

# FRA OPLAND TIL SØER OG VANDLØB: UDVEKSLING AF GRUNDVAND OG NÆRINGSSTOFFER OG BETYDNINGEN AF RANDZONER

Lektor Peter Engesgaard  
Seniorforsker Bertel Nilsson

Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet  
Hydrologisk Afdeling, GEUS

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Vandkvalitet i grundvand/overfladevand  
- hvordan griber vi det an?

Møde 29. november 2011



## RESUMÉ

Flere af vores nye undersøgelser viser, at grundvandets opholdstid i randzoner til vandløb og søer er i størrelsesordenen uger til år. Det er i tråd med vurderingen i GOI typologien (/1/). Til gengæld viser de samme undersøgelser, at nitratreduktionen er lille i de fleste systemer (næsten nul), hvor der i /1/ blev vurderet, at denne var af størrelsesordenen 10-97% for den diffuse strømning gennem et ådalsmagasin. For nitrats vedkommende styres dette af, at der alle steder også findes ilt, og reduktionskapaciteten er derfor lille. Nitratreduktionen kan dog godt være større, da det vurderes, at der mange steder kan ske en betydelig reduktion af nitrat i selve vandløbs- eller søbunden.

## INDLEDNING

Der er en berettiget øget fokus på grundvand-overfladevands interaktion, da grundvandets bidrag i form af vand og næringsstoffer (fluxe) til vandløb og søer kan påvirke det økologiske system. De grønne områder, bufferzonerne, engene, vådområderne eller her blot benævnt randzonerne, omkring vandløb og søer bliver derfor også interessante, da de er sidste station, inden grundvandet ender som overfladevand. I /1/ blev der i 2004 forslået en typologi for Grundvand-Overfladevands Interaktion (GOI), som på forskellige skalaer vurderer; (1) betydningen af den regionale geomorfologiske og geologiske opbygning på GOI, (2) ådalstypen, dvs. kontakten mellem ådalsmagasinet og det nærliggende regionale grundvandsmagasin og (3) strømningsveje i ådalsmagasinet til vandløb.

Vi har gennem længere tid kigget mest på de hydrogeologiske og hydrauliske forhold, der styrer disse strømningsveje (vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb), men har i nogen sammenhænge også haft mulighed for at kigge på næringsstoffer og pesticider og deres skæbne i randzoner, der kan udgøre hele ådalsmagasinet eller blot en del af det. Der er naturligvis en sammenhæng, og det har måske forbløffet os at se, "hvor lidt reaktiv" mange randzoner har været, specielt når det gælder nitrat. Ofte udvaskes nitrat direkte til vandløbet eller søen, med mindre der sker en betydelig omsætning direkte i vandløbs- eller søbunden.

## FORMÅL

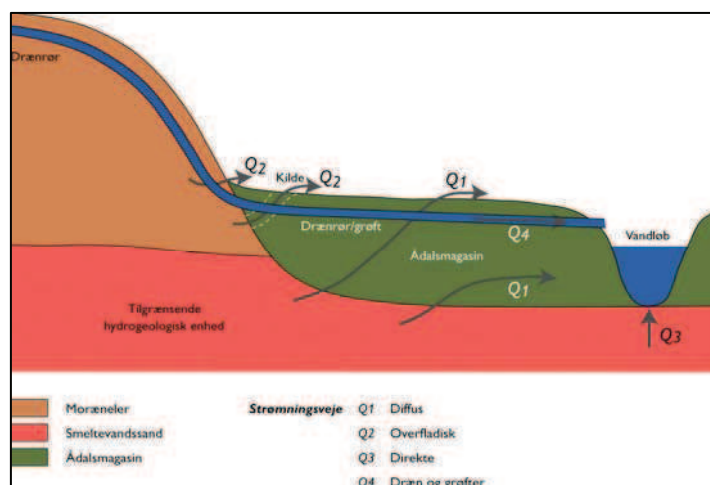
Formålet med indlægget er at;

1. Vise udvalgte eksempler på udvekslingen mellem grundvand og vandløb/søer
2. Diskutere, hvordan de hydrogeologiske og strømningsmæssige forhold påvirker, hvor effektive randzoner kan være i udvaskningen af næringsstoffer (og pesticider)

## METODER

Med fare for ikke at definere en randzone korrekt er der her valgt at definere denne som det grønne areal (eng) eller (naturlige) vådområde, der ligger mellem marken og overfladevandet (vandløb eller sø). Indlægget fokuserer kun på at vise udvalgte eksempler på fordele (eller mangel på fordele) ved at have en bræmme tæt ved vandløb eller søer, hvor udvaskningen af næringsstoffer via grundvandet kan formindskes, når rette betingelser tillader det.

