

# Nedbrydning af miljøfremmede stoffer i umættet og mættet zone

28. januar 2015

ATV Jord og Grundvand  
Bygning 115, DTU, Bygningstorvet, 2800 Kgs Lyngby  
Lisbeth Verner  
tlf. 4525 2177  
E-mail: [atvlv@env.dtu.dk](mailto:atvlv@env.dtu.dk) - [www.atv-jord-grundvand.dk](http://www.atv-jord-grundvand.dk)  
CVR 20944838 - Danske Bank 1471 16636800

## Indhold

	Side
Nedbrydning af olie i umættet zone - processer, rater og praktiske udfordringer <i>Udviklingsleder, ph.d. Per Loll, DMR A/S</i>	1
Vertikal transportmodul og nedbrydning i JAGG 2.0 - et bidrag til forståelse af den konceptuelle model <i>Chefkonsulent Jacqueline Anne Falkenberg, NIRAS A/S</i>	3
Hvordan dokumenterer vi den naturlige anaerobe dechlorering i forureningsfaner? <i>Lektor Mette Broholm, DTU Miljø, et al.</i>	5
Har reduktiv dechlorering en fremtid som afværget metode? <i>Seniorprojektleder Kirsten Rügge og Miljøingeniør Eline Begtrup Weeth, COWI A/S</i>	7
Dokumentation af naturlig nedbrydning af pesticider fra lossepladser <i>Civilingeniør, ph.d. Nina Tuxen, Orbicon A/S</i>	9
Mikrobiel nedbrydning af pesticider i vandværker og på afværgeanlæg - hvad viser hidtidig forskning, og hvad er fremtidsperspektiverne? <i>Seniorforsker Christian Albers, GEUS</i>	11
Til notater	13



## **NEDBRYDNING AF OLIE I UMÆTTET ZONE PROCESSER, RATER OG PRAKTISKE UDFORDRINGER**

Udviklingsleder Per Loll  
DMR A/S  
pl@dmr.dk

Oliestoffer nedbrydes biologisk under naturlige forhold i jordmiljøet; og specielt hurtigt under aerobe forhold og i "fortyndede" koncentrationer under transport væk fra kilden. I kildeområder/hotspots, derimod, vil nedbrydningen ofte medføre anaerobe forhold og en udtømmning af jorden for essentielle næringsstoffer og mineraler, som anvendes til mikroorganismernes opbygning af ny biomasse. Dermed vil nedbrydningen i selve hotspot, under naturlige forhold, ofte gå meget langsomt eller måske helt gå i stå.

Oliestoffer er en samlebetegnelse for en myriade af stoffer/kulbrinter med meget forskellige fysisk/kemiske egenskaber; herunder egenskaber, der bestemmer transportvilligheden (opløsning i vand og afdampning til poreluft) og nedbrydeligheden. Der sker således en ændring af forureningens sammensætning over tid, således at kilden over tid tømmes for de mest mobile og bionedbrydelige stoffer, og den tilbageværende forurening vil blive stadigt mindre mobil og mindre bionedbrydelig.

Derfor står vi ofte i en situation, hvor olieforureninger (i hotspot) kan "vare" i lang tid efter spildtidspunktet, men ikke udgør en risiko ift. underliggende grundvand eller ovenliggende indeklima og udeluft, fordi forureningen nedbrydes under vandringen fra kilde til receptor.

JAGG 2.0 indeholder muligheden for at regne på biologisk nedbrydning af oliestoffer under transporten fra kilden/hotspot til førstkommande grundvandsmagasin via modulet "Vertikal transport". Denne beregning tager udgangspunkt i en række simple og operationelle forudsætninger og viser næsten altid, at selv en ganske lille nedbrydningsrate kan eliminere den beregningsmæssige grundvandsrisiko fra en kilde, der "hænger" i den umættede zone.

På denne måde er der god sammenhæng imellem virkeligheden og risikoberegningerne.

Problemerne opstår da der ikke findes tilgængelige metoder til at karakterisere og kvantificere nedbrydningsraten under naturlige forhold – hvormed der ikke kan skabes tryghed for risikoberegningerne.

Vi står dermed i den situation, at vi bruger afværgekroner på at afværge forureninger, som formentlig ikke udgør nogen risiko, fordi vi ikke kan bevise, at det forholder sig sådan – selv om alle omkring sagen har en fornemmelse af, at der er spild af penge.

I indlægget præsenteres processer, nedbrydningsrater og årsagerne til, at der ikke findes metoder til at bestemme den biologiske nedbrydningsrate under naturlige forhold.



