

Vidensstatus for sammenhængen mellem tilstanden i grundvand og overfladevand

Jens Christian Refsgaard, Hans Jørgen Henriksen, Bertel
Nilsson og Per Rasmussen
Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse

Brian Kronvang, Jens Skriver, Jens Peder Jensen, Tage
Dalsgaard, Martin Søndergaard og Carl Christian Hoffmann
Danmarks Miljøundersøgelser;

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Indhold

SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	5
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 INDLEDNING	12
1.1 FORMÅL	12
1.2 PROJEKTBACKGRUND OG ORGANISATION	12
1.3 DEFINITIONER AF GRUNDEVAND OG OVERFLADEVANDE	13
1.4 VANDRAMMEDIREKTIVETS KRAV TIL INTEGRERET FORVALTNING AF GRUNDEVAND OG OVERFLADEVANDE	14
1.5 FREMGANGSMÅDE VED UDARBEJDELSE AF NÆRVÆRENDE RAPPORT	14
1.6 RAPPORTENS INDHOLD - LÆSEVEJLEDNING	15
2 DET KVANTITATIVE SAMSPIL MELLEM GRUNDEVAND OG OVERFLADEVANDE	16
2.1 PROBLEMFORMULERING	16
2.1.1 <i>Hvad er den "upåvirkede tilstand"?</i>	16
2.1.2 <i>Vandkredsløbet og problemer med vandbalancen</i>	18
2.1.3 <i>Samspil mellem grundvand og overfladevand</i>	20
2.2 GRUNDEVANDETS BETYDNING FOR VANDMÆNGDERNE I VANDLØB	23
2.3 GRUNDEVANDETS BETYDNING FOR VANDMÆNGDERNE I VÅDOMRÅDER	24
2.4 GRUNDEVANDETS BETYDNING FOR VANDMÆNGDERNE I DAMME OG SØER	25
2.5 GRUNDEVANDETS BETYDNING FOR VANDMÆNGDERNE I DE KYSTNÆRE OMRÅDER	27
2.6 KONKLUSION	28
3 DET KVALITATIVE SAMSPIL MELLEM GRUNDEVAND OG OVERFLADEVANDE	30
3.1 PROBLEMFORMULERING	30
3.2 GRUNDEVANDETS BETYDNING FOR NÆRINGSSTOFFER I OVERFLADEVANDE	31
3.2.1 <i>Fosfor</i>	31
3.2.2 <i>Nitrat</i>	33
3.2.3 <i>Udvaskning af næringssalte til søer</i>	34
3.2.4 <i>Udvaskning af næringssalte til de marine områder</i>	34
3.2.5 <i>Næringsstoffjernelse i danske vådområder</i>	35
3.2.6 <i>Pesticidfjernelse i danske vådområder</i>	37
3.3 GRUNDEVANDETS BETYDNING FOR ORGANISK STOF, FORSURING OG OKKERBELASTNING I OVERFLADEVANDE	37
3.4 GRUNDEVANDETS BETYDNING FOR TUNGMETALLER OG PESTICIDER I OVERFLADEVANDE	38
3.4.1 <i>Tungmetaller</i>	38
3.4.2 <i>Pesticider</i>	39
3.5 KONKLUSION	43
4 DEN ØKOLOGISKE KVALITET I OVERFLADEVANDE I RELATION TIL GRUNDEVAND	46

4.1	PROBLEMFORMULERING	46
4.2	VANDLØB	47
4.2.1	<i>Økologiske effekter af vandets mængde</i>	47
4.2.2	<i>Økologiske effekter af næringsstoffer</i>	50
4.2.3	<i>Økologiske effekter af organisk stof, forurening og okkerbelastning</i>	51
4.2.4	<i>Økologiske effekter af pesticider og tungmetaller</i>	51
4.2.5	<i>Samlet vurdering af betydningen af de hydrologiske forhold</i>	52
4.3	SØER	53
4.3.1	<i>Økologisk effekt af grundvandets indhold af næringsstoffer og pesticider</i>	53
4.3.2	<i>Eksempler fra danske søer</i>	53
4.4	MARINE OMRÅDER	58
4.5	KONKLUSION	59
5	VÆRKTØJER TIL ANALYSE AF SAMSPIL MELLEM GRUNDTVAND OG OVERFLADEVAND	60
5.1	HYDROLOGISKE MODELLER	60
5.1.1	<i>Problemformulering</i>	60
5.1.2	<i>Retningslinier for modellering</i>	60
5.1.3	<i>Eksisterende modelværktøjer</i>	61
5.1.4	<i>Modellering af vekselvirkning mellem grundvand og overfladevand (kvantitet)</i>	61
5.1.5	<i>Modellering af det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand</i>	63
5.1.6	<i>Sammenfatning om hydrologiske modeller</i>	64
5.2	HABITATMODELLER	64
5.2.1	<i>Problemformulering</i>	64
5.2.2	<i>Hvad menes der med fysiske habitater og hvorfor er de vigtige ?</i>	65
5.2.3	<i>Hvorfor er der behov for at kortlægge fysiske habitater ?</i>	66
5.2.4	<i>Skalaens betydning</i>	66
5.2.5	<i>Metoder og index benyttet til kortlægning af fysiske habitater</i>	66
5.2.6	<i>Statistiske metoder og modeller benyttet til kobling af biota og fysiske habitater</i>	68
5.2.7	<i>Hydrauliske modeller koblet til præferencekurver for biota</i>	70
5.2.8	<i>Sammenfatning og idekatalog</i>	71
6	SAMMENFATNING OM VIDENSTATUS OG PRIORITERING AF VIDENSBEHOV	74
7	IDEKATALOG	76
7.1	HØJ PRIORITET (A)	76
	<i>Emne</i>	76
7.2	MELLEM PRIORITET (B)	81
7.3	LAV PRIORITET (C)	84
8	REFERENCER	89
	BILAG A	99

Sammenfatning og konklusioner

Grundvandsressourcerne og overfladevandene har i Danmark i det store og hele hidtil været forvaltet hver for sig. Det har eksempelvis givet sig udslag i at der findes separate monitoringsprogrammer for overfladevand og grundvand, ligesom grundvands- og ferskvandsområderne organisatorisk typisk ligger i forskellige afdelinger/institutioner både hos staten og i de amtskommunale forvaltninger.

Denne opdelte måde at forvalte vandressourcerne på bliver kraftigt udfordret af det nye Vandrammedirektiv, som direkte foreskriver at overfladevand og grundvand fremover skal forvaltes i sammenhæng. Ifølge Vandrammedirektivet skal der eksempelvis etableres kriterier for vurdering af tilstanden i grundvand og overfladevand, således at det kan vurderes, hvordan grundvandet, kvantitativt og kvalitativt, påvirker overfladevandenes kvantitative og kvalitative tilstand samt økologiske forhold.

Formålet med nærværende rapport er at give et samlet overblik over kendskabet til grundvandets påvirkning af overfladevand under danske forhold samt at identificere eventuelle videnshuller om sammenhængen mellem grundvand og overfladevand i relation til implementeringen af Vandrammedirektivet.

I Vandrammedirektivet er grundvandet defineret som alt vand beliggende under det øvre (frie) grundvandsspejl. Det vil sige at drænvand er defineret som grundvand. Eftersom vi næsten ikke har egentlig afstrømning på overfladejorden under danske forhold (de vigtigste undtagelser er visse vådområder og situationer med frossen jord), vil det i praksis sige, at næsten alt det vand der løber i danske vandløb stammer fra grundvandet. Tilsvarende vil overfladevand omfatte alt det vand vi kan se, fra den opstrøms kilde til kystzonen, hvor grænsen er defineret som en afstand fra kysten på 1 sømil. Dette indebærer at mange fjorde og indre danske farvande er inkluderet. Endvidere bemærkes det at vandet i den umættede zone, som er beliggende mellem jordoverfladen og det øverste grundvandsspejl, ifølge Vandrammedirektivet er defineret som overfladevand.

Samspillet mellem grundvand og overfladevand er essentiel for hele vandmiljøet. Som eksempler herpå kan nævnes:

- Det er velkendt at grundvandsoppumpning resulterer i tilsvarende mindre vand i vandløbene, og at eksempelvis den intensive vandindvinding i hovedstadsområdet er årsagen til at mange sjællandske vandløb i tørre somre over lange strækninger primært indeholder vand fra spildevandsanlæg. Reduceret vandføring påvirker vandløbsøkologien. Specielt vil en reduktion af sommervandføringen resultere i dårligere forhold for fisk og bunddyr. Den administrative praksis for hvorledes dette tages i betragtning er ikke ensartet og der mangler egentlige værktøjer til effektvurderinger.
- Samspillet mellem grundvand og overfladevand er specielt vigtigt i de ånære områder. Nøglen til forståelsen af de komplicerede strømnings- og stofomsætningsprocesser, der sker i denne zone, er en karakterisering af et område i rumlige elementer, som har ensartede geokemiske og hydrologiske karakteristika. De få undersøgelser der tidligere er lavet viser at geomorfologien og strømningsbilledet på lille skala er meget kompleks.

- En sammenligning af vandkvaliteten i grundvandet med økotoksikologiske grænseværdier viser at der for visse tungmetaller og miljøfremmede stoffers vedkommende er så høje koncentrationer at grundvandskvaliteten nogle steder vil være afgørende for overfladevandets kvalitet.
- Grundvandets indhold af fosfor kan for nogle søers vedkommende være af afgørende betydning for fosfortilførslen og dermed de pågældende søers økologiske tilstand.

Vi har generelt en omfattende viden og et særdeles godt datagrundlag i Danmark på vandområdet, specielt hvis vi sammenligner os med mange andre lande. Men megen af den viden er fremkommet gennem de sidste par årtier via forsknings- og monitoringsprogrammer der har haft et andet sigte end de målsætninger der skal forfølges i Vandrammedirektivet. Der har således i den periode ikke været forskningsprogrammer der fokuserer direkte på samspillet mellem grundvand og overfladevand og de forskellige monitoringsprogrammer har været sektoropdelt, dvs. et program for grundvand, et andet program for rodzoneprocesserne, et tredje program for overfladevand osv. Derfor har vi i Danmark på nogle områder stået næsten stille forskningsmæssigt, mens der er foregået interessante og relevante aktiviteter internationalt.

Som følge heraf er der blevet identificeret en række områder hvor der er vidensbehov, såfremt vi skal kunne gennemføre Vandrammedirektivet med en faglig standard der svarer til state-of-the-art. De enkelte emner, hvor der er behov for yderligere viden enten i form af grundlæggende ny viden og/eller i form af nye værktøjer til operationel administrativ brug er beskrevet på skemaform i form af et idekatalog i selve rapporten.

Projektgruppen har foretaget en prioritering af de mange emner. Prioriteringen har resulteret i at emnerne er inddelt i tre kategorier: Høj (A), Mellem (B) og Lav (C). Der er ikke foretaget nogen prioritering indenfor de tre respektive kategorier. En oversigt over vidensbehovene og deres prioritering er givet i nedenstående tabel.

Prioritet	Idekatalog nr.	Emne	Kommentar
Høj prioritet (A)			
Høj	A-1	Metodik til undersøgelse af ådales geologi, geokemi og vandløbsmorfologi med henblik på at kunne beskrive vand- og stofomsætning i de ånære områder	Ny grundlæggende viden og værktøjer. Afgørende for grundvand-overflade interaktionen i ånære områder, både mht. vandmængder og -kvalitet
Høj	A-2	Undersøgelser af strømningsveje i overfladevand/grundvand på mark- og oplands skala	Ny grundlæggende viden og værktøjer. Afgørende for beskrivelse af stoffers skæbne fra rodzone til vandløb
Høj	A-3	Fastsættelse af mindste acceptable vandføring til sikring af god økologisk kvalitet (og målsætningsopfyldelse).	Udvikling af værktøj(er) til fastsættelse af acceptabel minimums vandføring
Høj	A-4	Sammenhængen mellem tilstanden i grundvand og i søer	Metoder og prognoseværktøjer til at vurdere effekten af ændrede grundvandsforhold i søer med stor grundvandsudveksling.
Høj	A-5	Definition af upåvirket tilstand	Fastsættelse af metodik for administrativ praksis
Mellem prioritet (B)			
Mellem	B-1	Koncentration af forurenende stoffer i grundvand og påvirkningen på overfladevand set i relation til referenceværdier	Undersøgelse af grundvandets eventuelle påvirkning af vandkvalitet i overfladevand.
Mellem	B-2	Kvantificering af vandbalancen og fordampningen på oplandsbasis	Også af afgørende betydning for grundvandszonering, beregning af grundvandsdannelse og nitratudvaskning
Mellem	B-3	Fosfor	Fastlæggelse af referencetilstand og viden om betydning af grundvand som transportvej til overfladevand.
Lav prioritet (C)			
Lav	C-1	Kvantificering af grundvandsafstrømningens regionale og tidslige variation	Værktøjsudvikling
Lav	C-2	Hydrokemisk og biologisk samspil mellem vandløb og ådale	Viden om samspillet mellem oversvømmelse, vegetation, grundvand og sedimentation af næringsstoffer i ådale.
Lav	C-3	Næringsstofudstrømning med grundvand til marine områder	Ny grundlæggende viden og nye værktøjer. Nødvendigt for at bestemme næringsstoffernes transport til marine områder
Lav	C-4	Parameterisering og usikkerhedsvurdering ved hydrologiske modeller af stor kompleksitet	Også af stor generel betydning, fx. ved grundvandszonering og regional modellering.
Lav	C-5	Referencetilstand og habitatmodeller i vandløb	Udvikling af dynamiske habitatmodeller som værktøj til forudsigelse af bl.a.. økologisk referencetilstand.

Summary and conclusions

Until now the groundwater and surface water resources in Denmark have been managed separately. As a consequence of this two different monitoring programs for groundwater and surface water exist today, and also the administration of groundwater and surface water is placed in different departments/institutions at the state level as well as at the county level.

This separate way of managing the water resources will be strongly challenged by the new EU Water Framework Directive, which states that surface water and groundwater in the future shall be managed as an integrated resource. The Water Framework Directive states among other things that criteria's for evaluation of the state of groundwater and surface water shall be established with the purpose of assessing how groundwater influences the quantity and quality of surface water as well as the ecological conditions of the surface water.

The objective of this report is to present an overview of the knowledge concerning the groundwater influence on surface water under Danish conditions, and to identify possible areas where the actual knowledge about the interaction between groundwater and surface water is insufficient in relation to the implementation of the Water Framework Directive.

In the Water Framework Directive groundwater is defined as all water found under the upper (unconfined) water table. This means that drainage water is defined as groundwater. Under Danish conditions surface runoff is very limited, with the exceptions of some specific wetlands and situations with frozen soils, so for practical purposes nearly all water in Danish streams originate from groundwater. Correspondingly surface water includes all water which can be seen from the spring to the coastal zone. At the coastal zone the outer boundary is defined as a distance of 1 nautical mile from the coast. This means that many Danish fjords and coastal waters are included under the Water Framework Directive. It should be noticed that water in the unsaturated zone, between the ground surface and the upper water table, is defined as surface water according to the Water Framework Directive.

The interaction between groundwater and surface water is essential for the entire aquatic environment. Some examples are here to be mentioned:

- It is well known that groundwater abstraction results in reduced stream water flow, and that e.g. the intensive groundwater abstraction around Copenhagen has caused that many streams in the area mainly conduct wastewater during dry summers. Reduced water flow affects the ecology of the streams. Especially will a reduction of the summer stream flow result in poorer conditions for fish and macro-invertebrates. The administrative practice today where these aspects are taken into consideration is not standardized, and there is a lack of appropriate tools for effect assessments.
- The interaction between groundwater and surface is of special importance in areas near the streams, the hyporheic zone. The key to the understanding of the complex processes of flow and solute transport in this zone, is a characterisation of an area in spatial elements that have similar geochemical and hydrological characteristics. The few existing

studies show that the geomorphology and the flow pattern on the small scale is very complex.

- A comparison of the water quality in groundwater with the ecotoxicological standards shows that for certain heavy metals and organic micro pollutants the concentrations in groundwater are so high that in some places the groundwater quality will determine the surface water quality.
- The phosphorus content in the groundwater might in some areas be of decisive importance for the phosphorus transport to lakes, and thus the ecological state of the lakes.

In general in Denmark we have a comprehensive knowledge and data collection within the field of hydrology and aquatic environment, especially compared to many other countries. But a lot of the knowledge we have achieved in the last decades has been during research and monitoring programmes with objectives other than the ones to be pursued within the Water Framework Directive. During the last decades there have been no research programmes focusing directly on the interaction between groundwater and surface water, and the different monitoring programmes have been split into traditional sectors with distinct monitoring programmes for groundwater, for root zone processes, for surface water etc. So in Denmark we have had very little research activities in some areas, while internationally there have been conducted interesting and relevant research activities.

As a result of this there have been identified a number of areas where there is a need for increasing the knowledge to be able to fulfil the Water Framework Directive with a technical and scientific level corresponding to the state-of-the-art. The different subjects, where there is a need for further knowledge either as new basic knowledge or as new tool for operational management, are described in a 'catalogue of ideas' in the main report.

The project group has made a priority list of the many subjects, and divided the subjects into three categories of importance: High (A), Medium (B), and Low (C). There has not been made any priority within the three categories. A summary of the needs of knowledge and their priority are found in the following table.

Priority	Catalogue no.	Subject	Comment
High Priority (A)			
High	A-1	Methods for investigation of geology, geochemistry and stream morphology of the hyporheic zone with the purpose of describing water and solute transport in the hyporheic zone.	New basic knowledge and tools. Decisive for groundwater - surface water interaction in hyporheic zone, for quantity as well as quality.
High	A-2	Investigations of flow patterns in the hyporheic zone at field and catchment scale.	New basic knowledge and tools. Decisive for the description of the fate of substances from root zone to stream.
High	A-3	Determination of minimum acceptable stream flow to maintain good ecological quality (and fulfil objectives)	Development of tool(s) for estimation of minimum acceptable stream flow.
High	A-4	The relation between the environmental state of groundwater and lakes.	Methods and prognosis tools for evaluating the effect of changing groundwater conditions on lakes with large groundwater exchange.
High	A-5	Definition of unaffected state.	Development of methods for administrative procedures.
Medium Priority (B)			
Medium	B-1	Concentration of polluting substances in groundwater and the effect on surface water compared to ecological standards.	Investigation of the potential influence of groundwater on the surface water quality.
Medium	B-2	Quantification of the water balance and evaporation on catchment scale.	Of decisive importance for the groundwater protection (zonation), estimation of groundwater recharge and nitrate leaching.
Medium	B-3	Phosphorus.	Estimation of reference state and knowledge of importance of groundwater as a transport media to surface water.
Low Priority (C)			
Low	C-1	Quantification of regional variations in groundwater flow in space and time.	Development of tools.
Low	C-2	Hydrochemical and biological interaction between stream and hyporheic zone.	Knowledge about interaction between floods, vegetation, groundwater and sedimentation of nutrients in streams, wetlands and the hyporheic zone.
Low	C-3	Transport of nutrients with groundwater to marine areas.	New basic knowledge and tools. Essential for estimation of the transport of nutrients to marine areas.
Low	C-4	Determination of parameters and uncertainties for hydrological models of large complexity.	Of large general importance, e.g. for groundwater protection (zonation) and regional hydrological modelling.
Low	C-5	State of reference and habitat models for streams.	Development of transient habitat models as tools for prediction of e.g. ecological state of reference.

1 Indledning

1.1 Formål

Formålet med nærværende rapport er at give et samlet overblik over kendskabet til grundvandets påvirkning af overfladevand under danske forhold samt at identificere eventuelle videnshuller om sammenhængen mellem grundvand og overfladevand i relation til implementeringen af Vandrammedirektivet.

1.2 Projektbaggrund og organisation

Miljøstyrelsens Spildevands- og Vandforsyningskontor udbød den 1. marts 2001 et projekt om 'Sammenhængen mellem Tilstanden i Grundvand og Overfladevande'. Projektet er et led i den faglige forberedelse af implementeringen af Vandrammedirektivet i dansk lovgivning. Ifølge Vandrammedirektivet skal der bl.a. etableres kriterier for vurdering af tilstanden i grundvand og overfladevand, således at det kan vurderes, hvordan grundvandet, kvantitativt og kvalitativt, påvirker overfladevandenes kvantitet, kvalitet og økologiske tilstand. Formålet med nærværende projekt er, jf. udbudsmaterialet, at etablere et samlet overblik over kendskabet til grundvandets påvirkning af overfladevand under danske forhold, herunder at påpege de eventuelle videnshuller der måtte være med hensyn til fastsættelse af kvalitetskriterier i grundvand i relation overfladevandene.

Projektet gennemføres af GEUS og DMU i perioden juni til december 2001. Projektgruppen består af:

- Jens Christian Refsgaard, GEUS (projektleder)
- Brian Kronvang, DMU (viceprojektleder, samspil mellem stoffer i grundvand og vandløb)
- Jens Skriver, DMU (biologiske forhold i vandløb)
- Per Rasmussen, GEUS (sekretær, grundvandskvalitet)
- Hans Jørgen Henriksen, GEUS (den fysiske interaktion mellem grundvand og overfladevand)
- Jens Peder Jensen, DMU (samspil mellem grundvand og søer)
- Martin Søndergaard, DMU (samspil mellem grundvand og søer)
- Bertel Nilsson, GEUS (vådområders hydrogeologi, interaktion mellem grundvand og overfladevand)
- Tage Dalsgaard, DMU (samspil mellem grundvand og kystnære områder)
- Carl Christian Hoffmann (ånære områders hydrologi)

Projektet har en følgegruppe bestående af:

- Martin Skriver, Miljøstyrelsen (formand)
- Christian Ammitsøe, Miljøstyrelsen
- Jan Steinbring Jensen, Skov- og Naturstyrelsen
- Jens Christian Refsgaard, GEUS
- Jens Skriver, DMU
- Per Rasmussen, GEUS

Til at bidrage til kvalitetssikringen indgår følgende panel af eksterne eksperter:

- Steen Christensen, Århus Universitet
- Kaj Sand-Jensen, Københavns Universitet
- Morten Sørensen, Fyns Amt
- Peter Wiberg-Larsen, Fyns Amt

1.3 Definitioner af grundvand og overfladevande

Grundvand og overfladevand er defineret på følgende måder i Vandrammedirektivet:

- "Overfladevand defineres som indvand, bortset fra grundvand; overgangsvande og kystvande. Når det drejer sig om kemisk tilstand omfatter overfladevand tillige territorialfarvande¹". Overfladevand omfatter således i praksis alt det vand vi kan se, fra den opstrøms kilde til kystzonen, hvor grænsen er defineret som en afstand fra kysten på 1 sømil. Det vil i praksis sige at mange fjorde og indre danske farvande er inkluderet.
- "Grundvand defineres som alle former for vand under jordoverfladen i mættede zoner og i direkte kontakt med jordoverfladen eller undergrunden²". Eftersom vi næsten ikke har egentlig afstrømning på overfladejorden (de vigtigste undtagelser er visse vådområder og situationer med frossen jord) under danske forhold, vil det i praksis sige, at næsten alt det vand der løber i danske vandløb og således ender i overfladevand stammer fra grundvandet. Eksempelvis er drænvand defineret som grundvand, eftersom drænvand er afdræning af vand i den mættede zone ved det øverste grundvandsspejl.

Denne definition på grundvand, inklusiv at drænvand defineres som grundvand, er helt i overensstemmelse med de gængse definitioner i den videnskabelige verden. Endvidere kan det nævnes at vandet i den umættede zone, som er beliggende mellem jordoverfladen og det øverste grundvandsspejl, ifølge Vandrammedirektivet er defineret som overfladevand. Definitionerne er illustreret på Fig. 1.1.

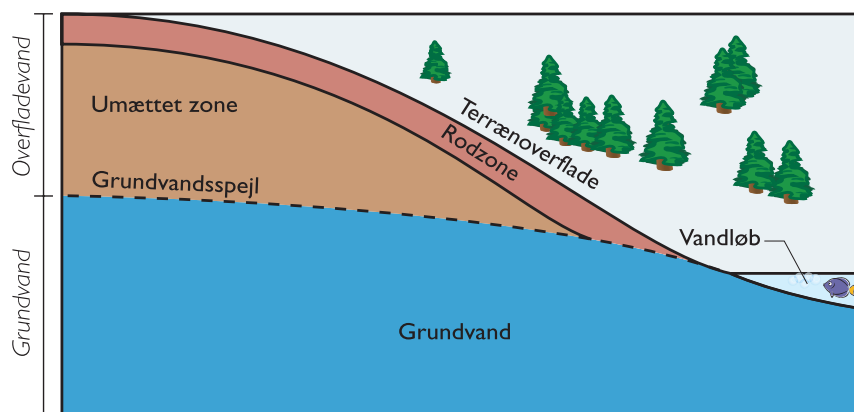


Fig. 1.1 Illustration af definitionerne på grundvand og overfladevand (modificeret fra Winter et al., 1998).

¹ Vandrammedirektivet, artikel 2, stk 1

² Vandrammedirektivet, artikel 2, stk 2

1.4 Vandrammedirektivets krav til integreret forvaltning af grundvand og overfladevand

Vandrammedirektivets overordnede formål er, at fastlægge en ramme for beskyttelse af vandløb og søer, overgangsvande, kystvande og grundvand. Et hovedprincip i direktivet er, at vandressourceforvaltningen skal ske ud fra helhedsbetragtninger (holistisk), hvor vandkvantitet, vandkvalitet, økologiske forhold og økonomiske forhold vurderes samlet, og hvor de forskellige forekomster af vand skal ses i sammenhæng. Der står eksempelvis følgende i direktivets indledende afsnit:

- "Ud fra miljøbeskyttelsesformål er der behov for en større integration af kvalitative og kvantitative aspekter af både overfladevand og grundvand, idet der skal tages hensyn til de naturlige strømningsveje i det hydrologiske kredsløb³".
- "Den kvantitative status af grundvand kan have indflydelse på den økologiske kvalitet af overfladevand og terrestriske økosystemer som er i forbindelse med grundvandet⁴".
- "Overfladevand og grundvand er i princippet fornyelige naturressourcer; især opgaven med at sikre en god tilstand for grundvandet kræver tidlig handling og stabil langtidsplanlægning af beskyttelsesforanstaltninger, på grund af den naturlige tidsforsinkelse ved grundvandsdannelse og – fornyelse. Sådanne tidsforsinkelser for forbedring skal tages i betragtning når der etableres tiltag til at opnå en god grundvandstilstand og vende enhver signifikant og konstant opadgående tendens i koncentrationen af et grundvandsforurenende stof⁵".

I forbindelse med implementeringen af Vandrammedirektivet er et afgørende forhold for klassificeringen af grundvandet, hvordan grundvandsstanden og -kvaliteten påvirker tilstanden i overfladevandene. Med den anvendte (brede) definition på grundvand stammer hovedparten af vandet i vandløbene fra det øvre grundvand, der som regel er ungt og derfor med hensyn til grundvandskvalitet er stærkt påvirket såvel af forureningskilder, fx. affaldsdepoter, som af landbrugspraksis.

Grundvandsressourcerne og overfladevandene har i Danmark i stort omfang hidtil været forvaltet hver for sig. Med principperne i Vandrammedirektivet bliver der således øget fokus på sammenhængen i forvaltningen af overfladevand og grundvand.

1.5 Fremgangsmåde ved udarbejdelse af nærværende rapport

Projektarbejdet har haft følgende indhold:

- På baggrund af indgående kendskab til danske forhold og ved studier af Vandrammedirektivet har projektgruppen udarbejdet problemformuleringer for fire delområder, hvor Vandrammedirektivet stiller krav som kræver betydelig indsats under danske forhold: (1) det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand, (2) det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand, (3) den økologiske kvalitet i overfladevand i relation til grundvand og (4) værktøjer for analyse af samspil mellem grundvand og overfladevand.
- Der er foretaget litteratursøgning indenfor en række delemler af relevans i forhold til problemformuleringerne. Der er søgt på internationale

³ Vandrammedirektivet, afsnit (34) i indledningen

⁴ Vandrammedirektivet, afsnit (20) i indledningen

⁵ Vandrammedirektivet, afsnit (28) i indledningen

videnskabelige artikler publiceret i perioderne: 1987-90, 1991-95 og 1996-2001. Litteratursøgningen er foregået på den database, som generelt er mest udbredt og tilsammen dækker de berørte fagområder, nemlig Web of Science.

- Den internationale litteratursøgning er suppleret med relevante danske studier som projektgruppen har kendskab til.
- På den baggrund er der udarbejdet beskrivelser af vidensstatus og tilhørende videnshuller for de fire delområder.
- De identificerede videnshuller er herefter blevet beskrevet og prioriteret.

Kvalitetssikringsgruppen har været inddraget midtvejs på en heldags-workshop, hvor projektgruppen fremlagde vidensstatus (skriftligt og mundtligt) til diskussion og kritik.

1.6 Rapportens indhold - læsevejledning

Kapitlerne 3-6 indeholder projektgruppens resume af vidensstatus på de fire delområder:

- det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand (kapitel 3),
- det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand (kapitel 4),
- den økologiske kvalitet i overfladevand i relation til grundvand (kapitel 5) og
- værktøjer for analyse af samspil mellem grundvand og overfladevand (kapitel 6).

Et resume af de enkelte litteratursøgningerne, som ligger til grund for kapitlerne 3-6 kan findes i Appendix A. Flere detaljer, herunder referencelisterne fra litteratursøgningen, er beskrevet i en række baggrundsnotater, som ikke er en del af selve rapporten. Baggrundsnotaterne kan downloades på <http://www.geus.dk>

Kapitel 7 giver en begrundelse for den foretagne prioritering af vidensbehovene, mens de enkelte vidensbehov er beskrevet i form af et idekatalog i Kapitel 8.

2 Det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand

Hans Jørgen Henriksen, Jens Peder Jensen og Tage Dalsgaard

2.1 Problemformulering

2.1.1 Hvad er den "upåvirkede tilstand"?

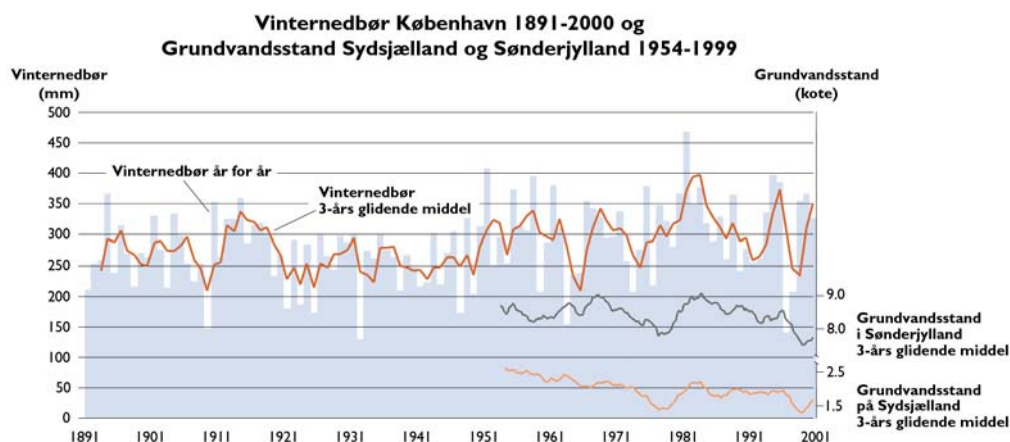
Tilstand for overfladevand skal efter Vandrammedirektivet vurderes med udgangspunkt i den "upåvirkede tilstand". De hydrologiske forhold vi kender i Danmark i dag er kulturbestemte. Således førte landbrugets dræningsinteresser op gennem 1900-tallet til en regulering af mange vandløb og rørlægning af vandløbsstrækninger. Vådområdernes antal og udstrækning blev derved reduceret. I de senere år har miljøvenlig vedligeholdelse af vandløb, bidraget til en forøget fysisk variation og ændret vandspejlsdynamik i ånære arealer. Samtidig er påbegyndt en genetablering af vådområder. Der er så småt iværksat en storstilet skovrejsning. Urbanisering (befæstede og kloakerede områder, håndtering af spildevand og regnvand) medfører yderligere påvirkning af de fysiske forhold. Endelig giver vandmiljøindsatsplaner anledning til ændret arealanvendelse.

En historisk betinget definition kunne evt. vælges, fx. defineret som den tilstand, vi havde fx. da Jyske Lov blev gennemført (1241), eller da Danske Lov blev vedtaget (1683). Eller man kunne anvende tidspunktet omkring den første grundlov i Danmark (1849) som referenceramme. Problemet med historisk defineret upåvirket tilstand og valg af referenceramme er åbenlyst. Nedenstående tabel (2.1) er blot tænkt som et diskussionsoplæg.

Tabel 2.1 Upåvirket tilstand – hvad skal vi forstå ved dette begreb?

Tilstandsvariabel	Nuværende tilstand	Upåvirket tilstand
1. Klima	Nuværende klimaforhold: nedbør, temperatur, havniveau mv. fx. 1991-2000 eller 1971-2000)	Historisk tilstand fx. fra 1241 frem til 1849).
2. Kulturtekniske forhold vandløb, dræn, spildevand mv.)	Nuværende forhold	Historisk tilstand (fx. 1241, 1683 eller 1849)
3. Arealanvendelse	Arealanvendelse under nuværende klimatiske- og socioøkonomiske betingelser	Historisk tilstand (fx. 1241, 1683 eller 1849)
4. Grundvandsstand	Grundvandstanden som produktet af nuværende klimatiske-, kulturtekniske-, arealanvendelses- og vandindvindingsforhold	Simulering af grundvandstand "uden oppumpning", og med øvrige forhold som i nuværende tilstand
5. Afstrømning	Afstrømningen som produktet af nuværende klimatiske-, kulturtekniske-, arealanvendelses- og vandindvindingsforhold	Simulering af afstrømning "uden oppumpning" og med øvrige forhold som i nuværende tilstand
6. Grundvandsdannelse	Grundvandsdannelse under nuværende forhold (1-5)	Simulering af grundvandsdannelse "uden oppumpning", og med øvrige forhold som i nuværende tilstand

De langperiodiske fluktuationer i fx. nedbøren har imidlertid stor betydning for grundvandstand, grundvandsdannelse og afstrømning. Man er derfor nødt til at inddrage denne viden direkte, når man forholder sig til eksempelvis vurdering af konsekvenser af vandindvinding for grundvand og overfladevand, eller i forbindelse med målinger eller simuleringer af grundvandsstanden, afstrømningen eller tilstanden i vådområder i mere begrænsede tidsperioder (se figur 2.1).

