

# **HVAD MED NEDBRYDNING I JAGG 2.0?**

**Per Loll, Ph.D., udviklingsleder, DMR A/S**  
**Nanna Muchitsch, civilingeniør, NIRAS**  
**Anders G. Christensen, Ekspertisechef, NIRAS**

## 1. RESUMÉ

Med JAGG 2.0 er der nu mulighed for at foretage risikovurderinger ifht. grundvandet, hvori der som en integreret del af beregningen fra en kilde, beliggende i den umættede zone, kan udføres en beregning af transporttiden/-dynamikken og nedbrydningen imens forureningen udvaskes/transporteres mod grundvandet, jf. /1/.

For således at imødegå behovet for at medtage nedbrydningen i risikovurderinger for grundvandet, når kilden er beliggende i den umættede zone, har Miljøstyrelsen igangsat et Teknologiprojekt for, at belyse hvilke feltstrategier der findes med henblik på at dokumentere nedbrydning i den umættede zone; dels kvalitativt og dels kvantitativt /2/.

Projektet, der gennemføres i samarbejde imellem NIRAS og DMR, er en gennemgang af tilgængelig litteratur og fokuserer på strategier, der kan benyttes til at dokumentere nedbrydning af oliestoffer i den umættede zone. På baggrund af litteraturstudiet er der i projektet angivet anbefalinger til afprøvning og implementering af metoder/procedurer/måleprogrammer i en dansk risikovurderingskontekst, herunder specielt ifht. anvendelsen af JAGG 2.0.

## 2. INDLEDNING

### 2.1 Baggrund

I JAGG 1.5 (grundvandsmodul) 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 (hhv. i jordforureningen og imellem jordforureningen og grundvandet) 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 for benzin- og oliestoffer, idet risikovurderingen anbefales opdelt i tre faser. Herunder er der i fase 2 og 3 mulighed for at inddrage nedbrydning mens transporten mod førstkomende grundvandsmagasin foregår.

Beregningen under fase 2 foretages under forudsætning af, at der foregår en 1. ordens nedbrydning, og der vælges en konservativ nedbrydningsrate (dvs. en forholdsvist lav rate), baseret på raterne fra et omfattende litteraturstudium udført i forbindelse med opdateringen af JAGG. Ved anvendelse af fase 3 – dvs. i det tilfælde, hvor risikovurderingen ikke baseres på en konservativ nedbrydningsrate fra litteraturen – skal der endvidere tilvejebringes data, der tillader estimering af en lokalitetsspecifik nedbrydningsrate. Dette er der redegjort for i en særskilt artikel/præsentation samt i /1/.

Ifht. anvendelse af konceptet opstillet i JAGG 2.0 er det dog væsentligt, at der ikke pt. foreligger direkte anvendelige strategier til dokumentation af nedbrydningen på en given lokalitet (fase 2 og 3), eller metoder der kan bringes i anvendelse ifht. en kvantificering af aktuelle nedbrydningsrater på en given lokalitet (fase 3).

## 2.2 Formål

Det overordnede formål med projektet er, på baggrund af et litteraturstudium, at beskrive hvilke strategier der findes til at dokumentere og kvantificere naturlig nedbrydning af oliestoffer i jordens umættede zone. Der fokuseres primært på strategier til dokumentation af opløst/gasformig forurening; dvs. at fokus ligger på den zone, der befinder sig imellem et decideret hot-spot og en given receptor – her det førstkommande grundvandsmagasin.

Projektet har desuden til formål at belyse, hvorvidt der er grundlag for en opdatering af de nedbrydningsrater, der er fundet i litteraturen i forbindelse med opdateringen af JAGG til version 2.0, herunder specielt med hensyn til udskillelse af nedbrydningsrater for benzen.

På baggrund af litteraturstudiet kommer med anbefalinger til afprøvning og implementering af metoder/procedurer/måleprogrammer i en dansk risikovurderingskontekst, herunder ifht. anvendelsen af JAGG 2.0.

