

MTBE-NEDBRYDNING I JORDENS UMÆTTEDE ZONE

Civilingeniør, Ph.D. Per Loll
Dansk Miljørådgivning A/S

Lektor Kaj Henriksen
Sektion for Miljøteknologi, Aalborg Universitet

Civilingeniør Dion Nørgaard
Thisted Kommune

Civilingeniør Claus Larsen
Dansk Miljørådgivning A/S

ATV MØDE

VINTERMØDE OM GRUNDEVANDSFORURENING

VINGSTEDCENTRET
4.- 5. marts 2008

1. RESUMÉ

DMR har sammen med Aalborg Universitet gennemført et projekt til undersøgelse af aerob naturlig nedbrydning af MTBE i jordens umættede zone. Der er blevet indsamlet jordprøver fra hot-spot på seks benzinstationer med kendte benzinspild, som indeholder MTBE, og der er konstateret primær aerob nedbrydning af MTBE i fem af seks prøver. Der er udført sideløbende forsøg med tre af jorderne, hvor effekten af toluen og benzen er undersøgt. For to af jorderne er der også udført kolonneforsøg (i større skala), som simulerer primær MTBE-nedbrydning i en jordsøjle over et forurenede grundvandsmagasin. Resultaterne fra den ene af lokaliteterne relateres til en sag hvor der gennemføres en fuldskala vakuumventilation.

2. INDLEDNING

2.1 Baggrund

Der savnes generelt viden om nedbrydning af forurenende stoffer i jordens umættede zone, bl.a. til brug for risikovurderinger ifht. grundvand og indeklima. Selvom nyere studier har haft fokus på problemstillingen (f.eks. [Pasteris et al., 2002], [Kjeldsen et al., 2004] og [OM, 2006]), er der stadig ikke tilstrækkelig viden om processerne til, at vi rutinemæssigt kan inkludere nedbrydning i vores risikovurderinger. Herunder findes der specielt kun en meget sparsom viden om umættet zone nedbrydning af stoffer som traditionelt bliver betragtet som svært nedbrydelige, f.eks. MTBE, og kun ét studium har, til vores kendskab, fokuseret på umættet zone nedbrydning af MTBE [Moreels et al., 2004].

2.2 Formål

Formålet med projektet er at opnå en viden om hvor hyppigt der forekommer MTBE-nedbrydning i jordens umættede zone på servicestationer med kendte benzinspild, hvilke nedbrydningsrater der kan observeres og hvilke parametre der ser ud til at have indflydelse på MTBE-nedbrydningen. Til projektet er der indsamlet jordprøver fra seks nordjyske benzinstationer, hvor der er konstateret MTBE i forbindelse med udførte forureningsundersøgelser. Dele af projektet er tidligere afrapporteret i [Loll et al., 2007].

3. METODER

Der er udført forsøg til en grundlæggende karakterisering af forsøgsjorderne fra de seks lokaliteter, som i det følgende kaldes lokalitet A – F.

3.1 Forsøgsjorder

Tabel 1 viser, for hver lokalitet spildets alder, estimeret fra historiske oplysninger i sagen og fra en antagelse om at MTBE blev introduceret omkring 1985. Tabellen viser også dybden for udtagning af prøvejorden på de enkelte lokaliteter samt for kulbrinteindholdet i prøverne. Pga. en meget inhomogen jordstruktur og forureningsfordeling i prøvejorden fra lokalitet B, er der udført en dobbeltbestemmelse af forureningsindholdet i denne forsøgsjord. Som det ses af resultaterne blev der kun observeret MTBE i én af de analyserede jordprøver; jordprøven fra lok. E, som også er den prøvejord som har det højeste forureningsindhold. Så sent som i 2005/2006 er der dog blevet konstateret MTBE i grundvandsprøver udtaget på samtlige lokaliteter. Der er ikke foretaget kulbrintebestemmelse for prøvejorden fra lok. F.

Lok.	Spildets alder (år)	Prøvedybde (m)	BTEX (mg/kg TS)				Total (C6-C35) (mg/kg TS)	MTBE ^{GV} (mg/kg TS)
			Benzen	Toluen	Ethylbenzen	Xylener		
A	6 – 22	1,0 – 3,0	0,79	10	2,9	27	950	<0,01
B	21	1,0 – 1,5	3,6 / 9,7	2,4 / 6,7	4,3 / 12	8,3 / 55	150 / 340	<0,2
C	10 – 22	Ca. 1,5	4,2	3,8	10	50	460	<0,01
D	12 – 22	1,0 – 1,5	2,5	26	16	120	620	<0,01
E	6 – 22	0,5 – 1,0	54	350	91	440	2.600	0,53
F	2 - 22	Ca. 1,5	i.a.	i.a.	i.a.	i.a.	i.a.	i.a.

Tabel 1: Spildalder, prøvedybde og kulbrinteindhold i umættede hot-spotprøver.

GV = Der er konstateret MTBE i grundvandet på samtlige lokaliteter i 2005/2006. i.a. = ikke analyseret.

Tabel 2 viser parametre, bestemt mht. jordkarakterisering: pH, gravimetrisk vandindhold (w), fraktionen af organisk stof (fom), og kornstørrelsesfordelingen (USDA) i fraktionerne ler (LE), silt (SI), finsand (FS), mellemkornet sand (MS), grovsand (GS) og grus, samt næringsstofferne orthofosfat og uorganisk kvælstof (NO_2^- , NO_3^- og NH_4^+). Der er ikke udført kornkurvebestemmelse for prøvejorden fra lok. F.

