette, parallelle sidevægge, og lodrette mellem vægge der står vinkelret på sidevæggene.

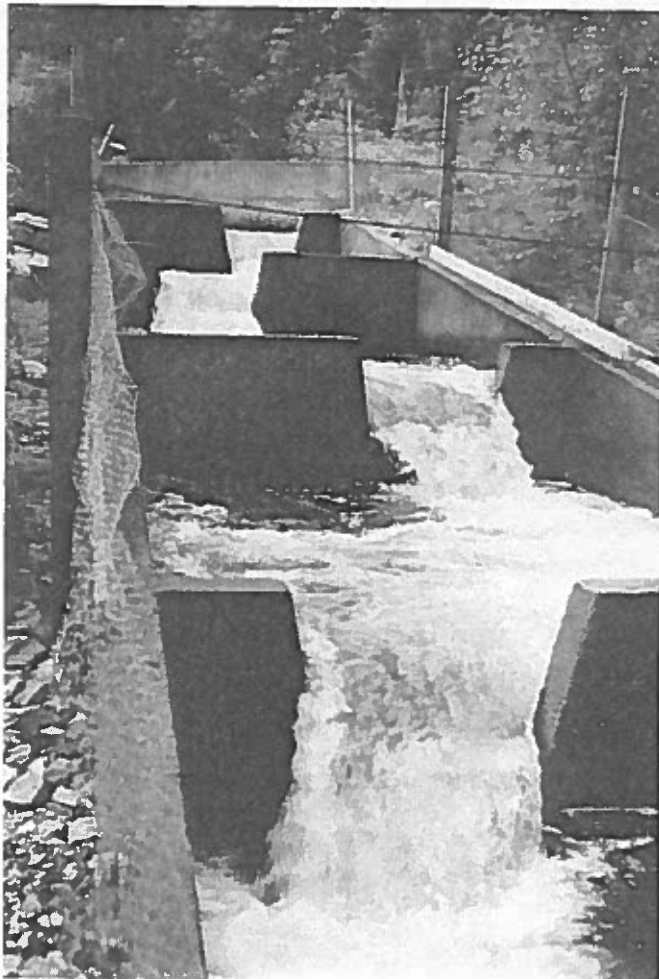


Fig. 1

Bassinpas (kammertrappe) med overløbsåbninger.

Minimumsdimensioner på kammertrapper med overløbsåbninger afhænger af de fiskearter, der skal benytte konstruktionen. Skal trappen benyttes af laks og havørreder bør åbningens bredde ved rektangulært tværsnit næppe være mindre end 0,4 m.

Bassinernes bredde og længde bør ikke være mindre end henholdsvis 1,5 m og 3 m. Vandspejlsforskellen mellem to nabobassiner bør ikke overstige 0,4 meter, og vanddybden under udløbene skal mindst være 0,65 meter. Øges bassindybden til 0,75 meter, kan bassinlængden reduceres til 2,5 meter.

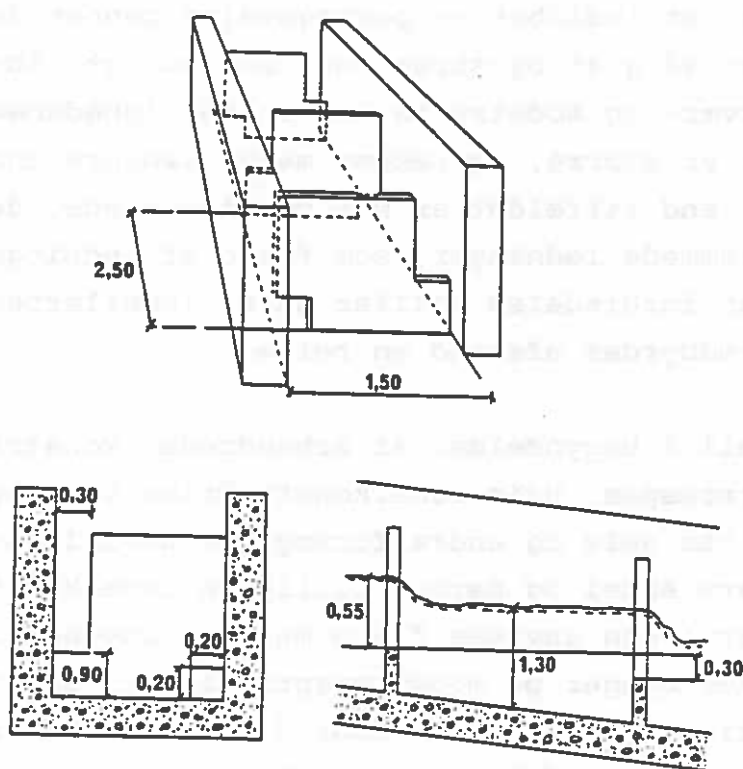
Skal kammertrappen udelukkende benyttes af bækørreder, må åbningens bredde ikke være mindre end 0,3 meter. Vandspejlsforskellen mellem bassinerne bør ikke overstige 0,3 meter. Bassinernes længde og bredde skal mindst være henholdsvis 2,4 meter og 1,2 meter, og vanddybden under udløbet skal mindst være 0,6 meter. Skal kammertrappen kunne forceres af karpefisk (kun få arter kan benytte denne type) bør vandspejlsforskellen ikke overstige 0,2 meter mellem to bassiner. Åbningsbredden kan, når kun karpefisk skal passere, reduceres til 0,25 meter.

