

ÅRSAGER TIL ARSEN I GRUNDEVANDSRESSOURCEN

Forskningslektor Claus Kjøller
Institut for Miljø & Ressourcer, DTU/Rambøll

Lektor Flemming Larsen, Institut for Miljø & Ressourcer, DTU

ATV MØDE

ARSEN I GRUNDEVAND OG DRILLEKVVAND

HELNAN, MARSELIS HOTEL
3. oktober 2007

RESUMÉ

Der gennemgås en række typeeksempler på årsager til, at der kan optræde forhøjede indhold af arsen i grundvand. Der præsenteres således eksempler på arsenfrigivelse ved henholdsvis pyritoxidation, desorption og reduktion af jernoxider. På grundlag af de gennemgåede typeeksempler og den geografiske og grundvandskemiske fordeling af indvindingsboringer med forhøjede indhold af arsen i Danmark opstilles der en mulig hypotese for forekomsten af forhøjede arsenindhold i dansk grundvand.

INDLEDNING

Det naturligt forekommende grundvandsproblem, der på verdensplan har haft størst bevågenhed de sidste 5-10 år, er problemet med forhøjede koncentrationer af arsen i grundvandsressourcen.

Årsagen til den store bevågenhed er, at problemet ofte forekommer i områder, hvor det grundet begrænsede økonomiske og teknologiske ressourcer ikke er muligt at rense grundvandet, så der kan opnås acceptable indhold af arsen i det vand, der anvendes til drikkevand. Resultatet er, at et meget stort antal mennesker i de særligt arsenpåvirkede områder af Verden drikker vand med indhold af arsen, der er langt over den af WHO anbefalede grænseværdi på 10 µg/l.

Alene i Bangladesh skønnes det, at op mod 40 millioner mennesker drikker vand med arsenindhold over 50 µg/l. Tilsvarende findes der store områder med arsenpåvirket grundvand (med koncentrationer over 50 µg/l) i lande som Vietnam, Kina, Argentina og Chile. /1/.

I Danmark er grænseværdien for arsen ved afgang fra vandværk på 5 µg/l /2/. En opgørelse baseret på samtlige danske boringskontrollodata viser at ca. 17 % af de analyserede indvindingsboringer i Danmark indvinder grundvand med arsenindhold over denne grænseværdi, mens kun ca. 1 % af indvindingsboringerne indvinder grundvand med arsenindhold over 30 µg/l. En tilsvarende opgørelse i forhold til rentvandsanlæg viser at ca. 4% af disse leverer drikkevand med arsenindhold over 5 µg/l /3/.

Med det formål at udvikle metoder til nedbringelse af arsenindholdet i det danske drikkevand har Miljøstyrelsen i 2007 igangsat et projekt om arsen i dansk grundvand og drikkevand, der er finansieret af Vandpuljens midler. Projektet udarbejdes af et konsortium bestående af Institut for Miljø & Ressourcer og Watertech, og der arbejdes både med problemstillinger i forhold til forekomsten af arsen i grundvandsressourcen og i forhold til rensning for arsen i vandbehandlingen på vandværker.

Dette indlæg er bl.a. baseret på det arbejde, der hidtil er udført i forbindelse med ressourcodelen af Miljøstyrelsens projekt.

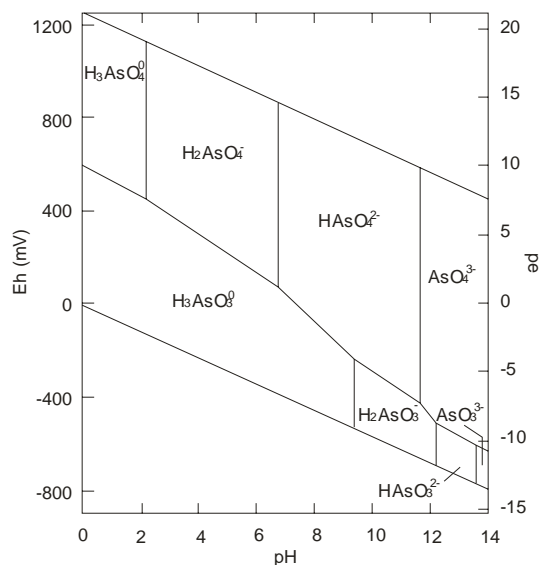
FORMÅL

Formålet med dette indlæg er at give et overblik over de generelt kendte årsager til, at der naturligt kan optræde arsen i forhøjede koncentrationer i grundvandet. Herunder, på det eksisterende vidensgrundlag, at beskrive mulige årsager til forhøjede indhold af arsen i dansk grundvand.

