

Sammenhængen mellem tilstanden i grundvand og overfladevand: Søer

af

Jens Peder Jensen, Martin Søndergaard og Erik Jeppesen
DMU, SOF

Indhold:

0 Problemformulering

1 Indledning

2 Litteraturstudie

3 Vandbalancer og danske eksempler på grundvandets betydning

3.1 Vandbalancer for danske søer

3.2 Grundvandets indhold af næringsstoffer

3.3 Eksempler på grundvandets betydning i danske søer

4 Referencer

5 Bilag

5.1 Eksempler på abstracts fra litteratursøgningen

5.2 Vidensbehov vedr. samspil grundvand – overfladevand: søer

0 Problemformulering

Udvekslingen af grundvand mellem søer og de forskellige grundvandsmagasiner kan potentielt påvirke vandkvaliteten både i søvand og grundvand. I områder med et højt indhold af næringsstoffer i grundvandet, herunder især fosfor, kan stor tilførsel af grundvand således påvirke vandkvaliteten i søerne negativt, fordi øget næringsstofindhold skaber øget vækst af planktonalger og mere uklart vand. Omvendt kan en stor tilførsel af grundvand med lavt næringsstofindhold have en positiv indflydelse på søtilstand, fordi der sker en fortynding af søernes øvrige hydrauliske tilførsel, der ofte består af mere næringsrigt overfladevand.

Ændret tilstrømning af grundvand kan også direkte påvirke søers vanddybde og dermed en række forhold med betydning for vandkvaliteten. Vanddybde har således stor indflydelse på både fysisk-kemiske forhold som eksempelvis hyppigheden og graden af ophvirvling af bundmateriale i forbindelse med blæst samt biologiske forhold, som eksempelvis undervandsplanternes dybdemæssige udbredelse.

Udsivning af forurenede søvand til grundvandet kan evt. have en negativ indflydelse på grundvandets kvalitet, men sandsynligvis er dette problem af ringe omfang. Forhøjede koncentrationer af miljøfremmede stoffer i grundvand kan ligeledes påvirke søvandet.

1 Indledning

Grundvand udgør i varierende omfang en del af de danske søers hydrauliske og næringsstofmæssige belastning og kan som sådan potentielt påvirke søtilstanden i forskellig retning. Kendskabet til samspillet mellem tilstand i grundvand og danske søers tilstand er dog begrænset, og der findes kun meget få undersøgelser, hvor der er fokuseret på grundvandets betydning for vandkvaliteten eller for den sags skyld søers indflydelse på grundvand.

Som udgangspunkt betragtes grundvandet i forhold til de danske søer dog normalt som havende en positiv indflydelse, idet næringsstofindholdet - der er afgørende for vandkvaliteten (ikke mindst fosfor) - i de fleste tilfælde er lavere i grundvandet end i den overfladetilførsel, der dominerer den hydrauliske tilførsel til de fleste søer. Årsagen er at tilførslen via vandløb og anden overfladeafstrømning ofte er påvirket af forskellige former for punktkilder og via landbrug, mens grundvandet som regel i mindre omfang påvirkes (i hvert fald indtil videre). Der findes dog områder, hvor grundvandskoncentrationerne er forholdsvist høje og her kan have en negativ indflydelse. Den potentielle påvirkning er højest i søerne uden overfladetilstrømning, fordi disse søer har en ringe næringsstofftilførsel så grundvandsdelen lettere kan udgøre en relativ større andel af den samlede næringsstofftilførsel.

I det følgende er der givet dels en oversigt over internationale artikler publiceret vedrørende samspillet mellem grundvand og søer samt en oversigt over vandbalancer og eksempler fra danske søer, der illustrerer forskellige aspekter af grundvandets indflydelse på søtilstand.

2. Litteraturstudie

Eftersom der ikke findes mange danske undersøgelser er der i det følgende foretaget et litteraturstudie vedrørende samspil mellem tilstand i grundvand og søer. Generelt skal man dog være varsom med at overføre udenlandske erfaringer til danske forhold, idet de hydrauliske, klimatiske og geologiske forhold kan være vidt forskellige.

Som udgangspunkt er der gennemført en litteratursøgning dækkende områderne "grundvand" og "søer". Efterfølgende er der foretaget en underopdeling på en række andre søgeord. Der er søgt i "Web of Science" og "ASFA", hvilket gav i alt 2456 artikler, fordelt på 1494 fra ASFA og 962 fra "Web of Science". Heraf var de 158 artikler dubletter (svarende til 6,5%), hvilket førte til samlet antal forskellige artikler på 2298. Nogle af disse er dog stadigvæk identiske idet, der findes en del artikler, som er refereret lidt forskellig eller forkert (feks. et ekstra

fornavn med som forfatter, bindestreg i et navn, tal angivet med bogstaver/tal, eller forkert årstal angivet).

Ordet “groundwater” indgik i titlen af 553 af de 2298 artikler. Bortset fra een enkelt artikel, der omhandlede saltvands-indtrængning i forbindelse med oprensning i kystnære arealer ved pumpning, var der ingen artikler, der omhandlede danske undersøgelser. Fordelt på forskellige tidsperioder var der især mange artikler fra 1990'erne og med det største antal i midten og slutningen af 90'erne (Fig. 2.1). I alt var der 300 artikler fra perioden før 1987, 295 fra 1987-1990, 811 fra 1991-1995 og 862 artikler fra 1996-2001.

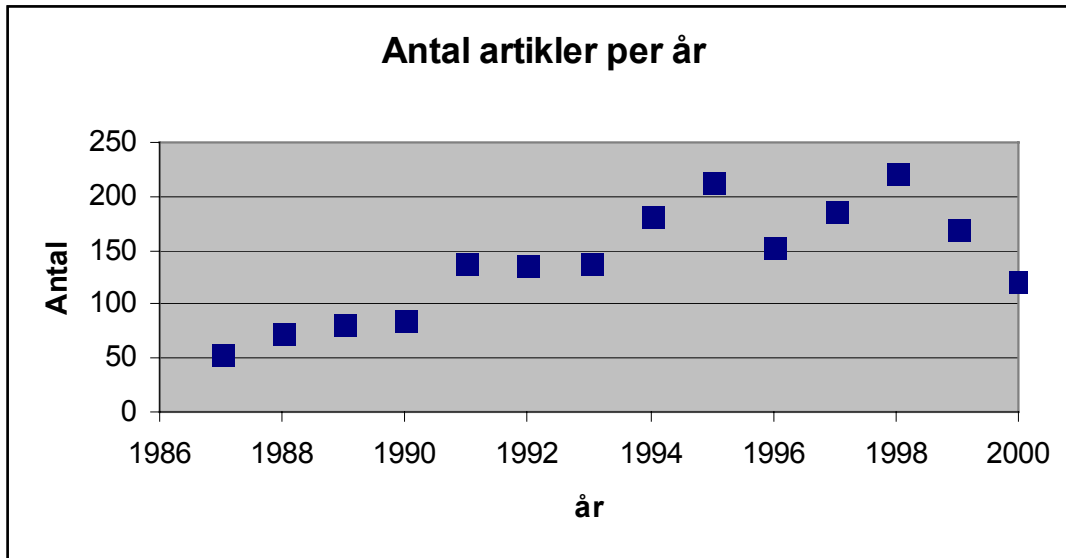


Fig. 2.1. Antal artikler fra de enkelte år fundet ved litteratursøgningen (“groundwater” and “lake”).

Fordelt på emner er der mange artikler som umiddelbart ikke synes relevante i relation til dette projekt (Tabel 2.1). Dette gælder ikke mindst mange artikler vedrørende modeller, men der er også mange vedrørende klima, forsuring og saltvandspåvirkning (især indtrængning af saltvand til ferskvandssøer og reservoirer). Der er færre artikler, hvor der indgår søgeord, som potentielt kunne være relevante i forhold til at vurdere grundvandets betydning for tilstanden i de danske søer. Søgeord vedrørende næringsstoffer og deres effekter (phosphorus, nitrate, eutrophication) forekommer hver i lidt mere end 100 artikler, mens de fleste biologiske søgeord, som plankton, fisk, makrofytter og invertebrater indgår i færre artikler. I det følgende gives en kort gennemgang af resultaterne fra søgningen. I bilag 5.1 er der vedlagt en række abstracts fra nogle af de mest relevante artikler.

