

# **IN-SITU TEST TIL DOKUMENTATION AF NEDBRYDNING I UMÆTTET ZONE.**

Per Loll, Ph.D., udviklingsleder, DMR A/S  
Andreas Houlberg Kristensen, Ph.D., DMR A/S  
Poul Larsen, Ph.D., DMR A/S  
Kaj Henriksen, Lektor emeritus, Sektion for Miljøteknologi, AAU  
Claus Larsen, civilingeniør, DMR A/S

## 1. RESUMÉ

DMR og AAU har under Miljøstyrelsens Teknologipulje udviklet og foretaget en indledende afprøvning af en felttest til dokumentation og kvantificering af nedbrydning af olieculbrinter i jordens umættede zone. Ved testen nedblæses forurening på gasform i ét punkt og opsuges i et nabopunkt (= en vandret felt-kolonnetest, uden kolonne). Testen benævnes Dual Point Degradation Test (DPD-test). På baggrund af et aerobt og et anaerobt testforløb, samt en simpel analyse af gennembrudskurven, dokumenteres in-situ nedbrydning og der kan estimeres en aerob nedbrydningsrate. Testen er hurtig og operationel ift. de metoder, der hidtil er publiceret, og er afprøvet på en sag, hvor der er efterladt en mindre dieselolieforurening.

## 2. BAGGRUND

### 2.1 Den danske risikovurderingskontekst: JAGG 1.5 og 2.0

I JAGG 1.5 (grundvandsmodulet) inddrages den umættede zone kun i det omfang, at kildegeometrien (areal og bredde), samt kildestyrkekoncentrationen skal karakteriseres. For risikovurderingen er det principielt ligegyldigt om der er 1 eller 50 meter fra bunden af forureningen til grundvandet (transportafstanden fra kilde til grundvand), ligesom aflejringstypen i den umættede zone ikke har betydning for resultatet. Man kan sige, at den tidsmæssige dynamik, samt de processer der måtte foregå under transporten fra kilde til grundvand, er trukket ud af risikovurderingen.

I JAGG 2.0 åbnes der op for at inddrage den umættede zone mere direkte i risikovurderingen, da der som en integreret del af beregningen fra en kilde, beliggende i den umættede zone, kan udføres en beregning af transporttiden/-dynamikken imens forureningen udvaskes/transporteres mod grundvandet /1/. For en kilde med olieculbrinter kan der endvidere inddrages nedbrydning under transporten igennem den umættede zone mod grundvandet. I den forbindelse er det vigtigt, at holde sig for øje, at der i JAGG 2.0 lægges op til, at nedbrydning i den umættede zone kan inddrages på tre forskellige niveauer /1/:

1. Ingen nedbrydning.
2. Kvalitativ dokumentation af nedbrydningen, f.eks. via dokumentation af iltforbrug og dannelse af kuldioxid (smoking guns), samt brug af en konservativ/lav nedbrydningsrate fra litteraturen.
3. Kvantitativ dokumentation af nedbrydning via en estimering af den aktuelle nedbrydningsrate på lokaliteten, og benyttelse af denne i risikovurderingen.

### 2.2 Hvilke projekter har Miljøstyrelsen igangsat?

For at imødegå behovet for at inddrage nedbrydningen i risikovurderinger for grundvandet (niveau 2 og 3), har Miljøstyrelsen igangsat et Teknologiprojekt med det formål, at belyse hvilke feltstrategier der kan benyttes med henblik på at dokumentere nedbrydning i den umættede zone; hhv. kvalitativt og kvantitativt /2 og 3/. Dvs. et litteraturstudie af eksisterende/publicerede og nærtliggende dokumentationsstrategier (stadig på et forskningsstadium). Kendetegnende for de identificerede strategier er, at de er forholdsvist arbejdskrævende og omkostningstunge (specielt på niveau 3).

I forlængelse af /4/, hvor resultaterne antyder en meget kraftig indflydelse af nedbrydning under transporten af olieculbrinter igennem den umættede zone, har Miljøstyrelsen igangsat et projekt til indledende feltafprøvning af en ny metode, der kan benyttes til påvisning/dokumentation af nedbrydning i den umættede zone. Dvs. udvikling og indledende afprøvning af en helt ny metode/strategi – som præsenteres her.