Lokalitet	pH*	w*	fom*						Ortho-P*	Uorganisk N*
				LE + SI	FS	MS	GS	Grus		
		(vægt %)		(vægt %)					(mg/kg TS)	
A	7,3	7,3	1,7	3,0	59,2	17,6	13,3	6,9	0,62	11
B	6,8	32	4,1	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	14
C	7,3	17	1,3	9,3	53,7	15,3	17,9	3,8	0,024	14
D	7,2	18	0,8	10,1	42,3	13,3	16,5	17,8	0,064	2,9
E	7,0	20	1,2	8,0	42,1	15,7	20,5	13,7	0,065	2,3
F	7,1	14	1,0	Karakteriseret som finsand					1,9	1,2

Tabel 2: Jordkarakteriseringsparametre for de seks hot-spotprøver.

* = Triplikatbestemmelse (dobbelbestemmelse for fom); gennemsnittet er vist.

3.2 Screening af primær MTBE-nedbrydning

De indsamlede jordprøver er grundigt homogeniseret og udlagt i et tyndt lag i 2-3 dage til fordamning af hovedparten af de flygtige forureningskomponenter. Efterfølgende er der foretaget en ny vandindholdsbestemmelse for hver af forsøgsjorderne.

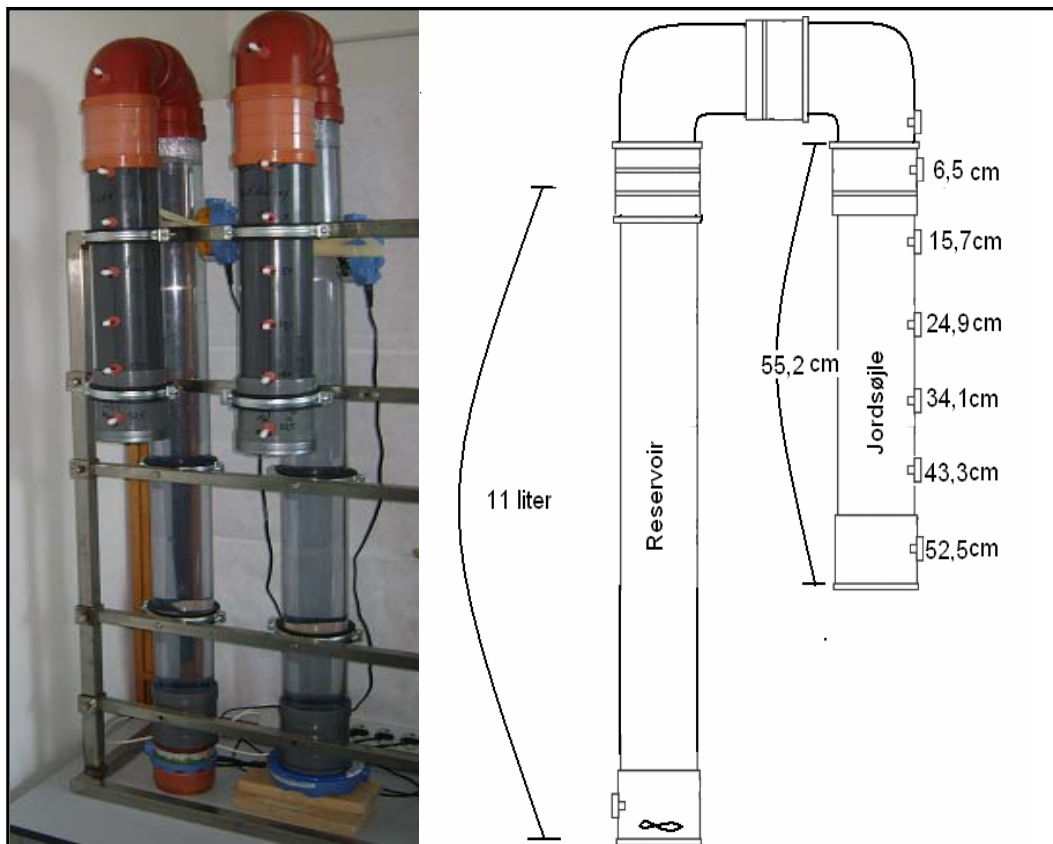
Hvert screeningsforsøg er udført som dobbeltbestemmelse med ca. 50 gram jord (vådvægt) i 580 mL serumflasker. Baseret på flaskernes indhold af omsætteligt kulstof (MTBE, toluen og benzen) er der efterfølgende tilsat en uorganisk næringssaltopløsning (NPK 23:3:7 med 50/50 $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$) for at forhindre næringssaltbegrænsning af omsætningen. Der er tilsat næringssalte svarende til et C:N:P-forhold på 100:20:2,6. Flaskerne er efterfølgende forseglet med gastætte propper. Alle forsøg er udført ved ca. 23°C.