Forbindelsen mellem de enkelte bassiner kan som nævnt også etableres ved dykkede åbninger, der anbringes ved eller nær bunden og en af siderne. Åbningerne anbringes oftest skiftevis i højre og i venstre side i mellemvæggene. Åbningerne kan være rektangulære med højden 0,45 meter og bredden 0,35 meter, når laks (og havørreder) skal benytte trappen. For havørred og ørred anses en højde på 0,35 meter og en bredde på 0,30 meter for tilstrækkelig, og for karpefisk kan en højde og en bredde på 0,25 meter regnes som minimum. Vandspejlsforskellen i to nabobassiner bør ikke overstige 0,4 meter for laks, 0,30 meter for havørred og ørred og 0,20 meter for karpefisk.

Beregning af bassinpas' vandføring foretages almindeligvis for de nævnte typer vedkommende ved anvendelse af de i hydraulikken sædvanligt benyttede formler for overløb og dykkede åbninger. Specielle udformninger kræver modelforsøg eller måling i fuld skala.



Figur 2 viser en kammertrappe med såvel overløbsåbninger, som dykkede åbninger. Med de anførte mål har trappen hældningen 1:8,3, og vandføringen er ca. 250 liter/sekund.



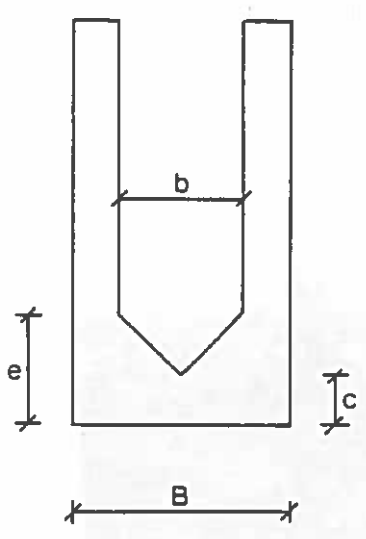
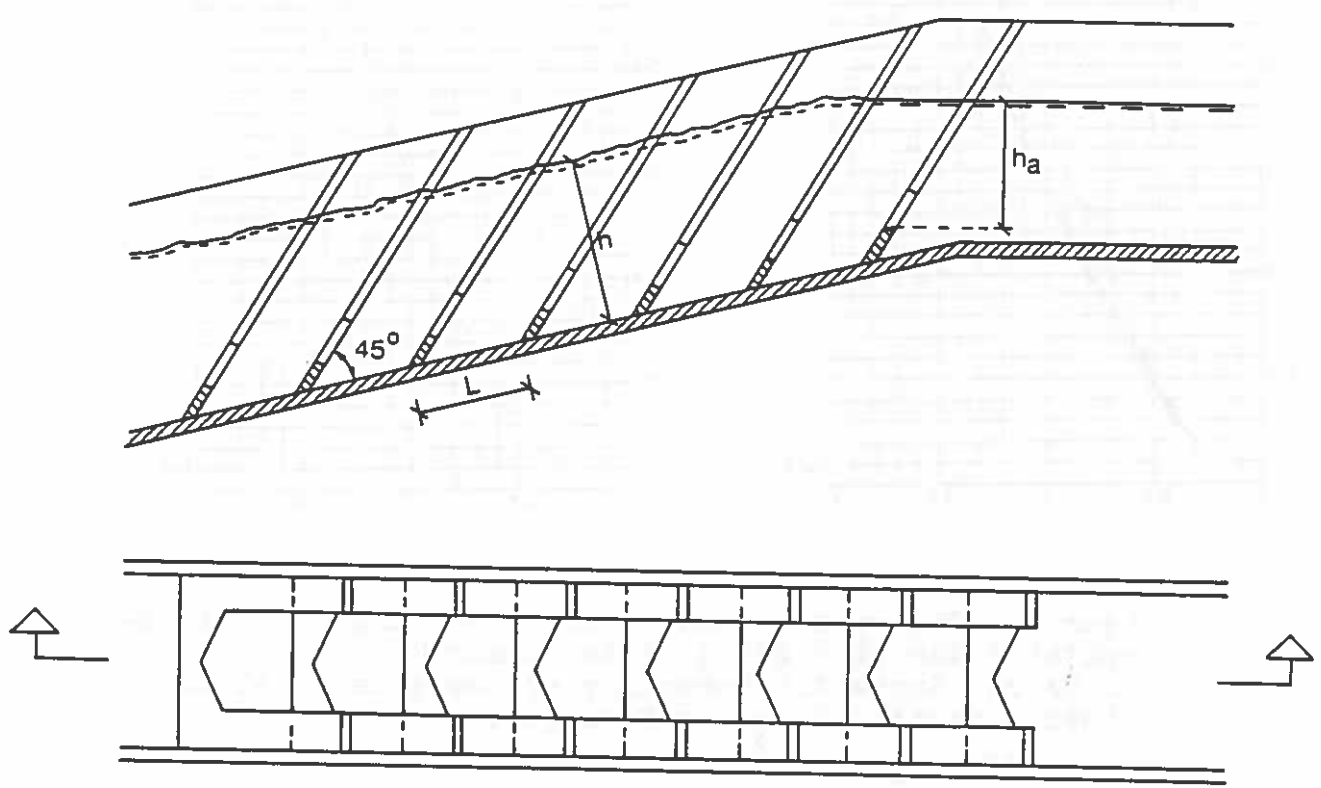
Figur 2. Kammertrappe med overløbsåbninger og dykkede åbninger.