Fosfor. Artiklerne som indeholder “phosphorus” som søgeord omfatter flere emnetyper, hvoraf mange ikke er relevante. En del artikler beskriver således problemstillinger i forbindelse med etablering af septiktanke, sure minesøer, forekomst af pesticider eller med fokus på vandløb. Nogle artikler er også potentielt relevante for dette projekt og omhandler især søer, hvor det er godtgjort at grundvandet har stor betydning for den samlede næringsstofftilførsel. Et eksempel er målinger fra Bysjön i det sydlige Sverige, hvor det grundvand, der kommer ind i søen har op til 20 gange højere koncentrationer af fosfor end det gennemsnitlige indhold i søen (Vanek, 1991, bilag 5.1). Det indstrømmende grundvand stammer fra den ripariske zone omkring søen, hvor det foreslås, at der gennem tiden er ophobet fosfor og andre næringsstoffer fra tilstødende bebyggelser (herunder også gødskning i haver) og landbrugsområder. En review artikel fra 1988 opsummerer kendskabet til grundvands indhold af fosfat og konkluderer at grundvandets indhold af fosfor mange steder er så høje, at det kan føre en eutrofiering af overfladevand (Driescher & Gelbrecht, 1988, bilag 5.1). I nogle artikler indikeres det, at dannelsen af næringsrigt grundvand sker via en landbrugs-mæssig påvirkning i den øvre del af et opland, som så tilføres overfladevandet i den nedre del af et opland. Også andre artikler påpeger at opbygningen af en stor næringsstofpulje i landbrugsjord p.g.a. en stor nettotilførsel af næringsstoffer på sigt udgør en alvor trussel og

umindsket eutrofiering via diffus belastning til overfladevande (Behrendt & Hoekhold, 1993, bilag 5.1). Enkelte artikler beskriver også søvands påvirkning af grundvand, hvor der over kortere strækninger af grundvand kan registreres forøget indhold af næringsstoffer, når næringsrigt vand siver ud af søen, men næsten alle andre undersøgelser omfatter påvirkningen den anden vej, dvs. grundvandets indflydelse på søvand.

Nitrat. Blandt artikler som indeholder søgeordet “nitrate” er der generelt ikke mange, som umiddelbart er relevante for dette projekt. Mange artikler beskriver grundvandets sammensætning, indhold af pesticider, nitratforurenede grundvand og metoder og processer (denitrifikation) der fjerner nitrat fra grundvand. En del artikler er også rettet mod vandløb eller forsøringsproblemer. Ligesom for fosfor gælder det, at de mest relevante artikler beskriver, hvor stor en del af den samlede kvælstoftilførsel, der tilføres via grundvand. En artikel fra New Zealand (Lake Rotorua) konkluderer at den nuværende landbrugspraksis forøger nitratindholdet i grundvandet, hvilket bidrager til søens næringsstofbudget (Grinsted & Wilson, 1978, bilag 5.1).

Tabel 2.1. Antal artikler, hvis litteratursøgningen på “groundwater” og “lake” udvides med andre søgeord (forekommende i titel eller abstract). Antal af artikler med relevans og graden af relevans for dette projekts problemstilling samt de oftest beskrevne emner er også angivet for relevante søgeord. Samme artikel kan godt forekomme flere gange indenfor de forskellige søgeord.

Søgeord	Antal artikler	Relevans			Hovedemner med relevans
		ingen	ringe	nogen	
Phosphorus	126	85	25	16	Grundvand kan udgøre en væsentlig af søens fosfortilførsel
Nitrate	107	99	7	1	Grundvand kan udgøre en væsentlig del af søens N-tilførsel
Eutrophication	54	45	8	1	Højt næringsstofindhold i grundvand kan føre til eutrofiering af søer
Plankton	63	51	8	3	Ændret næringsstoftilførsel og effekter på fytoplankton
Fish	106	91	12	3	Områder med koldt indsvivende grundvand øger gyde- og levevilkår for ørred
Macrophyte	35	29	3	3	Grundvandsindstrømning kan lokalt påvirke mængde og type af makrofytter
Invertebrate	20	19	0	1	Betydningen af varierende vandstand i temporære søer
Paleo	92	-	-	-	
Model	642	-	-	-	
Seepage	199	-	-	-	
Clima	255	-	-	-	
Acid	256	-	-	-	
Saline	228	-	-	-	
Mining	111	-	-	-	

Eutrofiering. “Eutrophication” som søgeord var kun indeholdt i 54 artikler. Af disse var de fleste ikke relevante og mange omhandlede vandløb eller omtalte en mere generel betragtning vedrørende eutrofiering. Ikke uventet var der desuden en del overlap i forhold til søgninger på fosfor og nitrat.

Plankton. Plankton indgår kun som søgeord i relativ få artikler og heraf vedrører de fleste fytoplankton. De fleste artikler omhandler emner der ikke er relevante her, herunder sure søer (+ minesøer), pesticider, arktiske søer, saltsøer samt palæolimnologiske analyser. Blandt de få relevante artikler, er der et eksempel fra en sø i Uruguay, hvor en ½ år afbrydelse af grundvandstilstrømningen medførte fosfatbegrænsning af fytoplankton (Aubriot et al., 2000, bilag 5.1).

Fisk. "Fish" indgår som søgeord i 106 artikler, men artiklerne er i de fleste tilfælde ikke relevante. Mange omhandler problemstillinger vedr. vandløb, mine-søer, aquakultur, palæolimnologi og pesticider. Blandt de mest relevante er enkelte artikler, der beskriver grundvandets temperaturmæssige indflydelse. Dette gælder for eksempel, hvordan indtrængning af grundvand kan tiltrække gydende fisk til specielle områder af søer, som eksempelvis kildeørred i 1469 Adirondack søer (Schofield, 1993, bilag 5.1). I andre søer bruger ørred (*Salvelinus namaycush*) kolde områder i søen med grundvandsindtrængning, som refugie i varme perioder (Snucins & Gunn, 1995, bilag 5.1).

Makrofytter (+bentiske alger). Kun i få af artiklerne indgår "macrophyte" som søgeord, hvoraf en del omhandler vandløb og nogle sure eller arktiske søer. Flere artikler påviser at forskellig hastighed af grundvandsindsivning kan påvirke fordelingen af makrofytter, således var at grundvandsudsivningen i littoralzonen af Lake Tahoe hurtigst inde i plantebælterne (Loeb & Hackley (1988, bilag 5.1), og fordelingen og biomassen af aks-tusindblad påvirket lokalt af grundvandsinput (Loeb & Hackely, 1986, bilag 5.1). I nogle søer er det også påvist at grundvandsindstrømmingen kan påvirke biomassen af bentiske alger (Hagerthey & Kerfoot, 1998, bilag 5.1).

Invertebrater. Kun i 20 af artiklernes abstract eller titel indgår "invertebrate" som søgeord. De fleste af disse beskæftiger sig med vandløb samt enkelte vedrørende forsurede og salte søer. En enkelt artikel er relevant i forhold til temporære søer som følge af vinter-sommer variationer i den lokale vandstand af grundvandet. En undersøgelse af sø fra Wales med vandstandsvariationer på 3-4 m viste en zonerings i forekomst af invertebrater med dominans af microkrebsdyr og insekter som tilpasses den tørre sommerperiode (Blackstock, 1993, bilag 5.1).

Øvrigt. Af øvrige emner kan nævnes klimatiske forhold, hvor grundvandets indflydelse på en række vådområder illustrerer hvordan forskellig nedbørsmængde påvirker en række forhold (Winter & Roseberry, 1995, bilag 5.1). Også indenfor området palæolimnologi kan der være artikler af interesse. I de fleste tilfælde drejer det sig om ændringer i forhold til klima over en kortere eller længere tidsperiode. De fleste artikler, der drejer sig om pesticider, fokuserer på grundvandets indhold af forskellige miljøfremmede stoffer. Enkelte artikler beskriver også hvordan udsivning af søvand til grundvandet evt. kan udgøre en trussel mod grundvandskvaliteten i søer, som har forhøjet indhold miljøfremmede stoffer via det omgivende miljø (Isiorho et al., 1996, bilag 5.1). Nogle artikler beskriver også mere fysiske aspekter, som feks. Norrstrom og Jacks (1996, se bilag 5.1), der viser at en stor del af grundvandstilførslen til den norske Skjervatjern sker via macroporer i søbunden, eller LaBaugh et al (1995, se bilag 5.1), der i en undersøgelse over 12 år beskriver, hvordan grundvandet udgør størsteparten både af input og output til søen, eller Donovan & Rose (1994, se bilag 5.1), der fra en lang række grundvandsfødte søer i USA viser at næringsstofindhold kan variere i forhold til hvilke dybder af grundvand, der bidrager. I forhold til søvandets opblanding, er der eksempler på, hvordan en øget grundvandsstand synes at kunne få en sø til skifte fra meromixis til holomixis, altså fra delvis til fuldt opblandede vandmasser, på grund af øget indhold af opløste stoffer i den opblandede zone (Hongve, 1999, bilag 5.1).