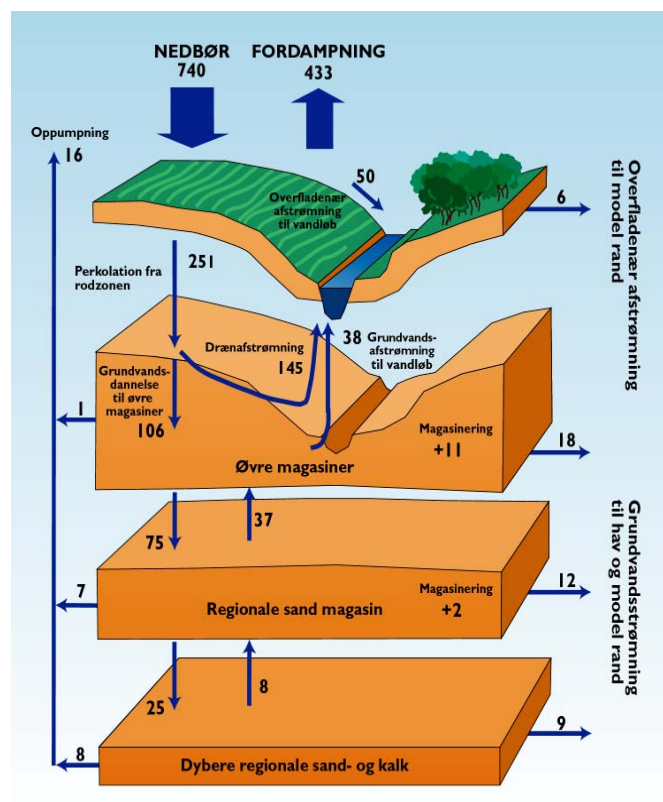
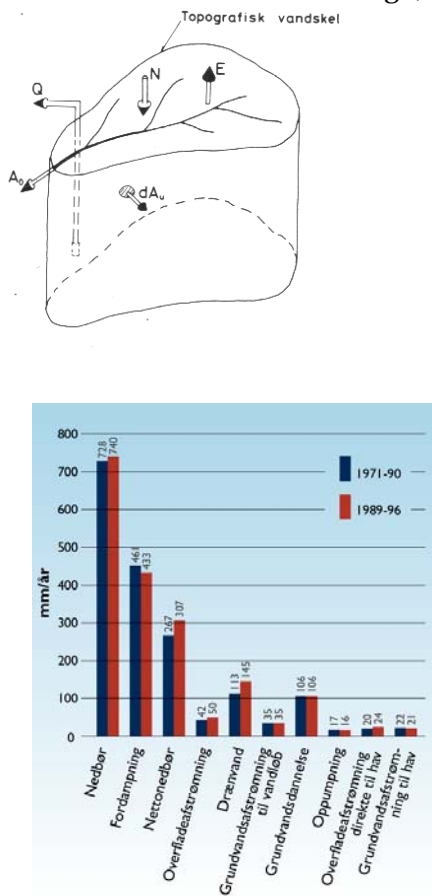


Figur 2.1 Ved vurdering af, om vandindvinding overstiger den tilgængelige grundvandsressource, må der tages højde for klimabetinget variation i nedbør- og grundvandstand

2.1.2 Vandkredsløbet og problemer med vandbalancen

En størrelsesorden for de enkelte led i vandbalancen fx. nedbør (N), aktuel fordamning (E), nettonedbør ($N-E$), afstrømning (A_0), vandindvinding (Q) og underjordisk afstrømning (A_u) kan fås fra hydrologiske modeller (fx. DK-model Fyn). I princippet har overfladisk afstrømning begrænset betydning i Danmark, bortset fra i byområder. Normalt anslår man denne komponent til få % af nedbøren, dvs. maksimalt 10-25 mm/år i områder uden befæstede arealer. Drænaforstrømningen er i figur 2.2 vurderet til 145 mm/år for Fyn. Grundvandsafstrømningen til vandløb er vurderet til ca. 38 mm/år. Sidstnævnte to komponenter er pr. definition (jf. Vandrammedirektivet) "grundvandskomponenter". Vandindvindingen udgør til sammenligning for Fyn ca. 16 mm/år. Den underjordiske afstrømning til havet udgør typisk ca. 10 mm/år, men er generelt dårligt kendt. I vandbalancen for Fyn ses en noget større underjordisk afstrømning, hvilket har modeltekniske årsager, idet randbetingelsen her er modelranden (fastholdt tryk) og ikke den egentlige afstrømning til havet. Dvs. en stor del af afstrømningen til randen (20-30 mm/pr) må antages at ske til drænsystemer og vandløb beliggende udenfor modelranden i kystzonen.

Tallene for Fyn giver et bud på størrelsesordenen af den overfladenære grundvandsafstrømning gennem kunstige drænsystemer (markdræn, bygningsdræn mv. evt. vand som infiltrerer i ledningssystemer gennem utætte samlinger mv.), men omfatter desuden grundvandsafstrømning til naturlige "drænsystemer" (øvre permeable jordlag, grøfter mv.). Den samlede drænvandsmængde fx. fra markdræn er bestemt af grundvandsspejlet beliggenhed, ledningssystemets tilstand samt af jordlagenes art. På vandløbsnære arealer er jordbunden sædvanligvis heterogen med mange tynde lag af sand, silt, ler og gytje, som har betydning for hvor udvekslingen nærmere foregår. Der er foretaget målinger på drænafstrømning fx. i forbindelse med Suså undersøgelsen, nitratforskning (NPO), landovervågningen (LOOP) og desuden i forbindelse med overvågning af pesticidudvaskning (VAP).



Figur 2.2 Eksempel på vandbalance for Fyn beregnet med DK-model (Henriksen et al., 1997).

Normalt modelleres drænafstrømning meget forenklet, idet der hverken findes datagrundlag eller brugbare metoder til parameterisering af fx. en rumligt distribueret dræntidskonstant. Der er måske behov for at kunne karakterisere drænafstrømningen i forskellige komponenter fx. med udgangspunkt i "opholdstid" i systemet (drænvand er en "integrator" for såvel de hurtige afstrømningskomponenter med meget kort opholdstid til den langsommere, mere konstante grundvandsafstrømning fra dybere magasiner, afhængigt af den fysiske placering af de enkelte drænstreng, marker mv.).

Der er i Danmark foretaget hydrologiske studier for en række oplande: Suså, Karup Å, Tude Å, Als, Århus, Odense mm. (se fx. Rasmussen et al., 1995). Disse undersøgelser er typisk gennemført for 10-20 år siden. Det var tilsyneladende muligt at få overensstemmelse i vandbalancen dengang, evt.

med visse ændringer fx. i antagelser vedr. potentiel fordampning. Nyere undersøgelser baseret på nye klimadata fra DMI viser at vandbalancen ikke længere "går op" for danske forhold (Refsgaard et al., 2001). Det vil sige at der tilsyneladende ikke længere er konsistens mellem de officielle estimater for nedbør, fordampning og afstrømning.

Der er dermed opstået et behov for en samlet forståelse af vandbalancen. Det må kræves at såvel punktmålinger som interpolerede gridværdier på forskellig skala (punkt, mark, opland, grid: $10 \times 10 \text{ km}^2$ og $40 \times 40 \text{ km}^2$) er konsistente og pålidelige. Dette er vigtigt, såfremt det fortsat skal være muligt at foretage kalibrering og validering af hydrologiske modeller. Hvis ikke klimainputtet er realistisk vil de opstillede nøjagtighedskrav ikke kunne opfyldes. Forkerte klimainput vil typisk medføre parameterværdier som ikke er beliggende indenfor realistiske grænser. Modeller er nødvendige hvis der skal foretages analyser af samspillet mellem grundvand og overfladevand med kvantificering af betydningen af menneskeskabte påvirkninger. Det er derfor af stor vigtighed og relevans at få kigget nærmere på problemet med vandbalancen, således at der kan etableres det nødvendige vidensgrundlag for tilvejebringelsen af et landsdækkende og konsistent datagrundlag til brug for vandbalancevurderinger på punkt-, mark-, oplands- og gridskala.

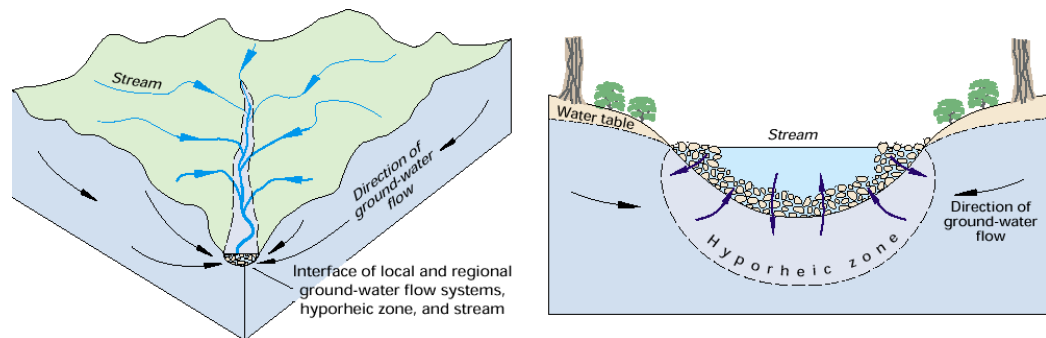
Årsagerne til inkonsistensen i vandbalancen kan skyldes en række forhold fx. nedbørskorrektion, beregning af potentiel fordampning (valg af metode og betydning af vegetationsforhold fx. skov, vådområder, bestemte afgrøder og dyrkningsforhold mv.), interpolation fra punktværdier til gridværdier eller distribuering af fx. $40 \times 40 \text{ km}^2$ gridværdier på $1 \times 1 \text{ km}^2$ gridværdier i den hydrologiske model. Der synes desuden at være et mere specifikt behov for at opbygge viden omkring fx. hvordan man bestemmer vandbalancen for skovområder.

2.1.3 Samspil mellem grundvand og overfladevand

Grundvand bidrager til afstrømning og overfladevand via en række forskellige komponenter:

- udveksling mellem grundvand og overfladisk afstrømning ("seepage flow")
- udveksling mellem grundvand og dræn (såvel naturlige som menneskeskabte drænsystemer)
- udveksling mellem grundvand og vandløb ("aquifer-river/darcy flow")

Vandudvekslingen mellem grundvand og overfladevand afhænger af 3 forhold: 1) gradient mellem trykniveau i grundvand og overfladevand (fx. vandstand, drænniveau eller topografi), 2) kontaktzonens udstrækning ("hyphorheic zone") og 3) hydraulisk ledningsevne af denne zone

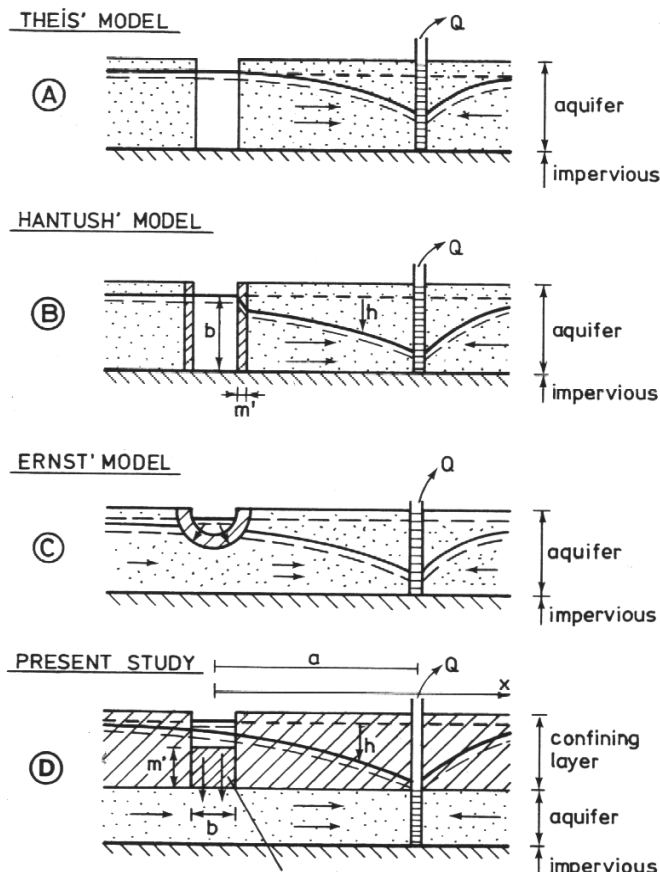


Figur 2.3 Udveksling mellem grundvand og overfladevand afhænger af trykniveaugradient, kontaktzonens udstrækning og den hydrauliske ledningsevne af denne zone (hyporheic zone). (Woessner, 2000; Calver, 2001; Winther et al., 1998)

Udvekslingen mellem grundvand og overfladevand afhænger ikke kun af de lokale forhold omkring vandløbet men er i væsentlig grad afhængig af regionale forhold vedrørende grundvandsdannelse, vandindvinding og hydrauliske parametre for grundvandssystemet som helhed. Udvekslingen mellem grundvand og vandløb er dermed afhængige af såvel regionale som lokale geologiske forhold omkring vandløb, søer eller i kystzonen.

En grundvandsindvinding vil påvirke (reducere) vandføringen i vandløbet. Størrelsen og den tidlige udvikling i denne påvirkning vil være afhængig af de geologiske forhold i de ånære områder samt af boringens placering i forhold til vandløbssystemet (Sophocleous, 2000). Der findes såvel analytiske som numeriske modeller til at beregne vandløbspåvirkninger (Stang, 1982; Hunt, 1999), se Figur 2.4. Nyere undersøgelser (Nyholm, 2000) antyder at de analytiske metoder ikke er så nøjagtige som tre-dimensionale numeriske modeller til at beregne vandføringspåvirkninger.

Et vidensproblem i forbindelse med beregninger af vandløbspåvirkninger består i dels at vurdere dels en korrekt "konceptuel model" for typen på udveksling/påvirkning, og dels at skønne den såkaldte "lækagekoefficient" (hydrauliske ledningsevne divideret med fx. tykkelsen af "modstandslaget"). Et forsøg på at klassificere et ånært område ud fra geologiske og morfologiske kriterier med den målsætning at forklare den stedlige variation af lækagekoefficienterne i Haller Å er for tiden emne for et PhD studie på Aarhus Universitet (Langhoff, 2001). Der har i forbindelse med DK-modellen været forsøgt klassifikation ud fra morfologiske og geologiske indgangsvinkler på større skala, men hidtil uden større succes med hensyn til at identificere en generelt brugbar metodik (Dahl et al., 1997).



Figur 2.4 Eksempler på forskellige geologiske situationer for kontakt mellem vandløb og grundvandssystem (Stang, 1982)

Samspil mellem grundvand og overfladevand for forskellige dele af systemerne findes beskrevet i udenlandsk litteratur:

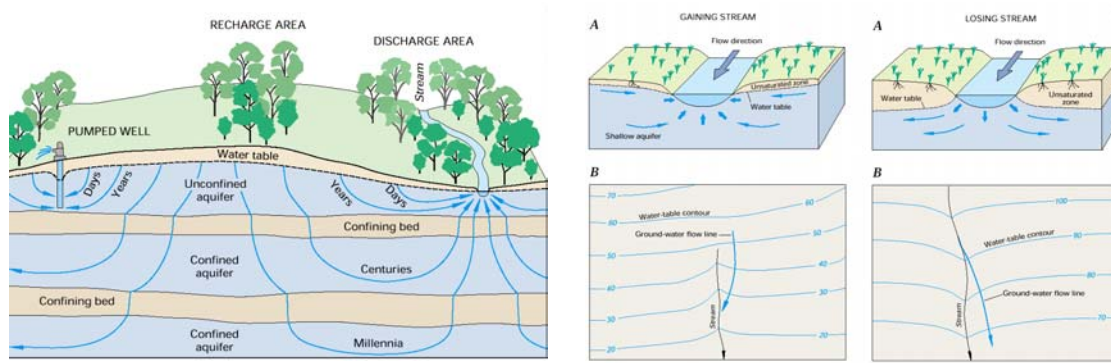
- Øvre dele af vandløbssystemerne (Atkinson, 1978; Cey et al., 1998; Morrice et al., 1997).
- 1. ordens bassiner (Barthurst and Cooley, 1995; Bates et al., 2000; Calver, 2001).
- Nedre dele af vandløbssystemerne (Montgomery and Dietrich, 1995).
- Søer og kystnære områder (Cherkayer and Carlson, 1997; Guyonnet, 1991; Heathcote and Herbert, 1996).

Et særligt problem er forbundet med den dynamiske karakter af vandløbsbundens (evt. søer eller kystnære områder) hydrauliske egenskaber. Permeabilitetsforhold er således ikke nødvendigvis en konstant størrelse. Permeabiliteten kan derimod afhænge af kontaktzonens udstrækning (i tid og sted; Woessner, 2000). Undersøgelser fra udlandet viser (Younger et al., 1993), at gradienten mellem grundvandstrykniveau og vandstand i overfladevand, også kan spille en rolle for permeabilitetsforholdene (clogging ved udsivning fra overfladevand til grundvand med væsentligt lavere hydraulisk ledningsevne, hvorimod stor udstrømning af grundvand kan løfte fine partikler væk fra bunden, så der opretholdes en god kontakt).

Der foregår i vandløbet (eller i søer og kystnære områder) desuden omlejring af bundsediment i tid, som kan have en betydning for de mere lokale ud- og indstrømningsforhold, herunder "bank storage". Forståelse af disse forhold forudsætter mere lokale proces- og feltstudier ved forskellige geologiske forhold, og lokaliseret ved de forskellige hydrologiske regimer

(øvre, mellem og nedre strækninger eller for søer og kystnære områder bredzone og større afstande fra bredzone), med bestemmelse af masseflux og strømningssveje, ved inddragelse af vandkemi, datering, tracere, temperatur mv. Vi savner generelt i dag en tilstrækkelig viden til at vi kan "linke" distribueringen af forskellige parametre (fx. vandløbslækage, drænkostant osv.) til geologiske og morfologiske kriterier, sådan som vi er i stand til at gøre det fx. for hydraulisk ledningsevne i grundvandssystemet (hydrofacies).

2.2 Grundvandets betydning for vandmængderne i vandløb



Figur 2.5 Udveksling mellem grundvand og vandløb afhænger af gradientforhold. Disse kan påvirkes af vandindvindning (Winther et al., 1998).

Grundvandsafstrømningen til vandløbene foregår via vandførende, løse sedimenter samt i revner og sprækker i tætte bjergarter. For en vanddråbe kan der være lang vej ned til det nedre, primære grundvandsmagasin. Selvom knap halvdelen af nedbøren fordamper fra rodzonen, fortsætter den del der ikke fordamper, drevet af tyngdekraften gennem umættet zone til grundvandsspejlet (se figur 2.5). Når vandet når grundvandsspejlet bestemmer grundvandets strømningssveje den videre skæbne. Vanddråben kan i princippet havne i en indvindingsboring, tage turen gennem de øvre eller dybere magasiner eller hurtigt afstrømme til et dræn og herfra til vandløb. Grundvandets strømningssveje er et produkt af de hydrauliske forhold i grundvandssystemet, topografi, nedsivningens størrelse, placering af vandløb, dræn og vandindvindning (randbetingelser). Alt efter de nærmere geologiske forhold og "randbetingelser" kan opholdstiden i grundvandet variere fra få dage eller måneder, til år, århundreder eller endog årtusinder.

Den afstrømning vi på en bestemt dag kan måle i et vandløbsprofil eller udtage med en "vandprøve", er derfor en "integration" af vanddråber med mange forskellige aldre og herkomster (afhængigt af den samlede afstrømnings strømningssvej denne dag). Det samme gælder, blot i mindre skala, for afstrømningen fra et drænoiland. Langt størstedelen af de vanddråber som når vandløbene, har altså været "en kortere eller længere tur" i grundvandet. Kun vanddråbens alder og evt. andre "arealrelaterede eller geokemiske fingeraftryk", rummer en potentiel nøgle til "afkodning" af en bestemt vanddråbes strømningssvej, opblanding og opholdstid gennem systemet. Typisk må en nærmere forståelse af strømningssveje til vandløb baseres på placering af veldefinerede "overvågningsfiltre" i forskellig dybe i grundvandssystemet og i forskellige afstande fra vandløbet, med en udstrækning som også omfatter de grundvandsdannende områder.

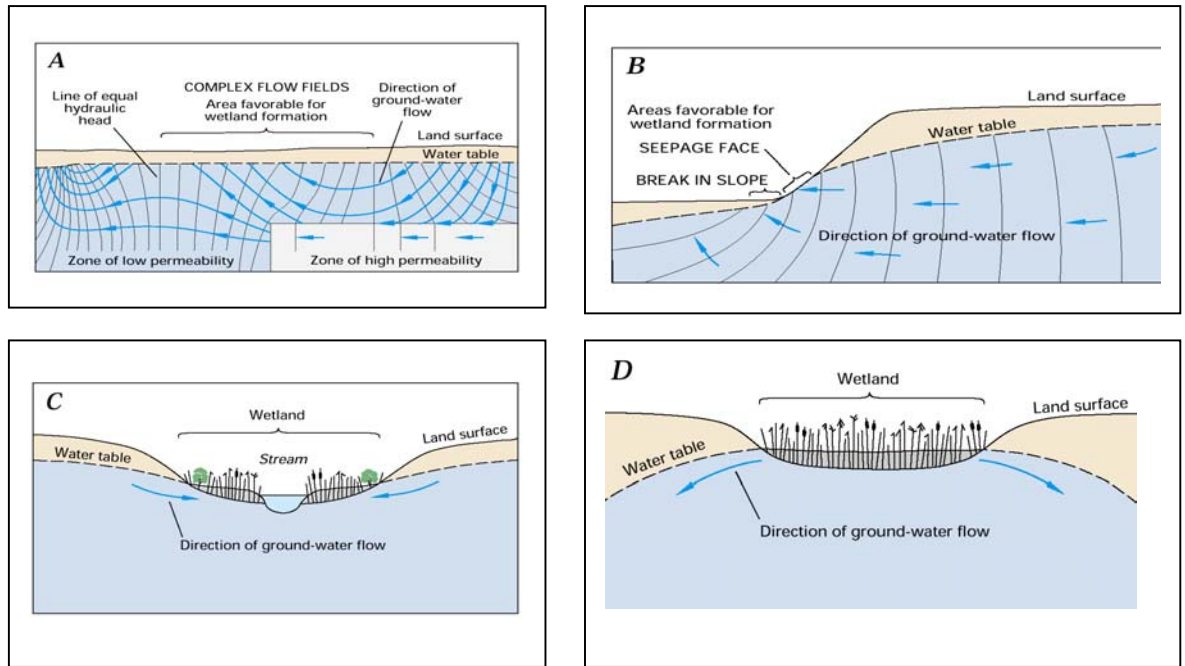
Under østdanske forhold, i områder med moræneler (typisk med drænsystemer), tager en betydelig fraktion af nettonedbøren blot en "hurtig tur" til det øverste grundvand, og afstrømmer herfra via dræn til vandløb med en relativ kort opholdstid i grundvandet. Under vestdanske forhold, i områder med sand, passerer derimod en mere betydelig fraktion gennem de lidt dybere grundvandsmagasiner til vandløb samtidig med at opholdstiden i grundvandet er meget større. Disse forhold har også stor betydning for afstrømningens årsrytme, idet drænastrømningen primært foregår i vinterhalvåret, hvorimod grundvandsafstrømningen (fra det lidt dybere grundvand) er mere jævnt fordelt over året. Til karakterisering af grundvandsafstrømningen (fra dybere magasiner) har man i mange år i Danmark anvendt medianminimum, dvs. den årsminimumsafstrømning man ca. hvert andet år når ned på typisk i sommerperioden. Medianminimum måles typisk i et opland med en målekampagne i juni-august efter en længere tør periode, i et stort antal målepunkter indenfor det samme opland, ved såkaldte synkronmålinger. Den forskel der er ved målestationerne i forhold til det målte medianminimum for en given referenceperiode (fx. 1971-90) korrigeres i forbindelse med bearbejdningen af medianminimumsskøn.

Medianminimum anvendes i dag i større eller mindre grad fra amt til amt til en række administrative forhold (bl.a. tilladelser til spildevandsudledning, dambrugsproduktion, vandindvinding mv.). I forbindelse med Vandrammedirektivet er der imidlertid behov for en mere tidssvarende metode til karakterisering af såvel minimumsafstrømning som dynamik i afstrømningsforløbet, idet ikke kun vandføringens størrelse men også dens variation og varigheden af forskellige hændelser, har betydning for de biologiske forhold i og omkring vandløbet.

Inputtet til bedre indikatorer i stedet for medianminimum til karakterisering af minimumsafstrømning og dynamik må komme som et resultat af erfaringer med habitatmodeller i Danmark. Der er i dag et væsentligt tættere net af faste målestationer med kontinuert registrering og tilmed en landsdækkende hydrologisk model, samt modeller på mindre skala. Der er behov for at fastlægge administrativt egnede metoder med et mere tidssvarende snit, baseret på såvel tidsseriedata som hydrologiske modeller.

2.3 Grundvandets betydning for vandmængderne i vådområder

Vådområder har lighedspunkter med såvel vandløb som søer (se afsnit 2.4). De kan både modtage og afgive vand til og fra grundvand (Gerla, 1999). De kan være primært grundvandsfødte (fx. ved beliggenhed på skrånninger hvor der udstrømmer grundvand), men kan også være nedbørsfødte (se figur 2.6).



Figur 2.6 Forskellige typer udveksling mellem grundvand og vådområder (Winther et al., 1998)

I kystnære områder kan vådområder have mere komplekse vandbalanceforhold, på grund af periodiske vandspejlsvariationer (tidevand, oversvømmelser).

Den temporære udsivning fra overfladevand til grundvand (i kortvarige) perioder med højt vandspejl i recipienten (stor afstrømning), og efterfølgende indsvingning, når vandstanden igen falder i fx. vandløbet, kalder man "bank storage" (Kondolf et al., 1987; Sjödin et al., 2001). I relation til vådområder, genereres ved bank storage et "lokalt" vandkredsløb i de vandløbsnære arealer, hvor stofferne følger med rundt. Disse arealer kan have stor betydning for stofomsætning og transport (fx. som følge af denitrifikation i iltfrie miljøer). I relation til Vandrammedirektivet har bank storage indirekte betydning for vandstrømningens volumen og dynamik, samt for bredzonens struktur, men også betydning for nedstrøms bundforhold (struktur og substans). Der synes at være et stort vidensbehov omkring beskrivelse af dette dynamiske lokale vandkredsløb, med en direkte link til de ofte meget heterogene geologiske forhold i de ånære arealer.

2.4 Grundvandets betydning for vandmængderne i damme og søer

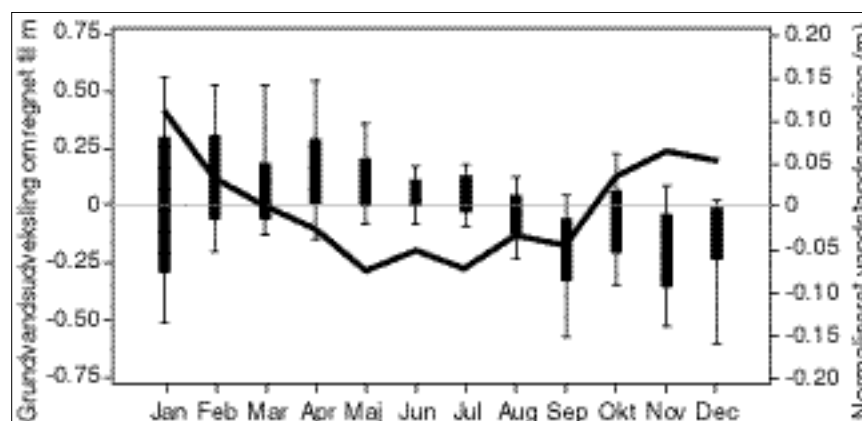
Søer udveksler med overfladevand som en af 3 hovedtyper, enten 1) afdræner de grundvandsmagasinet over hele søarealet, eller de 2) delvist afdræner og delvis afgiver vand til grundvandssystemet, som følge af en gennemstrømning med grundvand, og endelig 3) kan de over hele søarealet afgive vand til grundvandssystemet. Søbundssedimentet vil generelt have større volumener af organiske bundsedimenter, som kan være impermeable og dermed begrænsende for udvekslingen for dele af søarealet. Samtidig kan bølger ved bredzonen fjerne fine sedimenter så kontakten her er god (Winther et al., 1998)

I de fleste tilfælde udgør grundvandsdelen kun en mindre del af den samlede hydrauliske tilførsel til de danske søer. En opgørelse over 21 overvågnings søer, der især repræsenterer de større danske søer, viste at grundvandsdelen som

gennemsnit udgjorde omkring 10% af den samlede vandbalance (Jensen et al., 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. I mindre søer uden egentlig overfladetilløb og hvor der er en god kontakt mellem sø og grundvandsmagasin udgør grundvandet formentlig mange steder en væsentlig del af den samlede tilførsel og vil dermed være af stor betydning i relation til for eksempel ændret grundvandsstand. Omfanget og betydningen i disse søer er dog ukendt.

Tabel 2.2. 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.

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



Figur 2.7 Nettogrundvandsudvekslingen ($Q_{\text{indsiv}} - Q_{\text{udsiv}}$) korrigeret for søareal i perioden 1989-94 for 21 overvågningssøer. Kasserne angiver 25%, og 75% kvartiler, mens strengen angiver 10% og 90% fraktiler. Linien angiver medianværdien for vandstanden gennem sæsonen (fra Jensen et al., 1995). Bemærk forskellig akse-skala.

Samspillet mellem grundvand og søvand er ikke kun et spørgsmål om grundvandsindsivning. I nogle tilfælde sker der som nævnt ovenfor 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 indsvivning (Fig. 2.7). 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 udtømning til søen, mens der i efteråret, hvor øget afstrømning betyder at søerne fyldes hurtigere op end grundvandsmagasinerne, sker en transport modsatte vej. Som eksempel kan nævnes Arreskov Sø på Fyn (Fyns amt, 1995), hvor beregninger viser, at der kan være store forskelle fra år til år i grundvandsudvekslingen (Jensen et al., 1995).

Vidensbehovet for udveksling mellem grundvand og søer, falder indenfor samme problemkreds, som problemet med bank-storage og betydningen af fx. variationen i hydraulisk ledningsevne af søbund og de dybere jordlag, som har betydning for den nærmere vandudveksling mellem grundvandsmagasinet og sø. Der er behov for at vurdere egnede metodikker (punktmålinger/tracere/boringer/geofysiske metoder mv.) som kan bidrage til en kortlægning af de geologiske og hydrauliske forhold i og under søbunden (Cherkauer and Carlson, 1997).

2.5 Grundvandets betydning for vandmængderne i de kystnære områder

Direkte måling af vandtransporten fra grundvandet til det marine miljø kan være meget arbejdskrævende og en række forskellige indirekte teknikker er blevet anvendt. I Laholms bugten i Sverige er teknikker til identifikation af udsivende ferskt grundvand til kystvande blevet afprøvet (Vanek and Lee 1991). Teknikkerne er baseret på måling af porevandets ledningsevne og på direkte måling af indsvivningsraten med "seepage meter". Teknikkerne tillader kortlægning af indsvivende ferskvand med fra meter til kilometer opløsning.

En anden teknik er blevet anvendt til estimering af grundvandstilførslen til Waquoit Bay Massachusetts, en lukket bugt ca. 1,2 km bred og 3,3 km lang med en gennemsnitlig dybde på 1 m (Cambareri and Eichner 1998). Her er oplandets grundvandsmagasiner og -flow blevet karakteriseret med et stort antal piezometre og boringer. På baggrund heraf samt estimater af grundvandsmagasinerne "recharge" rate er grundvandets flow til bugten modelleret. Det blev fundet at den direkte grundvandstilførsel udgjorde 34%, mens grundvand tilført via floder udgjorde 55% af bugtens samlede vandtilførsel.

I studiet fra Waquoit Bay (Cambareri and Eichner 1998) dækker betegnelsen grundvand udelukkende ferskvand. Imidlertid bliver termen "grundvand" også brugt til at betegne saltholdigt vand, der strømmer ud af havbunden. I kystvande med relativt permeable sedimenter og bølgepåvirkning medfører bølgepåvirkningen en nedadrettet strøm af saltvand i bølgeslagszonen (Li et al. 1999). Efter at have passeret gennem sedimentet på sin vej væk fra stranden strømmer vandet igen ud af havbunden. Undervejs kan havvandet opblandes med udstrømmende ferskvand og er ferskvandsstrømmen relativt lille kan denne maskeres af havvands-cirkulationen (Simmons 1992), (Li et al. 1999). I situationer, hvor denne cirkulation er betydende, er det vigtigt at kende den, da den ellers kan medføre store overestimerer af den ferske grundvandsudstrømning. Således vurderede Moore (Moore 1996) at grundvandsudsvivning udgjorde 40% af flodernes tilførsel til South Atlantic Bight, en ca. 300 km lang kyststrækning i South Carolina, USA. Det viste sig, at Moores måleteknik (^{226}Ra berigelse af kystvandet) må have inkluderet det recirkulerende havvand i estimatet for grundvandsudstrømningen. Beregninger baseret på grundvandsmagasinerne "recharge" rate fandt at den ferske grundvandstilførsel til denne kyststrækning kun udgjorde 1,7% af den totale ferskvandstilstrømning (Younger 1996). For at estimere den ferske grundvandsudstrømning er det altså nødvendigt både at kende volumen og salinitet af det udstrømmende vand.

2.6 Konklusion

Der er med udgangspunkt i Vandrammedirektivet og udenlandsk litteratur og den eksisterende danske viden, vurderet en række behov for videnopbygning:

- Bedre forståelse af vandbalancen (specielt fordampning), og ændringer i udvekslingen mellem grundvand og overfladevand, på oplandsniveau, som følge af menneskeskabte ændringer (bl.a. klima og indvindinger).
- Bedre forståelse af strømningsveje og opholdstider, fra infiltration til udstrømning i vandløb, søer, vådområder og kystnære områder (herunder link til geologi og konsekvenser af indvinding).
- Revurdering af administrative værktøj; der er behov for indikatorer som kan inddrage tidlige variationer i afstrømning og minimumsafstrømninger (i stedet for medianminimum)
- Temporære ændringer i vandstand i fx. vandløb, søer, vådområder og kystnære områder har stor betydning for bank storage og etableringen af lokale vandkredsløb med vidtrækkende konsekvenser for stoftransport og -omsætning; der er behov for en nærmere vurdering af egnede metodikker baseret på punktmålinger, trancere, boringer, geofysik mv., som kan bidrage til kortlægning af geologiske og hydrauliske forhold i bundsediment og underliggende jordlag.
- Bedre kvantificering af grundvandsudstrømning direkte til kystnære områder.
- Bedre kendskab og forståelse af grundvandets betydning i de mindre søer, hvor der ikke er egentlig overfladetilløb.

