

# Temperatur identificerer interaktion mellem grundvand og overfladevand

Identifikation af zoner med grundvandsindstrømning i overfladevand er essentiel, hvor overfladevandet er sårbart overfor forurening fra punktkilder. Temperatur er en god, naturlig tracer, der kan benyttes ved undersøgelse af interaktionen mellem grundvand og overfladevand. Metoder til måling af den rumlige og tidslige variation i temperatur præsenteres her.

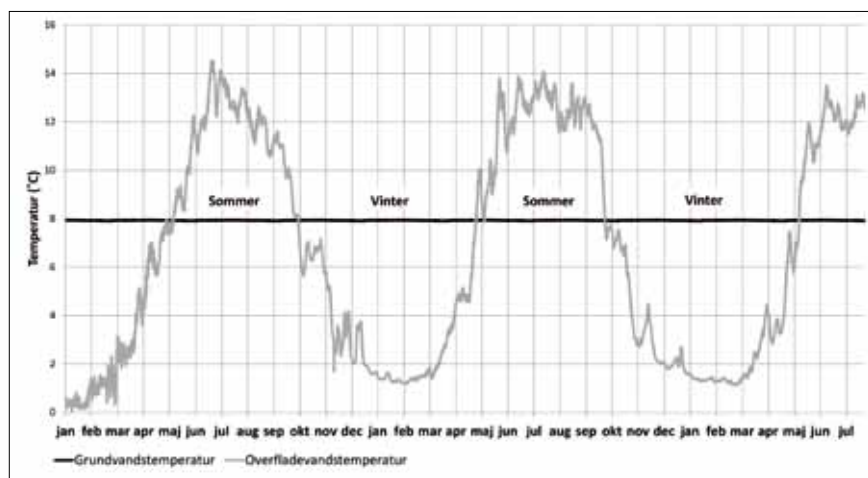
GRO LILBÆK & ANDERS G CHRISTENSEN

Grundvandstilstrømningen til overfladevand (fx vandløb, søer og tidevandszoner) kan have stor betydning for sårbarheden af overfladevandet i forhold til forurening fra punktkilder (fx områder med industri) og fladekilder (fx N og P fra landbrug). Forureningsfluxen vil være afhængig af sammenfald mellem forureningsfanen fra en lokal kilde og zoner med stor tilstrømning af grundvand. For at kunne risikovurdere og/eller planlægge oprensning af forureningen er der behov for detaljeret viden om det forurenede grundvands strømningsvej og derfor identifikation af indstrømningszoner.

Tilstrømningen af grundvand kan variere både rumligt og tidsligt. Den rumlige variation kan fx skyldes variationen i geologien nær vandløbet i kombination med grundvandets strømningsretning relativt hertil. Den tidslige variation kan skyldes fx sæsonvariationen i nedbørsmængde og intensitet samt fluktuationen i grundvandsniveauet.

## Temperatur som tracer

I starten af 1900-tallet blev det observeret, at der sker en temperaturoverførsel, når vand strømmer gennem porøse medier /1/. Som følge heraf kan varme benyttes som en naturlig



Figur 1. Eksempel på den tidlige temperaturvariation (°C) i henholdsvis overfladevand og grundvand (8 m u.t.).

tracer til undersøgelse af interaktionen mellem grundvand og overfladevand (fx /2/).

Fordelen ved at benytte temperatur som tracer er, at man udnytter naturlige forskelle i temperaturer (temperaturgradienter). Ydermere er temperatur en robust parameter, der er nem at måle og monitorere. Der er således ikke behov for at tilsætte tracers (fx farvestof, kemikalier) for at kunne vurdere strømningsforhold. Dermed er der heller ikke behov for kemisk analyse af prøver.

Ved måling i overfladevand udnyttes forskellen mellem grundvandets relativt konstante temperatur (8-10 °C) og overfladevan-

dets sæsonpåvirkede temperatur (Figur 1).