GENERELT OM ARSENS GRUNDEVANDSGEOKEMI

Arsen i grundvandet

I naturlige, vandige systemer optræder arsen i oxidationstrinene +3 og +5. Hvis arsen i kemiske forbindelser optræder i oxidationstrin +3 kaldes det arsenit, mens arsen i oxidationstrin +5 kaldes arsenat. I reduceret grundvand vil arsen hovedsageligt forekomme som arsenit, mens det i oxideret vand vil forekomme som arsenat. Både arsenit og arsenat danner vandige komplekser – særligt med ilt (O) og hydroxider (OH). De dominerende komplekser for arsenat er H_2AsO_4^- og HAsO_4^{2-} , mens arsenit ved neutral pH forekommer som H_3AsO_3^0 (jf. figur 1).



Figur 1. Stabilitetsdiagram for arsen ved varierende surhed (pH) og oxidationsforhold (Eh).

Alt andet lige vil det forhold, at arsenat optræder som anioner betyde, at sorption til overfladen af mineraler og organisk stof er størst under sure forhold, hvor overfladerne er positivt ladede. Den neutrale ladning af det dominerende kompleks for arsenit ved neutrale pH kan være forklaringen på en generelt mindre sorption, og større mobilitet, af arsen i dette oxidationstrin /4/. Mobiliteten af arsen i grundvandsmagasiner er således blandt andre forhold betinget af oxidations- og reduktionsprocesser (redox-forholdene) samt grundvandets pH-værdi. Derudover er det påvist at sorption af arsen til mineraler og organisk stof sker i konkurrence med andre anioner såsom fosfat (PO_4^{3-}), bikarbonat (HCO_3^-) og selenat (HSeO_3^-) /5/. Generelt øges mobiliteten af arsen i grundvand jo højere koncentrationen er af disse ioner og jo højere pH-værdien er i grundvandet.

Mulige kilder til arsen

I grundvandsmagasiner er sulfider og oxider de to typer af almindeligt forekommende mineraler, hvor der ses de højeste indhold af arsen. Disse to typer af mineraler anses derfor også for i de fleste at være de væsentligste kilder til forhøjede indhold af arsen i grundvandet /1/.

I sulfider, hvoraf pyrit (FeS_2) er det almindeligst forekommende mineral i grundvandsmagasiner, substituerer arsen for svovl, og kan i særlige tilfælde udgøre mere end 10 % (w/w) af mineralet /1/. I Danmark er der påvist gennemsnitlige koncentrationer af arsen i pyrit fra kalkmagasinerne i Østsjælland på 2-5 % (w/w) /6/.

Hvad angår oxidmineraler kan arsen både findes indbygget i oxiderne som en del af mineralstrukturen eller adsorberet til overfladen af oxiderne. På grund af den normalt store kvantitet af jernoxider i forhold til andre oxider (f.eks. aluminiumoxider og manganoxider) i grundvandsmagasiner, anses jernoxider for at udgøre den væsentligste kilde til forhøjede arsenindhold i grundvandsmagasiner, hvor arsenkilden skønnes at være oxider.

Derudover findes arsen typisk i mindre mængder associeret med f.eks. kalk, lermineraler og organisk stof i grundvandsmagasiner /1/.

EKSEMPLER PÅ ÅRSAGER TIL ARSEN I GRUNDVANDET

Koncentrationen af arsen i regnvand er i størrelsesordenen $0,03 \mu\text{g/l}$, mens indholdet i havvand er i størrelsesordenen $3-4 \mu\text{g/l}$ /7/. Forhøjede arsenindhold i grundvand må derfor skyldes, at der sker frigivelse af arsen fra mineraler, der findes i de lag grundvandet infiltrerer igennem eller i selve grundvandsmagasinet.

Der skal overordnet være to forhold, der gør sig gældende for at et grundvandsmagasin bliver påvirket af forhøjede arsenindhold:

- 1) Arsen skal frigives fra en kilde
- 2) De hydrogeologiske og grundvandskemiske forhold skal være sådan, at arsen forbliver i opløsning efter det er frigivet.

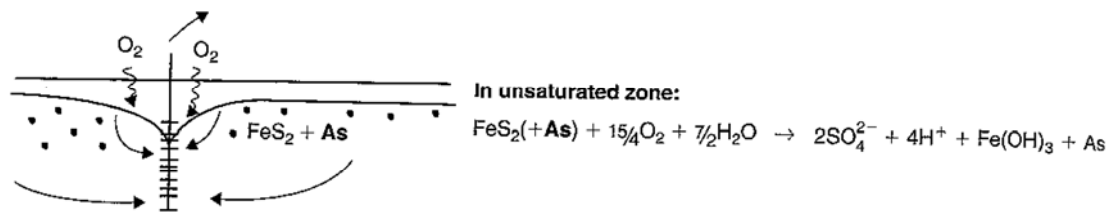
En lang række undersøgelser, i de dele af Verden der er påvirket af særligt høje arsenindhold i grundvandet, har sigtet imod at beskrive, hvornår ovenstående forhold er gældende (jf. bl.a. /5/ og referencer heri). På baggrund heraf kan der generelt opstilles tre typer af scenarier, som ved naturlige grundvandsgeokemiske processer kan resultere i forhøjede indhold af arsen i grundvandet:

- 1) Arsenfrigivelse ved pyritoxidation
- 2) Arsenfrigivelse ved desorption fra jernoxider
- 3) Arsenfrigivelse ved reduktiv opløsning af jernoxider

Derudover kan særligt høje arsenindhold forekomme i grundvandsmagasiner i tilknytning til geotermiske kilder. De tre ovenfor nævnte processer, der fører til forhøjede arsenindhold i grundvandet, er nærmere beskrevet i det efterfølgende.