3 Det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand

Bertel Nilsson, Tage Dalsgaard, Jens Peder Jensen, Brian Kronvang, Carl Christian Hoffmann og Per Rasmussen

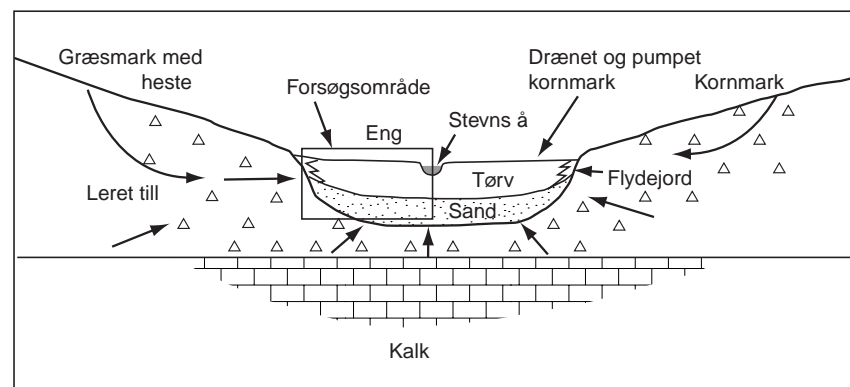
3.1 Problemformulering

Indtil nu har grundvandskvaliteten været vurderet ud fra det kriterium at grundvandet skulle kunne anvendes til drikkevand. Med Vandrammedirektivet er der også sat fokus på at udstrømmende grundvand skal have en sådan kvalitet at det er med til at sikre en "god tilstand" i overfladevandsrecipienterne. Derfor er det vigtigt at kende ikke blot de udstrømmende vandmængder, men også massefluxen af de vigtigste stoffer.

Grundvandet udgør i varierende omfang en del af de danske søer, vandløb, fjorde og marine områders hydrauliske system og vandkvalitetsmæssige belastning, og grundvandet kan som sådan potentielt påvirke overfladevandets tilstand. Under danske forhold er den dominerende strømningsretning fra grundvandszonen og ud i overfladevandene. Strømning i modsat retning kan dog forekomme, fx. i forbindelse med grundvandsindvinding og i tørre perioder af året, se fx. afsnit 2.4.

Det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand kan i Vandrammedirektiv terminologi struktureres efter hovedtyper af overfladevand: vandløb, vådområder/ånære arealer, søer og marine områder. Udover denne opdeling er der foretaget en inddeling efter stoftype-emnerne: 1) Næringsstoffer (nitrat og fosfat) og 2) Tungmetaller og miljøfremmede stoffer, dvs. pesticider og organiske mikroforureninger.

Et centralt fysisk område er nærområdet eller overgangszonen mellem grundvandet og overfladevandet (det ånære område eller den hyporheiske zone).



Figur 3.1 Eksempel på geologi og vandets formodede strømningsveje i et morænelandskab på Stevns (Hoffmann et al., 1993).

I denne overgangszone vil der ofte være fysiske, kemiske og/eller biologiske

forhold som er forskellige fra forholdene i såvel grundvandszonen som i de frie overfladevande. Denne overgangszone vil ofte have karakter af en 'reaktor', hvor et stofindhold i grundvandszonen vil blive ændret (nedbrudt eller tilbageholdt) før det når overfladevandet (Fig. 3.1).

De tre fundamentale mekanismer der styrer stofomsætningen i denne reaktor er bestemt af:

- Specifikke karakteristika af de kemiske stoffer der er opløst i vandet.
- Den tid som vandet er i kontakt med sedimenterne, dvs. vandets og stoffernes opholdstid i det ånære område.
- Det geologiske materiale i zonen, som i høj grad er bestemmende for parametre for sorption, nedbrydning, med videre samt det kemiske miljø (pH, redoxforhold, mv.).

Samspelet mellem de geologiske aflejringer (sedimentære facies) og den lokale hydrologi er således vigtig. Såfremt det er muligt at karakterisere et område i rumlige elementer, som har ensartede geokemiske og hydrologiske karakteristika (hydrokemiske facies), er der således et godt grundlag for at beskrive stofomsætningen og skønne de tilhørende parameterværdier.

I forbindelse med amternes udpegning af områder med særlige drikkevandsinteresser (OSD) har et vigtigt udpegningskriterium været så vidt mulig at undgå arealer der indeholdt kendte punktkilder der måtte være en trussel mod grundvandsressourcen på det pågældende sted. Naturligt nok har disse punktkilder aftagende interesse i amterne, så længe de er beliggende udenfor amternes OSD men i forhold til Vandrammedirektivet vurderes punktkilderne at skulle have en vis opmærksomhed, da den forhåndenværende viden om miljøfremmede stoffers negative effekt på vandkvaliteten i vådområder, ånære arealer og søer vurderes at være mangelfuld.

3.2 Grundvandets betydning for næringsstoffer i overfladevande

3.2.1 Fosfor

Fosforindholdet i grundvand er meget styret af redoxforholdene. Således er fosforindholdet lavt i øvre grundvand (ilt- og nitrat zonen), højere i jern/sulfat redoxzonen og højest i metan redoxzonen (tabel 3.1). I jordvand og drænvand er koncentrationen af opløst fosfat generelt også lavt (tabel 3.2). Koncentrationen af opløst fosfat er også lavt i de mindre vandløb som afvander skov- og naturområder, men betydeligt højere i mindre vandløb som afvander dyrkede områder (tabel 3.1).

Tabel 3.1 Koncentration af opløst orthofosfat og partikelbundet fosfor (total P minus PO₄-P) i grundvand, jordvand, drænvand og vandløb. Data om jordvand, drænvand og vandløb er fra det danske overvågningsprogram (NOVA). Intervallet for jordvand og drænvand er gennemsnit for stationsmarker indenfor LOOP-oplandene i NOVA uden enkeltmarker med høje fosforkoncentrationer i jordvand. I vandløb er vist mediankoncentrationen over perioden 1989-2000 og som interval 10 og 90% percentiler.

	Dybere grundvand (sulfat/metan zone)	Jordvand i oplande (n=6)	Drænvand i oplande (n=2)	Små vandløb i skov- og naturområder (n=7)	Små vandløb i dyrkede områder (n=38)
$\mu\text{g P l}^{-1}$					
Opløst fosfat	30-130 ¹⁾	10-17	18-22	21 (4-35)	51 (17-134)
Partikelbundet fosfor			11-41	31 (13-81)	60 (37-103)

¹⁾Total fosfor, 25 og 75% percentiler

De små vandløb i dyrkede områder, vist i tabel 3.1, modtager ikke fosfor fra punktkilder, men alene fra spredt bebyggelse. Umiddelbart ser det ud til at dybere grundvand i nogle områder kunne være en vigtig kilde til fosfor i overfladevand. Grundvandsområder med højt fosforindhold er anaerobt og forforet vil her typisk være af naturlig forekomst og som sådan give et vigtigt bidrag til den naturlige baseline for miljøtilstanden i fx. søer.

En fosforbalance på oplandsniveau opstillet på baggrund af målte fosforkoncentrationer i grundvand, jordvand og drænvand og en modelbaseret viden om betydningen af de enkelte afstrømningskomponenter viser da også, at der mangler at blive redegjort for langt hovedparten af det opløste fosfat og partikelbundne fosfor der transporteres i vandløb (tabel 3.2).

Tabel 3.2 Beregnet tilførsel af opløst fosfat og partikelbundet fosfor via de enkelte transportveje til vandløb sammenholdt med det målte oplandstab beregnet på baggrund af intensive målinger i mindre vandløb der afvander dyrkede oplande uden større punktkilder. Beregning af tilførsel til vandløb via grundvand og drænvand er foretaget ud fra en opsplitning af hydrografen i afstrømningskomponenter (NAM-model) og anvendelse af de målte koncentrationer af fosfor i dybere grundvand, øvre grundvand og drænvand indenfor Landovervågningsoplande.

	Dybere grundvand	Øvre grundvand	Drænvand	Beregnet tilført vandløb	Målt transport i vandløb
	$\text{kg P ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$				
Opløst fosfat	0,018-0,019	0,008-0,013	0,017	0,026-0,059	0,20
Partikelbundet fosfor	0		0,021	0,021	0,33

Langt den største del af det partikelbundne fosfor stammer fra erosionskilder (Kronvang et al., 2000; Laubel et al., 2000). Der er tale om jorderosion kombineret med overfladisk afstrømning, brinkerosion i vandløbet og andre ude fra kommende input i form af planterester, blade, mv. (se fx. Jacobsen og Kronvang, 2000). Strømning af vand fra overfladen gennem markroporer og sprækker til dræn har også vist sig at kunne tilføre vandløb store mængder partikelbundet fosfor (Grant et al., 1996). Kilder til opløst fosfat er spredt bebyggelse og en nedvaskning af opløst fosfat på marker der har en høj fosforstatus. Der er således på enkelte marker i Landovervågningsoplandene målt meget høje fosforudvaskninger efter tilførsel af store mængder fosfor i husdyrgødning eller fra jorde med et højt fosfortal (Kronvang et al., 2001). Det er væsentligt at kunne udpege disse kritiske kildeområder for erosionstab og nedvaskningstab af fosfor med henblik på at reducere fosfortabet til vandmiljøet.

Indholdet af fosfor i grundvandet er i de fleste tilfælde forholdsvis ringe, men overstiger dog 0,15 mg P/l i omkring 17 % af filtrene fra grundvandsovervågningsområderne og omkring 20 % af de indberettede analyser fra vandværksboringer (GEUS, 2000). De høje koncentrationer fra vandværksboringer kan ofte henføres til boringer, der har været i kontakt med yngre marine aflejringer. 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 P/l.

Med det kendskab, der eksisterer vedrørende sammenhæng mellem søers fosforindhold, der ofte er det begrænsende næringsstof i søer, og vandkvaliteten betyder dette, at forøget grundvandstilførsel fra områder med

de høje fosforkoncentrationer kan have en negativt effekt på søens tilstand, hvis der i øvrigt ikke tilføres høje koncentrationer fra andre kilder. Den generelle sammenhæng mellem søers indhold af fosfor og vandkvalitet viser, at de helt klarvandede søer først ses når fosforindholdet er meget lavt. Så længe fosforindholdet er under 0,02-0,03 mg P/l vil søerne ofte være klarvandede med flere meters sigtddybde, men i takt med at fosforindholdet stiger ændres søernes vandkvalitet. Ved fosforindhold over 0,1 mg P/l vil næsten alle søer være uklare og med en sigtddybde under en meter.

I vandløb har fosfor derimod ikke særlig stor betydning for de økologiske forhold fordi der er en meget stor transport gennem systemerne. Dog er fosfor begrænsende for væksten af bundlevende alger i foråret. I fjorde og kystvande har kvælstof oftest været begrænsende for algevæksten undtagen i korte perioder af foråret i nogle fjorde. Det har ændret sig i de sidste 10 år. Den store reduktion af fosforudledninger fra byer og industri har nu medført at fosfor er blevet mere begrænsende for algevækst i fjorde og kystvande. Denne succeshistorie kan blive modvirket hvis fosforudledningen fra andre kilder – herunder især landbruget – stiger i de kommende år.

3.2.2 Nitrat

Grundvandets indhold af nitrat

Nitratindholdet i grundvand er som for fosfor styret af redoxforholdene. Modsat fosfor er nitratindholdet højest i det øvre grundvand (ilt- og nitrat redoxzonen) mens det er lavere i jern/sulfat redoxzonen og slet ikke optræder i den metanogene zone. I rodzonevand i dyrket opland (også benævnt jordvand) udviser kvælstofindholdet meget betydelige variationer i tid og sted. Gennemsnitskoncentrationer fra de fem LOOP områder er angivet i Tabel 3.3. Heraf fremgår det at rodzonevands kvælstofindhold er relativt højt i både ler- og sandjordsoplande, mens koncentrationen af kvælstof der vaskes ud af rodzonen til drænvandet er en anelse lavere. Fra rodzonen og ned gennem det øvre grundvand (1,5-5,0 m) er konstateret et tydeligt aftagende indhold af kvælstof i lerjordsoplande, mens der fra sandjordsoplande er et noget mere moderat fald. Vandløb på lerjorde indeholder noget højere kvælstofkoncentrationer end vandløb i sandjordsoplande gør. Hovedparten af det tilførte kvælstof til vandløbene på lerjorde er tilledt via markernes drænsystemer, der ofte afledes direkte i vandløbene uden at gennemstrømme enge/vådområder, hvor der sker denitrifikation, inden vandet når ud i vandløbet. Det lavere kvælstofindhold i vandløb i sandjordsoplande skyldes at afstrømningen disse vandløb sker gennem væsentlig dybere jordlag, hvor der sker en større reduktion af kvælstofindholdet i grundvandet, samt at vandet i sandjordsområder i højere grad gennemstrømmer enge/vådområder.

Tabel 3.3 Gennemsnitskoncentrationer over 10 år af kvælstof i rodzonevand, drænvand, øvre grundvand og vandløb i hhv. tre lerede og to sandede grundvandsoplande. Alle data stammer fra det danske landovervågningsprogram LOOP.

	Rodzonevand	Drænvand	Øvre grundvand (aerob zone)	Vandløb
	<i>mg N l⁻¹</i>			
Lerjordsopland	19,9	17,1	8,7	9,5
Sandjordsopland	28,5	-	15,4	4,4

For det dybe grundvands vedkommende indeholder 61 % af overvågningsboringerne og 69 % af vandforsyningsboringerne mindre end 1 mg/l nitrat (GEUS, 2001). Tabel 4.4 viser medianværdien for forekomsten af nitrat i GRUMO filtre rapporteret i GRUMO-rapporten (GRUMO, 2001).

Tabel 3.4 Antal indtag med nitrat > 50 mg/l i GRUMO 2001. Nitrat er udregnet som medianen pr. GRUMO pr. år og derpå medianen pr. GRUMOnr.

Meter under terræn	Antal indtag	Indtag med nitrat > 50 mg/l	%
0-10 meter	184	42	22,8
10-20 meter	408	87	21,3
20-30 meter	347	65	18,7
30-40 meter	192	15	7,8

Den generelle vurdering af nitratkoncentrationen i grundvandet er fortsat, at der ikke kan konstateres nogen signifikant ændring som følge af foranstaltningerne i Vandmiljøplanerne, hvoraf den første er fra 1987. Det kan skyldes at størstedelen af det overvågede grundvand er fra før 1990.

Mens den kritiske nitratkoncentration i forhold til anvendelse af grundvandet som drikkevand er 50 mg/l, vil så høje koncentrationer af nitrat i grundvand i nogle situationer have betydelig negativ effekt på vandkvaliteten i overfladevand. Århus Amt har eksempelvis vurderet at Mariager Fjord vil få betydelige vandkvalitetsproblemer, såfremt nitratinholdet i grundvand kommer op i nærheden af de 50 mg/l. Det kan derfor i nogle områder være kravet til gode økologiske forhold i overfladevand der bestemmer hvor meget nitrat der kan tillades udvasket fra rodzonen snarere end drikkevandskvalitetskriteriet, som der i dag næsten udelukkende fokuseres på i grundvandssammenhæng.

3.2.3 Udvasning af næringsalte til søer

Indholdet af kvælstof kan især have betydning i søer med en langsom vandudskiftning, og hvor kvælstof i perioder evt. kan virke begrænsende for planteplanktonets produktion. Som nævnt ovenfor, vil tilførslen af fosfor dog normalt være det næringsstof, der har størst betydning for vandkvaliteten i søer, men effekten af de to næringsstoffer kan være vanskelig at adskille, fordi tilførslen af fosfor og kvælstof ofte er stærkt korrelerede. Til sammenligning ligger det gennemsnitlige indhold af kvælstof i indløbet til 16 af de danske overvågningssøer på 5-8 mg N/l. Ved indløb og passage gennem søerne fjernes en stor del af den tilførte kvælstof. Fjernelsen sker enten via indbygningen i organisk stof, som sedimenterer på søbunden eller via denitrifikation, hvor nitrat anvendes som oxidationsmiddel ved den bakterielle mineralisering i søbunden og omdannes til frit kvælstof og afgasses til atmosfæren. Den relative kvælstoftilbageholdelse i søer er meget afhængig af hvor hurtigt vandet strømmer igennem søerne og øges med øget hydraulisk opholdstid. For de 16 nævnte overvågningssøer fjernes som gennemsnit 30-40% af den kvælstof, som tilføres.

3.2.4 Udvasning af næringsalte til de marine områder

Studierne af næringsstoftransportens størrelse fra grundvand til kystvande beskæftiger sig stort set kun med nitrat, idet fosfaten bindes i jorden (Valiela et al., 1990; Sewell, 1982). Da primærproduktionen i de kystnære farvande generelt er begrænset af kvælstoftilgængeligheden (Howarth, 1988), er det i eutrofieringssammenhæng også kvælstof, der er mest interessant. I danske farvande er der dog tegn på at fosfor er begrænsende en del af sæsonen, så for danske forhold vil fosfortransporten via grundvandet også være interessant.

Det første bevis for en betydende transport af nitrat med grundvand til kystvande kom i 1985 (Capone and Bautista 1985) fra Great South Bay, Long Island, New York. Den præcise størrelse blev ikke opgjort, men det

konkluderes at indsvivende grundvand kunne være en betydende kilde til nitrat i kystnære farvande. Senere er nitrattilførslen via grundvand til bugten opgjort til at udgøre ca. 30% af den totale kvælstoftilførsel (Slater and Capone 1987). I andre områder har man forsøgt at opgøre den kvantitative betydning af nitrattilførsel via grundvand. Således blev det vurderet at udgøre 83% af den samlede kvælstoftilførsel til en lukket vig, Town Cove, Massachusetts (Giblin and Gaines 1990). Dette studie må karakteriseres som et specialtilfælde, da der ikke er floder eller åer af betydning, der udmunder i vigen. Dermed sker stort set hele ferskvandstilførslen via grundvandet, og det bliver dermed en meget betydende kilde.

I et andet studie fra et mere åbent farvand har man forsøgt at estimere grundvandet som kilde til kvælstof og fosfor. Det var en 10 km lang kyststrækning i Florida, hvor udsivning af N og P med grundvand var af samme størrelse som N og P tilledningen via en lille lokal flod (Rutkowski et al. 1999), og det konkluderes at næringssalte tilført med grundvand kan være en meget betydende kilde, specielt i områder uden større floder.

En del studier beskæftiger sig med ændringen af grundvandets indhold af næringssalte på dets vej fra grundvandsmagasinerne gennem havbunden til kystvandene. Ofte sker der store ændringer under denne transport og det er vigtigt at forstå processerne, der forårsager disse ændringer, for at kunne forudsige næringssalttransporten ud fra kendskab til flowrate og grundvandskoncentration.

Den kvantitative betydning af denitrifikationsprocessen er undersøgt flere steder og er fundet at variere meget. Fx. blev denitrifikationen fundet at være ubetydende for grundvandets nitratindhold i Nauset Marsh estuariet, Massachusetts (Nowicki et al. 1999), mens der i Great South Bay, New York, blev fundet høje rater af denitrifikation, og det konkluderes at en stor del af nitraten i det indsvivende grundvand blev fjernet på dets vej gennem de øverste 40 cm af havbunden (Slater and Capone 1987), (Capone and Slater 1990). På begge disse lokaliteter er der en tydelig sæsonvariation i denitrifikationen og processen er begrænset af tilgængeligheden af organisk stof. Den store forskel i betydningen af kvælstoffjernelsen mellem de to områder skyldes at grundvandet i Nauset Marsh var iltholdigt og strømmede gennem sandede sedimentter med lavt organisk indhold, mens grundvandet var iltfrit i Great South Bay og strømmede gennem organisk rige sedimentter.

Betydningen af saltmarsk mellem land og hav for kvælstoffjernelsen er også blevet undersøgt. Der er et stort potentiale for både denitrifikation og assimilering af kvælstof og fosfor i planterne. Også her er variationen stor. I en saltmarsk i Virginia var denitrifikationen af stor betydning for fjernelsen af kvælstof fra det gennemsvivende grundvand (Tobias et al. 2001), mens det modsatte var tilfældet i en saltmarsk i Massachusetts (Portnoy et al. 1998). Forklaringen på den store forskel skal søges i vandets rute gennem marsken. I det første tilfælde foregik vandgennemstrømningen gennem rodzonen, mens grundvandet i det andet tilfælde strømmede gennem permeable sandaflejringer ca. 1 m under rodzonen.

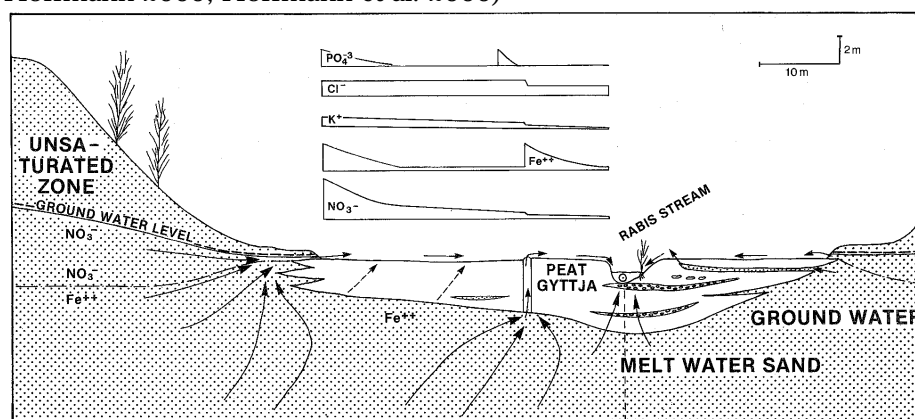
3.2.5 Næringsstoffjernelse i danske vådområder

Der er foretaget undersøgelser af næringssaltfjernelse i forskellige typer af ferske vådområder, dvs. områder der hydrologisk set domineres af (1) grundvandsgennemstrømning, eller tilførsel af grundvand på forskellig vis men som undervejs bliver til overfladevand (Figurerne 3.2 og 3.3), og (2) områder der hydrologisk set domineres af overfladevand stammende fra

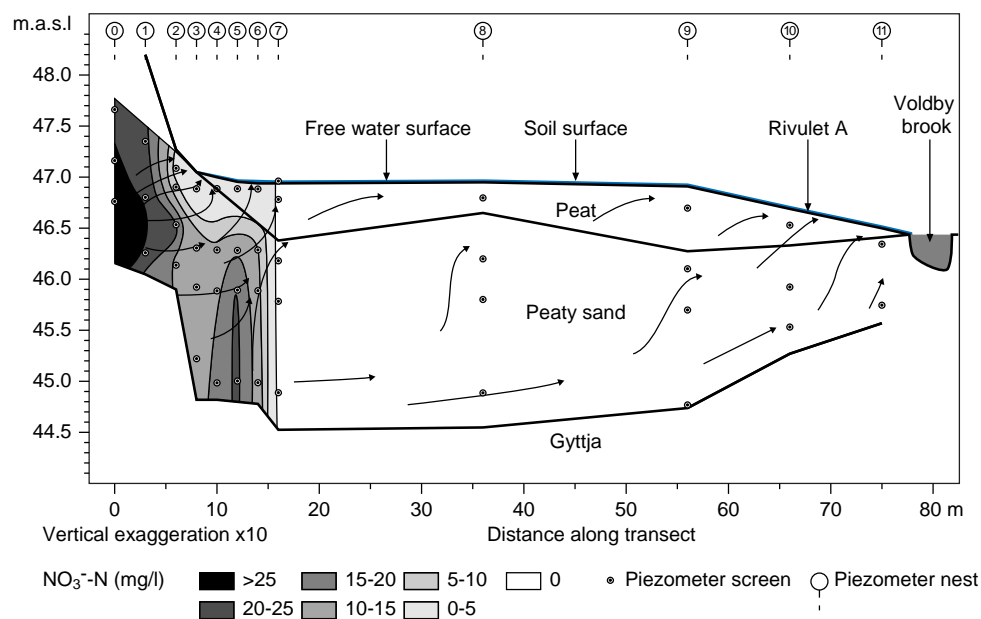
temporære oversvømmelser fra det nærliggende vandløb og overrisling fra dræn. Ser man bort fra lavvandede søer findes der ingen danske undersøgelser, der belyser næringsstofomsætning i vådområder der gennemstrømmes af overfladevand, men muligheden for at undersøge denne type vådområde er tilstede idet en del VMP2-vådområder af denne type er under forberedelse/genskabelse (fx. Årslev engsø). Undersøgelserne har dels været fokuseret på at kvantificere tilbageholdelsen eller udvaskningen af næringsstoffer og dels koncentreret om at belyse processerne og forskellige faktorerers betydning for et givet områdes evne til at omsætte næringsstoffer. Tilbageholdelse af kvælstof i grundvandsdominerede vådområder har vist sig at være ganske markant og foregår hovedsagelig ved omdannelse af nitrat til atmosfærisk kvælstof, N_2 , via denitrifikation. De forskellige undersøgelser afslører at effektiviteten varierer fra 56% og op til 97% (Brüsch og Nilsson, 1993; Hoffmann et al. 1993; Hoffmann 1998a; Hoffmann et al. 1998, 2000), dog uden nogen direkte sammenhæng med de absolutte mængder kvælstof, der kan fjernes. Disse ligger stort set jævnt fordelt i intervallet 8 til ca. 2000 kg N $ha^{-1} \text{år}^{-1}$. Variationen skyldes både varierende indløbskoncentrationer for nitrat og varierende hydraulisk belastning. De fleste undersøgelser af kvælstoffjernelse i overfladevandsdominerede vådområder viser at effektiviteten generelt set er en smule lavere, selvom intervallet stort set er det samme, nemlig 48 - 99 %. Kvælstoffjernelse opgjort på arealbasis spænder lige fra 34 til 2700 kg N $ha^{-1} \text{år}^{-1}$, med majoriteten liggende i området 200-600 kg N $ha^{-1} \text{år}^{-1}$ (Hoffmann 1998ab). Undersøgelser af vigtige biogeokemiske processer i vådområder har først og fremmest været centreret omkring denitrifikation (Blicher-Mathiesen 1997; Blicher-Mathiesen et al. 1998; Hoffmann 1998; Blicher-Mathiesen and Hoffmann 1999) og forhold vedrørende lattergas (Paludan and Blicher-Mathiesen, 1996; Blicher-Mathiesen and Hoffmann, 1999; Vinther and Hoffmann, 2000).

Massebalanceundersøgelser hvor fosfor er indgået i undersøgelsen har været foretaget i en del tilfælde (Ambus og Hoffmann, 1990; Hoffmann et al., 1993; Paludan og Hoffmann, 1996; Hoffmann 1996; Hoffmann 1998; Hoffmann 2000). Generelt set har undersøgelserne vist en mindre tilbageholdelse af fosfor, mens der i et par tilfælde er sket en kraftig udvaskning af fosfat til vandmiljøet. Der foreligger kun et enkelt mere dybdegående studie af fosfor i danske vådområder (Paludan, 1995), og der mangler således mere tilbunds-gående viden om fosfor og de processer som fosfor indgår i under reducerende forhold.

Der har endvidere været undersøgelser hvor sigtet primært har drejet om det givne vådområdes funktioner og ikke så meget om samspillet med de omkringliggende miljøer (Paludan 1995; Hoffmann 1998; Vinther og Hoffmann 2000; Hoffmann et al. 2000)



Figur 3.2 Integreret dansk undersøgelse af opland-vådområde-vandløb ved Rabis bæk i Karup Å oplandet (Brüsch og Nilsson, 1993).



Figur 3.3 Eksempel på dansk undersøgelse i den ånære zone (hyporheiske zone) fra Mølgårde i Gjærn Å oplandet (Hoffmann et al., 1993; Dahl, 1995).

3.2.6 Pesticidfjernelse i danske vådområder

Viden om miljøfremmede stoffer i vådområder er stærkt begrænset. Der er kun en enkelt undersøgelse (Dahl et al. 2000; Nilsson et al. 2000), der behandler transport, sorption og nedbrydning af et par udvalgte pesticider i et grundvandsdomineret vådområde. Undersøgelsen viste at der i ånære områder kan være et betragteligt potential for fortynding, såvel som sorption og nedbrydning af visse pesticider under grundvandets passage gennem det ånære område.

3.3 Grundvandets betydning for organisk stof, forsuring og okkerbelastning i overfladevande

Måling af pH i grundvandet viser at surhedsgraden generelt ikke har ændret sig væsentligt inden for de 100 år der eksisterer data fra, men at det er evident at pH er meget lav, især i de vestjyske amter. Den laveste pH, der er målt i NOVA er på 3,9, målt i Rabis Bæk i 1999. Den laveste pH målt i vandværkernes boringskontrol er på 4,2 målt på Fyn i 1998. Ved så lave pH værdier frigives der blandt metallerne især meget store mængder aluminium, op til 8 til 10 mg/l (Appelo og Postma, 1993). Landbrugskalkningen kan i intensivt dyrkede områder til en vis grad neutralisere den forsuring der skyldes sur nedbør og dermed reducere mængden af frigivne metaller.

Øget okkerbelastning i forbindelse med grundvandssænkning i jernholdige jorde kan medføre en betydelig påvirkning af vandmiljøet. I relation til søer vil udfældningen af okker ofte finde sted i de tilstødende vandløb og dræn, men kan dog lokalt også finde sted ved bredden af søer og i søbunden. Okkerudfældningen i søer kan på grund af jerns store evne til at binde fosfor under velilteede forhold have en positive indflydelse på søers evne til at tilbageholde fosfor. En stor tilbageholdelse af fosfor betinget af en stor tilførsel af både fosfor og jern forøger dog også samtidigt risikoen for en øget intern fosforbelastning, hvis den eksterne fosforbelastning reduceres.

Organisk stof er mange steder hovedårsagen til en manglende målopfyldelse i overfladevande. Hovedkilderne til organisk stof i overfladevande er dels den vækst, der fremkommer som følge af kvælstof- og fosfortilledningerne, herunder fra grundvandszonen, og dels den direkte udledning af organisk stof med spildevand. Organisk stof tilført via grundvandet anses ikke som et generelt problem for vandkvaliteten i recipienterne.

3.4 Grundvandets betydning for tungmetaller og pesticider i overfladevande

3.4.1 Tungmetaller

I tabel 3.5 er vist antallet af filtre i hhv. GRUMO, LOOP og boringskontrollen, hvor der én eller flere gange har været overskridelser af de økotoxikologiske grænseværdier udtrykt som % af antallet af undersøgte filtre (GEUS, 2001).

Tabel 3.5 Overskridelser af de økotoxikologiske grænseværdier udtrykt som % af antallet af undersøgte filtre i hhv. GRUMO, LOOP og boringskontrollen (Grundvandsovervågning, 2001)

Stof	GRUMO	LOOP	Boringskontrol
Aluminium ¹	66	69	55
Arsen	19	17	23
Zink	5	37	5
Kobber	3	31	2
Bly	2	37	3
Chrom	1	0	0
Cadmium	< 1	6	2
Kviksølv	0	0	2
Nikkel	< 1	14	< 1

¹ Med hensyn til aluminiums økotoxikologiske effekt eksisterer der ikke nogen officiel grænseværdi. Hultberg (1988) anfører at et kriterium på 0,003mol/m³ kan bruges for ferskvand for effekter på diverse fiskearter. Denne værdi svarer til 2,6 µg/l, hvilket er grundlaget for tallene i nærværende tabel.

Af tabel 3.5 fremgår det, at med de målte indhold af tungmetaller i grundvandet og med de begrænsninger, der måtte ligge i fastsættelsen af de økotoxikologiske grænseværdier (herunder at vi mangler dem for mange stoffer), så udgør aluminium tilsyneladende langt det største problem. Dernæst følger arsen, som er særdeles giftigt og kræftfremkaldende for mennesker. Dets koncentration i grundvandet er ikke pH-styret, men afhænger af redoxforholdene. Arsens opførsel i grundvand ligner meget fosfors og begge er høje under reducerende betingelser. De øvrige stoffer giver som det ses ikke de store problemer. Zink er nok overvurderet procentmæssigt, da nogle af GRUMO-prøverne er mistænkt for at være kontaminerede, enten fra boringsmaterialer eller på laboratoriet. Det bør påpeges at de økotoxikologiske grænseværdier generelt overskrides langt hyppigere i LOOP end i GRUMO, altså i det terrænnære grundvand sandsynligvis som følge af belastningen fra landbruget, især tungmetaller fra staldinventar og foder.

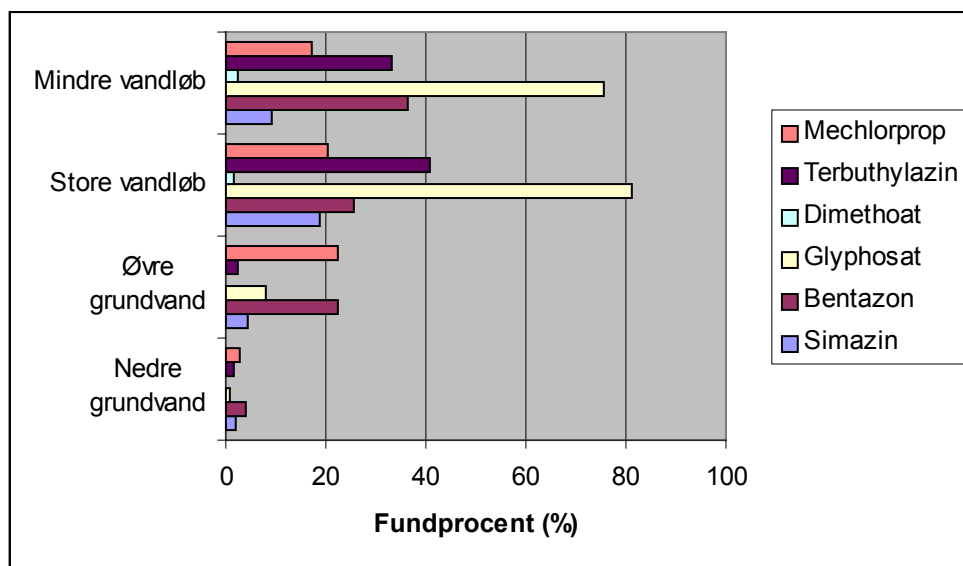
Det vil sige, at grundvandet de fleste steder må formodes at indeholder et eller flere tungmetaller i koncentrationer, som hvis de fandtes i overfladevand ville give problemer for bl.a. fisk. Eftersom langt hovedparten af overfladevandet stammer fra grundvandet, er det interessante spørgsmål herefter hvor stor en del af tungmetallerne der udfældes eller på anden måde forsvinder fra vandfasen i overgangszonen fra grundvand til vandløb og i selve vandløbet.

Det spørgsmål kan der ikke svares entydigt på med den eksisterende viden. Påvirkningen af vandløb eller evt. søer må dog antages at være mest alvorlig lokalt, idet de tilstandsparametre, der betinger de høje koncentrationer (aluminium - lav pH, arsen - reducerende forhold) relativt hurtigt ændres ved strømning i vandløbet. pH kan dog formentlig være ret lav fx. i vandløb med højt indhold af humusstoffer, mens redoxforholdene vil ændres til oxiderende ved kontakt med luftens ilt.