MTBE er tilsat til alle flasker fra en stokopløsning på 100 mg/L til en jordvæskekoncentration på ca. 10 mg/L. Toluen og benzen er tilsat fra stokopløsninger med koncentrationer på hhv. 550 og 800 mg/L, ligeledes til en jordvæskekoncentration på ca. 10 mg/L. Slutteligt er forsøgsjordernes vandindhold justeret til deres oprindelige vandindhold (jf. tabel 1) ved tilsætning af demineraliseret vand.

MTBE, benzen og toluen er bestemt ved head-space analyse på GC-FID (Chromopack 9000, WCOT CP-select 624-CB column, 30 m længde, 0,53 mm i.d.). Headspace koncentrationer er konverteret til totale koncentrationer ved benyttelse af Henry's konstanter for MTBE, toluen og benzen på hhv. 0,022, 0,27 og 0,22 [Miljøstyrelsen, 1996]. Adsorption er antaget negligibel for MTBE, mens adsorptionen af toluen og benzen er inddraget ved at antage lineær adsorption (med Koc på hhv. 92,9 og 22,1 [JAGG version 1.5]), og en relation imellem fraktionen af organisk kulstof (foc) og organisk stof (fom) på: $foc = fom \cdot 0,58$.

3.3 Kolonneforsøg

For to jorder (lok. D og E) er der ligeledes udført forsøg i kolonner (Ø110 mm) for at simulere primær MTBE-nedbrydning i en jordsøjle over et forurenet grundvandsmagasin. Forsøget er opstillet med et omrørt 11 L grundvandsreservoir, der via et headspace-volumen (U-stykke) er i kontakt med en jordsøjle indeholdende ca. 7 kg (våd) jord. Under forsøget er der foretaget en daglig MTBE-tilsætning til det omrørte grundvandsreservoir, for at opnå en tilnærmelsesvis ligevægt imellem den tilsatte mængde MTBE og nedbrydningskapaciteten i jordsøjlen. Der er foretaget en daglig måling af MTBE-koncentrationen dels i grundvandsreservoirets headspace og dels i seks forskellige dybder af jordprofilen via prøveudtagningsporte (kanyler i centrum af jordsøjlen, påsat mininert ventiler). Forsøgsopstillingen er vist i figur 1 og kolonnedata er gengivet i tabel 3.



Figur 1: Forsøgsopstilling til kolonneforsøget for jord D og E [Nørgaard, 2007].

	Totale systemvoluminer (L)*			Jord	Vandindhold #	Volumenvægt (ρ_b) #	Grundvandskonc.
	Jord	Vand	Luft	(kg TS)	(vægt %)	(g TS/cm ³)	(mg MTBE/L)
Lok. D	4,20	11,51	5,31	6,63	8,4	1,58	22
Lok. E	4,25	11,64	5,19	6,09	11,3	1,43	29

Tabel 3: Data for de to kolonneopstillinger. * = inkl. reservoir og U-stykke (headspace).
= middelværdi (af 6 lag) målt efter endt forsøg og opskæring.

Som det fremgår af tabel 3 er vandindholdet i kolonnerne noget lavere end det naturlige vandindhold og vandindholdet i screeningsforsøget (jf. tabel 2). Dette skyldes, at jorden inden pakning i kolonnerne er blevet udlagt til tørring for efterfølgende at kunne pakke den til en nogenlunde naturlig volumenvægt.

3.4 Vakuumentilering på lokalitet A

Jorden fra lokalitet A er udtaget i en benzinforurenede umættet zone på en igangværende tankstation, hvor der er igangsat en vakuumentilering med henblik på at reducere nedsivningen af især BTEX'er og MTBE fra den umættede zone til grundvandet. Målet med vakuumentileringen er således – på sigt – at mindske længden af en forureningsfane indeholdende både BTEX'er og MTBE.