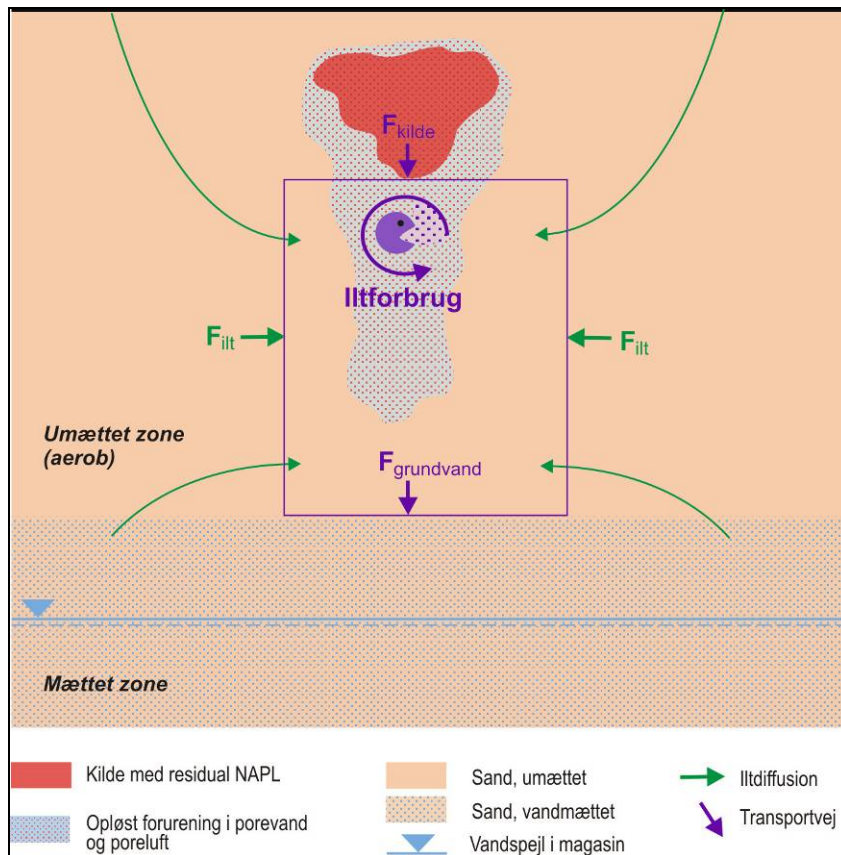
Perspektiverne for projektet er, at der foretages en afprøvning af de metoder, der anbefales; herunder kan der blive tale om at foretage en laboratorie- og/eller feltafprøvning af identificerede metoder til estimering af in-situ nedbrydningsrater i den umættede zone.

## 2.3 Problemafgrænsning ifht. JAGG 2.0

I JAGG 2.0 åbnes der op for at gennemføre risikovurderinger for grundvandet, hvor tidsperspektivet for transport igennem den umættede zone inddrages og hvor de processer der foregår under transporten (adsorption, diffusion, dispersion og nedbrydning) inddrages i vurderingen. Med tilføjelse af nedbrydningen i risikovurderingskonceptet vil den umættede zone – under givne betingelser – kunne fungere som en afskærende eller risikoreducerende faktor, som det ikke er/var muligt at inddrage i JAGG 1.5.

I JAGG 2.0 er der mulighed for at gennemføre beregninger under fire forskellige konceptuelle hydrogeologiske scenarier for vertikal transport mod det førstkommande grundvandsmagasin. Herunder er de to første (Model A og B) rettet imod anvendelse under mættede forhold, hhv. uden og med sprækker, mens Model C og D inkluderer elementer af umættet zone transport; hhv. vertikalt igennem en homogen umættet zone, og horisontalt i en homogen umættet zone, der overlejres af en mættet/impermeabel zone (et låg). Det matematiske udtryk der er lagt op til at benytte til analyse af Model D, giver dog ikke mulighed for at inkludere effekten af nedbrydning.