3.4.2 Pesticider

De miljøfremmede stoffer i overfladevand stammer fra både punktkilder (rengøring, industrier, dambrug, regnvandsbetingede udledninger og spredt bebyggelse), samt fra de diffuse kilder der enten er relateret til et tab i forbindelse med anvendelsen af stoffer (vinddrift ved udsprøjtning af pesticider) eller afstrømning fra land via forskellige transportveje (figur 3.4). Tilførsel af miljøfremmede stoffer fra land til vand sker via dybere og øvre grundvand eventuelt via dræn, makropore strømning gennem jord til drænvand og overfladisk afstrømning.

Forekomsten af de enkelte stoffer i dybere grundvand, øvre grundvand, drænvand og vandløbsvand giver en mulighed for at vurdere betydningen af de enkelte transportveje for forekomsten af stoffet i overfladevand. I tabel 3.6 er der lavet en sammenstilling af den nuværende viden om udvalgte tungmetaller og pesticiders forekomst i de forskellige vandige medier. Tabellen baserer sig på overvågningen af oppumpet grundvand (Boringskontrol), samt data fra grundvandsmoniteringsområder (GRUMO), øvre grundvand (LOOP), store vandløb med punktkilder og mindre vandløb i dyrkede oplande under NOVA programmet. Overvågningen af det dybe grundvand (Boringskontrol og GRUMO) er foregået siden 1993, mens overvågningen af øvre grundvand først er startet i 1995 og data fra vandløb er fra år 2000.



Figur 3.4 Fundprocent af udvalgte pesticider (aktivstof) i dybere grundvand (GRUMO), øvre grundvand (LOOP), store vandløb og mindre vandløb der fortrinsvis afvander dyrkede oplande. (Data er nærmere beskrevet i tabel 3.6).

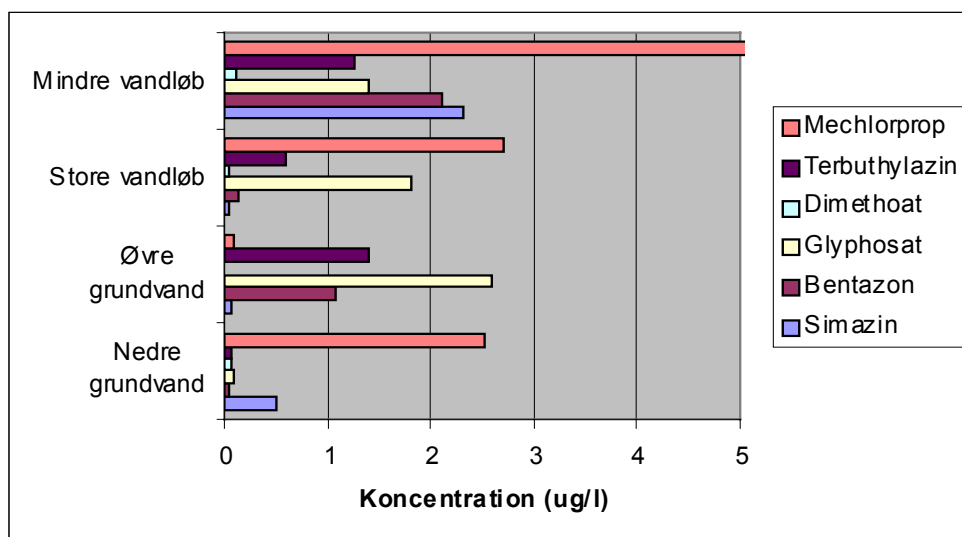
Sammenligningen af resultater på tværs af de forskellige programmer skal derfor ses i lyset heraf. Specielt den meget begrænsede periode med analyseresultater fra vandløb gør det svært at uddrage sikre konklusioner. Endvidere ved vi at pesticider ofte forekommer i de højeste koncentrationer i

forbindelse med korte perioder af året med nedbør og at disse perioder kun sporadisk dækkes af det nuværende prøvetagningsprogram i vandløb. Derfor må de maksimale koncentrationer vist i tabel 3.6 for fund i vandløb forventes at være undervurderet.

Forekomsten af tungmetaller, median koncentrationen og den maksimalt observerede koncentration i dybere grundvand, øvre grundvand og store vandløb afviger ikke meget fra hinanden. Den lavere fundprocent i vandløb skyldes således alene en højere detektionsgrænse på grund af at analysen gennemføres på ufiltrerede vandprøver. Vandprøver med et indhold over de fastsatte kvalitetskrav for vandløb er således i enkelte tilfælde både konstateret i grundvand og vandløb. I vandløb drejer det sig om tungmetallerne chrom, kobber og nikkel.

I tabel 3.6 er forekomsten af udvalgte pesticider også vist selvom der kun for enkelte er fastsat kvalitetskriterier i fersk overfladevand. Generelt er der for pesticider en stigning i fundhyppigheden (fund divideret med antal filtre/prøver) af pesticider i rækkefølgen dybere grundvand < øvre grundvand < vandløb. Et pesticid som terbuthylazin findes næsten ikke i dybere grundvand (1,4% af filtre), lidt hyppigere i øvre grundvand (2,5% af filtre) og meget hyppigt i både store (41% af vandprøver) og mindre vandløb (33% af vandprøver). Det samme gælder i større eller mindre grad andre af de medtagne letopløselige aktivstoffer i rækkefølgen glyphosat, isoproturon og simazin. Derimod er fundprocenten næsten ens i øvre grundvand og vandløb for mechlorprop og atrazin. Dimethoat findes næsten ikke i grundvand, men i enkelte tilfælde i vandløb.

Koncentrationen af pesticider er generelt højere i mindre vandløb end i grundvand og større vandløb (figur 3.5). Til gengæld findes der ofte lige så høje koncentrationer i øvre grundvand som i større vandløb. Kun få pesticider ser derfor ud til at kunne tilføres vandløb fra dybere grundvand. I andre tilfælde kan øvre grundvand være en meget betydelig transportvej for pesticider, mens andre transportveje må have betydning for pesticider som fx. terbuthylazin, glyphosat, isoproturon, dimethoat og simazin. De ukendte kilder og/eller transportveje kan være vinddrift, makropore transport til drænvand og overfladisk afstrømning. Endvidere kan forurenende arealer hvor pesticider er håndteret af landmænd eller haveejere og andre punktkilder selvfølgelig ikke afskrives.



Figur 3.5 Maksimum koncentration af pesticider (aktivstof) i dybere grundvand (GRUMO), øvre grundvand (LOOP), store vandløb og mindre vandløb der fortrinsvis afvander dyrkede oplande. (Data er nærmere beskrevet i tabel 3.6). Bemærk at maksimum koncentrationen for mechlorprop i mindre vandløb er på 25 µg/l.

Af de udvalgte pesticider er det i år 2000 kun simazin som har overskredet det gældende kvalitetskriterie. I forhold til denne konklusion er det meget vigtigt at holde sig for øje at prøvetagningen i vandløb ikke er målrettet mod at afsløre maksimale forekomster.

Forekomst af pesticider i drænvand er ikke medtaget i figur 3.4 og 3.5 samt i tabel 3.6, idet overvågningen kun har foregået i år 2000 og der i dette år på grund af manglende drænastrømning i efteråret kun blev udtaget i alt 9 vandprøver i 4 dræn i Landovervågningsoplandene (Grant et al., 2001). På trods af de få udtagne vandprøver blev der konstateret pesticider i 3 af de 4 undersøgte dræn. I de fleste tilfælde blev der gjort fund af pesticider som ikke har været anvendt på de drænedde marker indenfor de seneste 3 eller flere år. Det drejer sig især om atrazin og nedbrydningsprodukter heraf, men også DNOC, ioxynil og AMPA. Af anvendte stoffer i det samme år blev der i et dræn konstateret fund af isoproturon og pendimethalin.

Under Varslingssystemet for Pesticider (VAP) blev der i 1998 etableret målinger af pesticidudvaskning på seks lokaliteter repræsenterende en stor spændvidde af danske jord og klimaforhold. På fire af disse marker bliver der målt pesticidkoncentrationer i drænvand med en tids- og flowproportional prøvetagning. I den første monitoringsperiode fra maj 1999 til juni 2000 blev der målt pesticidrester fra 11 af de i alt 24 anvendte pesticider, heriblandt metribuzins nedbrydningsprodukter og glyphosat. Felldataene viste tydeligt at pesticidkoncentrationer og -flux varierer meget betydeligt indenfor kort tid. Derfor kræver en effektiv monitoring af pesticider i drænastrømning at der foretages tids- eller flowproportional prøveudtagning.

Andre undersøgelser har vist at drænvand kan være en meget betydende transportvej for pesticider til overfladevand især hvis makropore- eller spræktransport finder sted (Kreuger, 1999; Vilholth et al., 2000; Kronvang et al., 2001).

Tabel 3.6 Forekomst af tungmetaller og udvalgte pesticider i dybere grundvand (GRUMO, Vandværker), øvre grundvand (LOOP), store vandløb (5 i tilfældet Cd og Hg 9 vandløb) og i 25 mindre vandløb i dyrkede oplande. For enkelte af stofferne er den gældende grænseværdi for fersk overfladevand angivet (Miljøstyrelsen, 1996). Af = antal filtre med prøver. Ap = antal udtagne vandprøver. F = Fundprocent. Me = median koncentration. Ma = Maximum koncentration.

Tungmetaller	Kvalitetskrav i ferskvand	Dybere grundvand (GRUMO)				Dybere grundvand (vandværker)				Øvre grundvand (LOOP-filtre)				Store vandløb med spildevand				Mindre vandløb i dyrkede områder			
		Af	F	Me	Ma ¹	Af	F	Me	Ma	Af	F	Me	Ma	Ap	F	Me	Ma	Ap	F	Me	Ma
$g\ l^{-1}$																					
Arsen	4.0	973	98	0.76	5.7	593	86	1.8	41	35	88	0.3	2.5	55	44	1.4	3.1	im			
Bly	3.2*	882	91	0.057	0.27	494	39	0.27	35	35	97	0.5	39	47	43	1.4	7.0	im			
Chrom	10.0*	970	88	0.1	0.8	124	24	0.5	4.0	35	74	0.2	1.9	55	53	0.65	12.0	im			
Kviksølv	1.0	911	88	0.0012	0.003	83	18	0.1	0.2					89	25	0.0026	0.008	im			
Kobber	12.0	973	94	0.23	1.4	133	50	1.0	30.0	35	100	2.2	61.0	55	84	2.6	21.0	im			
Cadmium	5.0	973	83	0.007	0.078	625	30	0.025	1.9	35	97	0.11	6.2	91	51	0.036	0.16	im			
Nikkel	160.0*	973	90	0.34	6.25	7545	42	5.0	590	35	100	7.0	700	55	84	2.8	34	im			
Pesticider																					
Parathion	0.01	177	0			89	0			15	0			59	0						
Atrazin	1.0	1076	4.9	0.02	1.52	5979	4.1	0.022	1.11	45	13.3	0.021	0.12	59	3.4	0.012	0.013	176	9.1	0.02	0.33
Simazin	1.0	1076	2.1	0.031	0.51	5992	2.2	0.02	0.42	45	4.4	0.037	0.05	59	18.6	0.013	0.041	176	9.1	0.04	2.30
DDT	1.0	25	0			34	0							59	0						
Bentazon		983	3.8	0.037	2.8	4522	2.0	0.022	2.65	40	22.5	0.01	0.19	59	25.4	0.016	0.028	176	36.4	0.02	1.20
Terbuthylazin		979	1.4	0.02	0.05	4456	0.3	0.01	0.05	40	2.5	0.218	1.4	59	40.7	0.017	0.58	176	33.0	0.03	1.26
Isoproturon		980	0.2	0.028	0.045	4428	0.5	0.019	0.98	40	20	0.032	1.07	59	40.7	0.02	0.13	176	39.8	0.06	2.10
2,4-D	10	1072	1.3	0.018	0.044	5917	0.2	0.017	0.38	45	11.1	0.016	0.12	59	5.1	0.024	0.84	174	2.3	0.01	0.10
AMPA		848	1.5	0.026	1.0	187	0.5	0.011	0.01	37	8.1	0.059	0.7	59	91.4	0.11	1.1	169	79.9	0.10	0.52
Glyphosat		849	0.7	0.02	0.08	179	0.6	0.013	0.01	37	8.1	0.02	2.6	59	81.0	0.06	1.8	169	75.7	0.07	1.40
Propixonazol		896	0.2	0.024	0.034	689	0			39	0			59	0			175	6.3	0.02	1.40
Mechlorprop		1076	2.8	0.025	2.51	5994	2.1	0.025	26	45	22.2	0.016	0.083	59	20.3	0.023	2.7	176	17.0	0.02	23.6
Fenpropimorph		894	0.2	0.025	0.03	539	0			38	0			59	0			176	1.7	0.03	0.11
Dimethoat	1.0	951	0.2	0.04	0.06	4430	0.2	0.014	0.11	38	0			59	1.7	0.034	0.034	174	2.3	0.03	0.12

* Forslag til kvalitetskrav hvor datagrundlaget ikke er endeligt kvalitetsvurderet.

Ma¹ (GRUMO) = 90% percentil. im = ikke målt.

3.5 Konklusion

Det kan konkluderes at kendskabet til samspillet mellem tilstanden i grundvandet og overfladevandet generelt set ikke er velundersøgt. Der findes stadig kun et begrænset antal fagligt tværgående undersøgelser, hvor der er fokuseret på grundvandets betydning for vandkvaliteten i overgangszonen til de forskellige typer overfladevand. Generelt vurderes det at grundvandets stoftransport og strømningsveje fra grundvandszonen gennem "reaktoren" i ådalene til vandløbene såvel som i overgangszonerne til søer og kystzone er mangelfuldt belyst.

De fremtidige vidensbehov kan resumeres som følger:

- **Forurenende stoffers strømningsveje og skæbne gennem det ånære område (den hyporheiske zone).** Der er behov for en bedre forståelse af hvorledes procesbeskrivelser og parameterværdier, der karakteriserer vandstrømninger og stofomsætninger i de ånære områder kan forklares og bestemmes på baggrund af geologisk og vandløbsmorfologisk viden. En sådan viden vil være en forudsætning for kvantitativt at kunne vurdere betydningen af de ånære områder for samspillet mellem grundvand og overfladevand, uden på forhånd at være nødt til at lave detaljerede feltundersøgelser på hver enkelt lokalitet.
- **Sammenhængen mellem tilstanden i grundvand og i søer.** 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. Dette gælder ikke mindst de næringsfattige søer, hvor en lille ændring i næringsstofftilførsel kan have stor betydning for vandkvaliteten. Der er også et behov for et øget kendskab vedr. den sæsonmæssige udveksling (indsivning/udsivning) af grundvand og søvand.
- **Grundvandets påvirkning af vandkvaliteten i overfladevand.** Der er behov for en analyse af hvad de 'sande' maksimale koncentrationer er af fx. tungmetaller og pesticider i drænvand og vandløb, samt i hvor stor udstrækning forurenede grundvand i denne sammenhæng kan være en trussel mod overfladevandenes kvalitet.
- **Forførf.** Der er behov for at få en bedre viden dels om de forskellige processer der styrer udvaskning, transport og omsætning af fosfor og dels om forforkredsløbet på oplandsskala. Det er en nødvendig forudsætning for at kunne etablere en effektiv plan for nedbringelse af fosforureningen til vore overfladevande. Eksempelvis er der behov for udvikling af metoder til at kvantificere hvad erosionsbetinget tab og makropore strømning betyder for forekomst af fosfor i overfladevand.
- **Hydrokemiske og biologiske samspil mellem vandløb og ådale.** Der er behov for at opbygge bedre viden om samspillet mellem oversvømmelse, vandskifte, vegetationsmæssige forhold, grundvandsforhold og sedimentation af fosfor og kvælstof i forskellige ådalstyper. I denne forbindelse er der behov for en større viden om fosforomsætning på ånære arealer i forhold til jordtyper, vandmætning, redoxforhold, mv., samt denitrifikation i forbindelse med oversvømmelser af ådale. Desuden skal metoder udvikles til opskalering af viden om denitrifikation i våde enge.
- **Næringsstofudstrømning med grundvand til marine områder.** Biogeokemiske processer har potentielt stor indflydelse på næringssaltindholdet af det indsvivende grundvand til det marine

område. Det er imidlertid ikke altid dette potentiale udfoldes, og det er ikke muligt ud fra de foreliggende studier at forudsige effekterne af de biogeokemiske processer. Der er derfor behov for en langt større viden om samspillet mellem jordbundens og havbundens karakteristika, grundvandetets strømningsveje og -hastighed og de biogeokemiske processers rolle.

4 Den økologiske kvalitet i overfladevande i relation til grundvand

Jens Skriver, Jens Peder Jensen og Tage Dalsgaard

4.1 Problemformulering

Udvekslingen af grundvand mellem overfladevande og de forskellige grundvandsmagasiner kan potentielt påvirke vandkvaliteten mellem på den ene side grundvand og på den anden side vandløb, søer og marine områder. 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 tilstanden i vandløb, søer og kystnære marine områder, fordi der sker en fortynding af overfladevandenens øvrige hydrauliske tilførsel, der ofte består af mere næringsrigt overfladevand.

Ændret tilstrømning af grundvand kan også direkte påvirke vandføringen i vandløb samt søers vanddybde og dermed en række forhold med betydning for vandkvaliteten. Vandløbenes vandføring har stor betydning for dels de hydrauliske og substratmæssige forhold, for sedimentation samt for de biologiske forhold. I søer har vanddybden stor indflydelse, på både de fysisk-kemiske forhold som eksempelvis hyppigheden og graden af ophvirvling af bundmateriale i forbindelse med blæst, samt indflydelse på de biologiske forhold, som eksempelvis undervandsplanternes dybdemæssige udbredelse.

Udsivning af forurenede overfladevand 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 vandkvaliteten i vandløb, søer og kystnære marine områder.

Der er i det følgende foretaget en sammenstilling af eksisterende dansk og udenlandsk viden til belysning af eventuelle økologiske konsekvenser for vandløb, søer og marine områder som følge af menneskeskabte ændringer i grundvandsstand og tilførsel af grundvand til overfladevand. Det har været målet at forsøge at afdække eventuelle væsentlige huller i den eksisterende viden.

4.2 Vandløb

4.2.1 Økologiske effekter af vandets mængde

Påvirkning af tilgængeligt substrat samt substratets kvalitet

Oppumpning af grundvand og en deraf følgende reduktion i vandføringen vil i de fleste tilfælde medføre en reduktion i det vanddækkede areal af vandløbsbunden. Konsekvenserne for den del af floraen og faunaen der befinder sig i disse områder kan være betydelig, og kan medføre reduktion i antal og udbredelse eller eventuelt en fuldstændig eliminering inden for området. Omfanget af påvirkningen på de biologiske forhold vil afhænge af længden såvel som af hyppigheden af tørlægning, samt en række faktorer som er knyttet til de biologiske forhold. Dette gælder fx. arternes eventuelle tilpasninger til udtørring som følge af morfologiske, fysiologiske eller adfærdsmæssige forhold. Derudover vil tilgangen til mulige refugier være afgørende for både smådyrfaunaen og for fiskefaunaen.

Udover en egentlig tørlægning vil reduktion i vandføringen generelt medføre lavere strømhastigheder med deraf følgende øget tendens til sedimentation af sand og finere partikler. Sådanne ændringer af bundforholdene er rapporteret i mindre vandløb i forbindelse med lave afstrømninger, idet der ofte sker en fuldstændig overlejring med sand eller aflejring af silt som lukker og sammenkitter de små åbninger og sprækker i bundsedimentet. Dette forringer de biologiske forhold for både smådyr og for fisk (Wood and Armitage 1999; Wood et al. 1999). Men de store vandføringer har ligeledes betydning for bundforholdene og dermed for de biologiske forhold, idet de store afstrømninger er afgørende for at vandløbsbunden omlejres, hvorved de finkornede fraktioner resuspenderes og omlejres.

Smådyrarternes tilpasninger til udtørring og reduktion i vandføring

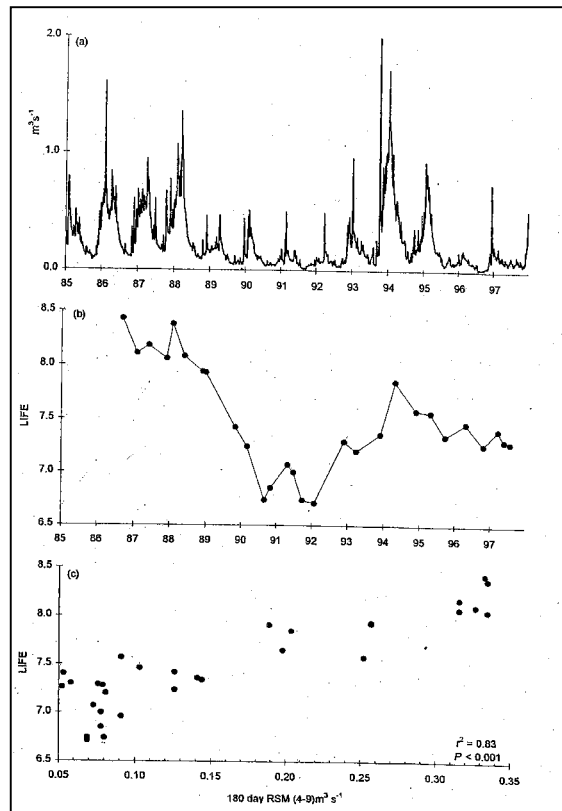
I vandløb som hvert år har reduceret vandføring eller som helt mangler vand i en kortere eller længere periode har faunaen på forskellig vis tilpasset sig de aktuelle livsbetingelser (Hynes 1970). Fx. har mange arter af smådyr udviklet en livscyklus som på forskellig måde betinger, at eksistens er mulig på trods af de vanskelige livsbetingelser. Tilpasninger til udtørring kan bl.a. være evnen til at søge ned i vandløbsbunden, og her overgå til et inaktivt stadie (diapause) som først kommer frem i vandløbet igen når der på ny er vand til stede. En sådan tilpasning ses fx. hos visse arter af slørvinger. Andre måder at klare en udtørring kan være, at det voksne insekt tilbringer sit voksenliv på land i et inaktivt stadie samtidig med at vandløbet er udtørret. Æg som tåler udtørring kan også være løsningen på manglende vand. Denne tilpasning ses hos bl.a. visse vårfluer. Andre dyr vælger at forlade den vandløbsstrækning som tørrer ud ved passiv drift med strømmen som det typisk ses hos vandløbets smådyr. Visse andre arter af smådyr kan ikke klare forholdene med lidt eller slet intet vand. Alligevel vil nogle af disse arter meget hurtigt genfindes i vandløbet når vandet vender tilbage. Årsagen er at disse dyr har en særlig evne til at sprede sig og derved genindvandrer enten ved flyvning af voksne insekter eller ved vandring af de vandlevende stadier op mod strømmen. For arter der flyver som voksne insekter vil især arter der har flere generationer årligt være blandt de første arter til på ny at genindvandre.

Effekter på samfundsniveau

På trods af visse arters evne til at overleve perioder med ugunstige hydrologiske forhold vil hovedparten af smådyrfaunaen blive påvirket i forskelligt omfang af udtørring eller betydelig reduktion i den normale vandføring. Effekterne på smådyrfaunaen er en generel reduktion i artsantallet og i individtætheden. Undersøgelser af rekoloniseringen (genindvandringen) viser, at denne i nogle tilfælde vil foregå hurtigt, og allerede vil være tæt på det normale efter et år. Mens den i andre tilfælde vil tage to til flere år.

Forskellige indeks har været anvendt til at identificere effekter på smådyrfaunaen. I England anvendes BMWP og ASPT til biologisk monitoring af vandløb (Armitage et al. 1983). Disse indices er baseret på en overordnet identifikation af faunaen. Forskellige score værdier er knyttet til de enkelte faunagrupper afhængigt af deres generelle følsomhed. BMWP værdien udgør den samlede score, mens ASPT værdien udgør den gennemsnitlige score pr. faunagruppe. Der er blevet påvist mindre værdier af disse udtryk i vandløb påvirket af ringe vandføring, hvilket svarer til en mere artsfattig fauna bestående af mere robuste arter. I Danmark har systemet Dansk Vandløbsfaunaindeks, DVFI (Miljøstyrelsen 1998) forsøgsvis været afprøvet på stationer under det nationale overvågningsprogram som både har biologiske og hydrologiske data. De foreløbige resultater har ikke været helt entydige. DVFI har dog vist en overordnet sammenhæng med de hydrologiske forhold som bekræfter at vandløb med et reduceret hydrologisk potentiale har generelt dårligere miljømæssige forhold. Et specialtilfælde af reduceret vandføring ses i danske vandløb i forbindelse med den såkaldte "døde å" strækning ved dambrug. En undersøgelse af 5 dambrug har vist varierende ændring af faunaen i disse strækninger. Dels i form af kvalitative og kvantitative ændringer i faunaen ved især et enkelt af dambrugene. Og dels i form af reduktion i faunaklassen ved to af de fem dambrug (Skriver et al. 2001).

Der er i England udviklet et særligt system (LIFE) baseret på smådyrfaunaen til kvantificering af effekten som følge af ændring af de hydrauliske forhold (Extence et al. 1999). Systemet er baseret på at de enkelte smådyrarter som er blevet inddelt i 6 grupper afhængigt af deres præferens for strømhastigheden. Denne inddeling er foretaget på baggrund af ekspertvurderinger. Herefter tildeles hver enkelt art en score værdi som er baseret dels på individantallet i en semi-kvantitativ ketcherprøve og dels på indplaceringen i ovennævnte strømpræferens grupper. Det endelige resultat, kaldet LIFE scoren, findes som summen af alle arternes score værdier divideret med antallet af arter. I den engelske undersøgelse som var baseret på naturlige forskelle i afstrømningen (våde og tørre år) blev der fundet en entydig sammenhæng mellem LIFE værdien og forskellige hydrologiske udtryk, idet LIFE scoren var signifikant lavere i år med ringe vandføring (figur 4.1). Smådyrsamfundene reagerer således på de hydrologiske forhold under naturlige omstændigheder. Dette er utvivlsomt også tilfældet i forbindelse med menneskeskabte påvirkninger.



Figur 4.1. Sammenhæng mellem hydrologiske og økologiske (b og c) udtryk i et engelsk vandløb (Extence et al. 1999). En høj LIFE score opnås når faunaen generelt består af strømelskende arter. 180 day RSM angiver den gennemsnitlige vandføring gennem de seneste 180 "sommerdage" (running summer mean).

Effekten af reduceret vandføring og udtørring på fiskefaunaen

Der er foretaget enkelte undersøgelser af effekten på ørred og laks, hvor grundvandsindvinding har medført udtørring eller reduktion i vandføringen i vandløb, men hovedparten af de undersøgelser der er beskrevet for fisk skyldes naturlig tørke som følge af væsentligt mindre nedbør end normalt. Umiddelbart efter en egentlig udtørring er det generelle billede, at bestandene af fisk vil blive elimineret. De længerevarende konsekvenser har været meget forskellige. Der er således rapporteret om fuldstændig normale forhold med hensyn til artssammensætning og samlet biomasse i det efterfølgende år med normale nedbørs- og vandføringsmæssige forhold. Dette var betinget af en hurtig rekolonisering fra nærliggende vandløbsstrækninger som ikke havde været udtørret. I andre tilfælde tager det flere år med normale nedbørsforhold før fiskebestanden opnår den tidligere artssammensætning, tæthed og aldersstruktur.

For ørred og laks er der dokumenteret elimination af en eller flere årgange af fisk. Dødelighed har været konstateret som følge af svampeangreb på æg hos kildeørred i tre undersøgte vandløb i forbindelse med stærkt reduceret vandføring. Og dødelighed har været konstateret for hele den yngste årgang af yngel hos laks ved reduceret vandføring – muligvis som følge af forhøjede temperaturer.

Sammenlignet med den normale tæthedafhængige dødelighed hos ørred er der i flere tilfælde konstateret et øget tab af yngel og 1 års fisk. Dette er blevet kædet sammen med en reduktion i de tilgængelige levesteder (egnet habitat) for ørred på grund af det mindre vanddækkede areal. En sådan reduktion i en eller flere årgange kan i visse tilfælde medføre, at antallet af smolt (ørred der bliver blanke og vandrer ud i havet) efterfølgende reduceres. Dette er påvist for en population af havørred, og medførte senere at antallet af gydemodne ørred der vandrede tilbage fra havet var tilsvarende reduceret. Effekten af en reduktion i vandføringen påvirker derfor ikke kun fiskebestanden kortvarigt, men kan række et antal år ud i fremtiden.

Reduktion i væksten er også blevet konstateret hos ørred der har været udsat for tørke. Konsekvensen for unge havørred var, at størrelsen ved smoltificering ligeledes var reduceret. Dette medførte forøget dødelighed ude i havet og færre kønsmodne ørred vendte siden hen tilbage for at gyde.

I forbindelse med oppumpning af grundvand nær floden Piddle i Dorset, er det blevet beregnet, at oppumpningen på visse strækninger kan forårsage et tab i habitatarealet for yngel og 1-års ørred på op til 77%. Det blev endvidere dokumenteret, at antallet af ørred var lavere på strækninger som var påvirket af oppumpning af grundvand. Modeller der beregner det tilgængelige habitat areal for ørred er i flere tilfælde blevet anvendt i England i forbindelse med beslutning om tilladelse til indvinding af grundvand. En række metoder til fastsættelse af økologisk acceptabel vandføring er behandlet i afsnit 4.3.

Effekten af reduceret vandføring og udtørring på vandplanter og bentiske alger

Bentiske algers biomasse, produktion, diversitet og artsantal reduceres ved store afstrømninger som følge af både en fysisk "afslibning" af faste substrater samt transport og omlejring af sedimentet. Men også udtørring forårsager en reduktion i algernes biomasse og produktion. De bentiske alger når dog hurtigt tilbage til tidligere niveauer – typisk inden for få uger. Også makrofyterne påvirkes, idet en egentlig udtørring af mindre vandløb forårsager en eliminering af de egentlige vandplanter. Afhængigt af de hydrologiske forhold er det muligt, at skelne mellem forskellige plantesamfund, idet de enkelte arter udviser forskellig tolerance for kortere eller længere tids udtørring. I forbindelse med ansøgning om tilladelse til indvinding har det i England været overvejet om der eventuelt kan meddeles yderligere tilladelser til indvinding, såfremt der ikke foretages skæring af makrofyterne i vandløbet. Herved kan det vanddækkede areal opretholdes med mulighed for mindre skadevirkning på de biologiske forhold.

4.2.2 Økologiske effekter af næringsstoffer

Næringsstof niveauet har betydning for algernes primærproduktion – i det mindste ved lave koncentrationer. Næringsstof niveauet i danske vandløb betragtes dog generelt som så højt, at yderligere tilførsel ikke bevirker øget algebiomasse. I upåvirkede eller svagt påvirkede vandløb vil en øget tilførsel af fosfor imidlertid ofte give anledning til en øget algebiomasse. I en række danske vandløb havde den maksimale algebiomasse i forårsperioden således signifikant sammenhæng med det gennemsnitlige indhold af opløst fosfat op til en koncentration på ca. 100 µg/l. Denne sammenhæng blev konstateret på fintkornet sediment, hvorimod der på sten ikke var nogen

entydig sammenhæng – muligvis som følge af at algebiomassen blev reguleret af algeskrabende insektlarver. Der ses derimod ingen mærkbar påvirkning af de faunamæssige forhold som følge af forhøjet næringsstof indhold. Både invertebratfaunaen og fiskefaunaen kan således have en optimal sammensætning på trods af at såvel kvælstofindhold som fosforindhold ligger langt over baggrunds niveauet.

4.2.3 Økologiske effekter af organisk stof, forsurening og okkerbelastning

Effekten af letomsætteligt organisk stof (BI_5) på makroinvertebratfaunaen i vandløb er veldokumenteret. Med øget indhold af BI_5 ændres makroinvertebratfaunaens artssammensætning og individtæthed. Effekterne på faunaen i vandløb ses primært i forbindelse med direkte udledning af spildevand til overfladevand. Men indirekte effekter kan forventes, såfremt der sker en reduktion i grundvandstilstrømningen til vandløb, hvorved udledte spildevandsbidrag fortyndes relativt mindre. I vandløb med lille vandføring i sommerperioden kan effekten blive betydelig. I små vandløb, hvor spildevandsbidraget stammer fra spredt bebyggelse, behøver effekten dog ikke at blive mærkbar (Fyns Amt 1999). Årsagen hertil er at spildevandet ofte ikke når frem til vandløb som følge af udsivning fra dræn til den omgivende jord. I situationer, hvor spildevand tilføres i form af markante punktudledninger, vil en generel reduktion i grundvandsbidraget derimod medføre en mindre fortynding af spildevand med mulighed for en dårligere miljøtilstand.

Forsuring er ikke et generelt problem i danske vandløb, men lavt pH kan dog forekomme lokalt fx. i forbindelse med dræning af okkerpotentielle jorder (Okkerredøgørelsen 1984) og i nåleskovsvandløb på sandbund. På regionalt plan kan forsurening også spille en rolle i sandjords områder, men dog ikke i samme målestok som ved pyritiltning i forbindelse med dræning. Invertebratfaunaen er følsom over for forsurening, og fx. krebsdyr, døgnfluer, og snegle tåler ikke større fald i pH. Derimod er mange slørvinger tolerante over for surt vand. Der er i Norge, Sverige og Tyskland udviklet indeks baserede systemer til beskrivelse af graden af påvirkning af makroinvertebratfaunaen.

Okker udgør et væsentligt problem især i de vestjyske amter, hvor 8-18% af vandløbsstrækningerne er så påvirkede, at de ikke opfylder deres målsætninger (Skriver et al. 1997), som følge af dræning og efterfølgende pyritiltning i den tidlige vandmættede zone. Jernforbindelserne har skadevirkning både på vandløbenes makroinvertebratfauna og på fiskefaunaen. En sænkning af grundvandsspejlet som følge af oppumpning af grundvand til markvanding eller til drikkevandsformål kan få tilsvarende konsekvenser for de biologiske forhold.