## VERTIKAL TRANSPORT MODUL OG NEDBRYDNING I JAGG 2.0 – ET BIDRAG TIL FORSTÅELSE AF DEN KONCEPTUELLE MODEL

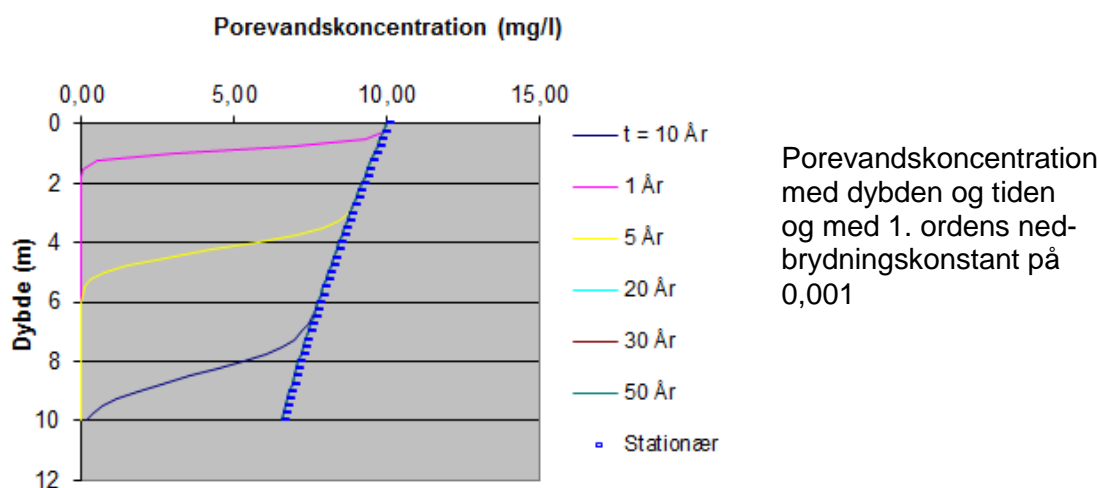
Chefkonsulent Jacqueline Anne Falkenberg  
NIRAS A/S  
jaf@niras.dk

Miljøstyrelsens risikovurderingsværktøj JAGG version 2.0 indeholder et modul til beregning af vertikal transport og evt. nedbrydning igennem et homogent jordlag ned til det førstkomende betydende grundvandsmagasin /1/. Modulet er baseret på et Excel regneark udarbejdet af DTU /2/. Vertikal transport kan beregnes/modelleres for de 192 enkeltstoffer i stofdata-basen, eller efter brugeren har indtastet egne stofdata. Men vertikal transport af olie kan også modelleres.

### JAGG 2.0 - Vertikal transport

For enkeltstoffer kan beregningen foretages for opløst forurening i porevand ved kilden. Den opløste forurening kan være grundvandskoncentration i et lokalt evt. hængende terrænnært magasin, en målt porevandskoncentration eller en beregnet porevandskoncentration baseret på en jordkoncentration.

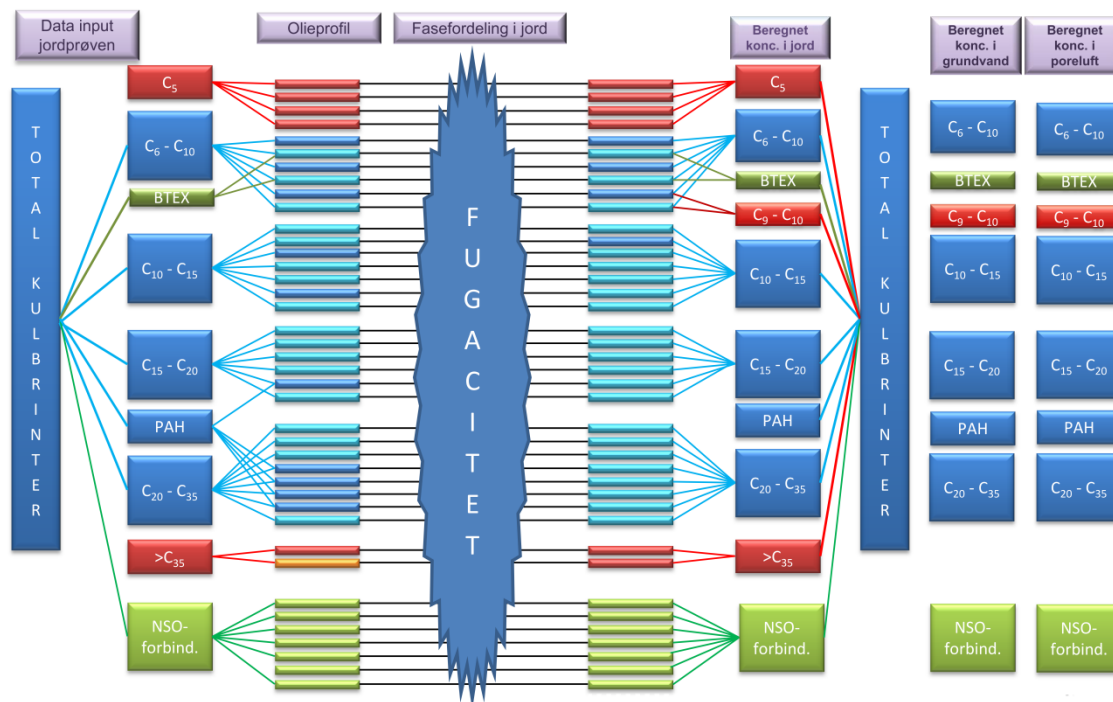
Modulet antager, at der er tale om en kontinuert kilde til forurening, hvor forureningen påbegyndes ved tid 0, og at der sker en stigende koncentrationsudvikling i dybden og med tiden indtil kildekonzentrationen er fordelt i hele dybden ned til det førstkomende betydende grundvandsmagasin. Dette betegnes som stationært forhold. Modulet kan dog også beregne de transiente (midlertidige) porevandskoncentrationer som en funktion af tiden og dybden, og illustrere, hvornår der kan forventes gennembrud i grundvandsmagasinet. Ved beregningen af risiko over for grundvand anvendes kun de stationære porevandskoncentrationer.