Nærværende projekt er rettet imod anvendelse ifht. Model C med vertikal transport igennem en homogen umættet zone med nedbrydning, jf. figur 1, og fokus for projektet er, at undersøge strategier/metoder, der kan anvendes til dokumentation af nedbrydning og/eller bestemmelse af nedbrydningsrater i den umættede zone i området imellem jordforureningen/kilden og receptoren (her det førstkommande grundvandsmagasin), og ikke ifht. en oprensning eller -kildereduktion.



**Figur 1:** Den umættede zone inddrages i JAGG 2.0, som en mulig afskærende eller risikoreducerende zone.

I forhold til anvendelse af både fase 2 og 3 i JAGG 2.0, er det essentielt, at der foretages en grundig monitoring, og at resultaterne af denne dokumenterer nedbrydningen på tre planer:

- i) Antagelsen om at der foregår en nedbrydning i den umættede zone under kilden underbygges (smoking guns).
- ii) Det dokumenteres, at forureningen ikke spredes uhensigtsmæssigt; altså at der er "balance" imellem kildestyrken og nedbrydningen i den afskærende zone imellem forureningens bund og grundvandet. Sagt med andre ord skal det dokumenteres, at nedbrydningen er tilstrækkelig til at holde forureningsspredningen i ave (uden at det dog er nødvendigt at bestemme en decideret nedbrydningsrate).
- iii) Slutteligt dokumenteres/sandsynliggøres det, at der – over tid – kan opretholdes en tilstrækkelig nedbrydning til at sikre den fornødne risikoreduktion indenfor kildens forventede levetid; altså, at der ikke blot er en tilstrækkelig nedbrydningskapacitet de næste 5 år, mens kildens levetid forventes at være 50 år.

Anbefalinger til essentielle elementer i at foretage denne dokumentation er opstillet i projektet, ligesom det er anbefalet, at foretage en konkret afprøvning af de forskellige delelementer på danske feltlokaliteter.

### 3. STRATEGIER TIL FASTLÆGGELSE AF NEDBRYDNINGSRATER

Der er i januar 2010 foretaget en omfattende indsamling af åben litteratur omkring strategier til vurdering/estimering af nedbrydning i den umættede zone. Der er fokuseret på strategier og metoder der *har* været bragt i anvendelse (f.eks. i udlandet) og metoder, hvor en anvendelse vurderes at være nært forestående, eller metoder der vurderes at kunne bringes i anvendelse med et (begrænset) teknologiløft.

De identificerede overordnede strategier/metoder til dokumentation af nedbrydning af olie-stoffer i den umættede zone, eller som kan benyttes til en decideret estimering af nedbrydningsrater, er:

- Indirekte kvantitative metoder (VOC, ilt og kuldioxid).
- Fanemodellering i umættet zone (1D, 2D og 3D).
- Isotopteknikker i gasfasen.
- Gas fase push-pull test.
- Diffusiv emitter test.
- Kildestyrkekarakterisering og –dokumentation.

I projektet er hver strategi/metode beskrevet på et niveau, hvor teknologien anvendes til at danne et øjebliksbillede af nedbrydningsforholdene, mens betragtninger omkring den forventede ”langtidsholdbarhed” af nedbrydningen ifht. den forventede kildestyrke er diskuteret i kapitel 4. For hver strategi/metode beskrives strategiens hovedelementer, fordele og ulemper (i den danske risikovurderingskontekst), usikkerheder og fejlkilder samt den relative økonomiske byrde, der er ved anvendelse af strategien.

Nogle af de sammenfattende hovedkonklusioner er gengivet i nedenstående tabel.