Arsenfrigivelse ved pyritoxidation

Som illustreret i figur 2 frigives der ved denne proces arsen til grundvandet som følge af, at sedimenter med pyrit (eller andre sulfider) bliver eksponeret for atmosfærisk ilt. Da pyritten ofte indeholder arsen i sporkoncentrationer, vil dette i første omgang resultere i en frigivelse af arsen til grundvandet.



Figur 2. Skitse af frigivelse af arsen ved oxidation af pyrit. (Fra /8/).

De mest kendte eksempler på, at pyritoxidation kan resultere i forhøjede arsenindhold i grundvandet er i forbindelse med de såkaldte "open-pit" miner, hvor store mængder sediment graves op i "tipper" som er frit eksponeret for den atmosfæriske ilt. Som følge af pyritoxidation i tipperne, kan der derfor udvaskes endog meget høje koncentrationer af arsen fra tipperne (f.eks. /9/).

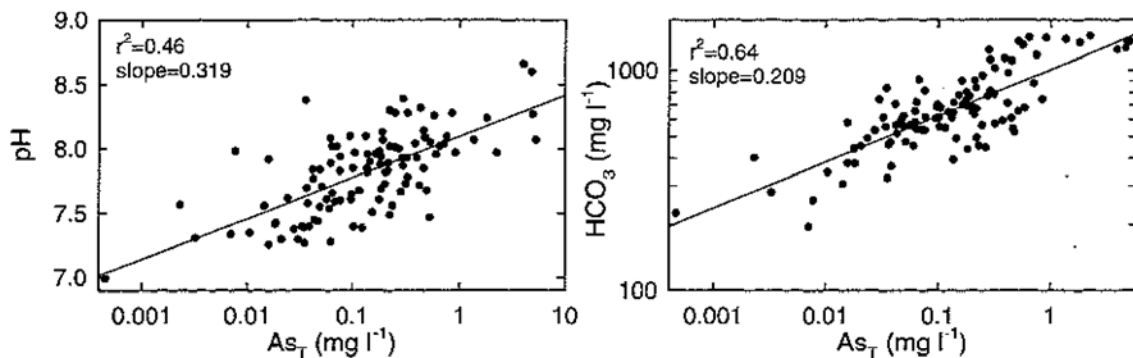
Da arsen i disse oxiderede miljøer hovedsageligt findes på den oxiderede arsenat form, og da pH-værdien ofte er lav, vil der alt andet lige ske en stor sorption af arsen til sedimenterne efter det er frigivet fra pyritten ved oxidationsprocessen. En stor del af det arsen, der frigives, bindes derfor formentlig igen til sedimenterne. Ved områder med minedrift er årsagen til, at der sker mobilisering af arsen i grundvandet derfor sandsynligvis de meget høje koncentrationer, der genereres i disse områder (op til flere hundrede milligram pr. liter).

Der findes endnu ikke eksempler på mobilisering af høje arsenkoncentrationer i grundvandet som følge af pyritoxidation i områder, der ikke er påvirket af minedrift. Dog har Polizotto et al. (2006) /10/ foreslået, at de høje arsenkoncentrationer, der ses i Bangladesh, kan være et resultat af pyritoxidation i topjorden.

Arsenfrigivelse ved desorption fra jernoxider

Desorption af arsen fra jernoxider kan i realiteten forekomme i områder hvor en hvilken som helst konkurrerende anion stiger i koncentration eller hvor pH-værdien stiger.

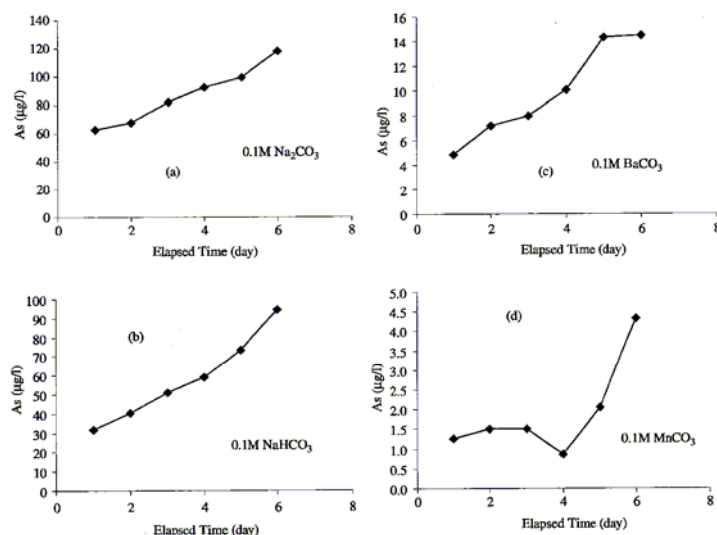
I figur 3 er vist koncentrationen af arsen sammen med henholdsvis grundvandets pH-værdi og indholdet af bikarbonat i grundvand fra Pampasen i Argentina.