### Fiskepas af modstrømstypen

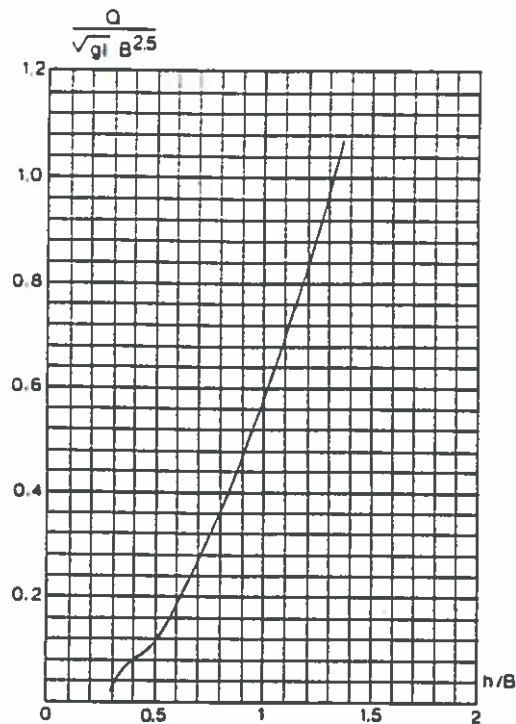
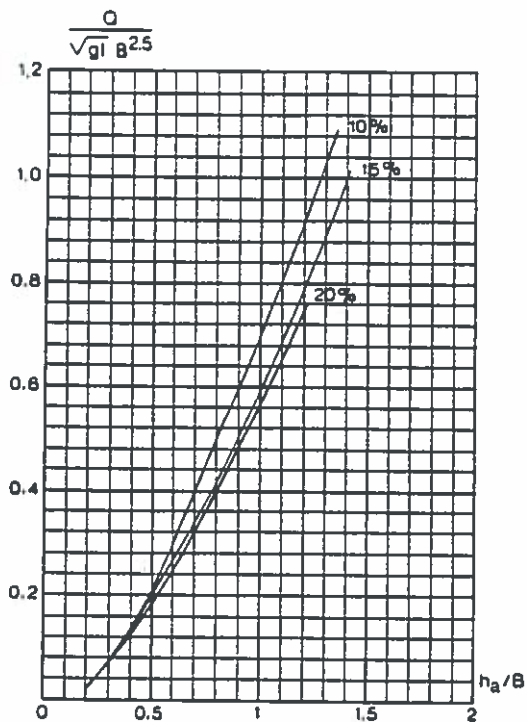
Pas af denne type udføres som en rende, almindeligvis med rektangulært tværsnit. I renden indbygges ved bunden og/eller siderne lameller, der opbremses det gennemstrømmende vand så meget, at hastigheden i rendens centrale, frie tværsnit - selv ved store pashældninger - reduceres så meget, at fiskene kan gennemsvømme lange pas i et stræk. Strømningen foregår med frit vandspejl.