Strategi	Forureningskomponent	Teknologistadium	Økonomi	Anvendelighed
Indirekte kvantitative metoder	TVOC	Velkendt teknologi. Målemetoder kan belyses nærmere	Fase 2, 25-75.000,- Fase 3, 75-750.000,-	Simpel metode og udbredte prøvetagningsmetoder
Fanemodellering i umættet zone	Enkeltstoffer stofgrupper	1D er afprøvet på mange lokaliteter. 2D og 3D er primært brugt ifbm. forskningsprojekter	1D: 25-100.000,- 2D: 75-250.000,- 3D: 250.000-???,-	1D: Relativ simpel 2D og 3D: Komplicerede
Isotopteknikker	Enkeltstoffer (op til C10)	Ikke udbredt teknologi under umættede forhold. Isotopfraktionering af H er under udvikling	1.000-2.000,- pr. poreluftprøve	Simpel prøvetagningsmetode Teknologien udføres kun af få kommercielle lab. i udlandet
Gas fase push-pull tests	Enkeltstoffer	Ikke afprøvet på olie- og benzinkomponenter. Kræver udvikling og afprøvning	75-350.000,- (estimat)	Udførelse relativ simpel, men kræver dyrt/kompliceret udstyr
Diffusiv emitter test	Enkeltstoffer	Ikke afprøvet på olie-/ benzinkomponenter. Kræver udvikling og afprøvning	75-350.000,- (estimat)	Udførelse relativ simpel, men kræver dyrt/kompliceret udstyr
Kildestyrkekarakterisering (porevand og poreluft)	Enkeltstoffer stofgrupper	Afprøvet i feltet for olie- og benzinkomponenter samt andre organiske stoffer (AMETIS-systemet)	400-800.000,- (estimat)	Installation ved standard boremetoder. Prøvetagning fra installation relativ simpel
Kildestyrkekarakterisering (jordprøver)	Enkeltstoffer stofgrupper	Velkendt teknologi	Afhænger af områdets størrelse og homogenitet	Simpel metode. Begrænset af forureningens heterogenitet Destruktiv prøvetagning

## 4. DOKUMENTATION AF NEDBRYDNINGEN OVER TID

Balancen imellem kildestyrke og nedbrydning *til et givent tidspunkt* kan i princippet dokumenteres og vurderes på baggrund af anvendelse af en kombination af én af metoderne til kildestyrkekokarakterisering og én eller flere af de øvrige metoder i afsnit 3. Resultaterne af sådanne undersøgelser kan dermed danne grundlag for udarbejdelse af en risikovurdering på undersøgelsestidspunktet, og der tilbagestår en opgave med at dokumentere/sandsynliggøre, at resultatet af risikovurderingen holder fremadrettet i tiden. Overvejelser som bør indgå i en sådan vurdering skal, ifht. situationen på figur 1, inkludere følgende elementer, som er behandlet i særskilte afsnit i rapporten:

- Forståelsesramme og konceptuel model.
- Kildens henfaldsdynamik og forventede levetid.
- Tidlig udvikling i balancen mellem kildestyrke og nedbrydning.
- Overordnet massebalancer for ilt, N og P.
- Dokumentation/monitoring.

I det følgende er blot refereret hovedelementer indenfor hver overskrift.

### 4.1 Forståelsesramme og konceptuel model

Det er helt basalt for et tilfredsstillende resultat af opgaveløsningen, at der opstilles en fælles forståelse af den problemstilling der behandles (imellem kunde, udøvende parter og myndigheder), og at alle delaspekter af opgaven relateres til denne fælles forståelsesramme. Dette gøres lettest ved opstilling af en konceptuel model – og det er vigtigt, at denne model løbende revideres og formidles imellem sagens parter, efterhånden som der løbende kommer nye oplysninger og resultater til igennem opgavens løsning.

