

# Skansehageprojektet: et felteksperiment med saltvandsindtrængning – strømning og geokemi

MARTIN SØGAARD ANDERSEN, VIBEKE NYVANG IVERSEN & FLEMMING DAMGAARD CHRISTENSEN

Andersen, M.S., Iversen, V.N. & Christensen, F.D. 2002–12–11: Skansehageprojektet: et felteksperiment med saltvandsindtrængning – strømning og geokemi. DGF grundvandsmøde 31. oktober 2002. *Geologisk Tidsskrift*, hæfte 2, pp. 6–8, København.

Et eksperiment omhandlende saltvandsindtrængning blev udført i et terrænnært grundvandsmagasin, der støder ud til Isefjorden i Nordsjælland. Projektets hovedformål var at undersøge de fysiske og geokemiske processer i grænsefladen mellem salt og ferskt grundvand. Undersøgelsen omfatter: forholdene i den naturligt forekommende grænseflade mellem saltvand og ferskvand, forholdene under en kunstig frembragt saltvandsindtrængning samt den efterfølgende naturlige opferskning. Undersøgelserne blev udført i et ca. 9 m tykt grundvandsmagasin, der hovedsageligt består af holocæne marine sand- og grusaflejringer iblandet enkelte tynde tørvelag. Det frie grundvandsmagasin har en høj hydraulisk ledningsevne ( $K \sim 2 \times 10^{-4}$  m/s) og afvander et mindre opland. Nedadtil afgrænses magasinet af et lavpermeabelt tørvelag. Omkring 100 permanente observationsboringer blev lavet i et 120 m langt transekt vinkelret på grænsefladen mellem salt- og ferskvandet og parallelt med grundvandsstrømmen. Disse boringer blev filtersat i dybder varierende fra 2 til 10 m (se Fig. 1A).