Som udgangspunkt foretages beregninger uden nedbrydning, i hvilket tilfælde den stationære porevandskoncentration lige over grundvandet vil være lig porevandskoncentrationen ved kilden. Typiske nedtrængningstider igennem jordlagene er 0,5 - 2 m/år, og dette betyder, at selv en lille 1. ordens nedbrydningskonstant på 0,001, svarende til en halveringstid på 690 dage, kan medføre en væsentlig reduktion i porevandskoncentrationen under nedsivning igennem flere meter jord og ned til grundvandsmagasinet.

## Oliestoffer og den vertikale transportmodul

Olie og benzin modulet i JAGG 2 tager udgangspunkt i fugacitetsberegninger for en jordprøve, hvor det samlede kulbrinteindhold allokeres til ca. 40 repræsentative stofgrupper /3/.



Dette betyder, at der på basis af fysisk-kemiske egenskaber kan foretages beregning af de forventelige porevandskoncentrationer for de ca. 40 stofgrupper. Endvidere i den vertikale transportmodul for oliestoffer kan de stationære og transiente porevandskoncentrationer lige over det førstkomende betydende grundvandsmagasin beregnes. Som nævnt ovenover er den stationære porevandskoncentration lige over grundvandet lig med porevandskoncentrationen lige under kilden, såfremt der ikke forekommer nedbrydning. Men de transiente porevandskoncentrationer for de forskellige stofgrupper viser store forskelle i, hvor hurtigt de når frem til grundvandsmagasinet.

I dette modul er det muligt at indtaste en 1. ordens nedbrydningskonstant, som dog gælder for alle stofgrupper med henblik på forståelse af den konceptuelle model og effekten af nedbrydning på gennembrud til grundvandsmagasinet.

### Litteraturhenvi sning

- /1/ Miljøprojekt nr. 1508, 2013 Manual for program til risikovurdering – JAGG 2.0
- /2/ Christensen, A. G., Binning, P., Trolborg, M., Kjeldsen, P. og Broholm, M. 2010. Opgradering af JAGG. Vertikal transport ned til førstkomende betydende magasin. Miljøprojekt nr. XXX. Miljøstyrelsen. Er ikke udkommet endnu.
- /3/ Andersen, L. og Oberender, A. 2010. Opgradering af JAGG. Revision af fugacitetsberegninger, Håndtering af fri fase og blandingsforureninger. Miljøprojekt nr. XXXX. Miljøstyrelsen. Er ikke udkommet endnu.



## **HVORDAN DOKUMENTERER VI DEN NATURLIGE ANAEROBE DECHLORERING I FORURENINGSFANER?**

Vurdering af udviklingen i den naturlige nedbrydning i forureningsfanen efter termisk oprensning af PCE kildeområde, Røde kro case

Lektor Mette M. Broholm

DTU Miljø, mibr@env.dtu.dk,

PhD studerende Alice Badin, Université de Neuchatel, Professor Carsten S. Jacobsen, GEUS, Dr. Phil Dennis, SiREM, Geolog Niels Just, Region Syddanmark og Professor Daniel Hunkeler, Université de Neuchatel

### **Introduktion**

Ved mødet vil præsentation mv. omfatte:

- Dokumentationsmetoder for naturlig anaerob dechlorering
- Case, Røde kro faneudvikling 8 år efter termisk kildeoprensning
- Øvelse i anvendelse af isotopfraktionering og mikrobielle data til dokumentation

Abstractet herunder omhandler alene Røde kro casen.

### **Baggrund og formål**

Der blev i 2006-2007 gennemført et teknologi-projekt med vurdering af anvendeligheden af stabile isotoper til vurdering af den naturlige nedbrydning i forureningsfanen fra det tidligere centralrenseri i Røde kro (Broholm et al. 2009, Hunkeler et al., 2010), hvor det ved hjælp af stabile isotoper blev dokumenteret, at cDCE såvel som TCE og PCE nedbrydes ved mikrobiel reduktiv dechlorering, samt dokumenteret at VC nedbrydes i fanen. Detektion af specifikke nedbrydere bestyrkede at nedbrydningen af cDCE er mikrobiel. Den ved bestemmelsen af stabile isotoper opnåede viden om nedbrydning var af afgørende betydning for risikovurderingen af forureningsfanen. En termisk oprensning af kildeområdet ved dampinjektion blev foretaget i 2006, og Region Syddanmark har siden foretaget løbende monitoring af udviklingen i forureningskoncentrationer og sammensætning i udvalgte filtre. Projektet har overordnet til formål at vurdere udviklingen i nedbrydningen af chlorerede eterner i forureningsfanen i grundvandet nedstrøms det tidligere centralrenseri i Røde kro efter den omfattende dampoprensning af PCE i kildeområdet foretaget for 8 år siden.