### 4.2 Kildens henfaldsdynamik og forventede levetid

Som udgangspunkt for en fremadrettet risikovurdering er det essentielt, at man får et håndtag på hvor længe det kan forventes, at en given kilde påvirker den umættede zone under forureningen. Et basalt bidrag til denne viden kan vi få dels ved at gennemføre modelberegninger, svarende til Model C i JAGG 2.0, der giver os en fornemmelse af dynamikken i den nedadrettede transporttid fra kilden til grundvandsspejlet; altså om der er 1 eller 100 år til forureningen når grundvandet.

Dertil er det nødvendigt, at estimere kildestyrken, altså den årlige flux af forureningskomponenter der forlader kilden ( $F_{\text{kilde}}$  på figur 1), f.eks. vejledning nr. 6 og 7, 1998. En balance imellem kildestyrken og den estimerede samlede forureningsmasse i kilden kan give os et indledende bud på kildens forventede levetid. I den forbindelse er det dog vigtigt, at afdampningen til atmosfæren, især af de mest flygtige stoffer og især det første år efter spildet, kan være ganske betydelig og principielt bør medregnes. Dette er dog ikke en triviell øvelse, og medregnes afdampningen til atmosfæren ikke, opnås under alle omstændigheder et konservativt bud på kildens forventede levetid.

Den aktuelle kildestyrke vil være afhængig af dels kildens alder, olietyper, nedsivningens størrelse, kildens arealmæssige udbredelse og jordarterne. Denne anskuelse er især vigtig at

holde sig for øje når vi taler om benzin- og olieforureninger, hvor der sker en relativt hurtig fjernelse af lettere, mere flygtige og opløselige komponenter fra kilden, mens fjernelsen af relativt tungere komponenter kan gå væsentligt langsommere. Dette fører til en præferentiel ”tømning” af kilden for successivt tungere komponenter, som dels skyldes afdampning, herunder til atmosfæren, og dels igennem opløsning i det nedsivende vand – og evt. igennem biologisk nedbrydning i selve kilden.

Efterhånden som de lettere komponenter forsvinder fra kilden, vil kildestyrken af totalkulbrinter; dvs. fluxen til zonen imellem kilden og grundvandet ( $F_{\text{kilde}}$  i figur 1), blive mindre. Samtidig med at den bliver mindre, vil sammensætningen gå mod tungere og tungere komponenter, der alt andet lige, nedbrydes langsommere – men som også bevæger sig langsommere, og dermed opholder sig i zonen/kontrolboksen i længere tid (hvormed nedbrydningen har længere tid til at virke).

Et samlet overblik over kildens henfald, og ændring i sammensætning over tid, kan opnås ved udførelse af kildekarakterisering ved udtagning af jordprøver til forskellige tidspunkter, mens betydningen for kildestyrken evt. kan vurderes ved direkte udtagning af porevandsprøver fra den umættede zone under kilden og/eller poreluftprøver til analyse for indhold af oliestoffer.

### **4.3 Tidslig udvikling i balancen mellem kildestyrke og nedbrydning**

I et fremadrettet perspektiv er det, ikke i sig selv, afgørende for udfaldet af en risikovurdering, om nedbrydningen i zonen imellem bunden af kilden og grundvandsmagasinet har en given størrelse. Dette skyldes, at der kan opnås samme grad af risikoreduktion ved en forholdsvis stor nedbrydningsaktivitet og en given (stor) kildestyrke, som ved en mindre nedbrydningsaktivitet og en tilsvarende mindre kildestyrke. Det er således den tidslige balance imellem kildestyrken ( $F_{\text{kilde}}$ ) og nedbrydningen (illustreret ved den lille Pacman i midten af forureningsfalten under kilden), der er afgørende, jf. figur 1.

Moniteringsprogrammet bør derfor omfatte data, der kan illustrere den tidslige udvikling i balancen imellem kildestyrken og nedbrydningen i den umættede zone, jf. afsnit 4.4. En indikator på status for denne balance kan opnås via monitoring af udviklingen i VOC-koncentrationen samt ilt og  $\text{CO}_2$  i og omkring nedsivningszonen under kilden; specielt når den første meget dynamiske periode efter spildet er overstået.