Ved tilstrømning af grundvand til overfladevand vil temperaturen i sedimentet om sommeren være relativt kold i forhold til temperaturen i vandsøjlen /2/. Det modsatte er tilfældet om vinteren, hvor temperaturen i sedimentet vil være relativt varm i forhold til temperaturen i vandsøjlen. Fluktuationen i sedimentets temperatur vil således være lille i forhold til fluktuationen i vandsøjlen (Figur 2A). Infiltration af overfladevand i sedimentet vil resultere i mere ens temperaturer i sedimentet og vandsøjlen og dermed større fluktuationer i sedimentets temperatur (Figur 2B).

## Måling af temperatur

Der findes mange metoder til måling af temperatur. Ofte anvendes et termometer (så som et termoelement) til temperaturmålinger, da det er en nem og billig metode. Et termoelement måler temperaturen i et enkelt punkt og kan med en datalogger måle den tidlige variation i punktet. Der er således behov for mange termoelementer ved bestemmelse af den rumlige temperatur variation.

En mindre kendt metode er 'distributed temperature sensing' (DTS). Her måles temperaturen ved at anvende et fiber optisk kabel (lyslederkabel) som sensor. Der måles med stor præcision samt høj tidlig og rumlig opløsning <sup>3/</sup>. Metoden kan anvendes til blandt andet kortlægning af temperaturfordelingen over store distancer og områder (m eller km skala). Boks 1 angiver eksempler på andre typer undersøgelser, som DTS-metoden ligeledes kan anvendes til.

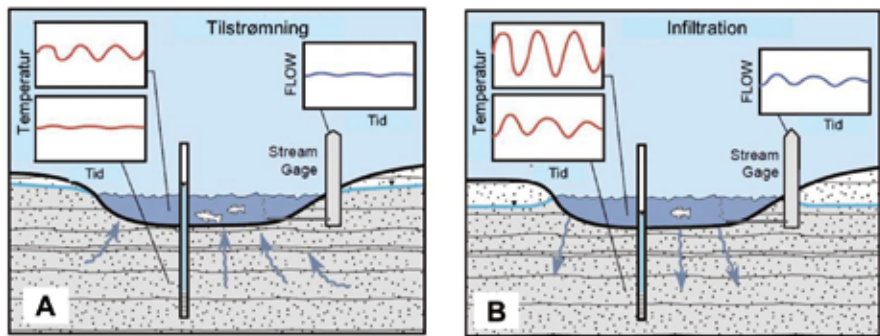
## Distributed temperature sensing (DTS)

DTS-målingen udføres ved at en lyspuls (laserys) bliver sendt gennem det fiber optiske kabel, og når lyset rammer en 'urenhed' i kablet reflekteres en del af lyset <sup>3/</sup>. Positionen af en given måling bestemmes ud fra kendskab til lysets hastighed i kablet.

Afhængig af typen af det fiber optiske kabel og styrken af DTS-instrumentet kan temperaturer måles over en afstand på op til 30 km med en rumlig opløsning på ned til 12,5 cm og tidlig opløsning på 0,1 Hz (10 sekunder). Præcisionen af målingerne afhænger af frekvensen af målingerne. En midling af målinger over en længere periode sænker usikkerheden <sup>3/</sup>. Figur 3 viser udstyret, der anvendes ved måling med DTS.

Ved kortlægning af områder med indstrømning i overfladevand lægges kablet ud langs bunden af vandløbet (Figur 3c). Udlæggets udformning vil variere alt efter lokalitet, da det afhænger af faktorer så som bredde på vandløb, distance og areal man vil undersøge samt detaljeringsgrad. Kablet kan lægges ud som ét langt, kontinuert kabel og derved dække en stor distance, det kan lægges flere gange frem og tilbage i vandløbet (loops) eller i zig-zag for at dække et større areal.

Ved kontinuert at måle temperaturen ved vand-sediment grænsefladen langs bunden af et vandløb kan områder, hvor temperaturer er forskellige fra omgivelserne, kortlægges (Figur 4). Om sommeren/efteråret vil indstrømningsområder være indikeret af koldere temperaturer, mens de om vinteren vil være indikeret af varmere temperaturer. Måling med DTS over en længere periode kan ligeledes påvise den



Figur 2. Konceptuel model for variationen i temperatur i henholdsvis overfladevand og sediment for områder med (A) tilstrømning af grundvand og (B) infiltration af overfladevand (modificeret fra USGS, 2008).

rumlige og tidlige variation i indstrømningsområder.