## 2.3 Praktiske erfaringer og udfordringer

Ved opstillingen af den nye strategi har vi inddraget en lang række erfaringer opnået fra projekter gennemført på Aalborg Universitet igennem de sidste 5-10 år, herunder specialeprojekter, f.eks. /5/ og /6/. De overordnede erfaringer fra disse projekter har været:

- a) At der stort set altid kan forventes en betydelig nedbrydning af oliekomponenter, herunder BTEX, under umættede forhold når der blot opretholdes aerobe forhold. Hæmning kan dog forekomme under toksiske forhold og næringssaltbegrænsning.
- b) At nedbrydningen af BTEX, selv i en uforurennet jord, hurtigt og massivt går i gang ved tilførsel af kulbrinter – typisk indenfor 2-14 dage.
- c) At det under dynamiske og rumligt variable forhold (når fysisk-kemiske og mikrobiologiske forhold varierer i tid og sted) kan være meget svært, at uddrage en eksakt nedbrydningsrate i den umættede zone. Dette skyldes, at stort set alle de styrende processer i den umættede zone er stærkt ikke-lineære og at små usikkerheder i input giver store usikkerheder på output (nedbrydningsraten). Sådanne dynamiske og rumligt variable forhold er desværre reglen frem for undtagelsen under in-situ forhold.

Den foreslåede og afprøvede strategi bygger derudover på praktiske erfaringer fra en lang række sager med oliekomponenter, herunder /4/, hvor alle indikatorer peger på, at nedbrydning ofte foregår i praksis og ofte eliminerer den faktiske risiko; specielt hvis der er aerobe forhold.

I forhold til praktiske risikovurderinger for oliestoffer er det endvidere kendetegnende, at nedbrydningsraten spiller en afgørende rolle for resultatet af risikovurderingen. Oftest vil der være en beregningsmæssig risiko hvis nedbrydningen ikke medtages, mens en meget lille nedbrydningsrate vil kunne medføre en beregningsmæssig risikoeliminering.

Den helt store udfordring er således, at dokumentere/kvantificere den aktuelle nedbrydningsrate tilstrækkeligt overbevisende, så den kan inddrages i vores risikovurderinger – selvom vores fysiske, kemiske og biologiske system er præget af store tidlige og rumlige variationer – og gerne uden at skulle op med den helt store tegnebog hver gang.

## 3. FORMÅL

Formålet med projektet har derfor været at opstille et operationelt og omkostningseffektivt alternativ til de metoder, der er identificeret i /2 og 3/ til dokumentation og kvantificering af nedbrydning af oliestoffer i den umættede zone; specielt med ovenstående praktiske udfordringer in mente.

### 3.1 Hvad er det nye og smarte?

Det nye ved den fremsatte strategi er, at vi for at opnå en operationel og omkostningseffektiv strategi for dokumentation af nedbrydningen ikke stræber efter at komme med et eksakt bud på nedbrydningsraten. Erkendelsen er nemlig, at vi ved en risikovurdering ikke har behov for at prediktere hvad den faktiske forureningsudbredelse er eller bliver, men blot har behov for at overbevise os om, at udbredelsen ikke bliver større end et givent estimat – om noget vil den faktiske udbredelse blive mindre end den beregnede fordi vi har benyttet en konservativ tilgang til at estimere en nedbrydningsrate.

Devisen er slet og ret: Ikke nøjagtigt - men simpelt og konservativt!

### 3.2 Hvordan passer strategien ift. JAGG 2.0?

På nuværende tidspunkt retter den opstillede strategi sig primært imod en kvalitativ in-situ dokumentation af nedbrydningen (niveau 2, jf. afsnit 2.1) via en direkte dokumentation på selve de risikodrivende forureningskomponenter, f.eks. benzen. I projektet opstilles endvidere en række perspektiver, der – i betragtning af strategiens potentiale – med et forholdsvist beskedent teknologiløft kan bringe strategien i retning af at kunne anvendes ift. kvantitativ dokumentation af nedbrydningen (niveau 3, jf. afsnit 2.1).

### 3.3 Forbehold

Desværre løser strategien ikke alle vores problemer mht. dokumentation og kvantificering af nedbrydning i jordens umættede zone, og den er som nævnt ikke færdigudviklet ift. anvendelse i JAGG 2.0 på niveau 3 (jf. afsnit 2.1) – men inden vi fortvivles over alt det vi ikke kan med den nye strategi, bør vi gøre os selv den tjeneste at overveje hvilke andre praktiske alternativer vi (ikke) har!

