

## Videnstatus for det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand

Af Hans Jørgen Henriksen, GEUS

### 1. Problemformulering

#### 1.1 Vandrammedirektivets terminologi og bestemmelser

Vandrammedirektivet forudsætter en karakterisering af overfladevandsområderne i : vandløb, søer, overgangsvande, kystvande, kunstige vandområder eller stærkt modificerede vandområder (se tabel 1).

TABEL 1 Begreb	TERMINOLOGI JF. VANDRAMMEDIREKTIVET Definition
Grundvand	Alle former for vand under jordoverfladen i mættede zone og i direkte kontakt med jordoverfladen eller undergrunden
Overfladevand	- Indvand bortset fra grundvand - Overgangsvande og kystvande
Vandløb	Indvand, som for størstedelens vedkommende løber på jordoverfladen, men som kan løbe under jorden i en del af sit løb
Sø	Indvand bestående af stillestående overfladevand
Overgangsvande og kystvande	Overfladevandsområder i nærheden af flodmundinger, som er delvis saltholdige som følge af, at de er i nærheden af kystvande, dem som i væsentlig grad påvirkes af ferskvandsstrømme
Kystvande	Overfladevand på landsiden af en linje, hvor hvert punkt befinder sig i en afstand af én sømil til havsiden fra det nærmeste punkt på den basislinie, hvorfra bredden af territorialfarvande måles, og som, hvor det er relevant, strækker sig ud til overgangsvandets yderste grænse
Kunstigt vandområde	Forekomst af overfladevand skabt ved menneskelig aktivitet. Typisk vil kunstigt anlagte søer, kanaler, vandresservoirer o.l. falde ind under denne kategori
Stærkt modificeret vandområde	Overfladevand, der som et resultat af fysiske ændringer som følge af menneskelig aktivitet i væsentlig grad har ændret karakter som angivet af medlemslandet fx havneområder, vandområder med kunstige opfyldninger, stærkt kanaliserede eller udrettede vandløb og opdæmmede søer (muligvis også Nissum og Ringkøbing fjorde pga. regulering ved sluser)
Grundvandsmagasin	Et eller flere underjordiske lag af bjergarter eller andre geologiske lag med tilstrækkelig porøsitet og permeabilitet til at muliggøre enten en betydelig grundvandsstrømning eller indvinding af betydelige mængder af grundvand
Vandløbsopland	Landområde, hvorfra al overfladeafstrømning løber gennem en række mindre og større vandløb, og eventuelt søer ud til havet i én enkelt flodmunding eller ét enkelt delta
Grundvandstilstand	Det samlede udtryk for en grundvandsforekomsts tilstand bestemt ved enten dens kvantitative eller dens kemiske tilstand, alt efter hvilken der er ringest
Grundvands kvantitative tilstand	Udtryk for, i hvilken grad en grundvandsforekomst er berørt af direkte eller indirekte indvinding
Tilgængelig vandressource	Den langsigtede årlige gennemsnitlige grundvandsdannelse for en grundvandsforekomst minus den langsigtede årlige vandføring, der kræves for at opfylde de økologiske kvalitetsmål for tilknyttede overfladevande i henhold til artikel 4, for at undgå enhver væsentlig forringelse af et sådant vands økologiske tilstand og for at undgå enhver væsentlig skadelig indvirkning på tilknyttede terrestriske økosystemer
Drikkevand	Drikkevand i henhold til definitionen i drikkevandsdirektivet (80/778/EØF, som ændret ved direktiv 98/83/EF): - alle former for vand, der enten ubehandlet eller efter behandling er beregnet til drikkebrug, madlavning, fødevarer tilberedning eller andre husholdningsformål, uanset vandets oprindelse, og uanset om det leveres gennem distributionsnet, fra tankvogn/tankskib eller i flasker eller anden emballage - alle former for vand, der anvendes i levnedsmiddelvirksomheder til fremstilling, behandling, konservering eller markedsføring af produkter eller stoffer bestemt til konsum, medmindre de nationale kompetente myndigheder har fastslået, at vandets kvalitet ikke kan påvirke det færdige levnedsmiddels sundhedsmæssige kvalitet

Medlemsstaterne skal beskytte, forbedre og restaurere alle grundvandsforekomster og sørge for balance mellem indvinding og grundvandsdannelse med henblik på at opnå god grundvandstilstand. Retningslinierne for klassificering af overfladevand og grundvand med hensyn til kvantitet og definition af miljømål, herunder overvågning, fremgår af Vandrammedirektivets Bilag V. Tilstand for overfladevand og grundvand.