For vandløb tages der udgangspunkt i GOI-typologien (/1,2/), se figur 1.



Figur 1: GOI typologi for strømningsveje ved vandløb

Randzonen kunne være hele ådalsmagasinet eller blot en del af denne. I relation til hvor effektiv en randzone er, vil den diffuse tilstrømning ( $Q_1$ ) gennem randzonen være vigtig /1/.

Flere forhold spiller ind; for nitrats vedkommende om der er ilt til stede eller ej (redox front) og opholdstiden (om der er tid nok til nedbrydning). Hvis der er ilt til stede bliver nitrat ikke nedbrudt. Er opholdstiden ( $T$ ) meget længere end den karakteristiske tid det tager f.eks. at nedbryde nitrat ( $T_n$ ) er randzonen en effektiv reaktor og kan mindske udvaskningen. Opholdstiden kan estimeres fra Darcys lov, hvis den hydrauliske gradient, middel hydraulisk ledningsevne og porøsitet kendes. I /1/ vurderes opholdstiden til at være uger til år, og nitratreduktionskapaciteten langs denne strømningsvej vurderes til at være 10-97%.

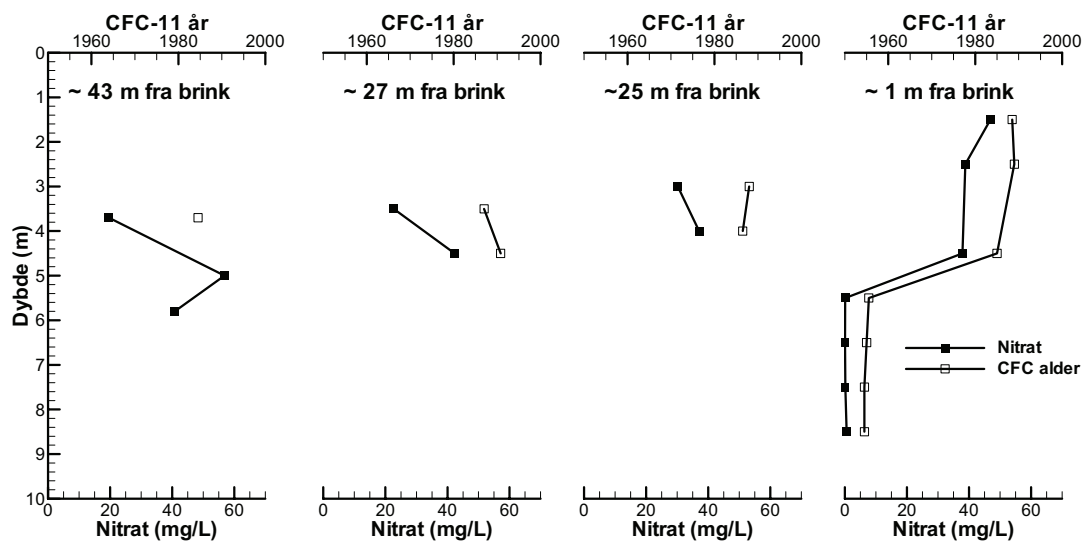
Hvis det antages, at nitratreduktion foregår ved en første-ordens proces, kan  $T_n$  defineres ud fra halveringstiden. Hvis de omsætningsmæssige forhold er til stede og  $T \gg T_n$ , vil randzonen være meget effektiv, hvis  $T \sim T_n$  vil f.eks. nitrat kunne nå ned til vandløbet eller søen i for høje koncentrationer, og hvis  $T < T_n$  vil nitrat nå ned til vandløbet/søen uden megen reduktion. Ofte ses der kun en oxisk zone tæt ved starten af randzonen, og for nitrats vedkommende kunne opholdstiden defineres ud fra længden af denne zone.