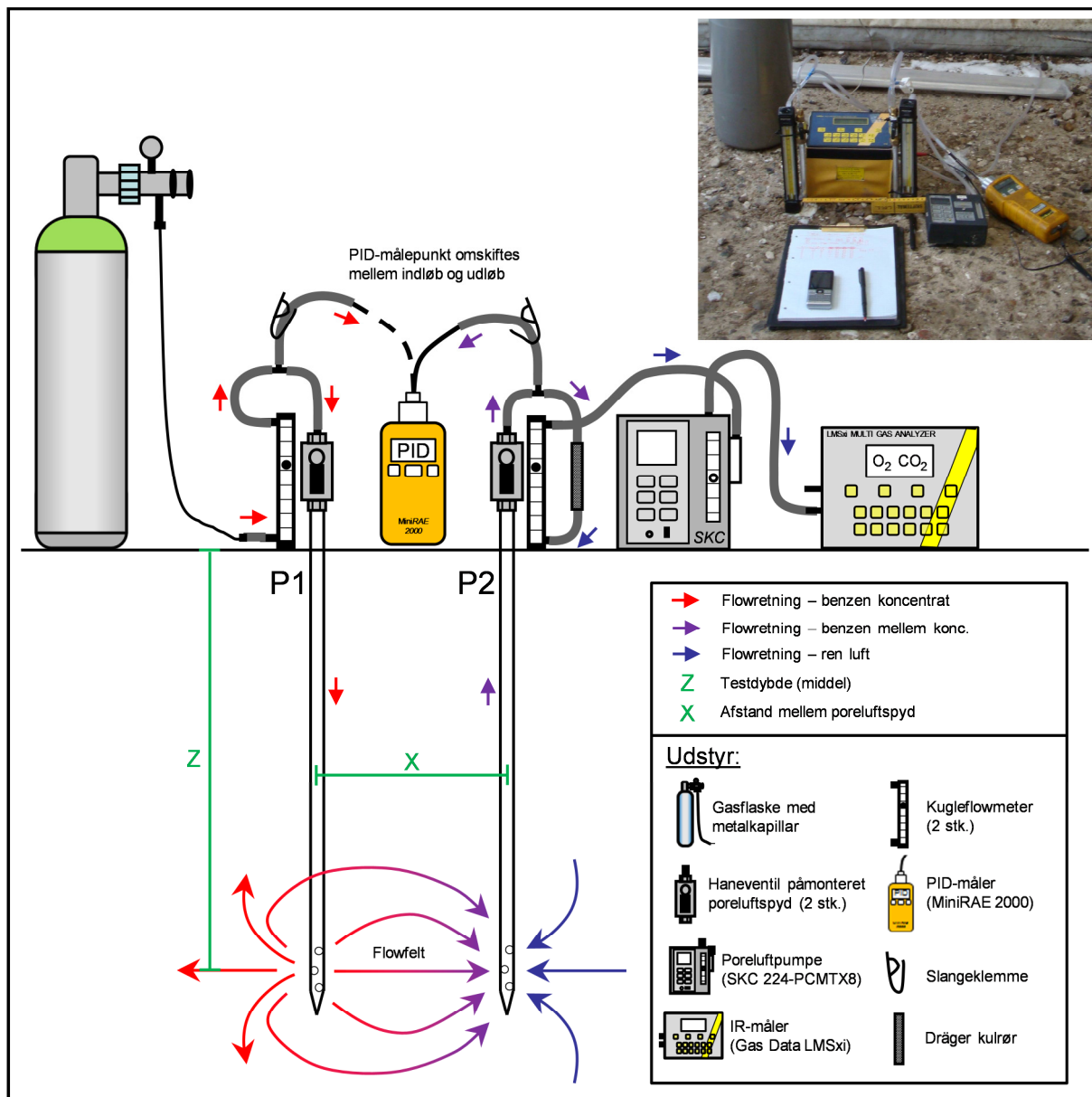
## 4. BESKRIVELSE AF STRATEGI

Felttesten er baseret på, at benzen på gasform nedblæses i ét punkt (P1) og opsuges i et nabopunkt (P2); svarende til en vandret felt-kolonnetest, uden kolonne. På baggrund af en aerob og en anaerob test, samt en simpel analyse af gennembrudsgraden i opsningspunktet for de to tests, dokumenteres hvorvidt der sker in-situ nedbrydning og der dannes basis for at estimere en konservativ aerob in-situ nedbrydningsrate. Dataanalysen begrænser sig til at se på forskellen imellem koncentrationsniveauet i opsningspunktet efter steady-state. Testproceduren er udviklet så den kan gennemføres med standard poreluftudstyr og et par specialfremstillede gasblandinger. Opstillingen er vist i figur 1.

### 4.1 Udstyrspakken

Rent udstyrsmæssigt benytter vi os af så meget standard poreluftudstyr som muligt. Et underordnet mål for metodeudviklingen har således været, at benytte så meget fra den almindelige poreluftprøvetagningspraksis som muligt (procedure og udstyr), bl.a. for at opnå, at den udførende sagsbehandler eller miljøtekniker har en fingerspidsfornemmelse for opsætning af testopstillingen og for div. driftsparametre. Som det fremgår af figur 1 har vi benyttet os af følgende udstyrspakke:

- En aerob 20 L gasflaske med ca. 2.000 mg benzen/m<sup>3</sup> i 21 % O<sub>2</sub>, med N<sub>2</sub> som grundgas (9 bar).
- En anaerob 20 L gasflaske med ca. 2.000 mg benzen/m<sup>3</sup> med N<sub>2</sub> som grundgas (39 bar).
- En trinløs reduktionsventil påsat en metalkapillar.
- 2 stk. kugleflowmetre med intervallet 0,1 – 1,2 L/min.
- 2 stk. poreluftspyd med påsat Ballofix haneventil.
- En PID-måler (MiniRAE 2000) – bruges til feltvurdering af steady-state.
- En SKC pumpe (224-PCMTX8 Deluxe).
- En IR-måler (Gas Data LMSxi).
- Diverse slanger, T-stykker, klemventiler og Dräger kulrør.