Under gennemstrømningen ledes vandet ind i de mange sekundære kanaler, der dannes af lamellerne og tvinges ud herfra i en retning, der er mere eller mindre modstrøms. Det er af stor betydning, at indløbet og passagevejen gennem de sekundære kanaler er så glat og strømlinet som muligt, idet de herved dannede tvær- og modstrømme har en hastighedshæmmende virkning, der er større, og rækker meget længere ind i hovedstrømmen, end tilfældet er med den turbulens, der opstår i gennemstrømmede ledninger, som følge af ledningsvæggens ruhed. I den forbindelse spiller såvel lamellernes form, placering og indbyrdes afstand en rolle.

Siden Denil i begyndelsen af århundredet konstruerede de første modstrømspas, hvis lamelkonstruktion var meget kompliceret, har han selv og andre forsøgt at udvikle modstrømspas med en mere enkel og dermed billigere lamelkonstruktion. Der kan derfor i dag anvises flere mulige, anvendelige konstruktioner, der bygger på modstrømsprincippet. En af de enkleste konstruktioner er vist på figur 3. Lamellerne er beliggende i ét plan og kan udskæres i et stykke af en plade af egnet materiale, eller de kan samles af brædder. Lamelkonstruktion, -placering, vandføringsevne og indeløbstryktab fremgår af figurerne 3 og 4.



Figur 3. Modstrømspas med etplanlameller. (8).  
B = indvendig totalbredde i passet.  
b = 0,58 x B  
c = 0,24 x B  
e = 0,47 x B  
L = 0,67 x B



Figur 4. Til venstre: Kurve til beregning af indløbs-tryktab i den på figur 3 viste konstruktion. Til højre: Kurve til beregning af sammenhæng mellem dybden i passet,  $h$  og vandføringen.

$Q$  = vandføringen ( $m^3/sek$ )

$g$  = tyngdeaccelerationen ( $m/sek^2$ )

$I$  = passets fald (rent tal)

$B$  = passets indvendige totalbredde (m)

$h_a$  = vanddybde i tilløb, se fig 3 (m)

$h$  = dybde i pas, se fig 3 (m).



Fig. 4 Modstrømspas

Modstrømspas er anvendt med indvendig totalbredde fra 1,2 m ned til ca. 0,6 m. Den frie gennemstrømningsbredde mellem lamellerne er fra ca 0,7 m ned til ca. 0,3 m. Passene anlægges med fald 1:8 - 1:4. De store (brede) pas anlægges oftest med faldet 1:6, og kun de mest avancerede typer kan - i de små størrelser - anlægges med fald 1:4, for pas med ringe faldhøjde endog med fald 1:3.

Ved store faldhøjder må der indbygges hvilebassiner. Litteraturen angiver så forskellige værdier af tilladelig faldhøjde mellem sådanne bassiner som 1,8 meter og 6 meter. Nødvendigheden af en indbygning må vurderes særskilt i hvert enkelt tilfælde, idet såvel pasudformning, -hældning, -størrelse som arten af de fisk, der skal benytte passet, har betydning.

Vandføringen i passene afhænger af bredden, faldet, lamelkonstruktionen og indløbets placering i forhold til vandspejlet. De store pas arbejder normalt med vandføringer omkring  $1 \text{ m}^3/\text{sek.}$ , medens det er muligt med små pas at nå ned på vandføringer mellem 50 og 100 l/sek.

Undersøgelser såvel i udlandet som herhjemme har vist at fiskepas af modstrømstypen er anvendelige for et stort antal fiskearter.

Mere detaljerede anvisninger vedrørende modstrømspas kan findes i N. Lonnebjerg: Fiskepas af modstrømstypen, Meddelelser fra Ferskvandsfiskerilaboratoriet 1/80, Danmarks Fiskeri- og Havundersøgelser.