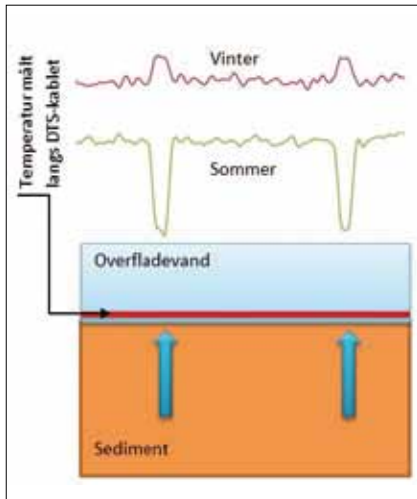
## Identifikation af indstrømningsområde

DTS-dataene analyseres almindeligvis ved at anvende tre indeks <sup>4/</sup>:

- Temperaturen ved bunden af vandløbet på det koldeste tidspunkt
- Temperaturen ved bunden af vandløbet på det varmeste tidspunkt
- Forskellen i temperatur ved bunden af vandløbet mellem det koldeste og varmeste tidspunkt (amplitude)



Figur 3. (A) DTS-metoden består af et fiber optisk kabel (rødt kabel på tromle), et DTS-system med laser og computer (åben, grå boks), samt strømforsyning (bilbatterier i aluminiumskassen). (B) Udlæg af kablet i overfladevand gøres lettest, hvis kablet kan transporteres i en båd. (C) Eksempel på udlæg af fiber optisk kabel langs bunden af vandløbet.



Figur 4. Konceptuel model, der illustrerer udlæg af DTS-kablet langs bunden af et vandløb. De blå pile indikerer, hvor evidens for indstrømning om vinteren ses som en varmere temperatur (rød graf) og om sommeren ses som en koldere temperatur (grøn graf).

Om vinteren, vil områder med stor grundvandsindstrømning ses som varmere temperatur end de øvrige målepunkter både på det koldeste og varmeste tidspunkt (omvendt om sommeren). Dette medfører en lav amplitude i disse områder, idet den store grundvandsindstrømning vil bevirke, at lufttemperaturen ikke vil påvirke temperaturen ved vandløbets bund signifikant. Indstrømningsområder kan identificeres med størst sikkerhed, hvis disse tre indeks stemmer overens (dvs. indeks 1 og 2 viser varme-/kuldeanomali og indeks 3 er lav). Metoden kan således bedst "se" områder med signifikant indstrømning og ikke diffus indstrømning.

Steder, hvor temperaturen viser en varmeanomali, men amplituden er høj (indeks 3),

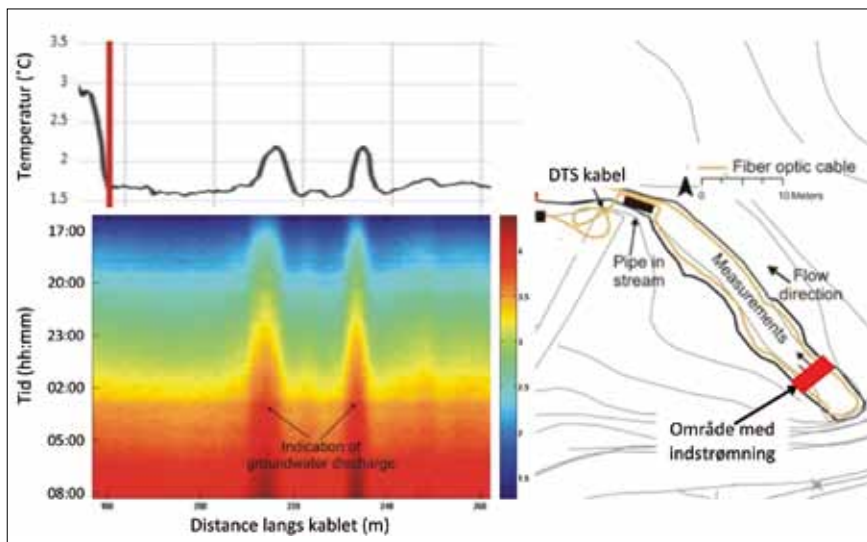
kan ikke med sikkerhed identificeres som et indstrømningsområde. Den høje amplitude kan eksempelvis skyldes sediment dækning på kablet (mere end 1 cm) eller en påvirkning fra lufttemperaturen, som følge af for eksempel lav vandstand og derved mulig indstråling fra solen. Årsagen kan imidlertid også skyldes, at fluxen er lav, så indstrømningen ikke påvirker temperaturen markant.