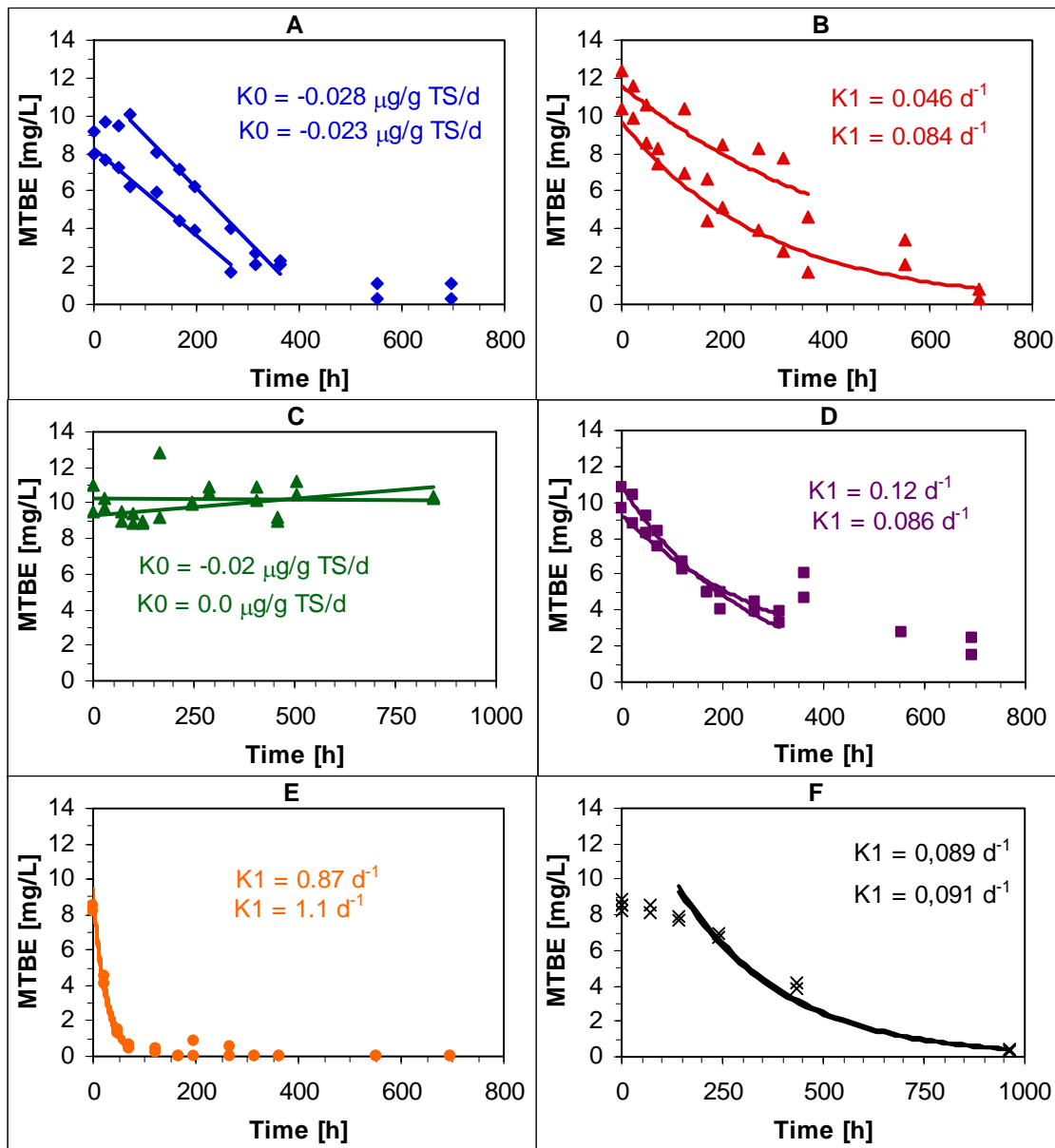
Resultaterne fra screeningsforsøget relateres til monitoringsresultater fra grundvandet under den ventilerede umættede zone på lokalitet A.

4. RESULTATER

4.1 Screening af primær MTBE-nedbrydning

Som det fremgår af afsnit 3.2 er screeningsforsøgene udført under aerobe redoxbetingelser og med en tilsætning af næringssalte svarende til den tilsatte mængde kulstof (hhv. MTBE, toluen og benzen) således at der ikke forventes at forekomme begrænsninger hvad disse faktorer angår. Forholdene i forsøget forventes således ikke nødvendigvis at svare til de naturlige forhold på lokaliteterne hvor jordprøverne er udtaget. Til gengæld vokser primære MTBE-nedbrydende mikroorganismer efter alt at dømme så langsomt, at en nedbrydning i batchforsøgene må tolkes som en aktivitet af en reelt tilstedeværende MTBE-nedbrydende population af mikroorganismer i hot-spot på de faktiske lokaliteter – en aktivitet som kan opnås når disse tilføres tilstrækkelige mængder af ilt og næringssalte, og ikke er væsentligt diffusionsbegrænset. I denne henseende må de opnåede nedbrydningsrater således betragtes som potentielle nedbrydningsrater.

Figur 2 viser resultaterne af screeningsforsøget for de seks hot-spot prøver, med fittede 1.ordensrater (K1) eller 0.ordensrater (K0). Der er udført 0.ordensanalyser på samtlige nedbrydningsforløb, men disse resultater er ikke vist grafisk. I forsøget er der medkørt en abiotisk kontrol, uden påvist abiotisk tab (resultater ikke vist).



Figur 2: Primære MTBE-nedbrydningsrater i seks hot-spot prøver.

Som det fremgår af figur 2 er der konstateret et primært nedbrydningspotentiale for MTBE i fem af de seks forsøgsjorder; forsøgsjord C undtaget. I prøverne fra lokalitet B, D og E ses nedbrydningen at starte uden lag fase, mens der i en af replikaterne fra lokalitet A samt i begge replikater fra lokalitet F ses en lag eller vækstfase inden nedbrydningen "tager fat". Mens nedbrydningen i de fleste prøver kan fittes med et 1.ordensforløb, udviser koncentrationsforløbet i replikaterne fra lokalitet A et udpræget 0.ordensforløb. De fittede 1.ordens- (K1) og 0.ordensrater (K0) fra screeningsforsøget er opsummeret i tabel 4

Lokalitet	1.ordensrate (K1)		0.ordensrate (K0)	
	(h ⁻¹)	(d ⁻¹)	(mg MTBE/L/h)	(µg MTBE/g TS/d)
A	ikke 1.orden		0,023	0,16
			0,028*	0,19*
B	0,0019	0,046	0,015	0,24
	0,0035	0,084	0,023	0,37
C	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
D	0,0050	0,12	0,035	0,29
	0,0036	0,086	0,025	0,20
E	0,036	0,87	0,146	1,4
	0,044	1,1	0,146	1,3
F	0,0037 [#]	0,089 [#]	0,0090	0,093
	0,0038 [#]	0,091 [#]	0,0087	0,087