Figur 3. Variation i grundvandets pH og bikarbonatkoncentration som funktion af indholdet af arsen. Data er fra grundvandsmagasiner på den argentinske Pampas. (Fra /11/)

Af figuren ses det, at der er en relativt god sammenhæng mellem arsenindholdet i grundvandet og grundvandets pH-værdi og bikarbonatkoncentration. På grundlag heraf foreslås det, at mobiliseringen af arsen sker som følge af desorption fra jernoxider, der findes i relativt høje koncentrationer i grundvandsmagasinet. Da grundvandet i det undersøgte grundvandsmagasin er oxideret, og da arsenat derfor er den dominerende arsenspecie, antages det, at desorptionen både kan ske som følge af en pH-effekt og som følge af konkurrence med bikarbonat om de tilgængelige sorptionspladser. De høje pH-værdier og bikarbonatkoncentrationer skyldes i tilfældet, der er illustreret i figur 3, særlig intens forvitring af silikat- og karbonatminerale, der er forårsaget af det tørre og varme klima på Pampasen /11/.

Et andet eksempel på at stigende koncentrationer af bikarbonat kan resultere i mobilisering af arsen til grundvandet, er illustreret i figur 4, som viser resultatet af en række laboratorieforsøg med sediment fra et grundvandsmagasin i Bangladesh.



Figur 4. Resultater af udvaskningsforsøg med sediment fra et grundvandsmagasin i Bangladesh. Som angivet i figuren er der udvasket med forskellige typer af karbonatopløsninger. (Fra /12/).

I laboratorieforsøgene blev sedimentet fra grundvandsmagasinet udvasket med en række forskellige karbonatrige opløsninger. Som det ses af figur 4, viste alle opløsninger en mobilisering af arsen, hvilket tolkes at skyldes desorption som følge af de høje bikarbonatkoncentrationer, der anvendes i udvaskningsforsøgene /12/.

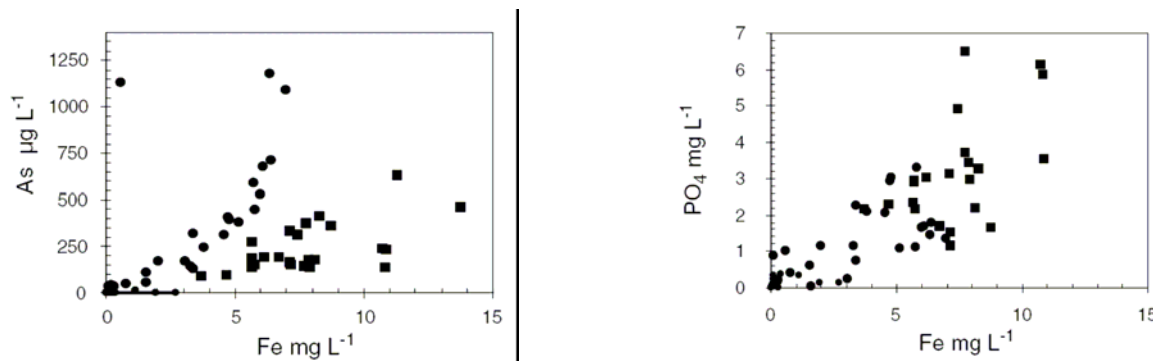
Udover de viste effekter af ændringer i grundvandets pH-værdi og bikarbonatkoncentration, er det sandsynligt, at en ændring i koncentrationen af andre stoffer såsom fosfat og selenat kan resultere i forhøjede indhold af arsen i grundvandet.

Arsenfrigivelse ved reduktion af jernoxider

Frigivelse af arsen som følge af reduktion af jernoxider er den hyppigst foreslåede proces, når forhøjede arsenindhold i grundvandsmagasiner skal forklares /1/. Ved denne proces sker der frigivelse af arsen til grundvandet, fordi der i grundvandsmagasinet sker reduktion af jernoxider i forbindelse med omsætningen af organisk stof.

I jernoxiderne findes arsen bundet enten på overfladen eller indbygget i selve mineralstrukturen som arsen i oxidationstrinnet +5. Ved reduktionen af oxiderne frigives der derfor også arsenat til grundvandet, som grundet de reducerende forhold efterfølgende reduceres til arsenit. Flere steder er det dog beskrevet, at arsenat i sådanne miljøer kan udgøre 5-10 % af den totale arsenmængde i grundvandet, hvilket formentlig skyldes at omsætningen af arsenat til arsenit er kinetisk begrænset i forhold til frigivelsen fra oxiderne ved reduktion.