Direktivets klassifikationssystem tager udgangspunkt i den upåvirkede tilstand, og omtaler høj, god og moderat økologisk tilstand. For at kunne udgøre et grundlag for forvaltningen er det imidlertid nødvendigt at omsætte disse definitioner til entydige kriterier, der for de enkelte variable definerer klasserne i klassifikationssystemet. Disse værdier kan fastsættes på fællesskabsplan, for de enkelte medlemsstaters samlede område eller for et enkelt vandområdedistrikt, eller for et konkret vandområde. I Danmark forventes i overensstemmelse hermed etableret et operationelt, objektivt system til fastlæggelse af konkrete krav til miljøtilstanden i de enkelte vandområder.

### 1.1.1 Overfladevand

For vandløb og søer er det især de kvalitetselementer, der er knyttet til de hydromorfologiske elementer, der understøtter de biologiske systemer, som vedrører det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand, dvs. kvalitetselementer såsom:

- hydrologisk regime (vandstrømningens volumen og dynamik, forbindelse til grundvandsforekomster og for søer desuden opholdstid)
- vandløbets kontinuitet (kan evt. indirekte i kortere eller længere perioder påvirkes af fx ændret flow)
- morfologiske forhold (variation i vandløbets eller søens dybde og bredde/volumen, bundforhold, struktur og substrat og bredzonens struktur (disse forhold kan ligeledes indirekte ændres som følge af fx ændret flow)

Indirekte spiller temperaturforhold også en vigtig rolle, som et særligt fysisk kemisk kvalitetselement:

- termiske forhold (samspillet mellem grundvand og overfladevand er her særligt vigtigt idet grundvand har en temperatur på ca. 8 grader året rundt, hvorimod overfladevand kan have meget svingende temperatur fra 0 til ca. 25 grader)

For overgangsvande og kystvande gælder lignende bestemmelser vedr. morfologiske forhold. Her spiller øvrige forhold dog også en vigtig rolle, såsom tidevandsregime, ferskvandsstrømning, bølgeeksponering, dominerende strømme osv.

De forskellige grader eller målsætninger vedr. økologisk tilstand, kan herefter defineres i forhold til, hvad der normalt gælder for denne type overfladevand under uberørte forhold:

- *høj økologisk tilstand*: ingen eller kun ubetydelig menneskeskabt ændring i værdierne for de fysisk-kemiske og hydromorfologiske kvalitetselementer
- *god økologisk tilstand*: svagt ændrede biologiske kvalitetselementer som følge af menneskelig aktivitet
- *moderat økologisk tilstand*: biologiske kvalitetselementer afviger i mindre grad og viser mindre tegn på ændringer som følge af menneskelig aktivitet; væsentligt mere forstyrrede end under god tilstand
- *ringe økologisk tilstand*: biologiske kvalitetselementer viser tegn på større ændringer; relevante biologiske samfund afviger væsentligt fra uberørte forhold
- *dårlig økologisk tilstand*: biologiske kvalitetselementer viser tegn på alvorlige ændringer, og store dele af relevante biologiske samfund mangler (i forhold til uberørte forhold)

### 1.1.2 Grundvand

Klassificering af grundvandets *kvantitative tilstand* skal ske på grundlag af ændringer i grundvandsstanden. Som miljømål for grundvand indgår, at der skal opnås en ”god kvantitativ tilstand”:

- grundvandsstanden ligger så højt, at der ikke er tegn på, at den gennemsnitlige årlige indvinding over en lang periode overstiger den tilgængelige grundvandsressource
- grundvandsstanden må således ikke være udsat for menneskeskabte ændringer, der vil medføre:
  - at miljømålene for tilknyttede overfladevande ikke kan opfyldes
  - at der sker en væsentlig forringelse af disse vandområders tilstand
  - at der sker en væsentlig beskadigelse af tilknyttede terrestriske økosystemer og vådområder, som er direkte afhængige af grundvandsforekomsten

Ændringer i strømretningen, som følger af ændringer i grundvandsstanden, må ikke føre til indtrængning af saltvand eller andet. Der må ikke være tegn på at ændringer i strømretningen skyldes menneskelig påvirkning.

Ved vurdering af, om indvinding overstiger den tilgængelige grundvandsressource, må der tages højde for effekter af global opvarmning og klimabetinget udvikling i nedbør/temperatur, som i dag vurderes at kunne påvirke grundvandsdannelsen væsentligt.

## **1.2 Det hydrologiske kredsløb og samspil mellem grundvand og overfladevand**

Grundvand bidrager til overfladevand, fx vandløb og størrelsen afhænger af såvel klimatiske som fysiske forhold. Forståelse af vandbalanceforhold på oplandsniveau, og konsistens mellem de enkelte led i vandbalance, er derfor en nødvendighed ved forvaltning efter Vandrammedirektivet, fordi disse forhold er grundlæggende for de nærmere hydromorfologiske forhold (hydrologisk regime, kontinuitet, morfologiske forhold og temperatur).