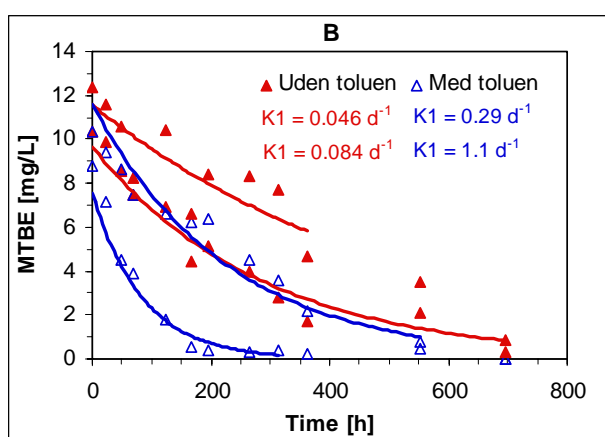
Tabel 4: Primære MTBE-nedbrydningsrater.

* = Ca. 70 timers lag. # = Ca. 144 timers lag. n.d. = ingen nedbrydning indenfor 35 dage.

Som det ses i tabel 4, er der konstateret primære aerobe nedbrydningsrater i størrelsesordenen (1. orden) 0,046 – 1,1 d⁻¹ og (0. orden) 0,087 – 1,4 µg MTBE/g TS/d. Mens forskellen imellem den højeste og laveste nedbrydningsrate således er på ca. en faktor 18-24, så varierer raterne for dobbeltbestemmelserne med maksimalt en faktor 1,8, hvor den højeste forskel ses for den meget finkornede/inhomogene jord fra lokalitet B.

4.2 Betydning af BTEX'er

Der er gennemført supplerende MTBE-nedbrydningsforsøg, hvor der er tilsat toluen og benzen (10 mg/L), til forsøgsjorderne fra lokalitet B (kun toluen), D og E. I forhold til lokalitet B er forsøget kørt sideløbende med screeningsforsøget, mens forsøgene med jord fra lokalitet D og E er kørt efterfølgende (inkl. et parallelforsøg til forsøget vist i figur 2). Resultaterne for lokalitet B er vist i figur 3.

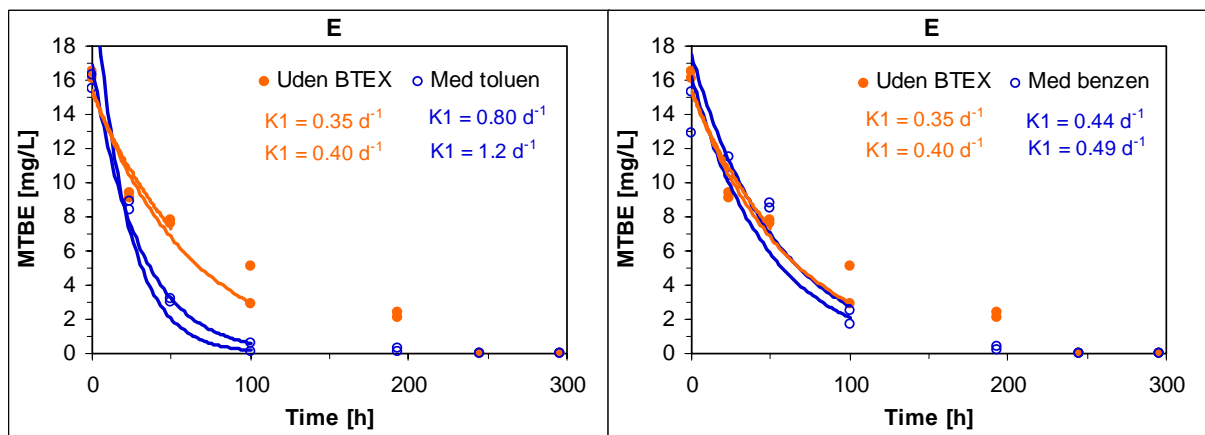


Figur 3: Effekt af toluen-tilsætning (10 mg/L) for lok. B.

Som det fremgår af figur 3 er der forholdsvis stor forskel på nedbrydningsforløbet i replikatforsøgene for jord B, både med og uden tilsætning af toluen, hvilket vurderes at skyldes denne jords inhomogene struktur og forureningsfordeling. Såfremt man blot betragter middelværdi-

en af nedbrydningsraterne hhv. med og uden toluen tilsat, er middelraten med toluen-tilsætning – noget overraskende - ca. 10 gange højere end raten uden toluen-tilsætning.

Resultaterne med tilsætning af toluen og benzen for lokalitet E er vist i figur 4, og det bemærkes, at nedbrydningsraterne uden tilsætning i det supplerende forsøg (figur 4) er en del lavere end de rater der blev opnået i screeningsforsøget (figur 2). I gennemsnit er de en faktor 2,6 lavere, hvilket tilskrives almindelige inhomogeniteter relateret til udtagningen af et mindre delvolumen fra et større prøvevolumen (på trods af en grundig homogenisering af at jorden).



Figur 4: Effekt af toluen- og benzen-tilsætning (10 mg/L) for lok. E.

