Geokemisk modellering og jordforurening

Der er store uudnyttede muligheder for brug af geokemiske modelleringsværktøjer i forbindelse med forurenede jorde, og en optimering af oprensningen af disse. Et eksempel med jordforurening med ioner af tungmetallerne kobber, chrom og arsen fra træimprægneringsvirksomhed demonstrerer, hvordan geokemisk modellering på en hurtig og relativ enkel måde bidrager til at kvantificere spredningsrisikoen og virkningen af mulige oprensningstiltag ved den givne lokalitet.

Anya B. Vinstrup
Peter E. Holm

Hos de amtslige myndigheder i Danmark er der pr. 1. januar 2003 registret 14.456 forurenede lokaliteter, heraf 7213 kortlagt på vidensniveau 1 og 5810 på vidensniveau 2 (se boks 1), og derudover 1433 lokaliteter hvor der endnu ikke er foretaget nogen form for kortlægning /1/. Miljøstyrelsen vurderer, at der er 227 lokaliteter i Danmark, hvor der ligger, eller har ligget, en træimprægneringsvirksomhed /2/. Af disse lokaliteter er 126 at finde i ROKA-databasen (Miljøstyrelsens **R**egister **O**ver **K**emikalie**A**ffaldsdepoter), hvor forureningsårsagen direkte angives som træimprægneringsvirksomhed. En gennemgang af forureningselementerne for disse lokaliteter viser, at tungmetaller, og her især kobber, chrom og arsen, er de primære forureningskomponenter, og at arsen ofte er den største forureningstrussel.

Kvalitetskravet for arsen i drikkevand blev i oktober 2001 skærpet fra 50 μg/L til 10 μg/L ved forbrugerens taphane og 5 μg/L ved indgangen til ejendom, ligesom der er kommet yderligere krav til analyser for arsen /3/. Disse nye grænseværdier skulle være opfyldt senest d. 25. december 2003. Der er således netop nu større opmærksomhed på problematikkerne omkring arsenforurenede jorde, og spredningen af arsen i det terrestriske og akvatiske miljø. Desuden er det nødvendigt at øge fokus på mulighederne for minimeringen af risicis ved oprensning af lokaliteter forurenet med træimprægneringsmidler indeholdende de toksiske ioner af kobber, chrom og arsen. Jorde forurenede med træimprægneringsmidler efter træimprægneringsanstalter udgør derfor en trussel både ved håndtering af jorden, f.eks. ved støvspredning via opgravning, og ved spredning til overfladevand og grundvand samt optag i fødekæden.

Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening har siden dets start i 1996 frem til 2002 iværksat 134 projekter /4/. Programmet har til formål at skabe grundlag for at foretage mere effektive oprydninger af forurenede lokaliteter, herunder at afprøve samt implementere nye oprydnings- og afværgeteknologier. For tungmetalforurenet jord har de afprøvede metoder omfattet jordvask, phytoremediering, elektrodialytisk rensning, kemisk oxidation/reduktion, jordvask og termisk rensning /4/. Metoderne har udvist store forskelle i effekt afhængig af metallet, metallets speciering * og de konkrete forhold på de forurenede lokaliteter. Kompleksiteten af den opnåede effekt, og de deraf afledte usikkerheder ved økonomien i oprensningen, betyder, at valget af oprensningsmetode er vanskelig og yderst kritisk. Specieringen af en metalion afhænger af mange faktorer, bl.a. jordtype, indhold af andre stoffer i jorden og redoxforhold. Effekten af en oprensning er svær at forudsige, når specieringen af de forurenende komponenter påvirkes. I det hele taget er der stor mangel på viden om elementers speciering i en forurenet jord. Det er derfor nødvendigt med metoder til at forudsige og vurdere mulige effekter af en oprensning i de konkrete sager.