### Case: Evidens fra et svensk vandløb

På en lokalitet i Sverige blev et BruSense fiber optisk kabel udlagt parallelt med vandløbets strømningsretning. Kablet blev udlagt i to tracéer (frem og tilbage i vandløbet), hvorved temperaturfordelingen på tværs af vandløbet kan observeres. Typisk er kablet udlagt langs brinken, og hvor vandløbet er dybest. Kablet fæstnes stedvist med pløkke for at sikre, at det ikke flyttes af vandets strømning. Denne form for udlæg giver ydermere mulighed for at vurdere, om et indstrømningsområde forekommer i hele bredden af vandløbet eller kun langs den ene brink eller bunden. Målinger blev udført med en frekvens på 30 sekunder og midlet over en 10 minutters periode.

Forhindringer i vandløbet i form af fx vegetation, væltede træer, store sten eller konstruktioner (rørføring) medfører, at kablet til tider må føres i luften i stedet for langs bunden. Dette ses tydeligt på måledataene og da der ingen markeringer er på selv kablet, der viser de absolute målepunkter, kan disse luftmålinger benyttes ved datatolkning til identifikation af specifikke placeringer. Sådanne 'fixpunkter' kan ligeledes benyttes til markering af fx enden af et måleområde, før kablet føres den modsatte vej.

Figur 5 viser et eksempel på, hvorledes det fiber optiske kabel er udlagt samt hvorledes



Figur 5. Eksempel på DTS-måledata (venstre), hvor et indstrømningsområde er synligt. Kablets udlæg er vist til venstre med markering af indstrømningsområdet.

**Boks 1.** Eksempler på andre typer undersøgelser som DTS-metoden kan anvendes til:

- Infiltration i jorden
- Mixing i søer
- Tidevandsdynamik
- Lækagesøgning i spildevandsledninger
- Vertikal flux i borehuller
- Dannelse af lossepladsgas
- Lufttemperatur og vind

DTS-måledata kan se ud, når et område med signifikant grundvandsstilstrømning detekteres. På figuren er vist temperaturmålingerne langs kablet til et enkelt tidspunkt (øverst til venstre). Der ses to tydelige toppe, som skyldes tilstrømning af varmere grundvand. Et mere farverigt plot, der viser både den rumlige og tidlige variation i temperatur langs kablet, ses nedenunder. Opad y-aksen ses tidspunkter på døgnet og langs x-aksen vises distancen langs kablet. På denne del af figuren ses områderne med tilstrømning af grundvand lige så tydeligt som på den øverste del af figuren.

Grundet kablets udlægning (jf. Figur 5), viser de to toppe på temperatur-plottet, at grundvandsstilstrømningen sker langs begge brinker i et begrænset område. Derved indikeres det, at området med signifikant indstrømning findes i hele vandløbets bredde.

### Kvantificering af indstrømning

Efter områder med signifikant indstrømning er identificeret kan størrelsen af tilstrømningen (fluxen) kvantificeres ved at måle den vertikale temperaturfordeling i den øvre del af sedimenterne under vandløbets bund.

Eksempler på temperaturprofiler er vist i figur 6. Konkave temperaturkurver viser tilstrømning af grundvand (opadrettet flux), mens konvekse kurver viser udstrømning af overfladevand (nedadrettet gradient). Hældningen på kurven for temperaturprofilen antyder størrelsen af fluxen.