Et eksempel på resultater fra en undersøgelse af en række Bengalske grundvandsmagasiner, hvor der er konstateret arsenfrigivelse i forbindelse med reduktion af jernoxider, er vist i figur 5.



Figur 5. Resultater af vandanalyser fra indvindingsboringer fra et Vestbengalsk grundvandsmagasin. Firkanter angiver boringer med et lavt As/Fe forhold, mens prikker angiver boringer med et relativt højt As/Fe forhold . (Fra /13/).

Som det ses af figur 5 er der en rimelig sammenhæng mellem indholdet af jern og indholdet af arsen og fosfat i de undersøgte grundvandsmagasiner, hvilket indikerer, at arsen og fosfat frigives ved reduktion af jernoxider. De to type af symboler indikerer vandtyper med forskellige As/Fe forhold (jf. figurteksten), hvilket formentlig reflekterer, at de jernoxider, der opløses, har et varierende indhold af arsen. En interessant konklusion, der drages på grundlag af undersøgelsen, der ligger til grund for figur 5 er i øvrigt, at høje arsenkoncentrationer først

opnås, når der er sket fuldstændig reduktion af jernoxiderne i de undersøgte sedimenter. Således er der i nævnte undersøgelse ikke konstateret arsenkoncentrationer over 10 µg/l i grundvandsmagasiner, hvor der er konstateret indhold af jernoxider i sedimentet, der udgør grundvandsmagasinet /13/.

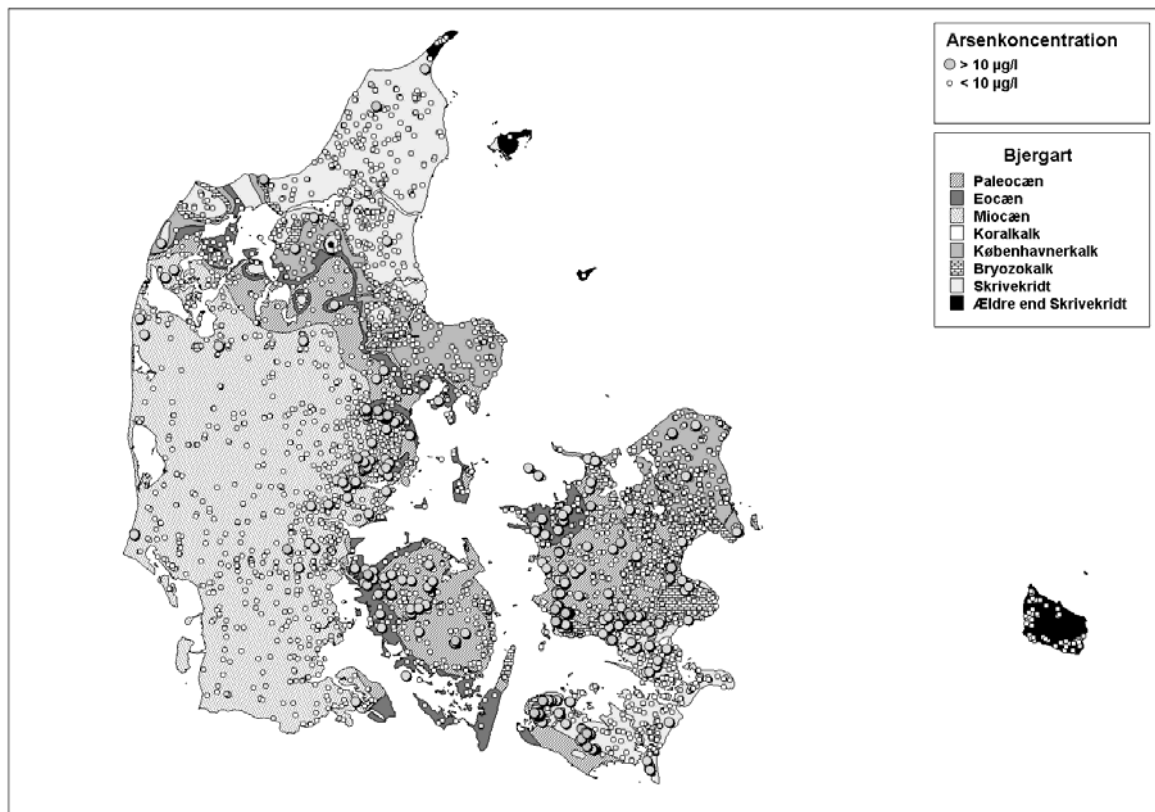
Et andet godt eksempel på arsenfrigivelse ved reduktion af jernoxider er beskrevet andetsteds i nærværende rapport fra ATV-mødet /14/. I denne undersøgelse måles der et indhold af arsen i grundvandet på op til ca. 400 µg/l samtidig med at der måles indhold af jernoxider på 10-20 mg/kg i sedimenterne, der udgør grundvandsmagasinet. Det synes således ikke at være generelt, at alle oxider i sedimentet skal reduceres, førend der kan ske mobilisering af væsentlige mængder arsen i grundvand.