Figur 2 viser en skitse af et grundvand-sø system, hvor der er defineret 3 reaktorer; (1) Grundvand, (2) bufferzone/randzone og (3) Sediment-Water-Interface (søbund), hvor der potentielt kan ske en omsætning/tilbageholdelse af næringsstoffer i hver enkelt af de 3 reaktorsystemer. En SWI burde også være med i GOI-typologien for vandløb.



Figur 4 viser nitratmålinger i forskellige afstande fra vandløbet. Der er nitrat i hele randzonen i de øverste ca. 5 m, og målinger tæt ved vandløbet viser et meget markant fald i ca. denne dybde. Iltprofilerne (ikke med) viser, at der er ilt i de øverste 5 m, og at iltten forsvinder samtidigt med nitrat. Grundvandet er aldersdateret med CFC-11, og det øverste grundvand er ca. 25 år gammelt, mens det under 5 m bliver helt op til 55 år gammelt. Det sidste skal tages med et forbehold, da CFC-11 kan nedbrydes under anoxiske forhold, men som udgangspunkt passer det fint med at gammelt vand er nitrat-frit, mens 25 år gammelt vand er nitratrigt. Vandløbet dræner altså relativt ungt nitratholdigt øvre grundvand og gammelt nitratfrit dybere grundvand.

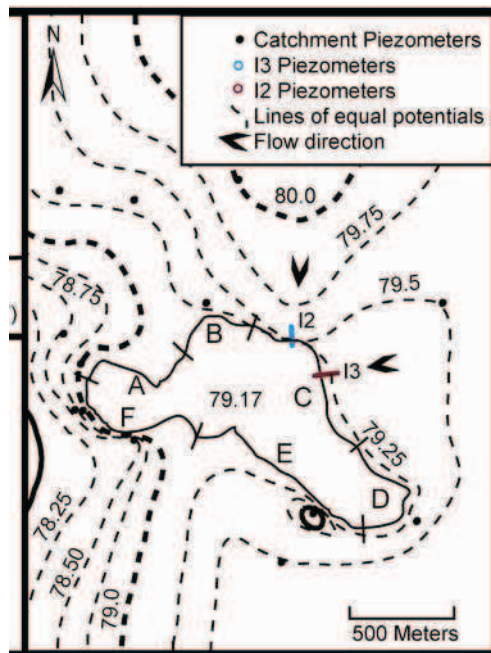
Som udgangspunkt er vådområdet derfor ikke effektiv til nedbrydning af nitrat da der er ilt til stede. Ved vandløbets bund (SWI) blandes ungt og gammelt grundvand, så det kan ikke udelukkes at der opstår anoxiske forhold der kan betinge en nitratreduktion. Hvor meget der kan omsættes af nitrat i selve vandløbsbunden vides ikke. Målinger med temperatur og seepagemeter (/5/) viser en Darcy flux på 10-100 cm/day fra grundvandet til vandløbet. Hvis det antages at SWI er 0.5 m tykt og porøsiteten er 0.35 giver det en opholdstid 0.2-2 dage, hvilket antagelig ikke er tilstrækkeligt for effektiv omsætning af nitrat.