Samspillet mellem grundvand og overfladevand, herunder grundvandets andel i fx vandløbsafstrømningen, kan estimeres ud fra hydrograf opsplittings metodikker hvorved grundvandsafstrømningen (baseflow) kan bestemmes (fx Institute of Hydrology, 1980; baseflow index metoden). Der findes en række forskellige metoder og de resulterer i ret forskellige estimater. Baseflow index metoden giver således typisk en overestimering af baseflow i forhold til resultater med fysisk baserede numeriske modeller (fx DK-model). Fra USA kendes eksempelvis resultater med en metode som medfører et mere konservativt estimat (Winter et al., 1998). For 54 oplande og en 30-årig periode viste resultaterne at i gennemsnit 52 % af den totale afstrømning var grundvandsafstrømning, med en variationsramme mellem 14 og 90 % fra opland til opland. I områder med højpermeable geologiske aflejringer var grundvandsafstrømningen væsentlig større end for lavpermeable aflejringer.

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 (gennemstrømning af grundvand), endelig kan de over hele søarealet afgive vand til grundvandssystemet. Søbundssediment vil generelt have større volumener af organiske bundsedimenter i forhold til vandløb, som også kan være meget lavpermeable og dermed begrænsende for udvekslingen under dele af søarealet (Winter et al., 1998). Samtidig kan bølger ved bredzonen fjerne fine sedimenter så kontakten her er god.

Vådområder kan ligesom søer og vandløb både modtage og afgive vand fra/til grundvand, men er ikke altid beliggende i lavtliggende områder, de kan også være beliggende på skrånninger ("fens", som primært er grundvandsfødte) eller i højreliggende områder ("bogs", som primært er nedbørsfødte). I terrænformer med stor hældning kan grundvand evt. direkte afstrømme til terrænoverfladen (med forekomst af vegetationsforhold som de kendes for vådområder). Vådområder i kystnære områder har specielt komplekse vandbalanceforhold på grund af periodiske vandspejlsvariationer (fx døgn: tidevand, sæson: oversvømmelse). I vådområder kan vegetation og rodnet spille en væsentlig rolle for vandudvekslingen og de hydrauliske forhold.

Hav og kystnære områder modtager betydelige grundvandsmængder, men i forhold til søer adskiller hav sig ved at densitetsforholdene her spiller en væsentlig rolle for udvekslingen (det ferskevand udstrømmer som en pude henover det mere salte havvand, dvs. forekomst af fx en saltvandskile). I Danmark anslås grundvandsafstrømningen til i størrelsesordenen 10 mm/år (bl.a. vurderet ud fra DK-modellen), men størrelsen kan variere betydeligt afhængigt af de hydrogeologiske forhold.

### **1.2.1 Interaktions hovedtyper**

Det kvantitative samspil mellem grundvand og overfladevand kan i Vandramme terminologi således struktureres efter hovedtyper defineret ovenfor: fx vandløb, vådområder, søer og hav. Herudover er det dog nødvendigt at introducere endnu en kategori, som vi har kaldt "vandløbsnær magasinering" (bank storage), som er den temporære udsivning fra overfladevand til grundvand i (kortvarige) perioder med højt vandspejl i

recipienten (fx i situationer med stor afstrømning). Bank storage kan være en væsentlig faktor for forklaring af fx stoftransport og kemiske forhold i et vandløb, som følge af tidsforskydninger mellem afstrømningsrytme for baseflow, drænflow og overfladisk afstrømning, eller genereringen af et lokalt vandkredsløb i de vandløbsnære areal hvor stofferne følger med rundt, som kan have stor betydning for stofomsætning og transport (fx denitrifikation af nitrat i iltfrie miljøer). I relation til Vandrammedirektivet har forståelsen af bank storage indirekte betydning vandstrømningens volumen og dynamik samt bredzonens struktur, men også betydning for nedstrøms bundforhold (struktur og substrat)

### 1.2.2 Processer og parametre

Man kan opdele et overfladevandssystem på underområder med forskellig "orden" (fra opstrøms retning og ned) og med tilhørende undertyper af vandløbsstrækninger (Atkinson, 1978; Dahl, 1995; Freeze, 1974; Montgomery and Dietrich, 1995; Mosley, 1979; Roulet, 1990; Sidle et al., 1995);

- Ephemeral stream (hillslope segment, headwater areas - Winther et al., 1998)
- 0. ordens basin (afløbsløst hul/lavning i terræn hvor overskudsnedbøren siver ned)
- 1. ordens basin (et enkelt delopland til fx et mindre tilløb til vandløbet)
- 2-X ordens basin (bestående af et større vandløb med tilløb fra flere 1. ordens basiner samt et mere betydeligt vandløbsnært område (riparian area - Wilson & Imhof, 1998) og evt. et eller flere vådområder (wetland), samt evt. søer/damme
- et opland til fx en fjord eller et andet kystnært område evt. et hav incl. X orden's basiner

Betragter man et transekt som går på tværs af et vandløb (Dahl, 1995) kan man definere et indstrømningsområder (med grundvandsdannelse og hvor der ofte kan forekomme 0. ordens basiner), en overgangszon (evt. med skiftende grundvandsdannelse eller udstrømning afhængig af årstidsvariationer, hvor der ofte forekommer hillslope segmenter), et vandløbsnært område (riparian) og et udstrømningsområde (med opadrettet strømning fra grundvand mod vandløb. Tegner man dræn ind på transektet vil man også kunne anskueliggøre områder som giver anledning til drænastrømning.