### **4.4 Overordnede massebalancer for ilt, N og P**

Det biologiske system der findes mellem undersiden af kilden og det underliggende grundvand er et dynamisk system, omfattende en kobling mellem fysiske, kemiske og biologiske processer. De biologiske processer er meget afhængige af tilgangen til bl.a. vand, næringsstoffer (N og P), ilt samt kulstofkilde (opløste forureningskomponenter).

Med hensyn til at dokumentere, at balancen imellem kildestyrke og nedbrydning kan oprettholdes fremadrettet bør det overordnet dokumenteres, at forudsætningerne for biologisk nedbrydning kan forventes at holde over en tidsperiode, der principielt svarer til kildens levetid; dog under hensyntagen til kildens henfaldsdynamik, jf. afsnit 4.1.

Antages en udvaskning af oliestoffer (kildestyrken,  $F_{\text{kilde}}$ ) fra en kilde af dieselolie på ca. 50 g/år (svarende til nedsivning 500 mm/år, areal 10 m<sup>2</sup>, opløst koncentration 10 mg/l) medfører det et årligt iltforbrug på ca. 150 gram ilt (aerob omsætning sker ved ca. forholdet 1:3 mellem ilt og kulbrinter). Betragtes en dybde eller reaktionslængde på blot f.eks. 1 m under kilden under arealet på 10 m<sup>2</sup>, findes der initialt et iltindhold på ca. 1.000 g (svarende til et iltindhold i poreluften på 0,28 kg-O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> eller ca. 21 vol. %). Der er således mere end 6 gange den iltmængde tilstede, som vil blive forbrugt pr. år, og således principielt nok ilt til at opretholde nedbrydningen i mere end 6 år – Dertil kommer et væsentligt bidrag af ilt via diffusion ind fra siden, som vist på figur 1. Den samlede udvaskning af olie over disse 6 år vil dog kun have medført en samlet udvaskning på 300 g olie.

Umiddelbart efter et spill vil det normalt fuldt aerobe miljø begynde at blive drænet for ilt i takt med at den biologiske omsætning kommer i gang. Dette vil give anledning til en stigende flux af ilt fra den omkringliggende jordmatrice og ind i det jordvolumen hvor den opløste forurening spredes. For rimeligt permeable jorder vil nettofluxen af ilt ind i det forurenede volumen være tilstrækkelig til at der ikke opstår anaerobe forhold. Herved er en af de vigtigste forudsætninger for en langtidsholdbar og stabil nedbrydning opfyldt.

Som en tommelfingerregel kan der regnes med et nødvendigt forhold imellem C, N og P på ca. 100:10:1 ved aerob heterotrof mikrobiel omsætning af benzin- og oliekomponenter. Altså for hver 100 gram olie, der skal nedbrydes (ca. 2 års nedsivning i ovennævnte forureningsscenario), skal der tilføres i størrelsesordenen 10 gram N og 1 gram P.

I den umættede zone, under topjorden, er indholdet af næringssalte måske i størrelsesordenen 1-15 mg uorganisk-N/kg TS og 0,02-1,9 mg ortho-P/kg TS /3/. Disse indhold svarer til, at det naturlige indhold af N og P i den øverste meter af den umættede zone under ovennævnte hypotetiske kilde (10 m<sup>2</sup>) vil indeholde omkring 20-250 g N og 0,34-36 g P. Med et masseforhold for C:N:P på 100:10:1, svarer disse indhold af N og P til nedbrydning af mellem 200 og 2.500 gram nedsivende olie (for N) og mellem 34 og 3.600 gram nedsivende olie (for P).

Ovenstående estimer er dog meget usikre at udtale sig generelt på baggrund af da der ikke foreligger megen viden om indholdet af hhv. uorganisk N og tilgængeligt P i dybereliggende umættede zoner. En aktuel vurdering bør således bero på lokalitetsspecifikke data.