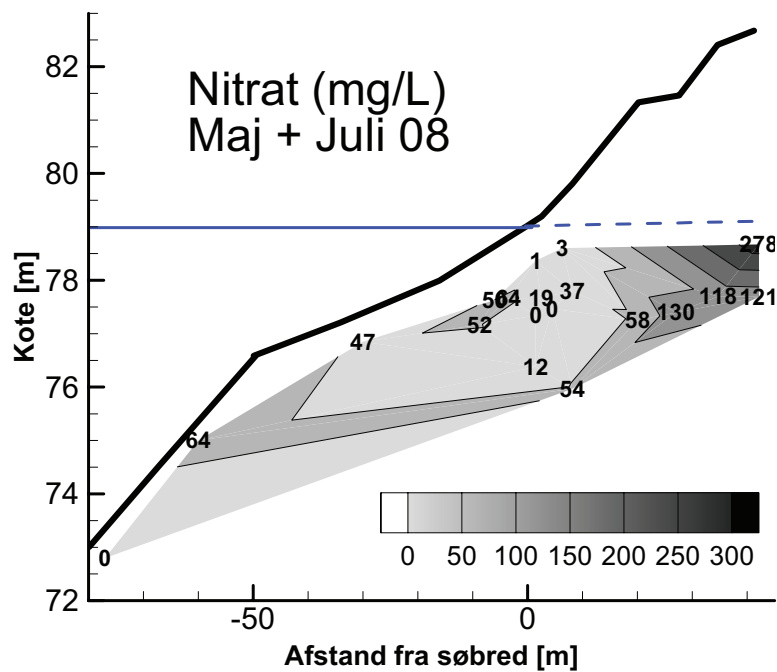
Figur 4: Nitrat og CFC-aldersprofiler i stigende afstand fra Holtum å.

### Sø (Hampen)

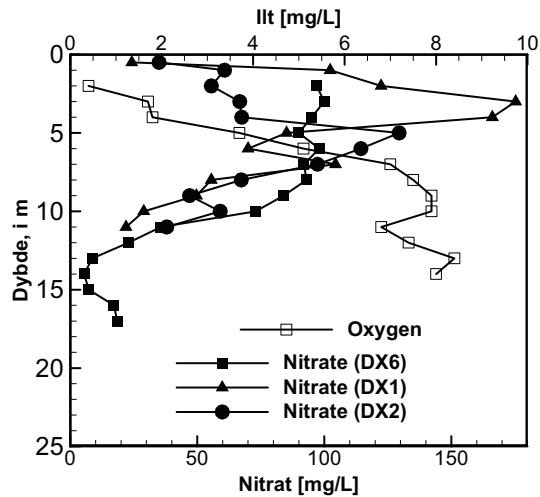
Figur 5 viser potentialekortet ved Hampen sø (/10/). Ved område C og transekt 13 er der konstateret udsivning af nitrat til søen fra landbrugsmarker ca. 45 m fra søbredden. Figur 6 viser nitratfanen fra sommeren 2008. Koncentrationerne varierer fra tæt på 300 mg/L til 50-80 mg/L blot 50 cm under søbunden. Som figur 7 viser, genfindes de høje nitratkoncentrationer til ca. 15 m's dybde (ler træffes ca. 17 meter under terræn). Nitrat nedbrydes ikke, da der samtidigt optræder høje iltkoncentrationer.



Figur 5: Hampen sø og isopotentialelinier. Landbrugsarealer er beliggende ved område C og transekt I3 (fra /10/)

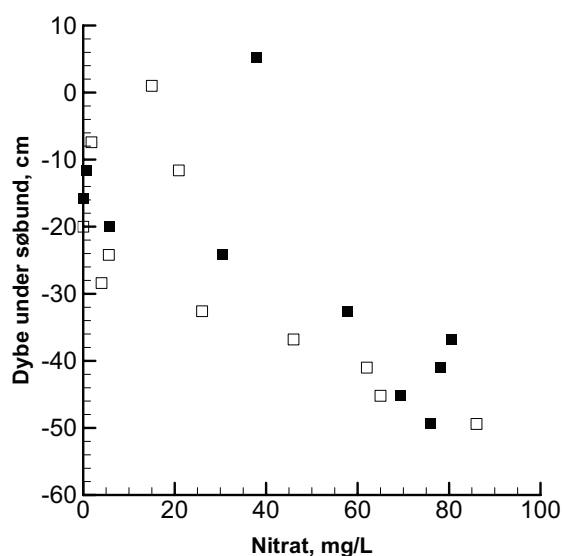


Figur 6: Nitratfanen i randzone ved I3 og under Hampen sø.