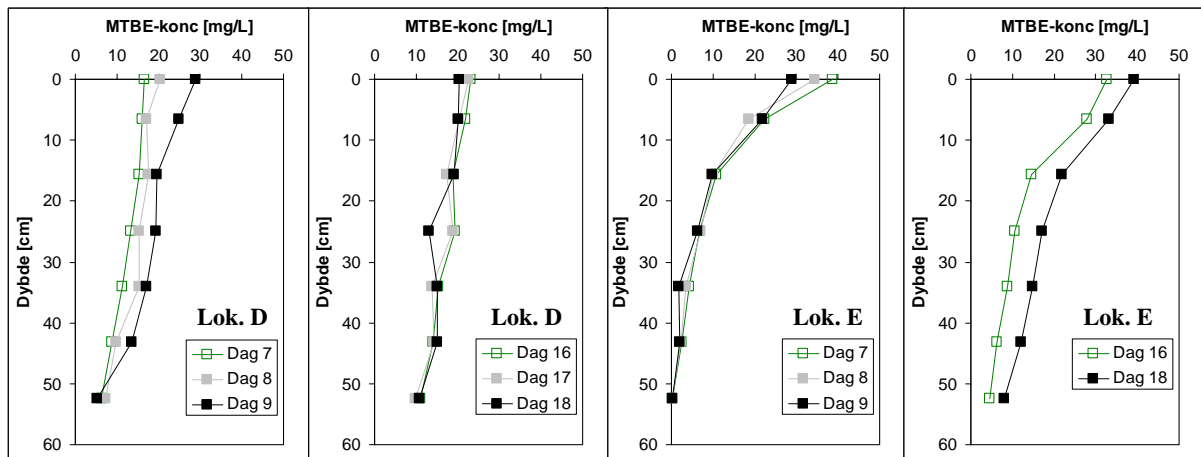
Sammenlignes middelraten med tilsætning af toluen ($1,0 \text{ d}^{-1}$) med raten uden tilsætning af toluen ($0,38 \text{ d}^{-1}$), ses der igen en positiv effekt af toluen-tilsætningen med en forøgelse af MTBE-nedbrydningsraten på en faktor ca. 2,7. Med benzen-tilsætning ses en mindre forøgelse af nedbrydningsraten på ca. en faktor 1,2, hvilket må siges at ligge indenfor den usikkerhedsmargin der er imellem replikatforsøgene generelt. Resultaterne fra lokalitet D viste ingen effekt af tilsætning af toluen eller benzen (resultater ikke vist).

Sammenfattende, på de udførte forsøg med tilsætning af toluen og benzen, kan det således – noget overraskende – konstateres, at tilsætning af toluen og benzen tilsyneladende har en positiv eller ingen effekt på MTBE-nedbrydningsraten. Dette er modsat hovedparten af de erfaringer der ligger i litteraturen og det er uvist hvilken mekanisme der ligger bag den tilsyneladende stimulering af MTBE-nedbrydningen som ses ved tilsætning af toluen til forsøgsjordene fra lokalitet B og E. Lignende resultater er tidligere rapporteret for en primær MTBE-nedbrydende kultur i [Miljøstyrelsen, 2004], hvor der gættes på at der muligvis kan være tale om en form for co-metabolisme eller anden stimulering af biomassevæksten eller enzymaktiviteten ved tilstedeværelse af et forholdsvis letomsætteligt substrat.

4.3 Kolonneforsøg

Efter er initial spikning af de to grundvandsreservoirer med MTBE til grundvandskoncentrationerne angivet i tabel 3, er de to kolonneopstillinger dagligt tilsat en mængde MTBE (i toppen af grundvandsreservoiret) på hhv. 3 og 6 mg MTBE/dag. Denne tilsætning er foretaget i 9 dage hvor der er målt koncentrationsprofiler igennem jordsøjlerne på dag 7, 8 og 9 for at se om systemet er i tilnærmelsesvis steady-state. På baggrund af resultaterne er det skønnet, at

kolonnen med jord fra lok. E var i nogenlunde ligevægt (måske med en tendens til let faldende koncentrationer i toppen af kolonnen), mens der blev observeret en tendens til stigende koncentrationer i kolonne med jord fra lok. D. Den daglige tilsætning til kolonneopstilling D blev herefter nedsat til 1,5 mg MTBE/dag, mens tilsætningen til kolonneopstilling E blev hævet til 8 mg MTBE/dag, og disse tilsætninger blev fortsat i yderligere 6 dage (frem til dag 17). Der er i slutningen af denne periode (dag 16, 17 og 18) målt yderligere tre koncentrationsprofiler for kolonne D og to (dag 16 og 18) for kolonne E. Resultaterne er gengivet i figur 5.