Betragter man derimod et catchment bestående af et vandløbssystem ovenpå et grundvandssystem er vandudvekslingens regionale fordeling derudover afhængig af nogen øvrige forhold a) dels de hydrauliske parametre for grundvandssystemet som en helhed, som har betydning for den regionale fordeling i grundvandet trykniveau og strømning, og endelig b) tidslige og regionale variationer i inputdata til systemet (dvs. nedbør, fordampning, vandindvinding, vandføring mv.).

Udvekslingen kan således ikke alene forstås med fokus på den recipientnære udveksling der foregår på "lokal skala" (fx udfra studier af udveksling fra et transekt eller på endnu mindre skala fra fx målinger på vandløbsbunden eller i laboratoriet), men skal også ansues med udgangspunkt i en regional skala, der inddrager randbetingelser til den lokale vandudveksling, fx fordeling af regional grundvandsstrømning indenfor et catchment osv.

Sophocleous and Perkins (1993) anvendte en invers 2-D numerisk model af det regionale grundvandssystem incl. interaktionen med overfladevandssystemet til at konkludere at vandløbsafstrømning fra grundvandet var mest afhængig af grundvandsdannelse, vandindvinding og hydrauliske parametre for grundvandssystemet som helhed og i mindre grad afhængige af lokale forhold omkring vandløbet fx vandløbslækagekoefficienter (bundsedimentets hydrauliske ledningsevne, tykkelse mv.).

Modica et al. (1997) påviste for et grundvands/overfladevandssystem, at grundvandet følger komplekse strømningsveje fra infiltrationsområder til udstrømningsområder (ved fx vandløb) og at der sker en betydelig opblanding af grundvand med varierende kvalitet og alder i udstrømningsområderne.

Vandudvekslingen mellem grundvand og overfladevand kan kvantificeres udfra en simpel "halvempirisk" relation som afhænger af vandspejlsgradient, kontaktzoneareal og hydraulisk ledningsevne (McDonald and Harbaugh, 1988). Udvekslingen er her proportional med 1) en vandspejlsgradient (fx trykniveauforskelle fra grundvand til vandløb eller til drænniveau), 2) den arealmæssige udstrækning af "hyporheic zone" (Woessner, 2000), dvs. den zone hvorigennem udvekslingen finder sted. og omvendt proportional med 3) den hydrauliske ledningsevne for denne "kontaktzone" ("hyporheic zone").

### *Fluktuationer i vandstand i overfladevand og trykniveau i grundvand*

For at kunne bestemme om grundvandet strømmer til et vandløb (eller strømmingen er i den modsatte retning) er det nødvendigt at kende trykniveauet i grundvandsmagasinet i forhold til vandspejlet i vandløb. Disse forhold er meget variable under forskellige hydrogeologiske forhold (Meyboom et al, 1964). I de fleste tilfælde, ved lille afstrømning, vil vandløbet afdræne det nærliggende grundvandsmagasin, hvorimod strømningsretningen i periode med stor afstrømning inverteres (evt. i kortere perioder). Oversvømmelser af lavtliggende areal tæt på vandløb kan her forøge infiltrationen til grundvandet.

### *Permeabilitetsforhold i vandløbsbund, lavpermeable lag under vandløbet og i grundvandsmagasinet*

Vandløbsbundens permeabilitetsforhold er den hydrogeologiske og hydrologiske størrelse der kan udvise størst geografisk variation lige fra  $1 \times 10^{-9}$  til mere end  $1 \times 10^{-2}$  m/s (Younger et al., 1993; Calver, 2001). Sammenlignet hermed varierer trykniveaugradient væsentligt mindre fra 0 til +/- 10 m, med en tidlig variation på max et par meter. Endelig varierer kontaktzonens udstrækning mellem en typisk bredde på fra 0.1-1 m op til 10-1000 m. Der kan dog være en betydelig "synergi" mellem de enkelte parametres variation i et område som ikke må overses. Enkelte undersøgelser indikerer (van Wonderen and Wyness, 1995) at permeabiliteten af vandløbsbundens sedimenter kan variere med adskillige størrelsesordener indenfor relativt korte afstande og desuden have en tidlig variation, som afhænger af vandføringen. Vandløbssedimenter som fjernes ved stor afstrømning og aflejres under lavere hastigheder kan evt. introducere en dynamik i systemets hydrauliske ledningsevne, ligesom at udsivning i perioder evt. kan medføre clogging af bunden og dermed meget lavere vandløbslækagekoefficienter.