### **Metode, teknik,**

I juni 2014 er gennemført en samlet prøvetagningsrunde for 43 filtersatte boringer overvejende i et langsgående transekt i forureningsfanen. Der er foretaget analyser for chlorerede ethener, potentielle nedbrydningsprodukter og redoxparametre for samtlige filtre. For omtrent samtlige filtre udføres analyser for stofs specifik kulstof og chlor isotopfraktionering for chlorerede ethener. Metoden kan både dokumentere nedbrydning og belyse nedbrydningsproces/-vej for forureningen. For 12-15 udvalgte filtre er foretaget analyser for specifikke nedbrydere (Dhc) og gener (Vcr) også udført mRNA analyser, som belyser aktiviteten af de specifikke nedbrydere. Endvidere udføres pyrotag sequencing som belyser sammensætningen af bakterier (nedbrydere), hvilket kan belyse om der er forskel på den mikrobielle sammensætning og dermed i nedbrydning i forskellige områder i fanen.

## Resultater, foreløbig konklusion og perspektivering

Koncentrationsniveauet i og umiddelbart nedstrøms kildeområdet er blevet væsentligt lavere som direkte effekt af oprensning i kildeområdet. Frigivelse af NVOC ved den termiske oprensning i kildeområdet har ført til stimulering af PCE, TCE og cDCE nedbrydning ved reduktiv dechlorering fra kildeområdet til mellem 350 m og 750 m nedstrøms samt af VC umiddelbart nedstrøms det behandlede område. Nedbrydningen er dokumenteret ved carbon- og chlor-isotopfraktionering. Nedbrydningen sker potentielt ved flere forskellige sideløbende nedbrydningsprocesser. Specielt i 350 m ses en meget stor variation i redoxforhold over dybden, og der er ved pyrotaq seequensing observeret en meget bred sammensætning af bakterier med relativt høje indhold af Dhc og andre anaerobe dechlorerende bakterier samt af aerobe oxiderende bakterier. Aktivitet af Dhc er påvist ved RNA bestemmelse.

Der er endvidere sket en yderligere reduktion af redoxforholdene centralt i fanen (>750/1050-1450 m nedstrøms behandlingsområdet), som muligvis er en afledt effekt af den termiske oprensning og frigivelsen af organisk stof. Dette har medvirket til en væsentlig øget nedbrydning af specielt cDCE, som specielt kommer til udtryk ved carbon-isotopfraktionering i 1050 m (B34), i fanen. I denne afstand ved pyrotaq seequensing observeret en meget bred sammensætning af bakterier, og der er også dokumenteret aktivitet af Dhc. Der foregår således mikrobiel nedbrydning af chlorerede ethener ved reduktiv dechlorering, men potentielt også nedbrydning af DCE og/eller VC ved oxidation. Den øgede nedbrydning af DCE centralt i fanen sker tilsyneladende uden forøgelse af VC koncentrationerne i fanen. Inddragelse af ny viden omkring dobbelt-isotop (carbon kombineret med chlor) udvikling ved forskellige nedbrydnings-processer ved tolkning af cDCE isotopdata fra 2006-7 indikerer endvidere, at abiotisk nedbrydning kan være af væsentlig betydning i fanen. Udvikling af jern-sulfat reducerende forhold med udfældning af frisk FeS kan have medført øget abiotisk nedbrydning, hvilket kan være en forklaring på øget DCE nedbrydning uden øget dannelse af VC.

Fanen udbreder sig fortsat langsomt i nedstrøms retning, og yderst i fanen er cDCE såvel som VC nedbrydning tilsyneladende aftaget. Dette observeres ved lavere carbonisotopfraktionering svarende til at en mindre andel af cDCE og VC er nedbrudt yderst i fanen i 2014 end i 2006-7. En relativt bred sammensætning af bakterier med flere anaerobt dechlorerende bakterier, som er observeret ved pyrotaq seequensing, og jernreducerende forhold samt potentiel abiotisk nedbrydning med beskeden VC dannelse virker dog lovende for fortsat massejernelse i fanen.

Den samlede forureningsmasse i fanen er aftagende. Det er ikke muligt at forudsige om de mere reducerende forhold centralt i fanen vil brede sig nedstrøms, stagnere eller ligefrem vende tilbage til mindre reducerede. Men der forventes på sigt at frigives fortsat aftagende koncentrationer af NVOC fra det behandlede område, og ilt og nitrat vil fortsat infiltrere til øvre del af fanen og potentielt atter øge pyritoxidationen med mindre reducerede forhold til følge. Det er derfor meget vanskeligt at forudsige, om naturlig nedbrydning med tiden vil føre til komplet fjernelse af forureningen.