Boks 1

Vidensniveau 1 (V1)

Et areal betegnes som kortlagt på vidensniveau 1, hvis der er tilvejebragt en faktisk viden om aktiviteter på arealet eller aktiviteter på andre arealer, der kan have været kilde til jordforurening på arealet (Jordforureningsloven §4)

Vidensniveau 2 (V2)

§5 Et areal betegnes som kortlagt på vidensniveau 2, hvis der er tilvejebragt et dokumentationsgrundlag, der gør, at det med høj grad af sikkerhed kan lægges til grund, at der på arealet er en jordforurening af en sådan art og koncentration, at forureningen kan have skadelig virkning på mennesker og miljø (Jordforureningsloven §5). Dette vidensniveau er påkrævet indenfor de offentlige indsatsområder; de steder, hvor forureningen kan have skadelig virkning på grundvand til drikkevandsforsyning eller skadelig virkning på mennesker i boligområder, børneinstitutioner eller offentlig legeplads (Jordforureningsloven §6-7)

Geokemiske modelleringsprogrammer

Geokemiske ligevægtsprogrammer bruges til at foretage simultane beregninger af mange ligevægtsudtryk for eksempelvis udfældnings- og opløsningsreaktioner samt kompleksdannelse. Computerspecieringsprogrammer som PHREEQC/5/ og MINTEQA2/6/ kan således

* *Speciering*
De forskellige kemiske former af et element, der tilsammen udgør den totale koncentration af elementet i en given prøve.
Eksempelvis kan specieringen af arsen i en prøve fra jordvandet udgøres af H_3AsO_3 og $H_2AsO_4^-$

udfra input vedr. totale indhold af kat- og anioner i eksempelvis en jordvæske samt en tilknyttet database med termodynamiske ligevægtskonstanter for alle potentielle reaktioner beregne output med fordelingen og sammensætning af alle kemiske specier (ioner og ionpar, f.eks. $CuCl^+$ og $HAsO_4^{2-}$) for den pågældende jordvæske. Modellerne kan også håndtere gas(luft)-væskefase og væske-fastfase ligevægte som opfældning/opløsning og sorption af stoffer til overflader. Sidstnævnte kræver dog, at man kan specificere overfladekarakteristika, hvilket man ofte ikke kan for jordprøver, men kun for overflader som er en del af mere velkontrollerede laboratoriesystemer.

En klar fordel ved computermodellering i forhold til eksperimentelle målinger er, at mulige ændringer relativt let kan simuleres i modellen, og betydningen af variationer i en valgt parameter (sensitivitetsanalyse) f.eks. pH kan undersøges for at se, hvilken effekt det har på resultaterne. Computermodelleringen har naturligvis den begrænsning, at resultaterne ikke kan blive bedre end det input og de parametre på hvilke den er baseret. Som nævnt er antagelsen om termodynamisk ligevægt i det undersøgte system en forudsætning for ligevægtsmodelleringerne. Langsom kinetik, jordens heterogenitet og biologiske fænomener kan betyde, at der ikke opnås ligevægt i jordsystemer, hvorfor de fremkomne resultater skal tages forholdsvis, og som et simplificeret bedste bud på en ukendt kompleks situation. Det er således nødvendigt at forholde sig kritisk til de fremkomne resultater.

Der er ikke væsentlige matematiske forskelle i de to specieringsprogrammer PHREEQC/5/ og MINTEQA2 /6/. Forskellen mellem programmerne ligger i brugergrænsefladen. PHREEQC er opbygget som en flowmodel, hvor input-formatet er meget frit, sådan at mulighederne for at opstille egne modeller og påvirke beregningerne i en ønsket retning er større. MINTEQA2 er derimod introduceret som et decideret geokemisk specieringsprogram med en mere stringent opbygning og strukturering. Dette kan være hæmmende for opbygningen af modeller og scenarier, men gør umiddelbart programmet mere enkelt at arbejde med. MINTEQA2 har desuden den fordel, at den findes i flere versioner med grafisk brugergrænseflade, der kan køre under Windows XP, f.eks Visual MINTEQA2 /7/. Derimod har PHREEQC en del flere features, og er bl.a. i stand til at modellere mættet transport samt inddrage reaktionskinetik i modelleringerne.

Modelværktøjerne PHREEQC, MINTEQA2 og Visual MINTEQ er alle freeware, og kan hentes ned sammen med manualer på henholdsvis http:// www.brr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/ , http://www.epa.gov/ceampubl/mmedia/minteq/ og http://www.lwr.kth.se/english/OurSoftWare/vminteq

Gennemførsel af geokemiske modelleringsprogrammer kræver som udgangspunkt en pH-værdi, samt de totale opløste koncentrationer af komponenterne, dvs. såvel forureningsstofferne som de øvrige ioner der er bestemt i forbindelse med undersøgelsen af lokaliteten f.eks. ved brug af multielementanalyser. I undersøgelsesrapporter vil metalkoncentrationer normalt være givet som det totale metalindhold i jorden pr. kg tørstof. For at omregne dette til en væskekoncentration af metallerne er det som regel nødvendigt at kende eller kunne estimere de enkelte metallers fordelingskoefficient, K_d, mellem jord og porevand. Kendes den lineære fordelingskoefficient K_d for et metal, er det muligt ud fra det totale metalindhold givet i forureningsrapporterne at opstille et udtryk for væskekoncentrationen af metallet (se boks 2) til brug i de videre modelleringer. Analyseresultater angivet i jordforureningsrapporter giver således et godt afsæt for inputdata til computermodelleringer.