### 1.2.3 Undersøgelsesmetodikker

Vandudveksling kan studeres ud fra

- A-Lokale proces- og feltstudier (feltstudie indgang: fx transekt)
- B-Analyse af afstrømning og vandkemi (Tracer-, vandkemi- og dateringsbaserede analyser af afstrømningen med hydrografseparation)
- C-Analytiske og numeriske modelstudier (modelindgang: fx lokale og regionale modeller)

En kombination af A og C eller B og C ses ofte i den nyere litteratur i forbindelse med mere kvantitative studier.

## 2. Litteraturstudie

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)

Denne søgning resulterede i 128 relevante referencer bedømt ud fra titlen. Antallet af artikler på hovedtyper er vist nedenfor i tabel 2.

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

Tabel 2: Søgestatistik baseret på 128 artikler om grundvand og overfladevand (kvantitative forhold)

Der er således 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.

## 3. Vidensbehov vedr. grundvandets betydning for vandmængderne i overfladevand

Der er udarbejdet 5 forslag til videnopbygning (se bilag A):

1. Kvantificering af vandbalancen og fordampningen på oplandsbasis
2. Kvantificering af grundvandsafstrømningens regionale og tidslige variation
3. Undersøgelse af strømningsveje i overfladevand/grundvand på felt- og catchment skala
4. Konceptuelle modeller for beskrivelse af vandudveksling mellem grundvand og dræn/vandløb med link til hydrofacies og geologiske forhold (parameterestimering)
5. Parameterisering og usikkerhedsvurdering i forbindelse med transiente, fysisk baserede og distribuerede hydrologiske modeller på stor skala / og stor kompleksitet (grundvands-/overfladevand)

#### 4. Referencer

##### *Vandløb*

- Atkinson, TC (1978) Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes, In: Hillslope hydrology (M.J. Kirkby, ed.), pp.73-120, John Wiley, New York.
- Barthurst, JC and Cooley, KR (1995) River-Aquifer exchange in the SHE catchment modeling system. In: Younger et al. 1995.
- Bates PD, Steward MD, Desitter, A, Anderson, MG, Renaud, JP and Smith, JA (2000) Numerical simulation of floodplain hydrology. WATER RESOUR RES **36**, 6-7, pp.2517-2529
- Calver, A. (2001) Riverbed permeabilities: Information from pooled data GROUND WATER. **39** (4), pp.546-553.
- Cey, EE., Rudolph, DL, Parking, GW and Aravena, R. (1998) Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada. J HYDROL **210** (1-4), pp.21-37.
- Chen XH and Yin YF (2001) Streamflow depletion: Modeling reduced baseflow and induced stream infiltration from seasonally pumped wells J AM WATER RESOUR ASSOC **37** 1 pp.185-195
- Clausen, B. (PhD thesis) The interaction of groundwater and streamflow.
- Dahl M., Harrar WG, Henriksen HJ and Knudby CJ (1998) Integrated 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. pp.607-616.
- Freeze, RA (1974) Streamflow generation. Rev. Geophys. And Space Physics **12** (4), pp.627-647.
- Meyboom P, van Everdingen, RO and Freeze, RA (1964) Patterns of groundwater flow in seven discharge areas in Saskatchewan and Manitoba. Geological Survey of Canada, Bulletin **147**, 548 pp.
- Modica E, Reilly TE and Pollock DW (1997) Patterns and age distribution of ground-water flow to streams. GROUNDWATER RESOUR RES **32** (7), pp.523-537.
- Montgomery DR and Dietrich WE (1995) Hydrologic processes in a low-gradient source area. WATER RESOUR RES. **31** (1), pp. 1-10.
- Mosley MP (1979) Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand. WATER RESOUR RES **15** (4), pp.795-806.
- Morrice JA, Valett, HM, Dahm CN and Campana, ME (1997) Alluvial characteristics, groundwater-surface exchange and hydrological retention in headwater streams. HYDROL PROCESS **11** (3), pp.253-267.
- Power, G. Brown, RS and Imhof, JG (1999) Groundwater and fish – insight from northern North America. HYDROL PROCESS **13** (3), pp.401-422.
- Pucci Jr.AA and Pope PA (1994) Simulated effects of development on regional ground-water surface-water interactions in the northern coastal plain of New Jersey. JHYDROL (167) 241-262
- Sear DA, Armitage PD, Dawson, FH (1999) Groundwater dominated rivers. HYDROL PROCESS **13** (3), pp.255-276.

Siddle, RC, 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.

Sophocleous M (2000) From safe yield to sustainable development of water resources – the Kansas experience. *J HYDROL* **235** (1-2), pp.27-43

Sophocleous, MA, Koelliker JK, Govindaraju, RS, Birdie, T., Ramireddygari, SR and Perkins, SP (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.

Sophocleous M, Townsend MA, Vogler LD, McClain TJ, Marks ET and Coble GR (1988) Experimental studies in stream aquifer interaction along the Arkansas river in central Kansas – field testing and analysis. *J HYDROL*. **98** (3-4), pp.249-273.