Seminar om danske vandløb afholdt i Ebeltoft 23. november 1987

INGENIØR-ØKOLOGISK RADGIVNING  
VEDRØRENDE  
SKJERN A OG RINGKØBING FJORD

Hans Schrøder  
Dansk Hydraulisk Institut (ATV)

1. INDLEDNING

Nærværende indlæg er stort set identisk med et rammeforslag udarbejdet af en konsulentgruppe bestående af Dansk Hydraulisk Institut, Vandkvalitetsinstituttet og LICconsult i august 1987 foranlediget af Skjern-A arbejdsgruppens indbydelse til alle interesserede til at fremsende forslag til forbedring af tilstanden i Skjern A-systemet og Ringkøbing Fjord.

Siden seminarets afholdelse er projektet vedrørende forbedring af Skjern A-systemets selvrensende effekt blevet gennemført og af-rapporteret, se /1/ og /2/.

2. BAGGRUND OG FORMÅL

Ringkøbing Fjords miljøtilstand er i løbet af det seneste årti blevet forværret i en sådan grad, at "fiskene er væk - fuglene er væk", jfr. miljøministerens udtalelser om denne sag.

I Ringkøbing Fjords tilfælde er der ikke tvivl om, at problemet er fremkaldt af menneskers indgreb i naturen lokalt omkring og i selve fjorden. Som sådant vil det også kunne ændres af mennesker ved at gennemføre forskellige ingeniør-økologiske projekter, der primært sigter på en nedsættelse af fjordens belastning med næringssalte og en forøgelse af vandskiftet.



Det sidste er nemlig muligt, idet udskiftningen af fjordens vand med det rimeligt uforurenet vand i Vesterhavet kontrolleres af slusen i Hvide Sande.

Mulighederne for at nedsætte fjordens belastning med næringssalte er også gode, idet man, udover dem der følger af Folketingets vandmiljøhandlingsplan, også kan opnå en reduktion af tilstrømningen af især kvælstofnæringssalte, dersom man lejlighedsvist tillader oversvømmelse af lavtliggende arealer i ådalen.

Miljøtilstanden i fjorden er blevet forværret af følgende hovedårsager:

- a) Skjern Å-projektet
- b) En stigning i tabene af næringsstoffer, især fra landbruget i fjordens afstrømningsopland
- c) En reduktion af vandskiftet gennem slusen i Hvide Sande.

a)

Dræningen af de lavtliggende engarealer i Skjern Å, der i sin tid blev muliggjort af åens udretning og inddigning, har medført en forøget tilførsel af næringsstoffer til fjorden.

Den naturlige aflejring af organisk stof og dermed også næringsstoffer, der før skete på de oversvømmede engarealer, føres nu direkte ud i fjorden. Herudover udnyttes engarealernes kapacitet til optagelse af næringssalte ved plantedækkets vækst ikke mere, samtidig med at den denitrifikation (bakteriers omdannelse af nitrat til luftformig kvælstof), der tidligere var virksom i engområderne, selvsagt ikke foregår nu.

Det er primært engarealerne, der har evnen til at tilbageholde de forurenende stoffer og herunder især fjerne nitrat ved denitrifikation. I selve åløbet foregår der imidlertid også en vis denitrifikation, som også er blevet mindre som følge af vandløbets udretning og grødeskæringen.





Skjern A's inddigning har derudover betydet, at den naturlige aflejring af fosfornæringsalte, der før skete på de oversvømmede engarealer, nu føres direkte ud i fjorden.

b)

Importen af kvælstof i form af kunstgødning og foderstoffer er steget meget væsentligt i afstrømningsoplandet over de sidste 30-40 år, på samme måde som det er sket i den øvrige del af Danmark. Samtidig er udnyttelsen af kvælstofgødningen blevet forringet. Resultatet er, at tabene af kvælstofforbindelser til vandet og luften er steget. Det er på landsplan vurderet, at belastningen med kvælstofforbindelser fra landbrugsområderne er steget 2-3 gange siden tiden omkring 1950. I oplandet til Ringkøbing Fjord kan stigningerne have været endnu større som følge af en stigning i kvægbestanden, der overstiger den landsgennemsnitlige.

Der er også sket en stigning i udledningen af fosfornæringsalte, især som følge af en stigning i forbruget af fosfatholdige vaskemidler. I det seneste årti er denne stigning dog blevet modsvaret af en forbedret spildevandsbehandling, således at stigningen nu formentlig helt er ophørt.

Endelig er der sket en forsuring af jordbunden og grundvandet. Der er flere årsager til denne forsuring, og årsagssammenhænge foreligger ikke fuldt belyst, ligesom man ikke kender forsuringens indflydelse på fjordens sundhedstilstand.