4.2.4 Økologiske effekter af pesticider og tungmetaller

Pesticider og tungmetaller kan også have stor betydning for de økologiske forhold i vandløb. Anvendelsen af pesticider i landbrug og skovbrug gennem en årrække har betydet, at en række af disse stoffer kan måles i vandløb (se tabel 3.6). Dette gælder også stoffer som er blevet forbudt, og som ikke længere anvendes. Effekten på de biologiske forhold er gennem årene blevet dokumenteret dels gennem laboratorieforsøg, forsøg i strømrrender under semi-naturlige forhold samt undersøgelser i udenlandske vandløb. Direkte anvendelse af værdier fra laboratoriet for lethale og sublethale koncentrationer af pesticider skal tages med forbehold. Disse værdier kan ikke direkte anvendes ved konsekvensvurderinger i

vandløbet, idet laboratorieforsøg kun foretages med få arter (typisk robuste) under forhold der er meget forskellige fra de naturgivne forhold. Værdier for pesticider angivet i tabel 3.6 i kombination med værdier af giftighed af pesticider fra laboratorieforsøg kan derfor ikke anvendes til at give et klart bud på de recipientmæssige konsekvenser i danske vandløb. Afhængigt af koncentrationen og typen af pesticider har effekten i udenlandske vandløb i nogle tilfælde være en fuldstændig elimination af hele invertebratsamfundet eller dele heraf. I andre tilfælde har der ikke været nogen målelig effekt. I nogle tilfælde vil påvirkningen i vandløbet kun være på en kort strækning, mens påvirkningen i andre tilfælde vil kunne registreres mange kilometer nedstrøms for et udledningssted. Invertebratsamfundets "recovery" kan tage dage, uger eller måske år afhængigt af rekoloniserings mulighederne. I værste fald vil visse arter ikke kunne vende tilbage fordi afstanden til den nærmeste bestand er for stor.

Effekten af pesticider på fisk kan enten være indirekte som følge af en elimination af makroinvertebratafaunaen der udgør fiskenes fødegrundlag. Eller effekten kan være direkte gennem fysiologiske ændringer og eventuelt øget dødelighed.

Forekomsten af tungmetaller i vandløb er knyttet til partikulært stof aflejret i bundsedimentet. Tungmetallerne kan være af naturlig oprindelse, udledt fra punktkilder, tilført gennem overfladeafstrømning fra marker eller via tilførsel af grundvand. I udlandet er der konstateret markante effekter på de biologiske forhold som følge af forurening af vandløb. I Danmark er direkte udledning fra virksomheder kendt fra fx. Grindstedværket med den konsekvens, at nedstrøms sediment og biota har akkumuleret tungmetaller. Det er imidlertid ikke muligt, at afgøre den økologiske betydning af denne udledning af tungmetaller, dels fordi der ikke foreligger oplysninger om tilstanden inden udledningen, og dels fordi udledning af spildevand og fysiske indgreb i vandløbet også har indflydet på den økologiske tilstand.

En anden og mere generel påvirkning med tungmetaller er forårsaget af anvendelsen af kunstgødning. Overfladeafstrømning fra marker kan forårsage tilførsel af tungmetaller i et sådant omfang, at afskåret grøde fra vedligeholdelsen af vandløb må bortskaffes til kontrolleret losseplads fordi gældende grænseværdier for tungmetaller er overskredet. Der er imidlertid ingen undersøgelser der har påvist økologisk skade i danske vandløb som følge af tungmetaller tilført som følge af dyrkning af jorden.

Effekten på de biologiske forhold i vandløb som følge af ændring i grundvandstilstrømningen og dermed mængden af pesticider og tungmetaller vil afhænge af mængden og kvaliteten af det vand der strømmer til vandløb, eller som udvindes til fx. vandforsynings formål. Effekten på de biologiske forhold i danske vandløb er endnu dårligt kendt, og kan være vanskelig at adskille fra andre antropogene påvirkninger. For eksempel vil vandløb i landbrugsoplande typisk være både regulerede og vedligeholdte, samtidigt med at de kan være belastede med spildevand og eventuelt tidligere være udsat for ulovlige udledninger.

4.2.5 Samlet vurdering af betydningen af de hydrologiske forhold

De hydrologiske forhold har stor betydning for bundsubstratet i vandløb gennem både erosion og sedimentation. Strømmen får derved indirekte betydning for de biologiske forhold på alle niveauer. Derudover afspejler ændringer i vandføringsforholdene sig i en række andre forhold som

ligeledes har stor betydning for både primærproducenter, makroinvertebrater og fisk. Blandt disse kan nævnes strømshastigheden, iltindholdet, temperaturen, indholdet af næringssalte samt indholdet af forurenende stoffer i form af næringssalte, organisk stof og pesticider. Samspejlet mellem tilstrømningen af grundvand og de hydrologiske forhold i vandløb er derfor afgørende for tilstedeværelsen af et alsidigt plante- og dyreliv. Især i mindre vandløb har dette samspil stor betydning. Der er imidlertid på nuværende tidspunkt i Danmark ikke indsamlet viden i større omfang der muliggør en forudsigtelse af ændringer på de biologiske forhold som følge af ændringer i de hydrologiske forhold. Det vil her være væsentligt at kunne forudsige om en given målsætning kan forventes overholdt som følge af et givet indgreb i vandløbet.

4.3 Søer

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 giver vi en baggrund for grundvandets betydning for vandkvaliteten i søer suppleret med en række eksempler på hvordan grundvand i forskellige sammenhænge har påvirket søernes vandkvalitet.

4.3.1 Økologisk effekt af 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 fx. 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.

Som nævnt tidligere vil grundvandets indhold af næringsstoffer ofte være så lille i forhold til den øvrige tilførsel at grundvand generelt har en positiv indflydelse på søers vandkvalitet. Som det imidlertid også blev nævnt i afsnit 3.3 er grundvandets indhold af fosfor dog tilstrækkelig høj i en del områder til at det må forventes at kunne påvirke søtilstanden i negativ retning.

Som beskrevet i afsnit 3.4 indeholder en betydelig del af grundvandsmagasinerne rester af pesticider. Problemets omfang i forhold til påvirkninger i vandmiljøet er indtil videre stort set ukendt. Største effekter forventes i intensivt dyrkede områder og samtidigt også mest i de mindre søer, hvor fortyndingseffekten er mindst. På grund af opblanding vurderes effekten dog ikke at være så akut som ved vandløb, hvor kortvarige pulser med stor koncentration kan have stor betydning.

4.3.2 Eksempler fra danske søer

I det følgende er der givet nogle eksempler på hvordan grundvandet i forskellige sammenhænge kan påvirke danske søers miljøtilstand. Dels som følge af ændret vandstand eller temperatur betinget af klimatiske

variationer og dels som følge af menneskelig påvirkning af grundvandstilførsel.

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 (upubliceret).

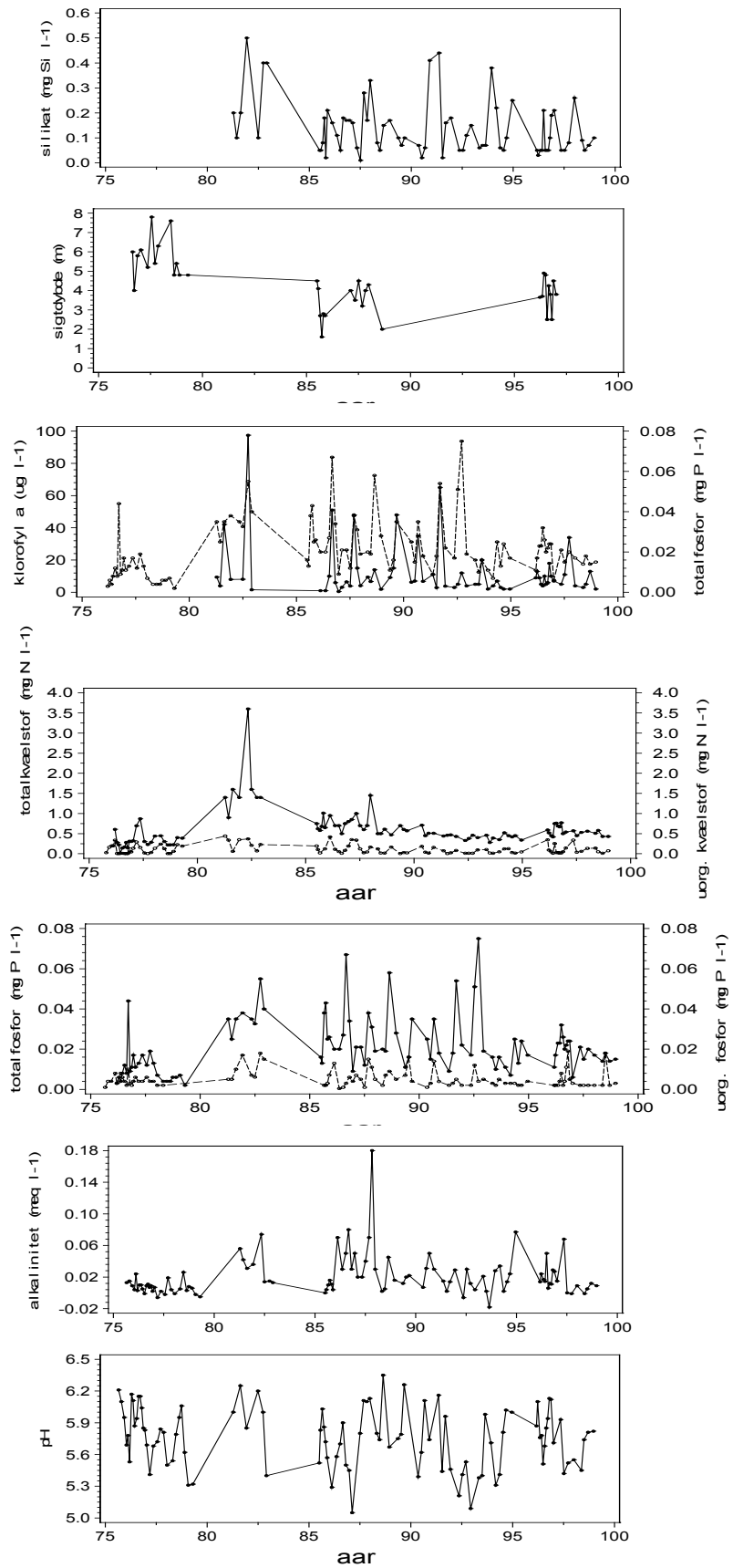
Søen, som er fredet, er ionfattig med lav eller ingen alkalinitet og en pH på 5-6. I 1977-80 var søen klarvandet med en sigtddybde på 4-7,8 m og store dele af bundet var dækket af grundskudsplanter (Strandbo, Tvepibet Lobelie og Sortgrøn Brasenføde). Koncentrationerne af planteplankton, fosfor og kvælstof var lave (Fig. 4.2).

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. 4.2). 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 sigtddybden 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.

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 kalkforurering 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.



Figur 4.2. Udviklingen i Ræv Sø 1975-2000.

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 sigtddybe 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)

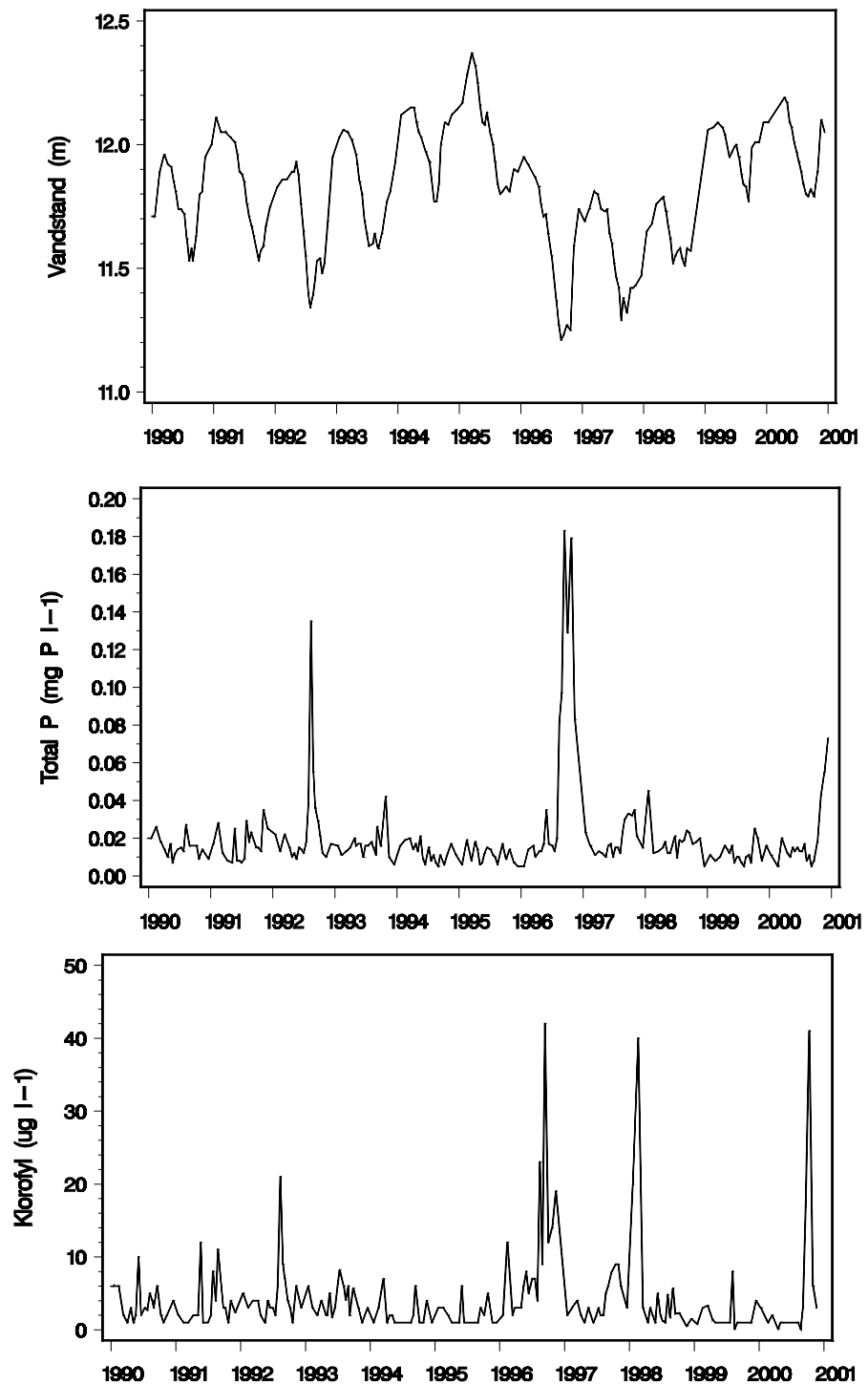
Grundvandet kan også have betydning for søvandets temperatur og dermed blandt andet være en væsentlig faktor i diskussionen vedr. klimaændringer. Grundvandets betydning kan illustreres med to søer fra Midtjylland, hvor grundvandsandelen af den samlede vandtilførsel er vidt forskellig. Således er vandtemperaturerne 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 4.1).

Tabel 4.1. 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 overvågningssøerne, 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 varierende vandstand, der blandt andet skyldes varierende grundvandsspejl i forbindelse med nedbørsrige og nedbørsfattige 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 i løbet af sommeren typisk med omkring ½ m med den laveste vandstand om sommeren (Fig. 4.3). 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 4.3. Målinger fra Holm Sø i Ribe amt, der viser vandstand (over DNN), søvandets indhold af total fosfor og klorofyl.

Perioder med lav vandstand har stor betydning for indholdet af fosfor i søvandet, hvilket ses af de markant højere koncentrationer, der blev set i 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 ofte at kunne føre til markant forhøjede koncentrationer af suspenderet stof og næringsstofindhold inden for korte tidsrum i lavvandede søer.

4.4 Marine områder

De kystnære danske farvande er som hovedregel belastede med næringsstoffer med en større eller mindre eutrofiering til følge. Primærproduktionen er i den største del af året begrænset af tilgængeligheden af kvælstof, og det er således tilførsel af kvælstof, der fastholder kystvandene i den eutrofierede tilstand. Kvælstoftilførslen via åerne til det marine miljø er godt kendt idet det hvert år opgøres ud fra et stort antal målinger i de danske vandløb. Mængden af kvælstof der tilføres med grundvand, der siver direkte ud i det marine miljø, kendes derimod ikke.

Det er for nuværende ikke muligt at forudsige præcise konsekvenser af tilførsel af næringssalte til kystnære farvande, og dermed heller ikke muligt at forudsige effekten af grundvandstransporterede næringsstoffer. De mere kvalitative sammenhænge er dog kendte: Øget næringsstofbelastning medfører et skifte fra stabile miljøer med havgræsser over mod mere ustabile miljøer domineret af makroalger og phytoplankton med en større hyppighed af iltsvind. Skiftet mod mere ustabile miljøer medfører også et skifte i faunasammensætningen mod en mindre divers fauna, hvor arter med stor spredningskapacitet og større tolerance mod iltsvind dominerer.

Der er kun ganske få publikationer, hvor sammenhængen mellem grundvandstilførte næringsstoffer og den økologiske tilstand i kystvande er undersøgt. I 2 tilfælde er udbredelsen af havgræsser forsøgt korreleret til kvælstoftilførsel via grundvand. I det ene tilfælde var det ikke muligt at påvise nogen sammenhæng (Rutkowski et al. 1999), mens der i det andet tilfælde var en fin negativ korrelation mellem kvælstoftilførsel og biomassen af ålegræs (Lyons et al. 1995). Der blev også fundet en positiv sammenhæng mellem kvælstoftilførsel og biomassen af makroalger.

I de danske farvande er effekten af næringssalte tilført med grundvand ikke undersøgt. Imidlertid eksisterer der en undersøgelse af relationen mellem total kvælstof i vandet og dybdegrænserne for bundvegetation (Nielsen et al. 1989). Dybdegrænsen angiver den maksimale dybde en given plante kan vokse på, og på større dybde er der for lidt lys til at planten kan klare sig. Der blev fundet en negativ korrelation mellem kvælstofindholdet i vandet og dybdegrænsen for både rodfæstede planter, brunalger og andre makroalger. Større kvælstofindhold i vandet mindsker således muligheden for at have en udstrakt bundvegetation i de kystnære farvande. Det er imidlertid ikke trivielt at estimere kvælstofindholdet i vandet ud fra kendskab til tilførslen af kvælstof og nogen relation mellem kvælstoftilførsel og bundvegetationens udbredelse kan således ikke opstilles.

I en mere overordnet artikel beskriver Valiela et al. (1990) effekterne af kvælstoftilførsel via grundvand. De konkluderer, at effekterne er: 1) En mindre stigning i næringssaltkoncentrationerne, 2) Væksten af løstliggende makroalger øges kraftigt, 3) Væksten af ålegræs nedsættes, 4) Hyppigheden af iltsvind forøges og 5) Faunaen ændres til en mere iltsvindtolerante typer. Disse konklusioner er understøttet af undersøgelser fra Waquoit Bay, Massachusetts.

4.5 Konklusion

Betydningen af den kvantitative og kvalitative tilførsel af grundvand for den miljømæssige tilstand i vandløb, søer og marine områder må forventes at aftage i den nævnte rækkefølge. For søer vil der dog være tilfælde, hvor disse er lige så følsomme for grundvandskuppet som tilfældet er i mindre vandløb. Samspillet mellem de hydrologiske og biologiske forhold kan imidlertid endnu ikke betragtes som fuldt belyst.

5 Værktøjer til analyse af samspil mellem grundvand og overfladevande

Hans Jørgen Henriksen og Brian Kronvang

5.1 Hydrologiske modeller

5.1.1 Problemformulering

Udfordringerne til hydrologisk modellering, som stilles af de vidensbehov, der er opridset i de foregående kapitler kan opdeles i to hovedpunkter:

- Et generelt behov for større fokus på stringens og kvalitetssikring i anvendelsen af hydrologiske modeller. Det er uddybet nærmere i afsnit 5.1.2.
- Beskrivelse af strømningsveje, opholdstider og stofomsætninger i de ånære områder stiller krav om en meget mere detaljeret beskrivelse end det hidtil er sket. Der er derfor behov for at undersøge om de eksisterende modelkoder er velegnede til sådanne nye typer af modelanvendelser. Dette aspekt er uddybet i afsnittene 5.1.3 - 5.1.5.

5.1.2 Retningslinier for modellering

Der er i disse år en voksende fokus på den faglige kvalitet af modelanvendelser indenfor vandressourceforvaltning. Indenfor de seneste år har der været taget en række initiativer både indenfor og udenfor Europa, med henblik på at forbedre troværdigheden af modelsimuleringer. Dette er bl.a. sket ved udarbejdelse af nye retningslinier for modellering fx. i Holland (Rijkswaterstaat, 2000), England, USA og Australien (Middlemis, 2000). I Danmark er nye retningslinier for grundvandsmodellering under udarbejdelse (Henriksen et al., 2001a; Henriksen et al., 2001b). Hvor de hollandske "best practices" søger at dække en række forskellige "domæner" i kredsløbet (fx. nedbør-afstrømningsmodel, umættet zone, grundvandsmodeller osv.) så dækker fx. de danske retningslinier primært grundvandsmodellering. De nuværende hollandske og danske retningslinier er derfor kun i begrænset form repræsentative eller harmoniserede med henblik på brug i forbindelse med integreret modellering, herunder beskrivelse af samspil mellem grundvand og overfladevand. Konsekvenserne af mangel på en videnskabelig baseret metodik, er at slutmodellerne og de beslutninger som baseres på disse er svære at gennemskue, kan være vanskelige at reproducere, og er vanskelige at forstå for tredjepart.

Der er et klart behov for at udbygge retningslinier for grundvandsmodellering, til at kunne håndtere integreret hydrologisk modellering og stoftransportmodellering, med den type modeller der er behov for i forbindelse med Vandrammedirektivet. Det vil også være konstruktivt såfremt der kan opstilles tilsvarende retningslinier for fx.

arbejdet med habitatmodeller. For stoftransport-modeller har det vist sig at det nok er muligt at udbygge retningslinierne. For reaktive modeller er der imidlertid påpeget et behov for et helt nyt sæt retningslinier (Henriksen et al., 2001a). En koordinering af disse aktiviteter synes påkrævet.

5.1.3 Eksisterende modelværktøjer

Vurdering af samspil mellem grundvand og overfladevand forudsætter en dynamisk og fysisk baseret numerisk model som beskriver de væsentligste strømningsprocesser i landfasen af det hydrologiske kredsløb lige fra snesmeltning, til aktuel fordampning, afstrømning på jordoverfladen, strømning over og under grundvandspejlet samt drænvandsafstrømningen og afstrømning i vandløb. En sådan model er typisk organiseret som et samlet integreret modelsystem bestående af en række delkomponenter (moduler) fx.:

- rodzonemodul (incl. snesmeltning, evaporation, transpiration og infiltration samt evt. nedsivning gennem umættet zone til grundvandspejlet), fx. DAISY (Hansen et al., 1991)
- modul for grundvandssystemet, incl. udveksling til overfladevand, fx. SHE (Abbott et al., 1986a/1986b; Barthurst og Cooley, 1995; Refsgaard og Storm, 1995) eller MODFLOW (McDonald og Harbaugh, 1988; Sophocleous et al., 1999)
- modul for vandløbssystemet incl. søer og vådområder, fx. fysisk baseret: MIKE 11 koblet til MIKE SHE (DHI, 2001a, Refsgaard et al., 1998; Sonnenborg et al., 2001)
- modul for fjorde og kystnære områder, fx. MIKE 21, MIKE 3 (DHI, 2001b).

Der eksisterer en lang række modelkoder, som ved første øjekast virker velegnede til formålet. Hvorvidt de i virkeligheden også er fuldt tilstrækkelige til de nye behov (se de næste to afsnit) med langt mere detaljerede simuleringer af forholdene i de ånære områder kan først endelig vurderes efter nogle forsøgsvisse anvendelser.

5.1.4 Modellering af vekselvirkning mellem grundvand og overfladevand (kvantitet)

De beskrivelser der anvendes på det mængdemæssige område, i de hydrologiske modeller i dag, er baseret på grundlæggende viden, bl.a. data fra den Internationale Hydrologiske Dekade (Freeze, 1974), og principper om vekselvirkningen mellem grundvand og overfladevand fra Suså og Karup undersøgelserne (Refsgaard og Stang, 1981; Miljøstyrelsen, 1983). Selvom denne viden har vist sig brugbar på stor regional skala (1000 km² eller mere) er den på mange måder utilstrækkelig. Et særligt problem udgør her problemet med den samlede forståelse af vandbalancen vi i dag står overfor (Refsgaard et al., 2001). Systematiske fejl på input kan medføre urealistiske parameterverdier og problemer med at overholde de performancekriterier der stilles til en given model, og dermed opnåelsen af konsensus omkring en given models brugbarhed (Henriksen, 2001b).

De integrerede modelopstillinger fra Danmark for fx. Suså, Karup Å, Tude Å, Århus området, Odense (Rasmussen et al., 1995; Christensen, 1994; Refsgaard og Stang, 1981; Miljøstyrelsen, 1983) har fokuseret på det hydrologiske kredsløb, herunder simulering af minimumsvandføringer under påvirkning af vandindvinding/markvanding og klima. Der er i forbindelse med den DK-modellen arbejdet videre med denne type model med en kobling af et relativt simpelt rodzonemodul (Christensen et al.,

2000) og en mere avanceret grundvands-/overfladevandsmodel baseret på MIKE SHE/MIKE 11 (Henriksen, 2001b; Henriksen et al., 1997; Henriksen et al., 1998; Sonnenborg et al., 2001). Når det gælder kvantitative forhold omkring vandkredsløbet og udveksling mellem grundvand og overfladevand for større oplande foreligger der relativ god erfaring incl. afprøvning af såvel koder som koncepter for modelopstilling under de forskellige geologiske forhold vi kender i Danmark. Modellerne er gode til at simulere vandbalanceforhold og grundvandsdannelse på større skala, men mindre gode til at simulere minimumsvandføringer og den nærmere vandudveksling i de ånære områder.

Medianmimumsvandføringer udgør et værdifuldt grundlag for kalibrering og validering af den rumlige variabilitet i de simulerede grundvandsafstrømninger til vandløb, men er samtidig en "stationær approksimation" af en størrelse som kan være relativ dynamisk (fx. betydelig årstidsvariation under visse geologiske forhold). Her er der behov for identifikation af bedre egnede indikatorer, som er mere relevante for habitatforholdene. Det tætte målestationsnet af faste vandføringsstationer med kontinuert registrering (Ovesen, et al., 2000) giver gode muligheder for udvikling og anvendelse af dynamiske indikatorer.

Når modeller ikke er så gode til at simulere minimumsafstrømninger skyldes det, at grundlaget for at parameterisere modellernes udveksling fra grundvand til overfladevand er for svagt, ligesom at de heterogene geologiske forhold og processer i ånære områder udgør en betydelig udfordring. Det er ikke muligt helt at "koble" parameterfastsættelsen til fx. den geologiske model (Dahl, et al., 1998). Det er derfor fortsat et centralt element i modelleringsprocessen at kunne "konceptualisere" og "parameterisere" de heterogene jordlag der styrer udvekslingen mellem grundvand og overfladevand, med et link til geologi og geomorfologi. I udlandet har fokus i de seneste år været rettet mod kombinerede felt- og modelstudier af detailprocesser omkring udvekslingen mellem grundvand og overfladevand bl.a. sammenstilling af den hydrauliske ledningsevne for kontaktzonen og studier af dennes dynamik (Calver, 2001; Montgomery and Dietrich, 1995). Andre studier har søgt at vurdere betydning af umættet/mættet zone forhold for udvekslingen (Bates et al., 2000) og har påpeget et behov for yderligere studier med inddragelse af flux målinger og tracerstudier med henblik på bedre kortlægning af 3D strømningsveje og opholdstider i ånære områder. makropore kan også have betydning for udvekslingens strømningsveje og hurtig gennemstrømning af øvre jordlag ved stor afstrømning (Montgomery and Dietrich, 1995; Siddle et al., 1995). Kombinationen af feltstudier og modellering vurderes som et stærkt værktøj i forbindelse med sådanne processtudier.

Med såvel de meget detaljerede kortlægningsdata (fra zoneringsen), det tætte net af faste vandføringsmålestationer og de unikke synkronmålingsdata fra Danmark, udgør forskning i udvikling af metoder til konceptualisering af hydrologiske processer og parameterfastsættelse for ånære områder et forskningsområde med et betydeligt potentiale og relevans, såvel ved studier i mindre skala, som ved operationalisering af denne viden til anvendelse på større skala. Vurdering af vandløbspåvirkning (påvirkningsgrader) som følge af vandindvinding ved analytiske modeller (Stang, 1982; Hunt, 1999; Nyholm, 2000) og numeriske modeller (Refsgaard og Hansen, 1982; Langhoff, 2001) udgør eksempler på et område med behov for operationelle metodikker til vandressourceforvaltningen. Betydning af "partiel peneretring" af vandløbet i akviferen og clogging (Zloknic og Huang, 1999) peger på at

vandløbets bredde, "penetrering" af grundvandsmagasiner og processer i skillefladen (clogging) mellem vandløb/vådområder/søer/hav og grundvand er vigtige parametre, der bør inddrages i analyserne af udvekslingen.

Det vurderes at der fortsat er et stort behov for at videreudvikle og afprøve metoder til 3D geologisk modellering, parameterfastsættelse, automatisk kalibrering og usikkerhedsvurdering, til brug for grundvands-/overfladevandsmodellering med distribuerede, dynamiske fysisk baserede modeller (Poeter og Hill, 1999; Hill, 1998; Gupta et al., 1998; Madsen, 2000 og Sonnenborg et al., 2001).

5.1.5 Modellering af det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand

Vurdering af stoftransport mellem grundvand og overfladevand vurderes at være mangelfuld, på grund af den manglende link mellem geologisk model og parameterisering af såvel hydrauliske forhold, redox forhold og andre parametre af særlig betydning for stofomsætning og stoftransport. Der er et klart behov for at undersøge hvordan disse forhold bedre kan kortlægges i 3 og 4 dimensioner, dvs. konceptualisering og parameterfastsættelse for ånære områder (Modica. et al., 1997). Bank storage processer er beskrevet i den udenlandske litteratur men betydningen heraf for danske forhold er i dag dårligt belyst (Kondolf et al., 1987, Sjodin et al., 2001), herunder bedre forståelse af kontaktzonens permeabilitet og dynamik (Woessner, 2000; Younger et al., 1993).

Behov for mere detaljeret modellering fx. i forbindelse med en kombination af feltstudier, hydrofacies modeller af udvekslingsdynamik i ådale og til søer og hav og modellering på mindre skala vurderes at være et stort behov med henblik på yderligere videnopbygning vedr. udveksling mellem grundvand og overfladevand. Det vurderes, at det i første omgang er omkring opstilling af "konceptuel" model, 3D geologisk model, ånære områders hydrofacies og parameterestimering, og i mindre grad omkring yderligere kodeudvikling at indsatsen i de kommende år skal fokuseres. Herved kan der evt. identificeres yderligere behov for kodeudvikling som giver større fleksibilitet omkring beskrivelsen af udvekslingen, kobling af modeller på forskellig skala, løsning af særlige numeriske problemer. Det er vigtigt at den nye viden operationaliseres så den er anvendelig af vandressourceforvalterne også i modelleringen på større skala for de enkelte distrikter. Der er i den forbindelse fortsat et behov for at styrke vandressourceforvalternes modelkompetance, idet de nuværende amter i dag hverken organisatorisk eller fagligt vurderes at kunne løfte opgaven med integreret modellering der skønnes nødvendigt i Vandrammesammenhæng.

Behovet for videnopbygning vedr. overgangszonen mellem grundvandet og overfladevandet (de ånære områder, søbunden, havbunden) og forståelse af strømningsveje fra grundvandsdannelse, gennem grundvandssystemet og gennem ånære områder til overfladevandet, er parallelle med vidensbehovene vedr. de kvantitative forhold, og bør kunne integreres hermed. Samspillet mellem de geologiske aflejringer (sedimentære facies) og den lokale geologi er her afgørende. Behovet er metoder til karakterisering af et område i rumlige elementer, som har ensartede geokemiske og hydrologiske karakteristika (hydrokemiske facies), som grundlag for beskrivelse af stofomsætning og skøn af parameterværdier (Sear et al., 1999; Morrice et al., 1997).

Redoxforhold er væsentlige eller ligefremt styrende for mange stoffer i grundvand (fx. fosfor, nitrat, miljøfremmede stoffer). Anvendelse af hydrologiske modeller og partikelbanemodeller som kan beskrive strømningsveje og stofomsætning ved passagen af forskellige redoxmiljøer, herunder i særdeleshed omkring ådalene, er vigtige værktøjer til analyse af strømnings- og transportveje samt til opstilling af massebalancer for de forskellige stoffer på oplandsskala. En væsentlig udfordring er her at benytte modellerne til en vidensopbygning, baseret på bl.a. feltstudier. Således er grundvandets strømningsveje fra grundvandszonen gennem "reaktoren" i ådalene til vandløbene i dag mangelfuldt belyst. Det er derfor i dag ikke muligt at opstille konsistente stofbalancer for fosfor, kvælstof og pesticider på oplandsniveau - specielt for de lidt større oplande.

5.1.6 Sammenfatning om hydrologiske modeller

Det primære problem i forbindelse med de hydrologiske problemer i dag er hvordan modellerne bruges. Fastlæggelse af det nødvendige kompleksitetsniveau til en given opgave, dvs. parameterfastsættelse, valg af nøjagtighedskriterier, kalibrerings- og valideringsmetoder og usikkerhedsanalyser på forskellig skala udgør de væsentligste udfordringer. Arbejdet med geologi i ånære områder, konceptuel model og tilvejebringelse af nødvendige datakrav bør have stor vægt. På visse områder er der dog behov for videreudvikling af modelkode, af hensyn til beskrivelsen af udveksling mellem grundvand og overfladevand, numeriske løsningsmetoder osv.

Der er på området hydrologiske modeller /analyseværktøjer primært behov for

- Fortsat udvikling af konceptuelle model for både grundvand og overfladevand. En række vandudvekslinger fx. grundvand-overfladisk afstrømning, grundvand-dræn og grundvand-vandløb er ikke tilstrækkeligt forstået ligesom modelkoder ikke fuldt ud understøtter en fleksibel håndtering. Det er vigtigt at kunne linke parameterfastsættelsen til hydrofacies/geologi
- Arbejdet med kompleksitet, detaljeringsgrad og forskellige skalaer er vigtig ved integreret modellering. Der er behov for yderligere analyser af forskellige typer modellering fx. flow, simulering af vandstand/hastighedsfordelinger og stoftransport og metodikker til kalibrering og validering af sådanne "komplekse" modeller
- Opstilling af harmoniserede retningslinier for modellering af grundvand, overfladevand og habitatmodeller
- Test cases (ånære områder). Fra rodzonen til vandløb. Strømningsveje, opholdstider og processer.