3 Vandbalancer og danske eksempler på grundvandets betydning for søtilstand

Som nævnt i indledningen og som også afspejlet ved litteratursøgningen findes der kun meget få danske undersøgelser med fokus på grundvandet og dets interaktioner med søer og deres vandkvalitet. I det følgende har vi givet en oversigt over de opgørelser, der findes vedrørende danske søers vandbalance baseret på de 21 overvågnings søer, hvor det har været muligt at etablere en vandbalance. Derudover er der medtaget en oversigt over grundvandets indhold af næringsstoffer (især fosfor) baseret på data fra GEUS. Endelig er der

givet nogle eksempler på hvordan grundvand i forskellige sammenhænge har påvirket søernes vandkvalitet.

3.1 Vandbalancer for danske søer

I de fleste tilfælde udgør grundvandsdelen kun en mindre del af den samlede hydrauliske tilførsel til de danske søer. En opgørelse over 21 overvågningssøer viste, at grundvandsdelen som gennemsnit udgjorde omkring 10% af den samlede vandbalance (Tabel 3.1, Jensen mfl., 1995). Der er dog store forskelle fra sø til sø, og i enkelte søer udgør grundvandsdelen en betydelig del og vil her have stor betydning for søens miljøtilstand. I halvdelen af de undersøgte søer udgør grundvandsindsivning og -udsivning mindre end henholdsvis 8 og 7 % af den samlede vandbalance.

Tabel 3.1. Den relative fordeling af vandtilførsel mellem målt opland ($Q_{\text{målt}}$) umålt opland ($Q_{\text{umålt}}$) nedbør og grundvandsindsivning (Q_{indsiv}) og grundvandsudsivning (Q_{udsiv}) i 21 overvågningssøer i perioden 1989-1994. Der henvises til Jensen mfl. (1995) for en nærmere beskrivelse af de beregningsmæssige aspekter.

Vandtilførsel	gennemsnit	25% kvartil	median	75% kvartil
$Q_{\text{målt}}$	61	48	65	75
$Q_{\text{umålt}}$	13	8	10	18
Nedbør	7	3	4	7
Q_{indsiv}	11	3	8	13
Q_{udsiv}	8	3	7	13

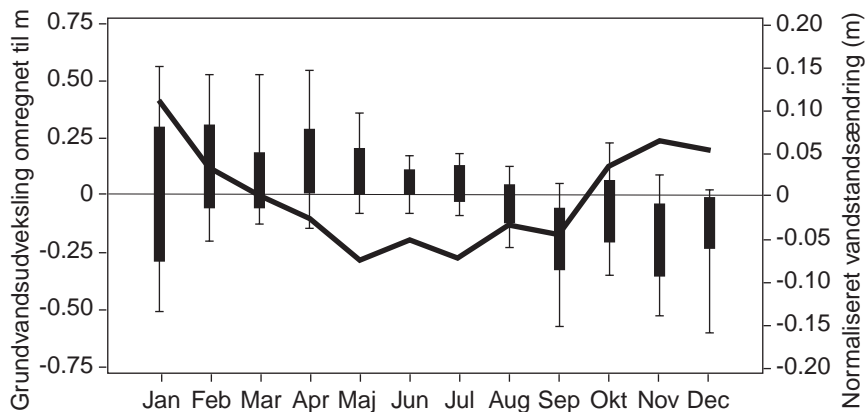


Fig. 3.1. Nettogrundvandsudvekslingen ($Q_{\text{indsiv}} - Q_{\text{udsiv}}$) korrigeret for søareal i perioden 1989-94 for 21 overvågningssøer. Kasserne angiver 25%, og 75% kvartiler, mens streger angiver 10% og 90% fraktiler. Linien angiver medianværdien for vandstanden gennem sæsonen. (fra Jensen mfl., 1995). Bemærk forskellig akse-skala.

Samspillet mellem grundvand og søvand er ikke kun et spørgsmål om grundvandsindsivning. I nogle tilfælde sker der også en udsivning af søvand til grundvandet. En opgørelse over grundvandsudvekslingen i de 21 overvågningssøer viste således, at der i efterårsperioden i de fleste søer sker en udsivning af grundvand, mens der den øvrige del af året skete en indsivning (Fig. 3.1). Sæsonforløbet af grundvandsudvekslingen peger på, at der generelt er tale om en udveksling med de sekundære grundvandsmagasiner. I den første del af året, hvor de sekundære grundvandsmagasiner er fyldt op, sker der en udtømmning til søen, mens der i efteråret, hvor øget afstrømning betyder at søerne fyldes hurtigere op end grundvandsmagasinerne, sker en transport modsatte vej. Lignende resultater er set fra Arreskov Sø på Fyn (Fyns amt, 1995). Beregninger fra Arreskov Sø viser endvidere, at der kan være store forskelle fra år til år i grundvandsudvekslingen (Jensen mfl., 1995).

3.2 Grundvandets indhold af næringsstoffer og pesticider

Søers næringsstofindhold er afgørende for vandkvaliteten, hvor høj næringsstofftilførsel fører til ringe vandkvalitet med uklart vand og mindsket biologisk mangfoldighed. Sammenhængen mellem næringsstofftilførsel og vandkvalitet er ikke altid lineær, og ikke mindst i området med

fosforkoncentrationer mellem 0,02 og 0,2 mg P/l ses ofte meget store forskelle i vandkvaliteten og et skift fra den klarvandede og biologisk diverse sø til den uklare sø med et mindre varieret plante- og dyreliv (se f.eks. Jeppesen mfl., 1997). Skiftet mellem den uklare og klarvandede tilstand sker i lavvandede søer oftest mellem 0,05 og 0,15 mg P/l. Her kan forholdsvis små forskelle føre til store ændringer.

I dette afsnit gives en kort oversigt over grundvandets indhold af fosfor, nitrat og pesticider. Oversigten er baseret på data fra grundvandsovervågningen GEUS (2000).

Indholdet af fosfor i grundvandet er i de fleste tilfælde forholdsvis ringe, men overstiger dog 0,15 mg/l totalfosfor i omkring 17% af filtrene fra grundvandsovervågningsområderne og omkring 20% af de indberettede analyser fra vandværksboringer. De højeste koncentrationer findes i metan- og jern-sulfat redoxzonen. De høje koncentrationer fra vandværksboringer kan ofte henføres til boringer, der har været i kontakt med yngre marine aflejringer (GEUS, 2000). I områder med indvinding fra kalkmagasiner i store dele af Sjælland, Lolland-Falster, Møn, Djursland, Himmerland og Han Herred findes til gengæld kun få boringer, hvor fosforindholdet overstiger 0,15 mg/l.

Med det kendskab, der eksisterer vedrørende sammenhæng mellem søers fosforindhold og vandkvaliteten betyder dette, at forøget grundvandstilførsel fra områder med de høje fosforkoncentrationer kan have en negativ effekt på søens tilstand, hvis der i øvrigt ikke tilføres høje koncentrationer fra andre kilder.

Indholdet af kvælstof, hvilket for grundvands vedkommende ofte sker i form af nitrat, kan især have betydning i søer med en langsom vandudskiftning, og hvor kvælstof i perioder evt. kan virke begrænsende for planteplanktonets produktion. Omkring 61% af overvågningsboringerne og 69% af vandforsyningsboringerne indeholder mindre end 1 mg/l nitrat (GEUS, 2000).

En del grundvandsprøvetagninger indeholder også rester af pesticider. Siden 1993 er der fundet pesticider eller nedbrydningsprodukter i 35% af de undersøgte overvågningsfiltre, mens fundprocenten er 24 i vandværksboringer. Problemet omfang i forhold til påvirkninger i vandmiljøet er dog indtil videre stort ukendt. Største effekter forventes i intensivt dyrkede områder og samtidigt også mest i de mindre søer, hvor fortyndingseffekten er mindst.