Det er samtidig nødvendigt at arbejde med en baggrundselektrolyt, dvs. en standardkoncentration af de almindeligste makroioner i jordvandet (natrium-, kalium-, calcium-, magnesium-, nitrat-, chlorid-, fosfor-, sulfat-, carbonat- og jern-ioner). Hvis disse ikke kendes kan benyttes koncentrationer for lignende jordtyper som tilnærmelse. Se f.eks. drænvandsopgørelser fra Statens Planteavlsforsøg /9/.

Ved modelleringer i de omtalte programmer fremkommer output som et udtryk for koncentrationerne af de forskellige stoffers specier i opløsning samt relevante mineralers og faste fasers opløselighedsindeks (mætningsindeks). Dette output kan bruges til at beregne forhold mellem oxidationstrin, procent opløst og udfældet i væsken samt specieringsprofilen for eksempelvis kobber, chrom og arsen. Desuden er det muligt at undersøge i hvilken retning et bestemt oprensningstiltag vil kunne påvirke udfældning/opløsning i væsken.

Kauslunde-grunden, Fyn

Der er i et specialeprojekt fra 2003 /10/ arbejdet med de ovenfornævnte problemstillinger i 6 forskellige cases. Her skitseres kort et eksempel på en case og resultaterne af de geokemiske modelleringer. På den forurenede grunde i Kauslunde (figur 1) er der foretaget træimprægnering med kobber, chrom og arsen fra 1900 til 1971. Jordbunden er en grov sandblandet lerjord med pH-værdier omkring 6 og et højt indhold af organisk materiale (7 % kulstof). Arealet er på 20.000 m², og der er påvist forurening på stort set hele arealet, af primært arsen og kobber, med et estimeret spild på 10.000 kg arsen og 55.000 kg kobber. Lokaliteten er beliggende i et landbrugsområde i udkanten af Kauslunde by og ligger pt. ubenyttet hen, men har tidligere været brugt til bl.a. køreteknisk anlæg og knallertbane. Ved modelleringer ud fra data angivet i foru-

Boks 2 . K_d-værdier

En K_d-værdi angiver fordelingen af metal mellem jordens faste fase og jordens væskefase som vist af følgende udtryk:

$$K_d = \frac{[metal]_{fast}}{[metal]_{væske}}$$

Under antagelse af, at jordbundens metalindhold i gasfasen kan ignoreres, kan formlen omformuleres til:

$$K_d = \frac{([metal]_{total} - [metal]_{væske})}{[metal]_{væske}}$$

Der er foretaget flere eksperimentelle studier over sammenhænge mellem forskellige forbindelsers K_d-værdi og jordbundsfaktorer. For metaller er der lavet en opsamling af disse i Sauve *et al.* (2000) /8/, hvorfra det er muligt at se sammenhænge mellem K_d-værdi, pH, indhold af organisk materiale og det totale metalindhold. For kobber især er denne sammenhæng godt belyst, men jordbundsfaktorerne er vist kun at kunne forklare 60% af variationen indenfor fordelingskonstanterne. For chrom og arsen vedkommende er denne sammenhæng mindre godt belyst, og her er må man vælge at forlade sig på gennemsnitlige K_d-værdier eller foretage eksperimentelle undersøgelser af fordelingskonstanterne for de specifikke jorde.

Figur 1. *Kauslunde-grunden på Fyn; grunden set mod nordøst – et af de udbredte områder uden vegetation på lokaliteten. Det er også muligt at se udfældninger af kobber på murbrokker og fundament-rester på arealet.*

reningsrapporterne for lokaliteten og forskellige scenarier for oprensning (tilsætning af additiver til stabilisering eller accelereret udvask af komponenterne) er resultaterne som vist i tabel 1 fremkommet. Boks 3 angiver de anvendte input-data, og et eksempel på output-data. Bemærk, at indholdet af opløst organisk materiale ikke kendes og ikke indgår i beregningerne, hvilket naturligvis er en forsimpling af modellen.