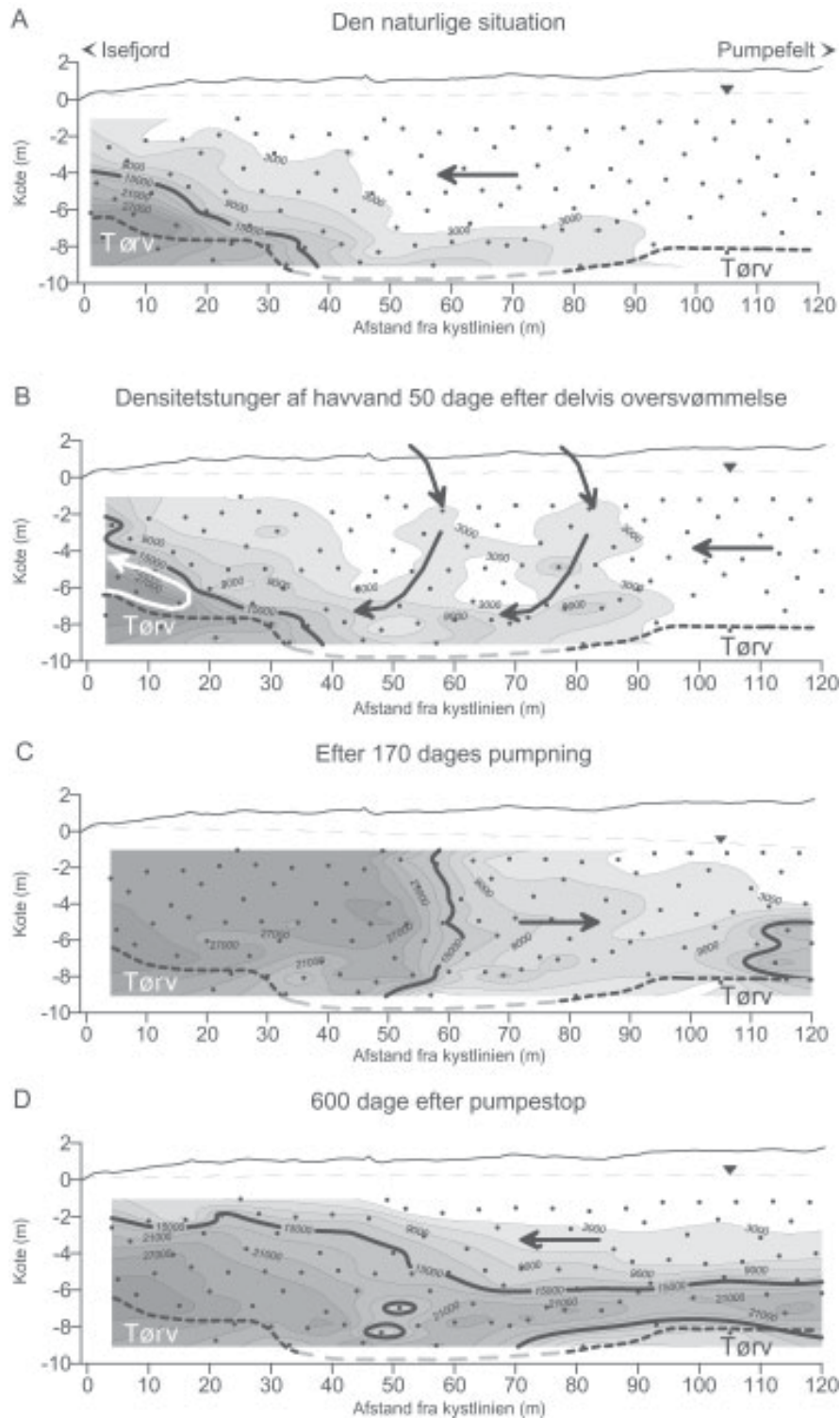
## Den naturlige situation

Under naturlige forhold er grænsefladen mellem salt- og ferskt grundvand relativt flad og hælder ind mod land (Fig. 1A). Havvand transporteres til stadighed naturligt ind i grundvandsmagasinet ved 1) en langsom, densitetsstyret cirkulation langs magasinets bund og 2) stormsituationer, hvor oversvømmelser medfører at tunger af havvand siver ned gennem den ferske del af magasinet som illustreret i Figur 1B. Under de naturlige forhold er omsætningen af organisk stof en af de dominerende geokemiske processer. Den væsentligste årsag til dette er magasinets unge alder og dermed relativt høje indhold af reaktivt organisk stof. I den ferske del af magasinet foregår omsætningen af organisk stof hovedsageligt ved

metandannelse (reaktion 1 i Boks 1). Sulfatreduktion (reaktion 2 i Boks 1) dominerer i den saltvandspåvirkede del af magasinet, hvor sulfat tilføres magasinet med havvandet. Reduktionen af sulfat medfører høje koncentrationer af opløst uorganisk kulstof ( $\text{HCO}_3^-$ ) og svovlbrinte ( $\text{H}_2\text{S}$ ) i denne del af magasinet. Ionbytning er ligeledes en betydningsfuld proces (reaktion 3 i Boks 1). Den naturlige transport af havvand ind i magasinet, dvs. den langsomme cirkulation af havvand i den salte del og specielt havvands-tungerne (skitseret på Fig. 1B), introducerer  $\text{Na}^+$  og  $\text{Mg}^{2+}$  i den ferske del af magasinet, hvor  $\text{Ca}^{2+}$  er dominerende på ionbytningskomplekset. Her ionbytter  $\text{Na}^+$  og  $\text{Mg}^{2+}$  med  $\text{Ca}^{2+}$ , hvilket øger  $\text{Ca}^{2+}$ -koncentrationen i grundvandet og kan medføre en udfældning af kalcit (reaktion 4 i Boks 1). Den modsatte ionbytningsproces forekommer, når magasinet efterfølgende opferskes (dvs. havvandet skylles ud), og  $\text{Ca}^{2+}$  fra oplandets ferske grundvand ionbytter med  $\text{Na}^+$  og  $\text{Mg}^{2+}$  på ionbytningskomplekset. Resultatet er en lav  $\text{Ca}^{2+}$ -koncentration i grundvandet og et øget potentiale for opløsning af kalcit. Således opstår et komplekst mønster af opløsning og udfældning af kalcit drevet af ionbytningsprocesser og omsætningen af organisk stof.

## Saltvandsindtrængnings-eksperimentet

Den forcerede saltvandsindtrængning blev frembragt ved oppumpning af ferskt grundvand. I en afstand af ca. 140 m fra kysten (i forlængelse af transektet med observationsboringerne) blev syv pumpeboringer installeret og udstyret med dykpumper fra Grundfos (af typen SQE-7). Der blev i alt oppumpet ca. 200.000  $\text{m}^3$  grundvand i de ca. 10 måneder indtrængningsforsøget varede. En indadrettet hydraulisk gradient



Figur 1: Vertikale transekter af elektrisk konduktivitet (EC) [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] på porevandsprøver som mål for saltholdigheden ( $EC_{\text{Havvand}} \sim 30\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $EC_{\text{Ferskvand}} \sim 500\ \mu\text{S}/\text{cm}$  og 50 % havvand er repræsenteret ved kurven for  $15\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Målingerne er udført i et transekt af observationsboringer (angivet med **prikker**) henover salt-/ferskvandsgrænsefladen ved Skansehage i Nordsjælland. **A:** EC i den naturlige grænseflade. **B:** EC ca. 50 dage efter en storm, hvor en del af magasinet blev oversvømmet med havvand, hvilket gav anledning til en densitetstransport af havvandstunger ned gennem magasinet. **C:** EC efter 170 dages pumpning i saltvandsindtrængningseksperimentet. **D:** EC ca. 600 dage efter ophørt pumpning. **Pilene** viser de dominerende strømningsretninger. Den **nedre stiplede linje** angiver den omtrentlige placering af den lavpermable tørv, dvs. magasinets bund. **Stiplede grå linje:** tørvslag uvist eller mangler.