Figur 1: Foto og skematisk tegning af feltopstillingen. P1 er injektionspunktet og P2 er opsugningspunktet. Pilottesten er kørt ved en dybde på 100 cm (Z) og med 20 cm afstand imellem poreluftspyddene (X).

#### 4.2 Fremgangsmåde for dataanalyse

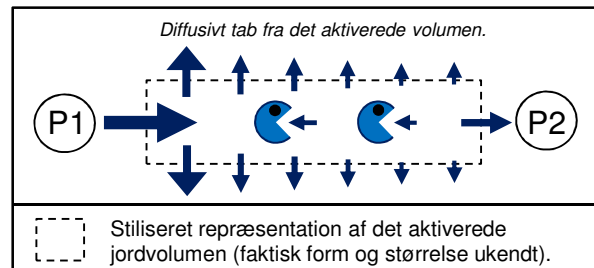
Erkendelsen fra diverse projekter, herunder /2, 5, 6 og 7/, er, at det er en meget omfattende og omkostningskrævende proces, at estimere nøjagtige nedbrydningsrater under dynamiske og rumligt varierende forhold. I forlængelse af /7/ er det således vores opfattelse, at det beregningsmæssigt er en meget stor fordel at forsøge, at estimere nedbrydningsraten under stationære forhold (steady-state).

##### Den aerobe test (inkl. aerob nedbrydning)

Først gennemføres en aerob test med et konstant og ens flow i P1 og P2 (her 1 L/min) samt med en konstant koncentration af benzen i indløbet (her ca. 2.000 mg/m<sup>3</sup>).

Når udløbskoncentrationen for denne test har nået et konstant niveau er der ligevægt imellem det massinput, systemet påføres og de processer der foregår i jordmatricen ved det resulterende koncentrationsniveau. Der har således indstillet sig en ligevægt imellem koncentrationen i poreluften, koncentrationen i porevandet (opløsning) og koncentrationen på jordpartiklerne (adsorption). Dertil er der opnået ligevægt imellem betingelserne i jordmatricen og nedbrydningsraten.

Forskellen imellem det masseinput jordmatricen påføres i injektionspunktet, P1 og den masse, der trækkes ud i P2 (mg/dag) er således lig med den masse som forsvinder ud af systemet via diffusion og nedbrydning. Dette er illustreret som summen af massestrømspilene ud af boksen, samt det der omsættes af mikroorganismene i figur 2.



Figur 2: For den aerobe test kan tabet til diffusion og nedbrydning estimeres som forskellen imellem masseinput ved P1 og masseudtræk ved P2 (ved steady-state).

Massetabet under den aerobe testdel (mg/dag) ved steady-state estimeres som:

$$T_{aerob} = Q_1 \cdot (C_{ind,aerob} - C_{ud,aerob}) \quad (1)$$

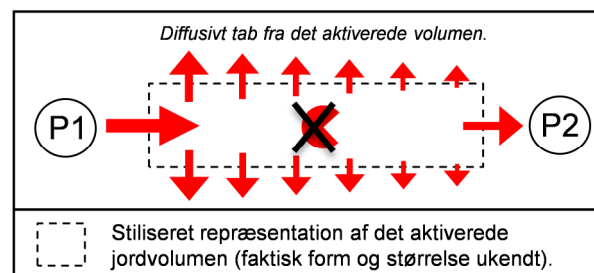
Hvor  $T_{aerob}$  [mg/dag] er det aerobe massetab af benzen til diffusion og nedbrydning,  $Q_1$  [m<sup>3</sup>/dag] er flowet igennem P1 og P2 ( $1 \text{ L/min} \cdot 60 \cdot 24 / 1000 = 1,44 \text{ m}^3/\text{dag}$ ),  $C_{ind,aerob}$  [mg/m<sup>3</sup>] er indløbskoncentrationen under den aerobe testdel (2.000 mg/m<sup>3</sup>) og  $C_{ud,aerob}$  [mg/m<sup>3</sup>] er koncentrationen i P2 når der er opnået steady-state (måles med kulrør og akkrediteret kemisk analyse).

#### Den anaerobe test (ekskl. aerob nedbrydning)

Efterfølgende gennemføres en anaerob test, hvor der køres med samme konstante flow som under den aerobe test med samme konstante koncentration af benzen i indløbet (1 L/min i både P1 og P2 samt ca. 2.000 mg/m<sup>3</sup> i indløbet).

Når udløbskoncentrationen for denne test har nået et konstant niveau er der igen ligevægt imellem det massinput, der påføres systemet og de processer der foregår i jordmatricen ved det resulterende koncentrationsniveau.