#### **4.5 Dokumentation/monitoring**

Som det fremgår af ovenstående bør dokumentationen i forbindelse med en risikovurdering for den umættede zone, hvori der inddrages nedbrydning i zonen under kilden, baseres på elementer, der indeholder betragtninger omkring:

- Kilstørrelse og –udbredelse.
- Kildens forventede levetid.
- Kildens sammensætning (over tid).
- Kilstyrken (over tid).
- Nedbrydningskapaciteten/-raten (over tid).
- Forudsætningerne for nedbrydning (ilt, N og P).



Det aktuelle monitoringsprogram og den nødvendige monitoringsfrekvens og -periode vil afhænge af en række lokalitetsspecifikke forhold, men vil som minimum skulle indeholde en dokumentation der, rent tidsmæssigt, går ud over den indledende forholdsvist hurtige udvaskning af letopløselige komponenter og afdampning af flygtige komponenter. Efter denne indledende periode (måske de første par år) er det projektgruppens opfattelse, at en kvalitativ eller kvantitativ dokumentation af nedbrydningen primært kan kombineres med en efterfølgende monitoring af – og dokumentation for – at der er opnået stationære forhold hvad angår oliekomponenter, ilt og CO<sub>2</sub> i og omkring nedsivningszonen.

Grundet en aftagende kildestyrke (bør dokumenteres i det enkelte tilfælde) er der således ringe risiko for at kildestyrken vil blive større med tiden, med mindre arealanvendelsen går fra impermeabel overflade til permeabel overflade eller lignende. Hvis det således dokumenteres, at der er indtrådt stationære forhold, og at der er basis for en fortsættelse af den biologiske nedbrydning (jf. afsnit 4.3) vil nedbrydningen med stor sandsynlighed kunne fortsætte og forureningen vil derfor ikke spredes uacceptabelt.

En dokumentation af stationaritet kan opnås ved at monitorere igennem en længere periode. Monitoringsresultaterne vil sandsynligvis variere gennem monitoringsperioden grundet naturlige tidlige variationer, men hvis resultaterne overordnet viser stabile forhold er der grundlag for at vurdere, om dette vil fortsætte fremadrettet.

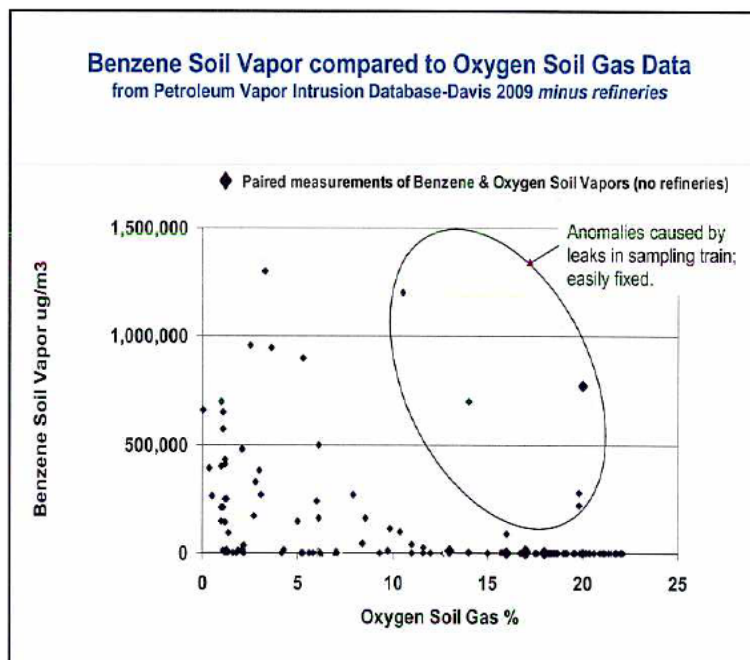
Monitoringsperiodens længde vil blandt andet afhænge af forureningens alder – og estimerer over dynamikken i forureningsudvaskningen og en forventet kildelevetid.