Van Wonderen J and Wyness, A (1995) The validity of methods used for modelling of river-aquifer interaction. In: *Modelling river-aquifer interactions: Proc. Of British Hydrological Society meeting, March*. Pp. 101-116.

Winter TC, Harvey JW, Franke OL and Alley, WM (1998) Ground water and surface water: A single resource. USGS Circular 1139.

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

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

Zlotnik VA and 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

### *Vådområder*

Bernaldez FG, Benayas JMR and Martinez A (1993) Ecological impact of groundwater extraction on wetlands (Douro basin, Spain). *J HYDROL*. **141** (1-4), pp.219-238.

Dahl M (1995) Flow dynamics and water balance in two freshwater wetlands, Ph.D. thesis, University of Copenhagen, Denmark. National Environmental Research Institute. 326 pp.

Devito KJ, Hill AR and Roulet N (1996) Groundwater-surface water interactions in headwater forested wetlands of the Canadian shield. *J HYDROL* **181** (1-4), pp.127-147.

Gerla PJ (1999) Estimating the ground-water contribution in wetlands using modeling and digital terrain analysis. *WETLANDS* **19** (2) pp.394-402.

Kehew AE, Passero RN, Krishnamurthy RV, Lovett CK, Betts MA and Dayharsh BA (1998): Hydrogeochemical interaction between a wetland and an unconfined glacial drift aquifer, southwestern Michigan. *GROUND WATER* **36** (5), pp.849-856.

Roulet NT (1990) Hydrology of a headwater basin wetland: groundwater discharge and wetland maintenance. *HYDROL PROCESS* **4**, pp.387-400.

Whigham PA and Young WJ (2001) Modelling river and floodplain interactions for ecological response  
MATH COMPUT MODELLING **33** pp.635-647

Winther TC and Rosenberry DO (1995) The interaction of ground-water with prairie pothole wetlands in the cottonwood lake area, East-central North-Dakota, 1979-1990. WETLANDS **15** (3) pp.193-211.

Wise WR, Annable MD, Walser JAE, Switt RS, Shaw DT (2000) A wetland-aquifer interaction test. J HYDROL **227** (1-4) pp.257-272.

### *Søer*

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

Cherkauer DS and Mckereghan PF (1991) Groundwater discharge to lakes – focusing in embayments. GROUND WATER **29** (1), pp.72-80.

Cherkayer DS and Zager JP (1989) Groundwater interaction with a kettle-hole lake – relation of observations to digital simulations. J HYDROL **109** (1-2), pp.167-184.

Guyonnet DA (1991) Numerical modeling of effects of small-scale sedimentary variations on groundwater discharge into lakes. LIMNOL OCEANOGR **36** (4), pp.787-796.

Laubagh JW, Rosenberry DO and Winter TC (1995) Groundwater contribution to the water and chemical budgets of Williams lake, Minnesota, 1980-1991. CAN J FISHERIES AQUAT SCI **52** (4), pp.754-767.

Lee TM (2000) Effects of nearshore recharge on groundwater interactions with a lake in mantled karst terrain. WATER RESOUR RES. **36** (8), pp.2167-2182.

Sacks LA, Herman JS, Konikow LF and Vela AL (1992) Seasonal dynamics of groundwater-lake interactions at Donana national park, Spain. J HYDROL **136** (1-4), pp.123-154.

Townley LR and Trefry MG (2000) Surface water – ground water interaction near shallow circular lake. Flow geometry in three dimensions. WATER RESOUR RES **36** (4), pp.935-948.

Urbano LD, Person M and Hanor J (2000) Groundwater – lake interactions in semi-arid environments. J GEOCHEM EXPLOR **69**, pp.423-427.

### *Hav*

Bokuniewicz HJ (1992) Analytical descriptions of subaqueous groundwater seepage. ESTUARIES **15** (4), pp.458-464.

Bugna GC, Chanton, JP, Cable, JE, Burnett WC and Cable PH (1996) The importance of groundwater discharge to the methane budgets of nearshore and continental shelf waters of the northeast Gulf of Mexico. GEOCHIM COSMOCHIM ACTA **60** (23), pp.4735-4746.

Heathcote JA, Jones MA and Herbert AW (1996) Modelling groundwater flow in the Sellafield area. QUART J ENG GEOL **29**, pp59-81.

Nobi N and DasGupta A (1997) Simulation of regional flow and salinity intrusion in an integrated stream-aquifer system in coastal region: Southwest region of Bangladesh. GROUND WATER **35** (5), pp.786-796.

Singh VS and Gupta CP (1999) Groundwater in a coral island. ENVIRON GEOL **37** (1-2), pp.72-77.

*Bank storage*

Curry RA, Gehrels J, Noakes DLG and Swainson R (1994) Effects of river flow fluctuations on groundwater discharge through brook trout, *Salvelinus-Fontinalis*, spawning and incubation habitats. HYDROBIOLOGIA **277** (2) pp.121-134.