Langt det meste af metallerne i jorden findes sorberet (>99,9%). Den ikke-sorberede fraktion af kobber og chrom i jorden er primært at finde på udfældet form som $CuFe_2O_4$, $Cu_{(s)}$ og Cr_2O_3, mens den fraktion arsen, der ikke er sorberet findes opløst i jordvæsken. Jordvæskekoncentrationerne af metalionerne er ligeledes givet i tabel 1. De dominerende specier af de undersøgte metalioner i jordvæsken er; for kobber Cu^+, for chrom $CrOH^{2+}$, og for arsen er det H_3AsO_3 (tabel 1).

Der er beregnet stabiliseringsscenarier for immobilisering af metallerne ved tilsætning af additiver til den metalforurenede jord. Tabel 2 viser den beregnede immobiliseringseffekt

Boks 3

Input

Kobber : 1010 mg/kg TS
Kd (Cu) 1264 L/kg /8/
Chrom : 198 mg/kg TS
Kd (Cr) : 14 920 L/kg /8/
Arsen 238 mg/kg TS
Kd (As) : 13 119 L/Kg /8/
pH 6 → pE 0,06 (under antaget ligevægt med O2)
Na+ 0,66 mM /9/
K+ 0,23 mM /9/
Ca2+ 0,92 mM /9/
Mg2+ 0,19 mM /9/
NO3- 0,22 mM /9/
Cl- 0,82 mM /9/
SO42- 0,15 mM /9/
PO43- 0,00026 mM /9/
HCO3- 0,51 mM
Fe2+ 0,0051 mM

Output

– eksempel for Cr(III)-forbindelser uden additiver tilsat

	[mol/L]
Cr(OH)2+	2,5E-07
Cr(OH)3 (aq)	9,8E-08
Cr(OH)4-	3,8E-13
Cr3+	3,3E-09
Cr2(OH)24+	8,5E-11
Cr2(OH)2(SO4)2 (aq)	5,5E-16
Cr2(OH)2SO42+	1,2E-13
Cr3(OH)45+	4,4E-13
CrCl2+	5,3E-13
CrH2PO42+	1,7E-13
CrHPO4+	1,8E-13
CrNO32+	1,2E-14
CrOH2+	6,1E-07
CrOHSO4 (aq)	4,9E-09
CrSO4+	2,5E-10
	Opløselighedsindeks SI
Cr(OH)3	-0,2
Cr2O3	0,0 (udfældet 6,8E-07 mol/L)
CrCl3	-43,0
FeCr2O4	-7,7
MgCr2O4	-9,4

Tabel 1. *Fordeling og forekommende form af metallerne i jorden ved Kauslunde lokaliteten.*

Kauslunde lokaliteten	Relativ sorberet mængde i forhold til total absolut mængde i jorden	De totale jordvæskekoncentrationer [mol/L] fordelt på metallernes oxidationstrin	Form af de(n) dominerende specie(r) i jordvæsken samt den procentvise dominans for hvert oxidationstrin
Kobber	99,95 %	Cu(I) 4,4E-09 Cu(II) 6,5E-12	Cu(I) Cu^{+} 48,6 % Cu(I) CuCl(aq) 43,9 % Cu(II) Cu^{2+} 92,5 %
Chrom	99,996 %	Cr(II) 2,0E-15 Cr(III) 9,6E-07 Cr(VI) 4,9E-38	Cr(II) $CrOH^{+}$ 86,3 % Cr(III) $CrOH_2^{+}$ 62,9 % Cr(VI) $HCrO_4^{-}$ 74,0 %
Arsen	99,995 %	As(III) 2,2E-07 As(V) 2,0E-10	As(III) H_3AsO_3 99,9 % As(V) $H_2AsO_4^{-}$ 88,9 %

Tabel 2. *Stabiliseringsscenarier for immobilisering af metallerne på Kauslunde-lokaliteten ved forskellige tilsætninger og påvirkninger. Effekten er angivet som den procentuelle ændring i mængden af udfældet metal.*

Metal	Kalkning med mættet CaCO3 (160 kg/ha)	Tilsætning af Jern(II)sulfat 1755 mM	Redoxændring til reducerende forhold[a] (pE 0,06 → pE –3,4)	Tilsætning af Natriumhydroxid (til et modelleret pH på 12,2)
Kobber	0 %	93 %	0,04 %	-98 %
Chrom	0 %	30 %	-0,02 %	-63 %
Arsen	0 %	0 %	0 %	0 %

a: De reducerende forhold kan f.eks. skabes ved vandmætning af jorden.