Forskellen imellem det masseinput jordmatricen påføres i injektionspunktet, P1 og den masse, der trækkes ud i P2 (mg/dag) er således lig med den masse som forsvinder ud af systemet via diffusion. Nedbrydningen sættes lig nul, da der altovervejende er tale om anaerobe forhold i jordmatricen. Det diffusive massetab kan illustreres som summen af massestrømspilene ud af boksen i figur 3.



Figur 3: For den anaerobe test kan tabet til diffusion estimeres som forskellen imellem masseinput ved P1 og masseudtræk ved P2 (ved steady-state).

Massetabet under den anaerobe testdel (mg/dag) ved steady-state estimeres som:

$$T_{anaerob} = Q_2 \cdot (C_{ind,anaerob} - C_{ud,anaerob}) \quad (2)$$

Hvor  $T_{anaerob}$  [mg/dag] er det anaerobe massetab af benzen til diffusion,  $Q_2$  [m<sup>3</sup>/dag] er flowet igennem P1 og P2 (1 L/min·60·24/1000 = 1,44 m<sup>3</sup>/dag),  $C_{ind,anaerob}$  [mg/m<sup>3</sup>] er indløbskoncentrationen under den anaerobe testdel (2.000 mg/m<sup>3</sup>) og  $C_{ud,anaerob}$  [mg/m<sup>3</sup>] er koncentrationen i P2 når der er opnået steady-state (måles med kulrør og akkrediteret kemisk analyse).

#### Estimering af en aerob nedbrydningsrate for matricen

Den aerobe nedbrydningsrate for den del af jordmatricen, som er inddraget i testen, estimeres efterfølgende som det aerobe massetab minus det anaerobe massetab. Ligning 3 gælder kun når  $C_0$  [mg/m<sup>3</sup>] er den samme konstante indløbskoncentration i både den aerobe og den anaerobe test (her  $C_{ind,aerob} = C_{ind,anaerob} = 2.000$  mg/m<sup>3</sup>).

$$T_{nedbrydning} = T_{aerob} - T_{anaerob} = Q \cdot (C_{ud,anaerob} - C_{ud,aerob}) = Q \cdot \Delta C_{ud} \quad (3)$$

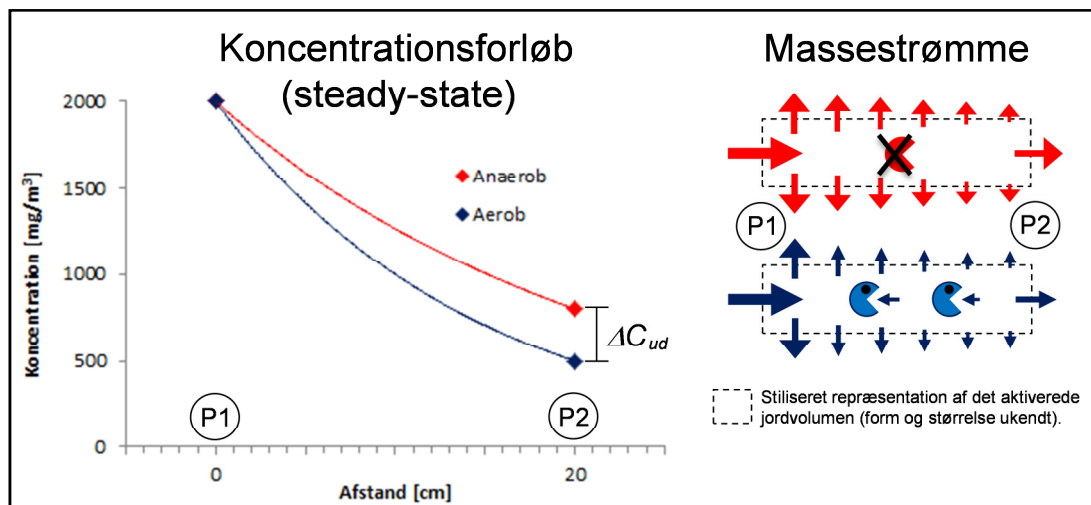
Hvor  $T_{nedbrydning}$  [mg/dag] er estimeret på det aerobe massetab af benzen til nedbrydning,  $Q$  [m<sup>3</sup>/dag] er det samme konstante flow i P1 og P2 under såvel den aerobe som den anaerobe test ( $Q = Q_1 = Q_2 = 1,44$  m<sup>3</sup>/dag), mens  $C_{ud,aerob}$  og  $C_{ud,anaerob}$  [mg/m<sup>3</sup>] er koncentrationen i P2 for hhv. den aerobe og den anaerobe test når der er opnået steady-state (måles med kulrør og akkrediteret kemisk analyse).