De foranstaltninger, der nu skal gennemføres i forbindelse med vandmiljøhandlingsplanen var primært tænkt at skulle hjælpe på iltforholdene i Bælthavet og Kattegat, men de vil i høj grad også komme Ringkøbing Fjord til gode. Foranstaltningerne vil dog næppe alene være tilstrækkelige til at frembringe en fuldt tilfredsstillende vandkvalitet i fjorden.

c)

I løbet af de seneste 30 år er slusepraksis blevet ændret, således at man i dag tillader mindre vandmængder at passere ud og ind



gennem slusen. Saltholdigheden i fjorden genspejler vandudskiftningens størrelse. I slutningen af 50'erne var sommersaltholdigheden omkring 15 ‰. I dag ligger saltholdigheden om sommeren omkring 7 ‰. Det vurderes, at ændringen i slusepraksis har betydet, at vandet i gennemsnit opholder sig ca. 1,5 gange længere i fjorden i forhold til tiden omkring slutningen af 50'erne. Det har yderligere forøget fjordens indhold af næringssalte og dermed virket i uheldig retning.

Alene i en ændring af slusepraksis, i retning af den tidligere anvendte, ligger der en mulighed for at forbedre fjordens tilstand.

Problemet er blot, at man ikke ved, på hvilken måde en ændret slusepraksis vil slå igennem på fjordens økologiske tilstand.

På den baggrund beordrede trafikministeren iværksættelsen af et 3-årigt forsøg i fuld skala for at undersøge virkningen af at tillade større ind- og udslusninger. Skjern A-arbejdsgruppen har fået til opgave at vurdere forsøgets resultater.

En højere saltholdighed vil medføre, at arter, der er tilpasset saltvand, vil vinde frem på bekostning af arter, som er tilpasset brakvand. En tilsvarende ændring kan forventes i bunddyrenes og vandplanternes artssammensætning.

For at følge udviklingen i vandkvaliteten og den økologiske tilstand i fjorden har Ringkøbing amt iværksat et overvågningsprogram, der omfatter målinger i selve fjorden og i tilløbene til fjorden for at bestemme belastningen. Samtidig følges tilstanden i fjorden ved at kortlægge bundplanternes og bunddyrenes udbredelse og sammensætning.

- " -

Situationen i dag er den, at det politisk er besluttet 1) at projektere og iværksætte foranstaltninger, der vil øge Skjern A's selvrensende effekt, og 2) at iværksætte foranstaltninger, der



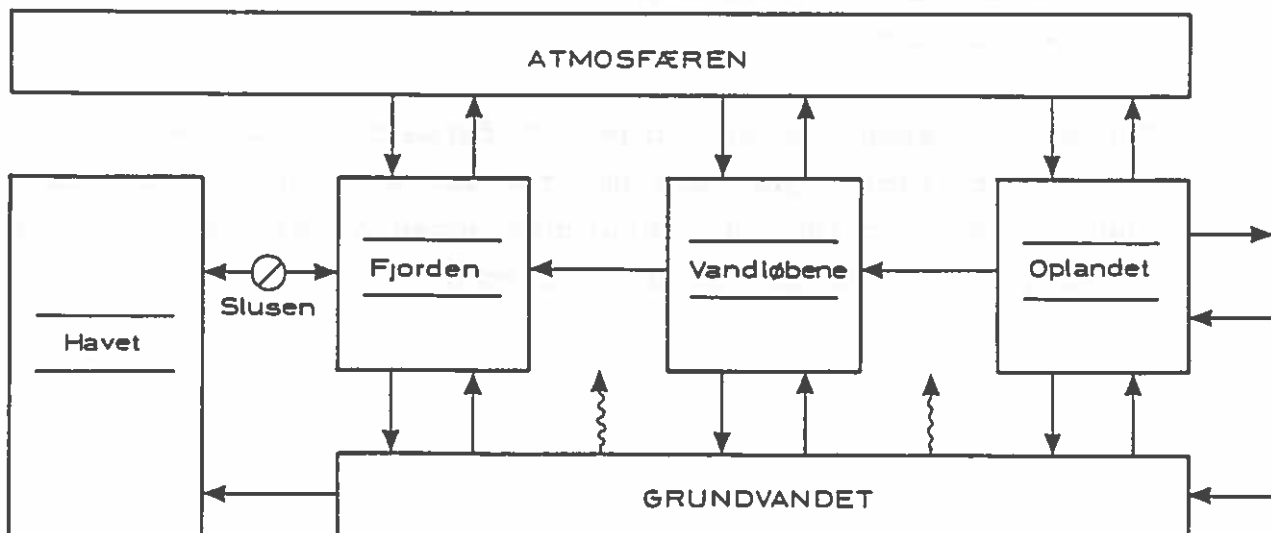
vil reducere tabene af næringsstoffer i fjordens opland, samt 3) at overveje mulighederne for at ændre slusepraksis for at forøge vandskiftet.