MULIGE ÅRSAGER TIL ARSEN I DANSK GRUNDVAND

Der findes i Danmark endnu ikke tilsvarende veldokumenterede eksempler på processer, der fører til de forhøjede arsenindhold, der ses i danske grundvandsmagasiner. Der er dog flere steder udført undersøgelser, som med de internationale studier som typeeksempler, kan bidrage til vores forståelse af hvorfor der også i danske grundvandsmagasiner visse steder findes forhøjede indhold af arsen.

Fordelingen af arsen i dansk grundvand

I forbindelse med Miljøstyrelsens igangværende arsenprojekt, er der foretaget et udtræk af medianværdier for arsenkoncentrationen i GEUS' boringskontroldatabase. Udtrækket giver 4833 medianværdier for arsenindholdet i dansk grundvand, som fordeler sig geografisk, som vist i figur 6.



Figur 6. Geografisk fordeling af arsen i dansk grundvand. Baseret på udtræk af 4833 medianværdier for arsenindholdet i boringskontroldata fra perioden 1990-2006.

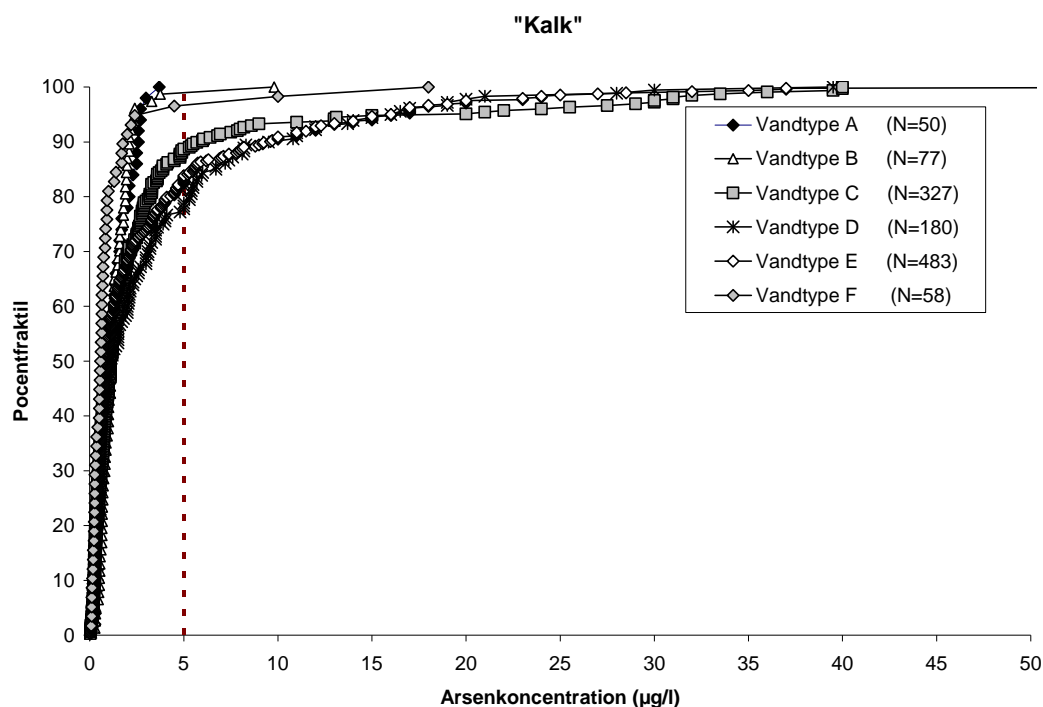
Af figuren ses det at høje arsenindhold særligt findes i grundvandet i Østjylland, på Fyn, i Vest- og Sydsjælland samt på Lolland. På Lolland og i Sydsjælland er de høje arsenindhold hovedsageligt knyttet til kalkmagasiner, mens de høje arsenindhold i den resterende del af landet findes i grundvandsmagasiner af smeltevandssand.

For at undersøge om de høje arsenindhold findes i særlige vandtyper i de nævnte grundvandsmagasiner er det i figur 6 viste dataudtræk inddelt i seks vandtyper (jf. tabel 1). Vandtypeinddelingen er valgt, så den hovedsageligt afspejler vandets redoxkemi, og svarer omtrent til den vandtypeinddeling, der tidligere er anvendt i /4/.

Tabel : Definerede vandtyper, der er anvendt til vandtypeklassificeringen af råvandsanalyserne fra GEUS' boringskontroldatabase.