Lige nu har vores estimat på nedbrydningen en atypisk enhed (mg/dag) idet 0.ordensrater typisk angives i enheden (mg/kg TS/dag) og 1.ordensrater angives med enheden (dag<sup>-1</sup>). Hvis vi kan opnå et estimat på nedbrydningsraten der har en af disse enheder ville vi således være i stand til at sammenligne konkret opnåede værdier med litteraturværdier. Et estimat på en 0.ordensrate (mg/kg TS/dag) kan opnås ved at estimere den masse af jord (kg TS), der er aktiveret under testen. Et eksempel på dette er vist i afsnit 5. I JAGG 2.0 benyttes 1.ordensrater med enheden (dag<sup>-1</sup>), og det ville således være mest hensigtsmæssigt, at kunne opnå rateestimerer med denne enhed med DPD-testen. Perspektiver for at opnå rateestimerer med denne enhed via DPD-testen er kort berørt i afsnit 6.

#### Diskussion af usikkerheder – den konservative tilgang

Som det fremgår af ovenstående antages det, at der ikke sker en nedbrydning under den anaerobe test. Hvis der i virkeligheden sker en (lille) nedbrydning under den anaerobe testdel (f.eks. en anaerob nedbrydning eller en aerob nedbrydning i aerobe mikrozoner) bliver det endelige bud på den aerobe nedbrydningsrate konservativt, da massetabet under den anaerobe test ( $T_{anaerob}$ ) således repræsenterer et diffusivt tab og et (lille) tab til nedbrydning.

Under den anaerobe test vil koncentrationen i jordmatricen være højere end under den aerobe test, da nedbrydningen er ubetydelig. Ved en højere koncentration langs centerprofilet imellem P1 og P2 vil der ligeledes opstå en større koncentrationsgradient imellem centerprofilet og den omgivende matrice. Derved vil det diffusive tab under den anaerobe test, alt andet lige, være en smule større end under den aerobe test. Under estimeringen af det aerobe massetab (jf. ligning 3), fratrækkes derfor et konservativt bud på det aerobe diffusive tab. Situationen er illustreret i figur 4, hvor koncentrationen langs centerprofilet imellem P1 og P2 er højere for den anaerobe test, hvorfor det diffusive massetab er større for den anaerobe test. Kilden til dette er den manglende (eller meget lille) nedbrydning under den anaerobe testdel.



Figur 4: Illustration af koncentrationsprofil langs centerlinjen imellem P1 og P2 ved steady-state, samt betydningen for massestrømmene for det aktiverede jordvolumen.  $T_{nedbrydning}$  estimeres på baggrund af  $\Delta C_{ud}$ , jf. ligning 3.

## 5. PILOTTEST OG RESULTATER

### 5.1 Lokalteten og testforhold

Pilottesten er gennemført på en privat ejendom, hvor der fra før 1946 og til i dag har der været drevet vognmandsforretning med oplag af dieselolie. Oplaget af dieselolie har ledt til jord- og grundvandsforurening ved en utæt nedgravet tank. Der er foretaget en afgravning af størstedelen af jordforureningen, men der er dog efterladt en mindre restforurening i udgravningens kant, under offentlig vej. Restforureningen er konstateret fra 0,5 – 2,8 m.u.t. og er karakteriseret ved jordprøver med totalindhold af kulbrinter på mellem 580 og 5.300 mg/kg TS, mens indholdet af BTEX'er er mellem *ikke påvist* og 0,52 mg/kg TS. Restforureningen er beliggende i fyldjord, bestående af muldet sand. Fyldlaget har en mægtighed på op til ca. 1,7 meter. Grundvandsspejlet er konstateret omkring 2,6 m.u.t.

Pilottesten er udført i det sandfyld, der er fyldt i udgravningen, ca. 15 cm fra udgravningens kant og i en dybde på 1,0 m u.t. Pilottesten er gennemført den 3. december 2010 med ca. 17 cm frost i jorden og en jordtemperatur i 1 meters dybde på ca. 7 °C (målt med PID-måleren). Erfaringsmæssigt er en lav temperatur ikke befordrende for en effektiv nedbrydning i den umættede zone (<5 °C) /8/, men forskellen på nedbrydningsrater ved hhv. 12 og 7 °C burde "kun" være i størrelsesordenen en faktor 2 (med en Q10 på 4).