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

Sjodin A, Lewis WM and Saunders JF (2001) Analysis of groundwater exchange for a large plains river in Colorado (USA). HYDROL PROCESS **15** (4), pp 609-620.

Whiting, PJ and Pomeranets, M (1997) A numerical study of bank storage and its contribution to streamflow. J HYDROL **202** (1-4), pp.121-136.

## BILAG A – VIDENSBEHOV GRUNDEVAND-OVERFLADEVAND KVANTITET

<b>Emne</b> 1. Kvantificering af vandbalancen og fordampningen på oplandsbasis
<b>Problemstilling</b> En korrekt kvantificering af arealnedbør og fordampning er afgørende for vurdering af vandbalance forhold i forskellige sammenhængen fx overvågning, opgørelse af udnyttelig grundvandsvandsressource, kvantificering af vandkredsløbet ved brug af hydrologiske modeller og i forbindelse med zonerings.
<b>Vidensstatus</b> Fra Suså 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 nedbørskorrektioner, afstrømningsmålinger eller restled i vandbalancen (fx grundvandsafstrømning til hav eller ”afdunstning” fra grundvandet)
<b>Fremtidigt vidensbehov</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Paradigme skift fra modificeret penman til penman-montieth vegetationsafhængig fordampning</li><li>• Konsistens mellem nedbørskorrektion, potentiel fordampning, afstrømning osv.</li><li>• Ensartet metode til håndtering af 10x10/20x20 km klimadata på oplandsniveau (forskellige skalaer)</li><li>• Kvantificering af grundvandsafstrømning til hav, søer og ud af oplande</li><li>• Integrerede usikkerhedsestimater (såvel enkelte led i vandbalancen som samlet usikkerhed)</li></ul>
<b>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Der gennemføres tværgående vandbalancestudier (felt + model) i 2-3 større oplande (&gt;500 km<sup>2</sup>) hvor randbetingelser har mindre betydning, og med mere detaljerede målinger.</li><li>- Sammenligning af forskellige nedbørskorrektioner og fordampningsberegningemetoder på stor skala og vurdering af konsekvenser for forskellige led i vandkredsløbet</li></ul>

<b>Emne</b> 2. Kvantificering af grundvandsafstrømningens regionale og tidlige variation
<b>Problemstilling</b> Grundvandsafstrømning til vandløb (Darcy flow) har en betydelig regional og tidlig 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 tidlige variation over året. Herved kan årsgennemsnit (andel af samlede afstrømning) og variationsramme af Darcy grundvandsafstrømning kortlægges ud fra afstrømningsmålinger og baseflowseparationsteknikker for forskellige landsdele og hydrogeologiske forhold. Samtidig er der behov for at se nærmere på mere egnede statistiske mål for grundvandsafstrømningen end medianminimum.
<b>Vidensstatus</b> 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 Q 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.
<b>Fremtidigt vidensbehov</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- 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).</li><li>- Bedre metoder til hydrografopsplitning i forhold til målinger, vandkemi/aldersdatering mv.</li></ul>
<b>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Litteraturundersøgelser af forskellige baseflowseparationsmetoder (traditionel, vandkemi/dateringsbaserede og baseret på fysisk baserede, distribuerede modeller)</li><li>- Kombination af feltstudier og modelstudier på forskellige skalaer med henblik på kvantificering af Darcy grundvandsafstrømning til vandløb, herunder regionale og tidlige variationer indenfor oplandet</li><li>- Undersøgelse af afstrømningstidsserier og kvantificering af tidlige og regionale variationer i baseflow under forskellige hydrogeologiske forhold med identifikation af betydende parametre</li></ul>

<b>Emne</b> 3. Undersøgelse af strømningsveje i overfladevand/grundvand på felt- og catchment skala
<b>Problemstilling</b> Kvantificering af strømningsveje og opholdstider på catchmentskala fra infiltration til afstrømning til fx vandløb eller sø er vigtige med henblik på forvaltning af vandressourcen på catchmentskala og vurdering af mulige konsekvenser af flade- eller punktkildebelastninger af grundvand og overfladevand.
<b>Vidensstatus</b> Der er fra udlandet både på områderne ”streamflow generation” og ”hydrogeomorphic components” foretaget en række studier med en forståelse af overfladenære afstrømningskomponenters virke og betydning. En række danske studier er desuden gennemført for forskellige oplande af strømningsveje i grundvand (fx SMP 96 pesticider og grundvand) samt i relation til zoner, som viser at kendskab til strømningsveje, opholdstider og redoxzoner er et brugbart instrument til en første vurdering (screening) af mulige konsekvenser af en given punktkilde/fladekilde.
<b>Fremtidigt vidensbehov</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- afløbsløse hullers betydning for strømningsveje og opholdstider (0'te ordens bassiner)</li><li>- grundvands- overfladevandsinteraktion for hillslope / 1. ordens bassiner</li><li>- strømningsveje og opholdstider i grundvandszonen</li><li>- strømningsveje og opholdstider i vandløbsnære areal (riparian)</li><li>- strømningsveje og opholdstider af ferskvand i vandløb, søer og kystnære områder</li></ul>
<b>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- process studier omkring forskellige hydrogeomorfiske komponenters betydning for strømningsveje, redoxforhold mv.</li><li>- felt og modelstudier for 1-2 oplande på lille skala med diskretisering af model i max 20 m grid og stor vertikal opløsning og analyse af strømningsveje, opholdstider (i forskellige redoxzoner)</li></ul>