3.3 Eksempler fra danske søer

I det følgende er der givet nogle eksempler på hvordan grundvandet i forskellige sammenhænge kan påvirke danske søers miljøtilstand.

Betydningen af ændret vandstand i Ræv Sø

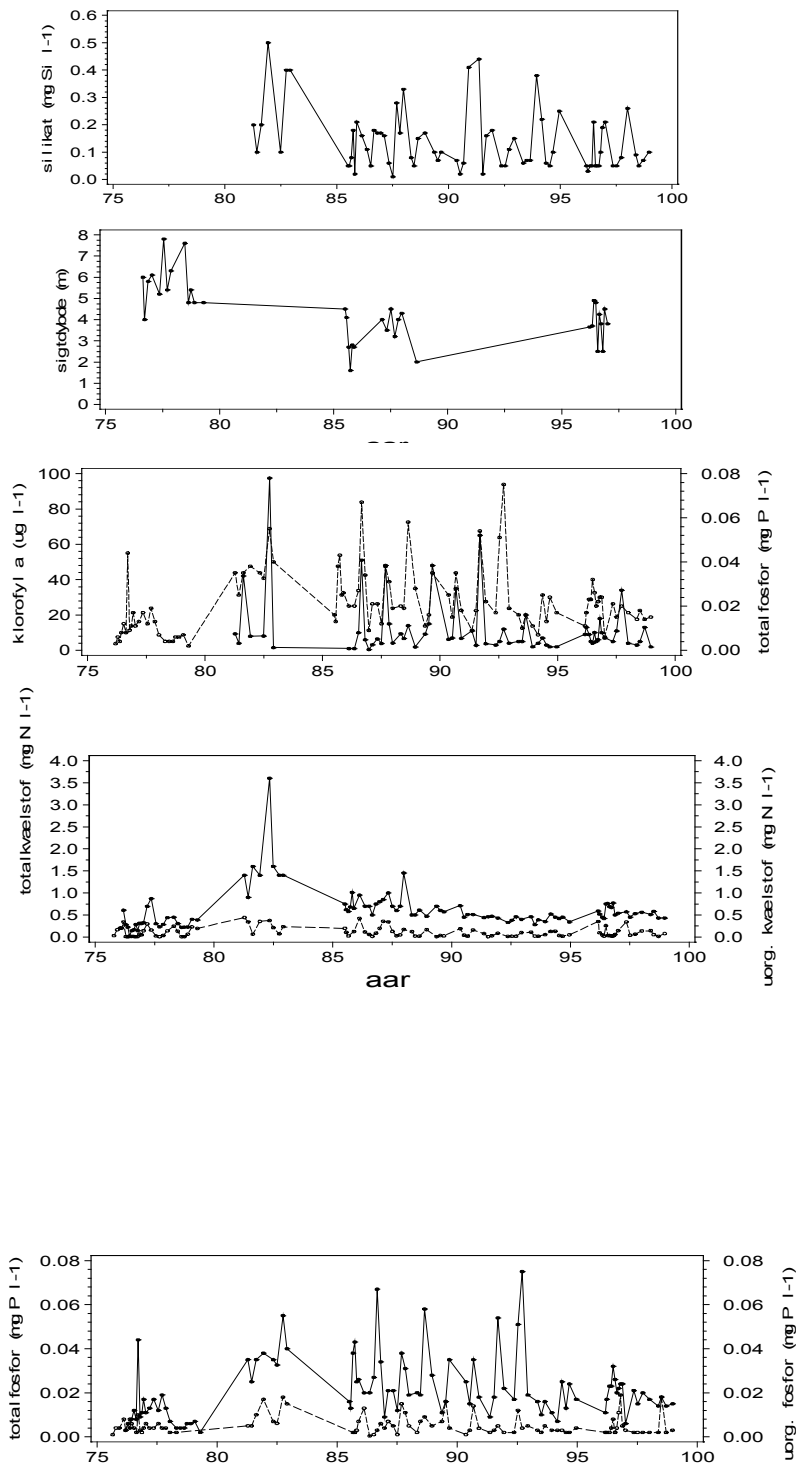
Rævsø er et eksempel på de effekter, der kan ses af ændringer i vandstand efter nedbørsrige år og stormfald. Den lille næringsfattige hedesø, Rævsø, ligger på udvaskede sandaflejringer i den tidligere tunneldal, Tingdalen i Midtjylland. Data stammer fra Hagelskær mfl. (1988) samt Århus Amt (upub.).

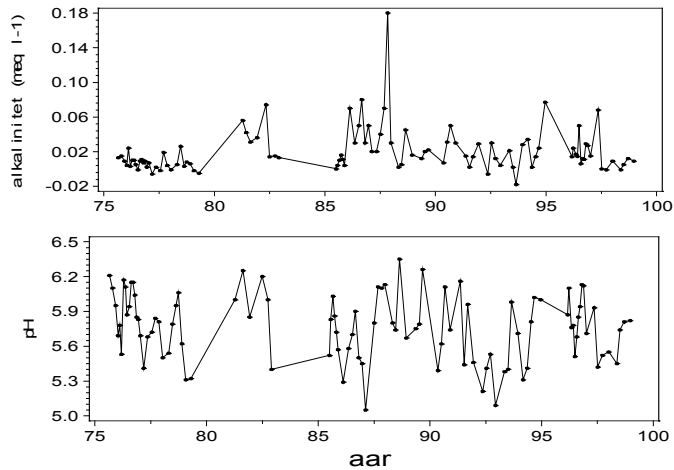
Søen, som er fredet, er ionfattig med lav eller ingen alkalinitet og en pH på 5-6. I 1977-80 var søen klarvandet med en sigtddybde på 4-7,8 m og store dele af bundet var dækket af grundskudsplanter (Strandbo, Tvepibet Lobelie og Sortgrøn Brasenføde). Koncentrationerne af planteplankton, fosfor og kvælstof var lave (Fig. 3.2).

Efter år med kraftig nedbør og sammenfaldende med et stormfald i søens opland steg vandstanden markant, så søens areal blev udvidet med omkring 50%, fra 4,6 til 6,8 ha og vandvolumet med 30%. Vandstandsstigningen og udvaskning af næringsstoffer og humusstoffer ændrede søens miljøtilstand radikalt. Søen blev brunvandet og koncentrationen af fosfor og kvælstof øgedes med en faktor 2-3 (Fig 3.2). Det var især den organiske fraktion

af fosfor og kvælstof, som blev større, formentlig bundet i opløste og partikulære humusstoffer. Samtidigt steg alkaliniteten en smule, hvilket bl.a. kan tilskrives en stigning i silikat. Det uklare vand betød at stort set alle karakteristiske grundskudsplanter forsvandt. Derimod steg algemængden målt som klorofyl a fra skønsmæssigt 10 µg/l til målte værdier på op til 82 µg/l og vandet blev mere uklart.

Siden er der sket et gradvist fald i næringsstofniveauet og alkaliniteten, uden at det dog i dag har nået niveauet fra 1970'erne. Der er tegn på at klorofyltoppene, som typisk forekommer i august-september, er aftaget i størrelse. Vandets klarhed udtrykt ved sigtdybden målt med en nedsænket hvid skive er i overensstemmelse hermed steget fra midten af 80'erne til slutningen af 90'erne, men var dog stadig i 1997 væsentligt under niveauet i 70'erne.





Figur 3.2. Udviklingen i Ræv Sø 1975-2000.

Rævsø er således et illustrativt eksempel på at markante ændringer i grundvandsstanden her i kombination med stormfald kan have særdeles store og længerevarende effekter på miljøtilstanden i næringsfattige grundvandsfødte søer.

Betydning af grundvandsindpumpning for fosfor og kvælstof i Kvie Sø

Kvie Sø i Ølgod kommune er ligeledes en næringsfattig, lobeliesø. I forbindelse med en kalkforurening af søen i 1992, blev der i 1993 iværksat en indpumpning af grundvand for at reducere alkaliniteten og brunfarvningen af søvandet (Ribe amt, 2001). Indpumpningen fortsatte indtil starten af 1999.