Tabel 3. *Scenarier for mobilisering af metallerne ved vask med forskellige additiver. Effekten er angivet som den procentuelle ændring i mængden af mobiliseret metal.*

Metal	Tilsætning af saltsyre til pH 0,9	Tilsætning af oxalsyre til pH 1,4	Tilsætning af eddikesyre til pH 4	Tilsætning af EDTA (0,1 M) pH uændret
Kobber	Alt opløst	520 %	39 %	Alt opløst
Chrom	Alt opløst	140 %	140 %	Alt opløst
Arsen	Alt opløst	Uændret	Uændret	Alt opløst

på metalionerne i jordvæsken ved forskellige tilsætninger og påvirkninger af jorden.

Ved simulering af jordvask er det muligt at benytte sig af geokemiske modelleringer for at finde muligheder for tilsætning af additiver til mobilisering af de bundne metaller i jorden. Tabel 3 viser den beregnede mobiliseringseffekt ved vask med tilsætning af forskellige additiver med tilhørende forskellige resulterende pH-værdier.

Konklusioner

Geokemiske modeller

Den anvendte fremgangsmåde, med at tage udgangspunkt i oplysninger fra jordforureningsundersøgelser og anvende data i geokemiske beregninger, har vist sig operationel i forhold til en udvælgelse og prioritering af oprensningsstrategier for konkrete cases med metallerne kobber, chrom og arsen. Det skønnes, at fremgangsmåden vil kunne styrkes og give større sikkerhed i vurderingen, såfremt der bestemmes lokalitetsspecifikke fordelingskoefficienter for metallernes fordeling mellem jord og jordvæske. Modelberegningerne giver desuden information om mulige additivers sideeffekter, f.eks. hvordan vask med oxalsyre påvirker jordens indhold af f.eks. jern og andre planteessentielle grundstoffer.

Metaller

Metallerne kobber, chrom og arsen, der er hyppigst brugt i imprægneringsmidler før 1994, og som er de dominerende forurenings-komponenter på træimprægneringsforurenede jorde, har egenskaber, der gør dem svære at oprense samtidig. Her er blandt andet redoxforholdene og pH af betydning for metallernes speciering og bindingsforhold i jorden, og en enkelt justering af disse faktorer kan tilsyneladende ikke uden tilsætning af additiver medføre en tilstrækkelig mobilisering eller immobilisering af stofferne. I jordbunden er der ved geokemiske specieringsundersøgelser fundet, at kobber primært er at finde i jorden som Cu^{+} og Cu^{2+} for pH under 7, mens komplekserne $CuCl_{(aq)}$ og $CuCO_3$ er de dominerende former ved højere pH-værdier. Chromforbindelserne er domineret af Cr(III) i form af $Cr(OH)_3$ på alle lokaliteter og ved alle aktuelle pH-værdier. Arsen findes ved pH-værdier højere end 8 primært som $HAsO_4^{2-}$, mens arsenforbindelserne for lokaliteter med pH under 7 udgøres af H_3AsO_3 og $H_2AsO_4^{-}$. Den mobile mængde arsen i jordvæsken er modsat kobber- og chromforbind-

elserne således domineret af anioniske forbindelser som i mindre grad sorberer til jorden pga. jordens overvejende evne til at sorbere kationer. Dog vil de anioniske arsenforbindelser kunne bindes ved specifik adsorption til f.eks. jernhydroxider. Ved immobilisering af træimprægneringsforurenede jorde vil arsenforbindelsernes og jordens sorptionsegenskaber derfor være det styrende og begrænsende forhold. Sammenholdt med kobber- og chromforbindelserne er toksiciteten af arsenforbindelserne ofte udslagsgivende for en risikovurdering, og det er ønskeligt at forholdet $As(III)/As_{total}$, skal være så lavt så muligt, da As(III) er mere toksisk end As(V). Dette opnås kun for jorde med relativt høje pH-værdier (>8), hvilket f.eks. ikke er opfyldt for den omtalte Kauslunde-lokalitet, der som nævnt har pH-værdier omkring 6.