<b>Emne</b> 4. Konceptuelle modeller for beskrivelse af vandudveksling mellem grundvand og dræn/vandløb med link til hydrofacies og geologiske forhold (parameterestimering)
<b>Problemstilling</b> Med henblik på hydrologisk modellering er der behov for en nærmere udredning af nødvendig og tilstrækkelig kompleksitet i beskrivelsen af vandudvekslingen med grundvand og dræn/vandløb, når formålet er dels strømningsmodellering og dels stoftransportmodellering.
<b>Vidensstatus</b> Der findes fra Danmark fra hydrologiske modelstudier (bl.a. DK-model) et vist kendskab til distribuering af lækagekoefficienten for vandløb i forhold til geologiske forhold, jordart, baseflow og bestemt ud fra modelkalibrering. Et egentlig veldokumenteret metodik til distribuering af lækagekoefficient eller drænkønstant foreligger imidlertid ikke, som kan linkes til geolgien. Studier fra udlandet (Calver, 2001) viser at der typisk anvendes en distribuering af parametre på 1-3 klasser, men at en a-priori fastsættelse mangler.
<b>Fremtidigt vidensbehov</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- udstrækning (sæsonvariation) i ”hydrophobic zone” for danske vandløb og søer</li><li>- parameterisering af hydraulisk ledningsevne</li><li>- kan drænkønstanten distribueres og hvordan?</li><li>- geologi/hydrofacies som grundlag for a-priori distribuering af lækagekoefficient og drænkønstant</li></ul>
<b>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- opstilling af et antal forskellige konceptuelle modeller (geologi/hydrofacies, kompleksitet, dræn, vandløb osv.)</li><li>- undersøgelse af modelperformance under anvendelse af transient automatisk kalibrering for udvalgte oplande og manuel kalibrering</li><li>- valideringstest og sammenligning af resultater</li><li>- sammenligning af forskellige simuleringer med lige gode konceptuelle modeller og anvisninger på nødvendig kompleksitet ved strømnings- og stoftransportmodellering</li></ul>

<b>Emne</b> 5. Parameterisering og usikkerhedsvurdering i forbindelse med transiente, fysisk baserede og distribuerede hydrologiske modeller på stor skala / og stor kompleksitet (grundvands-/overfladevand)
<b>Problemstilling</b> 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.
<b>Vidensstatus</b> Automatisk kalibrering af transiente modeller er forsøgt for Karup (Madsen, 2001) baseret på multi-objektive metoder (shuffled complex evaluation) og MIKE SHE. Stationær kalibrering af DK-model Sønderjylland er gennemført af (Sonnenborg et al., 2001) med UCODE og MIKE SHE med efterfølgende god overgang fra stationær til dynamisk model (god transient performance). Gradient-baseret optimering, GLUE-metodik og multi-objektiv metodik har været afprøvet på Gjern å oplandet (Jensen et al., 2001). Fra udlandet har været anvendt nye metoder baseret på Bayesian recursive estimation, BaRe (Gupta, 2001), hvorved der eventuelt kan opnås en væsentlig effektivisering af den automatiske kalibrering, idet parameter løbende ”opdateres” under hver kørsel efter at ny information er analyseret (fx en ny hændelse stor/eller lav afstrømning).
<b>Fremtidigt vidensbehov</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Gevinsten ved automatisk contra manuel kalibrering</li><li>- Egnethed af automatiske kalibreringsmetodikker og usikkerhedsvurdering ved stor modelkomplexitet og transiente modeller for grundvand/overfladevand (ca. 100.000 beregningskasser)</li><li>- Behov for at fastlægge metoder til vurdering af nødvendig modelkomplexitet til forskellige forhold</li><li>- Fastsættelse af nøjagtighedskrav (performance kriterier)</li></ul>
<b>Forslag til undersøgelser for at opnå ny viden</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- identifikation af metodikker ud fra litteratur og erfaringer fra udlandet</li><li>- modelstudier for 3-4 oplande med opstilling af transiente teknikker for (fx Gjern, Karup) og test af metodik for 1-2 DK-model oplande)</li><li>- videnssynthese med vurdering af afviklingstider, reproducerbarhed, objektivitet og nytteværdi (i forhold til manuel kalibrering og validering)</li></ul>