Risikoen ved fanen er aftaget betydeligt med de aftagende koncentrationer og den aftagende VC dannelse. Risikoen forventes ikke at øges, idet koncentrationsniveau ikke stiger og der ikke er nogen indikationer på væsentlig produktion eller ophobning af VC.

Anvendelsen af nyere stabile isotopmetoder og mikrobielle metoder har givet indsigt i kompleksiteten af nedbrydningsprocesser i forureningsfanen og givet essentiel information for vurdering af nedbrydningen og risikovurdering for forureningsfanen.

## Litteraturhenvi sning

Broholm, M.M., Badin, A., Jacobsen, C.S., Hunkeler, D., 2014. Rødekro 2014. Vurdering af udviklingen i den naturlige nedbrydning i nedstrøms forureningsfanen efter kildeoprensning. DTU Miljø, 2014. Publiceres ved endt projekt på [www.sara.env.dtu.dk](http://www.sara.env.dtu.dk).

## HAR REDUKTIV DECHLORERING EN FREMTID SOM AFVÆRGENETODE?

Seniorprojektleder Kirsten Rügge og  
Miljøingeniør Eline Begtrup Weeth, COWI A/S  
kiru@cowi.dk / ebwe@cowi.dk

### Baggrund og formål

Ved reduktiv dechlorering af chlorerede opløsningsmidler omdannes højere chlorerede stoffer, f.eks. PCE til mindre chlorerede stoffer via TCE, DCE, VC og videre til ethen og ethan. Nedbrydningen til DCE kan varetages af en række anaerobe bakterier, der anvender stofferne som elektronacceptorer. Det er dog kun de specielle bakterier af familien *dehalococcoider*, der ligeledes besidder genet for vinylchloridreduktase, der kan nedbryde stofferne helt til ethan og ethan ved anaerob reduktiv dechlorering, dvs. hvor processen er energigivende for bakterien.

For at processen kan forløbe, kræves stærkt anaerobe forhold. Dette opnås gerne ved at tilsætte et letomsætteligt substrat, f.eks. lactat, som kan købes kommercielt i adskillige former og sammensætninger, f.eks. Newman Zone®. Herved produceres også brint, som er nødvendig som elektrondonor. For yderligere at stimulere oprensningen tilsættes specifikke nedbrydere f.eks. KB-1® kultur, som ligeledes kan købes kommercielt,

Processen har været kendt i de sidste 10-20 år og der har i Danmark været gennemført adskillige oprensninger i sandmagasiner med denne metode. Gennem de sidste 10 år har det været forsøgt også at få metoden til at fungere i mere lavpermeable aflejringer som silt og moræneler, hvor kontakt mellem bakterier og de chlorerede stoffer ofte er et problem.

Metoden kan anvendes til kildeoprensning, faneoprensning eller som afskæringsmetode for at reducere truslen mod det primære grundvand og specifikke vandindvindinger. Tilstedeværelse af fri fase kan her være en udfordring.

I hvert tilfælde vurderes ud fra geologi og forureningssituation (omfang og udbredelse), hvorvidt oprensningen mest fordelagtigt gennemføres som en passiv eller en aktiv oprensning. Ved den passive oprensning injiceres der typisk substrat og bakterier i akviferen, hvorefter der monitors over en længere periode inden en evt. geninjicering finder sted. Ved den aktive løsning tilsættes doner og evt. bakterier i pulse kombineret med oppumpning og recirkulation i oprensningsområdet, hvorved kontakt mellem forurening, substrat og bakterier forbedres.

Ud fra erfaringerne med metoden /1-4 m.fl./ over de sidste 10-20 år må konkluderes:

- Ved sammenligning med andre mulige afværgemetoder, falder den stimulerede anaerobe dechlorering gerne ud som økonomisk mest fordelagtig og samtidig som mest bæredygtig.
- Metoden er ikke optimal i kildeområder med betydeligt indhold af fri fase. Dog kan anvendelse af specielle elektrondonorer, som kan trænge ind i den fri fase og herfra opløses langsomt, øge effektiviteten af metoden
- Metoden er generelt velegnet i sandede aflejringer.

- Metoden er ikke optimal i lavpermeable aflejringer, medmindre den optimeres f.eks. ved brug af langtlivende reaktanter, EK-Bio eller andet
- Ophobning af VC i indkørringsfasen kan opstå, men det vurderes ikke, at problemet er stort.
- Evt. dannelse af VC i en senere fase, hvor substratet er opbrugt. Omfanget heraf endnu ikke veldokumenteret.
- Produktionen af methan bør monitoreres løbende med kontinuerte målinger så længe der er stærkt reducerede forhold.
- Oprensning ved reduktiv dechlorering kan tage mange år, 3-5 år eller mere er ikke unormalt.
- Metoden kan med fordel kombineres med andre oprensningsmetoder, f.eks. termisk oprensning eller kemisk oxidation.