I perioden 1993 til 1998 faldt årsgennemsnittet af totalfosfor og totalkvælstof fra 0,089 mg P/l og 1,37 mg N/l til 0,055 mg P/l og 0,091 mg N/l. Siden 1998 er koncentrationerne igen steget og var som årsmiddel i 2000 på 0,091 mg P/l og 0,13 mg N/l. Stigningen i koncentrationen af fosfor og kvælstof kan være forårsaget af, at der ikke længere pumpes grundvand ind i søen (Ribe amt, 2001). I perioden 1993 til 1999 steg sigtddybden i søen fra 1,2 til 1,6 m, men faldt i 2000 til 1,3 m som årsgennemsnit.

Selvom årsagen til ændringerne i næringsstofindhold og sigtddybde i Kvie Sø ikke entydigt kan tilskrives forskellig grad af grundvandsindpumpning indikerer det alligevel muligheden for at påvirke søtilstanden via grundvandstilstrømningen – i dette tilfælde er grundvandet indhold af næringsstoffer tilsyneladende lavt nok til at have en positiv indflydelse.

Betydning af grundvand for søers vandtemperatur (Søbygård Sø og Væng Sø)

Grundvandet kan også have betydning for søvandets temperatur og dermed blandt andet være en væsentlig faktor i diskussionen vedr. klimaændringer. Grundvandets betydning kan illustreres med to søer fra Midtjylland, hvor grundvandsandelen af den samlede vandtilførsel er vidt forskellig. Således er vandtemperaturerne i vintermånederne 0,5-0,7 °C højere i den 90%-grundvandsfødte Væng Sø end i Søbygård Sø, hvor kun 10% af vandtilførslen stammer fra grundvand (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Den gennemsnitlige vandtemperatur (°C) i Væng Sø og Søbygård Sø i vinter- og sommermånederne. Kun data hvor der er målt på samme datoer er medtaget. Grundvandets andel af den samlede vandtilførsel udgør omkring 90% i Væng Sø og 10% i Søbygård Sø.

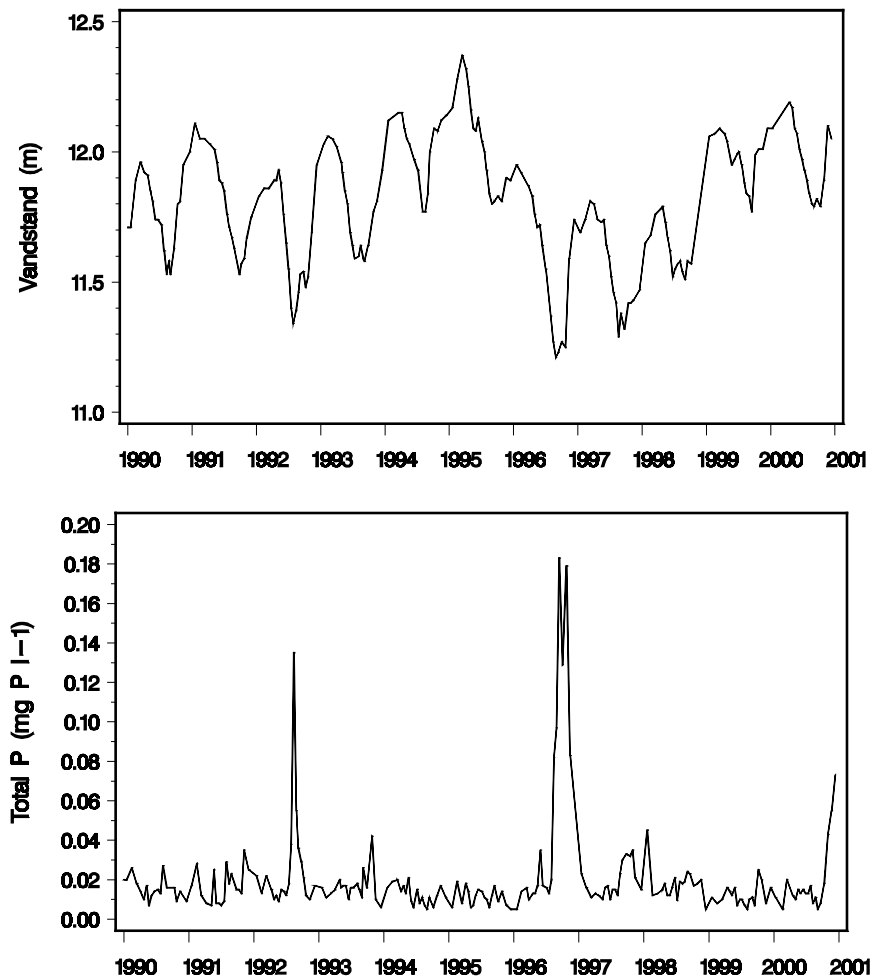
Måned	Antal målinger	Væng Sø, temperatur	Søbygård Sø, temperatur
Januar	14	4,1	3,4
Februar	8	4,2	3,7
Marts	13	5,6	5,0
Juli	24	18,4	18,4

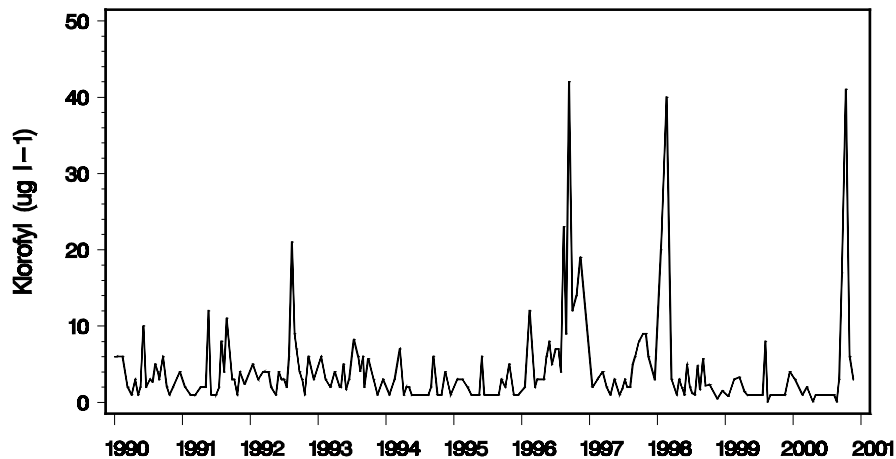
August	25	17,2	17,1
September	28	13,7	13,7

Betydningen af varierende vandstand i den lavvandede Holm Sø

Holm Sø, der er en af overvågningsøerne, er en næringsfattig og klarvandet lobeliesø beliggende nordvest for Oksbøl. Søen har kun en middelvanddybde på 0,8 m (opmålt ved 12,02 m DNN) og samtidigt en meget variende vandstand, der blandt andet skyldes varierende grundvandsspejl i forbindelse med nedbørsrige og nedbørsfattede år. Om sommeren betyder den lave vandstand, at store dele af søbunden tørlægges, mens høj vandstand i vinterhalvåret til gengæld betyder at nærliggende hedearealer oversvømmes.

Vandstanden i søen varierer med over i løbet af sommeren typisk med omkring ½ m med den laveste vandstand om sommeren (Fig. 3.3). Derudover varierer vandstanden i søen også betydeligt fra år til år afhængig nedbørsforhold, hvilket betyder at gennemsnitsdybden om sommeren også kan variere betydeligt. Et eksempel er årene 1995-96 hvor vandstanden om sommeren i 1995 lå på omkring 11,8 m (DNN), mens den i sommeren 1996 nåede ned på 11,2 m.





Figur 3.3. Målinger fra Holm Sø i Ribe amt, der viser vandstand (over DNN), søvandets indhold af total fosfor og klorofyl a. Efter Ribe amt.

Perioder med lav vandstand har stor betydning for indholdet af fosfor i søvandet, hvilket ses af de markant højere koncentrationer, der blev set især 1996 og 1992 i forbindelse med meget lav vandstand. I disse perioder blev fosforkoncentrationen mere end 5-doblet og øget fra et niveau på omkring 0,02 mg P/l til 0,12-0,18 mg P/l. Denne sammenhæng skyldes at den meget lave vandstand øger opkoncentreringen og fører til større påvirkninger fra sedimentet, herunder også forøget muligheden for ophvirvling af sediment i forbindelse med blæsende perioder (Ribe amt, 2001). Resuspension af sediment er kendt for at ofte at kunne føre til markant forhøjede koncentrationer af suspenderet stof og næringsstofindhold inden for korte tidsrum i lavvandede søer.