5.2 Habitatmodeller

5.2.1 Problemformulering

EU's Vandramme Direktiv sætter krav til indenfor Vanddistrikter at kunne udpege overfladevand i forskellige kategorier. Vedrørende vandløb opdeles der i naturlige vandløb, kunstigt skabte vandløb og stærkt modificerede vandløb. Indenfor hver af disse tre kategorier skal der ske en opdeling af vandløbene i typer. Alle vandløb indenfor vanddistriktet skal på baggrund af eksisterende og eventuel ny overvågning tildeles en økologisk status indenfor 5 klasser: Høj status (high), god status (good), moderate status

(moderate), dårlig status (poor) og meget dårlig status (bad). Den økologiske status skal bedømmes ud fra referencetilstanden (dvs. den uforstyrrede tilstand) både hvad angår de biologiske, fysisk-kemiske og hydro-morfologiske forhold. Vanddistrikterne skal indenfor en 15 års periode efter Vandramme Direktivets ikrafttrædelse sikre, at alle vandløb opnår en god økologisk status. Samtidig skal det sikres at kunstige vandløb og stærkt modificerede vandløb opnår et godt økologisk potentiale og en god kemisk status.

I udlandet er der i de senere år arbejdet meget med opstilling af metoder og empiriske habitat modeller, der kan benyttes til at beskrive den økologiske referencetilstand i vandløb indenfor forskellige økoregioner og/eller vandløbstyper ud fra en række forklarende fysisk-kemiske variable. De udviklede metoder og modeller kan for eksempel benyttes til at kvantificere eventuelle afvigelser fra referencetilstanden på en given vandløbsstrækning, ved at sammenligne de eksisterende biotiske forhold (fisk, makroinvertebrater og planter) med den af metoden/modellen forudsagte diversitet på et givet niveau (art, familie). Endvidere er der i udlandet arbejdet med at udvikle mere dynamiske habitatmodeller, som analyseværktøj til at vurdere de økologiske konsekvenser på biota af fx. et øget pres på grundvandsressourcen, etablering af reservoirer, vandløbsvedligeholdelse, mv.

I Danmark mangler vi i dag den nødvendige viden om referencetilstanden i de forskellige regioner og vi har derfor ikke mulighed for objektivt at vurdere den økologiske kvalitet i vandløb som krævet i EU's Vandramme Direktiv. Vi mangler i dag en grundlæggende viden om hvor stor betydning grundvandets mængde har for regulering af de økologiske forhold i vandløb og ånære arealer. Vi mangler ligeledes en grundlæggende viden om hvilke kvalitetskriterier der kan fastsættes for koncentrationen af naturlige og miljøfremmede stoffer i de strømmende vande set i forhold til tålegrænser for planter og dyr.

I det følgende gennemgås den internationale og danske vidensstatus omkring metoder og modeller til kortlægning og kvantificering af habitater i vandløb. Endelig peges der i et idekatalog på hvordan den manglende viden på området kan opnås.

5.2.2 Hvad menes der med fysiske habitater og hvorfor er de vigtige ?

Akvatiske habitater kan defineres som de lokale fysiske, kemiske og biologiske elementer som tilsammen danner levesteder for organismer. I den internationale litteratur er der mange beviser for at både kvaliteten og kvantiteten af tilgængelige habitater påvirker strukturen og sammensætningen af de tilstedeværende biologiske samfund både hvad angår fisk (fx. Milner et al., 1998; Pusey et al., 2000; Vismara et al., 2001), makroinvertebrater (Jowett et al., 1991; Quinn and Hickey, 1994; Peeters and Gardeniers, 1998; Schleiter et al., 1999; Turak et al., 1999; Marchant et al., 1999; Smith et al., 1999) og perifyton (Biggs et al., 1998). I forbindelse med anvendelsen af ordet 'habitater' er det vigtigt at holde sig for øje, at betegnelsen ikke alene omfatter en fysisk genkendelig form eller beregnbar størrelse, men at den skal have en påvist biologisk betydning. Det er her at samspillet mellem hydrologi, morfologi, kemi og biologi træder i karakter.

De fysiske habitater afspejler de natur- og kulturskabte påvirkninger af vandløb og opstår som interaktionen mellem fysiske strukturer i vandløb

(størrelse, form, hældning, bundsubstrat, brinkens form, mv.) og de hydrauliske forhold, der ved en given vandføring bestemmer dybdeforhold, strømhastighed, shear stress, mv. De fysiske habitater er ikke stabile størrelser men ændrer sig ned igennem vandløbet (udspring til munding), på tværs af vandløbet og ådalen og fra bunden mod vandoverfladen. Hertil kommer at de på grund af ændringer i vandføring varierer med tiden både hvad angår substratforhold (sedimenttransport og sedimentation) og vandløbets skikkelse og form (brinkerosion og løb i ådalen).

5.2.3 Hvorfor er der behov for at kortlægge fysiske habitater ?

Kortlægning og beskrivelse af de fysiske habitater har stor betydning indenfor fiskeøkologi især i forbindelse med ophjælpning af fiskebestande. Derudover er det benyttet i forbindelse med evalueringer af restaureringsprojekter i vandløb og ved fastsættelse af krav til minimums vandføringer ved opdæmninger af vandløb, oppumpning af drikkevand, mv. I mange år er de fysiske forhold blevet beskrevet i forbindelse med bedømmelser af vandløbskvaliteten både herhjemme og i udlandet. Det er dog først indenfor de senere år at der i Danmark og især i udlandet er blevet arbejdet med at udvikle standardiserede metoder til kortlægning af de fysiske habitater i vandløb. Det er stadigvæk få steder at hvor de fysiske habitater indgår som en integreret del af bedømmelser af vandløbskvaliteten (Raven et al., 1998).

5.2.4 Skalaens betydning

Mange af de eksisterende metoder til beskrivelse af fysiske habitater bliver anvendt på forskellige skalaer. Jo mindre skala, jo mere bliver de fysiske habitater og biota følsomme overfor forstyrrelser og det tager længere og længere tid at genskabe den oprindelige tilstand (recovery). Den mindste skala er punkter eller delområder af et vandløb (mikrohabitater), hvor de fysiske og hydrauliske forhold på selve levestedet for en organisme beskrives. Eksempler herpå er undersøgelser af habitatforholdene for de punkter i vandløb hvor fisk står eller hvor enkeltindivider af forskellige arter af smådyr lever. Sektioner af vandløbet (mesohabitater) er den næste skala og den identificerer delområder af vandløbet som er foretrukne levesteder for forskellige livsstadier af dyr eller planter. Et godt eksempel er laks og ørreders habitatkrav til gydepladser. Der er udviklet forskellige beskrivende systemer for mesohabitater, der dog alle indeholder den typiske opdeling af vandløbet i morfologiske elementer (stryg, høl, osv.). Den tredje skala er strækningsniveauet (makrohabitater) hvor både habitat- og biologiske forhold er mere stabile over tid, end ved de lavere niveauer. På dette niveau beskrives de dominerende fysiske forhold på strækningen, som substrat, hældning, dybde/bredde ratio, sinuositet, arealanvendelse på tilstødende arealer, sammen med de overordnede topografiske, geologiske, hydrologiske, og arealanvendelsesmæssige forhold. Det sidste niveau er hele vandløbsoplande. På dette niveau er det helt overordnede parametre som beliggenhed (længde og breddegrad), topografi, geologi, klima, arealanvendelse, spærringer, mv., der indgår i beskrivelsen af habitatforhold.

5.2.5 Metoder og index benyttet til kortlægning af fysiske habitater

Internationale erfaringer

I praksis arbejdes der oftest på strækningsniveau med beskrivelsen af fysiske habitater og beregning af forskellige former for index eller scores. Dette er tilfældet med de fleste af de habitat kortlægnings metoder, som er

udviklet i udlandet. En metode til kortlægning af fysiske habitater i vandløb er blevet udviklet af Rosgen (se fx. Thorne, 1997). Metoden er baseret på objektive og let målelige kriterier hvor strækninger på 1 niveau inddeles i 9 typer baseret på hældning, længdeform, tværsnitsform og bredde/dybde ration for derefter at blive yderligere inddelt på 2 niveau efter bund- og brinksustrat. Klassifikationssystemet kan anvendes til at sammenligne nuværende tilstand med en upåvirket tilstand, og der kan arbejdes med empiriske sammenhænge mellem tilstanden og vandføring, mv. Andre har udarbejdet metoder til klassificering af mesohabitat typer på baggrund af visuelt identificerbare primære og sekundære morfologiske, hydrauliske og vegetationsmæssige habitater på vandløbsstrækningen (Kershner and Snider, 1992). Typisk er der tale om habitater som stryg (lille og stort fald), høl (mange sekundære typer), kantzone, bagvand, trærødder, forskellige makrofyter, mv.

Det engelske River Habitat Survey (RHS) omfatter en kortlægning af fysiske strukturer i vandløbet, på dets bredder og omgivende land på 500 m lange strækninger af vandløb (Raven et al., 1998). Kortlægningen gennemføres ved en visuel inspektion langs vandløbet (af certificeret personale), der ved hjælp af en manual, klassificerer vandløb og ånære arealer ud fra ca. 200 parametre. I Storbritannien blev der i årene 1994-1996 indsamlet beskrivende data fra 3 naturlige eller semi-naturlige vandløb indenfor hver af i alt 1523 10x10 km grids (4569 strækninger). Ni vandløbstyper blev i første omgang defineret ud fra databasen baseret på overordnede forhold vedrørende geologi, hældning og arealanvendelse.

Den amerikanske Miljøstyrelse (US EPA) har udviklet et system til bedømmelse af vandløbsstrækninger (Rapid Bioassessment Protocol) (Plafkin et al., 1989). Udover bedømmelser af tilstanden ud fra fisk og makroinvertebrater anvendes en metode til evaluering af de fysiske habitater. Den indeholder tre niveauer: 1) substrat og skygning i vandløb; 2) vandløbets morfologi; 3) Udformning af brink og ådal. De tre niveauer tillægges forskellig betydning i den endelige score med størst vægt på den første gruppe og mindst på den sidste gruppe. Svagheden ved den amerikanske metode er at de tre indeks ikke er udviklet set i en sammenhæng og at det fysiske habitat index ikke er målrettet mod betydning for biota.

Danske erfaringer

I Danmark har amterne igennem mange år gennemført visuelle, subjektive registreringer af de fysiske forhold i vandløb på alle de lokaliteter hvor der er blevet gennemført bedømmelser af forureningsgraden. Oftest er der dog blevet anvendt vidt forskellige skemaer i de enkelte amter til støtte for karakteristikken af de fysiske forhold. De gennemførte registreringer af de fysiske forhold er meget subjektiv og bedømmelsen af de enkelte elementer (bredde, substrat, mv.) er formentlig gennemført på forskellig måde i de enkelte amter og af de enkelte personer involveret. Der har ikke i Danmark været gennemført forsøg på at teste sammenligneligheden af de udførte registreringer af de fysiske forhold. I forbindelse med indførelse af Dansk Faunaindeks er der sket en harmonisering af den fysiske bedømmelse så alle benytter samme skema og registrerer de samme variable. Kaarup (1999) har udarbejdet et forslag til nyt fysisk index til brug for entydig beskrivelse af de fysiske forhold i vandløb i Århus amt. De registrerede fysiske parametre er opdelt i positive og negative grupper og der er lavet en score for hver parameter. Positive parametre er eksempelvis forekomst af stryg/høl, mæanderbuer, gydegrus, sten, rødder, underskårne brinker, mv.,

mens negative parametre er sandvandring, blød bund, bredt vandløbsprofil, mv.

5.2.6 Statistiske metoder og modeller benyttet til kobling af biota og fysiske habitater

Internationale erfaringer

I de sidste 20 år er der i udlandet forsket i udvikling af metoder og modeller til kobling af fysiske habitater og biota. Der er både blevet forsket i udvikling af statistiske modeller til forudsigelse af levesteder og bestande for forskellige livsstadier af laks og ørred, andre fiskearter, makroinvertebrater og bentiske alger.

Fisk

HABSCORE er en simpel metode som bygger på empiriske sammenhænge mellem fisketæthed og kombinationer af oplands- og strækningsspecifikke oplysninger. HABSCORE er udviklet på baggrund af tætheder af laks (2 livsstadier) og ørred (4 livsstadier) og fysiske parametre fra 602 vandløbsstrækninger (30-100 m) i England og Wales (Milner et al., 1998). Pusey et al. (2000) har undersøgt sammenhængen mellem artstæthed og forekomst/fravær af enkelte fiskearter mod en række miljøvariable i Queensland, Australien. Data er indsamlet fra 4 større vandløbssystemer ved gentagen elbefiskning på i alt ca. 650 vandløbsstrækninger, der er 40 m i udstrækning. Miljøvariable dækker fra geografiske data til detaljerede fysiske data (bredde, substrat, middel strømhastighed, skjul, mv.) fra strækningen. Multivariat analyser blev gennemført vandløbssystem for vandløbssystem. Undersøgelsen viser at det er muligt at forudsige både artsdiversitet og forekomst/fravær i vandløb der har stabile afstrømning i modsætning til vandløb med store udsving i vandføring. Undersøgelsen viste også, at det hovedsageligt er de overordnede geografiske parametre, som har indflydelse på fiskebestanden (højde, afstand fra udspring, længdegrad, mv.).

Makroinvertebrater

Det engelske RIVPACS (River In Vertebrate Prediction And Classification System; Wright, 1989) er udviklet på baggrund af sammenhænge mellem makroinvertebrat samfund og de fysiske/kemiske forhold på i alt 438 upåvirkede (reference) vandløbsstrækninger i næsten 80 vandløbssystemer i Storbritannien. RIVPACS kan anvendes til at vurdere de nuværende økologiske forhold på en vandløbsstrækning i forhold til referencesituationen. Ud fra de indsamlede fysiske og kemiske data kan RIVPACS forudsige artssammensætningen på strækningen på forskellige sandsynlighedsniveauer. Marchant et al. (1999) har analyseret sammenhængen mellem makroinvertebrater (art eller slægt) og forskellige kemiske og fysiske parametre på baggrund af feltmålinger i 199 upåvirkede referencevandløb i 29 afstrømningsområder i Victoria, Australien. I alt 46 miljøvariable blev målt samtidig med prøvetagningen spændende fra oplandsdata, over kemiske data til strækningsspecifikke –og biologiske data (perifyton, trådalger, mv.).

Smith et al. (1999) har udviklet en metode til bedømmelse af vandløbskvaliteten i Australien (AusRivAS) baseret på makroinvertebrater og en række miljøvariable som indikatorer. Metoden er udviklet på baggrund af data fra 188 minimalt forstyrrede vandløbsstrækningen i Vestaustralien. Samtidig med prøvetagningen blev der målt 44 miljøvariable spændende fra oplandsdata, kemiske data til strækningsspecifikke data. Turak et al. (1999) opstiller en RIVPACS type

model baseret på undersøgelser af 250 upåvirkede vandløbsstrækninger i New South Wales, Australien. Ca. 30 fysiske, kemiske og vegetationsmæssige parametre blev registreret.

Planter

I årene 1978 og frem blev makrofytsamfundet i vandløb og på brink bedømt til art på mere end 1500 strækninger i 250 engelske vandløb alle med et tilnærmelsesvis intakt naturligt makrofytsamfund (Holmes et al., 1998). Ægte vandplanter (dykkede og submerse makrofyter) blev bedømt til artsniveau ud fra en check-liste på 223 arter i de fleste tilfælde af den samme bedømmer. Hvert sted blev den relative forekomst af makrofyter bedømt i 3 klasser og dækningsgraden bedømt i 3 klasser. Fysiske beskrivelser af vandløbet blev også opsamlet sammen med data om geologi, højde og hældning. Systemet er i dag udvidet til også at omfatte landplanterne i ådalen i et scoringsystem kaldet SERCON (Boon et al., 1997). Biggs et al. (1998) har påvist at fysiske forstyrrelser i forbindelse med afstrømningshændelser i vandløb kan være med til at regulere biomassen af bundlevende alger på strømmende steder (stryg og strømmende). Det gælder specielt i mindre vandløb, mens den fysiske forstyrrelse ikke er så betydende længere nedstrøms i vandløb.

Danske erfaringer

Landsdækkende og repræsentative undersøgelser af sammenhængen mellem fauna i vandløb og de fysiske forhold er ikke gennemført. I en enkelt undersøgelse er forureningstilstanden i mindre vandløb sammenlignet med de fysiske forhold baseret på amternes oplysninger (DMU, publicerede data). Der blev her konstateret sammenhænge mellem både et strømindex, et substrat index og et regulerings index og forureningsgraden. Sand-Jensen and Mebus (1998) har studeret forskellige plantearters modificerende indvirkninger på strømhastighed og turbulens i danske vandløb. De har vist at de enkelte plantearter danner sine egne helt specielle habitater ved at modificere strømmen omkring og inden i planteøerne og ved at påvirke sedimentations- og substratforhold. Indirekte effekter af dette er påvirkninger af fødegrundlag, iltforhold, mv.

Kronvang et al. (2001) gennemførte en mikrohabitat kortlægning af 5 delstrækninger af et restaureret vandløb med henblik på at kunne kvantificere effekten af restaureringen for de fysiske og biologiske forhold ved sammenligning til 2 opstrøms kontrolstrækninger. Friberg et al. (2001) testede sammenhængen mellem de fysiske habitater og indsamlede makroinvertebrater prøver (Surber sampler) på 5 replikater af hver habitattype på henholdsvis den restaurerede og den udrettede kontrolstrækning. I den multivariate analyse udskilte kun 2 af de 5 fysiske habitater sig tydeligt i forhold til invertebratsamfundet (grusstryg og kanthabitat). Fyns amt (2001) har analyseret sammenhængen mellem en række fysiske, kemiske og oplandsmæssige forhold (fx. spredt bebyggelse) og vandløbskvaliteten målt som faunaindeks i 52 mindre fynske vandløb (< 2 m brede). De mest betydende parametre til forklaring af faunaindeks var fysisk kvalitet og BI5, med førstnævnte som den der korrelerer stærkest.

Forskellen mellem de fysiske forhold og makrofytsamfundet er blevet undersøgt på syv vandløbsstrækninger, der var reguleret og kanaliseret og 7 strækninger der var naturligt slyngende (Baatrup-Pedersen et al., 1998). Der var næsten samme høje dækningsgrad af planter i de to typer vandløb, men den gennemsnitlige artsdiversitet var signifikant højere på de slyngede (22 arter), end på de regulerede strækninger (15 arter). Makrofytsamfundet ændrer sig ned gennem de danske vandløb (Sand-

Jensen et al., 2000). For eksempel falder dækningsgraden af planter med vandløbsstørrelsen på grund af den øgede dybde. Hyppigheden af amfibiske og sekundære planter falder også med vandløbsstørrelsen og arts sammensætningen af de ægte vandplanter ændres, så vandstjerne arter dominerer i små vandløb (< 3 m) og vandaksarter i større vandløb (> 9 m).

5.2.7 Hydrauliske modeller koblet til præferencekurver for biota

I udlandet er der i mange år forsket i koblingen mellem hydrauliske modeller og modeller der beskriver de optimale fysiske forhold for dyr og planter (præferencekurver). Disse modeller kan som regel gennemføre dynamiske beregninger af habitatforhold for fisk og makroinvertebrater på baggrund af input af døgnvandføringer. De fleste modeller er endimensionelle (1D), men enkelte har også arbejdet med 2D og 3D modeller.

Internationale erfaringer

Metoder til modellering af egnetheden af vandløbshabitater har været udviklet i 20 år. De bygger alle på feltmålinger af vandløbets skikkelse, vanddybde, strømhastigheder og substrat, der i en hydraulisk model simulerer ændringer i de fysiske forhold under forskellige vandføringer, koblet til præference kurver for biota. Modellerne opstilles ud fra feltmålinger i repræsentative tværsnit i et vandløbs længdeforløb. En omdiskuteret svaghed i modellerne er den simple beskrivelse af de fysiske habitater (hydrauliske forhold) der ofte er punktorienteret og endimensional, mens de habitater biota udnytter normalt har en større udstrækning og kun kan modelleres korrekt hydraulisk ved 2D eller 3D hydrauliske modeller (Crowder and Diplas, 2000).

PHABSIM der er udviklet i USA er den igennem tiden mest anvendte model til forudsigelse af egnetheden af habitater i vandløb ved forskellige vandføringer (fx. Bovee, 1982). Det er en 1D hydraulisk model, der bygger på Instream Flow Incremental Methodology (IFIM). RHYHABSIM er en videreudviklet version af PHABSIM fra New Zealand (Mosley and Jowett, 1999). RHYHABSIM bygger som PHABSIM på IFIM og præferencekurver for biota. Den opstilles enten for repræsentative tværsnit langs en vandløbsstrækning eller bedre efter en forudgående kortlægning af morfologiske elementer (stryg, høl, planteøer, kant, mv.), hvorefter et antal tværsnit udvælges tilfældigt indenfor hver habitattype.

Schleiter et al. (1999) har analyseret sammenhængen mellem makroinvertebrat samfund (individantal på artsniveau) og forskellige miljøvariable fra 3 tyske vandløb ved hjælp af neurale netværk (NN). Metoden ser ud til at være bedre til at beskrive de oftest ikke lineære sammenhænge mellem invertebrater og miljøvariable (bredde/dybde, substrat, BOD, mv.) end simple regressionssammenhænge.

Lamouroux et al. (1999) har anvendt en statistisk hydraulisk model og koblede denne til multivariate præference kurver for to fiskearter (døbel og karpe) i Rhone floden, Frankrig. I en undersøgelse fra en flod i Italien har Vismara et al. (2001) undersøgt muligheden for at udvikle habitat egnetheds kurver (Habitat Suitability Curves – HSC) på baggrund af målinger af de fysiske forhold (strømhastighed, dybde, substrat og skjul) på 528 standpladser for havørreder (*Salmo Trutta Fario* L.).

Peeters and Gardeniers (1998) har undersøgt muligheden for at anvende logistisk regression, som en metode til at definere habitat kravene for to bunddyrsarter i hollandske vandløb (*Gammarus fossarum* og *Gammarus pulex*). Ud fra et stort landsdækkende datasæt (ca. 4000 observationer) af sammenhængende data mellem de to bunddyrs arter og en række forklarende kemiske og fysiske variable opstillet de sandsynlighedskurver for arternes forekomst. Jowett et al. (1991) har undersøgt muligheden for at opstille præferencekurver for 12 arter af makroinvertebrater på baggrund af stratificeret prøvetagning i 4 vandløb i New Zealand. De opstiller præferencekurver for den sværeste art mod strømhastighed, dybde og substrat og finder at præferencekurver oftest er vandløbsspecifikke.

Danske erfaringer

På trods af den rimeligt store udbredelse af habitat-hydrauliske modeller i udlandet er de kun i meget begrænset omfang blevet benyttet i Danmark. Det skyldes for det første, at der ikke er udviklet/aftestet præferencekurver for biota i danske vandløb. Den anden grund er formentlig den manglende indsats forskningsmæssigt på dette område i Danmark. Lund og Clausen (1998) har som de første aftestet RHYHABSIM på Elverdamsåen på Sjælland. I den forbindelse anvendte de præferencekurver for forskellige livsstadier af ørred fra udenlandske undersøgelser. Fjordback et al. (2001) har i en undersøgelse af effekterne af genslyngningen af et dansk vandløb (Gelså i Sønderjylland) også anvendt RHYHABSIM. I en nyere undersøgelse omkring gydepladsers funktion er habitatkrav for ørredyngel blevet undersøgt (Pedersen et al., 1999). På baggrund af disse målinger er der lavet de første præferencekurver for ørredyngel baseret på undersøgelser i danske vandløb.

5.2.8 Sammenfatning og idekatalog

Danmark er langt bagefter når det gælder opstilling og anvendelse af habitatmodeller. Det gælder både når det drejer sig om metoder til at klassificere fysiske habitater, empiriske modeller til fastlæggelse af referencetilstand og egentlige dynamiske modeller til forudsigelse af hvad der sker ved en ændret management af vandløb og ånære arealer (vedligeholdelse, restaurering, oppumpning af vand, opstemninger, osv. Når vi skal i gang i Danmark er det vigtigt at bygge på den ret omfattende viden der nu eksisterer internationalt. De vigtigste punkter som litteraturen peger på er:

- At det er muligt at udvikle en empirisk model for sammenhængen mellem de fysiske, kemiske og geografisk relaterede forhold og biota i reference vandløb på strækningsniveau.
- Opstillingen af sådanne sammenhænge kræver et omfattende datamateriale (mange referencestrækninger i alle vandløbstyper og repræsentation af hele river kontinuum).
- Da der vil være ændringer gennem sæsonen er det vigtigt at en dansk habitatmodel som grundlag inddrager prøvetagning i flere sæsoner (forår, sommer, sensommer) og af en række fysiske, kemiske og biologiske data hvor planter indgår som modificerende element og selvstændig fysiske habitat.
- At præferencekurver for biota (fisk og smådyr) risikerer at ændre sig fra region til region eller fra vandløbssystem til vandløbssystem, måske på grund af en manglende beskrivelse af andre vigtige forudsætninger, som fx. temperatur, vandkvalitet, fødegrundlag, mv. i modellerne.

- Habitatmodeller inddrager kun de fysiske forhold ikke om fødegrundlaget er tilstede.
- De eksisterende dynamiske habitatmodeller inddrager ikke planter, som en vigtig modificerende faktor og vigtig habitat.
- At det er svært at opstille artsspecifikke præferencekurver for invertebrater.
- At det især er muligt at opstille præferencekurver for de forskellige livsstadier af laks, ørred og andre fiskearter igen skal planterne inddrages som centralt element.
- At RHYHABSIM kan videreudvikles til en brug for analyser på strækningsniveau i forskellige specifikke sammenhænge som ved projektering af restaureringsprojekter, analyse af minimums vandføringskrav ved vandindvindingsprojekter, effekter af klimaforandringer, etc.

Da Vandrammedirektivet direkte sigter mod en forbedring af de økologiske forhold i vandområderne har vi akut behov for mere viden om forhold der regulerer disse. Det gælder især for de hydrologiske og fysiske forholds betydning for opnåelse af høj økologisk kvalitet i danske vandløb.

Vidensbehovet vedrørende habitatmodeller kan opsummeres til at være:

- Standardiseret kortlægning af referencetilstanden i danske vandløb både hvad angår biota (fisk, makroinvertebrater, makrofyter, bundalger) og de fysiske, hydrologiske og kemiske forhold.
- Udvikling af et klassifikationssystem for danske vandløb.
- Udvikling af en landsdækkende eller regionsbaseret model til forudsigelse af referencetilstanden for biota.
- Udvikling af dynamiske habitatmodeller der kan anvendes til forudsigelse af ændringer i de økologiske forhold i vandløb og ådal ved forskellige typer af indgreb (vedligeholdelse, restaurering, etablering af vådområder, oversvømmede enge, mv).
- Udvikling af model til at forudsige den potentielt bedste tilstand for 'heavily modified waterbodies'

6 Sammenfatning om videnstatus og prioritering af vidensbehov

Videnstatus for de enkelte delområder fremgår af kapitlerne 2-5. Samlet kan vi sige at vi generelt har en omfattende viden og et særdeles godt datagrundlag i Danmark på vandområdet, specielt hvis vi sammenligner os med mange andre lande. Men megen af den viden er fremkommet gennem de sidste par årtier via forsknings- og monitoringsprogrammer der har haft et andet sigte end de målsætninger der skal forfølges i Vandrammedirektivet. Der har således i den periode ikke været forskningsprogrammer der fokuserer direkte på samspillet mellem grundvand og overfladevand og de forskellige monitoringsprogrammer har været sektoropdelt, dvs. et program for grundvand, et andet program for rodzoneprocesserne, et tredje program for overfladevand osv. Derfor har vi i Danmark på nogle områder stået næsten stille forskningsmæssigt, mens der er foregået interessante og relevante aktiviteter internationalt.

Som følge heraf er der blevet identificeret en række områder hvor der er vidensbehov, såfremt vi skal kunne gennemføre Vandrammedirektivet med en faglig standard der svarer til state-of-the-art. De enkelte emner, hvor der er behov for yderligere viden enten i form af grundlæggende ny viden og/eller i form af nye værktøjer til operationel administrativ brug er beskrevet på skemaform i form af et idekatalog i kapitel 7.

Projektgruppen har foretaget en prioritering af de mange emner. Projektgruppen er enige om, at alle emnerne i idekataloget er væsentlige i relation til Vandrammedirektivet, men at nogle af emnerne er mere vigtige end andre for sammenhængen mellem grundvand og overfladevand. Ved prioriteringen er der lagt vægt på følgende principper:

- De emner, hvor der er behov for enten grundlæggende ny viden og/eller nye administrative værktøjer, og som vurderes at være af meget afgørende betydning for den integrerede forvaltning, som Vandrammedirektivet foreskriver, er givet høj prioritet. Det er typisk områder, hvor vi i Danmark gennem de sidste par årtier er sakket bagud i forhold til international forskning.
- De emner, hvor der primært er behov for administrative værktøjer suppleret med grundlæggende viden på nogle områder og/eller som vurderes at være meget vigtig, men måske ikke afgørende alene i vandrammedirektivsammenhæng, er givet mellem prioritet.
- Mange af emnerne er "brede" forstået på den måde at de udover grundvand-overfladevands aspektet i vandrammedirektiv sammenhæng også er væsentlige i mange andre sammenhænge. De emner som ikke har "tyngdepunktet" i Vandrammedirektiv grundvand-overfladevands problemstillingen, er givet lav prioritet.

Prioriteringen har resulteret i at emnerne er inddelt i tre kategorier: Høj (A), Mellem (B) og Lav (C). Der er ikke foretaget nogen prioritering indenfor de tre respektive kategorier. En oversigt over vidensbehovene og deres prioritering er givet i Tabel 6.1 Tabel 6.1 Prioriteringen af vidensbehov

Prioritet	Idekatalog nr.	Emne	Kommentar
Høj prioritet (A)			
Høj	A-1	Metodik til undersøgelse af ådales geologi, geokemi og vandløbsmorfologi med henblik på at kunne beskrive vand- og stofomsætning i de ånære områder	Ny grundlæggende viden og værktøjer. Afgørende for grundvand-overflade interaktionen i ånære områder, både mht. vandmængder og -kvalitet
Høj	A-2	Undersøgelser af strømningsveje i overfladevand/grundvand på mark- og oplands skala	Ny grundlæggende viden og værktøjer. Afgørende for beskrivelse af stoffers skæbne fra rodzone til vandløb
Høj	A-3	Fastsættelse af mindste acceptable vandføring til sikring af god økologisk kvalitet (og målsætningsopfyldelse)	Udvikling af værktøj(er) til fastsættelse af acceptabel minimums vandføring
Høj	A-4	Sammenhængen mellem tilstanden i grundvand og i søer	Metoder og prognoseværktøjer til at vurdere effekten af ændrede grundvandsforhold i søer med stor grundvandsudveksling.
Høj	A-5	Definition af upåvirket tilstand	Fastsættelse af metodik for administrativ praksis
Mellem prioritet (B)			
Mellem	B-1	Koncentration af forurenende stoffer i grundvand og påvirkningen på overfladevand set i relation til referenceværdier	Undersøgelse af grundvandets eventuelle påvirkning af vandkvalitet i overfladevand.
Mellem	B-2	Kvantificering af vandbalancen og fordampningen på oplandsbasis	Også af afgørende betydning for grundvandszoner, beregning af grundvandsdannelse og nitratudvaskning
Mellem	B-3	Fosfor	Fastlæggelse af referencetilstand og viden om betydning af grundvand som transportvej til overfladevand.
Lav prioritet (C)			
Lav	C-1	Kvantificering af grundvandsafstrømnings regionale og tidlige variation	Værktøjsudvikling
Lav	C-2	Hydrokemisk og biologisk samspil mellem vandløb og ådale	Viden om samspillet mellem oversvømmelse, vegetation, grundvand og sedimentation af næringsstoffer i ådale.
Lav	C-3	Næringsstofudstrømning med grundvand til marine områder	Ny grundlæggende viden og nye værktøjer. Nødvendigt for at bestemme næringsstoffernes transport til marine områder
Lav	C-4	Parameterisering og usikkerheds-vurdering ved hydrologiske modeller af stor kompleksitet	Også af stor generel betydning, fx. ved grundvandszoner og regional modellering.
Lav	C-5	Referencetilstand og habitatmodeller i vandløb	Udvikling af dynamiske habitatmodeller som værktøj til forudsigelse af bl.a. økologisk referencetilstand.

7 Idekatalog

7.1 Høj prioritet (A)

A-1 DE ÅNÆRE OMRÅDER

Emne Metodik til undersøgelse af ådales geologi, geokemi og vandløbsmorfologi med henblik på at kunne beskrive vand- og stofomsætning i de ånære områder
Problemstilling Samspillet mellem grundvand og overfladevand er specielt vigtigt i de ånære områder. Det er forholdene i de ånære områder der er bestemmende for hvordan en grundvandsoppumpning påvirker vandløbet, ligesom omsætning af nitrat og andre forurenende stoffer i overgangszonen fra grundvand til vandløb kan have stor betydning for vandkvaliteten. Indtil videre har det ikke været muligt at skønne de hydrauliske og geokemiske parameterværdier der styrer henholdsvis de strømningsmæssige og de stofomsætningsmæssige processer uden at gennemføre detaljerede feltstudier i de konkrete områder. Det betyder at skøn over vandløbspåvirkninger og stofomsætninger (fx. nitratfjernelse) i ådale er behæftet med meget store usikkerheder.
Vidensstatus Nøglen til vurderingen af de komplicerede processer, der sker i de ånære områder, er en forståelse af den geomorfologiske og geologiske opbygning af denne zone. De få undersøgelser der tidligere er lavet i Danmark og udlandet af den ånære zone viser, at strømnings- og geomorfologiske forhold på såvel lille som større skala er kompleks (fx. Hoffmann et al., 1993; Brüsck og Nilsson, 1993). Nyere forskningsresultater (Langhoff, 2001) antyder dog at det måske er muligt at udnytte geologisk og morfologisk viden og data til at forklare en del af den naturlige variation i de hydrauliske parametre.
Fremtidigt vidensbehov Der er behov for at skabe en bedre forståelse af hvorledes processbeskrivelser og parameterværdier, der karakteriserer vandstrømninger og stofomsætninger i de ånære områder kan forklares og bestemmes på baggrund af geologisk og vandløbsmorfologisk viden. En sådan viden vil være en forudsætning for kvantitativt at kunne vurdere betydningen af de ånære områder for samspillet mellem grundvand og overfladevand, uden på forhånd at være nødt til at lave detaljerede feltundersøgelser på hver enkelt lokalitet.
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer Når et tilstrækkeligt vidensgrundlag er etableret vil der være behov for at udvikle operationelle værktøjer til bestemmelse af de geologiske, geokemiske og vandløbsmorfologiske parametre der er styrende for strømningsveje og stofomsætning i udstrømnings zonen på lille og større skala. Metoderne skal tage udgangspunkt i anvendelse af let tilgængelige eksisterende data såsom flyfoto, satellitdata, hydrologiske data, vandløbsmorfologiske data, geologiske data og geokemiske data. Værktøjerne skal målrettes mod anvendelse i de amtskommunale forvaltninger.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• Der skal udvikles en metodik, som med udgangspunkt i geologiske aflejringer (sedimentære facies) kan benyttes til karakterisering af rumlige elementer, der har ensartede geokemiske og hydrologiske karakteristika (hydrokemiske facies), samt til at skønne hydrauliske og geokemiske parameterværdier for disse elementer ud fra eksisterende data.• Metodikken skal testes og videreudvikles på nogle få repræsentative ånære områder, hvor der på forholdsvis lille skala indsamles detaljerede feltdata.• Endelig skal det forsøges at afprøve hvorvidt det er muligt at anvende metodikken på andre områder på såvel lille som stor skala, idet der her kun benyttes eksisterende data.