Figur 7: Nitrat og iltprofiler i randzonen ved I3 (ca. 5 m fra søbred)

Nitratprofiler i søbunden (SWI) viser, at koncentrationen går brat fra omkring 80 mg/L til få mg/L ved selve bunden (Figur 8). Flere ting gør sig sandsynligvis gældende; (1) Målinger har vist, at opholdstiden i SWI (50 cm) varierer meget, men er relativ høj (10-600 dage), (2) simple batchforsøg har vist, at fjernelsen af nitrat sker inden for få dage, hvilket tilskrives en forholdsvis høj og sandsynligvis lettilgængelig reduktionskapacitet (/11/) og (3), samtidig ved vi, at planterne trives godt i zoner, hvor der siver grundvand og næringsstoffer ud (/3/), dvs. at planterne fungerer som et effektivt filter.



Figur 8: Nitratprofiler i søbunden ved I3 (/11/)



## DISKUSSION

Tabel 1 viser en sammenfatning af de undersøgelser, vi har været involveret i de sidste ca. 4-5 år, og hvor vi kan begynde at sige noget om effektiviteten af randzoner som defineret her.

Tabel 1: Effektivitet af forskellige randzoner ved vandløb og søer. <sup>1</sup> Afstand fra randzonen/mark til bredden af vandløb eller sø, <sup>2</sup> Baseret på målinger, men kan naturligvis variere meget, <sup>3</sup> Fra GOI typologien, <sup>4</sup> Beregnet opholdstid på basis af målinger, <sup>5</sup> Simpel mål for randzonens effektivitet, baseret på målte koncentrationer. Hvis randzonen er L meter lang, og der er fundet nitrat L/2 meter inde i zonen, er effektiviteten 50%, hvis der er fundet nitrat helt ned til vandløbet, er effektiviteten 0%, <sup>6</sup> Opholdstiden i en 50 cm tyk vandløbs- eller søbund, baseret på målinger

Lokalitet	Type	Længde, m <sup>1</sup>	K værdi, m/d <sup>2</sup>	Q type <sup>3</sup>	Opholdstid, dage <sup>4</sup>	Forurening	Effektivitet % <sup>5</sup>	SWI <sup>6</sup> T <sub>swi</sub> dage
Brynemade (Odense)	Eng	~ 200	10	Q <sub>1</sub>	2500	Nitrat	~ 40	?
				Q <sub>2</sub>	?	Pesticider	100	
				Q <sub>3</sub>	?			
Skallebanke (Odense)	Eng	~ 70	7	Q <sub>1</sub>	360	Nitrat	0	1-20
				Q <sub>2</sub>	?	Pesticider	100	
				Q <sub>3</sub>	?			
Mølgaard (Gjern)	Vådområde	~ 70	3.5	Q <sub>1</sub>	205	Isoproturon	~50	?
				Q <sub>2</sub>	425		100	
				Q <sub>3</sub>	?			
Hygild (Skjern)	Vådområde	~ 50	10	Q <sub>1</sub>	60	Nitrat	0	0.2-2
				Q <sub>2</sub>	? (< 60)			
				Q <sub>3</sub>	? (stor)			
Hampen sø	Eng	~ 45	70	Q <sub>1</sub>	45	Nitrat	0	10-600
Væng sø	Eng/vådområde	500/10-20	?	Q <sub>1</sub>	?	Fosfor	0	0.02-60
				Q <sub>2</sub>	?			

Ingen af områderne lever måske op til definitionen af en bræmme eller randzone, men kan karakteriseres bredt som enge eller vådområder. Området ved Skallebanke var dog dyrket ind til for få år siden og repræsenterer derfor et område, der er omlagt til en slags randzone.

Længden er defineret som afstanden fra kanten af randzonen (kilden) til vandløbet/søen. Som det ses er der i disse tilfælde tale om brede randzoner.

K-værdierne er opmålt på basis af mange slugtests og karakteriserer typisk sedimentet fra ca. 1 meter under terræn. I mange tilfælde er der en stor variation, specielt ved Mølgaard, hvor K-værdierne kan variere en faktor 100-1000.

Oftentimes har det kun være muligt at estimere opholdstiden for den diffuse tilstrømning (Q<sub>1</sub>) ved en simpel anvendelse af Darcy (og ofte understøttet af 2D/3D modellering på basis af hydrogeofysiske opmålinger, CFC aldersdatering, og direkte målinger af udvekslingen af vandløbs- eller søbund).