### Litteraturhenvisning

- /1/ Miljøstyrelsen (2009). Erfaringsopsamling for reduktiv dechlorering som afværgeteknologi i moræneler. Miljøprojekt nr. 1294.
- /2/ Stroo, H.F. et al. (2012). Chlorinated ethene source remediation: Lessons learned Environ. Sci. Technol. 46, 6438–6447.
- /3/ Kern-Jespersen, H. (2012). Udfordringer med nedbrydningsprodukter ved SRD som afværgeteknik. Præsentation ved ATV-møde november 2012.
- /4/ Videntcenter for Jordforurening (2007). Afværgekatalog. Teknik og Administration nr. 4, 2007.

## DOKUMENTATION AF NATURLIG NEDBRYDNING AF PESTICIDER I LOSSEPLADSFANER

M.Sc., Ph.D., Nina Tuxen\*, Orbicon A/S  
M.Sc. Trine Skov Jepsen, Orbicon A/S  
Professor Poul L. Bjerg, DTU Miljø  
\*ntux@orbicon.dk

### Baggrund og formål

Pesticider – og især phenoxysyrer – er ofte de miljøfremmede stoffer, der udgør det største grundvandsproblem i forureningsfaner fra gamle, ukontrollerede lossepladser, da de kun i ringe grad nedbrydes under de anaerobe forhold, der ofte træffes i fanerne /1, 10/. Imidlertid kan stofferne nedbrydes under aerobe forhold, der kan træffes længere væk fra kildeområdet, eller på randen af forureningsfanen /8, 11/. Afværge af lossepladsefaner er en omkostningstung affære, der oftest består af afværgepumpning, der skal foregå i årtier. På grund af pesticidernes nedbrydelighed under visse forhold, kan monitoreret naturlig nedbrydning derfor være en attraktiv afværgeløsning.

### Dokumentationsmetoder

For at anvende monitoreret naturlig nedbrydning som afværgeteknik kræves solid dokumentation af at nedbrydning finder sted og reducerer forureningen til et acceptabelt niveau inden for en given afstand. Dokumentation af naturlig nedbrydning af phenoxysyrer i lossepladsefaner giver en række særlige udfordringer. Forureningen med phenoxysyrer findes som oftest som adskillige smalle faner "inden i" en større generel forureningsfane fra lossepladsen. Desuden er phenoxysyrerne til stede i  $\mu\text{g/l}$  niveau, mens andre stoffer – som fx organisk kulstof – findes i  $\text{mg/l}$  niveau, og derfor er styrende for udviklingen af redoxzoner nedstrøms lossepladsen /5, 8, 10/.

Alligevel findes der en række dokumentationsmetoder, der – anvendt rigtigt – kan bruges til den ønskede dokumentation:

- Kvantificering af forureningsfluxe i nedstrøms transekter /8/
- Vurdering i forhold mellem moderstoffer og metabolitter (under hensyntagen til forekomst af urenheder i moderstoffet) /6/
- Stofspecifikke enantiomer- og isotopanalyser /3, 6/
- Nedbrydningsforsøg /5, 9/
- Måling af specifikke bakterier /7, 9/
- Reaktiv stoftransportmodellering /4/

Især anvendelsen af de nyudviklede enantiomer- og isotopspecifikke analysemetoder, er meget attraktive, da de ved udtagelse af få vandprøver kan give stor viden om nedbrydning af phenoxysyrerne. Analyserne er imidlertid ikke en hyldevare og kan pt. kun udføres af speciallaboratorier i udlandet, hvilket kan medføre udfordringer som fx lange analysetider /3/. Desuden er der endnu begrænset tilgængelig forskningsviden om enantiomerspecifik nedbrydning af de forskellige stoffer under forskellige redoxforhold. En øget viden ville kunne betyde at sådanne analyser kunne blive endnu mere attraktive, da det bl.a. kunne gøre det muligt at kvantificere nedbrydningen bedre.

## Perspektivering

Grundvandsforurening fra lossepladser er ikke et meget udbredt problem, da de fleste af de miljøfremmede stoffer (fx oliestoffer og chlorerede nedbrydningsprodukter) nedbrydes inden for kort afstand af lossepladserne (lossepladser har dog de seneste år fået fornyet opmærksomhed, da de potentielt truer overfladevand /2/). Pesticider i lossepladser er imidlertid hyppigt forekommende, og pesticider i forureningsfanen kan være udslagsgivende i forhold til en risikovurdering i forhold til grundvand og medføre et afværgebehov.

Undersøgelsesomkostningerne forbundet med monitoreret naturlig nedbrydning kan være store og undersøgelserne vil sandsynligvis tage længere tid end sædvanligt. At vælge monitoreret naturlig nedbrydning som afværgeløsning kræver desuden mod og vedholdenhed, da borgere og andre interessenter skal overbevises om at forureningen bliver håndteret fornuftigt. Til gengæld vil denne afværgestrategi medføre et betydeligt fald i både energiforbrug og omkostninger forbundet med afværgeren sammenlignet med at drive et afværgepumpeanlæg i årtier. Udfordringen er selvfølgelig, at man kan iværksætte dyre undersøgelser for at søge at dokumentere naturlig nedbrydning, og så ende med det resultat, at nedbrydningen ikke er tilstrækkelig, så man alligevel ender med en pumpeløsning.