Der foreligger to sideordnede formål med bestræbelserne for at forbedre miljøet. Det ene er, at forbedre de rekreative og landskabelige værdier i Skjern Å-dalen. Det andet er, at forbedre tilstanden i fjorden.

Førstnævnte formål vil med Folketingsbeslutningen af 5. maj 1987 blive søgt opfyldt på kort sigt, idet et konkret projekt skal være udarbejdet således, at effektueringen kan begynde senest den 1. marts 1988.

Tilbage står spørgsmålet om, hvorledes man genskaber en god miljøtilstand i Ringkøbing Fjord, hvilket kun kan ske på meget længere sigt. De allerede besluttede tiltag vil uden tvivl hver have en gavnlig virkning, men der mangler en samlet vurdering af hvilke kombinationer af tiltag, der på længere sigt vil blive nødvendige for at nå målet.

Der mangler med andre ord en prioritering, og herunder en harmonisering af tiltagene for at nå frem til løsninger, der giver størst mulig virkning for de færrest mulige midler. En sådan prioritering kan kun opstilles ved at betragte problemet i sin helhed, og herunder anvende matematiske modeller, der sammenkæder de tre ovennævnte årsager til virkningen på fjordens tilstand.





### 3. OPGAVER

#### 3.1 Forbedring af Skjern Å-systemets selvrensende effekt (Forslag 1)

En række delelementer forventes at indgå i forslagene til forbedring af Skjern Å-systemets selvrensende effekt. Der bliver formentlig tale om:

- o Reetablering af Skjern Å's snoninger
- o Fjernelse af diger
- o Etablering af deltaer (vådområder)
- o Etablering af rørskove og anden beplantning
- o Ophjælpning af fiskebestande.

Konsulentgruppen foreslår at yde rådgivning ved vurdering af konkrete projekter i deres helhed, af dele af konkrete projekter og ved kombination af delelementer fra forskellige forslag. Rådgivningen vil blive baseret på en sammenstilling af forslagernes forventede effekter på selve å-systemet, herunder dets naturtilstand og på belastningen af Ringkøbing Fjord. Heri vil indgå vurdering af forslagernes indflydelse på :

- o Den selvrensende effekt
- o Vandstande i å-systemet
- o Stabilitet af etablerede snoninger
- o Sedimenttransport-udvikling af bundniveau i å-systemet
- o Ophjælpning af fiskebestande
- o Belastning af Ringkøbing Fjord
- o Arealudnyttelse

Gennem en sådan samlet vurdering forbedres mulighederne for, at der i et samarbejde mellem forslagsstillere, arbejdsgruppen, anden fagekspertise og konsulentgruppen vælges den bedst mulige løsning inden for den givne tidsramme.



### 3.2 Ringkøbing Fjord (Forslag 2)

Målet for rådgivningsarbejdet er at gøre det muligt for politikere og miljømyndigheder at planlægge og gennemføre omkostnings-effektive foranstaltninger i bestræbelserne for på længere sigt at genskabe en acceptabel miljøtilstand i fjorden.

En af forudsætningerne for at nå målet, er, at der udføres et måle- og modelarbejde, som nærmere er beskrevet i Forslag 2. Det foreslåede arbejde kan kort sammenfattes som følger:

Forslaget beskriver et samlet system til detailplanlægning og overvågning af Ringkøbing Fjord i relation til den igangsatte 3-årige forsøgsperiode med ændret drift af sluserne i Hvide Sande og i sammenhæng med andre forslag og initiativer, der har til hensigt at opnå en afgørende forbedring af vandskifte- og miljøforhold i fjorden. Forslaget omfatter etablering af et dataopsamlingsystem for fjorden og opstilling af en matematisk model for vandskifte og vandkvalitet, kaldet fjordmodellen.

Systemet foreslås at indeholde en fælles database til brug for en samlet registrering og overvågning af alle relevante måledata for fjorden. Specielt understreges behovet for en snarlig iværksættelse af en automatisk registrering af vandskiftet gennem slusen i Hvide Sande og etablering af selvregistrerende målere i fjorden.