## **5. NEDBRDNINGSRATER FOR BENZEN**

I forbindelse med udvikling af et paradigme for hvordan indeklimaproblemer på NAPL-grunde kan vurderes, er der af en arbejdsgruppe ledet af US-EPA sammenstillet vertikale poreluftprofiler, hvor både kulbrinter/BTEX og ilt/kuldioxid er målt i en eller flere målerunder. På baggrund af den samlede database er der gennemført en udvælgelse af i alt 45 vertikale profiler fra 17 forskellige grunde. De vertikale profiler for benzen er tilpasset en 1. ordens nedbrydningsrate ved hjælp af en numerisk model.

På baggrund af sandsynlighedsfordelingen for de bestemte 1. ordens porevandsbaserede rater er medianværdien for 1. ordensraten bestemt til 0,09 time<sup>-1</sup> eller 2,4 d<sup>-1</sup>. Medianværdien for gruppen af BTEX i det tidligere Shell-studie refereret i /1/ var 6,8 d<sup>-1</sup>, og der er således konsistens mellem de to datasæt. De laveste rater for benzen, udtrykt ved hhv. 1 og 5 % fraktilen, er 0,019 d<sup>-1</sup> hhv. 0,025 d<sup>-1</sup>.

På baggrund af de anvendte jordtyper, er det konkluderet at raterne øges når jordens permeabilitet øges og når kildestyrken reduceres, dvs. når balancen imellem kildestyrke/stoftilførsel og ilttilførsel/elektronacceptor rykkes mod højere ilt:VOC-forhold. Disse forhold indikerer således, at den biologiske nedbrydning er styret af tilstedeværelse af ilt i jorden, hvilket tydeligt fremgår af figur 2, der viser den målte sammenhæng mellem benzen og ilt i de poreluftprøver hvorpå raterne er bestemt.



**Figur 2:** Sammenhæng mellem indholdet af benzen og ilt i poreluften for de punkter der er anvendt til beregning af nedbrydningsraten for benzen i vandfasen ( $k_w$ ) /4/.

## 6. ANBEFALINGER

I projektet er der opstillet anbefalinger til en række punkter der bør arbejdes videre med, med henblik på at forbedre de værktøjer og den viden, der i praksis anvendes ved risikovurderinger vha. det ny JAGG 2.0. Det anbefales således bl.a. at der arbejdes videre med at fremskaffe erfaringstal for N og P i den dybere umættede zone under danske forhold, samt at arbejde hen imod en afprøvning af stabile isotoper (C og H) på én eller to danske feltlokaliteter. Endelig er der identificeret en nyudviklet teknologi (AMETIS-systemet fra Israel), som kan benyttes til at udtage såvel vand- som poreluftprøver fra et profil direkte fra den umættede zone under f.eks. et kildeområde. Dette system anbefales afprøvet under danske forhold.

## 7. REFERENCER

- /1/ Christensen A.G., Binning P.J., Trolborg M., Kjeldsen P., Broholm M. *Opgradering af JAGG til version 2.0 Vertikal transport ned til førstkomende betydende magasin. 2007. Miljøstyrelsen.*
- /2/ Muchitsch, N., A.G. Christensen og P. Loll. *Litteraturgennemgang af strategier til dokumentation af nedbrydning af oliestoffer i den umættede zone. Udkast til Miljøprojekt, marts 2010.*
- /3/ Loll P, Nørsgaard D, Henriksen K, Larsen C. *MTBE biodegradation in the vadose zone. In Situ and On-Site Bioremediation. Proceedings of the Ninth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium Baltimore, Maryland; May 7-10, 2007.*
- /4/ Lahvis M.A. *Evaluation of 1st-order biodegradation rates of benzene for VI risk assessment at petroleum-hydrocarbon sites. Pamphlet*