**Boks 1: Geokemiske processer**  
**X angiver ionbytningsskomplekset i (3)**

<b>Metandannelse:</b>	
$2CH_2O \rightarrow CH_4 + CO_2$	(1)
<b>Sulfatreduktion:</b>	
$2CH_2O + SO_4^{2-} \rightarrow H_2S + 2HCO_3^-$	(2)
<b>Ionbytning:</b>	
$Na^+ + \frac{1}{2}Ca - X_2 \leftrightarrow \frac{1}{2}Ca^{2+} + Na - X$	(3)
<b>Kalcitopløsning/udfældning</b>	
$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$	(4)

på 5% medførte, at grænsen mellem salt- og ferskvand bevægede sig ind i magasinet med en hastighed på ca. 9 m/måned. Den observerede indtrængningsfront er hovedsagelig vertikal i hele magasinets tykkelse (Fig. 1C). At fronten ikke er kileformet skyldes sandsynligvis, at den indadrettede trykgradient forårsaget af oppumpningen er af meget større betydning for strømmingen end densitetsgradienten over grænsefladen mellem salt- og ferskvand. Variationer på indtrængningsfronten er forårsaget af variationer i den hydrauliske ledningsevne, lækage af ferskt grundvand op gennem magasinets bund samt en heterogen saltvandsfordeling ved forsøgets start. Det saltvand, der trænger ind i den ferske del af magasinet, kan kemisk karakteriseres ved to zoner: en 10–20 m bred zone med saltvand fra den oprindelige salt-/ferskvandsgrænseflade, hvor de oprindelige høje koncentrationer af bikarbonat og svovlbrinte genfindes, og bagved denne oprindelige grænseflade en zone med friskt havvand fra Isefjorden. I den korte periode indtrængningsforsøget varede, nåede omsætningen af organisk stof ved sulfatreduktion ikke at have større indflydelse på vandkemien. Derimod gav de høje koncentrationer af  $Na^+$  og  $Mg^{2+}$ , der blev transporteret ind i magasinet med saltvandet anledning til ionbytning, hvor  $Ca^{2+}$  blev frigivet til porevandet.

På indtrængningsfronten blev der opbygget en top i  $Ca^{2+}$ -koncentrationen, som faldt sammen med den høje bikarbonatkoncentration fra den oprindelige salt-/ferskvandsgrænseflade. Dette bevirkede, at porevandet opnåede overmætning i forhold til kalcit med en deraf følgende mulighed for udfældning.

## Den naturlig opferskning

I dag, næsten to år efter at pumperne og dermed den forcerede saltvandsindtrængning er standset, er magasinet stadig kraftigt saltvandspåvirket (Fig. 1D). Salt-/ferskvandsgrænsefladen er igen blevet flad med det ferske vand øverst, men det ser ud til at den dybere del af magasinet opferskes væsentligt langsommere end den øvre del. Den naturlige opferskning har således vist sig at være en langsom proces sammenlignet med indtrængningen. En 3-dimensionel densitetsafhængig strømningsmodel antyder, at for ikke-reaktive stoffer (fx klorid) kan det tage op mod 10 år at nå tilbage til den initiale situation (som i Fig. 1A) og endnu længere tid for reaktive stoffer som  $Ca^{2+}$  og  $Mg^{2+}$ , der retarderes som følge af ionbytning. I projektets nuværende fase overvåges de geokemiske effekter af opferskningen.

I projektet er der p.t. udgivet to Ph.D. afhandlinger og en tredje er på vej:

Andersen, M.S. 2001: Geochemical processes at a seawater-freshwater interface. *Miljø & Ressourcer (E&R)*, Danmarks Tekniske Universitet (DTU), 145 pp.

Christensen, F.D. 2002. Numerical analysis of physical and geochemical processes for seawater intrusion in coastal aquifers. *Miljø & Ressourcer (E&R)*, Danmarks Tekniske Universitet (DTU), 158 pp.

Iversen, V.N. (forventet 2003): Redox processes at the salt/-freshwater interface. *Miljø & Ressourcer (E&R)*, Danmarks Tekniske Universitet (DTU).

---

Martin Søgaard Andersen, Danmarks Tekniske Universitet, Miljø & Ressourcer, Bygning 115, DK-2800 Kongens Lyngby, e-post: msa@er.dtu.dk

Vibeke Nyvang Iversen, Danmarks Tekniske Universitet, Miljø & Ressourcer, e-post: vni@er.dtu.dk

Flemming Damgaard Christensen, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse/Dansk Hydraulisk Institut, e-post: fdc@geus.dk