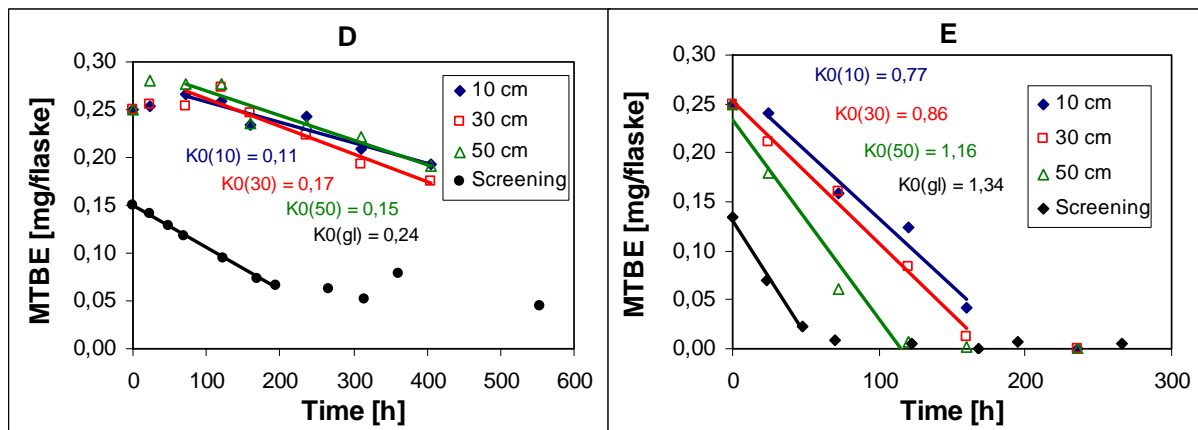


Figur 5: Koncentrationsprofiler for jordkolonner (lokalitet D og E).

Som det fremgår af figur 5 opnås de bedste tilnærmede steady-state koncentrationsprofiler (= konstante profiler i tid) for kolonne D og E ved tilsætninger på hhv. 1,5 mg MTBE/dag (dag 16-18) og 6 mg MTBE/dag (dag 7-9). Hvis der ses bort fra dynamiske effekter og nedbrydningsratens eventuelle koncentrationsafhængighed – og blot ses på hele kolonnen under et – kan der på baggrund af disse daglige tilsætninger og kolonnens samlede jordmængde beregnes 0. ordens nedbrydningsrater på hhv. 0,23 og 0,99 μg MTBE/g TS/dag for kolonne D og E.

Sammenlignes disse rater med middelerterne fra screeningsforsøget (jf. tabel 4), på hhv. 0,245 og 1,35 μg MTBE/g TS/dag er der således opnået rater i kolonneforsøget på hhv. 94% og 73% af de rater der blev opnået i screeningsforsøget.

Efter afslutning af kolonneforsøget er der foretaget en opskæring af de to kolonner, og der er udført supplerende batchforsøg til bestemmelse af MTBE-nedbrydningsraterne i dybder på hhv. 10, 30 og 50 cm. Resultaterne fra disse forsøg (middel af dobbeltbestemmelse) fremgår af figur 6, sammen med middelværdierne af screeningsresultaterne.

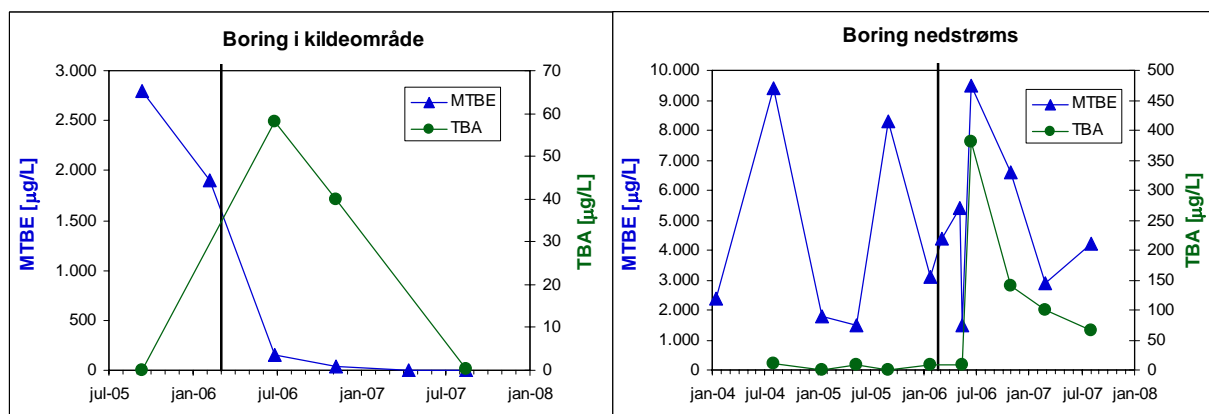


Figur 6: Supplerende batchforsøg efter opskæring af kolonnerne sammenholdt med middelresultaterne fra screeningsforsøget (lokalitet D og E).

På baggrund af de supplerende forsøg er der konstateret mindre variationer imellem nedbrydningsraterne fra de forskellige dybder (ca. en faktor 1,5 imellem højeste og laveste rate). Middelraten fra kolonne D er på $0,14 \mu\text{g MTBE/g TS/d}$, mens middelraten fra kolonne E er $0,93 \mu\text{g MTBE/g TS/d}$, og der er overordnet set en god overensstemmelse imellem raterne opnået efter opskæring af kolonnerne (jf. figur 6) og raterne opnået ved den oprindelige screening (tabel 4) og de tilnærmede rater fra kolonneforsøget. Bemærkelsesværdigt er det dog, at der observeres en lagfase for samtlige de supplerende forsøg med jord fra kolonne D.

4.4 Monitoringsdata fra lokalitet A

Figur 7 viser monitoringsresultater (MTBE og TBA) fra to grundvandsboringer på lokalitet A, hvor der gennemføres en vakuumventilering i en 8,5 meter umættet zone i kildeområdet. Den lodrette streg (marts 2006) indikerer det tidspunkt hvor vakuumventileringen er igangsat.