Effektiviteten er vurderet som et simpelt mål for langt "forureningen" er trængt ind i randzonen. Ved Hygild er effektiviteten således 0%, da der måles nitrat helt ned til vandløbet.

Da vi ofte måler på selve udvekslingen over vandløbs – eller søbunden, er der forsøgt at give et bud på opholdstiderne under antagelse at SWI er 50 cm tyk.

Hygild og Hampen sø er gennemgået ovenfor:

Hygild er karakteriseret som et vådområde med tilsyneladende lille kapacitet for omsætning af nitrat, da der samtidigt findes ilt. En forholdsvis høj hydraulisk ledningsevne (K) og gradient betinger en kort opholdstid i randzonen (ca. 60 dage). Opholdstiden i SWI er ligeledes kort på grund af den høje udveksling af vand. Der er en dyb tilstrømning af anoxisk grundvand, der kan medføre en vis reduktion (kendes ikke).

Randzonen ved Hampen sø har også et lille potentiale for nitratreduktion da der findes ilt. Igen er det karakteristisk, at opholdstiden er kort, ca. 45 dage, her mest på grund af en relativ høj K værdi. Til gengæld er SWI meget effektiv, hvor opholdstiden og reaktiviteten er tilpas høje, der sammen med planteoptag omsætter/tilbageholder en stor del af nitraten.

Ved Skallebanke (Odense Å) når nitrat helt ned til vandløbet, igen da der findes ilt i området. Her er opholdstiden endda stor. Ved Brynemade (opstrøms Skallebanke) ses til gengæld en fjernelse af nitrat på ca. 40% (dvs. nitrat findes kun ca. 80 meter fra kanten af randzonen eller 120 m fra vandløbet). Opholdstiden er også ca. 7 gange længere ved Brynemade end ved Skallebanke.

Mange pesticider nedbrydes aerobt. Som det fremgår af tabellen, er der heller ikke fundet pesticider ved Skallebanke og Brynemade. Et feltforsøg ved Mølgaard har vist, at isoproturon blev effektiv fjernet i selve den aerobe zone af vådområdet (diffus strømning,  $Q_1$ ) (9/). Da området er præget af en høj overfladisk afstrømning, formodes det, at en vis del af pesticiderne (og nitrat) vil afstrømme hurtigt til vandløbet (Voldby bæk). Det er bemærkelsesværdigt, at området generelt har den laveste K værdi, som netop vil betyde en større overfladisk afstrømning, da grundvandet presses op med skræntfoden.

Udvekslingen mellem grundvand og Væng sø er meget speciel, idet ca. 40% af grundvandet er simuleret til at sive ind på den vestlige side (måske overfladisk) mens 60% strømmer under søen og siver op i vådområdet og søbunden på den østlige side. Det giver anledning til meget høje målte Darcy fluxe (op mod 8 m/dag) og meget lave opholdstider i SWI (helt ned til få timer). Ekstern fosfor belastning er et stort problem for Væng sø og tilbageholdelsen i randzonen eller SWI formodes at være lille.

De undersøgte "randzoner" har alle vist sig rimeligt højerpermeable ( $K=3-70$  m/dag) med en relativ stor udveksling med vandløb eller sø. Det har betydet relativ korte opholdstider i mange af systemerne, som dog passer godt med vurderingen i /1/ (uger til år). Kun i de tilfælde hvor der er en relativ lang opholdstid, er det fundet, at både ilt og nitrat forsvinder (Brynemade). En 2D transport og nitratreduktionsmodel er opsat for Brynemade, og halveringstiden for nitratreduktion er estimeret til 80 dage. Med andre ord tager det 80 dage at reducere koncentrationen med 50%, 160 dage betyder en reduktion på 25%, på 240 dage er reduktionen 12.5% og så fremdeles. Ved Hampen sø blev der lavet anaerobe batchforsøg med nitratreduktion i grundvandssediment, og halveringstiden blev anslået til 30-200 dage /11/. For visse

systemer kan reduktionskapaciteten derfor være begrænset eller nitratreduktionsraten lav i forhold til opholdstiden.