Vandtype	Ilt (mg/l)	Nitrat (mg/l)	Sulfat (mg/l)	Svovlbrinte (mg/l)
(A) Oxideret	> 2	> 2	> 40	±
(B) Anoxisk	< 2	> 2	> 40	±
(C) Svagt reduceret	< 2	< 2	> 40	±
(D) Reduceret	< 2	< 2	20 – 40	±
(E) Stærkt reduceret	< 2	< 2	< 20	±
(F) Højt sulfidindhold	< 2	< 2	< 20	> 0,5

I figur 7 er vist fordelingen af arsenindhold i kalkgrundvandsmagasiner på de i tabel 1 definerede vandtyper. En opgørelse for grundvandsmagasiner af smeltevandssand viser et tilsvarende billede /3/.



Figur 7. Sammenhæng mellem arsenindhold i grundvandet og vandtyper i grundvandsmagasiner af kalk i Danmark. Jf. tabel 1 for klassificering af vandtyper.

Figur 7 viser i lighed med tidligere undersøgelser i Danmark, at der stort set ikke findes forhøjede indhold af arsen i de grundvandsmagasiner, hvor grundvandet indeholder ilt eller nitrat. Det synes således som en forudsætning for at der kan optræde høje arsenindhold i grundvandet i Danmark, at der er reducerende forhold i grundvandsmagasinet. Dog viser

opgørelsen i figur 7, at der tilsyneladende under meget stærkt reducerende forhold, hvor der findes høje koncentrationer af svovlbrinte, ikke findes forhøjede arsenindhold i grundvandet. Dette skyldes formentlig, at arsen i sådanne grundvandsmagasiner immobiliseres ved udfældning med sulfidminerale som eksempelvis pyrit /15/.

Jernoxider som kilde?

Det er tidligere foreslået (f.eks. /4/), at den geografiske fordeling af arsen i dansk grundvand i stor udstrækning kan forklares ved tilstedeværelsen af marint ler fra Oligocæn, Eocæn og Miocæn i den prækvartære overflade, og at dette marine ler derfor udgør en primær kilde til de forhøjede arsenindhold, der ses i dansk grundvand.

Som det fremgår af figur 6, synes marint tertiært ler da også at udgøre prækvartæroverfladen de fleste af de steder, hvor der ses forhøjede indhold af arsen i grundvandet. Særligt ved Århus ses der god overensstemmelse mellem høje arsenindhold i grundvandet og grundvandsmagasiner, der er beliggende i begravede dalsystemer, som er eroderet i det tertiære marine ler. Tilsvarende er det på Fyn og Nordlolland samt i Vestsjælland sandsynligt, at prækvartært marint ler er oparbejdet i istidsaflejringerne, mens det på Sydsjælland kræver at et af de ældre isfremstød har skredet hen over det marine ler fra en nordlig retning og dernæst lagt en arsenrig moræne på kalken, hvorfra der i dag sker frigivelse af arsen. Det er ikke umiddelbart sandsynligt at kalken i sig selv er kilden til arsen i kalkmagasinerne, da man så ville forvente arsen overalt i kalkmagasiner med reduceret vand. Eksempler på at dette ikke er tilfældet, er på Møn og Falster, hvor der findes reduceret grundvand med et lavt indhold af arsen.

Grundet de reducerede forhold, der findes i danske grundvandsmagasiner med forhøjede arsenindhold (jf. figur 7) er det sandsynligt, at reduktion af jernoxider er en væsentlig årsag til, at der forekommer grundvand med forhøjede indhold af arsen.

Dette strider umiddelbart mod hypotesen om at tertiært marint ler er en væsentlig kilde til de forhøjede indhold af arsen, idet det må forventes at arsen overordnet findes associeret med pyrit i det marine ler /16/. Såfremt kilden til arsen hovedsageligt er *oparbejdet* marint ler i de kvartære aflejringer, er det dog sandsynligt, at der på et tidspunkt i forbindelse med oparbejdelsen af det marine ler, er sket oxidation af en væsentlig del af den pyrit, der findes i det marine ler. Herved er der formentlig efterfølgende udfældet jernoxider med associeret arsen (adsorberet eller i mineralerne).

Taget den reducerede vandtype i betragtning kan en forklaring på de nuværende arsenindhold være, at der ved efterfølgende begravelse af de arsenholdige aflejringer er skabt et miljø, hvor der ved reduktion eller desorption frigives arsen.

Dette er den arbejdshypotese, der pt. arbejdes med i det videre arbejde i forbindelse med Miljøstyrelsens igangværende arsenprojekt.

Pyrit som kilde?

Det vides, at der gennem tiden har forekommet omfattende pyritoxidation i Køge Bugt området som har resulteret i forhøjede indhold af sulfat, calcium og nikkel i det grundvand,

der indvindes i dette område. Da arsen findes i pyrit i omtrent samme koncentration som nikkel, sker der formentlig også frigivelse af væsentlige mængder arsen i forbindelse med pyritoxidationen. Denne mængde arsen resulterer dog ikke umiddelbart i forhøjede koncentrationer i grundvandet (jf. figur 6), hvilket sandsynligvis skyldes, at arsen bindes til sedimentet i kalkmagasinet.