## Referencer

- /1/ Miljøprojekt nr. 1502, 2013. Skelnen mellem pesticidkilder, appendix 4, bilag 5.
- /2/ Miljøprojekt nr. 16, 2014. Risikovurdering af lossepladsers påvirkning af overfladevand.
- /3/ Region Sjælland, 2014. Udkast til "Tilvejebringelse af beslutningsgrundlag for den fremtidige afværge på Stengårdens Losseplads".
- /4/ Prommer, H., Tuxen, N., & Bjerg, P.L., 2006. Fringe-controlled natural attenuation of phenoxy acids in a landfill plume: Integration of field-scale processes by reactive transport modelling. *Environmental Science & Technology*, 40, 4732-4738.
- /5/ Tuxen, N., Albrechtsen, H.-J. & Bjerg, P.L., 2005. Identification of a reactive degradation zone at a landfill leachate plume fringe using high resolution sampling and incubation techniques. *Journal of Contaminant Hydrology*, 85, issue 3-4, 179-194.
- /6/ Reitzel, L.A., Tuxen, N., Albrechtsen, H.-J., Ledin, A. & Bjerg, P.L., 2004. Can degradation products be used as lines of evidence of natural attenuation? *Environmental Science and Technology*, 38, 457-467.
- /7/ de Liphay, J.R., Tuxen, N., Johnsen, K., Hansen, L.H., Albrechtsen, H.-J., Bjerg, P.L. & Amand, J., 2003. In situ exposure to low herbicide concentrations affects microbial population density and catabolic gene frequency in an aerobic shallow aquifer. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 69 issue 1, 461-467.
- /8/ Tuxen, N., Ejlskov, P., Albrechtsen, H.-J., Reitzel, L.A., Pedersen, J.K. & Bjerg, P.L., 2003. Application of natural attenuation to ground water contaminated by phenoxy acid herbicides at an old landfill in Sjølund, Denmark. *Ground water monitoring and remediation*, 23, no. 4, 48-58.
- /9/ Tuxen, N., de Liphay, J.R., Albrechtsen, H.-J., Amand, J. & Bjerg, P.L., 2001. Effect of exposure history on microbial herbicide degradation in an aerobic aquifer affected by a point source. *Environmental Science and Technology*, 36, 2205-2212.
- /10/ Bjerg, P.L., Tuxen, N., Reitzel, L.A., Albrechtsen, H.-J. & Kjeldsen, P., 2011. Natural attenuation processes in landfill leachate plumes at three Danish sites, *Ground Water*, vol. 49, issue 5, p. 688-705
- /11/ Tuxen, N., Reitzel, L.A., Albrechtsen, H.-J. & Bjerg, P.L. Oxygen-enhanced biodegradation of phenoxy acids in ground water at contaminated sites. *Ground Water*, vol. 44 no.2, pp. 256-265

**MIKROBIEL NEDBRYDNING AF PESTICIDER I VANDVÆRKER  
OG PÅ AFVÆRGEANLÆG  
- HVAD VISER HIDLIG FORSKNING, OG HVAD ER FREMTIDSPERSPEKTIVERNE?**

Seniorforsker Christian Nyrop Albers  
GEUS  
cal@geus.dk

Forurening af grundvand med pesticider har igennem en årrække givet anledning til bekymring, ikke mindst blandt vandforsyningerne, som har måttet lukke stadig flere indvindingsboringer på grund af overskridelser af grænseværdien på 0,1 µg/L. I 2012 fandt man i den danske grundvandsovervågning pesticidrester i 42 % af alle indtag og en fjerdedel af disse fund var over grænseværdien (Thorling m.fl., 2013).

Der er mange kilder til pesticidforurening. Lovgivningsmæssigt skelner man især mellem to overordnede typer; fladebelastning, der forårsages af den almindelige brug af pesticider og punktkildeforurening, der skyldes uhensigtsmæssig håndtering af pesticider. Eksempler på kilder til punktkildeforurening vaskepladser på gårde og maskinstationer samt opfyldning i f.eks. gamle grusgrave.

Flere vandværker har i de senere år vist interesse for at foretage udvidet vandbehandling med aktiv kul, der kan binde en række pesticider, herunder det meget udbredte pesticidnedbrydningsprodukt BAM (2,6-dichlorbenzamid). Aktiv kul har også i begrænset omfang været anvendt i afværgeanlæg ("pump&treat") ved pesticidforureninger. Der er dog flere problemer forbundet med anvendelsen af aktiv kul til rensning af pesticider. For vandværkernes vedkommende er det ikke en teknologi man uden videre kan anvende, da det strider imod Danmarks målsætning om at rense vandet så simpelt som muligt. For afværgeanlæggenes vedkommende er problemstillingen især, at aktiv kul er omkostningsfuldt og miljøbelastende og at det ikke er fuldt effektivt over for alle typer pesticider, herunder phenoxysyre-herbiciderne, som er blandt de mest udbredte punktkilde-pesticider i Danmark.