Da den hydrauliske gradient ofte er styret af den flade topografi, vil længden af randzonerne være vigtig, hvis de skal være effektive i at nedsætte udvaskningen af næringsstoffer (her hovedsagelig belyst ved nitrat). For mange af de undersøgte systemer kan SWI have en potentiel stor betydning for udvaskningen af næringsstoffer, som dog styres. Igen vil opholdstiden i SWI være afgørende, og som kan variere fra få timer til år.

## TAK TIL

Undersøgelserne er blevet til i et samarbejde med en masse mennesker, som vi ikke havde tid til at sende manuskriptet til. Vi håber, at de har forståelse for, at de ikke optræder som medforfattere, men her er de;

IGG/KU: Sachin Karan (PhD stud.), Jannick Jensen (PhD stud.), Jakob Kidmose (nu GEUS), Rikke Pedersen (nu Mærsk), Jolanta Kazmierczak (PhD stud.)

GEUS: Mette Frandsen (PhD. Stud.), Troels Laier, Vibeke Erntsen, Mette Dahl, Anders Johnsen, Jens Aamand.

Biologisk Institut/KU: Ole Pedersen

Biologisk Institut/SDU: Daniella Ommen, Frede Ø. Andersen, Mogens Flindt

DMU: Carl Christian Hoffmann, Frank Landkildehus

Og tak til den nuværende finansiering;

HOBE: Center for hydrology ([www.hobe.dk](http://www.hobe.dk))

CLEAR: Center for sørestaurering ([www.lake-restoration.net](http://www.lake-restoration.net))

AUQUAREHAB: EU projekt ([www.aquarehab.vito.be](http://www.aquarehab.vito.be))

## LITTERATUR

1. Dahl, M., J. H. Langhoff, B. Kronvang, B. Nilsson, S. Christensen, H. E. Andersen, C. C. Hoffmann, K. R. Rasmussen, F. von Platen-Hallermund og J. C. Refsgaard, Videreudvikling af ådalstypologi – Grundvand-Overfladevandsinteraktion (GOI), Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, 16, 2004.
2. Dahl, M., B. Nilsson, J. H. Langhoff, J. C. Refsgaard, 2007, Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater-surface water interaction, J. Hydrol., 344, 1-16.
3. Frandsen, M., B. Nilsson, P. Engesgaard, O. Pedersen, 2011, Groundwater seepage stimulates growth of aquatic macrophytes, sendt til Freshwater Biology.
4. Jensen, J. K., 2009, Heat as a tracer for estimation of ground water-surface water interaction, speciale, Institut for Geografi og Geologi. Københavns Universitet.
5. Jensen, J.K. and P. Engesgaard, 2011 Non-uniform groundwater discharge across a stream bed: Heat as a tracer, Vadose Zone J., 10, 98-109, doi:10.2136/vzj2010.005.
6. Karan, S., 2008, Investigation and simulation of groundwater lake interaction with the use of multiple tracers, speciale, Institut for Geografi og Geologi. Københavns Universitet.
7. Kidmose, J., 2010, Groundwater-surface water interaction: From catchment to interfaces at lakes and streams, PhD thesis, Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet.

8. Kidmose, J., P. Engesgaard, B. Nilsson, T. Laier, and M.C. Looms, 2011, Spatial distribution of seepage at a flow through lake: Lake Hampen, Western Denmark, *Vadose Zone J.*, 10, 110-124, doi:10.2136/vzj2010.0017.
9. Kidmose, J., M. Dahl, P. Engesgaard, B. Nilsson, B.S. Christensen, S. Andersen, 2010, Experimental and Numerical Study of the relation between Flow Paths and Fate of a Pesticide in a Riparian Wetland, *J. Hydrol.*, 386, 68-79.
10. Ommen, D.A.O., J. Kidmose, S. Karan, M.R. Flindt, P. Engesgaard, B. Nilsson, and F.Ø. Andersen 2011, Importance of groundwater and macrophytes for the nutrient balance at oligotrophic Lake Hampen, Denmark, DOI: 10.1002/eco.213
11. Pedersen, R. E., 2010, Hydrogeologi og grundvandsgeokemi i udstrømningszoner til søer, speciale, Institut for Geografi og Geologi. Københavns Universitet.