<p>Emne Undersøgelse af strømningsveje i overfladevand/grundvand på mark- og oplandsskala.</p>
<p>Problemstilling Kvantificering af strømningsveje og opholdstider på oplandsskala fra vandet infiltrerer i marken til det strømmer ud til overfladevand i fx. vandløb eller sø er vigtige for at kunne beregne forurenende stoffers skæbne. For eksempel forsvinder størstedelen af den nitrat der udvaskes fra rodzonen inden den når vandløbet, men det vides ikke i hvilke grundvandslag og/eller anære områder det sker. Som et andet eksempel kan nævnes, at vi i dag har en mangelfuld viden om hvor meget af afstrømningen der i et givet vandløb stammer fra henholdsvis overfladisk afstrømning, drænvandsafstrømning og afstrømning via forskellige grundvandslag. En sådan forståelse er nødvendig for at kunne lave bare nogenlunde sikre skøn over hvor meget af de forurenende stoffer, som siver ud fra rodzonen, der efterfølgende nedbrydes inden de når vandløbet og dermed hvor meget grundvandet påvirker vandkvaliteten i overfladevand.</p>
<p>Vidensstatus Der er i dag generelt en tilstrækkelig viden om de overordnede strømningsveje til at gennemføre studier af grundvandets trykniveauer og vandløbenes vandføringer. Erfaringerne fra analyserne (med og uden modeller) af grundvandsdateringer i Danmark og resultater fra udenlandske undersøgelser viser dog at denne viden ikke er tilstrækkelig til at kunne give en nøjagtig beskrivelse af vandets strømningsveje, opholdstider og dermed alder. Denne viden er nødvendigt for at kunne beregne transport og omsætning af opløste stoffer. Der er fra udlandet både på områderne "streamflow generation" og "hydrogeomorphic components" foretaget en række studier af overfladenære afstrømningskomponenters virke og betydning. En række danske studier er desuden gennemført for forskellige oplande af strømningsveje i grundvand (fx. SMP 96 og i relation til zoner), som viser at kendskab til strømningsveje, opholdstider og redoxzoner er et brugbart instrument til en første vurdering af mulige konsekvenser af en given punktkilde/fladekilde.</p>
<p>Fremtidigt vidensbehov Der er behov for at få en bedre forståelse af vandets strømningsveje og opholdstider fra jordoverfladen, via grundvandssystemerne til det dukker frem som overfladevand i vandløb, søer eller kystnære områder. Herunder er der behov for at opnå en bedre forståelse af betydningen af afløbsløse huller, drænrør og præferentielle strømningsveje i geologiske formationer. På baggrund af den forbedrede procesforståelse er der behov for at udvikle og teste metodikker til hvordan dette bedst muligt kan beskrives med hydrologiske modeller, således at det på baggrund af eksisterende data vil blive muligt at forudsige vandets strømningsveje og opholdstider under forskellige hydrogeologiske situationer i Danmark.</p>
<p>Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer Når et tilstrækkeligt vidensgrundlag er etableret vil der være behov for at lave vejledninger for hvorledes eksisterende værktøjer kan benyttes bedst muligt. Metoderne skal kunne tage udgangspunkt i eksisterende data og skal målrettes mod anvendelse i de amtskommunale forvaltninger.</p>
<p>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gennemførelse af undersøgelser af vandets strømningsveje og opholdstider i nogle få repræsentative oplande. Der skal fokuseres på samspillet mellem grundvand og overfladevand over en længdestrækning i størrelsesordenen ½ - 5 km. Undersøgelserne bør gennemføres som kombinerede felt- og modelstudier med indragelse af forskellige sporstof- og dateringsmetoder og med en modellering med en diskretisering i max. 20 m. Det forventes ikke at være behov for udvikling af nye modelkoder, men snarere for at eksperimentere og afprøve eksisterende koder. • Udarbejdelse af vejledninger for hvordan modeller kan benyttes til at beskrive vandets strømningsveje og opholdstider under forskellige danske hydrogeologiske situationer.

A-3 VANDFØRING OG VANDLØBSØKOLOGI

Emne Fastsættelse af mindste acceptable vandføring til sikring af god økologisk kvalitet (og målsætningsopfyldelse).
Problemstilling Oppumpning af grundvand til markvanding og drikkevandsformål medfører lokale og regionale problemer med opretholdelse af tilstrækkelig vandmængde i vandløbene. Herved ændres (forringes) habitatkvaliteten i vandløbene. Især mange af de små vandløb tørrer ud eller vandføringen reduceres i et sådant omfang, at vandløbets økologiske forhold forarmes.
Videnstatus Mange af de grundlæggende mekanismer er velkendte, og der er udviklet metoder til bl.a. fastsættelse af vanddækket areal, habitat kvalitet, præference kurver for en række invertebrater og fisk etc. Den nuværende viden er imidlertid vanskelig at operationalisere, og administrative afgørelser om tilladelse til indvinding af grundvand er typisk baseret på skøn. Amterne inddrager forskellige parametre i vurderingerne.
Behov for grundlæggende viden Megen basal viden eksisterer, men der er behov for at kunne belyse sammenhængen mellem samtidigt virkende faktorer (vandføring, fysiske forhold, spildevand etc.) for de økologiske forhold.
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer Der savnes et objektivi redskab til brug hos de teknisk/administrative myndigheder (amterne) der kan fastlægge krav til mindste vandføringen, og dermed fastsætte størrelsen af den maksimalt acceptable grundvandsindvinding til sikring af god økologisk kvalitet i vandløbene.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• På kort sigt: Eksisterende metoder fra bl.a. England bør afprøves under danske forhold for at undersøge om erfaringer herfra kan anvendes her i landet.• På længere sigt: Der bør foretages en udvikling af værktøjer der bygger på allerede opnåede erfaringer, og som sikrer, at flere samtidigt virkende antropogene faktorer kan adskilles. Det skal fx. kunne vurderes, hvordan den mest optimale indsats kan foregå (fx. spildevandsrensning kontra begrænsning af indvinding af grundvand?).

A-4 GRUNDTVAND OG 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 (fx. via resuspension) og biologiske (fx. 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 overvågningssøer 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 er dermed på et niveau, der kan have stor betydning for vandkvaliteten i mange søer. Eventuelle sæsonmæssige variationer i udvekslingen mellem søvand og grundvand er ligeledes dårligt belyst. Betydningen af 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. Dette gælder ikke mindst de næringsfattige søer, hvor en lille ændring i næringsstofftilførsel kan have stor betydning for vandkvaliteten. Der er også et behov for et øget kendskab vedr. den sæsonmæssige udveksling (indsivning/udsivning) af grundvand og søvand.
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer Der er behov for udvikling af metoder og prognoseværktøjer, der kan vurdere konsekvenserne af ændrede grundvandsforhold i de søer, hvor grundvandsudvekslingen udgør en betydelig del af den samlede vandbalance.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• 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 næringsstoffkoncentrationer 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.

A-5 DEFINITION AF UPÅVIRKET TILSTAND

Emne Etablering af metodik for estimering af referencetilstand eller upåvirket tilstand som krævet i Vandrammedirektivet, specielt på områder som er afhængige af samspillet mellem overfladevand og grundvand.
Problemstilling Et af de helt centrale elementer i Vandrammedirektivet er at fastlægge referencetilstanden, eller den upåvirkede tilstand, for vandets mængde, vandets kvalitet og økologi. De hydrologiske og økologiske forhold vi kender i Danmark i dag er imidlertid kulturbestemte. Wilhelm udvalget konstaterede eksempelvis at "der er sket en omfattende udtørring af det danske landskab. Tidligere tiders afvandrings- og dræningsprojekter, der blev gennemført for at give plads til opdyrkning og skovplantning, har betydet at det danske landskab kun har få områder tilbage. Fra 1960 og frem har vandindvinding til brug for husholdninger, industri og markvanding yderligere medvirket til at udtørre landskabet." Endvidere har klimavariationerne gennem de sidste århundreder i høj grad påvirket økosystemernes funktion. Fastsættelse af upåvirket tilstand involverer mange aspekter, hvoraf kun nogle er centrale for samspillet mellem overfladevand og grundvand. Men spørgsmål om minimumsvandføringer, de ånære områders funktion med forskellige grader af dræning/vandløbsrenovering og vandkvaliteten er dog afgørende afhængige af overfladevands-grundvands interaktionen.
Vidensstatus Der eksisterer i dag ingen almen accepteret metodik til fastsættelsen af den upåvirkede tilstand og det er langt fra nogen uproblematisk sag. For overfladevands vedkommende foregår der et Europæisk udvalgsarbejde (EU Water Directors, Working Group 2.3 "Develop guidance on classification of inland surface water status and identification of reference conditions"), som vil være et nyttigt grundlag for det videre arbejde.
Fremtidigt vidensbehov Der er ikke behov for egentlig grundforskning.
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer Der er behov for at få udviklet og testet metodikker til fastsættelse af referencetilstanden svarende til den upåvirkede situation. I den forbindelse skal der træffes nogle vigtige valg om hvor hvilke(t) historisk(e) og kulturgeografisk(e) referencetidspunkt(er) der skal tages udgangspunkt i.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• Klarlægning af for hvilke parametre der skal defineres referencetilstande.• Opgørelse af mulige historiske tidspunkter (scenarier) der kan benyttes som udgangspunkt, samt hvilke metoder og datagrundlag der kan benyttes.• Eksempler på opgørelse af referencetilstande for de forskellige scenarier.• Valg af scenarie og udarbejdelse af detaljeret metodik så administrationerne i de enkelte vandområdedistrikter kan fastsætte referencetilstanden. Valget af scenarie skal ske i tæt dialog med det politiske system.

B-1 GRUNDEVANDS PÅVIRKNING AF VANDKVALITETEN I OVERFLADEVAND

<p>Emne Koncentrationer af forurenende stoffer i grundvand og påvirkningen på overfladevand set i relation til referenceværdier</p>
<p>Problemstilling Vandudvekslingen mellem grundvand og overfladevand har stor betydning for vandkvaliteten og økologien i overfladevande. En sammenstilling af data fra grundvandsovervågningen og økotoxikologiske grænseværdier for overfladevand viser at grundvandet de fleste steder må formodes at indeholder et eller flere tungmetaller i koncentrationer, som hvis de fandtes i overfladevand ville give problemer for bl.a. fisk. Udstrømningen af punktkilder er et andet eksempel hvor vandkvaliteten og –økologien kan påvirkes. I forbindelse med amternes udpegningskriterium været så vidt muligt at undgå arealer der indeholdt kendte punktforureningskilder der måtte være en trussel mod grundvandsressourcen på det pågældende sted. Men i forbindelse med Vandrammedirektivet vurderes punktkilderne overalt i oplandet at få en betydelig opmærksomhed, da de potentielt kan have negative effekt på vandkvaliteten i overfladevande. Den administrative praksis med hensyn til fastsættelse af acceptable påvirkninger på overfladevand ud fra fagligt funderede referenceværdier i forbindelse med bl.a. VVM sager er ikke faglig veldokumenteret.</p>
<p>Vidensstatus Generelt er vores viden om vandløbskvalitet og –økologi mht. samspillet mellem grundvand og overfladevand mangelfuld. Eftersom langt hovedparten af overfladevandet stammer fra grundvandet, er det interessante spørgsmål, hvor stor en del af tungmetallerne der udfældes eller på anden måde forsvinder fra vandfasen i overgangszonen fra grundvand til vandløb og i selve vandløbet. Det spørgsmål kan der ikke svares entydigt på med den eksisterende viden. Samtidig har vi mangelfuld viden (data) om de maksimale forekomster af fx. tungmetaller, pesticider, PCB, PAH, mv. i drænvand og vandløb ?</p>
<p>Fremtidigt vidensbehov Der vil være behov dels for at få etableret et overblik over hvor stort det potentielle problem i virkeligheden er og dels at få lavet nogle stofs specifikke undersøgelser af kemiske processer og parameter værdier for de kemiske miljøer der eksisterer i overgangszonen fra grundvand til overfladevand.</p>
<p>Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bedre data om de maksimale koncentrationer af tungmetaller og miljøfremmede stoffer i dræn og vandløb. • En analyse af grundvandskvaliteten ud fra referenceværdier som er relevante for overfladevande. • En vurdering af hvilke ændringer der formodes at ske i grundvandskoncentrationerne i overgangen til overfladevande. • Udvikling af værktøj til at vurdere den mulige påvirkning på overfladevand af forurenende stoffer i grundvand på grundlag af eksisterende grundvandskvalitetsdata og viden om den transformation der sker i overgangszonen.
<p>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden</p> <ul style="list-style-type: none"> • I samarbejde med amterne udarbejdes et register over punktkilder der kan være til potentiel fare for udstrømning i overfladevande fra grundvandszonen. Derved opnås en landsdækkende oversigt over problemets omfang. • Undersøgelser af hvorledes de forskellige kemiske stoffer omsættes i overgangszonen mellem grundvand og overfladevand.

B-2 VANDBALANCE OG FORDAMPNING

Emne Kvantificering af vandbalancen og fordampningen på oplandsbasis.
Problemstilling En korrekt kvantificering af arealnedbør og fordampning er afgørende for vurdering af vandbalance forhold i forskellige sammenhængen fx. overvågning, opgørelse af udnyttelig grundvandsvandressource, kvantificering af vandkredsløbet ved brug af hydrologiske modeller og i forbindelse med zoner.
Vidensstatus Fra Susá og Karup undersøgelser og andre undersøgelser har man tidligere kunnet få vandbalancen til at gå op på oplandsbasis, dog med væsentlig mindre nedbørskorrektion og evt. korrektion af fordampning. Nyere undersøgelse (Refsgaard <i>et al.</i> , 2001) har vist at der er en manglende konsistens i vandbalancen for både LOOP oplande og på større skala (fx. DK-model) når nye klimadata fra DMI anvendes. Det ser ud til at fordampningen generelt er underestimeret og at grundvandsdannelse og afstrømning generelt overestimeres med 5-30 %. Andre forklarende faktorer kunne dog være at der er systematiske fejl på vurdering af nedbørskorrekationer, afstrømningsmålinger eller restled i vandbalancen (fx. grundvandsafstrømning til hav eller "afdunstning" fra grundvandet).
Fremtidigt vidensbehov Paradigme skift fra modifieret penman til penman-montieth vegetationsafhængig fordampning. Konsistens mellem nedbørskorrektion, potentiel fordampning, afstrømning osv. Ensartet metode til håndtering af 10x10/20x20 km klimadata på oplandsniveau (forskellige skalaer). Kvantificering af grundvandsafstrømning til hav, søer og ud af oplande. Integrerede usikkerhedsestimater (såvel enkelte led i vandbalancen som samlet usikkerhed).
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer Behov for at opnå en beskrivelse af en anvendelse af eksisterende data som på konsistent vis sikrer at vandbalancen på oplandsbasis ikke indeholder ensidige fejl.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• Der gennemføres tværgående vandbalancestudier (felt + model) i 2-3 større oplande (>500 km²) hvor randbetingelser har mindre betydning, og med mere detaljerede målinger.• Sammenligning af forskellige nedbørskorrekationer og fordampningsberegningemetoder på stor skala og vurdering af konsekvenser for forskellige led i vandkredsløbet.

B-3 FOSFOR

Emne Fosfor
Problemstilling EU's Vandramme Direktiv sigter mod en forbedring af de økologiske forhold i vandløb og kræver at de til enhver tid gældende vandkvalitetsforhold holdes op mod en referencetilstand. I Danmark har vi allerede en stor datamængde fra den kemiske overvågning af grundvand, jordvand, drænvand, vandløb, søer og fjorde som kan anvendes ved fastlæggelse af referencetilstanden. Især for fosfor men også for nogle af de miljøfremmede stoffer er der dog transportveje som er dårligt belyst og som ser ud til at have afgørende betydning for det enkelte stofs forekomst i overfladevand. Det drejer sig især om de erosionsbetingede transportveje, samt nedvaskningen af opløste og partikelbundne stoffer fra kritiske kildeområder.
Vidensstatus Vi har i Danmark allerede en omfattende viden om forekomsten af fosfor i vandløb og grundvand fra den landsdækkende og regionale overvågning. Desuden er der gennemført flere forskningsprojekter både om fosfors forekomst og transportveje. Der er dog stadig betydelige huller i vor viden. Det er videnshuller som er afgørende for at kunne anvende viden i vandløbsoplande i den praktiske planlægning af foranstaltninger til nedbringelse af forureningen med fosfor.
Fremtidigt vidensbehov Der er behov for at få en bedre viden dels om de forskellige processer der styrer udvaskning, transport og omsætning af fosfor og dels om forforkredsløbet på oplandsskala. Det er en nødvendig forudsætning for at kunne etablere en effektiv plan for nedbringelse af fosforforureningen til vore overfladevande.
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer <ul style="list-style-type: none">• Udvikling af værktøjer til udpegning af kritiske kildeområder i vandløbsoplande hvad angår fosfordedvaskning og erosionsbetinget tab.• Udvikling af metoder til at kvantificere hvad erosionsbetinget tab og makropore strømning betyder for forekomst af miljøfremmede stoffer i overfladevand.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• Der gennemføres koblede eksperimentelle og markstudier af fosfortab via nedvaskning. Undersøgelser skal omfatte et antal replikater af danske jorder både teksturelt og fosforstatus.• Betydningen af makropore- og sprækkestrømning for tab af miljøfremmede stoffer og fosfor på forskellige danske jordtyper (drænede jorder).

C-1 GRUNDVANDSSTRØMNINGENS REGIONALE OG TIDSLIGE VARIATION

<p>Emne Kvantificering af grundvandsafstrømningens regionale og tidslige variation.</p>
<p>Problemstilling Grundvandsafstrømning til vandløb (Darcy flow) har en betydelig regional og tidslig variation. Medianminimum anvendes i dag til en række administrative forhold (bl.a. tilladelser til spildevandsudledning, dambrugsproduktion, vandindvinding mv.). Af hensyn til en mere kvalificeret og ensartet anvendelse af medianminimum i vandressourceforvaltningen er det nødvendigt at opbygge et bedre kendskab til det reelle grundvandsbidrag, herunder den tidslige variation over året. Herved kan årsgennemsnit (andel af samlede afstrømning) og variationsramme af Darcy grundvandsafstrømning kortlægges ud fra afstrømningsmålinger og baseflowseparationsmetoder for forskellige landsdele og hydrogeologiske forhold. Samtidig er der behov for at se nærmere på mere egnede statistiske mål for grundvandsafstrømningen end medianminimum.</p>
<p>Vidensstatus Datagrundlaget for en kvantificering af den regionale variation i medianminimum foreligger med et i international målestok unikt datagrundlag i form af et meget tæt vandføringsmålestationsnet (> 400 stationer) og tilmed et stort antal synkronmålingsundersøgelser, fra et net med endnu større detaljeringsgrad. Fra fx. DK-modellen vides at baseflow (Darcy flow) fra grundvand til vandløb har en væsentlig årstidsvariation, således at årsmiddelværdien for baseflow er 1.1 – måske 5 gange større end den fastlagte medianminimumsværdi. Dette faktum indgår imidlertid ikke i administrationen på baggrund af medianminimum i Danmark.</p>
<p>Fremtidigt vidensbehov Dokumentation af modelbaseret viden i form af nærmere analyser af de mange afstrømningsmålinger der foreligger og at udarbejde landsdækkende kort der angiver Darcy flowets andel af den samlede afstrømning og årlig variationsramme af baseflow (årstidsvariation).</p>
<p>Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer Bedre metoder til hydrografopsplnitning i forhold til målinger, vandkemi/aldersdatering mv.</p>
<p>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden Litteraturundersøgelser af forskellige baseflowseparationsmetoder (traditionel, vandkemi/dateringsbaserede og baseret på fysisk baserede, distribuerede modeller). Kombination af feltstudier og modelstudier på forskellige skalaer med henblik på kvantificering af Darcy grundvandsafstrømning til vandløb, herunder regionale og tidslige variationer indenfor oplandet. Undersøgelse af afstrømningstidsserier og kvantificering af tidslige og regionale variationer i baseflow under forskellige hydrogeologiske forhold med identifikation af betydende parametre.</p>

C-2 VANDLØB OG ÅDALE

Emne Hydrokemisk og biologisk samspil mellem vandløb og ådale.
Problemstilling I danske ådale er der på grund af den store modifikation af vandløbets morfologi oftest ikke noget hydrologisk samspil mellem vandløbet og ådalen i form af tilbagevendende oversvømmelser og ind- og udsivning af vand gennem den hyporheiske zone. I naturlige vandløbssystemer er dette en økologisk vigtig proces både for planter, dyr og stof.
Vidensstatus Betydningen af samspil mellem vandløb og ådal er i dag et vigtigt forskningstema i mange lande. I Danmark findes der kun en meget lille viden på området. Der er gennemført en del projekter i lille skala til beskrivelse af grundvandets strømning gennem enge og omsætningen af nitrat via denitrifikation. Der er også lavet enkelte undersøgelser af betydningen af oversvømmelser for stoftilbageholdelse.
Fremtidigt vidensbehov <ul style="list-style-type: none">• Oversvømmelse, vandskifte og sedimentation af fosfor og kvælstof i forskellige ådalstyper.• Vegetationsmæssige forhold i ådale med forskel i grundvandsstand og hydrologisk samspil med vandløb.• Fosforomsætning på ånære arealer i forhold til jordtyper, vandmætning, redoxforhold, mv.• Denitrifikation i forbindelse med oversvømmelser af ådale.• Betydning af vand og stofudveksling gennem hyporheiske zone.
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer <ul style="list-style-type: none">• Opbygning af ekspertsystem til forudsigelse af grundvandets strømning i ådale.• Metoder til opskalering af viden om denitrifikation i våde enge.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• Kortlægning af betydningen af det hydrologiske samspil i naturlige vandløbssystemer for stofomsætning og -tilbageholdelse og vegetationsforhold.• Undersøgelser af de abiotiske og biologiske effekter af at ændre det hydrologiske samspil mellem vandløb og ådale.• Eksperimenter vedrørende fosforsorption og -frigivelse under forskellige ådalsforhold (jordtype, vandmætning, redox, mv).• Ådalen som bufferzone for stof tilført fra oplandet via grundvand, drænvand og overfladevand.

C-3 GRUNDVAND OG MARINE OMRÅDER

Emne Betydningen af havbunden for fjernelse af næringsstoffer fra udstrømmende grundvand
Problemstilling I Danmark kan man ud fra grundvandsmodellering estimere grundvandstilførslen til de marine områder. For yderligere at estimere næringstransporten er det nødvendigt at kende grundvandets indhold af næringsstoffer samt at kende processerne, der potentielt kan påvirke næringssaltkoncentrationerne undervejs fra grundvandsmagasinerne til det marine miljø. Grundvandets indhold af næringsalte kendes, mens der ikke er nogen viden om processerne, der påvirker grundvandets sammensætning.
Vidensstatus Fra udenlandske undersøgelser findes der eksempler på, at denitrifikationen i havbunden er i stand til at fjerne mere end halvdelen af nitraten fra grundvandet på dets vej gennem de øverste 40 cm af havbunden. Imidlertid er der også eksempler på, at der ikke sker nogen fjernelse, og det er derfor svært at generalisere. Der eksisterer ingen danske undersøgelser, og der er kun få udenlandske. Der kan potentielt ske en meget stor fjernelse af nitraten i havbunden, men der er kun meget begrænset viden om, hvad der regulerer denne.
Behov for grundlæggende viden <ul style="list-style-type: none">• Estimering af transporten af nitrat med udsivende grundvand til det marine miljø i danske farvande• Estimering af den kvantitative rolle af fjernelsen af nitrat fra grundvandet på det vej gennem jordbund og havbund• Studier af reguleringen af denne fjernelse
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer <ul style="list-style-type: none">• Model til forudsigelse af den kvantitative betydning af nitratfjernelsen ud fra kendskab til havbundens sammensætning og den underliggende geologi• Indbygning af ovenstående model i mere overordnede modeller til vand og næringsstoftransport til fjorde og kystnære områder
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden Målet er at finde sammenhænge mellem sedimentkarakteristika, geologi og biogeokemiske processer, der tillader opstilling af en model, der i et givet område skal kunne forudsige både transporten af nitrat ud mod havbunden og fjernelsen af denne i havbunden. Der udvælges områder, hvor der er et godt kendskab til geologien og grundvandet langs kysten, således at transporten af nitrat med grundvandet ud til havbunden kan beregnes. Ved direkte målinger kan nitrattransporten med udsivende grundvand bestemmes og områder, hvor der fjernes nitrat ved grundvandets passage gennem havbunden, kan identificeres. I disse områder kan et mere detaljeret studie foretages. Det ville være vigtigt at bestemme størrelsen af fjernelsen og dennes regulering ved direkte målinger af de biogeokemiske processer i havbunden. Et sådant studie skulle i givet fald udføres over en tidshorisont, der tillader identifikation af eventuelle årstidsvariationer i både de biogeokemiske processer og grundvandets mængde og nitratindhold. Det må desuden forventes at svingninger relateret til tidevandscyklus kunne være betydende. Ovennævnte studier kunne gennemføres på flere lokaliteter og sideløbende skal målinger til karakterisering af sedimenterne, grundvandet og evt. de geologiske forhold, hvis disse ikke allerede kendes.

C-4 PARAMETERISERING OG USIKKERHEDSVURDERINGER

Emne Parameterisering og usikkerhedsvurdering i forbindelse med transiente, fysisk baserede og distribuerede hydrologiske modeller på stor skala /med stor kompleksitet (grundvands-/overfladevand).
Problemstilling Hydrologiske modeller til regional modellering bliver nødvendige værktøjer i forbindelse med Vandrammedirektivet og forvaltning af vandressourcen. Hydrologiske modeller på stor skala forudsætter stringente metodikker til konstruktion, parameterfastlæggelse, opstilling af nøjagtighedskriterier, kalibrering, validering og usikkerhedsvurdering. Automatisk kalibrering er et vigtigt redskab men et meget tidskrævende redskab med de metoder der i dag kendes.
Vidensstatus Automatisk kalibrering af komplekse transiente modeller er forsøgt er forsøgt af forskellige danske forskergrupper på forskellige oplande. For Karup oplandet er der således benyttet multi-objektive metoder (shuffled complex evaluation) og MIKE SHE. Stationær kalibrering af DK-model Sønderjylland er gennemført med UCODE og MIKE SHE med efterfølgende god overgang fra stationær til dynamisk model. Gradient-baseret optimering, GLUE-metodik og multi-objektiv metodik har været afprøvet på Gjærn Å oplandet Fra udlandet har der endvidere været anvendt nye metoder baseret på Bayesian recursive estimation, hvorved der eventuelt kan opnås en væsentlig effektivisering af den automatiske kalibrering, idet parametrene løbende ”opdateres” under hver kørsel efter at ny information er analyseret (fx. en ny hændelse stor/eller lav afstrømning).
Fremtidigt vidensbehov <ul style="list-style-type: none">• Gevinsten ved automatisk contra manuel kalibrering.• Egnethed af automatiske kalibreringsmetodikker og usikkerhedsvurdering ved stor modelkomplexitet og transiente modeller for grundvand/overfladevand (ca. 100.000 beregningsselementer).• Behov for at fastlægge metoder til vurdering af nødvendig modelkomplexitet til forskellige forhold• Fastsættelse af nøjagtighedskrav (performance kriterier).
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer <ul style="list-style-type: none">• Udarbejdelse af vejledninger for hvilken modelkompleksitet der bør anvendes i hvilke situationer.• Udarbejdelse af vejledninger for automatisk kalibrering.
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• Identifikation af metodikker ud fra litteratur og erfaringer fra udlandet.• Modelstudier for 3-4 oplande med opstilling af transiente teknikker for (fx. Gjærn, Karup) og test af metodik for 1-2 DK-model oplande).• Vidensyntese med vurdering af afviklingstider, reproducerbarhed, objektivitet og nytteværdi (i forhold til manuel kalibrering og validering).

C-5 REFERENCETILSTAND OG HABITATMODELLER I VANDLØB

Emne Referencetilstand og habitatmodeller i vandløb
Problemstilling EU's Vandramme Direktiv sigter mod en forbedring af de økologiske forhold i vandløb og kræver at de til enhver tid gældende forhold holdes op mod en referencetilstand. Vandramme Direktivet kræver også at danske vandløb beskrives fysisk og at deres grad af fysisk modificering kan beskrives. I Danmark mangler vi den nødvendige viden om den kemiske, fysiske og biologiske tilstand i og omkring upåvirkede eller ringe påvirkede vandløb, dels med henblik på en klassifikation af de danske vandløb, dels for at kunne forudsige referencetilstanden på en given vandløbsstrækning. Vi mangler også at udvikle habitatmodeller som gør det muligt for myndigheder, at analysere de økologiske konsekvenser af ændringer i grundvandsudnyttelse, vandløbsrestaurering, vandløbsvedligeholdelse, samt udformning og tilstand af bræmme og ådal.
Vidensstatus I udlandet er der i de senere år arbejdet meget med opstilling af empiriske habitat modeller, der kan benyttes til at beskrive den økologiske referencetilstand i vandløb indenfor forskellige økoregioner og/eller vandløbstyper ud fra en række forklarende fysisk-kemiske variable. De udviklede metoder og modeller kan for eksempel benyttes til at kvantificere eventuelle afvigelser fra referencetilstanden på en given vandløbsstrækning, ved at sammenligne de eksisterende biotiske forhold (fisk, makroinvertebrater og planter) med den af metoden/modellen forudsagte diversitet på et givet niveau (art, familie). Endvidere er der i udlandet arbejdet med at udvikle mere dynamiske habitatmodeller, som analyseværktøj til at vurdere de økologiske konsekvenser på biota af fx. et øget pres på grundvandsressourcen, etablering af reservoirer, vandløbsvedligeholdelse, vandløbsrestaurering, mv.
Fremtidigt vidensbehov <ul style="list-style-type: none">• Standardiseret kortlægning af referencetilstanden i danske vandløb både hvad angår biota (fisk, makroinvertebrater, makrofyter, bundalger) og de fysiske, hydrologiske og kemiske forhold.
Behov for operationalisering og udvikling af metodikker/værktøjer <ul style="list-style-type: none">• Udvikling af et klassifikationssystem for danske vandløb.• Udvikling af en landsdækkende eller regionsbaseret model til forudsigelse af referencetilstanden for biota.• Udvikling af dynamiske habitatmodeller der kan anvendes til forudsigelse af ændringer i de økologiske forhold i vandløb og ådal ved forskellige typer af indgreb (vedligeholdelse, restaurering, etablering af vådområder, oversvømmede enge, mv).• Udvikling af model til at forudsige den potentielt bedste tilstand for 'heavily modified waterbodies'
Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden <ul style="list-style-type: none">• Der gennemføres en landsdækkende kortlægning af referencetilstanden i vandløb og ånære arealer ved standardiserede feltundersøgelser af de biologiske, fysiske og kemiske forhold på et stort antal uforstyrrede vandløbslokaliteter i Danmark og eventuelt lignende økoregioner i udlandet (baltiske lande og Polen).• Der gennemføres koblede eksperimentelle og feltstudier med henblik på udvikling af præferencekurver for indikator organismer (livsstadier af ørred, eventuelt andre fiskearter, samt makroinvertebrater).• Eksisterende og/eller nye dynamiske habitatmodeller udvikles af autentis på danske vandløb.

8 Referencer

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a) An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physical-Based, Distributed Modeling System. *J.Hydrol.* 87, 4559.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986b) An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modeling System. *J.Hydrol.* 87, 61-77.

Ambus, P. og Hoffmann, C.C. (1990) Kvælstofomsætning og stofbalance i ånære områder. NPo-forskning fra Miljøstyrelsen, Nr. C13, 65 pp.

Armitage, P.D., Moss, D., Wright, J.F. and Furse, M.T. (1983) The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites. - *Water Res.* 17: 333-347.

Atkinson, TC (1978) Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes, In: *Hillslope hydrology* (M.J. Kirkby, ed.), pp.73-120, John Wiley, New York.

Baatrup-Pedersen, A, Riis, T.og Larsen, S. (2001) Planter i naturlige og regulerede vandløb. *Vand & Jord* 5, 101-104.

Barthurst, J.C. and Cooley, K.R. (1995) River-Aquifer exchange in the SHE catchment modeling system. In: Younger et al. 1995.

Bates, P.D., Steward, M.D., Desitter, A., Anderson, M.G., Renaud, J.P. and Smith, J.A. (2000) Numerical simulation of floodplain hydrology. *WATER RESOUR RES* 36, 6-7, pp.2517-2529

Biggs, B.J.F., Kilroy, C. and Lowe, R.L. (1998) Periphyton development in three valley segments of a New Zealand grassland river: Test of a habitat matrix conceptual model within a catchment. *Archiv fur Hydrobiologie* 143(2), 147-177.

Blicher-Mathiesen, G. (1997) Kvælstoffjernelse i enge. Ph.D.-rapport. Aarhus Universitet.

Blicher-Mathiesen, G., McCarty, G.W. and Nielsen, L.P. (1998) Denitrification and degassing in groundwater estimated from dissolved dinitrogen and argon. *J. Hydrol.* 208, 16-24.

Blicher-Mathiesen, G. and Hoffmann, C.C. (1999) Denitrification as a sink for dissolved Nitrous Oxide in a freshwater riparian fen. *Journal of Environmental Quality*, 28(1), 257-262.

Blicher-Mathiesen, G. and Hoffmann, C.C. (2000) Groundwater dissolved N₂ and N₂ degassing

measured in a riparian wet meadow: Initial observations. *Grassland Science*, 5, 490-492.

Boon, P.J., Holmes, N.T.H., Maitland, P.S., Rowell, T.A. and Davies, J. (1998) A system for evaluating rivers for conservation (SERCON): development, structure and function. In Boon, P.J. and Howell, D.L. (Eds), *Freshwater Quality: Defining the undefinable ?*, The Stationary Office, Edingburgh, 299-326.