Figur 7: Monitoringsdata fra to grundvandsboringer på lokalitet A.

Ud fra figur 7 ses det, at koncentrationsniveauerne for både MTBE og nedbrydningsproduktet TBA i den nedstrøms boring generelt er højere end i boringen, der er placeret i kildeområdet. Dette skyldes, at den nedstrøms boring efter alt at dømme er placeret midt i forureningsfanen mens boringen i kildeområdet ikke er placeret centralt i forhold til jordforureningen. I det føl-

gende fokuseres der på de relative tendenser i koncentrationen af TBA ifht. starten af vakuumentileringen. Som det fremgår er der hverken i periferien af kildeområdet eller i boringen nedstrøms jordforureningen konstateret nævneværdige niveauer af TBA inden igangsætningen af vakuumentileringen, mens der i begge boringer observeres en pludselig – og meget markant – stigning i TBA-koncentrationen efter starten af vakuumentileringen.

Sammenholdes observationerne med screeningsresultaterne fra lokalitet A, vurderes det, at der over tiden (langsomt) er opvokset en population af MTBE-nedbrydere i den umættede zone på lokalitet A. Denne population er efterfølgende blevet begrænset af ilttilførslen til den umættede zone, hvorfor der ikke ses nævneværdige koncentrationer af TBA i grundvandsprøverne inden igangsætningen af vakuumentileringen. Ved vakuumentileringen tilføres der imidlertid ilt til den umættede zone, hvorved iltbegrænsningen ophører og biomassen begynder at nedbryde MTBE – tilsyneladende under ophobning af nedbrydningsproduktet TBA.

5. DISKUSSION

Der er konstateret primær aerob nedbrydning af MTBE i fem af seks jordprøver udtaget fra hot-spot i den umættede zone på benzinformerede lokaliteter, og der er i batchforsøg konstateret potentielle nedbrydningsrater i størrelsesordenen (1. orden) $0,046 - 1,1 \text{ d}^{-1}$ og (0. orden) $0,087 - 1,4 \mu\text{g MTBE/g TS/d}$. Disse rater er sammenlignelige med raterne fra et tilsvarende projekt udført på danske grundvandssedimenter [Loll et al., 2002], hvor der dog kun blev konstateret nedbrydning i to af seks sedimenter. De observerede batchrater er ”verificeret” i kolonneforsøg (i større skala) for to jorde. Resultaterne fra den ene lokalitet er relateret til en aktuel sag, hvor igangsætningen af en vakuumentilering af hot-spot i den umættede zone tilsyneladende medfører en ”vækning” af ”sovende” MTBE-nedbrydere, og der pludselig observeres meget markante indhold af nedbrydningsproduktet TBA i to monitoringsboringer.

6. REFERENCER

- Kjeldsen, P., M. Christophersen, M. Broholm, P. Höhener, K. Kaufmann, D. Hunkeler, D. Bouchard og R. Aravena. ”The Værløse Implanted Source Field Experiment: Laboratory and Field Evidence of Natural Attenuation in the Vadose Zone”. *ATV Jord og Grundvand - umættet zone*, april 2004, s. 63-74.
- Loll, P., K. Henriksen, L. Bjergbæk, S. Mogensen og C. Larsen. 2003. ”MTBE nedbrydning i danske grundvandssedimenter”. *Vand & Jord*. 10(1), s. 13-16.
- Loll, P., D. Nørgaard, K. Henriksen og C. Larsen. 2007. ”MTBE Biodegradation in the Vadose Zone”. Paper C-38 på 9. internationale Battelle-konference om In Situ and On-Site Bioremediation i Baltimore, Maryland, 2007.
- Miljøstyrelsen. 1996. ”Kemiske stoffers opførsel i jord og grundvand: Bind 2”. Projekt om jord og grundvand nr. 20.
- Miljøstyrelsen. 2004. ”Rensning af MTBE-forurenet grundvand i bioreaktor med MTBE som primært substrat”. Miljøprojekt nr. 880.
- Moreels, D., L. Bastiaens, F. Ollevier, R. Merckx, L. Diels og D. Springael. 2004. ”Evaluation of the intrinsic methyl *tert*-butyl ether (MTBE) biodegradation potential of hydrocarbon contaminated subsurface soils in batch microcosm systems”. *FEMS Microbiol. Ecol.* 49(1), s. 121-128.
- Nørgaard, D. ”Nedbrydning og transport af MTBE i jordens umættede zone”. *Afgangsprojekt ved Civilingeniøruddannelsen, Sektion for Miljøteknologi, Aalborg Universitet*. Hovedrapport og bilagsrapport. Juni 2007.
- Oliebranchens Miljøpulje (OM). 2006. ”Projekt om umættet zone. Undersøgelse af fyringsolies transport og nedbrydning i den umættede zone”. NIRAS Allerød. Christensen, A.G. September 2006.
- Pasteris, G., D. Werner, K. Kaufmann og P. Höhner. 2002. ”Vapor Phase Transport and Biodegradation of Volatile Fuel Compounds in the Unsaturated Zone: A Large Scale Lysimeter Experiment”. *Environ. Sci. Technol.* 36(1), s. 30-39.