Laboratorieforsøg har således vist, at der for sorption af arsen på ren kalcit kan estimeres en K_d værdi på ca. 25 l/kg (ved $\rho_b = 2$ kg/l og en porøsitet på 45 % /17/). Til sammenligning kan en tilsvarende K_d værdi for nikkel beregnes til ca. 2 l/kg afhængigt af de øvrige grundvandsgeokemiske forhold. Dette betyder, alt andet lige, at mobiliteten af arsen i kalkmagasiner er 10 gange ”mindre” end mobiliteten af nikkel, som i forvejen er lav /18/.

PERSPEKTIVER

Som det fremgår af ovenstående beskrivelse er der stadigvæk en række uklare forhold vedrørende årsagerne til at der i visse danske grundvandsmagasiner findes forhøjede indhold af arsen. Det forventes dog, at en række af disse forhold er væsentligt bedre beskrevet når arbejdet i forbindelse med Miljøstyrelsens arsenprojekt er afsluttet.

REFERENCER

- /1/ Smedley, P. og Kinniburgh, D.G., 2005. Arsenic in groundwater and the environment. In: Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U. og Smedley, P. (eds.), *Essentials of medical geology*. Elsevier.
- /2/ Miljø- og Energiministeriet, 2006. Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg (nr. 1664 af 14. december 2006).
- /3/ Internt statusnotat for projektet ”Arsen i dansk grundvand og drikkevand”. Notatet er dateret den 16. juli 2007 og udarbejdet af Institut for Miljø og Ressourcer og Watertech.
- /4/ Larsen C. L. og Larsen F. (2003) Arsen i danske sedimenter og grundvand. *Vand & Jord* 10. Årgang, december 2003, 147-151.
- /5/ Smedley, P. and Kinniburgh, D. (2002): A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters, *Applied Geochemistry*, 17, (5), 517-568.
- /6/ Knudsen, C. og Karup-Møller, S., in prep. Fe-Ni-Co-As bearing bravoites from Danish limestone formations.
- /7/ Krauskopf, K.B., 1979. *Introduction to geochemistry* (2nd ed). McGraw-Hill.
- /8/ Appelo, C.A.J. og Postma, D., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). A.A.Balkema.
- /9/ Bodéan, F., Barnger, P., Piantone, P., Lassin, A., Azaroual, M., Gaucher, E. og Braibant, G., 2004. Arsenic behaviour in gold-ore mill tailings, Massif Central, France: hydrogeochemical study and investigation og in-situ redox signatures. *Applied Geochemistry*, 19, 1785-1800.
- /10/ Polizotto, M.L., Harvey, C.F., Li, G., Badruzzman, B., Ali, A., Newville, M., Sutton, S. og Fendorf, S., 2006. Solid-phases and desorption processes within Bangladesh sediments. *Chemical Geology*, 228, 97-111.
- /11/ Smedley, P., Zhang, M., Zhang, G. og Luo, Z., 2003. Mobilisation of arsenic and other trace elements in fluvio-lacustrine aquifers of the Huhhot Basin, Inner Mongolia. *Applied Geochemistry*, 18, 1453-1477.
- /12/ Anwar, H.M., Akai, J., Sakugawa, H., 2004. Mobilization of arsenic from subsurface sediments by effect of bicarbonate ions in groundwater. *Chemosphere*, 54, 753-762.
- /13/ McArthur, J.M., Banerjee, D.M., Hudson-Edwards, K.A., Mishra, R., Purohit, R., Ravenscroft, P., Cronin, A., Howarth, R.J., Chatterjee, A., Talukder, t., Lowry, D., Houghton, S., Chahda, D.K., 2004. Natural organic matter in sedimentary basins and its relation to arsenic in anoxic groundwater: the example of West Bengal and its worldwide implications. *Applied Geochemistry*, 19, 1255-1293.

- /14/ Postma, D., Larsen, F., Hue, N.T.M., Duc, M.T., Viet, P.H., Nhan, P.Q. og Jessen, S., 2007. Arsenic in groundwater of the Red River floodplain, Vietnam: controlling geochemical processes and reactive transport modeling, Submitted til *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- /15/ Knudsen, C., 1999. Nikkel i grundvand. København, Køge bugt og Stevns området. GEUS Rapport 1999/57.
- /16/ Heilmann-Clausen, C. og Surlyk, F., 2006. Korallrev og lerhav. In: Larsen, G. (ed). *Naturen i Danmark – Geologien*. Gyldendal.
- /17/ Sø, H.U., Postma, D., Larsen, F., Jakobsen, R., 2007. Binding af arsenat og arsenit på kalcit. ATV-møde om Arsen, Hotel Marselis, Århus, 3. oktober, 2007.
- /18/ Kjøller, C., Jessen, S., Larsen, F., Postma, D og Jakobsen, R., 2006. Binding af nikkel til og frigivelse fra naturlige kalksedimenter. Arbejdsrapport nr. 8 fra Miljøstyrelsen, 2006.