Bovee, K.D. (1982) A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodologies. US Fish and Wildlife Service Instream Flow Information Paper No. 12, Report No. FWS/OBS-82/26, USFWS, Fort Collins, USA.

Calver, A. (2001) Riverbed permeabilities: Information from pooled data *GROUND WATER*. 39 (4), pp.546-553.

Cambareri, T.C. and Eichner, E.M. (1998) Watershed delineation and ground water discharge to a coastal embayment. *Ground Water* 36: 626-634.

Cey, E.E., Rudolph, D.L., Parking, G.W. and Aravena, R. (1998) Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada. *J HYDROL* 210 (1-4), pp.21-37.

Cherkauer, D.S. and Carlson, D.A. (1997) Interaction of Lake Michigan with a layered aquifer stressed by drainage. *GROUND WATER* 35 (6), pp.981-989.

Christensen, S. (1994) Hydrological model for the Tude Å catchment. *Nordic Hydrology*. 25, pp. 145-166.

Christensen, B.C., Henriksen, H.J. and Nyegaard, P. (2000) Test af DK-modellens rodzonemodul. <http://www.vandmodel.dk/rodzonetest.pdf> .

Crowder, D.W. and Diplas, P. (2000) Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance. *Journal of Hydrology* 230(3-4), 172-191

Dahl, M., Harrar, W.G., Henriksen, H.J. og Knudby, C.J. (1998) Intergrated hydrological modelling of freshwater resources in Denmark – Distribution of aquifer –river exchange parameters. *Gambling with Groundwater – Physical, Chemical, and Biological Aspects of Aquifer-Stream Relations*. Brahana et al. (eds.) pp. 607-616.

Dahl, M., Nilsson, B., Jacobsen, O.S., Aamand, J., Juhler, R.K., Larsen, L., Hoffmann, C.C., Jørgensen, C., Engesgaard, P., Christensen, B.S.B. and Jensen, S. (2000) Transport, nedbrydning og sorption af pesticider i et vådområde. *Miljøforskning*, nr. 42, pp. 29-31.

DHI (2001a) Beskrivelse af MIKE SHE kan findes på: <http://www.dhisoftware.com/mikeshe/Description/index.htm>

DHI (2001b) Beskrivelse af MIKE 3 kan findes på: <http://www.dhisoftware.com/mike3/index.htm>

- Extence, C.A., Balbi, D.M. and Chadd, R.P. (1999) River flow indexing using British benthic macroinvertebrates: a framework for setting hydroecological objectives. *Regulated rivers: Research and Management* 15: 543-574.
- Fjorback, C., Kronvang, B., Friberg, N. og Pedersen, M.L. (2001) Danske vandløb og habitatmodeller. Indlæg på Dansk Vandressource Komite.
- Freeze, R.A. (1974) Streamflow generation. *Rev. Geophys. And Space Physics* 12 (4), pp.627-647.
- Friberg, N., Hansen, H.O. and Kronvang, B. (2001) Habitat surveys as a tool to assess the benefits of stream rehabilitation II: Macroinvertebrate communities. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27(3), 1510-1514.
- Fyns Amt (2001) Vandløb 2000. Fyns amt, maj 2001.
- Fyns Amt (2000) Vandløb 1999. VANDMILJØovervågning. Fyns Amt, Vand- og Miljøafdelingen. 135pp.
- Fyns Amt (1995) Arreskov Sø 1994. Natur- og vandmiljøafdelingen.
- Gerla, P.J. (1999) Estimating the ground-water contribution in wetlands using modeling and digital terrain analysis. *WETLANDS* 19 (2) pp.394-402.
- Grant, R., Blicher-Mathiesen, G., Paulsen, I., Jørgensen, J.O., Laubel, A.R., Jensen, P.G., Pedersen, M.L. og Rasmussen, P. (2001) Landovervågningsoplande 2000. Faglig rapport fra DMU nr. 376, <http://www.dmu.dk>, December 2001.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. (1998) Toward improved calibration of hydrological models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resour. Res.* 34 (4), pp. 751-763.
- Guyonnet, D.A. (1991) Numerical modeling of effects of small-scale sedimentary variations on groundwater discharge into lakes. *LIMNOL OCEANOGR* 36 (4), pp.787-796.
- Hagelskær B., Madsen, A.G., Olsen, M.S. og Iversen, T.M. (1988) Rævsø – en hedesø under forandring. *Vand & Miljø* 2: 65-67.
- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E. og Svendsen, H. (1991) Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model Daisy, *Fertilizer Research*, 27, pp. 245-259.
- Heathcote, J.A., Jones, M.A. and Herbert, A.W. (1996) Modelling groundwater flow in the Sellafeld area. *QUART J ENG GEOL* 29, pp59-81.
- Henriksen, H.J. and Madsen, B. (1997) GEOLOGI – Nyt fra GEUS, Nr. 2, 1997: VANDRESSOURCER Temanummer.
- Henriksen, H.J. (2001a) National Vandressourcemodel. Slutrapport for projektkontrakt 1996-2000. GEUS rapport 2001/29 (in Danish). http://vandmodel.dk/slutrapport_2001-29.pdf.

- Henriksen, H.J. (2001b) Fra boringsdatabasen JUPITER til DK-grundvandsmodellen. *Geologi – Nyt fra GEUS*. Nr. 3. November 2001.
- Henriksen, H.J., Sonnenborg, T., Christiansen, H.B., Refsgaard, J.C., Harrar, B., Rasmussen, P., Brun, A. (2001a) Retningslinier for opstilling af grundvandsmodeller. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr. 17. 2001
- Henriksen, H.J., Refsgaard, J.C., Sonnenborg, T.O., Gravesen, P., Brun, A., Refsgaard, A. og Jensen, K.H. (2001b) STÅBI i grundvandsmodellering. GEUS rapport 2001/56.
- Henriksen, H.J., Knudby, C., Rasmussen, P. og Nyegaard, P. (1997) National vandressource model. Modelopstilling og kalibrering for Fyn. GEUS rapport 1997/139.
- Henriksen, H.J., Trolborg, L., Knudby, C.J., Dahl, M., Nyegaard, P., Jakobsen, P.R. og Rasmussen, P. (1998) National Vandressource Model. Sjælland, Lolland, Falster and Møn. GEUS report 1998/109 (in Danish). <http://www.vandmodel.dk> .
- Hill, M.C. (1998) Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigation Report 98-4005, Denver, Colorado, USA.
- Hoffmann, C.C., Dahl, M., Kamp-Nielsen, L. og Stryhn, H. (1993) Vand- og stofbalance i en natureng. Miljøprojekt nr. 231, 150 pp, Miljøstyrelsen (in Danish).
- Hoffmann, C.C. (1996) Fate of phosphate, nitrate, and other elements during short-term flooding of a riparian meadow. In: Kronvang, B. Svendsen, L.M and Sibbesen, E. (Eds.) Sediment and Phosphorus, Erosion and delivery, transport and fate of sediments and sediment-associated nutrients in watersheds, pp. 135-142. Proceedings from an international workshop held in Silkeborg, Denmark, October 9-12, 1995. Ministry of Environment and Energy, 150 pp. - NERI Technical Report No 178.
- Hoffmann, C.C. (1998a) Nutrient retention in wet meadows and fens. PhD thesis, University of Copenhagen, Freshwater Biological Institute, and National Environmental Research Institute, Department of streams and Riparian Areas, 134 pp.
- Hoffmann, C.C. (1998b) Nitrate removal in a regularly flooded riparian meadow. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26, 1352-1358.
- Hoffmann, C.C., Pedersen, M.L., Kronvang, B.K. and Øvig, L. (1998) Restoration of the Rivers Brede, Cole and Skerne: A joint Danish and British EU-LIFE demonstration project, IV - Implications for nitrate and Iron transformation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 8, no 1, pp. 223-240
- Hoffmann, C.C., Vinther, F.P. and Jacobsen, O.S. (2000) Nutrient dynamics in a meadow grassland under contrasting hydrological conditions. *Grassland Science in Europe* 5: 427-430.
- Hoffmann, C.C., Pedersen, M.L. and Laubel, A.L. (2000) Headwater

restoration of the river Gudenå – 2. Implications for nutrients in riparian areas. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27 Vol. 1, pp.602-609.

Hoffmann, C.C., Rysgaard, S. and Berg, P. (2000) Denitrification Rates Predicted by Nitrogen-15 Labeled Nitrate Microcosm Studies, In Situ Measurements, and Modeling. J. Environ. Qual. 29(6), 2020-2028.

Holmes, N.T.H., Boon, P.J. and Rowwell, T.A. (1998) Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 8, 555-578.

Hultberg, H. (1988) Critical loads for sulphur to lakes and streams, In: Nilsson, J. and Grenfeld. P. (Eds), Critical loads of sulphur and nitrogen. Report from a workshop held at Skokloster, Sweden, 19-24 March, 1988. Miljørapport 1988:15, Nordic Council of Ministers, København, 185-200.

Hunt (1999) Unsteady stream depletion from ground water pumping. Ground Water, 37(1) 98-102.

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.

Jowett, I.G., Richardson, J., Biggs, B.J.F., Hickey, C.W. and Quinn, J.M. (1991) Microhabitat preferences of benthic invertebrates and the development of generalized delectidium spp habitat suitability curves, applied to 4 new-zealand rivers. New Zealand Journal Of Marine And Freshwater Research 25(2), 187-199.

Kaarup, P. (1999) Indeks for fysisk variation i vandløb. Vand & Jord 6, 136-139.

Kershner, J.L. and Snider, W.M. (1992) Importance of a habitat level classification system to desing instream flow studies. In Boon, P.J., Calow, P. and Petts, G.E. (Eds) River Conservation and Management, John Wiley, Chichester, 179-193.

Kondolf, G.M., Maloney, L.M. and Williams, J.G. (1987) Effects of bank storage and well pumping on baseflow, Carmel river, Monterey-county, California. J HYDROL 91 (3-4), pp.351-369.

Kreuger, J. (1999) Pesticider in the environment – atmospheric deposition and transport to surface waters. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, AGRARIA 162, Uppsala, 207 p.

Kronvang, B., Strøm, H.L., Iversen, H.L., Hoffmann, C.C., Jørgensen, J.O., Laubel, L. and Vejrup, K. (2001) Subsurface drainage loss of modern pesticides: A comparison of catchment and experimental field results. Poster presented at the 8th Symposium on Chemistry and Fate of Modern Pesticides, August 21-24 2001, Copenhagen, Denmark.

Kronvang, B., Hansen, H.O., Friberg, N., Larsen, S.E., Fjorback, C. and Johnsen, R. (1998) Habitat surveys as a tool to assess the benefits of stream rehabilitation I: The physical dimension. Verh. Internat. Verein. Limnol. 27, 1510-1514.

Lamouroux, N., Doutriaux, E., Terrier, C. and Zylberblat, M. (1999) Modelling impacts of minimum flow management on fish communities of

the Rhone River, France. *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture* 352, 45-61.

Lamouroux, N., Capra, H. and Pouilly, M. (1998) Predicting habitat suitability for lotic fish: Linking statistical hydraulic models with multivariate habitat use models. *Regulated Rivers-Research and Management* 14(1), 1-11.

Langhoff (2001) Evaluation of ground water stream interaction on an outwash plain using hydrological and geomorphological methods. Progress report for a PhD study. Aarhus University.

Li, L., D.A. Barry, F. Stagnitti, and J.Y. Parlange (1999) Submarine groundwater discharge and associated chemical input to a coastal sea. *Water Resour. Res.* 35: 3253-3259.

Lund, T.J. og Clausen, B. (1998) Levevilkår for ørred. *Vand & Jord* 5, 116-119.

Madsen, H. (2000) Automated calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *J.Hydrol.* 235 (3-4), pp.276-288.

Marchant, R., Hirst, A., Norris, R. and Metzeling, L. (1999) Classification of macroinvertebrate communities across drainage basins in Victoria, Australia: consequences of sampling on a broad spatial scale for predictive modelling. *Freshwater Biology* 41(2), 253-268.

McDonald, M.G. og Harbaugh, A.W. (1988) A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S., Geol.Surv. Tech. Water-Resour. Invest., Book 6, Chap. A1.

Middlemis, H. (2000) Draft groundwater flow modelling guideline. Murray-Darling Basin Commission. Aquaterra consulting Pty Ltd. Western Australia. Project No. 125. July 2000.

Miljøstyrelsen (1983) Karup undersøgelsen. Miljørapport 51.

Milner, N.J., Wyatt, R.J. and Broad, K. (1998) HABSCORE - applications and future developments of related habitat models. *Aquatic Conservation-Marine And Freshwater Ecosystems* 8(4), 633-644.

Modica, E., Reilly, T.E. and Pollock, D.W. (1997) Patterns and age distribution of ground-water flow to streams. *GROUNDWATER RESOUR RES* 32 (7), pp.523-537.

Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1995) Hydrologic processes in a low-gradient source area. *WATER RESOUR RES.* 31 (1), pp. 1-10.

Moore, W.S. (1996) Large groundwater input to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments *Nature* 380: 612-614.

Morrice, J.A., Valett, H.M., Dahm, C.N. and Campana, M.E. (1997) Alluvial characteristics, groundwater-surface exchange and hydrological retention in headwater streams. *HYDROL PROCESS* 11 (3), pp.253-267.

Mosley, P. and Jowett, I. (1999) River morphology and management in New Zealand. *Progress in Physical Geography* 23(4), 541-565.

Nilsson, B., Hoffmann, C.C., Dahl, M., Engesgaard, P., Rene, Juhler (2000) Fate and transport of two pesticides in a freshwater wetland: A field injection study. In: Bjerg, P.L., Engesgaard, P. and Krom, T.D. (eds): Groundwater 2000 - Proceedings of the international conference on groundwater research, Copenhagen, Denmark. 6-8 June 2000, p. 275-276.

Nyholm, T. (2000) Stream-flow depletion caused by groundwater abstraction near alluvial streams. PhD afhandling. Aarhus Universitet.

Ovesen, N.B., Iversen, H.L., Larsen, S.E., Müller-Wohlfeil, D.I., Svendsen, L., Blicher, A., Jensen, P.M. (2000) Afstrømningsforhold i danske vandløb. Faglig rapport fra DMU, nr. 340, 2000.

Paludan, C. (1995) Phosphorous dynamics in wetland sediments. PhD thesis, Århus University and National Environmental Research Institute.

Paludan, C. and Blicher-Mathiesen, G. (1996) Losses of inorganic carbon and nitrous oxide from a temperate freshwater wetland in relation to nitrate loading. *Biogeochemistry* 35, 305-326.

Paludan, C. and Hoffmann, C.C. (1996) Fate of phosphorus in a Danish minerotrophic wetland. In: Kronvang, B. Svendsen, L.M and Sibbesen, E. (Eds.) Sediment and Phosphorus, Erosion and delivery, transport and fate of sediments and sediment-associated nutrients in watersheds. pp. 123-129. Proceedings from an international workshop held in Silkeborg, Denmark, October 9-12, 1995. Ministry of Environment and Energy, 150 pp. - NERI technical Report No 178.

Pedersen, M.L., Dieperink, C. and B. Kronvang, B. (1999) Longterm effects of re-establishing spawning grounds in danish watercourses. Seminar on River Restoration and Maintenance. Ministry of the environment and European Centre for River Restoration. Silkeborg, Denmark, October 12 -13, 1999.

Peeters, E.T.H.M. and Gardeniers, J.J.P. (1998) Logistic regression as a tool for defining habitat requirements of two common gammarids. *Freshwater Biology* 39(4), 605-615.

Plafkin, J.L., Barbour, M.T., Porter, K.D., Gross, S.K. and Hughes, R.M. (1989) Rapid Bioassessment Protocols for use in Streams and Rivers: Macroinvertebrates and Fish. United States Environmental Protection Agency, EPA/444/4-89-001, Washington DC.

Poeter, E. og Hill, M.C. (1999) UCODE, A computer code for universal inverse modeling. *Computer in Geosciences*, 25 (4), pp. 457-462.

Pusey, B.J., Kennard, M.J. and Arthington, A.H. (2000) Discharge variability and the development of predictive models relating stream fish assemblage structure to habitat in northeastern Australia. *Ecology of Freshwater Fish* 9(1-2), 30-50.

Quinn, J.M. and Hickey, C.W. (1994) Hydraulic Parameters And Benthic Invertebrate Distributions In 2 Gravel-Bed New-Zealand Rivers. *Freshwater Biology* 32(3), 489-500.

Rasmussen, P., H.J. Henriksen, P. Nyegaard, N. Kelstrup, V. Søndergaard, M. Hundahl og R. Thomsen (1995) Klassificering af grundvandsressourcen. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen. Nr. 6.

Raven, P.J., Boon, P.J., Dawson, F.H. and Ferguson, A.J.D. (1998) Towards an integrated approach to classifying and evaluating rivers in the UK. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 8, 383-393.

Refsgaard, J.C., Hansen, S. og Henriksen, H.J. (2001) Problemer med vandbalancer og mulige konsekvenser for beregning af nitratudvaskning. Diskussionsoplæg. 17. august 2001. DVK-FORSKERNETVÆRK. <http://www.vandmodel.dk>

Refsgaard, J.C., Sørensen, H.R., Mucha, I., Rodak, R., Hlavaty, Z., Banský, L., Klučovská, J., Topolska, J., Takáč, J., Kosc, V., Enggrob, H.G., Engesgaard, P., Jensen, J.K., Fiselier, J., Griffioen, J., og Hansen, S. (1998) An integrated model for the Danubian Lowland – Methodology and applications. *Water Resources Management*, 12, pp.433-465.

Refsgaard, J.C. og Storm, B. (1995) MIKE SHE. In: V.P. Singh (Ed) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication, pp.809-846.

Refsgaard, J.C. og Hansen, E. (1982) A distributed Groundwater/Surface Water Model for the Suså Catchment, Part II – Simulations of Streamflow Depletions due to Groundwater Abstractions. *Nordic Hydrology*, 13(5) 311-322.

Refsgaard, J.C. og Stang, O. (1981) An Integrated groundwater/surface water hydrological model. Suså Investigation. H13, Dansk Komite for Hydrologi, Miljøstyrelsen, 122 pp.

Rijkswaterstaat (2000) *Handbook Good Modelling Practice*. Holland.

Sand-Jensen, K. and Mebus, J.R. (1998) Fine-scale patterns of water velocity within macrophyte patches in Danish lowland streams. *Oikos* 76, 169-180.

Sand-Jensen, K. (2000) Strøm på alle skalaer. IN: Sand-Jensen, K. og Friberg, N. (eds.) *De strømmende vande*, Gads Forlag, 72-85.

Sand-Jensen, K., Riis, T. og Vestergaard, O. (2000) Vandløbet fra kilde til å. IN: Sand-Jensen, K. og Friberg, N. (eds.) *De strømmende vande*, Gads Forlag, 61-72.

Schleiter, I.M., Borchardt, D., Wagner, R., Dapper, T., Schmidt, K.D., Schmidt, H.H. and Werner, H. (1999) Modelling water quality, bioindication and population dynamics in lotic ecosystems using neural networks. *Ecological Modelling* 120(2-3), 271-286.

Sear, D.A., Armitage, P.D. and Dawson, F.H. (1999) Groundwater dominated rivers. *HYDROL PROCESS* 13 (3), pp.255-276.

Siddle, R.C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M. and Shimizu T (1995) Seasonal hydrologic response at various scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan. *J HYDROL* 168, pp.227-250.

- Simmons, G.M. (1992) Importance of submarine groundwater discharge and seawater cycling to material flux across sediment water interfaces in marine environments. *Marine Ecology-Progress Series* 84: 173-184.
- Sjodin, A., Lewis, W.M. and Saunders, J.F. (2001) Analysis of groundwater exchange for a large plains river in Colorado (USA). *HYDROL PROCESS* 15 (4), pp 609-620.
- Smith, M.J., Kay, W.R., Edward, D.H.D., Papas, P.J., Richardson, K.S., Simpson, J.C., Pinder, A.M., Cale, D.J., Horwitz, P.H.J., Davis, J.A., Yung, F.H., Norris, R.H. and Halse, S.A. (1999) AusRivAS: using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia. *Freshwater Biology* 41(2), 269-282.
- Sonnenborg, T.O., Christensen, B.S.B., Nyegaard, P., Henriksen, H.J. and Refsgaard, J.C. (2001) Transient modeling of regional groundwater flow using parameter estimates from steady-state automatic calibration (submitted).
- Sophocleous, M. (2000) From safe yield to sustainable development of water resources – the Kansas experience. *J HYDROL* 235 (1-2), pp. 27-43.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygari, S.R. and Perkins, S.P. (1999) Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. *J HYDROL* 214 (1-4), pp.179-196.
- Stang, O. (1980) Stream depletion by wells near a superficial, rectilinear stream. Proceedings fra Nordisk Hydrologisk Konference i Vemdalen 10-16 august 1980. UNGI Rapport Nr. 53, 359-369.
- Thorne, C.R. (1997) Channel types and morphological classification. In: Thorne, C.R., Hey, R.D. and Newson, M.D. (Eds.) *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*. John Wiley and Sons, Chichester, 175-222.
- Turak, E., Flack, L.K., Norris, R.H., Simpson, J. and Waddell, N. (1999) Assessment of river condition at a large spatial scale using predictive models. *Freshwater Biology* 41(2), 283-298.
- Vanek, V. and D.R. Lee (1991) Mapping Submarine Groundwater Discharge Areas – an Example from Laholm Bay, Southwest Sweden. *Limnol. Oceanogr.* 36: 1250-1262.
- Vilholth, K.G., Jarvis, N.J., Jacobsen, O.H. and de Jonge, H. (2000) Field investigations and modelling of particle-facilitated pesticide transport in macroporous soil. *J. Environ. Qual.* 29. 1298-1309.
- Vinther, F.P. and Hoffmann, C.C. (2000) Emissions of nitrous oxide and methane from an organic wetland grazed by steers. *Grassland Science in Europe* 5: 487-489.
- Vismara, R., Azzellino, A., Bosi, R., Crosa, G. and Gentili, G. (2001) Habitat suitability curves for brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in the

River Adda, Northern Italy: Comparing univariate and multivariate approaches. *Regulated Rivers-Research and Management* 17(1), 37-50.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. and Alley, W.M. (1998) Ground water and surface water: A single resource. USGS Circular 1139.

Woessner, W.W. (2000) Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought. *GROUND WATER* 38 (3) pp.423-429

Wright, J.F., Armitage, P.D., Furse, M.T. and Moss, D. (1989) Regulated Rivers: Research and Management 4, 147-155.

Yonger, P.L., Mackay R. and Connorton, B.J. (1993) Streambed sediment as a barrier to groundwater pollution: Insight from fieldwork and modelling in the river Thames basin. *J IWEM*, 7.

Yonger, P.L. (1996) Submarine groundwater discharge. *Nature* 382: 121-122.

Zlotnik, V.A. og Huang, H. (1999) Effect of shallow penetration and streambed sediments on aquifer response to stream stage fluctuations (analytical model) *GROUND WATER* 37 (4), pp. 599-605.

1 : Det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand

Hans Jørgen Henriksen, GEUS

1.1 Metodik

Der er gennemført en litteratursøgning på Web of Science med følgende søgeprofil:

- bank AND storage AND (discharge OR river OR lake OR stream)
- (baseflow OR aquifer OR groundwater) AND (discharge OR river OR lake OR stream) AND quantity
- (baseflow OR aquifer OR groundwater) AND (discharge OR river OR lake OR stream) AND interaction
- (baseflow OR aquifer OR groundwater) AND (sea OR fiord OR coastal zone) AND quantity
- (baseflow OR aquifer OR groundwater) AND (sea OR fiord OR coastal zone) AND interaction
- (baseflow OR aquifer OR groundwater) AND (marine water)

1.2 Søgestatistik

Denne søgning resulterede i 128 relevante referencer bedømt ud fra titlen. Antallet af artikler på hovedtyper er vist i tabel 1.

Tabel 1 Søgestatistik baseret på 128 artikler om grundvand og overfladevand (kvantitative forhold)

Interaktions hovedtype	1987-90	1991-95	1996-2001	Udvalgte ref.		
				***	**	*
Vandløb	4 (57 %)	15 (42 %)	38 (45 %)	9	19	29
Søer	2 (29 %)	6 (17 %)	8 (9%)	4	5	7
Vådområder	0 (0 %)	4 (11 %)	11 (13 %)	3	4	8
Hav/kystvande	0 (0 %)	3 (8 %)	9 (11 %)	3	2	7
Bank storage	1 (14 %)	3 (8 %)	7 (8%)	2	2	7
Udenfor kategori/relevans	0 (0 %)	5 (14 %)	12 (14 %)	0	0	17
I alt artikler pr. periode	7 (100 %)	36 (100 %)	85 (100 %)	21	13	0

1.3 Kommentarer

Der er i alt udvalgt 34 artikler som grundlag for en nærmere vurdering af vidensbehov.

Det fremgår af tabel 1 at der kan ses en forholdsvis uændret andel af artikler som omfatter grundvand / vandløb interaktion. For grundvand /søer ses en aftagende tendens. Omvendt forholder det sig for både grundvand / vådområder og grundvand /hav. Tallene for 1987-90 er på grund af det begrænsede antal artikler mindre sigende med hensyn til vurdering af trend.

De 34 udvalgte artikler er efterfølgende suppleret med øvrige kendte referencer der ikke fremkom af søgningen til den referenceliste der er udarbejdet i dette notat grupperet på interaktions hovedtyper. Den samlede litteraturliste kan ses i baggrundsnotat på nedenfor nævnte link.

1.4 Link til pdf-fil med baggrundsnotat

Baggrundsnotat om det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand, se: <http://www.geus.dk>

2 : Vidensstatus for det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand

Bertel Nilsson, GEUS

2.1 Metodik

Der er gennemført en litteratursøgning på Web of Science med følgende kombinationer søgeord (søgeord med flest hits er understreget):

- (groundwater OR aquifer) AND surface water AND water quality
- (groundwater OR aquifer) AND (river OR stream) AND water quality
- (groundwater OR aquifer) AND lake AND water quality
- (groundwater OR aquifer) AND (wetland OR riparian zone OR hyporheic zone OR bank storage) AND water quality
- (groundwater OR aquifer) AND (coastal zone OR marine water OR sea) AND water quality
- (groundwater OR aquifer) AND surface water AND (nitrate OR phosphate)
- (groundwater OR aquifer) AND surface water AND (organic matter OR acidification OR ochre loading)
- (groundwater OR aquifer) AND surface water AND (micro pollutants OR BTEX OR PAH OR CHS OR MTBE)
- (groundwater OR aquifer) AND surface water AND pesticide
- (groundwater OR aquifer) AND surface water AND heavy metal

2.2 Søgestatistik

Denne søgning resulterede i 96 meget relevante referencer bedømt ud fra titel, keywords og abstract. Med undtagelse af vandløbslitteraturen der udelukkende er bedømt ud fra titel og keywords. Antallet af artikler på hovedtyper og stoftyper er vist i tabel 2.

Tabel.2 Søgkriterier baseret på 756 artikler om vandkvaliteten i grundvand/overfladevand systemet.*** = meget relevant, ** = lidt relevant, * = ikke relevant. ¹ Yderligere litteratursøgning i T. Dahlsgaard ("Grundvandsudsivning i marine områder"). ² Yderligere litteraturstudium i 1. rapportudkast fra Jensen, Søndergaard og Jeppesen (Sammenhængen mellem grundvand og overfladevand: Søer). ³ Relevans kategorier er udeladt.

Hovedtyper af overfladevand / stof typer	Total antal	1987-90	1991-95	1996-2001	Udvalgte ref.		
					***	**	*
Vandløb	264	2	71	191	26	75	163
Søer ²	50	0	14	36	13	15	22
Ånære og vådområder	51	0	10	41	12	12	27
Marine miljø ¹	51	0	16	35	8	10	33
/ Næringssalte	150	0	45	105	29	41	80
/ Pesticider	54	0	19	35	5	15	34
/ Organisk stof, forsure og/eller okkerbelastning ³	95	0	23	72			
/ Miljøfremmede stoffer	15	0	3	12	2	9	4
/ Tungmetal	9	0	1	8	1	3	5
I alt artikler pr. periode	756	2	202	535	96	180	368

2.3 Kommentarer

Som grundlag for en nærmere vurdering af vidensbehov er der således indtil videre udvalgt 96 artikler + yderligere 12 artikler med 2 stjerner fra kategorierne "Miljøfremmede stoffer" og "Tungmetaller", idet litteraturen på de to sidstnævnte kategorier er meget sparsom.

2.4 Link til pdf-fil med baggrundsnotat

Baggrundsnotat om det kvalitative samspil mellem grundvand og overfladevand, se: <http://www.geus.dk>

3 : Vandløb

Jens Skriver, DMU

3.1 Metodik

Der er anvendt følgende søgeprofil i Web of Science: "Streams and (macroinvertebrates or macrophytes or fish or algae) and (drought or abstraction)".

3.2 Søgestatistik

Der kom i alt 55 hits ud af søgningen. Disse var fordelt efter perioder og biologiske indikatorer som vist i tabel A.3.

Tabel 3 Resultat af litteratursøgning i Web of Science med søgeprofilen "Streams and (macroinvertebrates or macrophytes or fish or algae) and (drought or abstraction)".

	Søgningen delt i nedenstående perioder		
	1987-90	1991-95	1996-2001
Makroinvertebrater	-	8	14
Fisk	-	8	21
Makrofytter	-	2	5
Alger	-	2	4
Artikler pr. periode	-	19	36

3.3 Kommentarer

Søgningen har været rettet specifikt ind på at finde artikler med konstateret sammenhæng mellem biologiske forhold i vandløb og vandløbenes hydrologiske forhold med udgangspunkt i minimumssituationen (drought or abstraction).

Abstracts for de 55 artikler fra søgningen er blevet læst, og der er blevet knyttet en værdi fra 0 til 3 for hver artikels "relevans" for nærværende opgave. Artikler med en værdi på 2 eller 3 er efterfølgende regnet væsentlige for litteraturgennemgangen af området. På baggrund heraf er 29 artikler fundet relevante. Der er efterfølgende foretaget en supplerende søgning, idet der i stedet for "fish" er anvendt "trout" eller "salmon" eller "salmonides" i søgeprofilen. Dette har givet yderligere enkelte relevante artikler. I forbindelse med gennemgangen af artiklerne er der fundet en række relevante referencer fra perioden før 1987, men også flere nyere relevante artikler er blevet fundet.

Der er som helhed mange artikler fra de senere år. Størstedelen af disse er fra England, men der er også en del relevante artikler fra USA samt enkelte fra Spanien, Australien, New Zealand m.fl.

3.4 Link til pdf-fil med baggrundsnotat

Baggrundsnotat om vandløb, se <http://www.geus.dk>

4 : Søer

Jens Peder Jensen, Martin Søndergaard og Erik Jeppesen, DMU

4.1 Metodik

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".

4.2 Søgestatistik

Søgningen 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), se tabel 4.

Tabel.4 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 næringsstofftilførsel og effekter på fytoplankton
Fish	106	91	12	3	Områder med koldt indsvivende grund-vand øger gyde- og levevilkår for ørred
Macrophyte	35	29	3	3	Grundvandsindstrømning kan lokalt påvirke mængde og type af makrofyter
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	-	-	-	

4.3 Kommentarer

Fordelt på emner er der mange artikler som umiddelbart ikke synes relevante i relation til dette projekt (tabel A.4). 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, makrofyter og invertebrater indgår i færre artikler. I det følgende gives en kort gennemgang af resultaterne fra søgningen.

4.4 Link til pdf-fil med baggrundsnotat

Baggrundsnotat om søer, se <http://www.geus.dk>

5 Marine områder

Tage Dalsgaard, DMU

5.1 Metodik

Der er søgt i Web of Science med søgeprofilen: "marine and groundwater".

5.2 Søgestatistik

Søgningen gav 414 hits, tabel.5.

Tabel.5 Resultat af litteratursøgning i Web of Science og supplerende litteratur.

Søgningen delt i nedenstående perioder		
1982-90	1991-95	1996-2001
6	7	22

5.3 Kommentarer

Langt de fleste af disse artikler omhandler indsvivning af havvand i grundvandsmagasiner. Der blev fundet i alt 20 artikler omhandlende transport af grundvand til marine områder. Disse blev suppleret med artikler fra referencelisterne så der i alt blev fundet 35 artikler. De fordeler sig på perioder som vist i tabel A.5. Af disse er 21 blevet udvalgt og læst.

Langt hovedparten af artiklerne omhandler undersøgelser i USA (77%), mens Europæiske undersøgelser udgør en lille del af artiklerne (17%). Der er ingen omtale af danske lokaliteter i artiklerne.

5.4 Link til pdf-fil med baggrundsnotat

Baggrundsnotat om marine områder, se <http://www.geus.dk>

6 : Habitatmodeller

Brian Kronvang, DMU

6.1 Metodik

Søgeprofil for søgning af litteratur om habitatmodeller i databasen WEB of Science er: ***(Habitat and Model) and (River(s) or Stream(s))***.

6.2 Søgestatistik

I alt blev der fundet 286 hit hvoraf de 149 (52%) blev bedømt som værende relevante i forhold til emnet, tabel A.6.

Tabel 6 Oversigt over internationale publikationer i perioden 1987-2001 fra søgning i databasen Web of Science.

Emne	1987-1990	1991-1995	1996-2000
Laks og ørred	0	26	44
Andre fiskearter	0	13	19
Vandløbs insekter	1	6	18
Bentiske alger	0	1	5
Andre dyr	0	2	3
Klassifikation/GIS	0	0	5
Model	0	3	3
Total	1	51	97

6.3 Kommentarer

Modeller til beskrivelse af de fysiske vandløbshabitater i form af simple og mere dynamiske hydrauliske modeller, samt dyr og planters krav til levesteder har været udsat for en øget forskningsindsats international igennem de sidste 15 år (tabel 1). Der har i den internationale litteratur specielt været fokuseret på at opnå en viden om de krav dyr og planter stiller til strømhastighed, dybde, substrat, mv., mens de mere rene modelmæssige tilgange ikke har omfattet mange publikationer i den gennemførte søgning. Antallet af internationale publikationer har en overvægt mod undersøgelser af især laks og ørreds habitatkrav, der alene omfatter næsten halvdelen af de fundne publikationer (tabel 1). Andre fisk eller hele fiskesamfundes krav er også velundersøgt, mens det først er i de seneste år at smådyrsfaunaen krav til levesteder i vandløb for alvor er blevet undersøgt. Det er således på smådyrsfaunaen og de bentiske alger at væksten i forskningen har ligget i den seneste 4 års periode. Et andet emne som dukker op i den internationale litteratur ide seneste år er artikler om klassifikation af vandløb specielt med udnyttelse af Geografiske Informations Systemer (GIS).

6.4 Link til pdf-fil med baggrundsnotat

Baggrundsnotat om habitatmodeller, se <http://www.geus.dk>