Metoder og additiver

Ud fra de geokemiske modelleringer er det muligt at kvantificere de generelle muligheder ved brug af additiver i oprensningsøjemed. Her er undersøgt henholdsvis mobilisering og immobilisering af metallerne. Hverken kalkning, ændring af redoxforhold eller øgning af pH viste sig at være effektiv til at stabilisere kobber-, chrom- og arsenforbindelserne i jorden. Kun tilsætning af $FeSO_4$ har vist sig i stand til at forrykke udfældningerne af kobber og krom væsentligt, mens det ikke har været muligt at opnå udfældninger af arsen i modelsimuleringerne. Andre eksperimentelle forsøg har dog vist, at det er muligt at opnå en immobilisering af arsen ved tilsætning af jern(II)sulfat /11/. Jern(II)sulfat har som sådan vist sig at være det eneste lovende immobiliseringsadditiv til den træimprægneringsforurenede lokalitet. Ved mobilisering af kobber, chrom og arsen i jorden for at øge effektiviteten i en mulig oprensning ved jordvask er der størst potentiale ved anvendelse af de svage organiske syre som blandt andet eddikesyre og syntetiske chelater som EDTA. Brugen af kraftigere syrer bør udgås pga. destruktiviteten overfor jorden. Ved mobiliserende additiver og jordvask bør fokus, udover en optimering af mobiliseringen, være på opretholdelse af næringsstofbalancen i jorden og efterfølgende reetablering af jorden.

Perspektiver

Geokemiske modelleringsværktøjer er relativt enkle at benytte, samtidig med at de kan være med til at undgå fejlslagne forsøg på oprensning. De kan ud fra input fra V2-kortlægning være et redskab til at prioritere mellem oprensningsstrategier, ligesom de kan stå som forarbejde for forskningsindsatser og optimeringsforsøg. Perspektiverne i brugen af geokemiske modellering som redskab er således store, men kræver en vis grad af input og et øget vidensniveau omkring metallernes fordeling i jord.

Referencer

/1/ Depotrådet 2003: Redegørelse om jordforurening 2002. Redegørelse fra Miljøstyrelsen, 1/ 2003. Miljøstyrelsen

/2/ Miljøstyrelsen 1998: Branchevejledning for forurenede træimprægneringsgrunde. Vejledning fra Miljøstyrelsen, 8/1998. Miljøstyrelsen.

/3/ Miljøstyrelsen, 2001. Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. Bekendtgørelse nr.871 af 21. september 2001. Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen, journalnr. 2014-0033

/4/ Heron, T. 2002: Afprøvede teknologier under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening. Miljøprojekt nr. 714, 2002; Teknologiudviklingsprogrammet for jord- og grundvandsforurening. Miljøstyrelsen

/5/ Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. 1999: User's guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. Water-Resource Investigations Report 99-4259. U.S. Department of the Interior. Denver, U.S.A.

/6/ Allison, J.D., Brown, D.S. and Novo-Gradac, K.J. 1991: MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems; version 3.0 user's manual. Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency. Georgia, U.S.A.

/7/ http://www.lwr.kth.se/english/OurSoftWare/vminteq/index.htm#download

/8/ Sauvé, S., Hendershot, W. and Allen, H.E. (2000): Solid-Solution Partitioning of Metals in Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter. Environmental Science & Technology. Vol. 34, no. 7 (2000), 1125-1131

/9/ Simmelsgaard, S.E. (1996): Plantenæringsstoffer I drænvand og jordvand. SP rapport nr. 7 (1996). Statens Planteavlsforsøg. Forskningscenter Foulum.

/10/ Vinstrup, A.V. (2003): Metoder til oprensning af tungmetalforurenet jord; geokemiske modelleringer for tidligere træimprægneringslokaliteter. Specialerapport, KVL.

/11/ Moore, T.J., Rightmire, C.M. and Vempati, R.K. (2000): Ferrous Iron Treatment of Soils Contaminated with Arsenic-Containing Wood-Preserving Solution. Soil and Sediment Contamination. Vol. 9 no. 4. (2000), 375-405

Anya Bjørn Vinstrup, forstkandidat fra 2003. Ansat som strategimedabejder ved Danmarks Jordbrugsforskning, Forskningscenter Bygholm, afdeling for Jordbrugsteknik. Arbejder med strategiplanlægning, informations- og formidlingsarbejde.

Peter E. Holm, lektor ved den Jordbunds- og miljøkemiske faggruppe på Institut for Grundvidenskab, KVL. Civilingeniør og Ph.d. fra 1995. Arbejder med jordbundsmiljøkemi i relation til arealanvendelse med særlig fokus på metallers opførsel i jord og jordvæske.