Temperaturfordelingen over dybden er påvirket af flere varmeforplantningsprocesser, hvoraf de vigtigste er varmeledning, som følge af sedimentets ledningsevne, og varmekonvektion (eller -advektion), som er transport af varme ved grundvands strømning.

Den vertikale grundvandsflux,  $q_z$  (opad eller nedadrettet; Figur 6), kan estimeres ud fra temperaturen ved overfladevand-sediment grænsefladen ( $T_s$ ), grundvands temperaturen ( $T_g$ ) i dybden  $L$ , samt temperaturfordelingen  $T_z$  over dybden  $L/5$ . En steady-state vertikal flux antages, samt ingen horisontal flux og homo-

gene sedimentforhold (og derved ensartet termiske egenskaber). Relationen mellem varmekonvektion og varmeledning bestemmes ved Peclet's tal. Dette er en hurtig og effektiv metode til kvantificering af indstrømningen.

I indstrømningsområdet identificeret i Figur 5 er den vertikale flux om vinteren estimeret til at variere mellem  $0,08 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}^2$  og  $0,37 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}^2$ . Den højeste flux er opnået nær den brink, der vender mod grundvandets generelle strømningsretning. En ulempe ved denne målemetode er imidlertid, at der er tale om indirekte målinger, idet beregningerne er underlagt en række antagelser i forbindelse med modelleringen. Derudover er den estimerede vertikale grundvandsflux kun repræsentativ for det område, hvor det vertikale profil er udført.

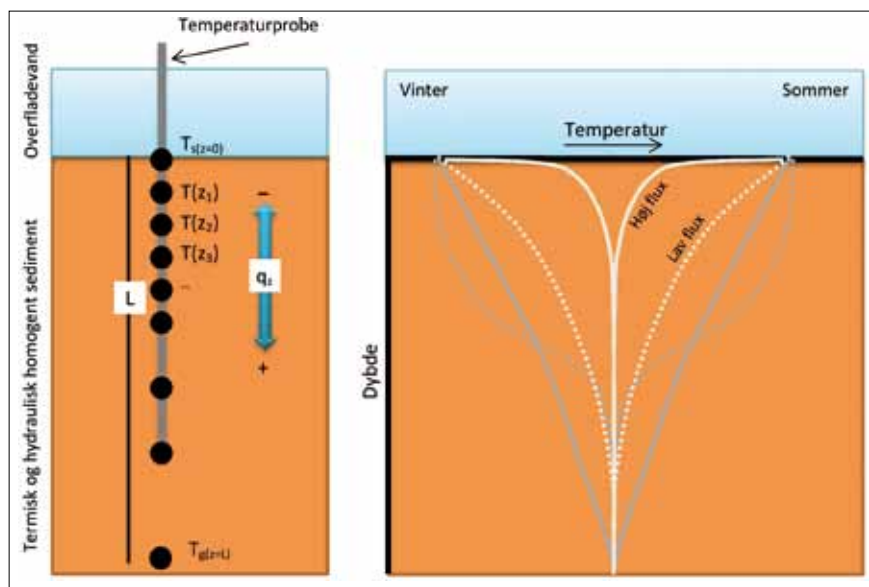
### Beregning af masseflux

Kendskab til det grundvandskemiske indhold, uorganisk (fx N og P) så vel som organisk (fx chlorerede opløsningsmidler og PFAS), ved et område med indstrømning gør det muligt at evaluere massefluxen for det tilstrømmende grundvand. Altså estimering af mængden af forurening, der tilføres overfladevandet. En stor tilstrømning af grundvand (stor flux) kombineret med et lavt indhold af forurening i grundvandet kan resultere i blot en begrænset påvirkning af overfladevandet. Omvendt kan et område med en lille indstrømning (lav flux) kombineret med høje forureningskoncentrationer medføre en signifikant påvirkning af overfladevandet.