### 5.2 Afvigelser

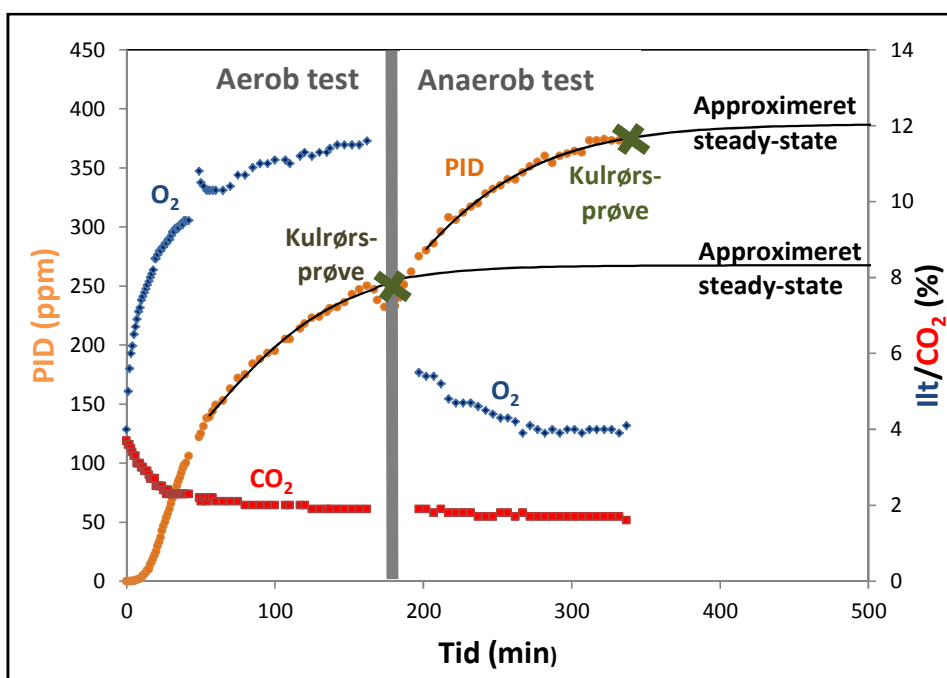
Kulrørsprøver af den indkøbte standardgas, som var bestilt til at skulle indeholde 2.000 mg benzen/m<sup>3</sup>, har vist, at kun omkring 240 mg/m<sup>3</sup> af den indkøbte gas er benzen, mens gassen har et totalindhold af kulbrinter på omkring 2.000 mg/m<sup>3</sup>. En efterfølgende kontakt til gasleverandøren samt en efterbestilt GC-MS screening af gasprøver fra hhv. den aerobe og anaerobe gas har ikke givet nogen entydig afklaring på hvilke andre kulbrinter (udover benzen) der befinder sig i de indkøbte gasblandinger. Det nærmeste vi kommer en afklaring pt. er at der er tale om kulbrinter med et kogepunktinterval i området 50-70 °C. Denne problemstilling afventer således endelig afklaring ligesom muligheden for at bestille en ren gas med en specifik koncentration af f.eks. benzen er ved at blive undersøgt. For illustration af testen er der dog blot regnet med TVOC (ukendte komponenter inkl. benzen).



Den aerobe testdel er ikke kørt helt til steady-state, da gasflasken forinden løb tør (ca. 180 min), og den anaerobe testdel blev i felten vurderet at have nået steady-state (konstant PID i udløb ca. 30 min), men er efterfølgende vurderet at kunne have varet længere.

### 5.3 Resultater

Resultaterne af pilottesten er vist i figur 5. PID-niveauet kan (desværre) ikke benyttes direkte til estimering af TVOC-koncentrationen da ilt hæmmer PID-signalet. Således kan et højt PID-udslag under den anaerobe testdel (lav  $O_2$ -konc.) være udtryk for en lavere TVOC-konc. end et tilsvarende højere PID-udslag i den aerobe testdel. PID benyttes derfor kun til at finde tidspunktet for steady-state, hvor der skal udtages kulrørsprøver til akkrediteret analyse.



Figur 5: Resultater målt i P2: PID,  $O_2$  og  $CO_2$ . Omkring 50 min blev Q1 ved et uheld momentant opjusteret til 1,2 L/min, og der ses en stigning af ilt i udløbet (P2). PID benyttes til at estimere hvor der er opnået steady-state under de to testforløb, der samlet varede ca. 6 timer.

Det ses, at der er tegn på naturlig nedbrydning i testområdet ( $O_2$  og  $CO_2$  er ca. 4 % til  $t=0$ ). Baggrunds-PID er  $< 0,1$  ppm. Så sættes den aerobe testdel i gang (TVOC i atm. luft nedblæses i P1) og det ses, at iltkoncentrationen i P2 stiger, mens  $CO_2$  falder. Jordmatricen gøres aerob og  $CO_2$  "skylles" langsomt ud (den er i en træg ligevægt med porevandet). Den  $CO_2$  der dannes ved aerob nedbrydning bliver overdøvet af det massive input af ilt via indløbsgassen, så der ikke observeres en netto-stigning i  $CO_2$  i P2. Imens stiger PID og bliver ca. konstant, hvor der udtages en kulrørsprøve til akkrediteret analyse ( $C_{ud,aerob}$ ); efterfølgende er steady-state PID approximeret at være ca. 8 % højere end tidspunktet for kulrørsprøven.