4. Referencer

Fyns Amt. 1995. Arreskov Sø 1994. Natur- og vandmiljøafdelingen.

GEUS 2000. Grundvandsovervågning 2000.

Hagelskær B., A. G. Madsen, M. S. Olsen, & T. M. Iversen. 1988. Rævsø – en hedesø under forandring. *Vand & Miljø* 2: 65-67.

Jeppesen E., M. Søndergaard, J.P. Jensen, T. Lauridsen, L. Jacobsen & S. Berg. 1997. Biologiske samfund og samspil i lavvandede søer. *Vand & Jord* 4,6:223-228.

Jensen J.P., E. Jeppesen, M. Søndergaard, J. Windolf, T. Lauridsen, L. Sortkjær. 1995. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1994: Ferske Vandområder – søer. Faglig rapport fra DMU nr. 139.

Ribe Amt 1992. Kvie Sø, Holm Sø, miljøtilstand.

Ribe Amt. 2001. Kvie Sø, Holm Sø 2000. Vandmiljøovervågning.

5 Bilag

5.1 Eksempler på abstracts fra litteratursøgningen

Phosphorus

Vanek, V. (1991). *Riparian zone as a source of phosphorus for a groundwater-dominated lake. Water Res. 25: 409-418.*

Groundwater entering Lake Bysjoen in southern Sweden is somewhat higher in specific conductance and up to 20 times higher in phosphate than the mean for the lake. This leads to elevated values of both specific conductance and phosphate in lake water within a 500 m long and several meter wide strip along the shore. In areas not influenced by groundwater inflow, specific conductance and phosphorus content near the shore are close to that of open lake water. High concentrations of phosphate (up to 9 mg/l PO sub(4)-P) in the inflowing groundwater originate from the riparian zone surrounding the lake. It is suggested that, over a long time, this ecotone has accumulated phosphorus and other nutrients that were transported from the adjacent developed areas and arable land. This phosphorus is now entering the lake, probably as a result of increased decomposition of organic matter.

Driescher, E. and J. Gelbrecht (1988). *(Phosphorus in ground water. 1. Report: On the occurrence of phosphates in groundwater -- a literature review.) Acta Hydrophys. 32: 213-235.*

This review illustrates at which concentrations phosphorus has been observed in subsurface waters, including drainage and bankfiltered water. It opposes the widespread opinion that - because of the well known physicochemical elimination processes - groundwater generally contains phosphorus only in some ppm. P-concentrations really measured in several aquifers and drainage waters would be sufficient to cause eutrophication of surface waters. Therefore, more attention should be paid to groundwater discharge into surface waters, especially into lakes, and to monitoring groundwater quality also in regard of phosphorus.

Behrendt, H. and A. Boekhold (1993). *Phosphorus Saturation in Soils and Groundwaters. Land Degradation and Rehabilitation 4: 233-243.*

On average, crops require about 30 kg ha⁻¹ y⁻¹ of P in humid regions. In some regions fertilizer and manure are applied in amounts that exceed this. The surplus of P in agricultural areas is about 20-45 kg ha⁻¹ y⁻¹. This implies an accumulation of P. The surplus of P estimated from the balance of agricultural soils of industrialized countries in Europe in the last four decades is between 800 and more than 1500 kg ha⁻¹ although this distribution is not even. Phosphorus accumulation is more than one order of magnitude higher than average in areas with intensive livestock farming. Consequently, the application of high levels of manure exceed the capacity of the soil to store P. This implies that P saturation may pose a problem. Indeed, about half of the Dutch sandy soils (approximately 300 000 ha) are currently considered to be saturated with P, meaning that there is a hazard of P leaching to groundwaters in the future. Assuming current phosphate application rates, phosphate leaching is a distinct possibility over a period of decades to a century. Vulnerable areas are soils with high inputs, low sorption capacities for P, high water-tables and a low retention time for water. The possible consequence is a time-delayed increase of eutrophication of surface waters (lakes, rivers and the sea) caused by a diffuse load of P in the few next decades. Modelling the influence of different agricultural strategies shows that accumulation of P would not increase further only if the use of P increases by an amount that compensates for the increased inputs. It is proposed to change the current support system of agriculture by installing a system of financial incentives and taxes which seek to promote nutrient balances for each farm.

Nitrate

Grinsted, M. J. and A. T. Wilson (1978). *Nitrate concentrations in the groundwater around Lake Rotorua.*

Bores, wells, and springs from the area around Lake Rotorua, New Zealand, were sampled in May 1974 and analysed for nitrate. Of a total of 102 samplings, the World Health Organisation limit for nitrogen in potable water (10.0 mg.ISUP--1) was exceeded by only one sample (23 mg.ISUP--1) from a pig farm. Most samples were found to have nitrate levels in the range 0.1-

5.0 mg.-SUP--1. An inverse relationship between nitrate concentration and distance from the shore of the lake was found for the northwestern section of the lake's catchment. Levels of nitrate-nitrogen increased from 0.5 mg.ISUP--1 at 8.1-10.0 km from the lake's shore to 2.0 mg.ISUP--1 at 0.1-2.0 km from the lake's shore. It is concluded that current farming practices around Lake Rotorua are contributing to the levels of nitrate in the local groundwater. The inflow of groundwater nitrate may be high enough to contribute to the nutrient budget of the lake.

Phytoplankton

Aubriot, L., F. Wagner and G. Falkner (2000). *The phosphate uptake behaviour of phytoplankton communities in eutrophic lakes reflects alterations in the phosphate supply. European Journal of Phycology [Eur J Phycol] 35: 255-262.*

The phosphate uptake behaviour of phytoplankton communities in two eutrophic Uruguayan lakes has been studied using [super(32p)]phosphate. In order to measure net incorporation of this tracer, lake samples were prelabelled with successive pulses of radioactive phosphate prior to the uptake experiments proper. The data were analysed using a proportional flow-force relationship which allows the evaluation of two characteristic parameters: a conductivity coefficient $L_{sub}(P)$ that here reflects the overall activity of the uptake systems of the community, and a threshold concentration $[P_{sub}(e)]_{sub}(A)$ at which net incorporation of phosphate ceases for energetic reasons. Between December 1997 and July 1998 in Lago Rodo phosphate supply by inflowing groundwater was periodically interrupted resulting in distinct states of phosphate deficiency. This showed that the phytoplankton responded to alterations in the phosphorus status of the lake by characteristic changes in $L_{sub}(P)$ and $[P_{sub}(e)]_{sub}(A)$. The uptake behaviour of the phytoplankton community thus obeyed the linear flow-force relationship over a wide concentration range, in contrast to expectations of non-equilibrium thermodynamics. The observed uptake characteristics exhibited by multi-species phytoplankton ensembles are discussed with respect to a possible coherent behaviour of the constituents of these communities.

Fisk

Schofield, C. L. (1993). *Habitat Suitability for Brook Trout (Salvelinus-Fontinalis) Reproduction in Adirondack Lakes. Water Resources Research 29: 875-879.*

The relationships between habitat characteristics and reproductive status of Adirondack brook trout populations were examined utilizing the Adirondack Lake Survey Corporation data base, which includes physical, chemical, and biological data for 1469 lakes. The only variables strongly related to brook trout natural reproduction were indices of groundwater influence on surface water chemistry, specifically silica and sodium concentrations. This finding supports the hypothesis that lake spawning populations of brook trout are strongly dependent on groundwater seepage for successful reproduction. Spawning habitat in small headwater lakes impounded by beaver activity may be degraded as a result of siltation of nearshore zones and diminished groundwater seepage. Adirondack lakes situated in thick-till basins receive proportionally greater groundwater input than thin-till lake types and thick-till lakes also had the highest proportion of self-sustaining brook trout populations. Acidification is most pronounced in thin-till basins, which also exhibited a low frequency of self-sustaining brook trout populations. Although brook trout fisheries may be maintained in acidic lakes by liming and stocking, the establishment of self-sustaining brook trout populations is not a likely outcome of these management practices. Additionally, there appears to be limited potential for restoration of lake spawning brook trout populations in currently acidic, fishless lakes should acidic inputs decline as a result of reductions in acid-forming emissions.