For det identificerede område i figur 5 varierer koncentrationen af PCE i den øvre del af grundvandet ( $0,5 \text{ m}$  under vandløbets bund) mellem  $0,3 \text{ mg/l}$  om vinteren og  $15 \text{ mg/l}$  om sommeren. Denne dybde vurderes at være under vandløbets hyporheic zone (opblandingszone i sedimentet tættest på vandløbet), og derfor repræsenterer grundvandets sammensætning. Dette medfører en masseflux der varierer mellem  $1-55 \text{ g}/\text{år}/\text{m}^2$  om vinteren og  $15-876 \text{ g}/\text{år}/\text{m}^2$  om sommeren. Denne variation i den indstrømmende masseflux kan genfindes i vandløbets koncentrationer. Her varierer PCE-koncentrationen i området mellem  $1 \text{ ug/l}$  om vinteren og  $150 \text{ ug/l}$  om sommeren. Miljøstyrelsens kvalitetskriterier for overfladevand er på  $10 \text{ ug PCE/l}$ .

### Konklusion

Indstrømning af grundvand til overfladevand sker alene, når forhold så som opadrettet gradient og permeabel bund er til stede, hvilket medfører en tidlig og rumlig variation af både koncentreret og diffus indstrømning. Vandføringen i overfladevandet påvirker ligeledes



Figur 6. Konceptuel model for måling af vertikalt sediment-temperaturprofil til modellering af den vertikale grundvandsflux. Kurverne til højre viser eksempler på temperaturprofiler henholdsvis vinter og sommer; konkave kurver (hvide) viser tilstrømning af grundvand (opadrettet flux) og konvekse kurver (grå) viser udstrømning af overfladevand (nedadrettet gradient). Hældningen på kurven antyder størrelsen af fluxen.

indstrømningen, idet den er påvirket af variationen i nedbør (intensitet og mængde), sne-smeltning og grundvandets fluktuation.

Temperatur som naturlig tracer er brugbar generelt indenfor hydrologi og har en bred anvendelse (USGS, 2008). Her er anvendelsen til identifikation af interaktion mellem overfladevand og grundvand præsenteret i form af DTS-metoden samt vertikale temperaturprofiler.

DTS-metoden er hurtig og effektiv til identifikation og kortlægning af områder med signifikant grundvandsindstrømning under de rigtige forudsætninger (temperaturgradienter, bundforhold etc). Bedste resultater opnås sommer og vinter, når temperaturgradienten (temperaturforskellen) mellem grundvandet og overfladevandet er stor. Undersøgelser har ydermere vist, at ved selv en kort måleperiode kan det hurtigt identificeres, hvorvidt signifikant indstrømning finder sted på en given strækning.

Estimering af den indstrømmende vertikale grundvandsflux kan gøres hurtigt og effektivt ved brug af vertikale temperaturprofiler. Blot skal man være opmærksom på, at målinger kun er repræsentative for det (lille) område, hvor profilet er udført.

Undersøgelser viser ligeledes, at der er en tidlig og rumlig variation i den indstrømmende grundvands kemiske koncentrationer samt i den indstrømmende flux. Kombinationen af disse bevirker at der potentielt opstår en rumlig og tidlig variation i overfladevands koncentrationer.

### Referencer

- 1/ Bouyoucos, G. 1915. Effects of temperature on some of the most important physical processes in soils: East Lansing, Michigan State University, Michigan College of Agriculture Technical Bulletin 24, 63 p.
- 2/ USGS. 2008. Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water. Techniques and Methods 4-D2. Edited by Donald O. Rosenberry and James W. LaBaugh. 128 s.
- 3/ Selker, J. S., L. Thévenaz, H. Huwald, A. Mallet, W. Luxemburg, N. van de Giesen, M. Stejskal, J. Zeman, M. Westhoff, and M. B. Parlange. 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems, Water Resour. Res., 42, W12202, doi:10.1029/2006WR005326.
- 4/ Lowry, C.S., Walker, J.F., Hunt, R.J., Anderson, M.P. 2007. Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor. Water Resour. Res., 43, W10408.
- 5/ Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I. S. 1965. Rates of Vertical Groundwater Movement Estimated from the Earth's Thermal profile. Water Resources Research 1(2), 325-328.

GRO LILBEK, Ph.D., er hydrogeolog (gri@niras.dk) og ANDERS G CHRISTENSEN er expertisechef (agc@niras.dk) i afdelingen for Miljø ved NIRAS, Sortemosevej 19, 3450 Allerød.