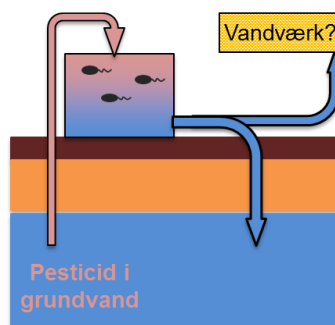
Der har derfor i de senere år bredt sig en interesse for at se på, om det er muligt at opnå biologisk nedbrydning af pesticider i sandfiltre, som allerede er udbredte på vandværker men også som "pump&treat"-teknologi over for punktkilder. Det har ledt til en række forskningsprojekter i Danmark såvel som i andre Europæiske lande og i USA.

Erfaringen fra disse forskningsprojekter er indtil nu noget blandet. I sandfiltre i almindelig drift, f.eks. på vandværker, lever masser af bakterier, og nogen af disse bakterier har vist sig at kunne nedbryde pesticider. F.eks. blev der fundet nedbrydningspotentiale over for flere pesticider i sandfiltre fra Belgiske vandværker (Vandermaesen m.fl., 2013) og erfaringer fra USA viser ligeledes, at der lever bakterier i sandfiltre, som potentielt kan nedbryde en række fremmedstoffer herunder pesticider (Zearley & Summers, 2012). I Kerteminde vandværk er der påvist nedbrydningspotentiale over for phenoxy-herbicidet MCP, hvilket tilsyneladende bevirker fuldstændig fjernelse af en lav indløbskoncentration af dette pesticid under filtreringen (Hedegaard m.fl., 2014).

GEUS har i samarbejde med Krüger og Region Sjælland undersøgt muligheden for rensning af grundvand forurenet med phenoxysyre-herbicider ved opstilling af et test-sandfilter i et opfyldningsområde i Hedeland (Albers m.fl., 2014). I dette projekt blev opnået en betydelig

nedbrydning af pesticiderne efter opformering af de naturlige grundvandsbakterier i sandfiltrene, men der var samtidig en betydelig restkoncentration, der ikke blev nedbrudt. Tilsætning af en phenoxysyre-nedbrydende bakteriestamme dyrket i laboratoriet viste kortvarig forøgelse af nedbrydningen i sandfiltret. Tilsætning af specifikke pesticidnedbrydende bakterier til sandfiltre har også været forsøgt i både Danmark og Belgien. Begge steder var der tale om bakterier der kunne nedbryde det svært nedbrydelige BAM, og begge steder blev opnået betydelig nedbrydning af BAM i sandfiltrene men med tab af såvel bakterier som nedbrydningskapacitet inden for ca. 1 måned (Albers m.fl., 2015).

Sammenfattes alle disse projekter må konklusionen være, at sandfiltre er udmærkede levesteder for en række bakterier, herunder pesticidnedbrydende bakterier. De lave koncentrationer af pesticider og deraf lavt energiudbytte for bakterierne under nedbrydning udgør dog indtil videre udfordring for både de pesticidnedbrydere, der naturligt lever i filtrene og for evt. tilsatte pesticidnedbrydere. Sandsynligheden for en fremtidig succesfuld nedbrydning må således forventes at være størst i forbindelse med høje pesticid-koncentrationer fra punktkilder. Den mere generelle anvendelse af biologisk nedbrydning til pesticidrensning på såvel vandværker som afværgeanlæg kan dog endnu ikke afskrives, da der er mange uafklarede spørgsmål og potentielle forbedringsmuligheder.



## Litteratur

Albers, C.N., Clausen, L., Nielsen, T.B., 2014; Oprensning af punktkildeforurening med pesticider ved biologisk nedbrydning i sandfiltre – erfaringer fra pilotprojekt i Hedeland, Jordforurening.info, 1-2014: 3-11.

Albers, C.N., Feld, L., Ellegaard-Jensen, L., Aamand, J., 2015; Degradation of trace concentrations of the persistent groundwater pollutant 2,6-dichlorobenzamide (BAM) in bioaugmented rapid sand filters (indsendt til Water Research).

Hedegaard, M.J., Arvin, E., Corfitzen, C.B., Albrechtsen, H.-J., 2014. Mecoprop (MCP) removal in full-scale rapid sand filters at a groundwater-based waterworks. *Sci. Total Environ.* 499, 257–64.

Thorling, L., Brusch, W., Hansen, B., Larsen, C.L., Mielby, S., Troldborg, L. og Sørensen, B. L., 2013: Grundvand. Status og udvikling 1989 – 2012. Teknisk rapport, GEUS 2013.

Vandermaesen, J., Deckers, A.; Walravens, E.; Springael, D. Pesticide mineralization in sand filter material taken from drinking water production facilities. <http://www.york.ac.uk/conferences/yorkpesticides2013/pdfs/029.pdf>

Zearley, T.L., Summers, R.S., 2012. Removal of Trace Organic Micropollutants by Drinking Water Biological Filters. *Environ. Sci. Technol.* 46, 9412–9419