Snucins, E. J. and J. M. Gunn (1995). *Coping with a Warm Environment - Behavioral Thermoregulation by Lake Trout. Transactions of the American Fisheries Society 124: 118-123.*

Temperature-sensing ultrasonic transmitters were used to monitor the behavior of eight individual lake trout *Salvelinus namaycush* in two lakes: a shallow lake that becomes isothermal (15-20 degrees C) during late summer and a typical dimictic lake with a cold hypolimnion. Use of a cool, nearshore groundwater discharge site, a behavior never before documented for lake trout, was observed among some fish in the shallow lake when ambient lake temperatures exceeded the species' preferred thermal range of 6-13 degrees C. We suggest that during very warm years, groundwater refugia may be important habitat for lake trout and that these refugia should be protected.

Makrofytter

Loeb, S. L. and S. H. Hackley (1988). *The distribution of submerged macrophytes in Lake Tahoe, California and Nevada, and the possible influence of groundwater seepage. Congress in New Zealand 1987. Proceedings. V. Sladeczek: 1927-1933.*

The objectives of this study were: (1) describe the distribution pattern of the submerged macrophytes in the shallow (0-10 M) littoral zone of Lake Tahoe; (2) examine the seasonal growth pattern; and (3) determine whether differential groundwater seepage into the lake was associated with the growth distribution patterns of these plants. The seepage flux both inside and outside the macrophyte bed demonstrated a positive flow of groundwater into the lake. Also demonstrated by all but two of the flux measurements was that the rate of groundwater seepage inside the bed was greater than outside the bed. From these data, it was concluded differential groundwater seepage rates may affect the distribution of macrophytes in Lake Tahoe.

Lille, R. A. and J. W. Barko (1990). *Influence of sediment and groundwater on the distribution and biomass of Myriophyllum spicatum L. in Devil's Lake, Wisconsin. J. Freshwat. Ecol. 5: 417-426.*

Influences of physical and chemical characteristics of sediments and of groundwater inputs on the distribution and biomass of Eurasian milfoil, *Myriophyllum spicatum*, were studied in Devil's Lake, Wisconsin. Sediment cores from inside and outside *M. spicatum* beds were analyzed for density, particle size composition, and moisture, organic, elemental, and nutrient contents. Groundwater direction, volume, and nutrient concentration were determined using seepage meters. Whereas sediment composition appears to be inadequate to support dense growth of macrophytes, localized groundwater inputs may be important in regulating the distribution and biomass of *M. spicatum* in Devil's Lake.

Hagerthey, S. E. and W. C. Kerfoot (1998). *Groundwater flow influences the biomass and nutrient ratios of epibenthic algae in a north temperate seepage lake. Limnology and Oceanography [Limnol Oceanogr] 43: 1227-1242.*

Groundwater flow influenced epibenthic algal biomass and N:P ratios at a seepage lake (Sparkling Lake, Wisconsin). During seasonal studies, biomass and seepage flux were positively associated ($r = 0.453$; $P < 0.001$). Pore-water soluble reactive phosphorus (SRP) concentrations (29.2-110.7 $\mu\text{g PO sub}(4) \text{ liter super}(-1)$), SRP fluxes, and algal biomass were significantly higher at high groundwater discharge sites than at low flow sites (<10.0 to $27.7 \mu\text{g PO sub}(4) \text{ liter super}(-1)$). Pore-water ammonia (NH sub(3)) concentrations were significantly lower at high groundwater discharge sites (<10.0 to $566.0 \mu\text{g NH sub}(3) \text{ liter super}(-1)$) than at low groundwater discharge and recharge sites (61.4 - $1464.9 \mu\text{g NH sub}(3) \text{ liter super}(-1)$). The coupling between pore-water nutrient concentrations and local groundwater flow dynamics suggests a mechanism for the observed spatial patterns in biomass. In situ experimental chambers evaluated coupling between epibenthic algal biomass, N:P ratios, and groundwater flow patterns. Biomass responded rapidly in chambers, reaching ambient levels within 1.5 months of initiation. Free-flow chambers in discharge regions had consistently higher soluble reactive phosphorus (SRP), NO sub(3)-NO sub(2), and O sub(2) concentrations, higher phosphate and nitrate-nitrite fluxes, higher algal biomass, and lower N:P ratios in the developing mat. Free-flow chambers in recharge regions had high ammonia (NH sub(3)) concentrations, lower algal biomass, and higher N:P ratios. These results confirm that groundwater-related nutrient fluxes influence the local physicochemical environment and affect epibenthic algal biomass.

Invertebrater

Blackstock, T. H., C. A. Duigan, D. P. Stevens and M. J. M. Yeo (1993). *Vegetation zonation and invertebrate fauna in Pant-y-llyn, an unusual seasonal lake in south Wales, UK. Aquat. Conserv.: Mar. Freshwat. Ecosyst. 3: 253-268.*

Temporary waters have been relatively neglected in British nature conservation, due in part to paucity of survey and comparative assessment. Such water bodies hold distinctive and specialized biological communities, and the need for conservation measures at key localities is increasingly recognized in Europe. An account of the vegetation and invertebrate fauna in Pant-y-llyn, a small temporary lake on Carboniferous Limestone in South Wales, is presented. Water levels in the basin reflect seasonal variation in the height of the local groundwater, and it fills to a depth of ca 3-4 m in winter but is almost completely dry in summer. There is a

clearly displayed sequence of bryophyte, herbaceous swamp and woody plant communities which occupy different depth zones in the basin. The invertebrate community is dominated by microcrustaceans and a range of insect groups; adaptations for survival over the summer dry phase are considered. It is concluded that the ecological characteristics and distinctive hydrological features of Pant-y-llyn closely resemble those of the Irish turloughs. Pant-y-llyn thus represents an important site for conservation as the only known example of this form of seasonal water body in Britain.

Øvrigt

Winter, T. C. and D. O. Rosenberry (1995). *The Interaction of Ground-Water with Prairie Pothole Wetlands in the Cottonwood Lake Area, East-Central North-Dakota, 1979- 1990. Wetlands 15: 193-211.*

The interaction of ground water with prairie wetlands in the Cottonwood Lake area has been the focus of research by the U.S. Geological Survey and the U.S. Fish and Wildlife Service since 1977. During this time, climatic conditions at the site ranged from near the driest to near the wettest of the century. Water levels in wetlands and in water-table wells throughout the study area responded to these changing climate conditions in a variety of ways. The topographically highest wetlands recharged ground water whenever they received water from precipitation. The wetland of principal interest, Wetland P1, which is at an intermediate altitude, received ground-water discharge much of the time, but it also had transpiration-induced seepage from it along parts of its perimeter during all but the wettest year. The large fluctuations of the water table in response to recharge and transpiration reflect the ease with which water moves vertically through the fractured till. Lateral movement of ground water is much slower; pore-water velocities are generally less than 3 m yr⁻¹. The water supply to the wetlands is largely from precipitation during fall, winter, and spring. During these periods, precipitation either falls directly on the wetland, or precipitation that falls on the upland runs over frozen soils or saturated soils into the wetland. The average ratio of stage rise to total overwinter precipitation was 2.59 for the 12-year study period. After plants leaf out, precipitation generally results in much lower rises of the wetland water level. The average ratio of stage rise to over-summer precipitation was less than 1.0.

Isiorho, S. A., F. M. Beeching, P. M. Stewart and R. L. Whitman (1996). *Seepage measurements from Long Lake, Indiana Dunes National Lakeshore. Environ. Geol. 28: 99-105.*

Long Lake, located near Lake Michigan within the dune-complexes of Indiana Dunes National Lakeshore, USA, was formed some time during the Pleistocene and Holocene epochs. A surficial aquifer underlies Long Lake, which is either a source or sink for the lake. The hydrologic processes in the lakeshore and surrounding environs have been significantly altered during the agricultural, municipal, and industrial development of the region. Limited data suggest that the organisms of Long Lake have elevated levels of several contaminants. This study attempts to quantify seepage within the lake to assess the potential threat to groundwater quality. Seepage measurements and minipiezometric tests were used to determine seepage within the lake. Seepage measurements and minipiezometric tests suggest that water seeps out of Long Lake, thus recharging the groundwater that flows southwest away from the lake. There is a great deal of variability in the seepage rate, with a mean of 11.5×10^{-4} plus or minus 11.2×10^{-4} m d⁻¹. The mean seepage rate of 0.3 m yr⁻¹ for Long Lake is greater than the 0.2 m yr⁻¹ recharge rate estimated for the drainage basin area. The Long Lake recharge volume of 2.5×10^5 m³ yr⁻¹ is approximately 22% of the volume of the lake and is significant when compared to the total surface recharge volume of 4.8×10^5 m³ yr⁻¹ to the upper aquifer of the drainage area. There is a potential for contamination of the groundwater system through seepage from the lake from contaminants derived from aerial depositions.