Ved den anaerobe testdel (TVOC i kvælstof nedblæses i P1) falder  $O_2$  og  $CO_2$  i P2. Imens vokser PID op til et nyt niveau, hvor der er ligevægt imellem den mængde TVOC der tilføres, diffunderer ud af testvoluminet og suges op i P2. Der udtages en kulrørsprøve til analyse. Også her er det "sande" steady-state niveau approximeret (+ 4 %).

Ud fra de approximerede steady-state niveauer og –tidspunkter burde det samlede testforløb nok have løbet over 10 timer (300 min for både den aerobe og anaerobe del). På baggrund af de approximerede PID-niveauer for steady-state og TVOC-indholdet i de udtagne kulrørsprøver er  $C_{ud,aerob}$  og  $C_{ud,anaerob}$  estimeret til hhv. 260 og 360 mg TVOC/m<sup>3</sup>.

I henhold til ligning 3 kan det aerobe in-situ massetab til nedbrydning under de givne betingelser ( $C = 2.000$  mg TVOC/m<sup>3</sup> og  $Q = 1,44$  m<sup>3</sup>/dag) estimeres til 144 mg TVOC/dag. Efterfølgende er der lavet en orienterende PID-afgrænsning af det aktiverede jordvolumen til ca. 0,5 m<sup>3</sup> (0,8 · 0,8 · 0,8 m), svarende til 800 kg TS ved en volumenvægt på 1.600 kg TS/m<sup>3</sup>, som er benyttet til at beregne et groft estimat på en 0.ordensrate = 0,18 mg TVOC/kg TS/dag, hvilket ligger på et realistisk niveau ift. TVOC-rater fra litteraturen.

## 6. KONKLUSION OG PERSPEKTIVER

Der er gennemført et pilotforsøg til afprøvning af en ny test – Dual Point Degradation test – til dokumentation og kvantificering af in-situ nedbrydning af oliekulbrinter i jordens umættede zone. Metoden vurderes at have potentiale ift. kvalitativ og kvantitativ dokumentation af nedbrydning i forbindelse med risikovurderinger med JAGG 2.0.

I forhold til den gennemførte pilottest er der dog en række punkter som kræver yderligere undersøgelser før testen kan anvendes rutinemæssigt, ligesom en række forbedringer ville styrke testen. Her nævnes blot et par af perspektiverne for det videre arbejde:

- Forbedring af følsomheden i rateestimatet ved optimering af mass-recovery i P2 ved at ændre på de forskellige driftsparametre: X, Z, Q og huller i spyddene.
- Muligheden for at købe specialgasser i henhold til nøjagtige specifikationer for gas-sens indholdskomponenter (kulbrintekomponenter, C<sub>0</sub> og O<sub>2</sub>-niveau).
- Muligheden for at estimere 1.ordens nedbrydningsrater vha. en modellering af flowfelt og de indgående processer (gasflow, opløsning, adsorption og nedbrydning).
- Anvendelse af stabile isotoper (<sup>13</sup>C og <sup>2</sup>H) til yderligere dokumentation/kvantificering af nedbrydningsrater.

## 7. REFERENCER

- /1/ Opgradering af JAGG til version 2.0 Vertikal transport ned til førstkomende betydende magasin. Christensen, A.G., P.J. Binning, M. Trolborg, P. Kjeldsen, M. Broholm. Udkast til Miljøprojekt 2007. Miljøstyrelsen.
- /2/ Litteraturgennemgang af strategier til dokumentation af nedbrydning af oliestoffer i den umættede zone. Muchitsch, N., A.G. Christensen og P. Loll. Udkast til Miljøprojekt 2010. Miljøstyrelsen.
- /3/ Hvad med nedbrydning i JAGG 2.0? P. Loll, N. Muchitsch og A.G. Christensen. 2010. Skriftligt indlæg på ATV-mødet: JAGG med "face lift" og større motor.
- /4/ Erfaringsopsamling på udviklingen i poreluftkoncentrationer på villatanksager. P. Larsen, P. Loll og C. Larsen. Miljøprojekt nr. 1310, 2009. Miljøstyrelsen.
- /5/ Soil Column Method for Examination of Volatile Organic Chemical Diffusion and Degradation in the Unsaturated Zone. A.H. Kristensen. M.Sc. Eng. Final Thesis, Section of Environmental Engineering, June 2006. Aalborg University.
- /6/ Nedbrydning og transport af MTBE i jordens umættede zone. D. Nørgaard. Afgangprojekt ved Civilingeniøruddannelsen. Sektion for Miljøteknologi. Juni 2007. Aalborg Universitet.
- /7/ MTBE-nedbrydning i jordens umættede zone. P. Loll, C. Larsen, K. Henriksen og D. Nørgaard. ATV Vintermøde, s.15-26, 2008.
- /8/ Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective. Atlas. R.M. Microbiological reviews. 45(1), 180-209, 1981.