Dataindsamlingen danner endvidere grundlaget for en nøjagtig kalibrering af den matematiske model.

Fjordmodellen består af en hydrodynamisk model, en model af saltindholdigheden og en vandkvalitetsmodel. Den er et afgørende hjælpeværktøj til vurdering af måledata og et nødvendigt beslutningsværktøj for at vurdere konsekvenser af forskellige foranstaltninger til forbedring af fjordens miljøtilstand. Fjordmodellen eller dele heraf kan eksempelvis anvendes til:



- o at forudsige virkningen på saltholdighed og vandkvalitet af foranstaltninger, der øger vandudskiftningen (såsom ændret slusepraksis, opgravning af render eller etablering af en ny åbning til havet),
- o at forudsige virkningen på vandkvaliteten af forureningsbegrænsende foranstaltninger i fjordens nedbørsopland,
- o at simulere vandstanden og herunder vurdere risikoen for oversvømmelser, dersom regulativet ændres med hensyn til vandstandsinterval,
- o at simulere forholdene omkring den eksisterende sluse, dersom der etableres en ny åbning til havet,
- o at etablere et varslingsredskab til vejledning for slusemesteren under kritiske forhold.

### 3.3 Modeller for Ringkøbing Fjords opland og de Ferske vande (Forslag 3)

En anden forudsætning for at nå frem til det overordnede beslutningsværktøj, er, at man kender størrelsen af de fremtidige tilførsler af ferskvand og næringsstoffer fra afstrømningsoplandet til fjorden.

Det foreslåede arbejde i den forbindelse er nærmere beskrevet i Forslag 3.

Som allerede nævnt vil Skjern Å-restaureringsprojektet medføre en reduktion af fjordens belastning med næringssalte. Dertil kommer, at ændret arealudnyttelse, ændret gødskningsstrategi og andre forureningsbegrænsende foranstaltninger, som i de kommende år vil blive gennemført i hele oplandet som led i den landsdækkende vandmiljøhandlingsplan, givetvis vil få en stor, men indtil videre ukendt indflydelse på forholdene i fjorden.



I forbindelse med NPO-handlingsplanen, vedtaget af Folketinget i 1985, iværksattes et større forskningsprogram, som kan nyttiggøres i nærværende sammenhæng. Det foreslås at nyttiggøre de relevante dele af den viden, forskningsprogrammet indhøster, til at udarbejde modeller for Ringkøbing Fjords opland og de ferske vande, der er i stand til at forudsige de fremtidige tilførsler af ferskvands- og næringssalte som funktion af restaureringsprojekter, forureningsbegrænsende foranstaltninger og ændret arealudnyttelse i hele oplandet.

Derudover tjener et sådant modelredskab det formål at indgå som et nødvendigt element i et redskab til varsling af ekstreme vandstande i fjorden.

#### 4. BESLUTNINGSVÆRKTØJ

Sammenfattende er det konsulentgruppens opfattelse, at man ved gennemførelse af Forslag 2 og Forslag 3 sikrer, at der kan gennemføres en samlet vurdering af, hvilke kombinationer og tiltag, der på længere sigt vil være nødvendige for at opnå en permanent forbedring af tilstanden i Ringkøbing Fjord og Skjern A-systemet.

Fjordmodellen (Forslag 2) og modellerne for opland og de ferske vande (Forslag 3) udgør tilsammen det beslutningsværktøj, der gør det muligt at vurdere, hvorvidt de forskellige foranstaltninger, der nu er under overvejelse, tilsammen vil resultere i en acceptabel miljøtilstand, eller om der kræves yderligere foranstaltninger. Samtidig vil et sådant modelværktøj af helheden gøre det muligt til enhver tid at udpege kombinationer af foranstaltninger, der bevirker, at man opnår den størst mulige virkning for en given investering. Eller med andre ord, at man opnår en given tilstand for de mindst mulige omkostninger.



## 5. REFERENCER

- /1/ Skjern Å-Systemets selvrensende Effekt - Analyse af skitseprojekter. Skjern Å-arbejdsgruppen DHI/VKI/LICconsult. Marts 1988.
  
- /2/ Skjern Å-Systemets selvrensende Effekt - Analyse af skitseprojekter. Tillægsnotater. Skjern Å-arbejdsgruppen DHI/VKI/LICconsult. Marts og maj 1988.

1988-08-02  
1006/wrdb20  
JR/HS/skn