Norrstrom, A. C. and G. Jacks (1996). *Water pathways and chemistry at the groundwater surface water interface to Lake Skjervatjern, Norway. Water Resources Research 32: 2221-2229.*

Macropore flow at the groundwater/surface water interface to a humic lake and the seepage fluxes through the lake bottom were measured, as well as was the groundwater chemistry. With a 100-fold difference in discharge from the lake, the seepage rates through the lake bottom differed by only 15%, indicating that macropores provided a major part of the inflow during high-flow events. Two larger macropores had flow rates between 0.3 and 0.7 L s⁻¹,

corresponding to velocities of 1-3 m min⁻¹). The flow rates of four smaller macropores were recorded to only 0.02-0.1 x 10⁻⁴ L s⁻¹). One of the larger macropores had water with high concentration of alkalinity, Ca and Si in dry periods, whereas during wet periods dissolved organic carbon was elevated and pH was depressed. This is an indication of different source areas depending on the rainfall rate. As the alkalinity/chloride ratios were lower in the macropores than in the peat water, acid groundwater seemed to find a shortcut directly into the lake.

LaBaugh, J. W., D. O. Rosenberry and T. C. Winter (1995). Groundwater contribution to the water and chemical budgets of Williams Lake, Minnesota, 1980-1991. Can. J. Fish. Aquat. Sci. J. Can. Sci. Halieut. Aquat. 52: 754-767.

Groundwater seepage was the largest annual flux of water into (58-76%) and out of (73-83%) Williams Lake during a 12-year study, during which the entire volume of the lake was replaced four times. The only other water fluxes to and from the lake, which has no surface-water inlet or outlet, were atmospheric precipitation and evaporation. Nearly all of the annual input of calcium, magnesium, sodium, potassium, chloride, sulfate, and silica was provided by groundwater. Although much of the calcium and most of the silica input was retained in the lake, this retention did not result in increased chemical mass in the lake water mass because biologically mediated removal of calcium and silica to the sediments equaled or exceeded loss by lake seepage to groundwater. Groundwater represented as much as one-half the annual hydrological input of phosphorus and nitrogen; the remainder was supplied by atmospheric precipitation. From about 70 to 90% of the annual input of phosphorus and nitrogen was retained in the lake. Although water and chemical fluxes varied from year to year, interaction of the lake with groundwater determined the hydrological and chemical characteristics of Williams Lake.

Donovan, J. J. and A. W. Rose (1994). Geochemical Evolution of Lacustrine Brines from Variable-Scale Groundwater Circulation. Journal of Hydrology 154: 35-62.

Evaporative groundwater-fed lakes in the glaciated North American Great Plains vary widely in chemistry. A contributing cause is chemical variability of source groundwater intercepted by specific lakes, caused in part by differing depths of groundwater circulation. Aqueous chemical characteristics of 61 lakes and 160 groundwater samples were compared for an area where such lakes are common in eastern Montana-western North Dakota. Results indicate that groundwater chemistry varies according to depth in a similar fashion within different aquifers. Lake water evaporation from initial groundwater solutions typical of three depths was geochemically modeled using PHRQPITZ, based on a Pitzer treatment of activities and equilibria. Results show that chemistry of most lake waters in the study area may correspond to that predicted from evaporation of shallow- and intermediate-depth groundwater, but not of deep groundwater as postulated in some previous investigations. Lakes in shallow surface depressions receive water primarily from shallow (local) groundwater flow; lakes located in deep or broad topographic depressions may additionally receive groundwater from deeper circulation. In the field area studied, relative dominance of anions (sulfate vs. carbonate) in brines is a signature for inferred depth of source. Also diagnostic is the suite of brine salts formed (Na- SO₄-Mg salts for shallow flow; these plus Na-CO₃ salts for intermediate depth flow). Such source signatures will vary from area to area according to depth variations in groundwater chemistry and in stratigraphy. Chemical evolution of lake water is a two-stage process, with a groundwater path (influenced by residence time, depth of circulation, aquifer mineralogy, and related factors) and a surface path (influenced by evaporation rates, lake-aquifer hydraulics, and lake geochemical reactions). Groundwater flow patterns may affect the former set of factors, thereby indirectly controlling lake water chemistry.

Hongve, D. (1999). Long-term variation in the stability of the meromictic lake Nordbytjernet caused by groundwater fluctuations. Nordic Hydrology 30: 21-38.

A zone with permanent anoxic conditions prevailed in the deep waters of Nord-bytjernet before 1978 due to a significant depth gradient in dissolved substances. High concentrations of manganese and bicarbonate in the deep waters were most important for the lake's stability. The electrolyte concentrations in the mixed layer increased between 1978 and 1991, wiping out the depth gradient. A subsequent study showed a major variation in the solute concentration in the most important surface tributary that depends on fluctuations in the elevation of the groundwater table. A rising groundwater table seems to enhance oxidation of iron sulphides and dissolution of carbonates. Increasing solute concentrations in the mixed

zone contributes to a weakening of the density gradient and reduced stability. Mineralised stream water may also intrude into the anoxic zone when the lake is not thermally stratified and cause precipitation of iron and manganese. Thus, a temporary rise of the groundwater table seems to be the reason why the lake changed from meromixis to holomixis. Lately the stream water concentrations have decreased and the lake has returned to meromixis. This periodic shift may be normal for this kind of lake.

5.2 Vidensbehov vedr. samspil grundvand – overfladevand: søer

Emne Sammenhængen mellem tilstanden i grundvand og i søer
Problemstilling Udvekslingen af grundvand mellem søer og grundvand kan påvirke tilstanden både i søvand og grundvand. Højt indhold af næringsstoffer i grundvandet, herunder især fosfor, kan påvirke vandkvaliteten i søer negativt, mens grundvandstilførsel med lavt næringsstofindhold kan have en positiv indflydelse på søtilstand, fordi der sker en fortynding af næringsrigt overfladevand. Udsivning af forurenede søvand til grundvandet kan evt. have en negativ indflydelse på grundvandets kvalitet. Ændret tilstrømning af grundvand kan også påvirke søers vanddybde og dermed have indflydelse på både fysisk-kemiske (fex. via resuspension) og biologiske (fex. udbredelsen af undervandsplanter) forhold.
Videnstatus Kendskabet til sammenhængen mellem tilstand i grundvand og søer i Danmark er ufuldstændigt. I de fleste søer dominerer overfladetilstrømningen og her har grundvandsudvekslingen kun ringe betydning for vandkvaliteten. Som gennemsnit for de danske overvågnings søer udgør grundvandsdelen omkring 10% af den hydrauliske tilførsel. I de søer, hvor grundvandsdelen udgør en betydelig del af den hydrauliske og næringsstofmæssige tilførsel er der imidlertid generelt en ringe viden om denne belastnings betydning for søernes tilstand. Analyser fra vandværksboringer viser at koncentrationen overstiger 0,15 mg P/l i ca. 20%, og dermed på et niveau, der kan have negativ betydning for vandkvaliteten i mange søer. Eventuelle sæsonmæssige variationer i udvekslingen mellem søvand og grundvand er ligeledes dårligt belyst. Betydningen udsivning af søvand til grundvand er ukendt.
Fremtidig vidensbehov Der er behov for et øget kendskab til grundvandets kvalitative og kvantitative betydning i de søer, hvor grundvand udgør en betydelig del af den hydrauliske belastning. I den forbindelse er der behov for udvikling af velegnede metoder. Der er også et behov for et øget kendskab vedr. den sæsonmæssige udveksling (indsivning/udsivning) af grundvand og søvand.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden Der bør gennemføres et detaljeret studie af grundvandets betydning i et antal søer, hvor det vides at grundvandsdelen udgør en betydelig andel af den samlede næringsstofftilførsel. Der bør foretages en mere grundig og landsdækkende fastlæggelse af næringsstofkoncentrationer i forskellige typer af grundvand og i forskellige typer af oplande. Der er behov for at undersøge i hvor høj grad landbruget bidrager til forhøjede koncentrationer af fosfor i grundvandet og i hvilket omfang dette påvirker søernes vandkvalitet.

